

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica



Progetto di un impianto elettrico ospedaliero: studio di fattibilità di una distribuzione in corrente continua per l'alimentazione di luci a LED e impiego di supercondensatori come dispositivi di peak shaving

Relatore: Prof. Enrico TIRONI

Co-relatore: Ing. Claudio PAGANI

Tesi di Laurea Magistrale di:

Emanuele PETA Matr. 804803

Anno Accademico 2014 - 2015

Dedico il mio lavoro a

Miriam

INDICE

INDICE DELLE FIGURE	Errore. Il segnalibro non è definito.
INDICE DELLE TABELLE	4
Sommario.....	6
Introduzione	8
1 - Impianti Elettrici nei Locali a uso Medico	10
1.1 Generalità.....	10
1.2 La zona Paziente	13
1.3 Il Rischio Elettrico.....	15
<i>1.3.1 Collegamento equipotenziale.....</i>	<i>17</i>
<i>1.3.2 Il sistema IT-M.....</i>	<i>19</i>
<i>1.3.3 Interruzione automatica dell'alimentazione</i>	<i>22</i>
<i>1.3.4 Protezione dalle sovracorrenti</i>	<i>24</i>
1.4 La Continuità.....	26
<i>1.4.1 L'Alimentazione di Sicurezza.....</i>	<i>27</i>
1.5 Le Sorgenti di Sicurezza.....	29
<i>1.5.1 Batterie di accumulatori</i>	<i>30</i>
<i>1.5.2 UPS.....</i>	<i>31</i>
<i>1.5.3 Gruppi elettrogeni.....</i>	<i>33</i>
2 - Cabina di Trasformazione MT/BT.....	35
2.1 Generalità.....	36
2.2 Esame della cabina di trasformazione MT/BT	41
<i>2.2.1 Analisi dei carichi.....</i>	<i>42</i>
<i>2.2.2 Scelta della configurazione di cabina.....</i>	<i>43</i>
<i>2.2.3 Calcoli di rete</i>	<i>58</i>

2.2.4 Tarature degli interruttori	67
2.2.5 Il locale cabina	79
3 - Progetto del Lato di Bassa Tensione	88
3.1 Quadro Generale di Bassa Tensione.....	100
3.2 Reparto Operatorio	114
3.2.1 Sala Operatoria	121
3.2.2 Locale Preparazione/Risveglio Pazienti.....	130
3.3 Reparto Degenze.....	133
3.3.1 Degenze.....	138
3.4 Reparto Diagnostica	145
3.4.1 Locale TAC	149
3.5 Scelta del Gruppo Elettrogeno.....	153
3.6 Scelta degli UPS	163
3.6.1 Criteri di dimensionamento	165
3.6.2 Comportamento in caso di guasto	170
4 – Impianto in Corrente Continua	176
4.1 Generalità sulla Corrente Continua	177
4.1.1 Interruzione della corrente continua	181
4.1.2 Tipi di rete in corrente continua	184
4.1.3 Gli interruttori in corrente continua.....	191
4.1.4 Dimensionamento dei cavi.....	193
4.2 Illuminazione a LED	195
4.2.1 Alimentazione dei LED in corrente alternata.....	196
4.2.2 Alimentazione dei LED in corrente continua.....	197
4.3 Camere di Degenza.....	200
4.3.1 Descrizione Generale.....	200
4.4 Fornitura in Corrente Continua.....	210
4.4.1 Linea di Alimentazione Esterna	212
4.4.2 Linee Dedicare per ogni Padiglione	221

4.4.3 Realizzazione di isole in corrente continua	229
4.4.4 Valutazione economica	238
4.5 Conclusioni.....	244
Conclusioni	276

INDICE DELLE FIGURE

Fig.1. 1: Zona paziente intorno al tavolo operatorio fisso.	13
Fig.1. 2: Zona paziente intorno al tavolo operatorio mobile.	14
Fig.1. 3: macroshock (sinistra) e microshock (destra).	16
Fig.1. 4: Collegamento al nodo equipotenziale tramite sub-nodo.	19
Fig.1. 5: Differenze tra guasto fuori dalla zona paziente (sinistra) e dentro (destra).	20
Fig.1. 6: 1) selettività totale 2) selettività parziale 3) selettività nulla.	23
Fig.1. 7: Alimentazione delle prese.	24
Fig.1. 8: Schema di un UPS.	32
Fig.2. 1: Esempio di cabina elettrica privata di trasformazione MT/BT.	37
Fig.2. 2: Guasto nel caso di trasformatori in parallelo.	39
Fig.2. 3: Layout Cabina MT/BT.	45
Fig.2. 4: Organizzazione dei carichi alla sbarra di BT.	46
Fig.2. 5: Layout della cabina nel caso di impiego di due trasformatori da 630 kVA.	48
Fig.2. 6: Layout della cabina nel caso di impiego di due trasformatori da 800 kVA.	50
Fig.2. 7: Layout della cabina di trasformazione MT/BT.	57
Fig.2. 8: Layout della rete considerata.	61
Fig.2. 9: Andamento della in-rush current di un circuito ohmico induttivo.	63
Fig.2. 10: Grafico per la verifica dei tempi dei dispositivi di protezione del trasformatore. ...	65
Fig.2. 11: Andamento della corrente di cortocircuito.	66
Fig.2. 12: Caratteristica di intervento del dispositivo generale di MT.	71
Fig.2. 13: Curva di intervento dell'interruttore MT di macchina.	73
Fig.2. 14: Caratteristiche di intervento della protezione BT del trasformatore.	75
Fig.2. 15: Distribuzione delle correnti in un trasformatore, in funzione del tipo di guasto.	77
Fig.2. 16: Curve di selettività.	79
Fig.2. 17: Configurazione dei locali della cabina MT/BT.	80
Fig.2. 18: Distribuzione delle correnti di guasto.	85
Fig.3. 1: Condizione $I_b \leq I_n \leq I_z$	94
Fig.3. 2: Caratteristica energetica dell'interruttore e del cavo.	98
Fig.3. 3: Forme di segregazione di tipo 4a e 4b.	104
Fig.3. 4: Fronte quadro Power Center.	104
Fig.3. 5: Grafico per la determinazione del valore del coefficiente k.	108
Fig.3. 6: Grafico per la determinazione del coefficiente c.	109
Fig.3. 7: Schema linee principali.	111
Fig.3. 8: Curva interruttore NSX 250 B.	117
Fig.3. 9: Fronte quadro QRO.	119
Fig.3. 10: Schema linee principali 2.	120
Fig.3. 11: Curva caratteristica interruttore magnetotermico C40a e iC60H.	126
Fig.3. 12: Caratteristiche dell'interruttore del sistema IT-M generale di sala operatoria.	127
Fig.3. 13: Fronte quadro QSO.	128

Fig.3. 14: Caratteristica NSX 250 B con soglia magnetica ritardata	129
Fig.3. 15: Caratteristiche degli interruttori in cascata per la sala operatoria.....	129
Fig.3. 16: Curve degli interruttori senza intersezioni tra le caratteristiche di intervento.	130
Fig.3. 17: Fronte quadro QPRP.....	131
Fig.3. 18: Livelli di selettività dal QRO ai carichi alimentati dal QPRP.	132
Fig.3. 19: Curva interruttore NSX 250 E	135
Fig.3. 20: Fronte quadro QRD.	136
Fig.3. 21: Schema linee principali 3.....	137
Fig.3. 22: Curva intervento interruttore iC 60 N.....	139
Fig.3. 23: Fronte quadro QDP1.....	139
Fig.3. 24: Curva intervento interruttore C 40 N.	141
Fig.3. 25: Schema linee principali 4.....	141
Fig.3. 26: Fronte quadro camera di degenza.	142
Fig.3. 27: Curve di selettività relative ai quadri del reparto degenze.....	143
Fig.3. 28: Curve selettività degli interruttori.....	144
Fig.3. 29: Curva interruttore NS 250 B.	147
Fig.3. 30: Fronte quadro QRDG.....	147
Fig.3. 31: Schema linee principali 5.....	148
Fig.3. 32: Caratteristica interruttore C 120 N.....	151
Fig.3. 33: Fronte quadro QTAC.	151
Fig.3. 34: Curve di selettività del reparto Diagnosi	152
Fig.3. 35: Andamento corrente di cortocircuito per guasto ai morsetti di un alternatore.	154
Fig.3. 36: Caratteristica d'intervento dell'interruttore a valle del gruppo elettrogeno.....	158
Fig.3. 37 : Selettività tra interruttore del gruppo elettrogeno e del reparto diagnostica.....	159
Fig.3. 38:Schema complessivo della sbarra BT	161
Fig.3. 39:Schema completo di un UPS.	163
Fig.3. 40:Esempi di guasto a valle di una linea alimentata da UPS.....	171
Fig.3. 41: (a): UPS con neutro passante. (b): UPS con neutro isolato.	172
Fig.4. 1: Generazione di energia mediante impianto fotovoltaico.	178
Fig.4. 2: Generazione mediante fotovoltaico e allaccio dei carichi in corrente continua.	179
Fig.4. 3: Tipico circuito R-L con alimentazione in continua alla tensione U.	181
Fig.4. 4:Andamento della corrente di cortocircuito in un sistema a corrente continua.....	183
Fig.4. 5: Andamento della corrente di cortocircuito e della tensione d'arco.....	184
Fig.4. 6: Possibili configurazioni delle reti	185
Fig.4. 7: Esempio di guasto tra due poli su una rete isolata.	186
Fig.4. 8: Guasto verso terra su una rete isolata..	186
Fig.4. 9: Doppio guasto, rete isolata.....	188
Fig.4. 10: Guasto tra due poli su una rete con polo negativo connesso a terra.	188
Fig.4. 11: Guasto della polarità non connessa a terra.....	189
Fig.4. 12: Guasto sulla polarità connessa a terra.	189
Fig.4. 13: Guasto tra due conduttori.....	190
Fig.4. 14: Caso di guasto a terra.....	190
Fig.4. 15: Estratto di una tabella per la scelta dei dispositivi di protezione.....	192

Fig.4. 16: Interruttore con poli in serie e interruttore con i poli collegati in parallelo.....	192
Fig.4. 17: Caratteristica tensione corrente dei LED.	195
Fig.4. 18: Schema a blocchi dello stadio di alimentazione di una stringa di LED.	196
Fig.4. 19: Schema a blocchi alimentatore a LED con alimentazione in continua.....	197
Fig.4. 20:Schema alimentatore con tensione continua paragonabile a quella di stringa.....	198
Fig.4. 21: Planimetria di un piano del padiglione degenza.	201
Fig.4. 22: Camera di degenza.....	201
Fig.4. 23: Schema relativo ai carichi luce nella singola camera di degenza..	205
Fig.4. 24: Linee di collegamento dei carichi luce nella camera dei degenza.	205
Fig.4. 25: Percorso cavi nel caso di alimentazione mediante linea esterna in continua.....	210
Fig.4. 26: Percorso cavi nel caso di alimentazione mediante linee dedicate in continua.....	211
Fig.4. 27: Percorso cavi nel caso di alimentazione mediante isole in continua.	212
Fig.4. 28: Percorso cavi nel caso di linea EST ed OVEST.	215
Fig.4. 29: Esempio di guasto sulla linea generale esterna.....	218
Fig.4. 30: Esempio di alimentazione di una lampada attraverso due stadi di conversione	220
Fig.4. 31: Esempio di guasto nel caso di linee dedicate per ogni padiglione.....	222
Fig.4. 32: Scelta del numero di poli da impiegare nell'interruzione	226
Fig.4. 33: Presenza di più linee in partenza dal convertitore	228
Fig.4. 34: Caso isole in continua.	229
Fig.4. 35: Confronto tra uno e due stadi di conversione.	230
Fig.4. 36: La figura mostra il percorso cavi luci della camera di degenza.....	231
Fig.4. 37: Schema unifilare di una linea alimentante una degenza.	232
Fig.4. 38: Percorso cavi e organizzazione dei carichi luce nei corridoi.....	236
Fig.4. 39: Linee in partenza dal QDP1	237
Fig.4. 40: Dettaglio dei costi da in corrente alternata e continua.....	243
Fig.4. 41: Confronto tra soluzione in alternata ed in continua senza costo dei convertitori. .	245
Fig.5. 1: Assorbimento della RX dalla rete nel caso di singola radiografia.....	248
Fig.5. 2: Zoom relativo all'istante in cui si verifica l'assorbimento impulsivo.	249
Fig.5. 3: Altro esempio di assorbimento impulsivo nel caso di unico esame.	250
Fig.5. 4: Assorbimenti nel caso di esami effettuati in successione.	250
Fig.5. 5: Altro esempio di assorbimenti in caso di esami in successione.	251
Fig.5. 6: Assorbimento tipico della TAC.	252
Fig.5. 7: Secondo esempio di assorbimento di una TAC.	252
Fig.5. 8: Comportamento della TAC con assorbimenti continui in diversi istanti.....	253
Fig.5. 9: Modello di un condensatore a facce piane parallele.	255
Fig.5. 10: Modello del condensatore cilindrico.....	256
Fig.5. 11: Modello di Helmholtz.....	257
Fig.5. 12: Modello completo per lo studio del supercondensatore.	258
Fig.5. 13: Schema generale di un supercondensatore.	259
Fig.5. 14: Esempio di assorbimento impulsivo di potenza	262
Fig.5. 15: Schema unifilare linea L di alimentazione della macchina radiologica	265
Fig.5. 16: Schema di collegamento dei supercondensatori alla macchina radiologica	274

INDICE DELLE TABELLE

Tab.1. 1: Tempi d'intervento sistemi TN-S e IT.....	17
Tab.1. 2: Classificazione delle interruzioni in base alla durata.....	26
Tab.2. 1: Suddivisione dei carichi in base alle necessità di continuità dell'alimentazione.	42
Tab.2. 2: Utenze tipiche di un ospedale e relative classi di appartenenza.	43
Tab.2. 3: Costi apparecchiature elettriche per la soluzione 1.....	47
Tab.2. 4: Costo totale per la realizzazione della soluzione 1.	47
Tab.2. 5: Costo delle apparecchiature per la soluzione 2.....	49
Tab.2. 6: Costo totale per la realizzazione della soluzione 2.	50
Tab.2. 7: Costo delle apparecchiature per la soluzione 3.....	52
Tab.2. 8: Costo totale per la realizzazione della soluzione 3.	52
Tab.2. 9: Valori di corrente e tempi di intervento delle protezioni del Distributore.....	60
Tab.2. 10: Valori di k_i e $t_{in-rush}$ in funzione della taglia del trasformatore in resina.	64
Tab.2. 11: Caratteristiche e tarature della protezione MT generale a monte.	70
Tab.2. 12: Caratteristiche e tarature della protezione MT di macchina.	72
Tab.2. 13: Caratteristiche e tarature della protezione BT del trasformatore.	74
Tab.2. 14: Caratteristiche dei sezionatori.....	75
Tab.3. 1: Tabella coefficienti di contemporaneità e utilizzazione	90
Tab.3. 2: Fattore di superficie b a seconda del tipo di installazione.	106
Tab.3. 3: Fattore d per involucri senza aperture di ventilazione con $A_e \geq 1,25 \text{ m}^2$	107
Tab.3. 4: Tabella riepilogativa dei valori dell'espone x	107
Tab.3. 5: Tabella riepilogativa dei valori di A per il Power Center	109
Tab.3. 6: Tabella riepilogativa dei coefficienti di interesse per il Power Center.....	110
Tab.3. 7: Valori di sovratemperatura massima ammissibile.	111
Tab.3. 8: Caratteristiche elettriche delle linee in partenza dal Power Center	112
Tab.3. 9: valori di I_0 ammessi per interruttori con $I_n = 250 \text{ A}$	117
Tab.3. 10: Caratteristiche elettriche delle linee in partenza dal QRO.....	120
Tab.3. 11: Caratteristiche tecniche dei trasformatori di isolamento scelti.	124
Tab.3. 12: Valori di I_0 ammessi per interruttori con $I_n = 250 \text{ A}$	135
Tab.3. 13: Caratteristiche elettriche delle linee in partenza dal QRD.....	137
Tab.3. 14: Caratteristiche elettriche delle linee in partenza dal QDP1.	141
Tab.3. 15: Caratteristiche elettriche delle linee in partenza dal QRDG.....	148
Tab.3. 16: Relazioni calcolo delle correnti di cortocircuito ai morsetti di un alternatore.....	155
Tab.3. 17: Caratteristiche dell'interruttore del gruppo elettrogeno.....	158
Tab.3. 18: Caratteristiche delle linea tra gruppo elettrogeno e Power Center.	160
Tab.4. 1: Caratteristiche dei LED impiegati	199
Tab.4. 2: Numero di lampade impiegate nel singolo piano e nell'intero padiglione.	202
Tab.4. 3: Potenza dei carichi luce installati nel singolo piano e nell'intero padiglione.	202

Tab.4. 4: Confronto esul consumo delle lampade alimentate in alternata ed in continua.....	204
Tab.4. 5: Carichi luce nel singolo piano e nel padiglione con alimentazione in continua.	204
Tab.4. 6: Caratteristiche delle linee e potenze dissipate in alternata.....	206
Tab.4. 7: Caratteristiche delle linee e potenze dissipate in continua.....	207
Tab.4. 8: Potenza transitante nella linea in alternata in presenza della linea in continua.	214
Tab.4. 9: Riepilogo del numero di interruttori installati in un singolo piano.....	238
Tab.4. 10: Costo per la realizzazione dell'impianto in alternata.	239
Tab.4. 11: Costo per la realizzazione dell'impianto in continua.	241

Tab.5. 1: Costi da sostenere nell'impianto senza dispositivo di peak shaving installato.	272
Tab.5. 2: Costi da sostenere nell'impianto con dispositivo di peak shaving installato.	272

Sommario

In questa tesi si vuole affrontare, oltre all'aspetto della progettazione degli impianti elettrici secondo quanto prescritto dalle norme CEI, lo studio di provvedimenti innovativi in campo di progettazione elettrica. Alcuni di essi potrebbero essere applicati a tutti gli impianti, altri riguardano strettamente gli ambienti medici in quanto riferiti ai locali in cui sono presenti particolari apparecchiature medicali.

Oltre ai problemi legati al dimensionamento delle linee, la scelta dei dispositivi di protezione ed il loro coordinamento, sarà quindi affrontato lo studio mirato dei benefici che potrebbero derivare dall'applicazione dei seguenti accorgimenti: l'impiego della corrente continua e l'uso di dispositivi di peak shaving per far fronte al comportamento impulsivo dei macchinari di diagnostica.

In una società come la nostra, sensibile al problema del risparmio e dell'efficienza energetica, l'uso della corrente continua potrebbe essere di grande aiuto per il perseguimento di tale obiettivo grazie alle caratteristiche dovute alla sua natura ed ai benefici che essa può dare sia dal punto di vista economico che energetico.

Per dimostrare queste affermazioni, all'interno dell'elaborato sarà affrontato un caso reale di distribuzione in continua e ne risulterà che quest'ultima riesce a garantire dei vantaggi notevoli rispetto all'alternata. Tuttavia, questi vantaggi non possono essere sfruttati al massimo a causa della scarsa diffusione della corrente continua.

Altro aspetto innovativo, ma stavolta legato ai soli ambienti ospedalieri o comunque ad ambienti in cui siano impiegati dispositivi caratterizzati da assorbimenti impulsivi di corrente, è quello trattato nell'ultimo capitolo. Sarà valutata l'ipotesi di impiegare i supercondensatori, dispositivi caratterizzati da notevoli prestazioni in termini di velocità di risposta e numero di cicli di vita, per la fornitura locale di energia caratterizzata da elevate potenze per tempi molto ridotti. Come si risconterà dallo sviluppo del lavoro, questo provvedimento può garantire notevoli vantaggi, ma la sua fattibilità è subordinata alla tipologia di caso in esame e alle caratteristiche tecniche dell'impianto considerato.

Abstract

The main topic we want to deal with in this thesis work, beside the design aspect of the electrical plants according to the IEC, is the study of several innovative measures for electrical planning. Some of them could be applied to every electrical plant, whereas other ones are useful only for medical structures because referred to places where particular electro medical machines are installed.

After sizing the lines, choosing the switching devices and coordinating them, we will analyze the benefits that could be obtained through the application of the following two expedients: the use of direct current and the use of peak shaving devices to solve the problem of the impulsive absorption of the diagnostic machines.

For a society that takes care about cost savings and energy efficiency, the usage of direct current could be extremely helpful to achieve the goals thanks to the features linked to its nature and to the advantages it can offer both in the energetic and economic field.

In order to prove these statements, during our work we will analyze a real case of direct current distribution and we will show that it offers more advantages than the alternative current distribution. However, some of these advantages cannot be actually achieved because of the poor diffusion of direct current.

Another innovative aspect, but related only to medical places or to other places where we can find machines characterized by impulsive absorptions of energy, is treated in the last chapter. We will study an hypothetical use of ultracapacitors, that are devices characterized by high rate response and long life, for local power supply during the impulsive absorption of the electro medical machines. As this work will prove, such devices could offer outstanding advantages but the feasibility of this project depends on the type of plant we are dealing with and on its technical characteristics.

Introduzione

In questo lavoro, suddiviso in cinque capitoli, ci si propone di affrontare la progettazione di un impianto ospedaliero focalizzando l'attenzione su tre reparti, ciascuno caratterizzato da particolari esigenze di natura impiantistica. Successivamente, sarà analizzato un caso in cui viene valutata la fattibilità di una distribuzione in corrente continua per l'alimentazione dei carichi luce ed infine, si cercherà di risolvere il problema dell'assorbimento impulsivo di corrente, tipico delle macchine radiologiche.

Si descrive di seguito la struttura di ciascun capitolo e gli argomenti trattati.

Nel primo capitolo sarà effettuata una trattazione dal punto di vista tecnico e normativo degli ambienti medici, sottolineando le differenze rispetto agli ambienti ordinari e le esigenze che nascono in seguito alla presenza del paziente che, essendo in condizioni di vulnerabilità, necessita di particolari attenzioni in termini di sicurezza elettrica e di continuità del servizio. Si elencheranno, quindi, le tipologie di ambienti medici presenti all'interno di una struttura sanitaria secondo la classificazione prevista dalla norma CEI 64/8 – 7 che, alla sezione 710, si occupa della regolamentazione degli ambienti ospedalieri. A seconda delle apparecchiature medicali presenti in questi ambienti e delle esigenze dettate dal personale medico, la norma stabilisce dei gruppi di appartenenza che differiscono per i tempi di interruzione ammessi dalle apparecchiature e sulla base dei quali devono essere dimensionate le sorgenti di sicurezza: UPS (per utenze che non ammettono interruzione dell'alimentazione) e gruppi elettrogeni (per utenze che ammettono interruzioni per lunghi tempi).

Nel secondo capitolo inizierà la fase vera e propria di progettazione e sarà affrontato il dimensionamento della cabina di trasformazione MT/BT di proprietà dell'utente. Sarà effettuata la scelta dei trasformatori da installare e la loro modalità di messa in esercizio. Inoltre, secondo le prescrizioni normative e quelle imposte dal Distributore, saranno scelti i dispositivi di protezione lato MT e BT ed effettuate le tarature degli stessi secondo i criteri di selettività e le problematiche annesse. Infine, dopo aver definito il layout della cabina e la scelta dei servizi ausiliari da installare per la ventilazione, l'illuminazione dei locali e il rifasamento delle macchine, sarà dimensionato l'impianto di terra dell'intera opera.

Il terzo capitolo riguarderà il dimensionamento dell'impianto di bassa tensione a partire dal Power Center installato in cabina di trasformazione, fino alla distribuzione capillare ai carichi. Per ognuno dei tre padiglioni trattati (padiglione operatorio, di diagnostica e degenze) si affronteranno il dimensionamento delle linee, la scelta degli interruttori, la verifica termica dei quadri e la verifica delle cadute di tensioni lungo le linee. Sarà eseguito il coordinamento dei dispositivi di protezione in seguito al calcolo delle correnti di cortocircuito ai quadri, in modo da garantire un buon livello di selettività. Per quanto riguarda le esigenze di continuità del servizio nei vari reparti, si prevedrà la presenza di UPS opportunamente dimensionati per far fronte ad eventuali problemi derivanti da guasti o mancanza di alimentazione da parte della rete di distribuzione principale. Secondo quanto prescritto dalla normativa vigente, sarà prevista la presenza di un gruppo elettrogeno per l'alimentazione in caso di emergenza. Il gruppo elettrogeno dovrà essere dimensionato per fornire la potenza necessaria all'alimentazione dei carichi privilegiati e si affronterà, anche per quest'ultimo, il dimensionamento dell'interruttore posto a protezione della macchina.

Il quarto capitolo riguarderà lo studio di fattibilità di una distribuzione in corrente continua per l'alimentazione dell'illuminazione a LED posta all'interno del padiglione ospitante le camere di degenza. E' ben noto il fatto che i LED funzionino in corrente continua ma, per l'interfacciamento alla attuale rete di distribuzione a corrente alternata, necessitano di uno stadio di conversione sede di perdite. Saranno analizzate, quindi, tre soluzioni che permettono la fornitura di energia alle lampade e sarà effettuato un confronto per capire quale sia la soluzione che più si presta per l'impianto in questione. Si eseguirà un'analisi dei punti critici di ogni soluzione e, una volta individuata la migliore, si affronterà un confronto economico con quella che prevede l'alimentazione in alternata.

Il quinto e ultimo capitolo riguarderà la possibilità di impiegare dei supercondensatori per far fronte al problema degli assorbimenti impulsivi legati alle apparecchiature elettromedicali impiegate per le operazioni di diagnostica. Saranno studiati i comportamenti di una macchina per raggi X e una TAC stabilendo la possibilità dell'impiego dei dispositivi di peak shaving per fornire localmente l'energia necessaria a far fronte ai picchi di potenza assorbiti durante la fase di esecuzione dell'esame. Il supercondensatore è il dispositivo che più si presta a risolvere questo problema e si analizzerà un caso reale con valutazione economica annessa.

1 - Impianti Elettrici nei Locali a uso Medico

1.1 Generalità

In questo capitolo ci si propone di affrontare le problematiche presenti negli ambienti medici focalizzando l'attenzione su quali siano le particolarità di questi posti dal punto di vista legislativo e della sicurezza. L'ambiente medico, infatti, è particolarmente complesso a causa delle molteplici esigenze che possono variare tra i vari locali e all'interno degli stessi. Prendendo in considerazione un ospedale, ad esempio, non tutti i locali richiedono gli stessi accorgimenti dal punto di vista impiantistico ma è necessario effettuare uno studio approfondito per conoscere le caratteristiche e le esigenze di ciascuno di essi realizzando un impianto secondo la regola dell'arte.

Ciò che caratterizza questo tipo di ambienti e che rende necessario l'uso di particolari accorgimenti in fase di progettazione, è la presenza del paziente la cui vita potrebbe dipendere dalla presenza dell'alimentazione elettrica. Il paziente all'interno di un locale a uso medico è sottoposto, infatti, ad una serie di pericoli di natura elettrica sicuramente maggiori rispetto ad altri locali poiché la tipicità dell'ambiente e le particolari attività che vi si svolgono determinano un aumento dei fattori di rischio. Le precarie condizioni di salute, le diminuite capacità di reazione e la presenza di apparecchi elettromedicali direttamente a contatto fisico, rendono il paziente particolarmente vulnerabile ai pericoli della corrente elettrica. Da queste considerazioni si evince la necessità di elevare il grado di sicurezza ad un livello accettabile adottando provvedimenti più severi rispetto ad altri luoghi, sia per gli apparecchi elettromedicali sia per l'impianto elettrico.

Il paziente ricopre il ruolo principale nello studio della sicurezza ed è colui il quale particolarizza questo genere di locali. Non bisogna comunque trascurare che le strutture sanitarie adempiono il duplice compito di erogatori di assistenza al paziente e di ambiente di lavoro per il personale addetto e pertanto rappresentano luoghi affollati nei quali convivono numerose fonti potenziali di rischio fisico, chimico ed elettrico comuni nello stesso tempo a pazienti, lavoratori e visitatori.

Nei locali a uso medico è dunque necessario garantire la sicurezza del paziente che potrebbe venire a contatto con gli apparecchi elettromedicali, ma anche quella del personale medico o di chiunque altro si trovi all'interno dell'edificio e proprio per questi motivi è necessario che siano osservate le prescrizioni per la sicurezza regolate dalla norma CEI 64/8-7 *“Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in c.a. e a 1500V in c.c. Parte 7: ambienti ed applicazioni particolari”* nella sezione 710 dedicata per l'appunto ai locali a uso medico.

Il campo di applicazione di questa norma è esteso a ospedali, cliniche private, studi medici e dentistici, locali a uso estetico e locali medici nei luoghi di lavoro.

Ovviamente, come già accennato, le esigenze dipendono dal tipo di reparto preso in considerazione e, poiché nella maggior parte dei casi la sicurezza può essere raggiunta mediante provvedimenti sull'impianto, si agirà dal punto di vista progettuale e normativo a seconda delle casistiche a cui si è sottoposti. Per quanto riguarda la classificazione, la 64-8/7 prevede la seguente suddivisione dei locali a uso medico:

- Locali di gruppo 0¹: *“locale ad uso medico nel quale non si utilizzano Apparecchi Elettromedicali con Parti Applicate e ove la mancanza di alimentazione non comporta pericolo per la vita”* (CEI 64-8 art. 710.2.5).
- Locale di gruppo 1: *“locale ad uso medico nel quale le Parti Applicate sono destinate ad essere utilizzate nel modo seguente:*
 - *esternamente,*
 - *invasivamente entro qualsiasi parte del corpo, ad eccezione della zona cardiaca, e ove la mancanza di alimentazione non comporta pericolo per la vita”* (CEI 64-8 art. 710.2.6).
- Locale di gruppo 2: *“locale ad uso medico nel quale le Parti Applicate sono destinate ad essere utilizzate in applicazioni quali interventi intracardiaci, operazioni chirurgiche, o il Paziente è sottoposto a trattamenti vitali dove la mancanza di alimentazione può comportare pericolo per la vita”*(CEI 64-8 art. 710.2.7).

¹ I locali appartenenti al gruppo 0 sono considerati ordinari e pertanto regolati dalla normativa tradizionale

Va da sé che ciascun locale appartenente ad ognuna delle tre categorie sarà trattato diversamente dal punto di vista delle caratteristiche e delle peculiarità dell'impianto.

E' importante sottolineare come la totale qualità dell'impianto e la garanzia di sicurezza per il paziente e per chiunque sia nell'edificio, non sia garantita solo dalla protezione da eventuali guasti, ma anche agendo su altri aspetti altrettanto importanti che fanno sì che i locali medici siano trattati con maggior cautela rispetto ad altri.

E' il caso della continuità dell'alimentazione la quale rappresenta una delle maggiori fonti di sicurezza in questo genere di impianti, basti pensare ad una sala operatoria o ad un macchinario da cui dipendono le corrette funzionalità degli organi del paziente o addirittura la sua stessa vita. E' molto importante trattare anche questo aspetto considerando le problematiche relative all'interruzione dell'alimentazione e ai tempi di tolleranza che variano a seconda degli apparecchi o del tipo di locale in cui avviene l'interruzione. In fase di progettazione sarà dunque necessario tener conto di questi fattori e di conseguenza l'impianto elettrico dovrà essere adattato alle varie esigenze.

E' possibile notare, dunque, come le esigenze dettate dalle attività svolte in un certo locale, condizionino le scelte impiantistiche e particolarizzino il lavoro da compiere. I locali medici, infatti, necessitano di diversi gradi di sicurezza e diversi accorgimenti rispetto agli altri impianti e sarà premura del progettista adempiere al compito di rispettarli.

Nel corso del capitolo si affronterà il tema della sicurezza sottolineando come per certi aspetti, il grado di sicurezza da ottenere in questi ambienti debba essere maggiore rispetto a quello previsto per gli ambienti ordinari e come la normativa vigente permette di conseguirlo.

1.2 La zona Paziente

La zona paziente rappresenta “Qualsiasi volume in cui un paziente con parti applicate può venire in contatto intenzionale, o non intenzionale, con altri apparecchi elettromedicali o sistemi elettromedicali o con masse estranee o con altre persone in contatto con tali elementi”(CEI 64-8 art. 710.2.8) e viene individuata soltanto nei locali di gruppo 1 e 2.

La criticità delle condizioni del paziente, fa sì che la sua vulnerabilità debba essere salvaguardata mediante adeguate prescrizioni restrittive e, di conseguenza, si individua come misura protettiva, una zona accessibile al paziente la quale dovrà essere ben definita in quanto soggetta a particolari misure di sicurezza. Non è sempre possibile individuare il volume della zona paziente in quanto la postazione ad esso assegnata può essere mobile e quindi non univocamente definita.

Nel caso in cui la posizione del paziente sia fissa, la norma sopra citata assume il volume di Fig.1. 1:

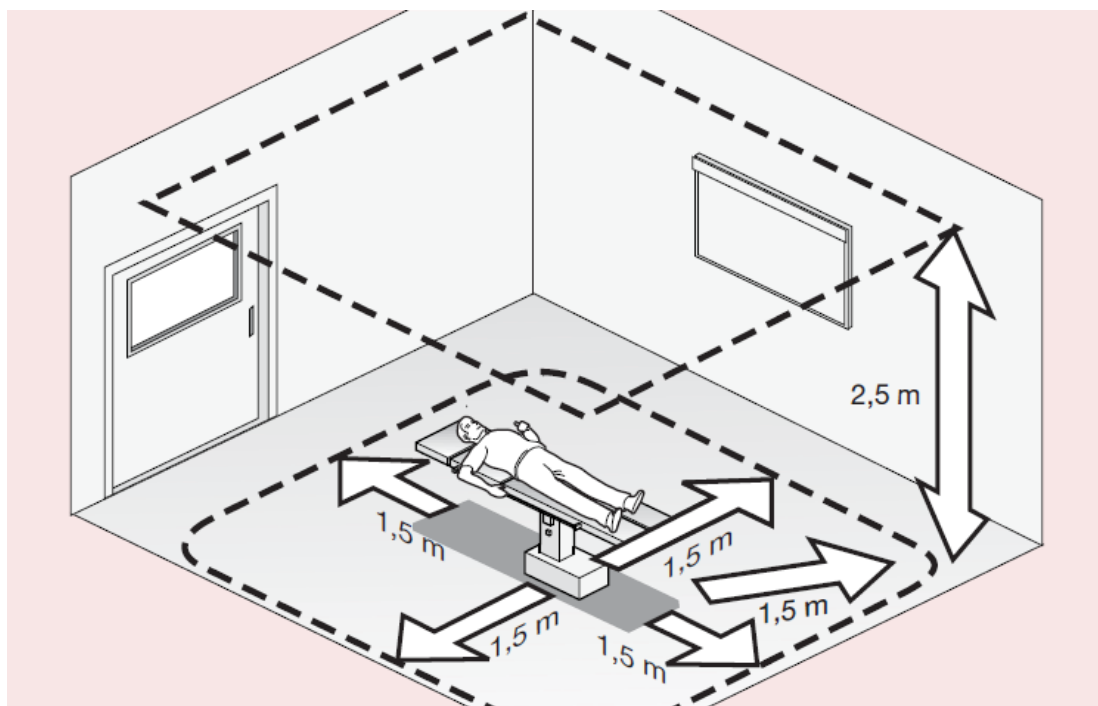


Fig.1. 1: Zona paziente intorno al tavolo operatorio fisso.

Qualora il tavolo operatorio o l'apparecchio elettromedicale con parti applicate possa assumere più posizioni, la zona paziente è individuata come l'involuppo di tutte le posizioni assumibili dal paziente mentre è in contatto con le parti applicate (Fig.1. 2.) Se gli apparecchi sono più di uno e possono assumere diverse posizioni, la zona paziente è estesa a tutta la stanza. In questo modo si garantisce la sicurezza per ogni posizione degli apparecchi elettromedicali e della postazione del paziente e nel locale è garantita la sicurezza anche qualora le apparecchiature dovessero subire spostamenti futuri. Nello sviluppo della zona paziente non è considerata l'ipotesi relativa agli spostamenti del paziente dentro o fuori dal locale, quando al paziente non è applicata alcuna apparecchiatura. In questo caso, come nel caso di apparecchi elettromedicali con parti applicate ma alimentate da sorgente elettrica interna (batterie o accumulatori), non sono necessari particolari accorgimenti dal punto di vista elettrico [1].

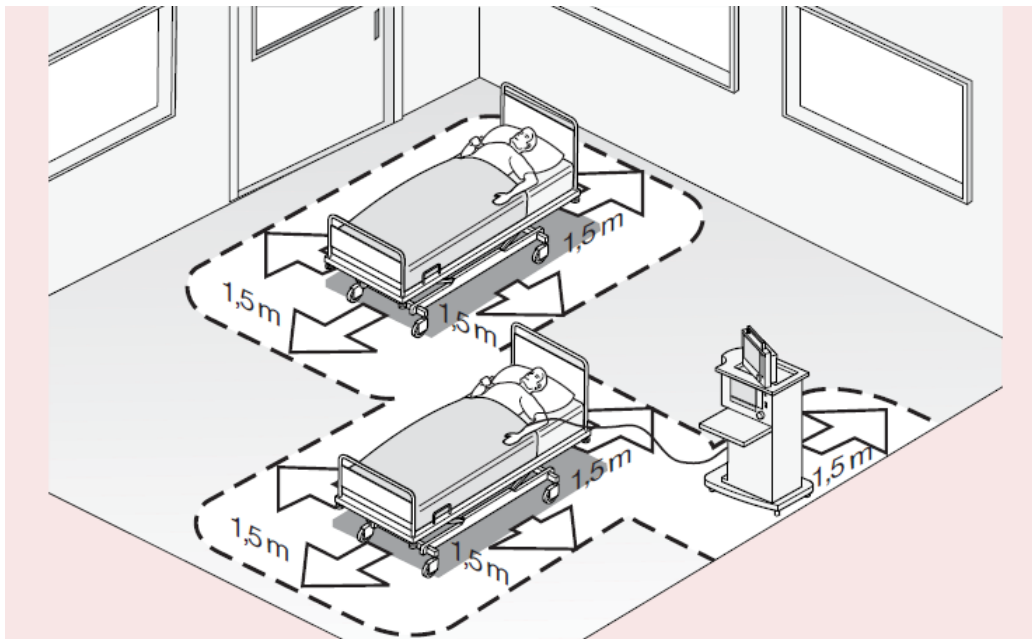


Fig.1. 2: Zona paziente intorno al tavolo operatorio mobile.

La zona paziente, in materia di sicurezza elettrica, rappresenta un concetto proprio dei locali ad uso medico che li contraddistingue dagli altri.

E' importante definire una zona paziente poiché quest'ultima determinerà le più importanti scelte impiantistiche atte a garantire l'incolumità del paziente specie in determinati casi in cui un guasto elettrico può costituire un pericolo mortale.

1.3 Il Rischio Elettrico

Di rilevante importanza per la garanzia della sicurezza è la protezione delle persone contro i contatti diretti e indiretti. I locali medici, a differenza di quelli ordinari, presentano delle particolari necessità in materia, basti pensare che l'interruzione dell'alimentazione di un macchinario atto a garantire il corretto funzionamento degli organi vitali di un paziente, potrebbe comprometterne l'incolumità. Di conseguenza in questi ambienti è necessario prendere le dovute precauzioni e adattare l'impianto alle specifiche esigenze.

Si parla di contatto diretto, quando avviene un contatto con una parte attiva normalmente in tensione (es. un conduttore), mentre il contatto è indiretto quando avviene con una parte normalmente non in tensione, come una massa o una parte conduttrice collegata ad una massa, ma che si trova in tensione a causa di un guasto dell'isolamento. Il contatto indiretto può avvenire tra la massa di un apparecchio e la terra o attraverso il contatto con la massa di un altro apparecchio o con una massa a potenziale diverso. In particolare, il contatto indiretto è causa di rischi elettrici classificabili come microshock e macroshock, eventi pericolosi che possono provocare la fibrillazione ventricolare.

Nel caso di macroshock si ha un passaggio di corrente nella persona a causa del contatto tra una parte accidentalmente in tensione e il corpo umano. La corrente attraversa il corpo interessandone un'ampia sezione ma solo una minima parte fluisce attraverso il cuore, con un rischio minimo di fibrillazione ventricolare.

Ben diverso è invece il caso di microshock. Esso si manifesta sempre con un passaggio di corrente nella persona dovuto al contatto tra una parte accidentalmente in tensione e il corpo umano, ma in questo caso, la corrente attraversa in gran parte il cuore, introducendo un disturbo dell'attività cardiaca che rende molto elevata la probabilità di una fibrillazione ventricolare. Questo è il caso di un paziente sottoposto a pratiche medico chirurgiche che comportano interventi di cateterismo cardiaco oppure all'applicazione di sonde o elettrodi vicino al cuore.

In questo caso, per proteggersi dal microshock, a causa dei valori molto bassi di corrente in grado di attivare il fenomeno di fibrillazione cardiaca, è necessario adottare alcuni accorgimenti aggiuntivi intervenendo sugli impianti.

In Fig.1. 3 si può notare come nel caso di macroshock la corrente interessa gran parte del corpo, mentre nel caso di microshock interessa maggiormente l'organo cardiaco a causa del collegamento diretto tra lo stesso e l'apparecchio elettromedicale.

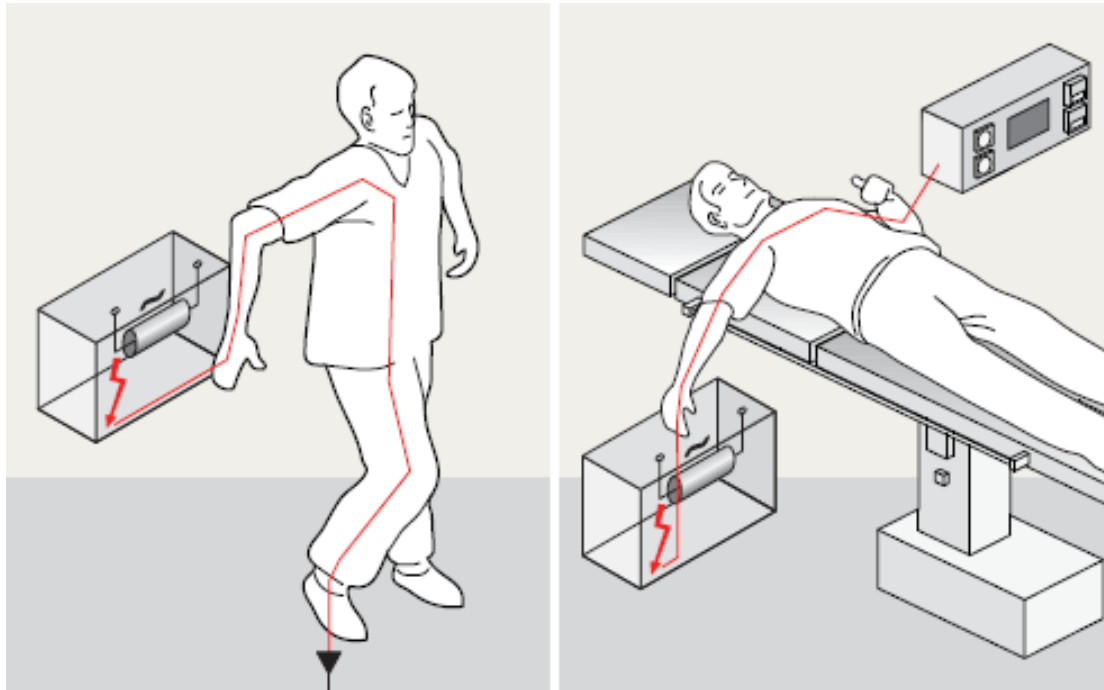


Fig.1. 3: macroshock (sinistra) e microshock (destra).

Da queste considerazioni ne consegue che, per proteggere il paziente dal pericolo di microshock, è necessario ridurre a 25 V la tensione di sicurezza che per gli impianti ordinari è pari a 50V. "(CEI 64-8 art. 710.413.1.1.1).

Nello specifico dovrà valere la seguente relazione per i sistemi TT:

$$R_A I_{dn} \leq 25 [V]$$

Con:

$R_A [\Omega]$: resistenza pari alla somma della resistenza di terra (R_E) e del conduttore di protezione;

$I_{dn} [A]$: corrente differenziale nominale d'intervento dell'interruttore.

Nei sistemi TN-S² e IT, il guasto franco a terra sui circuiti terminali deve determinare l'intervento delle protezioni nei tempi riportati in Tab.1. 1:

SISTEMA TN-S		SISTEMA IT		
U ₀ [V]	t [s]	U ₀ /U [V]	Neutro non distribuito t[s]	Neutro distribuito t[s]
120	0,4	120/240	0,4	1
230	0,2	230/400	0,2	0,4

Tab.1. 1: Tempi d'intervento sistemi TN-S e IT.

Queste considerazioni valgono per i locali di gruppo 1 e 2, in quanto gli impianti dei locali di gruppo 0 sono regolati dalla normativa dei locali ordinari.

1.3.1 Collegamento equipotenziale

Vedremo in seguito come la presenza di un nodo equipotenziale comporti un beneficio dal punto di vista della sicurezza del paziente soprattutto nei locali di gruppo 2. Ci si propone, a tal proposito, di analizzare gli aspetti relativi a questo particolare collegamento dal punto di vista tecnico e della normativa.

La norma CEI 64-8/7 art. 710.413.1.6.1 afferma che:

“In ciascun locale a uso medico di gruppo 1 e 2 deve essere installato un nodo equipotenziale a cui siano collegate le seguenti parti situate, o che possono entrare, nella zona paziente:

- *Masse (conduttori di protezione);*
- *Masse estranee (conduttori equipotenziali);*
- *Schermi, se installati, contro le interferenze elettriche;*
- *Eventuali griglie conduttrici nel pavimento;*
- *L'eventuale schermo metallico del trasformatore d'isolamento.”*

² I sistemi TN-C sono proibiti dalla normativa per gli impianti nei locali di gruppo 1 e 2

La funzione del nodo equipotenziale è quella di interconnettere galvanicamente tutte le masse e le masse estranee presenti o che possono entrare nella zona paziente in modo che, qualora si verifici un guasto verso massa, tutte le masse vengano a trovarsi allo stesso potenziale e il paziente, eventualmente a contatto con due o più de esse, non sia soggetto a correnti pericolose. Nei locali di gruppo 0 si applicano le regole generali degli impianti ordinari e quindi non è richiesto alcun nodo equipotenziale, tranne che per i locali da bagno e doccia.

Nei locali di gruppo 1 (ad esempio camere di degenza), vanno collegate al nodo equipotenziale tutte le masse e le masse estranee ed eventuali schermi contro le interferenze elettromagnetiche, in quanto è opportuno considerare la zona paziente estesa a tutto il locale. Qualora esistano locali da bagno o doccia collegati funzionalmente al locale di gruppo 1 e ordinariamente utilizzati dal paziente, devono essere anch'essi collegati al nodo equipotenziale tramite il nodo locale.

Nei locali di gruppo 2, oltre al semplice collegamento degli elementi sopra citati, è necessario rispettare un valore massimo di resistenza tra i collegamenti, viste le condizioni critiche del paziente e quindi il maggior grado di sicurezza da garantire per la sua incolumità. La norma CEI 64-8/7 art. 710.413.1.6.2 impone il limite di resistenza di $0,2 \Omega$ per il collegamento tra il nodo equipotenziale e la massa o massa estranea. Questo valore di resistenza, secondo le norme, garantisce una differenza di potenziale non dannosa per il paziente. Un'altra prescrizione sui livelli di resistenza ammissibili è dettata dalla CEI 64-8/7 art. 710.413.1.6.1 e riguarda le masse estranee. Essa afferma che nei locali di gruppo 2 si intende massa estranea, e quindi deve essere collegata al nodo equipotenziale, una parte metallica che presenta verso terra una resistenza di valore inferiore a $0,5 M\Omega^3$ e che pertanto può permettere la circolazione di una corrente dannosa per il paziente a rischio di microshock. Fanno eccezione a questa regola le masse che entrano nei locali come ad esempio tubazioni esterne che devono essere collegate al nodo equipotenziale a prescindere dal loro valore di resistenza verso terra in quanto potrebbero introdurre un potenziale pericoloso per la sicurezza. Scendendo più nel dettaglio, dal punto di vista prettamente tecnico il nodo equipotenziale è costituito da una morsettiera o una barretta di rame con appositi fori per garantire il collegamento dei conduttori. Secondo quanto imposto dalla norma CEI 64 - 8/7 art. 710.413.1.6.3, il nodo

³ Nei locali in cui non si incorre a pericolo di microshock, è considerata massa estranea una massa che presenta verso terra una resistenza di valore inferiore a 200Ω (CEI 64-8/2 art. 23.3)

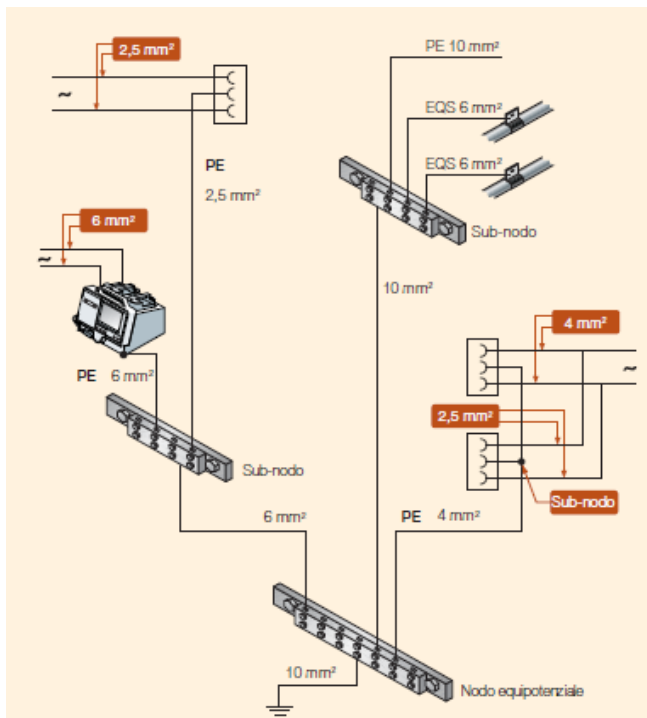


Fig.1. 4: Collegamento al nodo equipotenziale tramite sub-nodo

equipotenziale deve essere posizionato all'interno del locale o nelle immediate vicinanze e deve essere facilmente accessibile per le ispezioni. In più, i conduttori devono essere singolarmente scollegabili, chiaramente identificabili in modo da facilitare le verifiche e, infine, il nodo deve essere collegato a terra mediante un conduttore di sezione pari alla massima sezione presente tra i conduttori collegati ad esso. La stessa norma prevede la presenza di altri collegamenti equipotenziali detti sub-nodi che possono essere interposti tra una massa, o massa estranea, e il nodo

equipotenziale. La norma afferma che tra una massa ed il nodo equipotenziale, può essere presente un solo sub-nodo e il collegamento tra sub-nodo e nodo equipotenziale deve avvenire tramite un conduttore di sezione pari a quella del conduttore di sezione più elevata connessa al sub-nodo. Un chiaro esempio di quanto esposto è illustrato in Fig.1. 4.

1.3.2 Il sistema IT-M

Come visto finora, le problematiche legate agli ambienti medici portano a scelte impiantistiche atte a garantire la sicurezza del paziente e a salvaguardare la sua vulnerabilità limitando la tensione alla quale può essere sottoposto in caso di guasto per evitare il pericolo di microshock. Nei locali medici di gruppo 2 è vietato intervenire contro i contatti indiretti mediante interruzione automatica dell'alimentazione sia per evitare che la mancanza di alimentazione metta in pericolo la vita del paziente, sia perché i tempi di intervento sono troppo lunghi per proteggere il paziente da microshock. Le precauzioni e gli accorgimenti da prendere per questi particolari motivi, non trovano riscontro, dal punto di vista impiantistico, in nessuno dei sistemi normalmente usati negli impianti, da qui la necessità di escogitare un nuovo sistema che prende il nome di sistema IT – MEDICALE (IT-M). Il sistema IT-M nasce per rispondere alle particolarità dei locali di gruppo 2, contraddistinti dal fatto che vengono impiegati apparecchi elettromedicali con parti applicate direttamente nella zona cardiaca. In

condizioni di guasto in un apparecchio, il paziente è sottoposto alla differenza di potenziale tra gli apparecchi con i quali è a contatto o tra l'apparecchio e le masse estranee accessibili. Per limitare tali differenze di potenziale si è visto quanto sia utile introdurre nel locale, o nelle sue immediate vicinanze, il nodo equipotenziale. Ci occuperemo ora di capire come quest'ultimo sia legato al sistema IT-M e quali siano i criteri da adottare per raggiungere un opportuno grado di sicurezza. In caso di guasto, si verifica una differenza di potenziale tra l'apparecchio guasto e tutte le altre masse collegate al nodo. Grazie al nodo equipotenziale, se il guasto avviene all'esterno della zona paziente, la differenza di potenziale tra le apparecchiature accessibili al paziente è nulla e quindi è salvaguardata la sicurezza, ma qualora il guasto avvenisse all'interno della zona paziente, nascerebbe una tensione tra l'apparecchio guasto e tutte le altre masse accessibili al paziente (Fig.1. 5). Ciò rappresenta, ovviamente, una situazione di pericolo aggravata dal fatto che, trovandoci in locali di gruppo 2, basta una corrente dell'ordine dei 50 μA per causare la morte del paziente in seguito a microshock⁴.

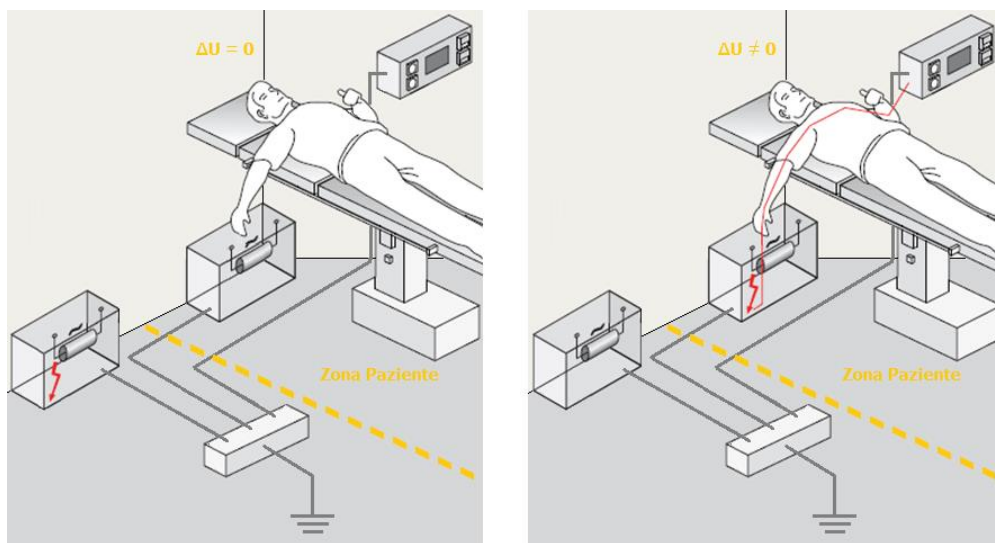


Fig.1. 5: Differenze tra guasto fuori dalla zona paziente (sinistra) e dentro (destra). Si può notare come nel primo caso il guasto non comporti una differenza di potenziale ai capi del paziente, mentre ciò non accade nel caso di guasto all'interno della zona paziente.

Intuitivamente, la soluzione per contenere la tensione entro livelli accettabili potrebbe essere quella di diminuire la resistenza del conduttore o limitare la corrente di guasto. Dal punto di vista teorico si potrebbe agire sul conduttore di protezione aumentandone la sezione o

⁴ Nei sistemi TT la corrente di guasto può arrivare a valori di circa 100 A e ipotizzando una resistenza del conduttore di protezione pari a 0,1 Ω fino al nodo, si stabilirà una tensione pari a 10 V. Assumendo che il paziente presenti una resistenza di 1000 Ω , la corrente che lo percorrerà sarà pari a 10 mA e dunque pericolosa. Le cose peggiorano nei sistemi TN dove la corrente di guasto può assumere valori di circa 1000 A.

diminuendone la lunghezza, ma ciò non è possibile in pratica per ragioni tecnico-economiche; bisogna dunque agire sulla corrente di guasto e il modo più efficiente che ci permette di abbassarla drasticamente è l'uso di sistemi isolati che si realizzano tramite trasformatore d'isolamento.

In questo caso, essendo il sistema poco esteso e isolato da terra, le correnti di primo guasto sono prevalentemente di tipo capacitivo e quindi di valore così modesto (ordine dei milliampere) da rendere trascurabili le cadute di tensione sui conduttori di protezione⁵, tali comunque da garantire sia la continuità del servizio sia la sicurezza del paziente.

Il primo guasto in questo modo non causa alcuna disfunzione nell'impianto e potrebbe permanere per un tempo indefinito. E' importante osservare che in queste condizioni, un secondo guasto a terra che avvenga su un'altra fase costituirebbe un cortocircuito con richiusura della corrente attraverso il secondario del trasformatore d'isolamento e conseguente intervento delle protezioni. Questa situazione costituisce un pericolo per il paziente sia per le elevate correnti in gioco che per l'interruzione dell'alimentazione facendo venire meno il requisito della continuità del servizio.

E' intuitivo, dunque, che il secondo guasto deve essere prevenuto e per questo motivo le norme prescrivono un controllo continuo della resistenza di isolamento verso terra del circuito secondario di alimentazione da effettuare tramite un dispositivo con caratteristiche ben definite dalla CEI 64-8/7 art. 710.413.1.5, in grado di avvisare del pericolo mediante un segnale ottico non disinseribile e un segnale acustico tacitabile. Il personale in servizio sarà quindi avvisato e dovrà concludere velocemente le operazioni in sala per permettere al servizio di manutenzione di riparare il guasto prima di riprendere la normale attività.

Abbiamo visto come, trattando le problematiche presenti nei locali medici in cui l'elettricità gioca un ruolo di primaria importanza, si è pervenuti alla soluzione di compromesso che meglio soddisfa le esigenze. Per completezza si riassume quanto detto evidenziando le peculiarità del sistema IT-M e le differenze rispetto al semplice sistema IT.

La garanzia del perseguimento di un adeguato livello di sicurezza è fornita grazie all'interazione delle varie parti del sistema. Il nodo equipotenziale garantisce l'incolumità del paziente mantenendo saldi i potenziali delle masse, il trasformatore di isolamento permette di

⁵ Ipotizzando una corrente di guasto di 10 mA e una resistenza del conduttore di 0,2 Ω , si avrà una tensione di 2 mV ai capi degli apparecchi. Se la resistenza interna del paziente è pari a 1000 Ω , la corrente circolante sarà pari a 2 μ A e dunque non pericolosa.

isolare galvanicamente la parte di impianto interessata e di ottenere delle correnti di guasto modeste. Infine il controllo dell'isolamento fa sì che si prevenga il pericolo di secondo guasto e quindi l'insorgere di correnti di valore pericoloso [2].

Come per il sistema IT, nel sistema IT-M il neutro è isolato e le masse collegate a terra, ma la prima differenza tra i due sta nel fatto che il trasformatore non è ordinario ma isolato e medicale e le prescrizioni relative allo stesso devono essere conformi alla norma CEI 96-3 "Sicurezza dei trasformatori, delle unità di alimentazione e similari" e alla CEI 96-16 "Sicurezza dei trasformatori, dei reattori, delle unità di alimentazione e loro combinazioni. Parte 2-15: Prescrizioni particolari e prove per trasformatori di isolamento per alimentazione di locali ad uso medico".

Il sistema IT-M si differenzia ancora dal semplice IT anche dal punto di vista della normativa come chiaramente espresso dalla CEI 64-8/7 art 710.413.1.5.

1.3.3 Interruzione automatica dell'alimentazione

Secondo quanto stabilito dalla 64-8/7 art. 710.413.1.3, nei locali di gruppo 1 possono essere impiegati interruttori differenziali con $I_{dn} \leq 30$ [mA] per la protezione dei circuiti che alimentano prese di corrente da 32 A mentre, per quanto riguarda i locali del gruppo 2, devono essere protetti mediante interruttori differenziali con $I_{dn} \leq 30$ [mA] tutti i circuiti che non sono alimentati da un sistema IT-M. L'obbligo decade se tali circuiti alimentano soltanto apparecchi fissi posti ad altezza superiore a 2,5 m e che non possono entrare nella zona paziente.

Per ciò che concerne la scelta dell'interruttore differenziale, la stessa norma prescrive la tipologia di interruttore impiegabile nei locali di gruppo 1 e 2 in base alle caratteristiche degli stessi e degli elementi facenti parte dell'impianto. Alcuni utilizzatori, quali i gruppi statici di continuità (UPS), personal computer, stampanti, apparecchiature elettromedicali incorporano circuiti elettronici che danno luogo, in caso di guasto a terra, a correnti con componenti continue tali da compromettere il funzionamento dei normali dispositivi differenziali di tipo AC che non sono in grado di rilevare le componenti unidirezionali. Da queste considerazioni si evince il perché dell'obbligo per questi locali di ricorrere ai differenziali di tipo A, in grado di intervenire anche con correnti di guasto unidirezionali pulsanti o di tipo B, capaci di intervenire anche con correnti di guasto unidirezionali pulsanti e continue. Nel caso di

alimentazione tramite UPS trifase la norma richiede che la protezione sia ottenuta mediante interruttori differenziali di tipo B.

Data l'importanza della continuità dell'alimentazione e i problemi che potrebbero nascere se quest'ultima non fosse garantita, la norma CEI 64-8/7 art. 710.413.1.3 raccomanda di suddividere l'impianto in più circuiti in modo da non incorrere a scatti intempestivi dell'interruttore differenziale posto a monte di un circuito su cui sono collegati diversi apparecchi.

In questo caso, infatti, si ha il duplice vantaggio di evitare sia che venga disalimentata un'ampia zona dell'impianto, sia il verificarsi di scatti intempestivi che potrebbero avvenire a causa delle correnti di dispersione capacitive proprie degli apparecchi elettromedicali causando un disservizio potenzialmente pericoloso.

Gli interruttori differenziali in serie, devono essere selettivi per garantire una buona qualità dell'alimentazione mediante opportune tarature dei dispositivi posti a monte.

Gli interruttori per uso domestico e similare sono di tipo S (selettivi) o G (generale). L'interruttore di tipo S, che presenta una corrente differenziale nominale maggiore di 30 mA ed una nominale maggiore di 25 A, deve essere selettivo rispetto al generale posto a valle. La selettività totale è garantita se l'interruttore di tipo S presenta una corrente di taratura almeno tre volte superiore a quella del dispositivo posto a valle, altrimenti si tratta di selettività parziale.

La Fig.1. 6 mostra un esempio di quanto detto:

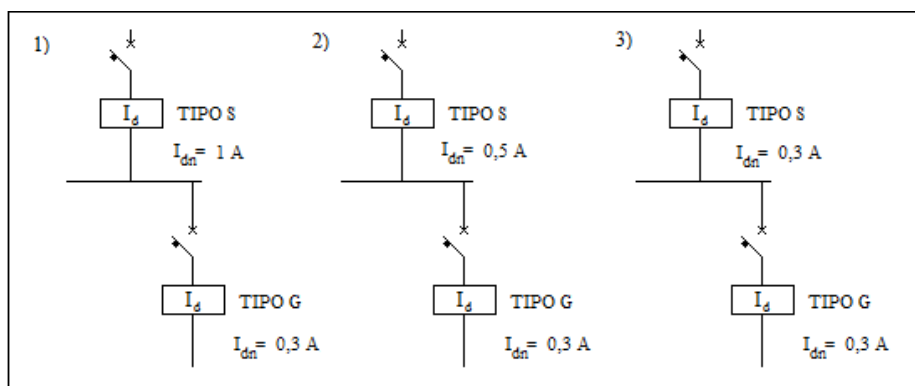


Fig.1. 6: 1) selettività totale 2) selettività parziale 3)selettività nulla.

1.3.4 Protezione dalle sovracorrenti

I locali medici, come quelli ordinari, necessitano di protezioni contro le sovracorrenti che possono essere garantite tramite fusibili o interruttori automatici. Particolare attenzione è fatta per i locali appartenenti al gruppo 2 dove la norma CEI 64-8/7 art. 710.53.1 afferma che la protezione contro il sovraccarico deve essere effettuata tramite i soli interruttori automatici preferendoli ai fusibili per la facilità di ripristinare l'alimentazione in breve tempo. E' comunque concesso l'uso dei fusibili per la protezione contro il cortocircuito. Di particolare importanza è la questione legata alla selettività dei dispositivi di protezione dalle sovracorrenti allo scopo di assicurare al massimo la continuità del servizio. Per raggiungere l'obiettivo di fornire all'impianto un'adeguata affidabilità sia dal punto di vista della sicurezza che della qualità dell'alimentazione, deve essere realizzata una selettività sia orizzontale che verticale. La selettività orizzontale, come visto per gli interruttori differenziali, consiste nel suddividere l'impianto in più circuiti, riducendo il disservizio creato in caso di guasto con un inevitabile aumento dei costi. Nei locali medici, un aspetto particolare della selettività orizzontale riguarda i locali di gruppo 2 per i quali la norma CEI 64-8/7 art. 710.55.3 prevede particolari prescrizioni. La norma richiede che in ogni posto di trattamento del paziente (ad esempio un quadretto prese o un'unità di alimentazione a parete), per le prese a spina alimentate da un sistema IT-M sia prevista la connessione a due diversi circuiti di alimentazione, ciascuno protetto da dispositivi propri. Alternativamente, la stessa norma ammette la configurazione in cui sia garantita la protezione dalle sovracorrenti dedicata a ciascuna presa o a gruppi di almeno due. La situazione appena descritta è illustrata in Fig. 1. 7:

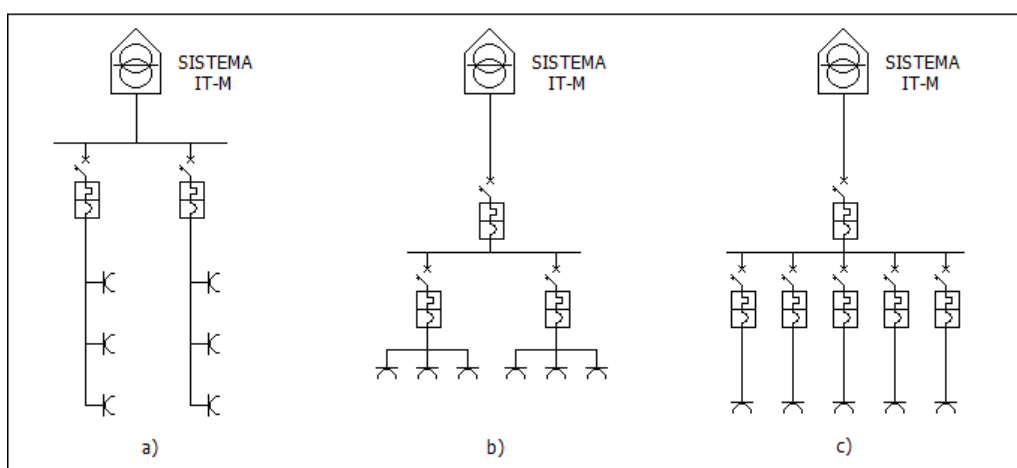


Fig.1. 7: a) prese alimentate da due circuiti; b)prese protette a gruppi; c) prese protette individualmente.

Ovviamente, come accennato, una selettività orizzontale studiata molto finemente comporta un aumento notevole dei costi. Per trovare il giusto compromesso è necessario costituire gruppi di linee opportunamente scelti, in modo da abbattere i costi e non compromettere la sicurezza e la continuità del servizio.

Organizzare le linee in modo da conseguire un buon livello di selettività orizzontale, garantisce una maggiore efficienza dell'impianto in caso di intervento delle protezioni in quanto il fuori servizio è esteso al solo gruppo di prese protetto dall'interruttore che eventualmente interviene.

Come è noto, per ottenere un buon risultato è necessario raggiungere un livello di selettività non solo orizzontale ma anche verticale in modo che in caso di guasto intervenga solo il dispositivo posto a protezione del circuito interessato e non quello a monte. Analogamente a quanto visto per gli interruttori differenziali, la selettività verticale si ottiene attraverso una corretta taratura dei dispositivi di protezione in modo che l'interruttore a valle intervenga prima che l'interruttore a monte inizi la manovra di apertura per ogni valore possibile di corrente. Per far sì che ciò avvenga è necessario conoscere le zone di intervento dei dispositivi e assicurarsi che queste non si sovrappongano fino al valore massimo di corrente di cortocircuito da estinguere. La completa selettività si raggiunge affiancando alla selettività amperometrica quella cronometrica, ritardando il dispositivo a monte entro i possibili limiti fisici dello stesso [3].

1.4 La Continuità

Fino ad ora è stata affrontata la problematica della qualità dell'alimentazione dal punto di vista della sicurezza e della selettività fornendo la garanzia di continuità dell'esercizio in caso di primo guasto e garantendo la limitazione di eventuali disservizi, derivanti dall'intervento delle protezioni, applicando i criteri di selettività. In questo paragrafo si affronterà il tema della continuità dell'alimentazione con le relative problematiche derivanti dal fatto che la particolarità degli ambienti trattati impone che siano prese delle precauzioni per garantire il corretto funzionamento dei cosiddetti carichi privilegiati. A tal proposito la normativa impone che sia presente un'alimentazione di sicurezza per far fronte ad eventuali disservizi causati dalla rete di distribuzione o che si verifichino nell'impianto proprio.

Saranno prese in esame le situazioni che si possono verificare all'interno di una struttura ospedaliera considerando la normativa vigente in materia ed i vincoli da essa imposta. La norma che definisce il concetto di alimentazione dei servizi di sicurezza è la CEI 64-8/2 mentre la CEI 64-8/3 art. 352 stabilisce la classificazione delle interruzioni in base alle tempistiche di inserimento dell'alimentazione di sicurezza⁶. Per completezza si riporta la classificazione in Tab.1. 2:

CLASSE	TEMPI DI COMMUTAZIONE
Classe 0	Alimentazione disponibile senza interruzioni
Classe 0,15	Alimentazione disponibile entro un tempo di 0,15 s
Classe 0,5	Alimentazione disponibile entro un tempo $0,15 < t < 0,5$ s
Classe 15	Alimentazione disponibile entro un tempo $0,5 < t < 15$ s
Classe >15	Alimentazione disponibile in un tempo $t > 15$ s

Tab.1. 2: Classificazione delle interruzioni in base alla durata.

⁶ Nei locali medici si usano le sole classi 0,5, 15 e >15.

1.4.1 L'Alimentazione di Sicurezza

L'alimentazione di sicurezza nei locali medici è regolata dalla norma CEI 64-8/7 Sez. 710 e dal DM 18/09/02 che si occupano rispettivamente di stabilire quali siano i carichi a cui garantire la continuità dell'alimentazione e per quali tempi.

Nello specifico, la norma CEI, negli articoli 710.562.2.1 e 710.562.2.2 impone per gli apparecchi di illuminazione di tipo scialitico delle sale operatorie e per alcuni apparecchi elettromedicali, un'interruzione di tipo breve mentre l'interruzione può essere media per l'illuminazione di sicurezza e per i sistemi di rilevazione e allarme antincendio. Nell'art. 710.562.2.3 la suddetta norma prevede la possibilità di collegamento di alcuni circuiti ad un'alimentazione di sicurezza che ammetta un'interruzione superiore a 15 secondi per tutti quei servizi che possono tollerarla senza compromettere le proprie funzionalità. Questa concessione ha il vantaggio di permettere al gruppo elettrogeno di prendere il carico in maniera graduale con evidenti benefici per gli apparati di cui è composto e per il suo dimensionamento. La norma cita a titolo di esempio una serie di servizi che ammettono un'interruzione maggiore di 15 secondi come apparecchi per la sterilizzazione, impianti di riscaldamento e condizionamento, apparecchi frigoriferi, di cottura ecc.

Altre prescrizioni in materia di alimentazione di sicurezza dettate dalla CEI 64-8/7 riguardano quanto di seguito elencato:

- Per l'alimentazione di classe 0,5 la sorgente deve avere un'autonomia minima di 3 ore che può essere ridotta ad 1 ora se la linea può essere commutata su un'altra sorgente come ad esempio un gruppo elettrogeno;
- Per l'alimentazione di classe 15 deve essere prevista un'autonomia di almeno 24 ore che può essere ridotta ad 1 ora se le attività mediche lo consentono e se è possibile, in questo tempo, evacuare i locali;
- Per l'alimentazione di classe >15 la sorgente deve avere almeno un'autonomia di 24 ore.

Il Decreto, invece, impone che l'alimentazione di sicurezza debba essere a interruzione breve per gli impianti di illuminazione di sicurezza, di rilevazione e allarme antincendio, mentre può essere ad interruzione media per gli impianti di diffusione sonora, degli ascensori e degli impianti idrici antincendio. In ogni caso la ricarica completa degli accumulatori deve essere garantita in 12 ore e deve avvenire in maniera automatica.

In più, sono prescritti dei vincoli relativi alla durata della sorgente:

- almeno 30 minuti per l'impianto di rilevazione e allarme antincendio;
- almeno 2 ore per l'illuminazione di sicurezza, gli impianti di diffusione sonora, gli ascensori e gli impianti idrici antincendio;

Ovviamente il committente ha il compito di indicare al progettista dell'impianto le caratteristiche delle apparecchiature impiegate in modo da stabilire la classe di appartenenza e garantire l'adeguata messa in opera del sistema.

1.5 Le Sorgenti di Sicurezza

Prima di parlare delle sorgenti di sicurezza è necessario spendere qualche parola sui circuiti di sicurezza, definiti dalla norma CEI 64-8/7 art. 710.562.1.3 come i circuiti che collegano la sorgente di alimentazione dei circuiti di sicurezza al quadro di distribuzione principale.

Per garantire un certo grado di affidabilità e far sì che i circuiti di sicurezza siano salvaguardati da problemi che si potrebbero verificare su altri circuiti dell'impianto, la norma CEI 64-8/5 art. 563.1 prevede che detti circuiti debbano essere indipendenti dagli altri in modo che eventuali guasti non compromettano il loro corretto funzionamento. Ne consegue, dunque, che il quadro di distribuzione principale risulta alimentato da due linee di cui una ordinaria ed una di sicurezza collegate rispettivamente alla rete elettrica di alimentazione e ad una sorgente di sicurezza, ad esempio, un gruppo elettrogeno. La sorgente di sicurezza interviene alimentando i propri circuiti qualora si verificasse un problema sulla linea ordinaria o si riscontrasse un abbassamento di tensione sul quadro principale. In questo caso un relè di minima tensione posto sulla sbarra ordinaria comanda l'avviamento del gruppo elettrogeno.

Per quanto riguarda i circuiti a valle del quadro principale la norma non prescrive alcun obbligo, pertanto possono essere singoli o doppi a seconda dell'affidabilità che si vuole ottenere dall'impianto. Esiste invece un obbligo della norma CEI 64-8/5 art. 563.2 che impone, per i circuiti di sicurezza posati in luoghi a maggior rischio in caso di incendio, l'uso di materiali resistenti al fuoco per i tempi necessari a garantire l'alimentazione onde evitare che un incendio in un altro locale comprometta il funzionamento di tali circuiti e causi dei disservizi in locali dove non ne sono ammessi.

Dopo questa premessa, si può proseguire descrivendo le tipologie di sorgente e le prescrizioni in materia di normativa. La sorgente di sicurezza è in generale quella parte dell'impianto che adempie al compito di alimentare i circuiti di sicurezza qualora fosse necessario, anche se la norma CEI 64-8/5 art. 562.5 ammette che la sorgente di alimentazione di sicurezza possa essere utilizzata per alimentare circuiti non di sicurezza, detti di riserva, purché abbia potenza a sufficienza e, in caso di sovraccarico, dia la priorità ai circuiti di sicurezza. Ovviamente, è anche necessario che i dispositivi di protezione sui circuiti di riserva siano selettivi rispetto a quelli dei circuiti di sicurezza in modo che un guasto su di essi non comprometta il corretto funzionamento dell'impianto.

Per ciò che concerne il dimensionamento e la potenza richiesta alla sorgente di sicurezza, è necessario sommare le potenze assorbite delle apparecchiature da alimentare aggiungendo le perdite di potenza in linea ed eventualmente un margine per prevedere ampliamenti futuri dell'impianto.

1.5.1 Batterie di accumulatori

Tali dispositivi sono impiegati per l'alimentazione di quei circuiti che appartengono alla classe 0,5, ossia ammettono un'interruzione massima di 0,5 secondi. Solitamente si tratta degli impianti di illuminazione di sicurezza, quali ad esempio apparecchi di illuminazione di tipo scialitico delle sale operatorie. L'autonomia della batteria deve essere di 3 ore ma, come visto in precedenza, la norma ammette la riduzione ad 1 ora se è presente la possibilità di commutare la linea su un'altra sorgente di alimentazione. Ovviamente la scelta della durata della batteria e del tempo di ricarica della stessa, dipendono dal dimensionamento e dai tipi di materiali usati che rendono più o meno oneroso il sistema complessivo.

Per ciò che concerne i locali in cui le batterie sono installate, la norma CEI 64-8/5 impone che siano alloggiare in un locale dedicato con modalità di posa di tipo fisso accessibile solo a personale competente. Possono essere anche ubicate all'interno di armadi chiusi a chiave senza la necessità di avere un locale dedicato ma garantendo l'adeguata ventilazione. Una delle problematiche legate all'uso delle batterie di accumulatori, infatti, è il rilascio dei gas in condizioni anomale di funzionamento. In condizioni normali le batterie non provocano rilasci pericolosi di gas ma se sottoposte a stress termici a causa di sovracorrenti, si possono creare situazioni pericolose e i gas emessi possono formare una miscela esplosiva con l'aria. Per questo motivo il locale deve essere adeguatamente ventilato in modo da far sì che, in questi casi, i gas rilasciati dalle valvole di sfogo che si attivano in presenza di sovrappressione interna, non raggiungano una concentrazione pericolosa.

La norma CEI 21-39 fornisce la formula attraverso la quale si può calcolare la portata d'aria necessaria per la ventilazione e quindi per il dimensionamento del dispositivo che adempirà tale compito. Il suo valore di portata necessario per garantire la sicurezza sarà dato da:

$$Q = 5 \cdot 10^{-5} \cdot n \cdot I \cdot C \text{ [m}^3\text{/h]}$$

Con:

- n: numero di elementi della batteria;
- I: corrente di carica per ogni ampereora di capacità della batteria (mA/Ah);
- C: capacità della batteria (Ah).

Una volta calcolata la portata, si può ricavare la superficie necessaria per garantire la corretta ventilazione. Questa sarà data da:

$$A = 28Q [cm^3]$$

1.5.2 UPS

L'Uninterruptible Power System (UPS) rappresenta senz'altro la migliore soluzione per garantire l'alimentazione dei servizi di sicurezza ai locali a uso medico, in quanto fornisce l'energia al carico senza alcuna interruzione come richiesto dalla classe 0 (*Tab. 1.2*). Proprio per questo motivo gli UPS sono impiegati per le linee che alimentano apparecchi che non tollerano interruzioni di oltre 0,5 secondi e solitamente sono progettati per garantire l'alimentazione per un tempo che varia tra i 10 e i 30 minuti.

Gli UPS sono dispositivi che offrono molteplici vantaggi rispetto alle soluzioni alternative grazie alle alte prestazioni dell'elettronica di potenza che permettono di ottenere alta affidabilità e ingombri ridotti.

Gli UPS, infatti, possono essere installati nei locali richiedendo predisposizioni minime e garantiscono un'ottima qualità dell'alimentazione e la possibilità di interconnessione a sistemi di controllo informatici grazie alle numerose interfacce disponibili. Ci sono, tuttavia, alcuni aspetti negativi degni di nota come ad esempio il comportamento in caso di sovracorrente: gli UPS non sono, infatti, idonei a sopportare sovraccarichi o cortocircuiti con correnti superiori a 1,5 volte la corrente nominale. Tali dispositivi sono caratterizzati da un'impedenza interna piuttosto alta, con conseguenze sulla corrente di cortocircuito (che risulta bassa) e, quindi, sul conseguimento della selettività tra le protezioni poste a valle.

Dal punto di vista impiantistico, l'UPS si presenta come in Fig.1. 8:

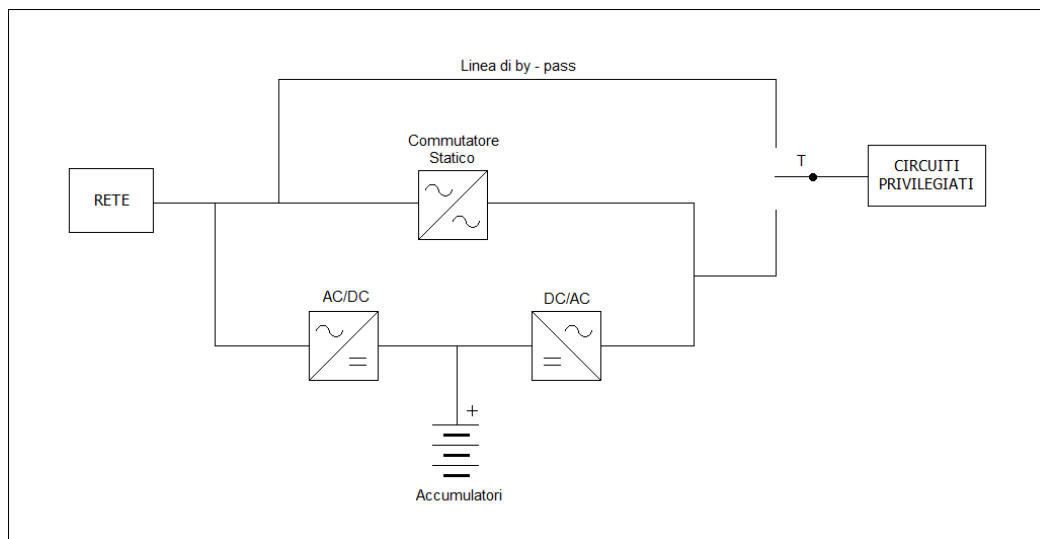


Fig.1. 8: Schema di un UPS.

Esso è costituito da:

- batterie di accumulatori;
- convertitore AC/DC (raddrizzatore) per la carica delle batterie;
- sistema di commutazione;
- convertitore DC/AC (inverter);
- eventuale circuito di by-pass.

Quando è presente la tensione di rete, il raddrizzatore alimenta gli accumulatori regolando automaticamente la corrente a seconda del loro stato di carica; se la tensione di rete viene a mancare o scende sotto l'80% del suo valore nominale, il circuito di commutazione rileva l'anomalia e inserisce la batteria che alimenta il circuito di sicurezza tramite l'inverter. Al ritorno della tensione di rete, dopo un'attesa di un certo tempo per evitare inutili commutazioni, la batteria viene disinserita e riprende automaticamente la sua fase di ricarica.

Il convertitore AC/DC ha il compito di convertire la tensione da alternata a continua e di caricare in tampone la batteria di accumulatori. Il suo controllo, data la presenza di dispositivi

elettronici, provoca un assorbimento di corrente ad alto contenuto armonico da parte dell'UPS con il conseguente bisogno di filtri opportunamente sintonizzati per limitarlo. La batteria di accumulatori alimenta l'inverter qualora la rete subisse interruzioni o perturbazioni mentre l'inverter converte la tensione continua in alternata. Il compito dell'inverter è quello di controllare la tensione e stabilizzarla in frequenza, ampiezza e forma d'onda. Qualora ci dovessero essere dei problemi sull'inverter, il commutatore statico permette di commutare il carico direttamente in rete senza interruzione di tensione.

Se previsto, in genere sugli UPS di media potenza, può essere presente anche il by-pass manuale che permette, in caso di avaria o interventi di manutenzione, di alimentare il carico indipendentemente dall'UPS.

1.5.3 Gruppi elettrogeni

Il gruppo elettrogeno è abbinato alle altre sorgenti sopra elencate che gli permettono di ritardare il proprio intervento, permettendogli una presa di carico graduale con evidente giovamento per il proprio dimensionamento e per la propria vita utile. Ciò fa sì che quest'ultimo sia impiegato per interruzioni medio-lunghe, ossia per le classi 15 e >15 in quanto presenta dei tempi di avviamento di circa dieci secondi. Nel momento in cui sia necessaria la sua messa in servizio, per evitare il parallelo con la rete di alimentazione, la norma CEI 64-8/5 art. 565.1 impone che siano previsti degli interbolcchi nei dispositivi di connessione mentre se si vuole ammettere l'esercizio in parallelo è necessaria l'autorizzazione del Distributore e l'installazione di adeguati dispositivi in modo da garantire un corretto funzionamento. In tal caso il gruppo è costantemente in funzione e garantisce un'alimentazione di classe 0,5 e 0.

Per potenze maggiori di 100 kVA la commutazione dell'alimentazione avviene mediante interruttori motorizzati alimentati dalla sorgente di alimentazione dei servizi ausiliari e da un dispositivo elettronico di comando che, per garantire l'infallibilità, deve essere alimentato tramite batterie di accumulatore con carica in tampone.

Data la pericolosità dei combustibili impiegati nell'alimentazione dei motori del gruppo, i locali in cui essi alloggiavano sono sottoposti alla supervisione della normativa. La Circ. M.I. n. 31/78 art. 2.2.1 stabilisce che i gruppi con potenza maggiore di 25kW devono essere installati in appositi locali aventi resistenza al fuoco REI 20 accessibili al solo personale addestrato e la stessa la stessa circolare nell'articolo 2.1 impone, per i gruppi alimentati a benzina o GPL,

l'installazione al piano terra mentre per quelli a gasolio o a olio combustibile, anche al primo piano interrato.

Per l'ovvio pericolo di esplosione derivante dai combustibili, è necessario applicare le CEI 31-30 e CEI 31-35 per identificare le zone pericolose, e la CEI 31-33 per stabilire la tipologia d'impianto da impiegare.

2 - Cabina di Trasformazione MT/BT

Nel seguente Capitolo sarà affrontato il dimensionamento della cabina di trasformazione MT/BT. Prima di entrare nel vivo della trattazione, è necessario fare una panoramica riguardante le problematiche in fase di progettazione e le normative vigenti. Saranno eseguiti i calcoli di cortocircuito necessari alla scelta delle apparecchiature di manovra e protezione ed eseguito il coordinamento delle protezioni nel rispetto dei limiti imposti dalla società elettrofornitrice in modo da non causare disservizi in caso di condizioni anomale di funzionamento.

2.1 Generalità

La cabina elettrica di trasformazione è costituita nel complesso da più dispositivi atti alla trasformazione della tensione, alla protezione, al sezionamento, alla misura e al controllo delle grandezze del sistema in modo da garantire che le caratteristiche della rete fornite dal Distributore, siano sempre monitorate e riportate ai valori utili per l'esercizio dell'impianto. L'insieme dei dispositivi è costituito da conduttori, apparecchiature di misura e controllo e macchine elettriche e i livelli di tensione forniti dalla società elettrofornitrice sono, in media tensione, quelli di 15kV o 20kV riportati al secondario alla tensione di 400V.

Si può effettuare una prima classificazione delle cabine elettriche in relazione al fatto che esse siano di proprietà di enti pubblici o privati. Avremo nello specifico:

- Cabine pubbliche: di pertinenza della società di distribuzione dell'energia elettrica ed impiegate per l'alimentazione di utenze;
- Cabine private: per questo tipo di cabina si ha una ulteriore suddivisione in cabine urbane, che sono generalmente costruite in muratura, e in cabine rurali che sono spesso installate all'esterno direttamente sul traliccio della MT. Le cabine private sono di proprietà dell'utente e ubicate nei locali stessi dello stabilimento o comunque nelle immediate vicinanze e possono alimentare sia utenze civili che industriali con fornitura dalla rete pubblica in MT.

Esse sono costituite da tre locali distinti come mostrato in Fig.2. 1:

- Locale di consegna: questo locale ospita le apparecchiature di manovra di proprietà della Società Elettrofornitrice. Per far fronte ad eventuali esigenze future della stessa, è necessario che abbia dimensioni tali da consentire l'eventuale messa in opera del sistema entra esci qualora l'ente distributore volesse realizzarlo in un secondo momento per far fronte, ad esempio, a nuove richieste di allacciamento. Il locale di

consegna rappresenta il confine tra l'impianto di pertinenza dell'ente distributore e quello di utenza ed è qui che sarà presente il punto di prelievo dell'energia.

- locale misura: contiene i gruppi di misura e deve essere accessibile da strada aperta al pubblico per permettere l'intervento al personale autorizzato indipendentemente dalla presenza dell'utente.
- locale utente: è di pertinenza dell'utente e contiene il trasformatore, gli apparecchi di misura e le apparecchiature di manovra e protezione in MT e BT.

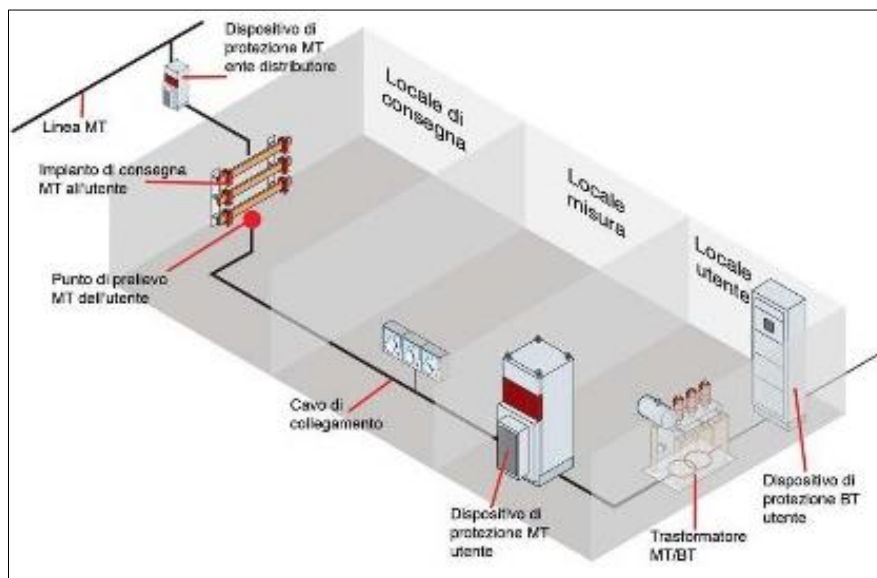


Fig.2. 1: Esempio di cabina elettrica privata di trasformazione MT/BT.

I trasformatori impiegati all'interno di queste cabine hanno normalmente:

- primario a triangolo in modo da bloccare le terze armoniche delle correnti magnetizzanti ed eventuali correnti di carico omopolari all'interno dei lati del triangolo in modo da impedire che si riversino in rete. In questo modo le forze

elettromotrici indotte al secondario sono ancora sinusoidali in quanto i flussi magnetici risultano non distorti.

- secondario a stella con centro stella accessibile in modo da permettere la messa a terra del neutro e rendere facilmente disponibili le tensioni concatenate e di fase. Un ulteriore vantaggio riguarda la sicurezza, in quanto nell'eventualità di guasto tra lato media e bassa, la tensione al secondario resta prossima al valore di fase garantendo un minor pericolo per le persone e preservando l'isolamento.

Le modalità di connessione della cabina alla rete MT, sono regolate dalle prescrizioni dell'Ente Distributore che fornisce una documentazione ufficiale con i criteri e le modalità di allacciamento. Tali regolamentazioni sono riferite alle reti MT esercite a tensioni nominali di 15kV e 20kV mentre, per altri valori di tensione, si possono applicare per analogia. Esse saranno relative alle massime potenze installabili, ai tempi di intervento delle protezioni per permettere l'esercizio di un impianto selettivo, e ai parametri di cortocircuito della rete. A titolo di esempio si riportano le prescrizioni di una società elettrofornitrice italiana relative alle potenze massime installabili per i trasformatori di cabina, aventi $v_k\% = 6\%$. I valori di potenza ammessi devono rispettare i seguenti vincoli:

- potenza non superiore a 1600 kVA per reti con tensione nominale di 15 kV;7
- potenza non superiore a 2000 kVA per reti con tensione nominale di 20 kV.

C'è da considerare che le macchine, all'inserzione, potrebbero provocare interventi intempestivi delle protezioni a causa della loro brusca energizzazione e, a meno che il cliente non impieghi dei dispositivi che controllino le macchine in modo da non permetterne la contemporanea accensione, il Distributore stabilisce che non è possibile installare più di tre trasformatori ciascuno di taglia pari ai limiti precedentemente indicati, in cabine con sbarre BT separate. Per quanto riguarda i trasformatori in parallelo, non può essere installata una

potenza complessiva superiore ai limiti indicati. Il Distributore impone tali limiti per limitare la complessiva potenza di cortocircuito che, se eccessiva, in caso di guasto ai morsetti secondari del trasformatore, può determinare l'intervento della protezione di massima corrente in testa alla linea MT di distribuzione.

Un notevole inconveniente dell'installazione di trasformatori in parallelo deriva dal fatto che la corrente di cortocircuito alle sbarre d'uscita è circa il doppio di quella della soluzione che prevede le sbarre di bassa tensione separate mediante congiuntore, a parità di potenza installata. Tutto ciò determina un aumento della corrente di cortocircuito sul lato BT e di conseguenza un aumento della corrente richiamata sul lato MT. Per far fronte a ciò, sarà necessario l'impiego di interruttori con tarature e potere di interruzione maggiori, caratterizzati da notevoli ingombri ed elevati costi.

Per chiarire meglio il concetto, si riporta in Fig.2. 2 la situazione appena descritta:

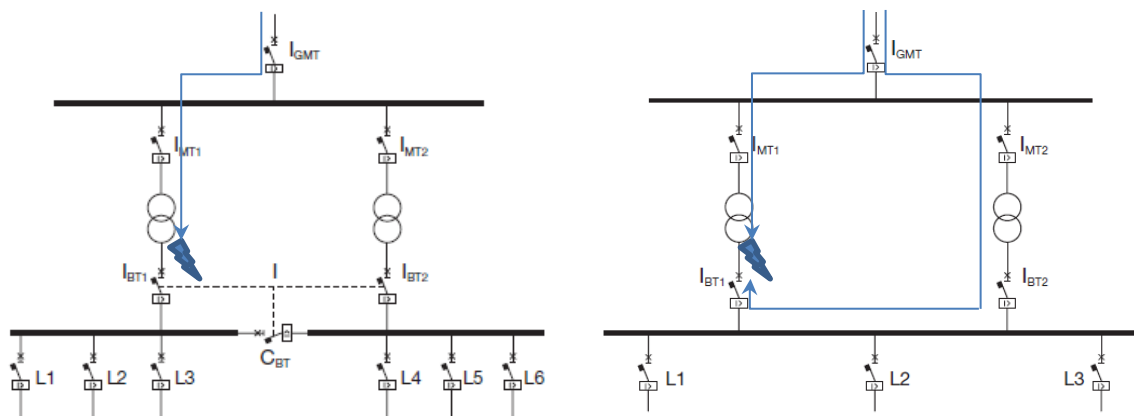


Fig.2. 2: Nel caso di trasformatori non in parallelo (sx) per un guasto come quello riportato in figura, l'interruttore IGMT è interessato da una corrente di cortocircuito che risulta pressoché doppia nel caso di trasformatori in parallelo (dx) in quanto il guasto è alimentato da entrambi i rami.

Dalla figura si può notare che la messa in parallelo di due trasformatori comporta un dimezzamento dell'impedenza equivalente che, trascurando l'impedenza della rete, comporterà un raddoppio della corrente di cortocircuito alle sbarre. Per un guasto al secondario di una delle due macchine, l'interruttore generale di MT (I_{GMT}) sarà interessato dal passaggio di questa corrente che sarà maggiore rispetto al caso in cui i trasformatori siano eserciti con sbarre di BT separate comportando un aumento dei costi d'installazione.

Il Distributore stabilisce che l'impiego di due trasformatori in parallelo di potenza tale da superare il limite di 2 MVA per reti alla tensione nominale di 20 kV e 1,6 MVA per reti alla tensione nominale di 15 kV, necessiterà dell'impiego di interruttori di MT di taglia tale da non permettere la selettività amperometrica, rischiando l'intervento dell'interruttore MT del Distributore in caso di guasto sul lato BT d'utente.

Un'ulteriore prescrizione imposta dal Distributore e valida a prescindere dal tipo di collegamento delle sbarre, prevede che il trasformatore sia connesso al punto di prelievo del locale di consegna, attraverso un cavo di collegamento in rame che deve avere una sezione minima di 95mm^2 indipendentemente dalla potenza fornita. Tale cavo è di proprietà dell'utente e deve essere il più corto possibile [4].

2.2 Esame della cabina di trasformazione MT/BT

A questo punto si può proseguire con il dimensionamento dei componenti della cabina di trasformazione dell'impianto in esame. In accordo con quanto detto, saranno fornite le prescrizioni della società elettrofornitrice che costituiranno i dati di partenza e successivamente sarà ricavato il layout della cabina e le relative caratteristiche di intervento dei dispositivi di protezione.

Per quanto riguarda i carichi, è necessario identificare quelli privilegiati e quelli ordinari in modo da gestirli separatamente in caso di assenza della rete. Come è stato visto al Cap. 1, infatti, in questo tipo di impianti è necessario distinguere i carichi assegnandogli un certo livello di priorità in base al ruolo svolto in modo da non compromettere il normale svolgimento delle attività mediche e soprattutto la sicurezza delle persone. La prima classificazione, che suddivide i carichi in "privilegiati" ed "ordinari" ci permette di riconoscere i carichi che potranno essere disalimentati in caso di mancanza dell'alimentazione poiché ritenuti non essenziali per le attività e per la sicurezza. Sulla base dei carichi privilegiati, invece, è necessario dimensionare le sorgenti di sicurezza in modo da far sì che sia sempre garantita la loro alimentazione. Le norme prevedono un'ulteriore suddivisione dei carichi privilegiati in differenti classi che si distinguono in base alla loro tolleranza alla mancanza di alimentazioni. Per i locali medici, come già visto, le classi di interesse sono tre e si riportano nel seguito per completezza:

- classe 0,5: carichi che ammettono la mancanza di alimentazione per un tempo di 0,5 s;
- classe 15: carichi che ammettono la mancanza di alimentazione per un tempo di 15 s;
- Classe >15: carichi che ammettono la mancanza di alimentazione per un tempo maggiore di 15 s;

E' importante conoscere la tipologia dei carichi da questo punto di vista, in quanto ciò può permettere di stabilire un allaccio temporizzato degli stessi con particolari vantaggi per la vita del gruppo elettrogeno, che può fornire l'energia ai carichi in maniera graduale senza particolari sforzi in fase di accensione.

2.2.1 Analisi dei carichi

Nell'impianto in questione, siamo in presenza di un carico complessivo di potenza $P = 720 \text{ kW}$ con fattore di potenza $\cos\phi = 0,9$. I carichi presentano la seguente suddivisione di Tab.2. 1:

Tipo di carico	Potenza
Carichi Ordinari	420 kW
Carichi Privilegiati	300 kW

Tab.2. 1: Suddivisione dei carichi in base alle necessità di continuità dell'alimentazione.

Per stabilire con esattezza la classe di appartenenza di alcuni carichi quali ad esempio specifici apparecchi elettromedicali, è necessario che il progettista interagisca con la direzione sanitaria in modo da ottenere informazioni a riguardo in base alle specifiche esigenze della struttura.

Per completezza si riporta in Tab.2. 2 un riepilogo riguardante alcuni tipi di utenze tipiche di un ospedale e le relative classi di appartenenza:

Struttura sanitaria	Classe	Utenze
Ambulatori medici di superficie $\leq 500 \text{ m}^2$	Classe 0,5	Illuminazione scialitica del tavolo operatorio e apparecchi elettromedicali che necessitano di alimentazioni entro 0,5 s
	Classe 15	Illuminazione di sicurezza: <ul style="list-style-type: none">- Per l'esodo- In locali di gruppo 1 (un apparecchio per locale) - In locali di gruppo due (il 50% dei locali)- Rilevazione ed estinzione incendi- Sistemi per estrazione fumi- Apparecchi elettromedicali con

		necessità di alimentazione pari a 15s - Fornitura gas medicali - Sistemi di chiamata
	Classe >15	Apparecchi di sterilizzazione, riscaldamento, condizionamento, apparecchi di cottura, frigoriferi e caricabatterie per locali medici
Ambulatori medici di superficie > 500 m ²	Classe 0,5	Illuminazione di sicurezza, antincendio, impianti di rilevazione ed allarme incendio
	Classe 15	Ascensori antincendio, impianto idrico antincendio, impianto di diffusione sonora

Tab.2. 2: Utenze tipiche di un ospedale e relative classi di appartenenza.

2.2.2 Scelta della configurazione di cabina

La scelta del trasformatore è dettata soprattutto dall'analisi dei carichi grazie ai quali si può stabilire la potenza di dimensionamento, ma per effettuare la scelta migliore è utile tener conto di alcuni fattori. E' necessario prevedere quale sia il funzionamento del trasformatore e mantenere un margine per eventuali ampliamenti futuri dell'impianto. In generale i trasformatori presentano i più alti rendimenti durante il funzionamento a circa l'80% della potenza nominale, per cui, prevedendo un futuro aumento della potenza installata dell'impianto, sarà necessario impiegare almeno 1 MVA di potenza delle macchine. Volendo impiegare moderni trasformatori in resina, si riescono ad ottenere dei rendimenti massimi anche durante il funzionamento continuativo a potenza nominale, rendendo non necessario il sovradimensionamento della macchina. In più, questi trasformatori sopportano sovraccarichi del 15 – 20% mantenendo delle perdite accettabili senza alcuna diminuzione della propria vita utile. Tutto ciò garantisce un vantaggio per l'impianto e un risparmio energetico grazie alle perdite ridotte di queste macchine.

Data la particolarità degli ambienti ospedalieri, è necessario prendere dovute precauzioni per realizzare un impianto affidabile e capace di far fronte a eventuali disservizi su una macchina o sulle apparecchiature ad essa connesse, senza compromettere la continuità e la sicurezza. Ovviamente, per queste ragioni, sarà scartata l'ipotesi dell'installazione di una sola macchina e saranno proposte nel seguito tre soluzioni qui riassunte:

- Caso 1: tre trasformatori da 500 kVA di cui uno di riserva;
- Caso 2: due trasformatori da 630 kVA;
- Caso 3: due trasformatori da 800 kVA.

Saranno nel seguito analizzati i tre casi confrontandoli del punto di vista economico, dell'affidabilità e della qualità garantita all'impianto.

CASO 1 – Tre trasformatori da 500 kVA di cui uno di riserva

Per i motivi già visti al Cap.1, a causa della particolarità degli ambienti, è necessario garantire l'affidabilità del sistema tramite la continuità dell'alimentazione e, a tale scopo, è stato deciso di proporre la possibilità di installare tre trasformatori identici di cui uno di riserva.

Per quanto riguarda la gestione dei carichi sulla sbarra BT, essi saranno organizzati in maniera tale da suddividere le potenze per ciascun trasformatore sia per quanto riguarda i carichi ordinari che quelli privilegiati. Ricordiamo che in questa configurazione lavoreranno due macchine contemporaneamente e ciascuna di esse avrà alla sbarra una potenza pari a 360 kW così ripartita:

- $P = 210$ kW carichi ordinari;
- $P = 50$ kW carichi privilegiati di classe 0,5;
- $P = 25$ kW carichi privilegiati di classe 15;
- $P = 75$ kW carichi privilegiati di classe > 15 .

Ovviamente la ripartizione sopra elencata è puramente indicativa in quanto il suo conseguimento dipenderà dalla distribuzione delle potenze dei carichi dell'impianto.

Il layout di cabina risulta quello illustrato in Fig.2. 3:

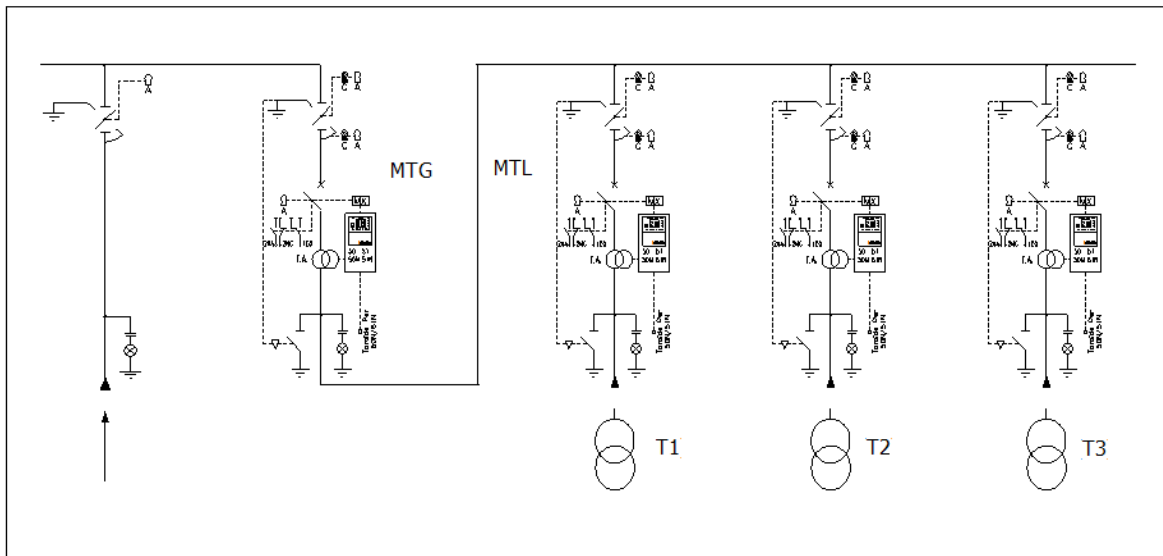


Fig.2. 3: Layout Cabina MT/BT : MTG rappresenta l'interruttore generale di media tensione ed MTL il generico interruttore di media tensione di macchina.

La Fig.2. 3 mostra lo schema elettrico della cabina d'utente. Dall'arrivo della linea dell'Ente Distributore, avremo [5]:

- Una cella di tipo IM di arrivo o partenza impiegata per l'allaccio alla rete del Distributore;
- Interruttore generale DM1 - G dotato di protezione e risalita sbarre. Sono presenti due sezionatori interbloccati fra loro per permettere la messa a terra a monte e valle per interventi in sicurezza sul dispositivo di protezione e sui TA in sicurezza;
- Tre interruttori di macchina tipo DM1 – A. La cella è costituita da una partenza con protezione, due sezionatori interbloccati per facilitare le manovre di manutenzione in cabine e permettere la messa a terra a monte e valle del dispositivo di protezione in modo da intervenire su esso e sui TA;
- Spie di segnalazione di presenza rete;

Le macchine sono dotate di interruttori di BT inter bloccabili per permettere il funzionamento di soli due trasformatore per volta e, inoltre, grazie ad un ulteriore interblocco con apposito congiuntore di sbarra, non è permesso il funzionamento delle macchine in parallelo. In questo modo si garantisce un certo livello di ridondanza, buona affidabilità del sistema e sicurezza nella continuità del servizio che è più che mai richiesta in questo genere di impianti. La sbarra di BT in cui sono rappresentati gli organi di manovra appena descritti, è riportata in Fig.2. 4:

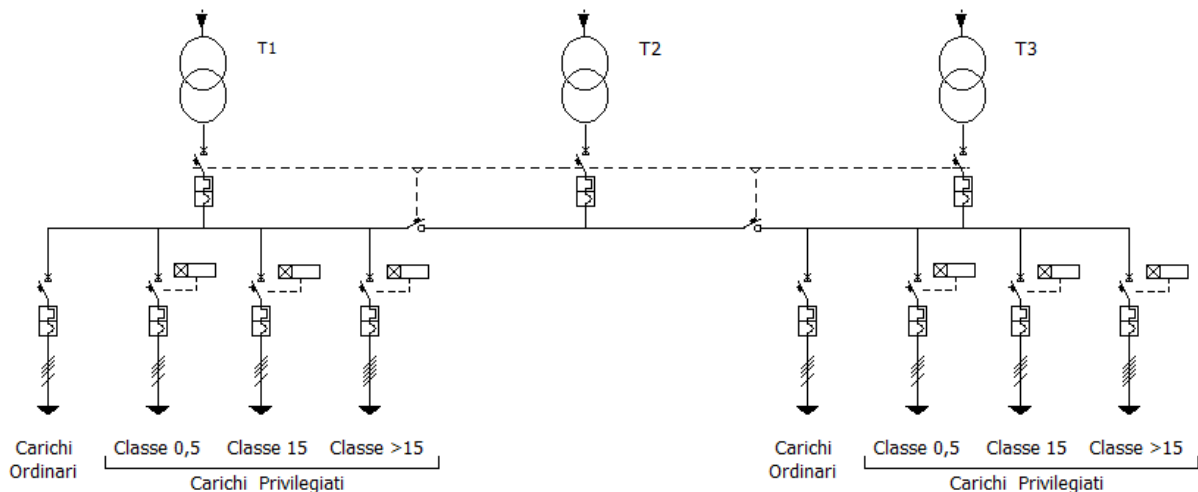


Fig.2. 4: Organizzazione dei carichi alla sbarra di BT. I carichi sono suddivisi in ordinari e privilegiati a seconda delle esigenze e, sulla base di questi ultimi, saranno dimensionate le sorgenti di alimentazione ausiliarie.

L'uso di un trasformatore di riserva ci permette di ovviare a problemi derivanti da guasti in cabina su uno dei macchinari che determinano il fuori servizio dell'intera linea del trasformatore, mentre per problemi derivanti da guasti sulla rete del distributore o sulla linea generale di media tensione, sarà prevista, come prescrivono le norme, l'installazione di un generatore di riserva opportunamente dimensionato per l'alimentazione dei carichi privilegiati. Il vantaggio di questa configurazione riguarda la possibilità di far lavorare le macchine a rendimenti elevati e garantire un alto livello di sicurezza e di continuità del servizio in caso di avaria. Ciascun trasformatore, infatti, lavorerà all'80% della potenza di dimensionamento e grazie ai congiuntori installati sulla sbarra di BT, sono garantite le manovre di commutazione tra l'eventuale trasformatore guasto e quello di riserva. Per favorire l'allungamento della vita utile della macchina si può prevedere un sistema di commutazione temporizzato per l'inserzione ciclica dei trasformatori in modo da far funzionare sempre due trasformatori contemporaneamente, ma disconnettendo volta per volta una macchina sostituendola con quella di riserva. In questo modo nessun trasformatore è mantenuto perennemente in riserva e si può avere uno sfruttamento massimo di tutte le

macchine. Il trasformatore di riserva permette di raggiungere un alto livello di sicurezza permettendo di mantenere in funzione l'intero impianto in ogni momento anche in caso di fuori servizio di una delle macchine. Nella remota ipotesi in cui si verificasse il fuori servizio contemporaneo di due macchine su tre, il sistema permetterebbe comunque l'alimentazione dei carichi privilegiati grazie al margine disponibile di potenza di 500 kVA. Questa soluzione si presta anche a favorire ampliamenti futuri della potenza installata a patto di utilizzare trasformatori in resina con caratteristiche tali da garantire un range di rendimento massimo fino al funzionamento della macchina alla potenza nominale. In questo modo, a fronte di una potenza apparente del carico di 800 kVA, si avrebbero a disposizione 200 kVA di potenza installabile in caso di necessità. Eventualmente, qualora fosse necessaria la disponibilità di una potenza maggiore, si potrebbe valutare l'ipotesi di far funzionare tutti e tre i trasformatori contemporaneamente organizzando i nuovi carichi in modo essere alimentati dal nuovo trasformatore entrato in servizio. Ovviamente in questo caso verrebbe meno il requisito di affidabilità, ma è opportuno considerare che l'ipotesi di un ampliamento così esteso dell'impianto è particolarmente remota. Dal punto di vista economico, la soluzione presenta degli elevati costi a causa della ridondanza richiesta. Volendo effettuare una stima del costo complessivo dell'opera dal punto di vista elettrico, si possono considerare i dati in Tab.2. 3:

Apparecchiature	Prezzi
Trasformatore in resina da 500 kVA	€ 9'645,21
Interruttore BT $I_n = 800$ A	€ 4'577,50
Quadro MT Generale	€ 30'000,00
Quadro MT di macchina	€ 23'000,00

Tab.2. 3: Costi apparecchiature elettriche per la soluzione 1.

Nello specifico, il costo da sostenere per la realizzazione complessiva è riportato in Tab.2. 4:

Apparecchiature	Numero	Prezzo
Trasformatore in resina da 500 kVA	3	€ 28'935,63
Interruttore BT $I_n = 800$ A	3	€ 13'732,50
Quadro MT Generale	1	€ 30'000,00
Quadro MT di macchina	3	€ 69'000,00
TOTALE COMPLESSIVO:		€ 141'668,13

Tab.2. 4: Costo totale per la realizzazione della soluzione 1.

CASO 2 – Due trasformatori da 630 kVA

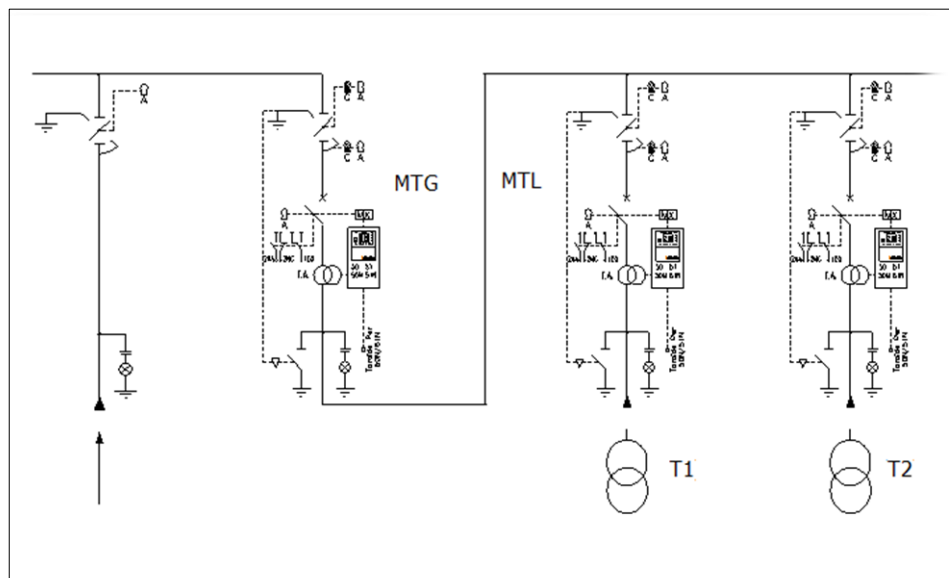


Fig.2. 5: Layout della cabina nel caso di impiego di due trasformatori da 630 kVA.

In questa situazione si decide di considerare due trasformatori identici non funzionanti in parallelo, della potenza di 630 kVA ciascuno come mostrato in Fig.2. 1. Come si può notare, la potenza complessivamente installata è minore rispetto a quella del caso precedente e non sono previste riserve, ma è comunque garantita la completa alimentazione dell'impianto a valle. Per quanto riguarda la gestione dei carichi sulla sbarra BT, le ipotesi rimangono le stesse del caso precedente, quindi saranno suddivise equamente tra i due trasformatori.

Ciascun trasformatore lavorerà al 63% della potenza di dimensionamento risultando sovradimensionato. La sbarra di bassa tensione sarà dotata di appositi congiuntori atti a garantire le manovre di commutazione in caso di guasto su un trasformatore in modo da permettere l'alimentazione attraverso il secondo. Ovviamente, in questa situazione un unico trasformatore risulterebbe sovraccaricato e sarà necessaria l'implementazione di un sistema di gestione dei carichi in modo da scollegare la potenza in eccesso. E' immediato notare come l'affidabilità del sistema risulti notevolmente ridotta rispetto al caso precedente a causa della mancanza di una riserva.

Qualora si verificasse il fuori servizio di una macchina, un unico trasformatore, sebbene capace di lavorare in servizio continuativo con un sovraccarico del 20%, non sarebbe sufficiente ad alimentare l'intero impianto e di conseguenza non sarebbe garantita l'affidabilità del caso precedente. Con questa soluzione, ipotizzando di lavorare sempre nelle condizioni nominali con $\cos\phi = 0,9$, in caso di guasto si potrà far fronte ad una potenza di 567

kW e sarà possibile alimentare tutti i carichi privilegiati (300 kW) ma sarà necessario effettuare un distacco dei carichi ordinari alimentandone solo una porzione pari a 267 kW su 420 kW totali. In realtà si dovrebbero tenere in considerazione le perdite lungo le linee stimabili all'incirca al 2,5% della potenza totale e di conseguenza sarebbe necessario disalimentare altri carichi ordinari. In questo caso assumeremo che tale sovraccarico sia tollerabile dal macchinario in quanto di lieve entità e della sola durata dell'intervento manutentivo o di riparazione del guasto. In conclusione, in caso di guasto la situazione dei carichi sarà la seguente:

- P = 300 kW (carichi privilegiati);
- P = 267 kW (carichi ordinari).

Come risulta dai calcoli, è garantita l'alimentazione di circa il 64 % dei carichi ordinari. La situazione sopra descritta è relativa all'uso di un trasformatore funzionante alla potenza nominale. Qualora si volesse far lavorare il trasformatore all'80% della potenza nominale, il carico complessivo sarebbe pari a 453,6 kW con $\cos\phi = 0,9$ e quindi la distribuzione dei carichi sarebbe:

- P = 300 kW (carichi privilegiati);
- P = 153,6 kW (carichi ordinari).

In questo caso è garantita l'alimentazione del 37 % dei carichi ordinari. Effettuiamo una stima di massima del costo dell'opera dal punto di vista elettrico. I dati sono riportati in Tab.2. 5:

Apparecchiature	Prezzi
Trasformatore in resina da 630 kVA	€ 10'195,50
Interruttore BT $I_n = 1000$ A	€ 5'024,00
Quadro MT Generale	€ 30'000,00
Quadro MT di macchina	€ 23'000,00

Tab.2. 5: Costo delle apparecchiature per la soluzione 2.

Nel caso in esame, il costo da sostenere per la realizzazione complessiva è riportato in Tab.2.

6:

Apparecchiature	Numero	Costo
Trasformatore in resina da 630 kVA	2	€ 20'391,00
Interruttore BT $I_n = 1000$ A	2	€ 10'048,00
Quadro MT Generale	1	€ 30'000,00
Quadro MT di macchina	2	€ 46'000,00
TOTALE COMPLESSIVO:		€ 106'439,00

Tab.2. 6: Costo totale per la realizzazione della soluzione 2.

CASO 3 – Due trasformatori da 800 kVA

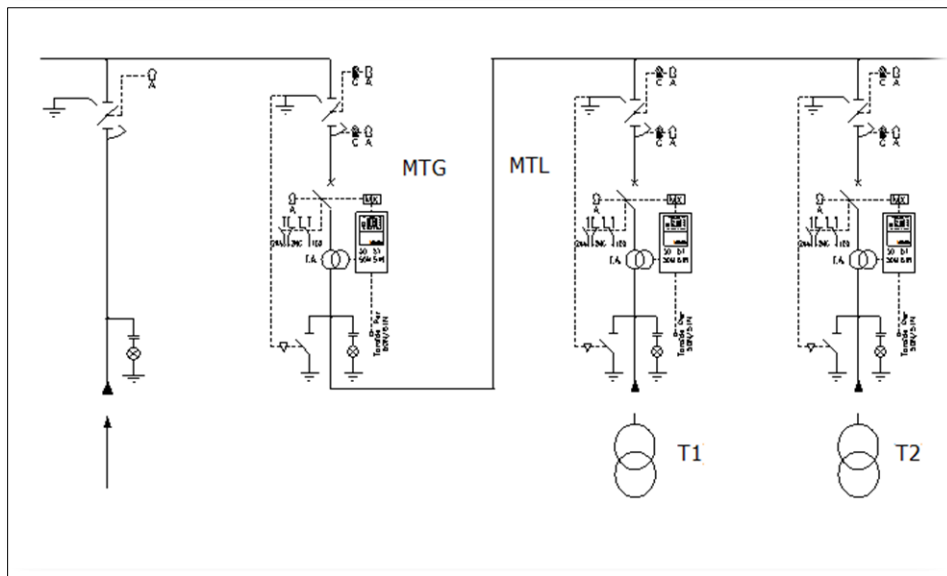


Fig.2. 6: Layout della cabina nel caso di impiego di due trasformatori da 800 kVA.

Nella situazione illustrata in Fig.2. 6 si prevede l'installazione di due trasformatori identici non funzionanti in parallelo, della potenza di 800 kVA ciascuno.

Qualora si ammettesse il funzionamento contemporaneo dei trasformatori, le macchine lavorerebbero al 50% della potenza di dimensionamento con rendimenti molto bassi e con un

conseguente aumento dei consumi di energia elettrica. In caso di fuori servizio di un trasformatore, sarebbe garantita l'alimentazione dell'intero impianto qualora il trasformatore permettesse di ottenere un rendimento massimo anche in corrispondenza di una potenza di lavoro pari alla nominale, altrimenti, qualora volessimo far funzionare il trasformatore all'80% della sua potenza nominale, avremo questa situazione:

- $P = 300 \text{ kW}$ (carichi privilegiati);
- $P = 276 \text{ kW}$ (carichi ordinari).

E' garantita l'alimentazione della totalità dei carichi privilegiati e del 66% dei carichi ordinari. La situazione è migliore rispetto al caso precedente in quanto, per ciò che riguarda i carichi ordinari, si ha quasi un raddoppio della potenza alimentabile.

Anche qui è previsto un congiuntore di sbarra per alimentare tutto l'impianto con un unico trasformatore in caso di guasto e la potenza dell'intero impianto risulta interamente ricoperta se si ammette l'utilizzo, al solito, di trasformatori con rendimento costante fino al 100% della potenza nominale. Considerando ciò, si potrebbe pensare di esercire la cabina mantenendo costantemente in funzione un solo trasformatore e utilizzando il secondo come riserva. In questo caso, si dovrebbe sostenere il costo di acquisto di un trasformatore da 800 kVA da far eventualmente lavorare alternativamente al primo in modo da realizzare una commutazione ciclica come nel Caso 1.

Durante il normale funzionamento dell'impianto si avrebbe sempre un unico trasformatore in funzione e ci sarebbe una riserva del 100% a completa disposizione per eventuali ampliamenti futuri.

Un aspetto importante da considerare è che, usando un trasformatore da 800 kVA funzionante in servizio continuativo alla potenza nominale, un aumento della potenza installata nell'impianto comporterebbe l'uso contemporaneo dei trasformatori e di conseguenza alcune problematiche, prima fra tutte l'assenza di una riserva e quindi del requisito di continuità del servizio in caso di guasto. Un altro problema deriverebbe dal fatto che i trasformatori lavorerebbero continuativamente con rendimenti troppo bassi richiedendo alla rete a monte un assorbimento di energia eccessivo e per ovviare a questo problema si potrebbe pensare una riorganizzazione dei carichi in modo da garantire ai trasformatori di funzionare a rendimenti

accettabili. Questo provvedimento, però, è subordinato all'entità dell'aumento di potenza derivante dall'ampliamento dell'impianto e alla valutazione di costi e benefici, ma in generale sarebbe un costo ingiustificato in quanto comporterebbe la riorganizzazione dei quadri di BT.

Dal punto di vista economico avremo la situazione riportata in Tab.2. 7 e Tab.2. 8:

Apparecchiature	Prezzi
Trasformatore in resina da 800 kVA	€ 11'516,90
Interruttore BT $I_n = 1250$ A	€ 5'972,50
Quadro MT Generale	€ 30'000,00
Quadro MT di macchina	€ 23'000,00

Tab.2. 7: Costo delle apparecchiature per la soluzione 3.

Apparecchiature	Numero	Costo
Trasformatore in resina da 800 kVA	2	€ 23'033,80
Interruttore BT $I_n = 1250$ A	2	€ 11'945,00
Quadro MT Generale	1	€ 30'000,00
Quadro MT di macchina	2	€ 46'000,00
TOTALE COMPLESSIVO:		€ 110'978,8

Tab.2. 8: Costo totale per la realizzazione della soluzione 3.

Sulla base delle valutazioni effettuate, la soluzione migliore risulta quella relativa alla scelta di tre trasformatori da 500 kVA di cui uno di riserva. Da un punto di vista economico la scelta comporta un maggior esborso, ma assolutamente accettabile data il minimo impatto percentuale rispetto al esborso complessivo derivante dalla realizzazione dell'intera opera. In più, la cabina così realizzata, rispetta i principali criteri di sicurezza ed affidabilità necessari per gli ambienti ospedalieri e, inoltre, questa soluzione ci permette di disporre di un margine di potenza di 200 kVA per ampliamenti futuri dell'impianto ed eventualmente un ulteriore margine di 500 kVA se si decide di far lavorare tutti e tre i trasformatori contemporaneamente.

E' necessario fare una precisazione su questo punto in quanto occorre notare che, in caso di ampliamento, la potenza totale dell'impianto non potrà eccedere il limite di 1500 kVA, il che vorrebbe dire quasi raddoppiare la potenza installata.

Ovviamente questa non è una situazione facilmente verificabile ma, anche considerando ampliamenti più ridotti che richiederebbero comunque la messa in servizio del trasformatore usato come riserva, sorgerebbe il problema della mancanza di una scorta per far fronte a un'eventuale fuori servizio di una delle tre macchine. In questo caso, il problema può essere ovviato gestendo opportunamente i carichi, attraverso apposite commutazioni, in modo da garantire sempre l'alimentazione dei carichi privilegiati che rappresentano la priorità di questi impianti.

Dal punto di vista energetico, i trasformatori installati in questa configurazione, lavoreranno in condizioni tali da permettere la salvaguardia della loro vita utile e presentando alti rendimenti.

Le caratteristiche tecniche dei trasformatori scelti sono nel seguito sono riportate [6]:

$A_n = 500 \text{ kVA}$	$v_{cc\%} = 6\%$
$V_{1n} = 20 \text{ kV}$	$P_j = 6,7 \text{ kW}$
$V_{2n} = 400 \text{ V}$	$D - yn 11$
$P_o = 1,4 \text{ kW}$	Tipo: Resina

Ricaviamo ora i dati più importanti da considerare che potranno essere utili durante la trattazione.

Innanzitutto è utile calcolare la corrente nominale primaria e secondaria della macchina attraverso le seguenti relazioni:

$$I_{1n} = \frac{A_n}{\sqrt{3} \cdot V_{1n}} = 14,4 \text{ A}$$

$$I_{2n} = \frac{A_n}{\sqrt{3} \cdot V_{2n}} = 721,7 \text{ A}$$

Successivamente è necessario ricavare l'impedenza equivalente riportata al secondario che servirà per la determinazione della resistenza e della reattanza serie della macchina:

$$Z_{TR} = \frac{V_{2n}^2 \cdot v_{cc\%}}{100 \cdot A_n} = 0,0192 \Omega$$

Attraverso il dato delle perdite joule nominali, fornito dal costruttore, si possono ricavare i parametri resistivi e induttivi:

$$R_{TR} = \frac{P_{jn}}{3 \cdot I_{2n}^2} = 0,0043 \Omega$$

$$X_{TR} = \sqrt{Z_{TR}^2 - R_{TR}^2} = 0,0187 \Omega$$

Considerando che i trasformatori installati in cabina sono chiamati ad eseguire un servizio continuativo durante il funzionamento dell'impianto, salvo i periodi previsti per il fermo macchina o per eventuali interventi manutentivi, è opportuno effettuare considerazioni di carattere energetico durante la fase di scelta.

Tali considerazioni riguardano la valutazione delle condizioni di funzionamento cui è sottoposto il trasformatore in modo da tenere conto anche di questi fattori in fase di progettazione: le condizioni di funzionamento della macchina, infatti, incidono sugli assorbimenti di energia dalla rete che possono essere più o meno consistenti in base ai parametri costruttivi e al carico da alimentare.

Dall'organizzazione dei carichi considerata in Tab.2. 1, e attraverso i dati della macchina forniti dal costruttore, si può ricavare la corrente assorbita da ciascun trasformatore (I_{bT}) in condizioni normali di funzionamento. Tale corrente determinerà le perdite joule e di conseguenza il rendimento effettivo della macchina:

$$I_{bT} = \frac{P_{sb}}{\sqrt{3}V_{2n}\cos\varphi} = \frac{360 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,9} = 577,35 \text{ A}$$

Dove $P_{sb} = 360 \text{ kW}$ indica la potenza relativa alla sbarra alimentata da ciascuna macchina secondo la ripartizione indicata in Tab.2. 1.

Il rendimento di un trasformatore è definito come rapporto tra la potenza erogata al secondario e quella assorbita al primario:

$$\eta = \frac{P_r}{P_a}$$

Poiché la potenza assorbita può anche essere espressa con la seguente espressione:

$$P_a = P_r + P_0 + P_j$$

otteniamo anche:

$$\eta = \frac{P_r}{P_r + P_0 + P_j}$$

Dove P_0 rappresenta le perdite nel ferro e P_j le perdite nel rame nelle condizioni di funzionamento considerate.

L'espressione del rendimento ci permette di notare che esso non è costante a tutti i carichi ma varia al variare dei termini che lo compongono e quindi al variare delle condizioni di funzionamento e della corrente erogata. In generale, ai carichi molto ridotti il trasformatore presenta bassi rendimenti, per questo motivo è importante scegliere la macchina in modo tale da sfruttarla adeguatamente.

Per calcolare in modo corretto il rendimento, è necessario considerare le effettive condizioni di funzionamento della macchina in modo da ricavare le perdite joule che dipendono dal quadrato della corrente di impiego:

$$P_j = 3 \cdot R_{TR} \cdot I_{bT}^2 = 4,3 \text{ kW}$$

Per quanto riguarda le perdite nel ferro, esse rimangono costanti al variare delle condizioni di funzionamento della macchina, per cui, considerando quelle fornite dal costruttore nel nostro caso pari a 1,4 kW, avremo:

$$\eta = \frac{\sqrt{3} V_{2n} I_{bT} \cos\varphi}{\sqrt{3} V_{2n} I_{bT} \cos\varphi + P_0 + P_j} \cdot 100 =$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 577,35 \cdot 0,9}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 577,35 \cdot 0,9 + 1,4 \cdot 10^3 + 4,3 \cdot 10^3} \cdot 100 = 98,4\%$$

La scelta di impiegare due trasformatori da 500 kVA, ci permette di ottenere un alto rendimento delle macchine adottando la distribuzione dei carichi scelta. Il sistema complessivo assorbirà dalla rete, chiamata a fornire le perdite della macchina, una potenza complessiva pari a:

$$P_{ass} = \frac{2 P_{sb}}{\eta} \cdot 100 = \frac{2 \cdot 360 \cdot 10^3}{98,4} \cdot 100 = 731,7 \text{ kW}$$

L'aver considerato il doppio della P_{sb} , è giustificato dal fatto che la potenza totale dell'impianto è il doppio di quella fornita dal singolo trasformatore. Qualora le taglie delle macchine non fossero adeguate alla potenza ed al tipo di carico da alimentare, si potrebbero verificare dei rendimenti molto bassi con un conseguente assorbimento di energia dalla rete per far fronte alle grosse perdite. Ovviamente è opportuno prestare attenzione a questo aspetto per evitare sprechi di energia che comportano maggiori assorbimenti dalla rete ed un inevitabile aumento dei costi.

A questo punto, scelta la tipologia d'impianto da installare e le caratteristiche dei macchinari, è necessario stabilire la configurazione della cabina per garantire un impianto affidabile nel rispetto della normativa.

Nel seguito saranno affrontate le problematiche riguardanti la scelta degli interruttori di manovra e protezione presenti in cabina che si baseranno sui calcoli di corto circuito della rete considerata e sulla valutazione dei criteri di selettività nella scelta degli interruttori da impiegare.

Lo schema di cabina è riportato in Fig.2. 7:

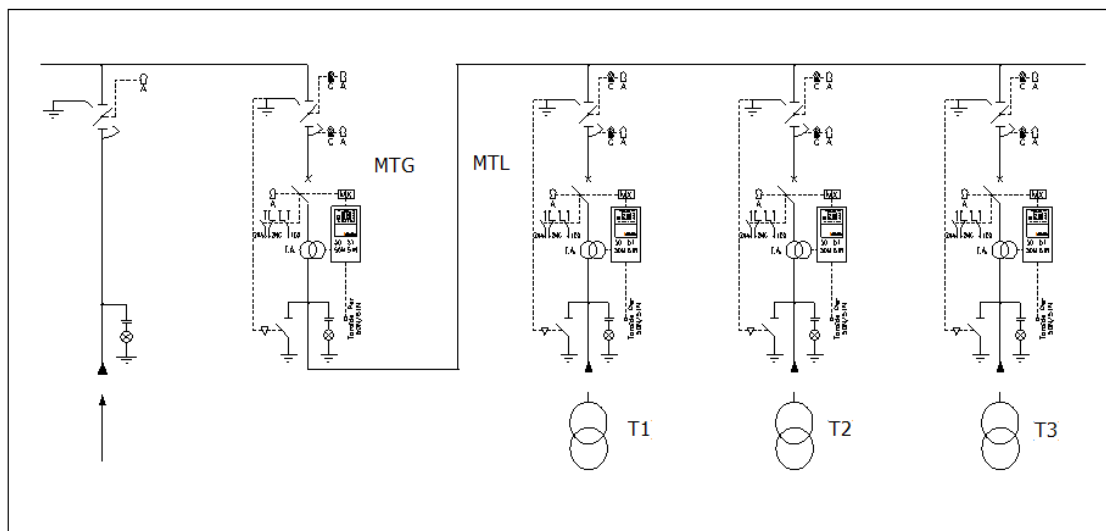


Fig.2. 7: Layout della cabina di trasformazione MT/BT.

Tutti gli interruttori di protezione sono equipaggiati con relè per protezione 50, 51, 51N, che rappresentano rispettivamente il relè di massima corrente di fase ad azione istantanea, relè di

massima corrente di fase ad azione ritardata e relé di massima corrente omopolare temporizzato. La sbarra di bassa tensione si presenta come già illustrato in Fig.2. 4.

2.2.3 Calcoli di rete

Il punto di partenza per la trattazione riguarda l'allaccio alla rete del Distributore che, previa richiesta, fornisce i principali parametri per le grandezze di interesse:

- **Rete**

Tensione nominale di esercizio: $V_n = 20 \text{ kV}$

Frequenza nominale: $f_n = 50 \text{ Hz}$

Corrente di cortocircuito trifase: $I_{3k} = 12,5 \text{ kA}$

Corrente di guasto monofase a terra: $I_{g0} = 50 \text{ A}$

Tempo di eliminazione del guasto a terra: $t_{g0} \geq 10 \text{ s}$

Corrente di doppio guasto a terra: $I_{2g0} = 10,8 \text{ kA}$

Corrente capacitiva verso terra: $I_{c0} = 2 \text{ A}$

I tipi di protezione da adottare in cabina di trasformazione, dipendono anche dalle caratteristiche della linea MT di proprietà dell'utente. In generale sono sempre necessarie le protezioni 50, 51 e 51N ma il Distributore impone l'impiego della protezione 67N⁷ qualora la linea MT dell'utente abbia estensione maggiore di 350 m con una tensione di 20 kV o 460 m alla tensione nominale di 15 kV.

Nel caso in cui si sia nelle condizioni di doverla installare, la protezione 67N interviene per guasti monofase a terra all'interno dell'impianto del cliente, mentre la 51 N è dedicata all'eliminazione rapida di guasti doppi monofase. Tra i parametri forniti dal Distributore, il punto che interessa questo aspetto e che determina i limiti massimi ammissibili di estensione

⁷ Il relé 67N rappresenta la protezione direzionale di terra e garantisce l'intervento per un guasto monofase verso terra.

della linea MT, è quello relativo al valore della corrente capacitiva verso terra. Tale valore è stabilito dal Distributore e rappresenta il massimo contributo di corrente capacitiva di guasto monofase a terra che la rete MT di proprietà dell'utente può fornire al sistema. Tutto ciò è necessario in quanto, a causa delle capacità dell'eventuale linea MT d'utente, i valori di corrente di guasto monofase potrebbero essere alterati in maniera considerevole e, se le lunghezze superassero i limiti prescritti, causerebbero interventi intempestivi delle protezioni del Distributore.

A tal proposito, quest'ultimo suggerisce una relazione attraverso la quale è possibile stimare l'entità della corrente capacitiva dovuta alla linea MT dell'utente:

$$I_c = 0.2 \cdot L \cdot U \text{ [A]}$$

essendo L la lunghezza in km della rete MT in cavo di proprietà dell'utente ed U la tensione di rete MT in kV. Nel caso di impianti con parti di rete MT in linea aerea con conduttori nudi bisognerà tenere conto anche di tale contributo pari a:

$$I_c = 0,003 \cdot L \cdot U \text{ [A]}$$

ottenendo in definitiva l'espressione generale:

$$I_c = 0,003 \cdot L_1 \cdot U + 0.2 \cdot L_2 \cdot U \text{ [A]}$$

Dove L_1 rappresenta la lunghezza, espressa in km, del tratto di linea aerea ed L_2 quella del tratto di linea in cavo. In caso di condizione limite, ossia di lunghezza della linea pari a 350 m alla tensione di esercizio $U = 20$ kV, il contributo di corrente capacitiva risulta pari a 1,4 A definito dal distributore come valore limite di corrente considerando una soglia cautelativa del 30%, rispetto al valore da esso comunicato.

Il Distributore fornisce il valore delle tarature da rispettare per i dispositivi di protezione installati nella cabina dell'utente e sarà necessario rispettare tali vincoli in modo da garantire la selettività con l'interruttore di MT in testa alla linea di distribuzione ed evitare scatti intempestivi dello stesso in caso di guasto nell'impianto di utente. I valori da comunicati sono riportati in Tab.2. 9:

Sigla Protezioni	Soglie	Corrente di Regolazione	Tempi di Intervento
51	1° soglia – sovraccarico	≤ 230 A	$\leq 0,50$ s
50	2° soglia – cortocircuito	≤ 600 A	$\leq 0,12$ s
51N	1° soglia	≤ 3 A	$\leq 0,12$ s

Tab.2. 9: Valori di corrente e tempi di intervento delle protezioni comunicati dal Distributore.

Nel nostro caso non sarà presente la protezione 67N in quanto l'estensione della linea MT in cavo è inferiore a 350 m.

Per la scelta dei componenti da installare e per il coordinamento delle protezioni, è necessario eseguire i calcoli di cortocircuito. È importante, dunque, conoscere la corrente di cortocircuito al secondario del trasformatore per dimensionare i relativi apparecchi di manovra e protezione e, affinché ciò sia possibile, dovranno essere ricavati i parametri di rete (resistenza e reattanza) e quelli del trasformatore stesso già calcolati al paragrafo precedente. Nel seguito saranno eseguiti i calcoli utilizzando come riferimento il lato BT della macchina.

RETE

Per la determinazione dei parametri di rete, conoscendo il valore di corrente di corto circuito fornito dal distributore, si può ricavare il modulo dell'impedenza della rete a monte riferita al lato MT tramite la relazione:

$$Z'_{Rete} = \frac{V_n}{\sqrt{3}I_{3k}} = 0,923 \Omega$$

Qualora non fosse disponibile il valore del $\cos\phi$ di corto circuito della rete, si possono ricavare i parametri resistivi e reattivi della rete attraverso le seguenti relazioni:

$$X'_{Rete} = 0,995 \cdot Z'_{Rete} = 0,918 \Omega$$

$$R'_{Rete} = 0,1 \cdot X'_{Rete} = 0,0918 \Omega$$

Infine si riportano i valori trovati al lato BT della macchina attraverso il rapporto di trasformazione K, ottenendo:

$$X_{Rete} = \frac{X'_{Rete}}{K^2} = 0,369 \text{ m}\Omega$$

$$R_{Rete} = \frac{R'_{Rete}}{K^2} = 0,0369 \text{ m}\Omega$$

I parametri appena trovati, andranno sommati ai parametri del trasformatore in modo da ottenere l'impedenza complessiva rispetto al punto in cui si vuole calcolare la corrente di cortocircuito. La rete considerata è riportata in Fig.2. 8:

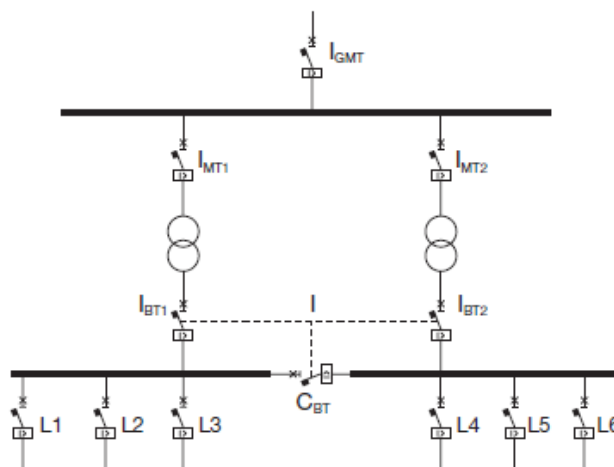


Fig.2. 8: Layout della rete considerata comprensiva dei due trasformatori funzionanti contemporaneamente, interruttori e sbarra BT con relative partenze.

Per calcolare la corrente di cortocircuito sulla sbarra BT, sommiamo i contributi resistivi e reattivi della rete e del trasformatore e calcoliamo l'impedenza complessiva. In questa trattazione è stata trascurata l'impedenza del cavo di collegamento di MT in quanto di basso valore vista la breve estensione e la sezione elevata.

Il contributo resistivo totale sarà:

$$R_{TOT} = R_R + R_{TR} = 4,3249 \text{ m}\Omega$$

Mentre quello reattivo:

$$X_{TOT} = X_R + X_{TR} = 19,084 \text{ m}\Omega$$

A questo punto procediamo con il calcolo del modulo dell'impedenza e con la determinazione della corrente di cortocircuito sulla sbarra BT e sul lato MT del trasformatore:

$$Z_{TOT} = \sqrt{X_{TOT}^2 + R_{TOT}^2} = 19,568 \text{ m}\Omega$$

$$I_{kBT} = \frac{V_{2n}}{\sqrt{3} \cdot Z_{TOT}} = 11,8 \text{ kA}$$

$$I'_{kBT} = \frac{I_{kBT}}{K} = 236 \text{ A}$$

Per quanto riguarda la scelta delle protezioni è necessario considerare altri due valori di corrente necessari per il corretto dimensionamento. Il primo rappresenta la corrente di spunto del trasformatore che non deve causare l'intervento degli interruttori all'inserzione della macchina, mentre il secondo è il valore della corrente di picco della corrente di corto circuito sulle sbarre BT che stabilirà il potere di chiusura dell'apparecchio (I_{cm}).

All'inserzione dei trasformatori o di un qualsiasi altro circuito fortemente induttivo, si possono raggiungere elevate condizioni di saturazione nel ferro per cui si potrebbe instaurare un'elevata corrente che rende problematico il coordinamento delle protezioni. Di tale corrente

si considera il valore di cresta I_{oi} che è un multiplo del valore efficace della corrente nominale primaria I_{1n} ed è legato ad esso tramite il coefficiente K_i , secondo la relazione:

$$I_{oi} = K_i \cdot I_{1n}$$

Il verificarsi o meno di tale sovracorrente dipende da vari fattori, come ad esempio l'induzione residua nel nucleo, ma soprattutto l'istante in cui avviene l'inserzione. Il fenomeno della sovracorrente di inserzione (in-rush current) si verifica nella sua massima intensità se l'inserzione avviene nell'istante in cui la tensione di alimentazione passa per lo zero mentre, viceversa, non si avrà la sovracorrente se l'inserzione avviene nell'istante in cui la tensione è massima. Il fattore K_i , fornito dal costruttore della macchina, tiene conto di questi fenomeni e permette di valutare il valore di picco della corrente di inserzione che, nel caso di un carico ohmico-induttivo, presenta l'andamento mostrato in Fig.2. 9:

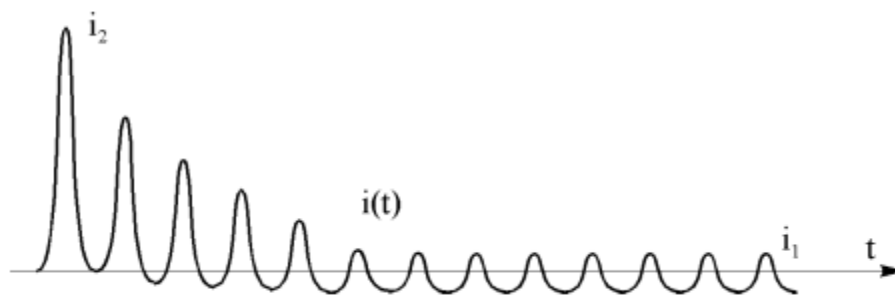


Fig.2. 9: Andamento della in-rush current di un circuito ohmico induttivo.

La presenza della resistenza dell'avvolgimento fa sì che i valori iniziali della corrente, di solito molto elevati (i_2), si smorzino e tendano successivamente ad assumere i valori di regime (i_1).

L'allegato F della Norma CEI 11-35 contiene una tabella con i valori di K_i da considerare per i trasformatori in olio e le costanti di tempo secondo cui la corrente di inserzione si smorza. La conoscenza dei due parametri è indispensabile per la taratura delle protezioni che, evidentemente, non devono intervenire all'inserzione del trasformatore.

Per i trasformatori in resina i due parametri devono essere chiesti al costruttore e, per completezza, si riportano in Tab.2. 10:

S_{nTR} [kVA]	$k_i = \frac{i_{pin-rush}}{I_{1nTR}}$	$t_{in-rush}$
250	10,5	0,18
315	10	0,20
400	10	0,25
500	10	0,25
630	10	0,26
800	10	0,30
1000	10	0,30
1250	10	0,35
1600	10	0,40
2000	9,5	0,40

Tab.2. 10: Valori di k_i e $t_{in-rush}$ in funzione della taglia del trasformatore in resina.

In cui:

- S_{nTR} = Potenza apparente nominale del trasformatore;
- I_{1nTR} = Corrente primaria nominale del trasformatore;
- $t_{in-rush}$ = Costante di tempo all'inserzione;
- $i_{p\ in-rush}$ = Valore di picco della corrente di inserzione (I_{oi}).

Considerando un trasformatore da 500 kVA, otterremo $K_i = 10$ e $t_{in-rush} = 0,25$ s. Tenendo conto che $I_n = 14,43$ A, il valore di picco della corrente di inserzione sarà:

$$I_{oi} = K_i \cdot I_n = 144,33 \text{ A}$$

In Fig.2. 10 si riporta il grafico fornito dalla norma che rappresenta la curva che separa il campo di possibile intervento di una generica protezione da quello di sicuro non intervento in caso di inserzione di un trasformatore:

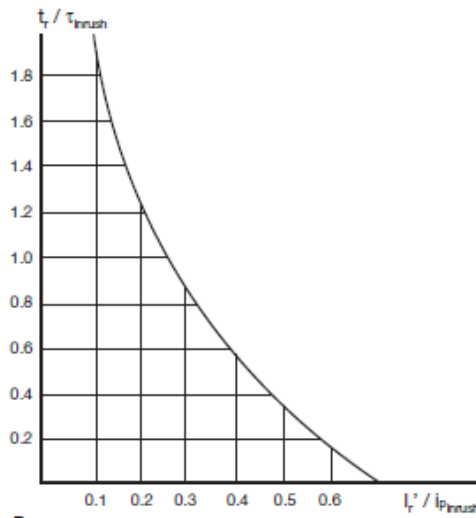


Fig.2. 10: Grafico fornito dalla norma per la verifica dei tempi di taratura dei dispositivi di protezione del trasformatore.

Dove:

- $t_{in-rush}$ = costante di tempo della corrente d'inserzione;
- t_r = regolazione del tempo di ritardo della protezione;
- I_r' = soglia di regolazione dell'interruttore;

Per il corretto perseguimento della selettività, è utile utilizzare il grafico in figura per essere certi di fornire il corretto ritardo agli interruttori di media tensione affinché non intervengano durante la fase di energizzazione della macchina.

Per quanto riguarda la corrente di corto circuito sulla sbarra BT, si deve tenere conto del fatto che il corto circuito è un fenomeno che presenta un picco iniziale dovuto alla presenza della componente unidirezionale della corrente che si smorza con costante di tempo dipendente dalla tipologia del circuito, per cui l'interruttore deve poter sopportare tale picco che è necessario valutare in fase di progettazione. La corrente di cortocircuito i_k può essere considerata composta da due componenti di cui una simmetrica i_s con forma d'onda sinusoidale ed una unidirezionale i_u con andamento esponenziale. La componente

unidirezionale, durante il periodo transitorio rende la corrente di cortocircuito asimmetrica caratterizzata da un valore di picco che può variare da $2 I_k$ a $2 \sqrt{2} I_k$, essendo I_k il valore efficace della corrente di cortocircuito i_k . Trascorso il periodo transitorio, la corrente di cortocircuito diventa simmetrica presentando un andamento come riportato in Fig. 2. 11:

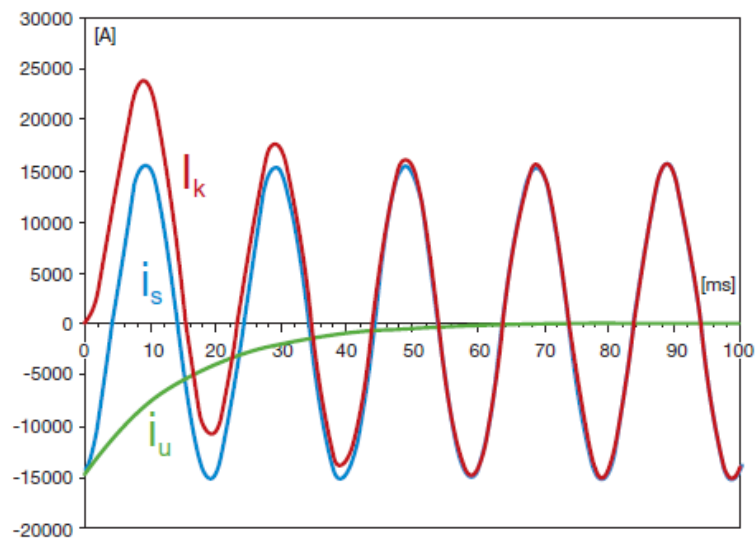


Fig.2. 11: Generico andamento della corrente di cortocircuito costituito da una componente unidirezionale ed una sinusoidale.

Conoscendo le caratteristiche della rete considerata, è immediato il calcolo del valore efficace della corrente di corto circuito ma non si può dire lo stesso del relativo valore di picco.

A tal proposito, la norma CEI EN 60909-0 fornisce indicazioni utili per questo calcolo ed in particolare indica la seguente relazione:

$$I_p = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_k$$

Con:

$$k = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3R}{X}}$$

Dove R e X rappresentano la resistenza e la reattanza totale a monte del punto di guasto.

Nel nostro caso:

$$I_p = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_k = 25,3 \text{ kA}$$

$$I'_p = \frac{k \cdot \sqrt{2} \cdot I_k}{K} = 506,2 \text{ A}$$

2.2.4 Tarature degli interruttori

Nel seguito saranno considerati gli interruttori di protezione e specificate le caratteristiche elettriche e le soglie di taratura. Per la scelta di queste ultime, si è seguita la linea guida del DK 5600 di ENEL che prevede:

- Soglia di massima corrente 51.S1 (51):

Soglia: (30 ÷ 600)A a gradini di 15A;

Tempo di ritardo: (0,05÷5) s a gradini di 0,05 s;

- Soglia di massima corrente 51.S2 (50):

Soglia: (30÷3000)A a gradini di 15A;

Tempo di ritardo: (0,05÷0,5) s a gradini di 0,05 s;

- Soglia max corrente omopolare 51 N:

Soglia (0,5 ÷ 10)A a gradini di 0,5 A;

Tempo di ritardo (0,05 ÷ 1) s, a gradini di 0,05 s;

Quanto sopra è riferito a TA conformi a quelli indicati nel DK 5600, cioè con rapporto di trasformazione 300:5. In caso di adozione di TA con diverso rapporto di trasformazione, i campi di taratura del relé devono essere tali da consentire, in ogni caso, l'impostazione di tarature per entrambe le soglie nel campo compreso fra 60 A e 1500 A primari. I trasformatori di misura impiegati per le protezioni omopolari, devono anch'essi essere conformi a quelli indicati dal DK 5600 e quindi avere rapporto di trasformazione 100:1. In caso di adozione di trasformatori con diverso rapporto di trasformazione, i campi di taratura del relé devono essere tali da consentire, in ogni caso, l'impostazione di tarature per entrambe le soglie nel campo compreso fra 1 A e 5 A primari. Per scegliere il dispositivo che più si presta alla protezione di un circuito, è necessario conoscere le grandezze di maggiore interesse che caratterizzano il comportamento dello stesso e sono indice della sua adeguatezza. Di seguito diamo una breve descrizione di questi parametri:

- Corrente nominale I_n : rappresenta il valore di corrente che caratterizza il relè di protezione installato e determina, in base ai settaggi disponibili sul relè, la caratteristica di protezione dell'interruttore stesso.
- Potere di interruzione nominale estremo in cortocircuito I_{cu} : rappresenta il valore efficace della componente simmetrica della corrente di cortocircuito ed è il massimo valore che l'interruttore è in grado di interrompere.
- Potere di chiusura nominale in cortocircuito I_{cm} : rappresenta il massimo picco della corrente presunta che l'interruttore deve essere in grado di stabilire. Tale valore di I_{cm} deve essere posto in relazione al valore della corrente di picco presente nel punto di installazione dell'interruttore e dovrà essere verificata la relazione $I_{cm} > i_p$.
- Corrente nominale di breve durata ammissibile I_{cw} : rappresenta il valore della corrente efficace della componente alternata che l'interruttore è in grado di portare senza danneggiamenti per un determinato tempo, solitamente pari a 1s e 3s.

Questi parametri dovranno essere scelti adeguatamente in modo da garantire anche la salvaguardia dell'interruttore in condizioni di guasto. La scelta delle soglie di intervento e dei tempi di ritardo è importante per garantire la selettività dell'impianto a valle ed assicurare che,

in caso di guasto, intervenga sempre il dispositivo in prossimità dello stesso e non quello a monte. Una corretta taratura delle soglie permette, infatti, di evitare disservizi che potrebbero causare problemi di natura più o meno grave a seconda delle linee interessate. In più, gestendo opportunamente i tempi di intervento, si può garantire a valle del dispositivo di BT di macchina, un range di tempo disponibile da sfruttare per eseguire la selettività cronometrica tra i dispositivi BT dell'impianto, realizzando un sistema sicuro, affidabile e di alta qualità. Per quanto riguarda le soglie amperometriche, invece, è importante conoscere le correnti di corto circuito massime e minime nei punti di interesse in modo da garantire la sicurezza e la corretta protezione in caso di guasto. Per perseguire correttamente la selettività, è necessario considerare il comportamento dei dispositivi di protezione e tenere conto dell'imprecisione dei trasformatori di misura e dei relè di protezione che li compongono. Per far fronte a questa problematica ed evitare di incorrere in scatti intempestivi, saranno considerati i seguenti margini di tolleranza per le grandezze di taratura delle protezioni:

- $1,05 \div 1,2$ per la protezione dal sovraccarico a tempo dipendente;
- $0,95 \div 1,05$ per la protezione dalle sovracorrenti a tempo indipendente.

Per cui, detta I_r la corrente di regolazione del dispositivo di protezione, avremo un intervento in un range di valori compreso tra $1,05I_r$ e $1,2I_r$ per i dispositivi a tempo dipendente, e tra $0,95I_r$ e $1,05I_r$ per quelli a tempo indipendente. Nel seguito saranno effettuate le opportune verifiche ed infine sarà controllato il rispetto della selettività.

INTERRUTTORE GENERALE MT

L'interruttore generale di media tensione è installato in prossimità del punto di consegna del Distributore e deve garantire la selettività a monte con il dispositivo dell'ente fornitrice e a valle con gli interruttori MT e BT di macchina. Facendo riferimento alle soglie imposte dal Distributore e riportate in Tab.2. 9, si prevede la regolazione del dispositivo posto all'arrivo a $I_r = 150$ A, con intervento tra 142,5 A e 157,5 A, mentre la temporizzazione sarà regolata a 450 ms, consentendo un gradino di selettività con l'interruttore MT a valle. L'intervento della soglia di cortocircuito istantaneo è regolato a 540 A. L'inserzione contemporanea dei due

trasformatori da 500 kVA provoca l'instaurarsi di una corrente d'inserzione dei due trasformatori, pari a $2 I_{oi} = 289 \text{ A}$ e per controllare la correttezza delle soglie di taratura del dispositivo di protezione scelto, è necessario riferirsi all'estratto dell'allegato F della norma CEI 11-35 riportato in Fig.2. 10. Partendo dalla soglia di intervento scelta e pari a 150 A, si ottiene $I_r / I_{oi} = 150/289 = 0,52$ e dal diagramma in figura si ricava $t_r / t_{in-rush} = 0,28$. Considerati questi valori, il tempo di ritardo minimo affinché non si verifichi l'intervento del dispositivo generale di MT all'inserzione dei trasformatori, deve essere $t_r = 0,28 t_{in-rush} = 0,28 \cdot 0,25 = 0,07 \text{ s}$, notevolmente inferiore al ritardo considerato per la protezione e pari a 0,45 s. Ciò vuol dire che la protezione non interverrà durante le manovre di messa in tensione del trasformatore e dunque la taratura è corretta. Per quanto riguarda la soglia della protezione omopolare, si sceglie una corrente di taratura $I_0 = 2 \text{ A}$ ed un tempo di intervento $t_{int} = 0,35 \text{ s}$ in modo da essere selettivi con le soglie del Distributore [7]. Le caratteristiche dell'interruttore generale di media tensione sono riportate in Tab.2. 11:

CARATTERISTICHE		TARATURE	
<i>Modello: SEPAM 20 S20</i>		<i>Soglia 51</i>	$I_{tr51} = 150 \text{ A}$
$V_n = 24 \text{ kV}$			$t_{51} = 0,45 \text{ s}$
$V_t = 50 \text{ kV}$		<i>Soglia 50</i>	$I_{tr50} = 540 \text{ A}$
$V_{imp} = 125 \text{ kV}$			$t_{50} = 0,1 \text{ s}$
$I_n = 630^8 \text{ A}$		<i>Soglia 51 N</i>	$I_{51N} = 4 \text{ A}$
$I_{cu} = 16 \text{ kA}$			$t_{51N} = 0,50 \text{ s}$
<i>TA (fasi)</i>	$N^\circ = 3$		
	$A_n = 2,5 \text{ VA}$		
	$I_n = 50 \text{ A}$		
<i>TA (omop)</i>	$N^\circ = 1$		
	Toroidale		

Tab.2. 11: Caratteristiche e tarature della protezione MT generale a monte.

⁸ La corrente nominale di 630 A rappresenta un valore standardizzato dalla norma CEI 0-16 che definisce le taglie per le apparecchiature di media tensione. Esso rappresenta la corrente nominale dell'interruttore ed è usato, a livello industriale, come valore di riferimento per uniformare la produzione dei dispositivi. Ogni interruttore, in seguito, sarà caratterizzato attraverso la corrente di regolazione I_r che dipende dall'entità del carico.

In Fig.2. 12 è illustrata la caratteristica di intervento dell'interruttore MT con le soglie appena impostate:

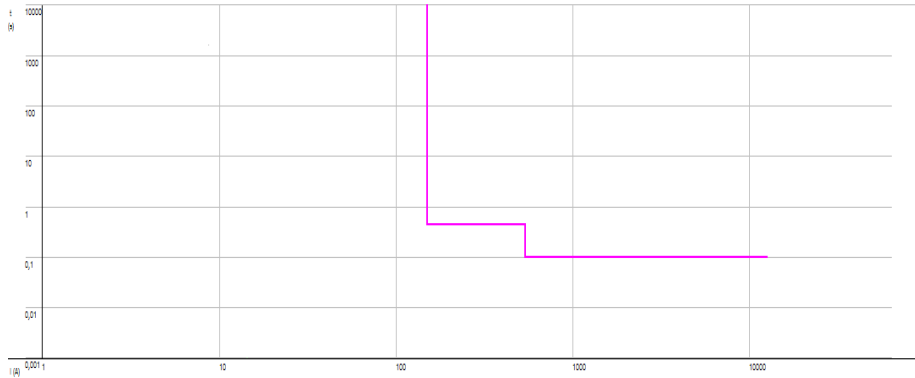


Fig.2. 12: Caratteristica di intervento del dispositivo generale di MT.

Gli apparecchi successivi sono quelli posti a protezione del trasformatore. Ovviamente, essendo i trasformatori uguali, le protezioni avranno le stesse caratteristiche e tarature.

INTERRUTTORE MT DI MACCHINA

La regolazione del dispositivo di protezione MT di macchina deve consentire la selettività con l'interruttore già trattato ed installato nel punto di consegna in MT e con l'interruttore BT di macchina. In realtà non è necessario che gli interruttori MT e BT di macchina siano selettivi in quanto per la continuità di servizio non si ottiene alcun vantaggio, infatti, in caso di intervento di uno dei due, è comunque escluso l'intero ramo. L'unico vantaggio che si otterrebbe dalla selettività, riguarda la riduzione delle manovre sull'interruttore MT per guasto sulla BT che sarebbero effettuate dall'apposito interruttore BT. Il dispositivo di MT ha anche il compito di proteggere la macchina dai sovraccarichi e di garantire la protezione in caso di cortocircuito al secondario del trasformatore, a monte dell'interruttore di bassa tensione.

Per quanto riguarda la protezione dai sovraccarichi, è necessario definire una soglia di corrente di intervento con caratteristica a tempo inverso che permetta la selettività con l'interruttore di bassa tensione. Quest'ultimo è solitamente tarato ad una corrente prossima alla nominale della macchina in modo da non ammettere elevati sovraccarichi per tempi

lunghi, per cui, la corrente di taratura della soglia termica dell'interruttore di MT sarà scelta necessariamente maggiore della $I_{1n} = 14,43$ A. Nel nostro caso, sceglieremo $I_r = 25$ A in modo da evitare intersezioni con la curva del dispositivo di BT mentre per la soglia di corto circuito di breve durata, è opportuno scegliere una corrente di intervento che garantisca la selettività con l'interruttore a monte e, nella fattispecie, sarà adottata una soglia $I_r = 105$ A con un intervento tra 99,75 A e 110,25 A e temporizzazione pari a 0,25 s. Infine, per la soglia istantanea sarà adottato un valore di corrente pari a 450 A con tempo di intervento di 0,05 s permettendo di avere un adeguato margine temporale ed amperometrico con la protezione a monte. Analogamente a quanto fatto per l'interruttore generale di MT, dobbiamo assicurarci che l'interruttore in questione non intervenga durante la fase di messa in tensione del trasformatore di cui è posto a protezione. Considerando che per la singola macchina $I_{oi} = 144,3$ A, otterremo un rapporto $I'_{tr} / I_{oi} = 105/144,3 = 0,727$ che, nel diagramma di Fig.2. 10, ricade nella zona di non intervento, per cui il dispositivo di protezione è correttamente tarato.

Infine, per la soglia di taratura della protezione omopolare si sceglie una corrente di taratura $I_0 = 1,5$ A ed un tempo di intervento $t_{int} = 0,30$ s in modo da essere selettivi con il dispositivo a monte. Le caratteristiche del dispositivo MT di macchina sono riassunte in Tab.2. 12:

CARATTERISTICHE		TARATURE	
<i>Modello: SEPAM 20 S20</i>		<i>Soglia 51</i>	$I_{tr51} = 105$ A
$V_n = 24$ kV			$t_{51} = 0,25$ s
$V_t = 50$ kV		<i>Soglia 50</i>	$I_{tr50} = 450$ A
$V_{imp} = 125$ kV			$t_{50} = 0,05$ s
$I_n = 630$ A		<i>Soglia 51 N</i>	$I_{51N} = 3$ A
$I_{cu} = 16$ kA			$t_{51N} = 0,3$ s
<i>TA (fasi)</i>	$N^\circ = 3$		
	$A_n = 2,5$ VA		
	$I_n = 25$ A		
<i>TA (omop)</i>	$N^\circ = 1$		
	Toroidale		

Tab.2. 12: Caratteristiche e tarature della protezione MT di macchina.

In Fig.2. 13 è illustrata la caratteristica di intervento dell'interruttore MT con le soglie appena impostate:

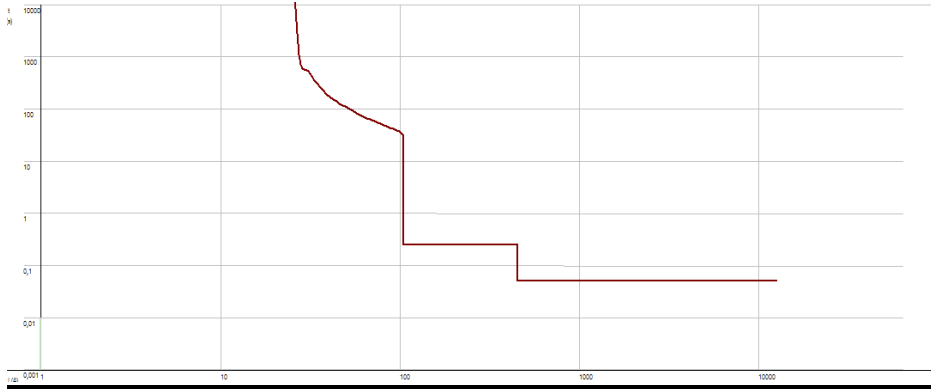


Fig.2. 13: Curva di intervento dell'interruttore MT di macchina.

INTERRUTTORE BT DI MACCHINA

Per quanto riguarda l'interruttore di macchina, la taratura deve essere effettuata garantendo un buon margine per il conseguimento della selettività con gli interruttori a valle.

E' importante regolare l'intervento della soglia di cortocircuito di breve durata a valori selettivi rispetto alla soglia di sovraccarico dell'interruttore generale di arrivo cabina e alla soglia di cortocircuito di breve durata dell'interruttore MT del trasformatore.

Con riferimento alla corrente di corto circuito sul lato BT, $I_{kBT} = 11,8$ kA ed al corrispondente valore di picco $i_p = 25,3$ kA, possiamo scegliere il potere di interruzione dell'interruttore che dovrà essere maggiore della corrente di cortocircuito I_{kBT} e il potere di chiusura che dovrà essere maggiore della corrente di picco i_p .

Per quanto riguarda la taratura del dispositivo, è necessario occuparsene in maniera accurata per garantire la protezione del trasformatore dal sovraccarico.

La taratura della soglia di protezione contro il sovraccarico è regolata dalla norma CEI EN 60947-2 che prescrive il comportamento per gli interruttori posti a protezione dal sovraccarico.

Detta I_r la corrente di taratura del dispositivo si avrà che:

- Se il dispositivo parte da freddo, si avrà il sicuro non intervento in tempi inferiori a quello convenzionale, pari a 2ore, per valori di corrente uguale a $1.05 I_r$;
- a caldo, si avrà il sicuro intervento in tempi inferiori a quello convenzionale per valori di corrente uguale a $1.3 I_r$;
- per valori di corrente compresi tra $1,05 I_r$ e $1,3 I_r$, si ha l'intervento del dispositivo ma senza conoscerne il tempo.

La soglia termica, nel nostro caso, è regolata ad un valore prossimo alla nominale del trasformatore in modo da intervenire per sovraccarichi e, a tal proposito, si sceglie una corrente di regolazione pari a 720 A. Per valori di corrente $I < 1,05 \cdot 720 = 756$ A non si avrà l'intervento del dispositivo ammettendo una sovraccaricabilità della macchina pari a circa il 5%, mentre per valori di corrente $I > 1,3 \cdot 720 = 936$ A, si avrà il sicuro intervento secondo i tempi della curva caratteristica. Nell'intervallo compreso tra $1,05 I_r$ e $1,3 I_r$ l'intervento avverrà al massimo entro due ore.

La soglia di cortocircuito istantaneo viene regolata in modo da garantire l'intervento istantaneo in caso di guasto e la corrente di taratura deve essere necessariamente inferiore a I_{kBT} .

In Tab.2. 13 si riportano le caratteristiche:

CARATTERISTICHE	TARATURE	
<i>Modello: NS800 N Micrologic 5.0</i>	<i>Reg. Termica</i>	$I_t = 720 A$
$V_n = 690 V$		$tr = 8 s$
$I_n = 800 A$	<i>Reg. Magnetica</i>	$I_{sd} = 4,32 kA$
$I_{cu} = 50 kA$		$t_{sd} = istantaneo$
$I_{cm} = 50 kA$		

Tab.2. 13: Caratteristiche e tarature della protezione BT del trasformatore.

In Fig.2. 14 è illustrata la caratteristica di intervento dell'interruttore BT con le soglie appena impostate:

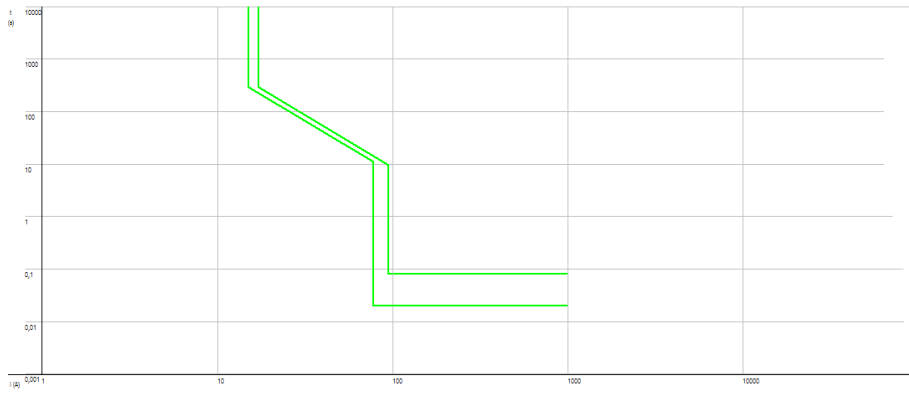


Fig.2. 14: Caratteristiche di intervento della protezione BT del trasformatore.

SEZIONATORI

I sezionatori permettono le manovre per la messa in sicurezza delle parti dell'impianto che devono essere sede di interventi manutentivi in caso di guasto o di eventuale intervento in cabina. Vengono installati a monte e a valle delle linee, degli interruttori di protezione per poter intervenire su di essi, sui TA o sui trasformatori. Sono caratterizzati da dati di targa quali la tensione nominale, la massima tensione fase – terra (V_{ft}) o fase – fase (V_{ff}) sopportabile per un minuto, la corrente nominale e la corrente nominale ammissibile di breve durata (I_{cw}). Si riportano in Tab.2. 14 i parametri dei sezionatori scelti:

CARATTERISTICHE SEZIONATORI LATO MT
$V_n = 24 \text{ kV}$
$V_{ft} = 50 \text{ kV (1 min)}$
$V_{ff} = 60 \text{ kV (1min)}$
$V_{imp} = 125 \text{ kV}$
$I_n = 630 \text{ A}$
$I_{cw} = 16 \text{ kA (3 s)}$

Tab.2. 14: Caratteristiche dei sezionatori.

PROTEZIONE DEI CAVI

E' importante assicurare che il cavo sia protetto nel caso in cui si verificasse un guasto e fosse percorso da una sovracorrente per un certo tempo. L'energia sopportabile dal cavo, deve essere necessariamente maggiore di quella rilasciata dalla sovracorrente entro il tempo di intervento della protezioni, per cui sarà necessario considerare il valore di sovracorrente che si verifica in caso di guasto e il ritardo intenzionale impostato per l'intervento della protezione. La sezione dovrà rispettare la seguente relazione:

$$S \geq \frac{I_k \cdot \sqrt{t}}{K_{cu}}$$

Con:

- $K_{cu} = 143$ per il rame;
- I_k = corrente di corto circuito presunta;
- t = tempo di intervento della protezione.

Nel nostro caso, per il cavo MT avremo:

$$S \geq \frac{I \cdot \sqrt{t}}{K_{cu}} = \frac{12,5 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{0,05}}{143} = 19 \text{ mm}^2$$

Bisogna garantire la protezione del cavo BT qualora si verificasse il minor valore di corrente di cortocircuito ed essere sicuri che questo provochi l'intervento delle protezioni in modo da proteggere la linea e il trasformatore. Oltre al valore di corrente di cortocircuito trifase, è quindi necessario considerare il valore di corrente per guasto bifase e monofase. La corrente di cortocircuito bifase è data dall'espressione:

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_k$$

Che nei trasformatori con collegamento triangolo – stella, richiama al primario, su due fasi, una corrente:

$$I'_{k2} = \frac{I_{k2}}{\sqrt{3} K} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} I_k}{\sqrt{3} K} = \frac{I_k}{2 K}$$

E sulla terza fase una corrente pari a:

$$I'_{k2} = \frac{2I_{k2}}{\sqrt{3} K} = \frac{I_k}{K}$$

Secondo la ripartizione riportata in Fig.2. 15:

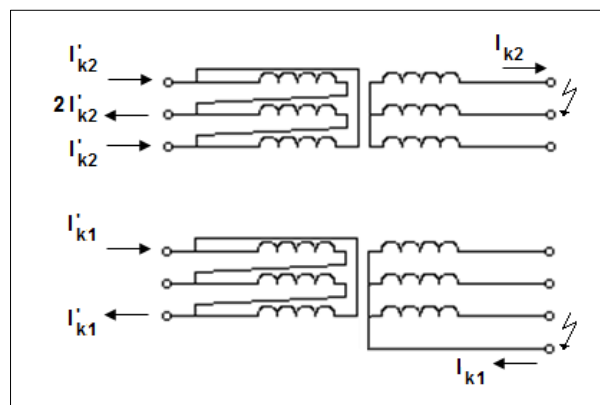


Fig.2. 15: Distribuzione delle correnti in un trasformatore, in funzione del tipo di guasto.

La corrente di cortocircuito fase – neutro, al secondario, richiama al primario una corrente pari a:

$$I'_{k1} = \frac{I_k}{\sqrt{3} K}$$

su due fasi come riportato nella medesima figura. Si ricorda che K rappresenta il rapporto di trasformazione del trasformatore definito come $K = V_{1n}/V_{2n} = 50$.

A favore della sicurezza è utile considerare un abbassamento di tensione cautelativo del 5% per cui le correnti di cortocircuito minime riportate al primario, per un guasto al secondario saranno:

$$I'_{kmin 1} = 0,95 \frac{2I_k}{\sqrt{3} K} = 0,55 \frac{I_k}{K}$$

$$I'_{kmin 2} = 0,95 \frac{I_k}{2 K} = 0,47 \frac{I_k}{K}$$

Come mostrato dalle relazioni, la $I'_{kmin 2}$ risulta la più piccola tra le due correnti e quindi su di essa sarà effettuato il controllo della corretta taratura della protezione.

Nel nostro caso la minima corrente di cortocircuito bifase riportata al primario sarà:

$$I'_{kmin 2} = 0,47 \cdot \frac{I_{kBT}}{K} = 110,9 \text{ A}$$

Se tale valore di corrente determina l'intervento della protezione MT, allora la linea è protetta. Poiché la taratura dell'interruttore MT di macchina è impostata a $I_{tr51} = 105 \text{ A}$, per un guasto bifase al secondario interverrà in 0,2 s. Il cavo è quindi protetto.

Una volta stabilite le protezioni, le loro caratteristiche e le relative tarature secondo i criteri di selettività, si riporta in Fig.2. 16 quanto riscontrato attraverso la simulazione della rete tramite un software di progettazione di impianti.

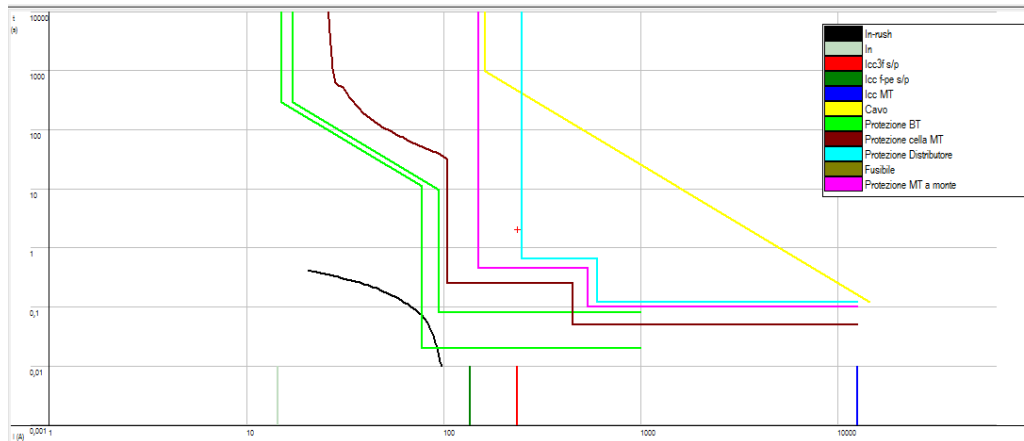


Fig.2. 16: Curve caratteristiche dell'interruttore generale di MT (fucsia), MT di macchina (marrone), BT di macchina (verde), e del distributore (celeste). Inoltre è rappresentata la caratteristica di inserzione del trasformatore (nero) ed i livelli delle correnti di cortocircuito trifase (rosso), monofase (verde) e della rete di distribuzione (blu).

Si può notare l'assenza di intersezioni tra le curve caratteristiche degli interruttori impiegati e tra esse e la curva d'inserzione del trasformatore. E' stata perseguita la selettività cronometrica ed amperometrica tra gli interruttori MT di cabina e del distributore e lo stesso è stato ottenuto tra gli interruttori MT e BT di macchina.

2.2.5 Il locale cabina

Il locale cabina è organizzato in modo da rispettare le prescrizione imposte da ENEL. L'ente prevede, infatti, la presenza di un locale appositamente dedicato al distributore e avente dimensioni minime 2,3 x 3m.

Tale locale deve garantire la possibilità di installazione di due scomparti entra-esci ed uno dedicato alle misure, in più deve essere prevista la possibilità di inserire uno scomparto per un'eventuale linea in derivazione.

Per quanto riguarda il locale misure, le dimensioni minime imposte sono di 1,2 x 3m.

Il locale utente ha dimensioni che dipendono dal numero di macchine installate e dagli ingombri dei quadri MT, BT, delle varie apparecchiature impiegate e dei sistemi di rifasamento dei trasformatori [8].

Nel nostro caso, la cabina ha le dimensioni riportate in Fig.2. 17:

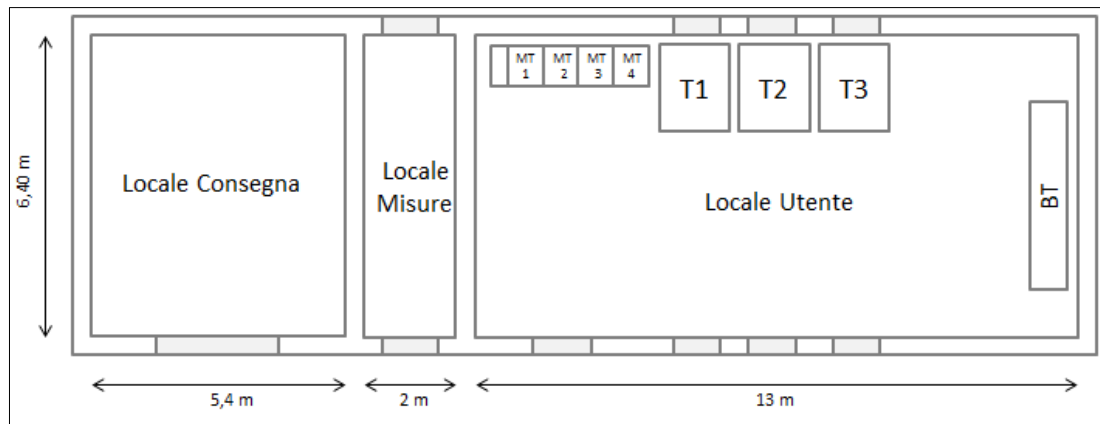


Fig.2. 17: Configurazione dei locali della cabina MT/BT e rappresentazione dei quadri di MT, BT e dei trasformatori.

Per quanto riguarda la ventilazione, deve essere assicurata alle macchine la giusta quantità d'aria in modo da garantire una corretta areazione ed evitare eccessivi aumenti della temperatura che comporterebbero surriscaldamenti dei trasformatori. Innanzitutto la cabina è dotata di prese d'aria per adempiere a tale compito e, qualora non bastasse la ventilazione naturale, è prevista una ventilazione forzata. Nel nostro caso saranno presenti due finestre dotate di apposite griglie per evitare l'introduzione di materiale che potrebbe creare dei problemi ai macchinari. Attraverso tali aperture, dovrà transitare un quantitativo d'aria necessario a smaltire il calore prodotto di trasformatori e dalle altre apparecchiature presenti in cabina. Per il calcolo della superficie necessaria, è opportuno stabilire le condizioni di funzionamento della macchina da cui dipenderanno le perdite Joule e quindi il calore prodotto.

Nel nostro caso, per un trasformatore, la corrente transitante sarà data da:

$$I_c = \frac{P_c}{\sqrt{3}V\cos\varphi} = \frac{360 \text{ k}}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,9} = 577 \text{ A}$$

A fronte di una corrente nominale pari a:

$$I_n = \frac{A_n}{\sqrt{3}V} = \frac{500 \text{ k}}{\sqrt{3} \cdot 400} = 721 \text{ A}$$

Le perdite Joule riportate alle condizioni di funzionamento saranno:

$$P_{jc} = P_j \frac{I_c^2}{I_n^2} = 6,7k \cdot \frac{577,35^2}{721,68^2} = 4,28 \text{ kW}$$

A questo punto, per stimare la potenza termica da dissipare, si considerano anche le perdite a vuoto e un ulteriore margine maggiorativo del 15% per inglobare il calore dissipato dalle altre apparecchiature presenti nel locale. La potenza finale sarà data da:

$$P_t = 1,15 \cdot (P_{jc} + P_0) = 1,15 \cdot (4,28 + 1,4)k = 6,53 \text{ kW}$$

Le aperture sono poste l'una di fronte all'altra. La prima sarà posizionata in basso, alle spalle del trasformatore e l'altra in alto, ad una distanza baricentrica $h = 1,80 \text{ m}$ dalla prima, di fronte alle macchine. A questo punto è possibile ricavare la superficie necessaria per avere un'aerazione tale da esportare questa potenza termica. Nel nostro caso la formula sarà:

$$A' = 0,119 \frac{P_t}{\sqrt{h}} = 0,5792 \text{ m}^2$$

Poiché la griglia posta all'aspirazione rappresenta un ostacolo per il flusso d'aria, viene effettuata una maggiorazione della superficie, di circa il 15%.

La superficie effettiva sarà allora:

$$A = 1,15 A' = 0,666 \text{ m}^2 \Rightarrow A = 0,7 \text{ m}^2$$

Ad esempio si può pensare di applicare due finestre aventi misure 1 x 0,7 m, per ogni trasformatore. Qualora la ventilazione naturale non dovesse essere sufficiente a garantire la dovuta areazione del locale, si opta per la ventilazione forzata, dimensionata per la massima condizione di funzionamento accettabile, ossia il funzionamento alla potenza nominale. In questo caso otterremo:

$$P_{tmax} = 1,15(P_{jn} + P_0) = 9,31 \text{ kW}$$

La portata d'aria necessaria per esportare questa potenza termica è data dalla formula:

$$q_v = 346 P_{tmax} = 3223 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Infine è necessario effettuare un controllo relativo alla velocità del vento che si instaura durante la ventilazione. Tale valore deve stare al di sotto del limite di $3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ in modo da evitare che vengano trasportate polveri o materiale potenzialmente dannoso per la macchina. Scegliendo per la ventilazione un estrattore da $4000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, considerando $n=2$ finestre utilizzate, si ottiene una velocità pari a:

$$v = \frac{4000}{3600 \cdot n \cdot A} = 0,793 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La condizione risulta rispettata.

SERVIZI DI CABINA

Si predispongono dei servizi per la cabina di trasformazione MT/BT come prescritto dalle norme. Nella fattispecie si decide installare:

- 2 apparecchi illuminanti da 1 x 36 W per garantire un illuminamento medio di 200 lx
- 2 prese industriali 2P+T e 3P+T da 16 A

E' previsto un sistema di rifasamento per il trasformatore. La potenza reattiva assorbita per la magnetizzazione del nucleo può essere ricavata come percentuale della totale potenza nominale della macchina:

$$Q_0 = A_n \cdot I_{0\%} = 6 \text{ kvar}$$

E' necessaria una batteria di condensatori per il rifasamento che eroghi tale potenza e che sia collegata a monte dell'interruttore BT in modo da rifasare il trasformatore anche durante il funzionamento a vuoto. La capacità varia a seconda che si decida di effettuare un collegamento a stella o a triangolo dei condensatori.

Collegamento a triangolo

$$C = \frac{Q_0}{3\omega V^2} = 39,78 \mu F$$

Collegamento a stella

$$C = \frac{Q_0}{3\omega \left(\frac{V}{\sqrt{3}}\right)^2} = 119,36 \mu F$$

IMPIANTO DI TERRA

Per concludere la trattazione relativa alla cabina è necessario dimensionare l'impianto di terra che sarà unico sia per l'impianto utilizzatore che per la cabina stessa. Per quanto riguarda la

messa a terra del neutro bisogna considerare la massima corrente che si verifica in caso di guasto, che nel nostro caso è la $I_{kBT} = 11,8 \text{ kA}$ che riportata al primario richiama una $I'_{kBT} = 236 \text{ A}$. Tale corrente determina l'intervento della protezione di MT del trasformatore in $t = 0,2 \text{ s}$. Da questi dati possiamo calcolare qual è la minima sezione accettabile per la messa a terra del neutro:

$$S \geq \frac{I \cdot \sqrt{t}}{K_{cu}} = \frac{11,8 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{0,2}}{228} = 23,14 \text{ mm}^2 \Rightarrow 35 \text{ mm}^2$$

Per soddisfare la relazione, si decide di scegliere una sezione maggiore. Lo stesso ragionamento vale per la messa a terra della carcassa del trasformatore e, in questo caso, il risultato sarà il medesimo poiché la stessa è la corrente massima di cortocircuito.

Per quanto riguarda i conduttori di protezione dei quadri BT, a favore della sicurezza, consideriamo la stessa corrente di corto circuito (in realtà sarebbe minore perché attenuata dall'impedenza dei conduttori). La sezione risulterà:

$$S \geq \frac{I \cdot \sqrt{t}}{K_{cu}} = \frac{11,8 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{0,2}}{228} = 23,14 \text{ mm}^2 \Rightarrow 35 \text{ mm}^2$$

Valuteremo ora la complessiva resistenza di terra per garantire la sicurezza, come imposto dalle norme. Prima di procedere con i calcoli si richiama per completezza la teoria relativa a questa parte d'impianto [1].

Il Distributore comunica una $I_{g0} = 50 \text{ A}$ da estinguere in un tempo $t_{g0} \geq 10 \text{ s}$. Alla tensione nominale di 20 kV e, grazie al collegamento della schermatura del cavo MT sia all'impianto di terra di utente che del Distributore, la ripartizione delle correnti sarà come mostrato in Fig.2. 18.

Nell'impianto di terra dell'utente, non circolerà la totale corrente di guasto I_F , ma una sua frazione identificata come I_E mentre la differenza delle due si richiederà nell'impianto di terra della società elettrocommerciale.

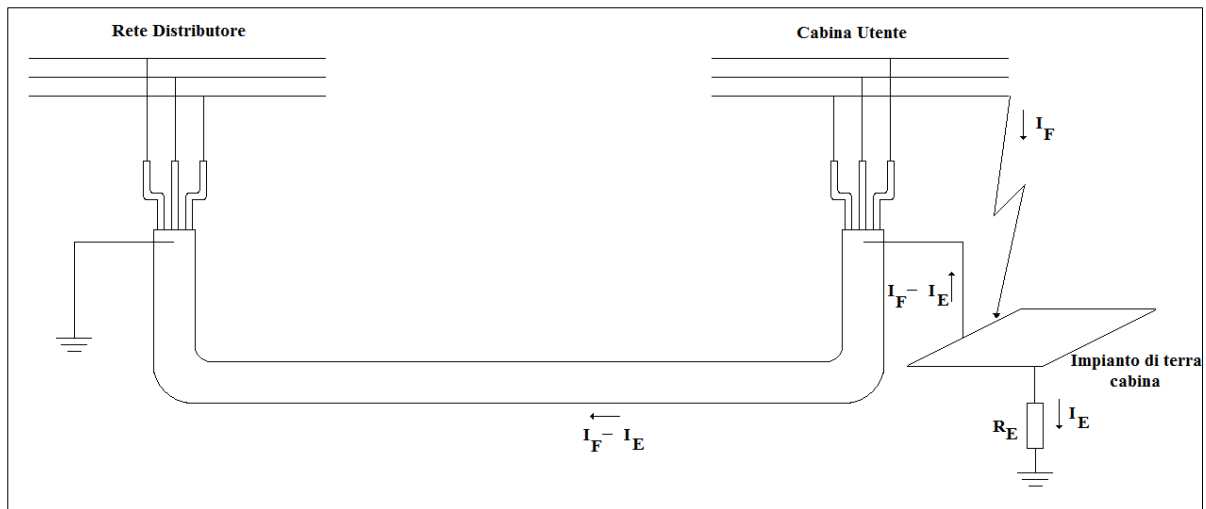


Fig.2. 18: Distribuzione delle correnti di guasto.

Per la sicurezza, si assume $I_E = I_F$ in modo da dimensionare la resistenza di terra in maniera più restrittiva e garantire certamente la sicurezza. A seconda del tempo di eliminazione del guasto, le norme stabiliscono dei valori massimi di tensione di contatto ammissibili (U_{Tp}) tabulati, per cui, affinché sia garantita la sicurezza, dovrà valere che:

$$R_E \cdot I_F \leq U_{Tp}$$

La I_F è la corrente comunicata dal Distributore (I_{g0}) e, in corrispondenza del tempo di estinzione di 10 s, risulta una tensione ammissibile di contatto pari a 75 V. Su questo valore sarà dimensionata la resistenza di terra che dovrà rispettare la relazione:

$$R_E \leq \frac{U_{Tp}}{I_F} = 1,5 \Omega$$

Per la messa in opera dell'impianto di terra si è deciso di impiegare un dispersore intenzionale costituito da una rete magliata posata ricoprente l'intera superficie della cabina. La rete avrà la stessa dimensione del locale, quindi superficie $S = 60 \text{ m}^2$ con lati $a = 15 \text{ m}$ e $b = 4 \text{ m}$. Le

maglie interne avranno lati $a = 1$ m e $b = 1,5$ m. Per il calcolo della resistenza complessiva si applica la seguente relazione:

$$R_{TOT} = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} = 5,598 \Omega$$

Dove:

- $\rho = 90 \Omega m$: resistività del terreno;
- $r = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$: raggio equivalente del cerchio avente stessa superficie della maglia considerata;
- S : area della maglia di terra;
- $L = (d + c) \cdot 2 \cdot n$: somma di tutte le lunghezze della rete di terra;
- n : numero di maglie della rete di terra.

Il valore della resistenza di terra non è sufficiente a garantire la tensione di sicurezza di 75 V, di conseguenza dovranno essere prese altre precauzioni. E' previsto infatti l'uso di una corda di rame da 25 mm² interrata alla profondità di 0,5 m che collega tra loro più dispersori naturali, ossia i plinti di fondazione in cemento armato. Considerando una resistività del terreno $\rho = 90 \Omega m$, la resistenza di ciascun plinto è stimabile a circa 20 Ω tramite la formula:

$$R = 0,366 \frac{\rho}{L} \log \left(\frac{3L}{d} \right)$$

Dove:

- d : diametro pilone metallico posato nel terreno [m];
- L : lunghezza per la quale il pilone è posato nella terra o nel cemento [m].

I plinti saranno collegati tra loro dalla corda di rame e, per il calcolo della resistenza totale, a favore della sicurezza, si decide di trascurare il contributo della stessa e della rete magliata, connettendo quindi più plinti in parallelo rispetto a quanti ce ne vorrebbero realmente. In definitiva, si conetteranno 14 plinti per una resistenza totale di terra pari a $R_E = 1,4 \Omega$, a cui corrisponderà una tensione di contatto:

$$U_{Tp} = R_E I_E = 70 V$$

E' importante notare che in realtà la tensione di contatto è inferiore a quella calcolata a causa delle approssimazioni fatte sulla corrente di guasto e sulla resistenza totale di terra. Abitualmente, si preferisce collegare a terra tutti i plinti di fondazione della struttura, il che ci porta a realizzare un impianto a favore della sicurezza.

3 - Progetto del Lato di Bassa Tensione

In questa parte del lavoro sarà analizzato l'impianto ospedaliero in questione prestando particolare attenzione al dimensionamento delle linee, dei quadri e delle apparecchiature di interruzione e manovra presenti negli stessi.

L'ospedale è costituito da diversi padiglioni, ciascuno ospitante uno o più reparti e le linee di collegamento tra il quadro generale e i quadri di zona saranno posate all'esterno in appositi cunicoli interrati.

Lo scopo del capitolo è di affrontare la progettazione di alcune parti dell'impianto evidenziando i tratti di maggior interesse in modo da poter effettuare, successivamente, un confronto con un'eventuale distribuzione in corrente continua laddove fosse possibile alimentare gli utilizzatori, quali ad esempio lampade, a tensioni ridotte con notevoli vantaggi per la sicurezza. Inizialmente ci si focalizzerà sull'impianto in corrente alternata, prendendo in considerazione i reparti di maggior interesse dal punto di vista elettrico poiché caratterizzati da particolari esigenze.

Innanzitutto sarà trattato nel dettaglio il reparto delle sale operatorie. La sala operatoria è un locale particolarmente delicato dal punto di vista elettrico vista l'esigenza di un elevato grado di sicurezza e di continuità del servizio che non possono assolutamente venir meno in questi ambienti per la salvaguardia dell'incolumità del paziente.

Il secondo reparto d'interesse è quello delle degenze. Questi locali sono classificati come gruppo 1 dalla norma CEI 64/8 - 7 e sono i locali in cui sarà introdotta la possibilità di un'alimentazione in corrente continua per alcune utenze. Il vantaggio di questa distribuzione comporta un aumento del livello di sicurezza poiché sarà effettuata in bassissima tensione con un notevole vantaggio in caso di contatti indiretti.

Il terzo ed ultimo punto riguarda lo studio dei reparti di diagnostica con particolare interesse rivolto alle apparecchiature elettromedicali impiegate. Questo tipo di apparecchiature presenta un comportamento, dal punto di vista elettrico, che causa degli squilibri in rete nell'istante in cui viene eseguito l'esame. Esse, infatti, possono essere caratterizzate da assorbimenti di corrente di tipo impulsivo tale da perturbare la rete a monte che poi si ristabilizza negli istanti

successivi. Un tale comportamento è inaccettabile e richiede dei sovradimensionamenti della linea a monte e dei dispositivi di protezione per evitare scatti intempestivi.

Ci occuperemo, quindi, del dimensionamento delle linee che collegano il quadro generale ai singoli reparti, delle linee interne ai reparti e della loro protezione dai contatti diretti ed indiretti. Tutto ciò sarà possibile partendo dalla conoscenza dei carichi da installare in modo da determinare le correnti di impiego ed eseguire il coordinamento secondo quanto prescritto dalla normativa.

Il primo passo per il conseguimento di un corretto dimensionamento dell'impianto, consiste nella determinazione della potenza di impiego che influenzerà tutti i calcoli per la scelta di linee ed interruttori.

Considerando un qualsiasi impianto caratterizzato da un certo numero di apparecchi di utilizzazione installati, avremo che la totale potenza installata sarà data dalla somma delle potenze dei singoli carichi.

In realtà, però, non tutti i carichi sono utilizzati contemporaneamente in ogni istante né tantomeno tutti gli apparecchi funzioneranno sempre alla loro potenza massima, per cui l'impianto non dovrà essere dimensionato per alimentare la totale potenza installata ma solo una frazione di essa, ricavata in maniera opportuna tenendo conto della tipologia di carico. Tale potenza, rappresenta l'effettiva potenza di impiego.

La determinazione della potenza di impiego non è immediata né di facile determinazione in quanto non esistono regole generali prestabilite per la determinazione dei coefficienti da applicare per ottenerla, ma è necessario conoscere i singoli carichi la loro tipologia di funzionamento.

In generale, in base alle apparecchiature presenti ed alle modalità di funzionamento previste a regime, occorre determinare un criterio per stabilire la potenza da considerare, in modo da dimensionare correttamente le linee, gli interruttori, i trasformatori e definire la potenza contrattuale con il fornitore di energia. Di ciò si tiene conto con due coefficienti che prendono rispettivamente il nome di fattore di utilizzazione ed il fattore di contemporaneità. Entrambi hanno un valore minore o uguale ad uno e costituiscono una scelta dettata dalla collaborazione tra il progettista ed il committente.

Esistono comunque tabelle derivate da rilievi statistici, come la Tab.3. 1 riportata nel seguito che può essere usata per fornire delle indicazioni di massima [9]:

Tipologia di Utenza	k_u	k_c	$\cos\varphi$
Ospedali e case di cura	0,45 ÷ 0,6	0,7	0,8 ÷ 0,9
Applicazioni domestiche	0,3 ÷ 1	0,2 ÷ 0,5	0,7 ÷ 0,8
Applicazioni terziarie	0,3 ÷ 0,6	0,3 ÷ 0,7	0,8 ÷ 0,9
Industrie tessili	0,7	0,9	0,7 ÷ 0,8
Industrie falegnameria	0,3 ÷ 0,5	0,8	0,75 ÷ 0,8
Industria meccanica	0,5	0,6	0,7 ÷ 0,8
Calzaturifici	0,6	0,4	0,65 ÷ 0,8

Tab.3. 1: Tabella per indicazioni di massima riguardo ai coefficienti di contemporaneità e utilizzazione per le applicazioni più diffuse.

Per ogni utenza, sia per un singolo carico che per un insieme di carichi, si definisce un fattore di utilizzazione, k_u , come rapporto tra l'effettiva potenza massima richiesta dal carico, P_{Mc} , e la potenza nominale installata, P_n :

$$k_u = \frac{P_{Mc}}{P_n}$$

Nel caso di un insieme di m carichi, la totale potenza nominale installata sarà:

$$P_n = P_{n1} + P_{n2} + \dots + P_{nm} = \sum_{i=1}^m P_{ni}$$

Qualora si fosse in presenza di N utenze, ciascuna caratterizzata da un proprio fattore di utilizzazione, la potenza massima effettiva dell'insieme delle utenze sarebbe data da:

$$P_M = \sum_{i=1}^N k_{u_i} \cdot P_{ni}$$

La potenza massima si ha se tutte le utenze funzionano contemporaneamente al loro massimo assorbimento, ossia in caso di fattore di utilizzazione unitario. In genere questa condizione non è verificata e quindi, per un gruppo di utenze, è sempre definito un fattore di contemporaneità, k_c , pari al rapporto tra l'effettiva potenza assorbita e la potenza massima:

$$k_c = \frac{P_{\text{ass}}}{P_M}$$

Infine, la potenza assorbita complessivamente, che rappresenta la potenza di dimensionamento di un impianto alimentante n insiemi di utenze, sarà data dalla somma delle potenze determinate per ogni insieme:

$$P_b = P_{\text{ass}} = \sum_{i=1}^n P_{b_i}$$

Si fornisce nel seguito un esempio esplicativo di applicazione dei coefficienti k_u e k_c , per un gruppo di 10 prese trifase con $I_n = 32$ A e $U_n = 400$ V.

Ipotizzando che il carico massimo allacciabile presenti una corrente $I_M = 25$ A, il fattore di utilizzazione di ogni presa sarà dato dalla relazione:

$$k_u = \frac{P_{Mc}}{P_n} = \frac{25}{32} \cong 0,78$$

Se si prevede un fattore di potenza del carico $\cos\varphi = 0,8$, la potenza massima assorbita da ogni presa sarà:

$$P_{Mc} = k_u \cdot P_n = k_u \sqrt{3} U_n I_n \cos\varphi = 0,78 \cdot \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 32 \cdot 0,8 \cong 13,8 \text{ kW}$$

Il fattore di contemporaneità dipende da come si decide di far funzionare le utenze. Ipotizzando di scegliere un impianto in cui si prevede il funzionamento contemporaneo di 6 prese su 10, otterremmo:

$$k_c = \frac{P_{\text{ass}}}{P_M} = \frac{6 P_{Mc}}{10 P_{Mc}} = \frac{6}{10} = 0,6$$

Pertanto la linea dovrà essere dimensionata per una potenza di dimensionamento:

$$P_{dim} = k_c n P_M = 10 \cdot 0,6 \cdot 13,8 = 83 \text{ kW}$$

Ovviamente il processo seguito è puramente indicativo in quanto la determinazione dei coefficienti e l'applicazione degli stessi ai vari carichi dipende, oltre che dalle scelte del progettista, dalle esigenze del committente e dalla tipologia di impianto considerato. E' utile mostrare come cambierebbe drasticamente la situazione qualora non fossero considerati i coefficienti in questione e come l'intero impianto sarebbe inutilmente sovradimensionato. In tal caso avremmo:

$$P_{Mc} = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 25 \cdot 0,8 = 13,8 \text{ kW}$$

Considerando che la linea presenta 10 prese, si ottiene:

$$P_{dim} = 10 \cdot 13,8 = 138 \text{ kW}$$

Questa potenza, risulta maggiorata del 66% rispetto a quella sufficiente per il corretto funzionamento dell'impianto.

Si può concludere dicendo che l'uso inappropriato o il mancato utilizzo dei coefficienti di contemporaneità ed utilizzazione, comporta un errore nella valutazione delle potenze di impiego dell'impianto che si ripercuote sulla scelta dei cavi, degli interruttori di protezione e di tutte le apparecchiature da installare con un notevole aumento ingiustificato dei costi.

Per quanto riguarda il dimensionamento dei cavi ed il coordinamento delle protezioni, una volta stabilita la potenza di impiego assorbita da ogni linea, si procede con il calcolo della corrente di impiego I_b sulla base della quale si sceglieranno le taglie del cavo e dell'interruttore di protezione. Innanzitutto è necessario assicurarsi che il cavo abbia una portata almeno pari alla corrente d'impiego del circuito, dovrà dunque valere la relazione:

$$I_b \leq I_z$$

in modo da non risultare termicamente sollecitato durante le normali condizioni di funzionamento dell'impianto. Inoltre, per un corretto coordinamento, il dispositivo di protezione deve essere in grado di sostenere con continuità la corrente I_b senza dar luogo a interventi intempestivi, ne consegue che la sua corrente nominale I_n deve essere maggiore della corrente di impiego. In più, affinché il dispositivo di protezione contro il sovraccarico protegga il cavo e non consenta il permanere di correnti superiori alla portata I_z , dovrà valere la relazione:

$$I_n \leq I_z$$

Per cui, considerando tutti gli aspetti sopra citati, si ricava la relazione per il coordinamento di cavo, interruttore e carico:

$$I_b \leq I_n \leq I_z \quad (3.1)$$

Le Norme non stabiliscono la forma che deve avere la caratteristica d'intervento del dispositivo di protezione contro le sovracorrenti, ma stabiliscono delle grandezze che ne descrivono il funzionamento e che rappresentano il confine tra il range di non intervento del dispositivo e quello di sicuro intervento. La prima grandezza è la corrente convenzionale di non intervento (I_{nf}) che rappresenta un valore specificato di corrente che non provoca l'intervento della protezione per un intervallo di tempo convenzionale. La seconda è la corrente convenzionale di intervento (I_f) che è la corrente che provoca sicuramente l'intervento nell'intervallo di tempo convenzionale ed è definita come $I_f = 1,45 I_n$ per interruttori per uso domestico conformi alla norma CEI EN 60898-1. Si può notare che il dispositivo interviene in modo certo solo per correnti uguali o superiori alla corrente di

intervento I_f . Le correnti comprese tra I_n e I_f costituiscono un sovraccarico per il cavo e potrebbero non essere mai interrotte, cosicché il cavo potrebbe essere permanentemente attraversato da correnti non trascurabili subendo un riscaldamento intollerabile. Qualora si volesse preservare il cavo in modo che qualunque corrente superiore a I_z non permanga per un tempo indefinito, dovrebbe essere soddisfatta la condizione in cui $I_f = I_z$. Così facendo, però, dovendo rispettare la (3.1), aumenterebbe il divario tra la corrente di impiego del circuito e la portata del cavo che risulterebbe sovradimensionato e quindi sottoutilizzato con un evidente spreco economico. La Norma CEI 64/8, stabilisce un compromesso tra sicurezza ed economia ammettendo che I_f possa essere maggiore di I_z , in modo da ridurre il margine tra la corrente di impiego e la portata del cavo. La relazione che deve essere soddisfatta per il corretto coordinamento delle protezioni, in aggiunta alla (3.1), dovrà rispettare:

$$I_f \leq 1,45 I_z \quad (3.2)$$

Per un interruttore automatico, il soddisfacimento della condizione $I_n \leq I_z$, implica anche il rispetto della (3.2), per cui una linea con corrente d'impiego si considera protetta contro il sovraccarico quando la corrente nominale $I_n \leq I_z$. La situazione che descrive i ragionamenti appena discussi, è riportata in Fig. 3. 1:

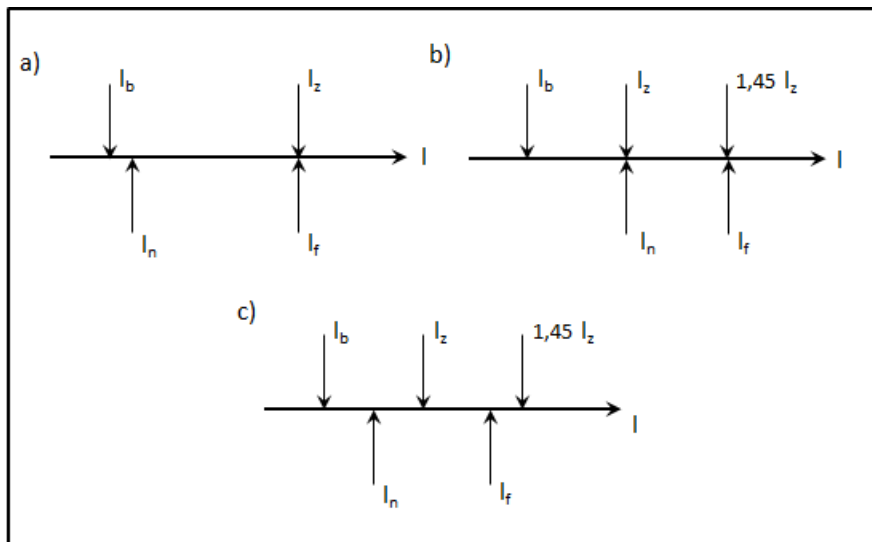


Fig. 3. 1: (a) Con $I_f = I_z$, nessuna corrente superiore alla portata può permanere per un tempo indefinito. Aumenta però il divario tra I_b e I_z . (b) Se si assume $I_n = I_z$, le correnti comprese tra I_n e I_f costituiscono un sovraccarico permanente per il cavo. (c) La norma ammette che, rispettando la relazione $I_b \leq I_n \leq I_z$ unitamente a $I_f \leq 1,45 I_z$, si ha la protezione del carico con un rischio accettabile.

Per quanto riguarda la protezione dal cortocircuito è necessario effettuare delle verifiche che permettano di stabilire se il cavo è realmente protetto qualora si verificassero sovracorrenti dovute ad un guasto sulla linea. E' necessario conoscere la corrente presunta di cortocircuito in un punto dell'impianto in modo da scegliere il dispositivo di protezione adatto in grado di interromperla e che abbia un adeguato potere d'interruzione. Oltre a riuscire ad interrompere la presunta corrente di cortocircuito, però, il dispositivo di protezione deve anche aprire il circuito in un tempo adeguato in modo da garantire anche la protezione termica del cavo.

Lo scopo della corretta taratura del dispositivo di protezione è di ottenere che al termine del cortocircuito, l'isolante non superi la temperatura massima consentita e che quindi non incorra a danni che ne determinerebbero una diminuzione della vita utile. A tale scopo deve essere soddisfatta la condizione che l'energia che l'interruttore lascia passare prima dell'estinzione del guasto, sia inferiore a quella sopportabile dal cavo.

Durante il cortocircuito la corrente assume un valore molto più elevato di quello del normale funzionamento e ciò provoca un surriscaldamento del cavo e delle apparecchiature interessate. Data la rapidità di intervento dei dispositivi di protezione, lo scambio termico che avviene nel sistema può essere considerato adiabatico in quanto non viene ceduto calore all'esterno e, dal punto di vista energetico, l'energia prodotta nell'unità di tempo per effetto Joule deve essere uguale a quella immagazzinata nel conduttore [10]. Considerando un cavo di resistività ρ , lunghezza l e sezione S percorso da una corrente i , avremo:

$$Pdt = Ri^2 dt = \rho \frac{l}{S} i^2 dt$$

Questa energia, prodotta per effetto Joule, implica nel tempo dt una variazione di temperature $d\theta$. Come conseguenza, si avrà un immagazzinamento di energia termica dovuto all'incremento di temperatura che sarà pari a:

$$cVd\theta = cSld\theta$$

dove c rappresenta il calore specifico per unità di volume, $V= Sl$ è il volume in cui è immagazzinata l'energia termica.

In base alle ipotesi di scambio termico nullo, possiamo eguagliare le precedenti relazioni ottenendo:

$$Pdt = Ri^2 dt = \rho \frac{l}{S} i^2 dt = cVd\theta = cSld\theta$$

Da cui:

$$i^2 dt = \frac{cS^2}{\rho} d\theta$$

Ponendo:

- t_i : tempo di interruzione del dispositivo di protezione;
- θ_0 : temperatura iniziale del conduttore all'istante del cortocircuito;
- θ : temperatura finale che il conduttore raggiunge dopo il cortocircuito;

Possiamo valutare la totale energia termica sviluppata considerando tutti gli intervalli infinitesimi dt :

$$\int_0^{t_i} i^2(t) dt = cS^2 \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{d\theta}{\rho} = \frac{cS^2}{\rho_0} \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{d\theta}{(1 + \alpha\theta)}$$

Per risolvere l'integrale è necessario introdurre delle ipotesi semplificative:

- Il calore specifico è ritenuto costante trascurando la dipendenza dalla temperatura;
- La sezione del conduttore si ritiene costante trascurando gli effetti di dilatazione termica del materiale;
- Si considera per la resistività la seguente legge di variazione lineare:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\theta)$$

Dove ρ_0 rappresenta la resistività del materiale a 0°C e $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ il coefficiente di temperatura del rame. Sviluppando l'integrale, si ottiene:

$$\int_0^{t_i} i^2(t) dt = \frac{cS^2}{\alpha\rho_0} \ln\left(\frac{1 + \alpha\theta}{1 + \alpha\theta_0}\right)$$

dove il primo termine prende il nome di integrale di Joule o energia specifica passante, si misura in A^2s ed è proporzionale all'energia che fluisce all'interno del conduttore. In fase di coordinamento delle protezioni è necessario scegliere opportunamente il tempo di intervento in modo da non far raggiungere al cavo una temperatura finale θ_f pericolosa per la salvaguardia della sua vita utile. Considerando che prima del guasto, il conduttore lavorava alla temperatura di servizio θ_s , possiamo valutare il valore minimo di energia ammissibile per il cavo attraverso la relazione:

$$\int_0^{t_i} i^2(t) dt = \frac{c}{\alpha\rho_0} \ln\left(\frac{1 + \alpha\theta_f}{1 + \alpha\theta_s}\right) S^2 = K^2 S^2$$

avendo posto ponendo $\theta_0 = \theta_s$ e $\theta = \theta_f$. Il termine K , che dipende da parametri costanti quali c , α e ρ , e da θ_s e θ_f che dipendono dalle condizioni di funzionamento, ha un valore indicato dalle norme e vale 143 per i cavi in EPR e 115 per quelli in PVC. In definitiva, la relazione da considerare è la seguente:

$$\int_0^{t_i} i^2(t) dt = K^2 S^2$$

Dove il primo membro è proporzionale all'energia che l'interruttore lascia passare fino al tempo t_i in cui viene estinto il guasto ed il secondo è proporzionale a quella che il cavo riesce a sopportare prima che raggiunga una temperatura troppo elevata.

E' buona norma che il primo membro sia minore o, al massimo, uguale al secondo:

$$\int_0^{t_i} i^2(t)dt \leq K^2 S^2$$

Per una corretta scelta del dispositivo di protezione, sarebbe opportuno confrontare l'energia passante attraverso l'interruttore e l'energia tollerabile dal cavo attraverso le caratteristiche fornite dai costruttori come mostrato in Fig. 3. 2:

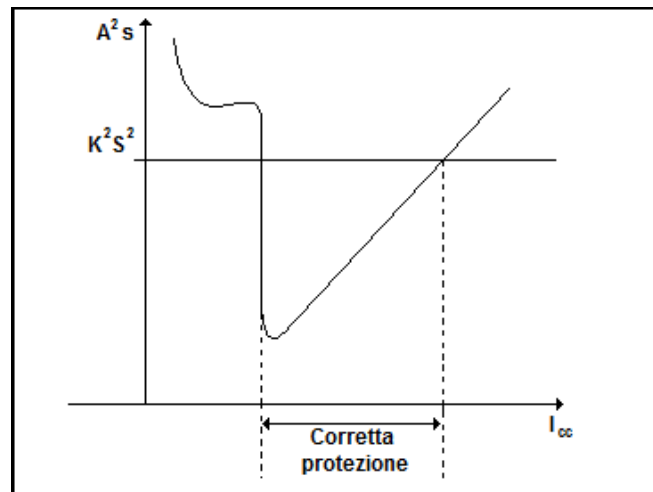


Fig. 3. 2: Caratteristica enenergetica dell'interruttore e del cavo. Quando, come nella zona centrale, la caratteristica energetica dell'interruttore risulta al di sotto di quella del cavo, la linea è protetta.

Per l'interruttore automatico, l'energia passante diminuisce in corrispondenza dello sgancio magnetico e successivamente aumenta poiché il tempo d'intervento rimane pressoché costante all'aumentare della corrente. Dal confronto delle caratteristiche risulta che la condizione che l'energia specifica passante sia minore o uguale a K^2S^2 , è soddisfatta per tutti i valori di corrente compresi tra le intersezioni della retta che indica l'energia tollerabile per il cavo con la curva dell'energia passante dell'interruttore. L'interruttore protegge, quindi, il cavo entro un intervallo di corrente definito; occorre pertanto verificare che le correnti di corto che possono verificarsi cadano all'interno di questo intervallo. Non sempre il costruttore del dispositivo di protezione fornisce l'andamento dell'integrale di Joule ma solo la caratteristica

d'intervento per cui ci si riferisce al prodotto I^2t , dove I è la corrente di cortocircuito presunta e t il tempo di intervento del dispositivo in prossimità di quella corrente. L'approssimazione che porta a valutare l'integrale di Joule con il prodotto I^2t , non è del tutto corretta in quanto la corrente che fluisce effettivamente durante il corto non è la corrente presunta I , ma sarà minore a causa dell'impedenza del dispositivo stesso e per la presenza dell'arco d'interruzione; in più per tempi d'interruzione molto brevi, la corrente di corto che fluisce attraverso il dispositivo, che è in genere asimmetrica, è diversa dal valore efficace I della componente simmetrica calcolata. L'approssimazione dell'integrale di Joule al prodotto I^2t è tanto più accettabile quanto più si considerano gli istanti successivi al periodo transitorio dove la corrente di cortocircuito presunta si approssima a quella reale. Per una corretta taratura del dispositivo sarebbe sempre meglio riferirsi alle caratteristiche fornite dal costruttore ma, poiché ciò non è solitamente possibile, il metodo di valutazione attraverso il prodotto I^2t è abbastanza attendibile e cautelativo nelle condizioni indicate.

Dopo la doverosa introduzione, inizieremo la trattazione dell'impianto di bassa tensione partendo dalla cabina MT/BT dove è alloggiato il quadro generale di bassa tensione che prende il nome di Power Center.

3.1 Quadro Generale di Bassa Tensione

Il quadro generale di bassa tensione (Power Center), rappresenta l'interfaccia tra i trasformatori della cabina MT/BT e l'impianto. Come già accennato al capitolo precedente, sarà installato all'interno della cabina di trasformazione, subito a valle dei trasformatori. Il quadro Power Center è il primo livello della distribuzione BT, ed è equipaggiato normalmente con interruttori aperti e scatolati.

Per permettere la manutenzione e l'intervento in sicurezza in una specifica zona senza creare disservizio nelle altre, il quadro sarà diviso in aree funzionali ed equipaggiato con interruttori in esecuzione estraibile per velocizzare la sostituzione degli stessi, mentre la corrente all'interno viene distribuita mediante sistemi di sbarre. Il Power Center è costituito da una carpenteria in materiale metallico rinforzato, atta a resistere alle elevate sollecitazioni elettromeccaniche e, viste le grosse potenze in gioco e le elevate correnti che attraversano i dispositivi di manovra e protezione, è necessario tenere conto della potenza termica dissipata dagli stessi in modo da effettuare una verifica termica in fase di progettazione per essere sicuri che il quadro non sia sede di pericolose sovratemperature che potrebbero creare grossi pericoli.

All'interno del Power Center saranno alloggiate tutte le partenze per i quadri dei padiglioni dell'impianto, gli interruttori BT di macchina, i congiuntori di sbarra per le commutazioni in caso di guasto in rete e per permettere le commutazioni che garantiscono ciclicamente l'entrata in funzione del trasformatore di riserva come previsto durante la progettazione della cabina MT/BT nel capitolo precedente.

Il quadro è composto da 18 partenze di cui 5 riserve con interruttori aventi taglie da 60A a 250 A e interruttori di macchina da 800 A. La norma che si occupa della regolamentazione dei quadri elettrici di BT è la CEI EN 60439 ed indica le regole da seguire in modo da ottenere un quadro che rispetti i criteri di conformità.

In generale, quando un quadro deve essere installato in un impianto con caratteristiche ben specifiche, è necessario che sia compatibile con quanto richiesto dalla normativa in modo da poterlo scegliere opportunamente.

Le informazioni più importanti, presenti anche sui data sheet forniti dai costruttori o sui dati di targa, sono elencate nel seguito:

- Tensione nominale del quadro (U_n): è la tensione del circuito principale del quadro;
- Tensione nominale di isolamento di un circuito (U_i): rappresenta il valore efficace della tensione di prova dell'isolamento, che ne caratterizza la capacità di tenuta e le distanze d'isolamento;
- Tensione nominale di tenuta a impulso (U_{imp}): è il valore di tensione che caratterizza la capacità di tenuta nei confronti di sovratensioni transitorie. E' caratterizzato tramite il valore di picco dell'impulso che un circuito può sopportare in specifiche condizioni di prova e al quale devono essere correlati i valori delle distanze di isolamento in aria;
- Corrente nominale di un circuito del quadro (I_{nc}): è la corrente che può scorrere in un circuito senza superare i limiti di sovratemperatura indicati dalla norma;
- Corrente nominale del quadro (I_n): rappresenta la più piccola corrente tra la somma delle correnti nominali dei circuiti in partenza dal quadro e la corrente totale che le sbarre principali sono in grado di distribuire.
- Fattore nominale di contemporaneità (RDF - Ratea Diversity Factor): fattore moltiplicativo da applicare alle correnti nominali dei circuiti di uscita per ricavare le massime correnti circolabili contemporaneamente ed in maniera continuativa. Il fattore di contemporaneità tiene conto delle reciproche influenze termiche tra i circuiti e può essere unico per tutto il quadro o diverso per gruppi di circuiti. Esso può essere indicato dal costruttore tra le caratteristiche nominali del quadro altrimenti sarà da ritenersi unitario;
- Corrente nominale ammissibile di breve durata (I_{cw}): valore efficace della corrente di cortocircuito che un circuito del quadro può portare senza danneggiarsi in condizioni di prova specificate. Tale corrente deve essere uguale o maggiore del valore efficace della corrente di cortocircuito presunta.

- Corrente nominale di cortocircuito condizionata⁹ (I_{cc}): rappresenta il valore efficace della corrente di cortocircuito che un quadro, protetto da un dispositivo di protezione può sopportare senza subire danni per un tempo corrispondente a quello di intervento del dispositivo che può essere direttamente integrato nel quadro o collocato a monte dello stesso. Per un determinato circuito la corrente nominale di cortocircuito condizionata deve essere uguale o maggiore della corrente di cortocircuito presunta.
- Corrente nominale ammissibile di picco (I_{pk}): valore istantaneo massimo della corrente di cortocircuito che un circuito del quadro può portare in condizioni di prova prefissate ai fini delle sollecitazioni elettromeccaniche. La corrente nominale ammissibile di picco deve essere uguale o maggiore del valore di picco della corrente di cortocircuito presunta.
- Frequenza nominale (f_n): valore di frequenza di funzionamento del quadro. Se non specificato diversamente, è ammessa una variazione del $\pm 2\%$ rispetto alla nominale.
- Grado di protezione contro la penetrazione di corpi solidi e liquidi (grado IP): indica il livello di protezione dell'involucro contro l'accesso a parti pericolose, l'ingresso di corpi solidi e di liquidi secondo quanto prescritto dalla Norma CEI 70-1.
- Protezione contro l'impatto meccanico (codice IK): indicatore che fornisce informazioni relative agli urti a cui un involucro è in grado di resistere. Il codice è formato dalle lettere IK seguite da un numero, da uno a dieci, corrispondente all'energia di impatto sopportabile secondo le Norme CEI 70-3 e CEI 104-1.

Le caratteristiche del quadro in questione devono essere indicate secondo quanto prescritto dall'allegato BB della norma CEI 61439-2.

⁹ Le correnti I_{cw} e I_{cc} sono tra loro alternative e servono per specificare e verificare la tenuta al cortocircuito del quadro.

A tal proposito, si riportano nel seguito quelle di maggior interesse:

- Protezione contro l'ingresso di corpi solidi e liquidi: IP31¹⁰;
- Impatto meccanico esterno: IK08¹¹ in quanto in cabina non esistono rischi di urti pericolosi;
- Resistenza ai raggi UV: non previsto perché installato all'interno;
- Resistenza alla corrosione: Severità di prova A poiché installato all'interno;
- Corrente di cortocircuito: 15 kA;
- Dimensioni: 4000 x 2365 x 1090 mm (Larghezza x Altezza x Profondità).

Le morsettiere per i collegamenti dei cavi, sono alloggiare insieme alle sbarre sul retro del quadro per il quale è stata scelta una forma di segregazione di tipo 4b in accordo con la norma CEI EN 61439-2. Questa forma richiede la segregazione delle barre dalle unità funzionali e la segregazione di tutte le unità funzionali l'una dall'altra compresi i terminali per i conduttori che sono parte integrante dell'unità funzionale. Come si può notare dalla Fig. 3. 3, nella forma 4a i terminali per i conduttori esterni sono nella stessa cella dell'unità funzionale associata, mentre nella forma 4b i terminali per i conduttori esterni sono alloggiati in singoli spazi separati e racchiusi in apposite celle [11].

Questa configurazione è generalmente la più specifica per quadri che, come questo, sono installati direttamente a valle dei trasformatori MT/BT e che richiedono un alto livello di sicurezza in quanto rappresentano l'elemento base di tutto l'impianto. Inoltre, la forma 4b è la più sicura e garantisce un alto livello di sicurezza qualora fosse necessario, come spesso accade, effettuare dei lavori sotto tensione per rimuovere o aggiungere delle unità funzionali.

¹⁰ Il quadro è protetto contro corpi solidi con diametro superiore a 2,5 mm e contro le cadute verticali di gocce d'acqua.

¹¹ Il quadro resiste ad urti con energia fino a 5 J

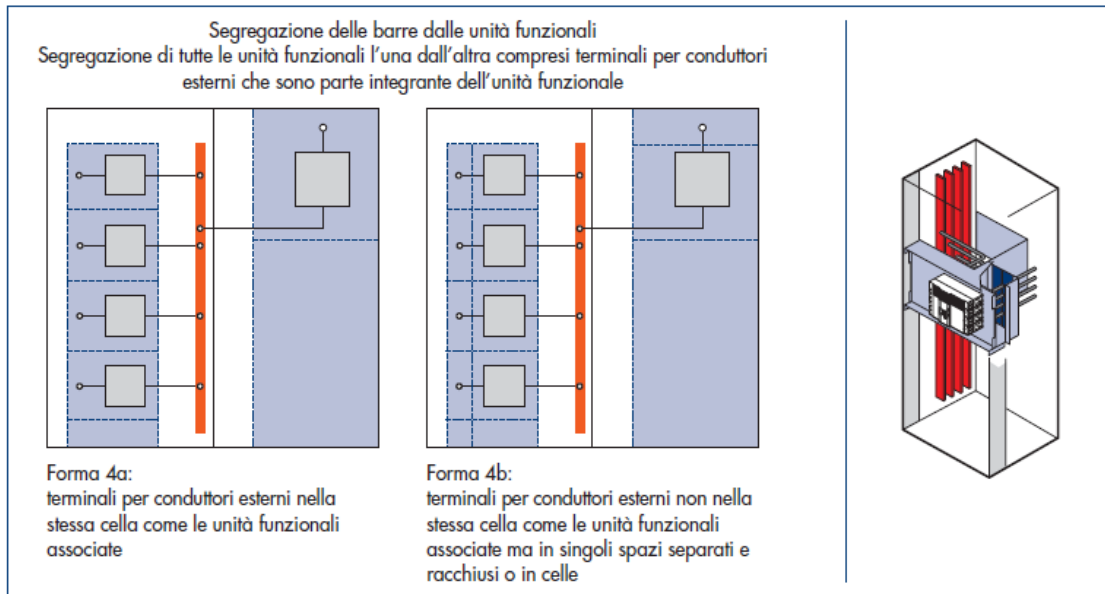


Fig. 3. 3: Forme di segregazione di tipo 4a e 4b

Infine, il quadro elettrico che sarà installato in cabina, si presenta come illustrato in Fig. 3. 4:



Fig. 3. 4: Fronte quadro Power Center

Per quanto riguarda la verifica termica, considerando un'installazione che prevede una distanza di un metro dalla parete del locale in cui è alloggiato il quadro in modo da permetterne l'aerazione, il costruttore fornisce una massima potenza termica sopportabile dalla struttura pari a 3'046 W termici, con una media di oltre 761 W per ogni armadio. Considerando i parametri forniti dal costruttore relativi alle potenze dissipate da ciascun

apparecchio funzionante in condizioni nominali, ne risulta una potenza dissipata totale pari a 1936,6 W termici. Il quadro rispetta i requisiti termici garantiti dal costruttore ed è quindi adeguato per la messa in esercizio in questo impianto.

Le norme prevedono, affinché il quadro sia ritenuto conforme, che sia effettuata anche una verifica di sovratemperatura in modo da assicurarsi che le massime temperature verificabili stiano al di sotto di alcuni valori tabulati. Nello specifico, a seconda della corrente nominale del quadro, esiste una distinzione che caratterizza le procedure di calcolo. Avremo che:

- Per i quadri con corrente nominale $I_n \leq 630$ A, la verifica consiste nel confrontare la somma delle potenze dissipate dai singoli dispositivi installati nel quadro (tali valori sono forniti dal costruttore) con la massima potenza termica sopportabile dalla struttura. Dunque si procede simulando tale dissipazione attraverso dei resistori e, una volta raggiunto il regime termico, si misura la temperatura stabilita.
- Per quadri con corrente nominale $630 \leq I_n \leq 1600$ A, la verifica deve essere effettuata secondo quanto prescritto dalla norma CEI 17-43.

Nel nostro caso, essendo in presenza di una corrente nominale maggiore di 630 A, seguiremo il procedimento espresso dalla suddetta norma. La CEI 17-43 prescrive un metodo di calcolo qualora siano valide determinate ipotesi:

- potenza dissipata ripartita uniformemente;
- apparecchi disposti in modo da non ostacolare la circolazione dell'aria;
- non più di tre separazioni orizzontali.

Una volta assicurati della validità delle stesse, i coefficienti necessari per il calcolo saranno ricavati mediante tabelle e grafici mentre è necessario conoscere i seguenti dati:

- le dimensioni dell'involucro;

- la potenza dissipata nell'involucro (apparecchiature e conduttori);
- il tipo di installazione.

Dapprima sarà necessario calcolare il valore della superficie effettiva di raffreddamento A_e :

$$A_e = \sum_i A_{0i} \cdot b_i$$

Dove A_{0i} rappresenta la i -esima superficie attraverso la quale può avvenire lo scambio termico e b_i un coefficiente tabulato, i cui valori sono riportati in Tab.3. 2, che tiene conto del fatto che la superficie considerata sia più o meno investita dall'aria esterna.

Tipo di installazione	Valore di b
Parte superiore esposta	1,4
Parte superiore coperta	0,7
Pareti laterali esposte	0,9
Pareti laterali coperte	0,5
Pareti laterali degli involucri centrali	0,5
Parte a pavimento	0,5

Tab.3. 2: Fattore di superficie b a seconda del tipo di installazione.

Una volta ottenuto questo valore, si procede con il calcolo della temperatura in due punti del quadro, rispettivamente a metà altezza ed in cima. La procedura di calcolo si basa sull'ipotesi che ci sia una crescita lineare della temperatura all'interno dell'involucro e quindi saranno

necessari solo due punti per tracciarne l'andamento qualitativo. Per il calcolo della sovratemperatura a metà altezza avremo:

$$\Delta t_{0,5} = k d P^x$$

Dove d è un coefficiente che tiene conto dell'esistenza delle separazioni orizzontali e k è una costante che caratterizza l'involucro, P è la potenza dissipata dai dispositivi e x che esprime la dipendenza della sovratemperatura all'interno dell'involucro dalla potenza dissipata. Per la determinazione di d e x si possono osservare la Tab.3. 3 e Tab.3. 4, mentre k si ricava mediante il grafico di Fig. 3. 5:

N° diaframmi	0	1	2	3
D	1,00	1,05	1,15	1,30

Tab.3. 3: Fattore d per involucri senza aperture di ventilazione con $A_e \geq 1,25 \text{ m}^2$.

$A_e \geq 1,25 \text{ m}^2$	Involucro senza aperture di ventilazione	0,804
	Involucro con aperture di ventilazione	0,715
$A_e \leq 1,25 \text{ m}^2$	Involucro senza aperture di ventilazione	0,804

Tab.3. 4: Tabella riepilogativa dei valori dell'esponeente x .

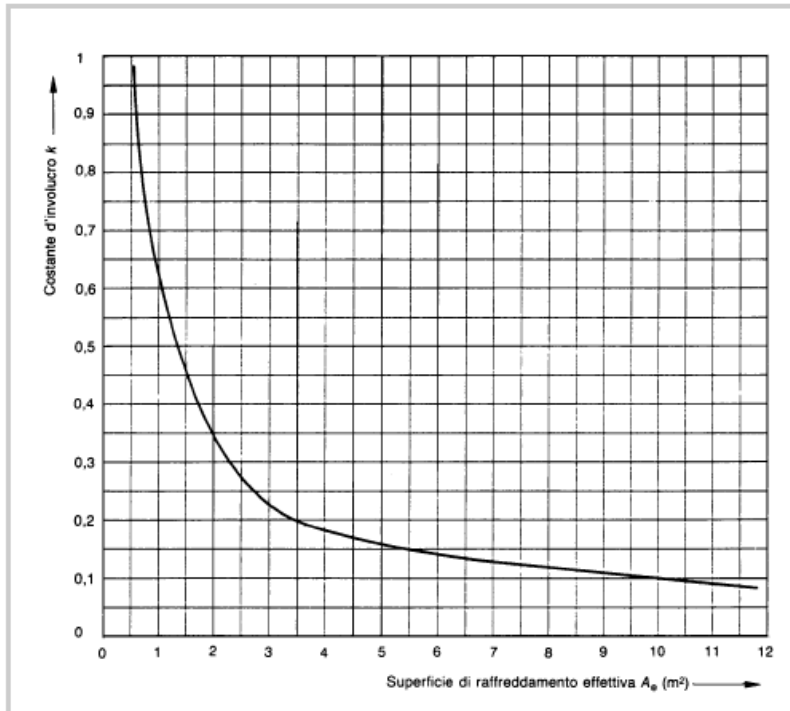


Fig. 3. 5: Grafico per la determinazione del valore del coefficiente k .

La sovratemperatura nel punto più alto del quadro è calcolabile attraverso la relazione:

$$\Delta t_1 = c \Delta t_{0,5}$$

In cui c è una costante di riscaldamento determinabile mediante i diagrammi riportati in Fig. 3. 6, dopo aver ricavato il coefficiente:

$$- f = \frac{h^{1,35}}{A_b} \text{ se } A_e \geq 1,25 \text{ m}^2 ;$$

$$- g = \frac{h^{1,35}}{L} \text{ se } A_e \leq 1,25 \text{ m}^2 ;$$

Dove A_b rappresenta la superficie di base dell'involucro, L la sua larghezza e h l'altezza.

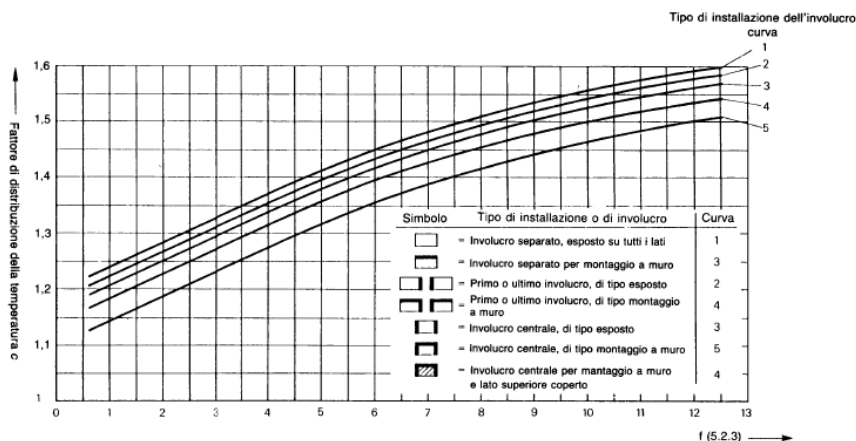


Fig. 3. 6: Grafico per la determinazione del coefficiente c.

Nel seguito tratteremo in maniera dettagliata la verifica della sovratemperatura del Power Center descritto in precedenza, seguendo il procedimento di calcolo trattato dalla norma CEI 17 – 43. Innanzitutto riassumiamo in Tab.3. 5 i valori dei coefficienti di maggior interesse e delle superfici A_{0b} necessarie per la determinazione della superficie effettiva di raffreddamento A_e dell'involucro. Ricordiamo che il Power Center in questione è costituito da quattro armadi accostati e di uguali dimensioni pari a 1000 x 2365 x1090 (Larghezza x Altezza x Profondità).

Parte considerata	Misure [m]	A_0 [m ²]	B	A_{0b} [m ²]
Parte superiore	1 x 1,09	1,09	1,4	1,526
Parte anteriore	1 x 2,365	2,365	0,9	2,128
Parte posteriore	1 x 2,365	2,365	0,9	2,128
Parte destra	2,365 x 1,09	2,577	0,5	1,288
Parte sinistra	2,365 x 1,09	2,577	0,9	2,32
$A_e = 9,39$ [m²]				

Tab.3. 5: Tabella riepilogativa dei valori dei coefficienti di maggior interesse per il Power Center dell'impianto considerato.

La scelta del valore dei coefficienti b è dettata dal fatto che è stato considerato il primo armadio che risulta esposto solo sul lato destro in quanto il lato sinistro confina con l'armadio successivo. A questo punto, considerando un numero di diaframmi interni pari a 2, possiamo ricavare $d = 1,1$ dalla Tab.3. 3. Tramite Fig. 3. 5 e Tab.3. 4 ricaviamo $k = 0,1$ e $x = 0,804$. La sovratemperatura a metà altezza dell'involucro sarà:

$$\Delta t_{0,5} = k d P^x = 5,67 K$$

essendo $P = 135 W$ la totale potenza dissipata dai dispositivi installati nel quadro in questione.

Poiché risulta soddisfatta la condizione $A_e \geq 1,25 m^2$, per la determinazione del coefficiente c sarà necessario calcolare il valore di:

$$f = \frac{h^{1,35}}{A_b} = \frac{2,365^{1,35}}{1 \cdot 1,09} = 2,93$$

Da cui ricaviamo $c = 1,31$ attraverso l'intersezione con la curva (2) dei grafici di Fig. 3. 6. A questo punto è possibile calcolare la sovratemperatura in cima all'involucro attraverso la relazione:

$$\Delta t_1 = c \Delta t_{0,5} = 1,31 \cdot 5,67 = 7,43 K$$

Analoghi ragionamenti valgono per gli altri quadri di cui è composto il Power Center. Seguendo lo stesso procedimento e svolgendo i medesimi calcoli, si ottengono i risultati riportati in Tab.3. 6:

Quadro ¹²	P [W]	A _e [m ²]	D	X	k	Δt _{0,5}	f	C	Δt ₁
1	135	9,39	1,1	0,804	0,1	5,67	2,93	1,31	7,43
2	108	10,937	1,1	0,804	0,09	4,27	2,93	1,29	5,5
3	190	10,937	1,1	0,804	0,09	6,72	2,93	1,29	8,66
4	118	9,39	1,1	0,804	0,1	5,09	2,93	1,31	6,67

Tab.3. 6: Tabella riepilogativa dei coefficienti di interesse per i quattro quadri di cui è composto il Power Center.

¹² La numerazione dei quadri considera come numero 1, il primo quadro rappresentato in Fig. 3.2 a partire da sinistra

Dal confronto con i valori di sovratemperatura ammissibili riportati in Tab.3. 7, possiamo affermare che non ci sono significativi aumenti della temperatura interna nei quadri scelti.

Componenti del quadro	ΔT ammissibile [K]
Morsetti	70
Involucri esterni metallici	30
Involucri esterni non metallici	40

Tab.3. 7: Valori di sovratemperatura massima ammissibile.

Come già detto, dal Power Center sono prelevate le partenze per l'alimentazione dei vari padiglioni dell'ospedale. Considereremo nel seguito le tre partenze dei padiglioni di interesse analizzando nel dettaglio le scelte progettuali eseguite ed evidenziando le caratteristiche di maggior rilievo di cui tener conto in fase di progettazione. E' importante notare come per la scelta delle caratteristiche del quadro, è necessario svolgere dei calcoli per conoscere il livello della corrente di cortocircuito che andrà ad influenzare la scelta dell'isolamento della carpenteria e dei dispositivi di protezione. Si riporta in Fig. 3. 7 uno schema unifilare esplicativo che permetterà di chiarire le idee.

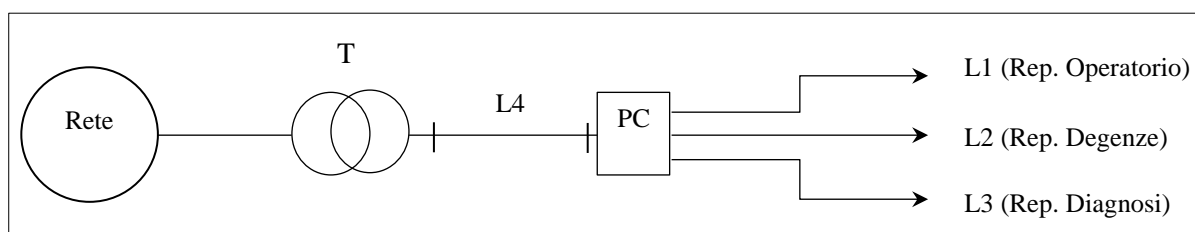


Fig. 3. 7: Schema rappresentante il lato MT, il trasformatore e le linee in BT in partenza da Power Center delle quali si vogliono ricavare le caratteristiche di maggior interesse

PC indica il Power Center, la linea L_4 rappresenta il tratto di collegamento tra il trasformatore e il PC e le linee di collegamento L_1 , L_2 ed L_3 rappresentano le partenze per i tre quadri di reparto considerati. Per ricavare i livelli di cortocircuito, sarà necessario conoscere le caratteristiche di tali linee quali sezione dei conduttori, lunghezze e parametri dei cavi. In questo modo, partendo dai dati di rete ricavati al capitolo precedente ed aggiungendo quelli del trasformatore, potremo calcolare le correnti di cortocircuito dei tre quadri generali.

In Tab.3. 8 sono riassunte le caratteristiche delle linee considerando i dati di resistenza e reattanza chilometriche delle linee, forniti dal costruttore del cavo e conformi alla normativa vigente.

	Lunghezza [m]	Sezione [mm ²]	Resistenza [Ω /km]	Reattanza [Ω /km]
Linea 1	25	70	0,277	0,0965
Linea 2	50	95	0,210	0,0975
Linea 3	100	95	0,210	0,0975
Linea 4	5	300	0,0652	0,0893

Tab.3. 8: Caratteristiche elettriche delle linee in partenza dal Power Center

A questo punto, considerando la resistenza e la reattanza della rete di alimentazione e del trasformatore, sarà possibile ricavare i valori delle correnti di cortocircuito ai vari quadri di padiglione. Detti valori sono già stati calcolati al Cap.2 e si riportano nel seguito:

$$Z_{TR} = R_{TR} + jX_{TR} = (4,3 + j18,7) \text{ m}\Omega$$

$$Z_R = R_R + jX_R = (0,0369 + j0,369) \text{ m}\Omega$$

Dove Z_{TR} e Z_R rappresentano rispettivamente l'impedenza del trasformatore e della rete.

Quadro generale del Reparto Operatorio:

Con i dati di Tab.3.1, per prima cosa possiamo calcolare il valore dell'impedenza relativa alla linea che collega il trasformatore al Power Center. Questo valore di impedenza sarà comune a tutte le partenze e sarà dato da:

$$Z_{L4} = r_4 \cdot L_4 + jx_4 \cdot L_4 = R_4 + jX_4 = (0,326 + j0,44) \text{ m}\Omega \Rightarrow |Z_{L4}| = 0,552 \text{ m}\Omega$$

Analogamente si procede con il calcolo dell'impedenza della linea L_1 e, sempre con i dati forniti dal costruttore e riportati in tabella, avremo:

$$Z_{L1} = R_1 + jX_1 = (6,92 + j2,41) \text{ m}\Omega \Rightarrow |Z_{L1}| = 7,33 \text{ m}\Omega$$

La corrente di cortocircuito in prossimità del quadro del Reparto Operatorio sarà:

$$I_{kL1} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_{TR} + R_R + R_{L4} + R_{L1})^2 + (X_{TR} + X_R + X_{L4} + X_{L1})^2}} =$$

$$= \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(4,3 + 0,0369 + 0,326 + 6,92)^2 + (18,7 + 0,369 + 0,44 + 2,41)^2}} \cdot 10^3$$

$$= 9,27 \text{ kA}$$

Quadro generale del Reparto Degenze:

Analogamente a quanto visto per il Reparto Operatorio, si procede con i calcoli ottenendo:

$$Z_{L2} = R_2 + jX_2 = (10,5 + j4,87) \text{ m}\Omega \Rightarrow |Z_{L2}| = 11,57 \text{ m}\Omega$$

$$I_{kL2} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_{TR} + R_R + R_{L4} + R_{L2})^2 + (X_{TR} + X_R + X_{L4} + X_{L2})^2}} = 8 \text{ kA}$$

Quadro generale del Reparto Diagnosi:

$$Z_{L3} = R_3 + jX_3 = (21 + j9,75) \text{ m}\Omega \Rightarrow |Z_{L3}| = 23,15 \text{ m}\Omega$$

$$I_{kL3} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_{TR} + R_R + R_{L4} + R_{L3})^2 + (X_{TR} + X_R + X_{L4} + X_{L3})^2}} = 5,9 \text{ kA}$$

I valori calcolati, serviranno per la scelta del valore di corrente di cortocircuito massima che il quadro potrà sopportare in caso di guasto.

3.2 Reparto Operatorio

Il Reparto Operatorio è costituito nel complesso da quattro sale operatorie e due locali atti alla preparazione e al risveglio del paziente. Ogni locale preparazione/risveglio paziente è posto a servizio di due sale operatorie e, come ben noto, questi locali richiedono requisiti stringenti dal punto di vista della continuità del servizio e della sicurezza elettrica. La norma CEI 64-8/7 nella Sez. 710, li classifica come Gruppo 2 imponendo quindi l'utilizzo di particolari accorgimenti quali ad esempio la diminuzione del livello di tensione di sicurezza a 25 V per la protezione dai contatti indiretti e il requisito di continuità del servizio anche in caso di primo guasto a terra che comporta l'introduzione di una sezione d'impianto completamente isolata e alimentata da un sistema IT-M.

Partendo dal Power Center, a protezione dell'intera linea trifase a 400 V sarà presente un interruttore magnetotermico differenziale. Per quanto riguarda i criteri che hanno portato alla scelta delle caratteristiche della linea di collegamento e delle apparecchiature poste a protezione della stessa, si deve partire da considerazioni di carattere energetico riguardanti il carico da alimentare, le distanze da ricoprire e le cadute di tensione ammissibili lungo il percorso. Il reparto operatorio presenta complessivamente una potenza di dimensionamento pari a circa 80,7 kW, ricavata dalla totale potenza installata nella sale operatorie, nei locali preparazione/risveglio pazienti tenuto conto di opportuni coefficienti di contemporaneità. Considerando un $\cos\phi = 0,93$, la corrente totale di dimensionamento sarà pari a $I_b = 125,2$ A. Nello specifico, per la determinazione della potenza di dimensionamento sono stati applicati dei coefficienti di utilizzazione e contemporaneità unitari per l'illuminazione dei locali, comprese le scialitiche, e un coefficiente di utilizzazione pari a 0,6 per i gruppi di prese. Le altre utenze come gli orologi, i negativoscopi e le porte automatiche presentano un coefficiente di utilizzazione unitario ma sarà tenuto conto della contemporaneità del gruppo di utenze applicando un coefficiente k_c per la parte di impianto alimentata da sistema IT – M. Come già accennato in precedenza, la determinazione dei coefficienti è dettata dall'analisi dei singoli carichi e dalla valutazione delle modalità di funzionamento degli stessi attraverso le esigenze del committente. La sala operatoria presenta una potenza totale installata pari a 35,6 kW che, stando alle ipotesi appena effettuate, si riduce a 6,9 kW. Analoghi ragionamenti valgono per il reparto preparazione e risveglio pazienti dove, a fronte di una potenza installata pari a 37,9 kW si ottiene una potenza di dimensionamento pari a 7,8 kW. Inoltre, considerando che i due locali non lavoreranno contemporaneamente durante il normale funzionamento dell'impianto, si applica un ulteriore coefficiente di contemporaneità tra pari a 0,7 riducendo ancora la potenza a 10,3 kW. Per quanto riguarda il collegamento del Quadro del Reparto Operatorio al Power Center, sarà opportuno scegliere un cavo avente una portata nominale che, in accordo a quanto prescritto dalla normativa, permetta di soddisfare la relazione:

$$I_b \leq I_z$$

Con I_z corrente nominale del cavo. Per evitare stress termici che potrebbero comportare una diminuzione della vita utile dei conduttori, si decide di scegliere una I_z strettamente maggiore di I_b . Le caratteristiche del cavo, la formazione della linea e le modalità di posa, sono riportate nel seguito.

Cavo:

- Tipo: FG7M1 Unipolare;
- Isolante: EPR;
- Formazione: 3 x (1 x 70) + 1 x 35 + 1 x 35;
- Lunghezza: 25 m
- Posa: Interrata in tubi o cunicoli;
- $I_z = 260$ A;

E' interessante notare come la portata di un cavo dipenda anche dalla posa scelta. Questa linea è situata all'esterno e collega il Power Center al padiglione del Reparto Operatorio, per cui necessita di un tipo di posa interrato. Il costruttore fornisce una serie di tabelle riportanti alcuni coefficienti correttivi da applicare alla portata nominale del cavo qualora le condizioni di posa fossero diverse da quelle nominali specificate nel datasheet. A favore della sicurezza e per tener conto degli sbalzi climatici o della resistenza termica del tipo di terreno in cui sarà posata la linea, si decide di applicare un coefficiente correttivo pari a 0,8 ottenendo quindi una portata $I_z = 208$ A nelle determinate condizioni in cui è installato l'impianto. A questo punto, considerando l'impedenza della linea in questione già calcolata in precedenza, possiamo ricavare la caduta di tensione come segue:

$$\Delta V\% = \frac{\sqrt{3}Z_{L1}I_b}{V} \cdot 100 = \frac{1,59}{400} \cdot 100 = 0,39\%$$

E' necessario, ora, scegliere l'interruttore posto a protezione della linea e coordinarlo opportunamente per garantire la sicurezza in caso di guasto. I dati di maggior interesse dell'interruttore scelto sono riportati nel seguito.

Interruttore:

- Modello: NSX 250 B;
- Tipo: Magnetotermico Differenziale Estraibile;
- $I_n = 250 \text{ A}$;
- Poli = 3;
- $I_{\Delta n} = 1 \text{ A}$ Tipo S¹³;

L'interruttore in questione permette una temporizzazione regolabile in modo da garantire la selettività con gli interruttori a valle per evitare scatti indesiderati che comporterebbero disservizi inaccettabili per questo impianto. Questo interruttore, posto all'interno del Power Center, deve permettere la selettività con quello di macchina a monte e garantire, a valle, un buon margine temporale ed amperometrico per realizzare la selettività con gli interruttori di bassa tensione installati nei vari quadri di reparto.

Il coordinamento tra cavo e interruttore, prevede che sia verificata la seguente relazione:

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

Dove:

I_b : corrente di impiego del carico;

I_n : corrente nominale dell'interruttore;

I_z : corrente nominale del cavo.

La soglia termica di taratura dell'interruttore, è regolabile come percentuale di una corrente I_0 (corrente di lungo ritardo) funzione della corrente nominale dell'interruttore e legata ad essa mediante una tabella fornita dal costruttore dell'apparecchiatura.

¹³ Come visto al Cap.1, i differenziali di tipo S sono caratterizzati da un intervento ritardato (o regolabile per apparecchi rispondenti alla norma CEI EN 60947-2) rispetto altri differenziali di tipo istantaneo. Essi sono impiegati quando occorre realizzare la selettività differenziale.

Per quanto riguarda gli interruttori da 250A, si riporta in Tab.3. 9, la riga della tabella che interessa tale taglia:

I_n	Valori ammessi di I_o								
250 A	63	70	80	90	100	110	125	150	160

Tab.3. 9: valori di I_o ammessi per interruttori con $I_n = 250$ A

Scegliendo un valore di $I_o = 160$ A e impostando sull'interruttore una taratura della soglia termica al 90% di tale corrente, si otterrà una corrente di regolazione termica pari a $I_r = 1 \cdot I_o = 160$ A e una magnetica pari a $10 \cdot I_r = 1,6$ kA. Il costruttore garantisce un intervento del dispositivo di protezione in un intervallo compreso tra $1,05 \cdot I_r$ e $1,2 \cdot I_r$ in modo da permettere la protezione del circuito dalle sovracorrenti con una caratteristica riportata in Fig. 3.8:

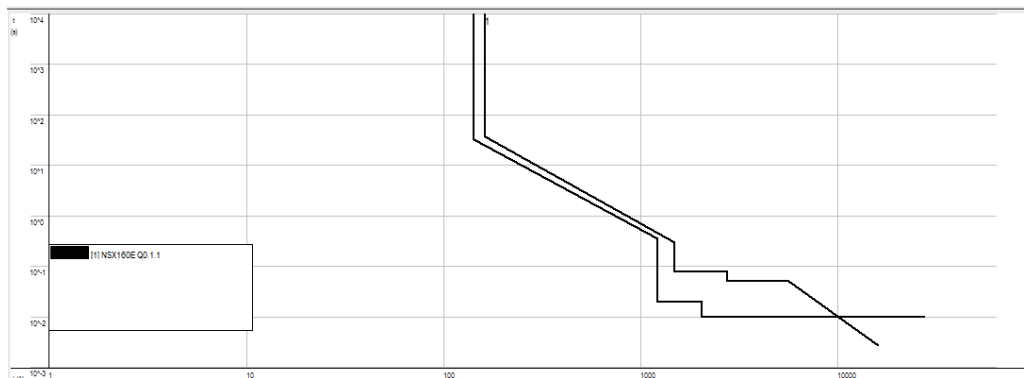


Fig. 3.8: Curva interruttore NSX 250 B posto a protezione della linea alimentante il Reparto Operatorio. Gli interruttori equipaggiati con sganciatori elettronici presentano una curva regolabile in maniera molto precisa. Essi sono contraddistinti da una soglia di sovraccarico (L), una soglia magnetica ad intervento ritardabile (S) ed una soglia magnetica ad intervento istantaneo (I).

E' interessante osservare come, qualora l'interruttore intervenisse per $1,2 \cdot I_r = 192$ A, la linea non sarebbe in alcun modo termicamente sollecitata in quanto la corrente instaurata risulterebbe minore di I_z e quindi sopportabile dal cavo. L'interruttore in questione garantisce la selettività con l'interruttore BT posto a protezione del trasformatore e tarato, come visto nel capitolo precedente, con una soglia istantanea pari a 4,32 kA ed una termica pari a 720 A; in questo modo non si incorre in scatti intempestivi delle protezioni scongiurando il pericolo di disservizi.

Per verificare l'efficacia della protezione contro il cortocircuito, è necessario assicurarsi che l'energia lasciata passare dall'interruttore prima di intervenire in caso di guasto sia inferiore a quella sopportabile dal cavo.

Per cui, come visto al Par 3.1, verifichiamo il tutto considerando la corrente di cortocircuito calcolata in precedenza pari a $I_{kL1} = 9,27$ kA che provoca l'intervento della soglia istantanea dell'interruttore pari a $t_i = 0,01$ s.

A questo punto dovrà essere soddisfatta la relazione:

$$I^2 t_i \leq K^2 S^2$$

Che fornisce come risultato:

$$0,86 < 100,2$$

Dalla validità della relazione, ne consegue la completa protezione della conduttura.

A questo punto, stabilite le caratteristiche della linea e coordinata la protezione a monte, arriviamo al Quadro Generale del Reparto Operatorio (QRO) che rappresenta il quadro generale da cui saranno prelevate le partenze per le diverse utenze da servire.

Il QRO è un quadro di distribuzione secondaria e rappresenta il secondo livello di distribuzione. Questi quadri possono essere realizzati con involucri in materiale plastico o metallico e sono generalmente equipaggiati con interruttori scatolati e apparecchi modulari.

I quadri di distribuzione secondaria, presentano correnti d'impiego molto minori rispetto a quelle del Power Center e solitamente sono installati in prossimità delle utenze permettendo la realizzazione con strutture a pavimento (in armadio) o a parete (in quadri), a seconda della quantità di interruttori installati e della potenza distribuita. L'interruttore in testa al quadro avrà le stesse caratteristiche di quello installato nel Power Center e, per raggiungere un maggiore livello di qualità dell'impianto si può prevedere una selettività cronometrica tra i due in modo da permettere al solo interruttore del QRO di intervenire in caso di guasto a valle di esso.

Non è necessario perseguire la selettività cronometrica in quanto, dal punto di vista del fuori servizio causato da un guasto a valle, non si ha alcun vantaggio ma può comunque essere utile introdurre una temporizzazione in modo da agire, in caso di intervento, sul QRO per il riarmo dell'interruttore anziché sul Power Center che potrebbe essere installato in un locale lontano dal reparto.

E' riportato in Fig. 3. 9 il fronte quadro:

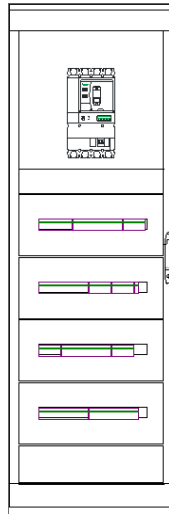


Fig. 3. 9: Fronte quadro QRO

Il QRO sarà dimensionato per una corrente di cortocircuito pari a 10 kA^{14} e presenterà un grado di protezione IP 31 e IK 08 con ingombri $650 \times 2000 \times 400 \text{ mm}$ (Larghezza x Altezza x Profondità). A seguito della verifica termica effettuata, risulta una potenza dissipata dai dispositivi pari a $302,16 \text{ W}$ termici a fronte di una potenza sopportabile dal quadro pari a 584 W .

E' importante notare che, essendo in presenza di un quadro elettrico con corrente nominale inferiore a 630 A , non è necessario applicare la norma CEI 17-43 per il calcolo della sovratemperatura massima ma è sufficiente la verifica termica appena effettuata.

Il QRO sarà dotato di una sezione normale di alimentazione che fornisce energia a tutte quelle utenze che ammettono interruzione del servizio per tempi minori di 15 s ed una sezione detta di continuità, costituita da quelle utenze che non tollerano interruzioni dell'alimentazione e che quindi necessitano dell'utilizzo di una sorgente di continuità.

In questo studio, trattando principalmente le problematiche legate agli ambienti particolari, quali soprattutto quella della continuità del servizio, ci focalizzeremo sulle parti di impianto più delicate dal punto di vista elettrico e alle quali deve essere garantita un'alimentazione continuativa per raggiungere elevati livelli di affidabilità.

Questo è senza ombra di dubbio il caso della sala operatoria che, dal punto di vista della continuità dell'alimentazione, è il locale più delicato. Tratteremo nel dettaglio, dunque, la sala operatoria e il locale di preparazione e risveglio paziente in modo da capire come si garantisce la sicurezza e quali sono le principali problematiche da affrontare in fase di progettazione.

¹⁴ A fronte di una corrente di cortocircuito presunta pari a $9,2 \text{ kA}$, si sceglie un quadro dimensionato in modo da resistere ad una corrente $I_{cc} > 9,2 \text{ kA}$. Tra i valori disponibili sul mercato, la scelta ricade su un quadro dimensionato per sopportare una corrente di guasto pari a 10 kA .

Analogamente a quanto fatto per i quadri di reparto, è necessario calcolare il valore della corrente di cortocircuito nei vari quadri di zona del Reparto Operatorio. Per farlo, consideriamo la Fig. 3. 10:

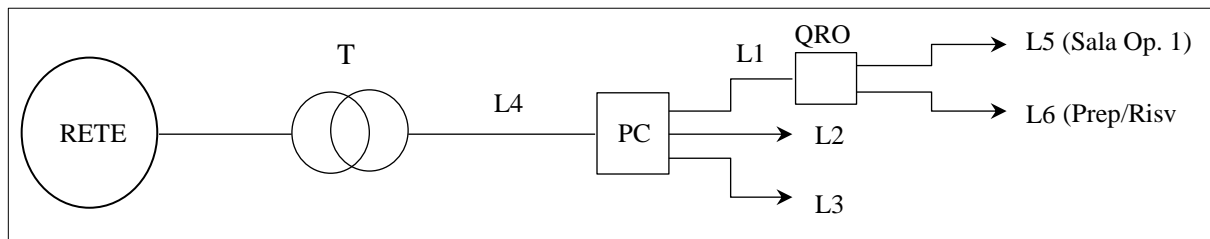


Fig. 3. 10: Schema rappresentante il lato MT, il trasformatore e le linee in BT in partenza da Power Center e dal QRO

Le caratteristiche delle linee sono riassunte in Tab.3. 10:

Riepilogo caratteristiche delle linee				
	Lunghezza [m]	Sezione [mm²]	Resistenza [Ω/km]	Reattanza [Ω/km]
Linea 5	20	25	0,795	0,0813
Linea 6	20	25	0,795	0,0813

Tab.3. 10: Caratteristiche elettriche delle linee in partenza dal QRO

Possiamo ricavare i valori delle correnti di cortocircuito ai vari quadri di zona, considerando un'impedenza Z' comprensiva del contributo della rete, del trasformatore, della linea L4 e della L1:

$$Z' = R' + jX' = (11,58 + j21,9) \text{ m}\Omega$$

Con

$$R' = R_{TR} + R_R + R_{L4} + R_{L1} = (4,3 + 0,0369 + 0,326 + 6,92) \cdot 10^{-3} = 11,58 \text{ m}\Omega$$

$$X' = X_{TR} + X_R + X_{L4} + X_{L1} = (18,7 + 0,369 + 0,44 + 2,41) \cdot 10^{-3} = 21,9 \text{ m}\Omega$$

Quadro di Sala Operatoria

Per calcolare il livello di cortocircuito di questo quadro, è necessario usare i dati in tabella per ricavare il valore dell'impedenza della linea che risulterà:

$$Z_{L5} = R_5 + jX_5 = (15,9 + j1,63) \text{ m}\Omega \Rightarrow |Z_{L5}| = 15,9 \text{ m}\Omega$$

La corrente di cortocircuito sarà:

$$\begin{aligned} I_{kL5} &= \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R' + R_{L5})^2 + (X' + X_{L5})^2}} = \\ &= \frac{400 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(11,58 + 15,9)^2 + (21,9 + 1,63)^2}} = 6,35 \text{ kA} \end{aligned}$$

Quadro di Locale Preparazione/Risveglio Pazienti

Seguendo gli stessi ragionamenti, otterremo:

$$Z_{L6} = R_6 + jX_6 = (15,9 + j1,63) \text{ m}\Omega \Rightarrow |Z_{L6}| = 15,9 \text{ m}\Omega$$

$$I_{kL6} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R' + R_{L6})^2 + (X' + X_{L6})^2}} = 6,35 \text{ kA}$$

3.2.1 Sala Operatoria

Per quanto riguarda la progettazione degli ambienti nelle sale operatorie, è necessario definire la cosiddetta “zona paziente” che rappresenta il volume in cui un paziente con parti applicate può venire in contatto intenzionale, o non intenzionale, con altri apparecchi elettromedicali, sistemi elettromedicali, con masse estranee o con altre persone in contatto con tali elementi. Il riferimento per la corretta definizione della zona paziente può essere, ad

esempio, il contorno del letto operatorio qualora questo sia fisso, altrimenti è necessario considerare l'involuppo delle zone paziente relative alle posizioni in cui il paziente può venirsi a trovare mentre è in contatto con parti applicate. Qualora gli apparecchi elettromedicali fossero più di uno e ci fosse la possibilità di spostarli, la zona paziente può essere estesa, a favore della sicurezza, a tutto locale. E' importante identificare correttamente la zona paziente in quanto la sua definizione comporterà la scelta delle masse da collegare al nodo equipotenziale. Secondo la norma CEI 64/8-7 art. 710.416.1.6.1, infatti, devono essere collegate al nodo equipotenziale solo le masse e le masse estranee poste all'interno, o che possono entrare nella zona paziente.

Data la particolarità dei locali in questione, è necessario che vengano applicate tutte le misure di sicurezza che ne possano mantenere la migliore funzionalità. Le sale operatorie richiedono livelli di sicurezza molto elevati garantiti anche grazie alla presenza di una parte di impianto alimentata tramite trasformatore di isolamento medicale (sistema IT-M).

Altri importanti requisiti di questo genere di locali, sono quelli dell'esigenza di continuità dell'alimentazione che vede come soluzione l'impiego degli UPS.

Per quanto riguarda gli accorgimenti da prendere durante la fase di progettazione e dimensionamento delle linee poste a monte della sezione IT-M, è necessario tener conto del fatto che i trasformatori presentano una corrente di spunto (corrente di magnetizzazione), che può arrivare fino ad un massimo di 12 volte la corrente nominale. La taratura del dispositivo dovrà tenere conto di questo fattore per evitare scatti indesiderati.

Una volta fatta una panoramica generale sui principali aspetti di questi ambienti su cui focalizzarsi, consideriamo la sala operatoria 1, alimentata dal Quadro di Sala Operatoria (QSO) tramite una linea di collegamento trifase facente capo al QRO.

Nel complesso l'utenza assorbe una potenza pari a circa 7 kW e, per garantire la continuità dell'alimentazione vista la particolarità dell'ambiente, tutto il quadro QSO è alimentato in regime di continuità tramite l'interposizione di un UPS a monte del circuito. In questo modo, qualora si verificasse un guasto in rete, i carichi alimentati dal QSO non saranno interessati da interruzioni del servizio, permettendo lo svolgimento delle operazioni in assoluta sicurezza.

Come già accennato, tenendo conto dei coefficienti di contemporaneità, la potenza di dimensionamento risulta essere 7 kW. Nella fattispecie, per le luci, comprese le scialitiche, per il dispositivo di controllo dell'isolamento e per i servizi che necessitano di un funzionamento costante, è stato applicato un coefficiente unitario in modo da garantire sempre la loro alimentazione. Per i gruppi di prese, è stato applicato un coefficiente di utilizzazione pari a 0,6 ed infine, a tutto il sistema IT-M che presenta una potenza installata pari a 34,6 kW, è stato applicato un coefficiente globale pari a 0,28 ottenendo complessivamente una potenza di circa 6 kW. Al di fuori del sistema IT-M, è presente l'alimentazione dell'illuminazione avente potenza pari ad 1 KW e coefficienti di utilizzazione e contemporaneità unitari. Tenendo conto di ciò, si giustifica la potenza totale del locale pari a 7 kW.

Come già detto, la sala operatoria appartiene alla categoria di locali di Gruppo 2, ossia a quei locali ad uso medico in cui le parti applicate sono destinate ad essere utilizzate in applicazioni

quali interventi intracardiaci, operazioni chirurgiche, o il paziente è sottoposto a trattamenti vitali dove la mancanza di alimentazione può comportare pericolo per la vita. Proprio per questo motivo, oltre a garantire la continuità in caso di guasto in rete, è necessario permettere il corretto funzionamento di una parte di impianto anche in caso di guasto a terra tramite una sezione appositamente ricavata sotto il sistema IT-M [2].

La Norma CEI 64/8-7 art. 710.413.1.5, impone che un sistema IT-M debba essere alimentato con trasformatore di isolamento ad uso medico e dotato di un dispositivo di controllo continuo dell'isolamento, che sia in accordo con la Norma CEI EN 61557-8 (CEI 85-28) e avente perciò i seguenti requisiti:

- impedenza interna $\geq 100 \text{ k}\Omega$;
- tensione di prova $\leq 25 \text{ V c.c.}$;
- corrente di prova, anche in guasto, $\leq 1 \text{ mA}$;
- indicazione quando la resistenza d'isolamento scenda a $50 \text{ k}\Omega$. Un dispositivo di prova deve essere presente per questa verifica;
- impossibilità di disinserire il dispositivo di controllo dell'isolamento.

Per ciò che concerne il trasformatore, invece, la Norma CEI 96/16 stabilisce che esso debba presentare le seguenti caratteristiche:

- Potenza apparente nominale (A_n) compresa tra 0,5 e 10 kVA;
- Tensione al secondario V_{2n} non superiore a 250 V;
- Corrente verso terra dell'avvolgimento secondario non superiore a 0,5 mA;
- Corrente di dispersione sull'involucro non superiore a 0,5 mA (norma 64-8 art. 710.512.1.1);
- Valore di picco della corrente di magnetizzazione non superiore a 12 volte il valore di picco della corrente primaria nominale;
- Targa di identificazione;
- E' consigliabile l'uso di dispositivi per il controllo del sovraccarico e della sovratemperatura.

Nel rispetto delle prescrizioni stabilite dalla norma, si riportano in Tab.3. 11 le caratteristiche del trasformatore scelto:

Trasformatore di isolamento	
Potenza [kVA]	7,5
Tensione Primaria [V]	230
Tensione Secondaria [V]	230
Frequenza [Hz]	50
Dimensioni [mm]	240 x 380 x160
Peso [kg]	50,5
Temperatura ambiente massima [°C]	40
Valore di picco corrente di inserzione [A]	$8 I_n$

Tab.3. 11: Caratteristiche tecniche dei trasformatori di isolamento scelti.

Nella sala operatoria in esame, il sistema IT-M alimenta un carico complessivo monofase $P_{IT-M} = 6 \text{ kW}$ costituito da linee prese, luci, soccorritore per lampade scialitiche, tavolo operatorio e qualsiasi altra apparecchiatura necessaria a portare a termine le operazioni.

In generale, quando si realizzano sistemi di questo genere, è necessario prendere dei particolari provvedimenti di tipo impiantistico che la norma impone per rendere perfettamente isolato il sistema e che riguardano principalmente i collegamenti equipotenziali e la posa dei cavi.

Per quanto riguarda i collegamenti al nodo equipotenziale, è necessario collegare:

- Tutti i dispositivi distanti meno di 1.5 m dal paziente e fino a 2,5 m in altezza (volume di sicurezza);
- Tutte le terre delle prese (eccetto quelle che alimentano dispositivi con potenza superiore a 5 KVA e radiologici).

Per i circuiti di alimentazione, deve essere prevista una separazione fisica tra le linee che alimentano un sistema IT-M e tutte le altre linee dell'impianto, sia nei condotti che all'interno delle cassette di derivazione, se ciò non è possibile è necessario impiegare cavi unipolari dotati di doppio isolamento. Infine, si deve prestare attenzione alla distribuzione delle prese all'interno di un locale. E' ammesso che all'interno di un locale possano essere presenti dei gruppi di prese alimentati dalla sezione IT-M e altri provenienti dalla linea normale di

alimentazione, in tal caso, è obbligatorio adottare tipi di prese a spine diverse per i due circuiti di alimentazione che non siano intercambiabili in modo da non compromettere la sicurezza anche nel caso di utilizzo da parte di personale non addestrato. Infine, per la continuità di servizio, le prese in locali del gruppo 2 sotto IT-M devono essere organizzate in almeno 2 circuiti prese o prese protette a gruppi (almeno 2) o prese protette individualmente.

Nel caso in esame, le prese sono protette a gruppi tramite interruttore magnetotermico garantendo un buon livello di selettività orizzontale.

L'intero sistema IT-M è protetto da un interruttore generale posto nel QSO e dimensionato per l'intera potenza P_{IT-M} . Presenterà le seguenti caratteristiche:

Interruttore:

- Modello: iC60H;
- Tipo: Magnetotermico Fisso;
- $I_n = 32 \text{ A}$ curva D¹⁵;
- Poli = 1;

Questo interruttore dovrà garantire la protezione di tutto il sistema IT-M e la taratura sarà effettuata in modo da essere certi che non intervenga all'inserzione del trasformatore d'isolamento. Avendo scelto una taglia pari a 7,5 kVA, la corrente nominale della macchina sarà:

$$I_n = \frac{A_n}{V_n \cdot \cos\varphi} = 36,23 \text{ A}$$

Il costruttore, garantisce una corrente di inserzione pari a $8 \cdot I_n$. Attraverso questo dato, calcoliamo la in-rush current del trasformatore scelto come:

$$I_{in-rush} = 8 I_n = 290 \text{ A}$$

¹⁵ Gli interruttori dotati di sganciatori termomagnetici presentano tre distinte curve di intervento che caratterizzano il valore di corrente che determina lo sgancio magnetico. La curva B, garantisce l'intervento per valori di corrente compresi tra 3 e $5I_n$, la curva C per $5 \div 10 I_n$ e la curva D per valori compresi tra 10 e $20 I_n$, dove I_n è la corrente nominale dell'interruttore scelto.

L'interruttore scelto presenta una taratura della soglia istantanea pari a 320 A, il che garantisce il non intervento all'inserzione. Ovviamente, essendo l'IT-M un sistema isolato e pensato appositamente per garantire la continuità del servizio consentendo il funzionamento dell'impianto in caso di guasto a terra, i dispositivi di protezione di tutte le utenze saranno solo di tipo magnetotermico e sarà omessa la protezione differenziale in quanto inutile in questo sistema. I carichi alimentati presentano potenze impiegate dell'ordine delle centinaia di Watt, il che fa sì che tutti gli interruttori posti a protezione delle linee siano uguali e dotati delle stesse caratteristiche. Non ci sono particolari tipologie di utenze da proteggere per cui, in presenza di carichi convenzionali, è ammesso l'uso di dispositivi non regolabili tarati in base alla corrente nominale del carico da proteggere. Gli interruttori in questione garantiscono l'intervento in un intervallo di corrente compreso tra 3 e 10 I_n a seconda che siano scelte curve di tipo B o C. Le caratteristiche più rilevanti sono riportate di seguito:

- Modello: C40a;
- Tipo: Magnetotermico Fisso;
- $I_n = (6 \div 16)$ A a seconda dell'utenza;
- Poli = 1;

Per la sezione di impianto al di fuori del sistema IT-M, è necessario l'uso del differenziale di tipo A per la protezione contro i contatti indiretti e, a fronte di due carichi da 500 W, saranno impiegati anche qui due interruttori di tipo C40a per la protezione dai contatti diretti.

In Fig. 3. 11 sono rappresentate le curve caratteristiche degli interruttori scelti:

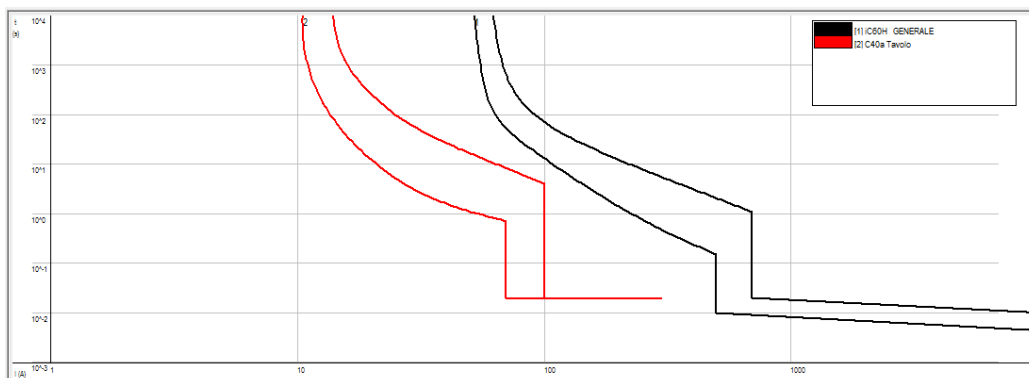


Fig. 3. 11: Curva caratteristica interruttore magnetotermico C40a e iC60H

Per quanto riguarda l'interruttore in testa alla linea di collegamento tra il QRO e il QSO, bisogna assicurarsi che anch'esso presenti una soglia di taratura magnetica tale da non causare interventi all'inserzione del trasformatore medicale.

A tale scopo si sceglie un interruttore avente le seguenti caratteristiche:

- Modello: NSX 160 E MicroL. 2.2;
- $I_0 = 55 \text{ A}$
- $I_r = 1 \cdot I_0 = 55 \text{ A}$;
- $I_{sd} = 10 \cdot I_r = 550 \text{ A}$;
- $I_{\Delta n} = 0,3 \text{ A}$;

Questo interruttore è tarato in modo da garantire la selettività con l'interruttore generale della sezione IT-M e non intervenire all'inserzione del trasformatore.

La curva caratteristica è riportata in Fig. 3. 12 dove si può notare la selettività con l'interruttore generale del sistema IT-M:

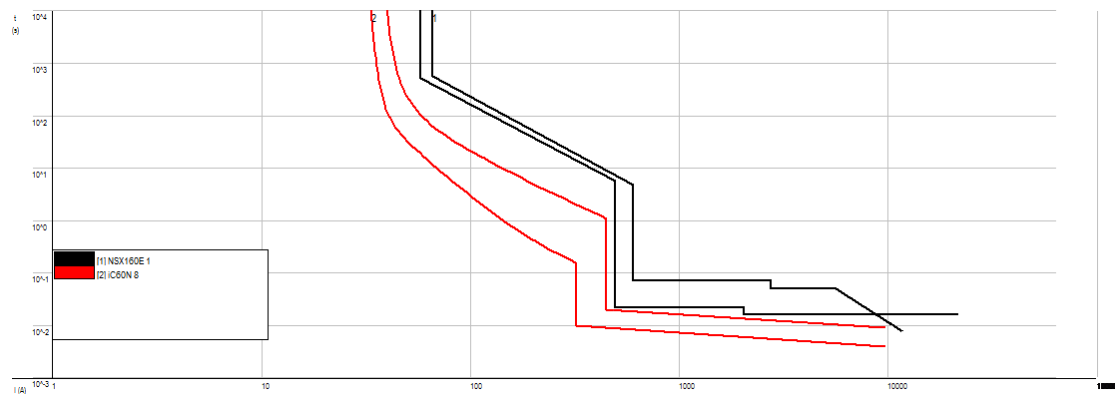


Fig. 3. 12: Caratteristica di intervento dell'interruttore del sistema IT-M (rosso) e del generale di sala operatoria (nero).

A questo punto, si riporta in Fig. 3. 13 il fronte quadro del QSO relativo alla sala operatoria 1:

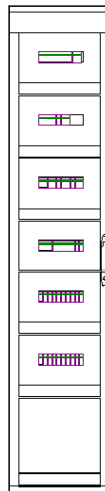


Fig. 3. 13: Fronte quadro QSO

Il quadro presenterà una protezione di tipo IP 31, IK 08, una corrente nominale di 160 A e di corto circuito pari a 10 kA, scelta tra le taglie disponibili in accordo con quanto calcolato precedentemente. Dalla verifica termica effettuata, risulta una potenza dissipata pari a 119,52 W termici a fronte di una massima ammissibile di 360 W termici. Le misure saranno 400 x 2000 x 400 mm (Larghezza x Altezza x Profondità). Il QSO sarà alimentato da una linea trifase proveniente dal QRO avente le seguenti caratteristiche:

- Tipo: FTG100M1 Multipolare;
- Isolante: EPR;
- Formazione: 3 x (1 x 25) + 1 x 16 + 1 x 16;
- Lunghezza: 20 m
- Posa: Aria libera su passerella perforata;
- $I_z = 127 A$

L'uso del cavo di tipo FTG100M1, è giustificato dal fatto che la linea collega un quadro posto ad alimentazione di carichi con requisiti di continuità. Questo tipo di cavo è infatti resistente al fuoco e non propagante l'incendio secondo le caratteristiche dettate dalla norma CEI 20/35 e 20/22. Lungo questa linea, la caduta di tensione sarà pari a:

$$\Delta V\% = \frac{\sqrt{3}Z_{L5}I_b}{V} \cdot 100 = \frac{0,310}{400} \cdot 100 = 0,077\%$$

Per garantire la selettività con l'interruttore della sala operatoria e con quello della sezione IT-M, si dovrà applicare un ritardo alla soglia magnetica dell'interruttore generale del reparto operatorio, modificando la curva rappresentata in Fig. 3.8 come mostrato in Fig. 3. 14:

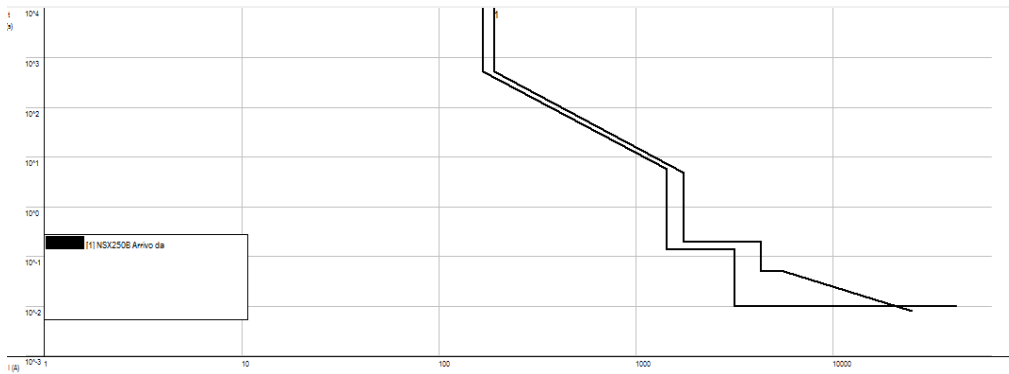


Fig. 3. 14: Caratteristica di intervento con soglia magnetica ritardata dell'interruttore NSX 250 B in testa alla linea di collegamento tra QRO e il QSO.

E' stato necessario impostare un ritardo pari a 0,2 s alla soglia magnetica ritardabile dell'interruttore, evitando intersezioni tra le curve d'intervento in modo da non incorrere in scatti intempestivi in caso di guasto.

Per concludere la trattazione, si riportano in Fig. 3. 15 le caratteristiche di intervento degli interruttori, a partire dal generale installato sul Power Center fino a quello installato alla partenza dell'intero sistema IT-M:

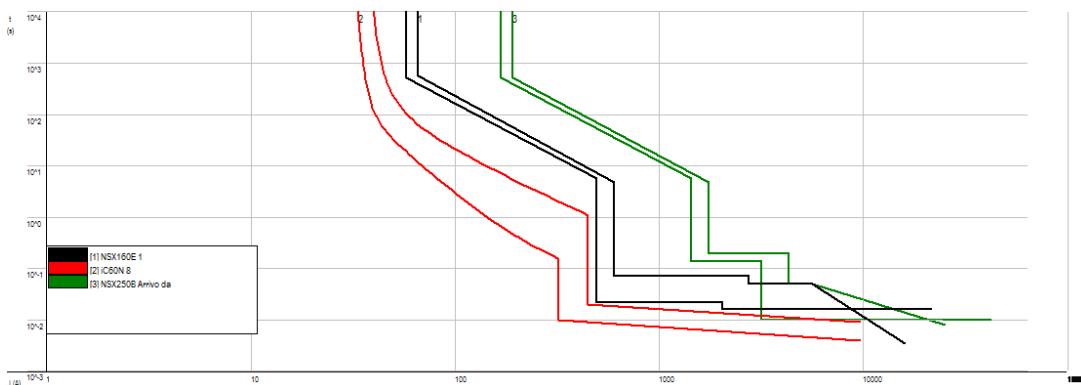


Fig. 3. 15: Caratteristiche degli interruttori in cascata: generale del QRO NSX 250 B (verde), partenza della linea della sala operatoria NSX 160 E (nero) e generale del reparto operatorio iC60H (rosso). Si può notare come l'intersezione tra le curve non permetta la selettività, per cui sarà necessario modificare la curva verde.

Si può notare che la selettività è rispettata, ma è presente una sovrapposizione tra la curva caratteristica dell'interruttore generale del reparto operatorio (verde) e quella dell'interruttore posto a protezione della sala operatoria 1 (nero). Per ovviare a questo problema, avendo impiegato un interruttore provvisto di sganciatore elettronico, si può azzerare la soglia istantanea¹⁶, ottenendo una caratteristica come in Fig. 3. 16:

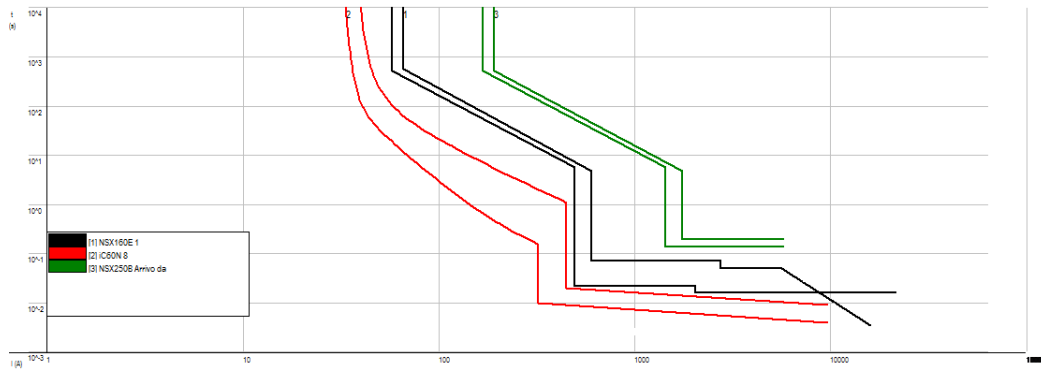


Fig. 3. 16: Curve degli interruttori dopo aver azzerato la soglia magnetica istantanea dell'interruttore NSX 250 B, eliminando le intersezioni tra le caratteristiche di intervento.

In questo modo non si avrà alcuna intersezione e la selettività è garantita. L'aver disattivato la soglia istantanea, comporterà un aumento dei tempi di intervento del dispositivo generale del reparto operatorio: occorrerà, dunque, verificare che la linea sia ancora protetta dalle sollecitazioni termiche in caso di guasto.

Dovrà essere verificata:

$$I^2 t_i \leq K^2 S^2$$

Che fornisce come risultato:

$$17,18 < 100,2$$

Avendo considerato $t_i = 0,2$ s.

3.2.2 Locale Preparazione/Risveglio Pazienti

In questi locali il paziente è monitorato e assistito con particolare attenzione, visto che può essere in gioco la sua stessa vita: si tratta, quindi, di locali classificati di gruppo 2, dove vengono utilizzati strumenti ed apparecchiature il cui funzionamento deve essere necessariamente garantito con la massima sicurezza possibile. Proprio per questo motivo, la scelta progettuale prevede l'alimentazione dell'intero locale attraverso una linea di continuità

¹⁶ Gli interruttori elettronici presentano la possibilità di ritardare una delle due soglie magnetiche (soglia S) e di regolare una soglia di intervento magnetico istantanea (soglia I) che può essere anche disabilitata dal pannello di comando dell'interruttore posizionando un'apposita manovella sulla posizione di OFF.

e quindi l'installazione di un UPS per far fronte ad eventuali buchi di tensione che potrebbero compromettere il corretto funzionamento delle apparecchiature con notevoli ripercussioni sulla sicurezza del paziente. Anche in questo caso, è necessario effettuare una precisazione riguardo alla potenza installata ed ai coefficienti di contemporaneità e di utilizzazione applicati. La potenza complessiva installata in questo locale è pari a 37,9 kW ripartita in modo da avere 36,9 kW installati all'interno del sistema IT-M e la restante parte, costituita da luci, al di fuori. Analogamente a quanto fatto per la sala operatoria, sono stati applicati dei coefficienti unitari per le luci e pari a 0,6 per le linee prese. Per tutto il sistema IT-M, è stato considerato un coefficiente globale pari a 0,18 e, di conseguenza, la potenza totale di dimensionamento del locale risulta pari a 7,7 kW a cui corrisponde una $I_b = 12,4$ A. L'intero sistema IT-M è protetto da un interruttore generale posto nel quadro del locale Preparazione e Risveglio Pazienti (QPRP) e dimensionato per l'intera potenza P_{IT-M} . La potenza del trasformatore impiegato è la stessa di quella della sala operatoria per cui le caratteristiche dell'interruttore sono le medesima del caso precedente.

Ovviamente, anche in questo caso i dispositivi di protezione di tutte le utenze saranno solo di tipo magnetotermico. Come nella sala operatoria, i carichi alimentati presentano potenze impiegate che dell'ordine delle centinaia di Watt, il che fa sì che tutti gli interruttori posti a protezione delle linee siano uguali e dotati delle stesse caratteristiche già viste. Per la sezione di impianto al di fuori del sistema IT-M, è necessario l'uso del differenziale di tipo A per la protezione contro i contatti indiretti e, a fronte di due carichi da 500 W, saranno impiegati anche qui due interruttori di tipo C40a. La curva caratteristica è la stessa già vista in Fig. 3.7. Il locale in questione è provvisto di un proprio quadro (QPRP) che riceve alimentazione direttamente dal quadro di reparto QRO analogamente a quanto accade per il quadro della sala operatoria 1 e presenterà le sue stesse caratteristiche. Il fronte quadro è riportato in Fig. 3. 17.



Fig. 3. 17: Fronte quadro QPRP.

Il quadro presenterà una protezione di tipo IP 31, IK 08, una corrente nominale di 160 A e di corto circuito pari a 10 kA . Analogamente a quanto fatto per gli altri quadri, è stata effettuata

la verifica termica considerando la potenza dissipata da ciascun dispositivo e quella sopportabile dalla carpenteria scelta. In questo caso, a fronte di una potenza sopportabile di 360 W termici, i dispositivi dissipano, in condizioni nominali di funzionamento, una potenza pari a 109,2 W termici. Il locale di Preparazione/Risveglio pazienti necessita, come detto, di esigenze di continuità del servizio, per le quali è necessario l'uso dell'UPS che in questo caso ricoprirà l'intera potenza installata. Esso sarà alimentato, come già detto, da una linea trifase proveniente dal QRO avente le seguenti caratteristiche:

- Tipo: FTG100M1 Multipolare;
- Isolante: EPR;
- Formazione: 3 x (1 x 25) + 1 x 16 + 1 x 16;
- Lunghezza: 20 m
- Posa: Aria libera su passerella perforata;
- $I_z = 127 \text{ A}$

Lungo questa linea, la caduta di tensione sarà pari a:

$$\Delta V\% = \frac{\sqrt{3}Z_{L6}I_b}{V} \cdot 100 = \frac{0,344}{400} \cdot 100 = 0,086\%$$

Analogamente a quanto visto per la sala operatoria, si riportano in Fig. 3. 18 le caratteristiche degli interruttori scelti e regolati in modo da garantire la selettività.

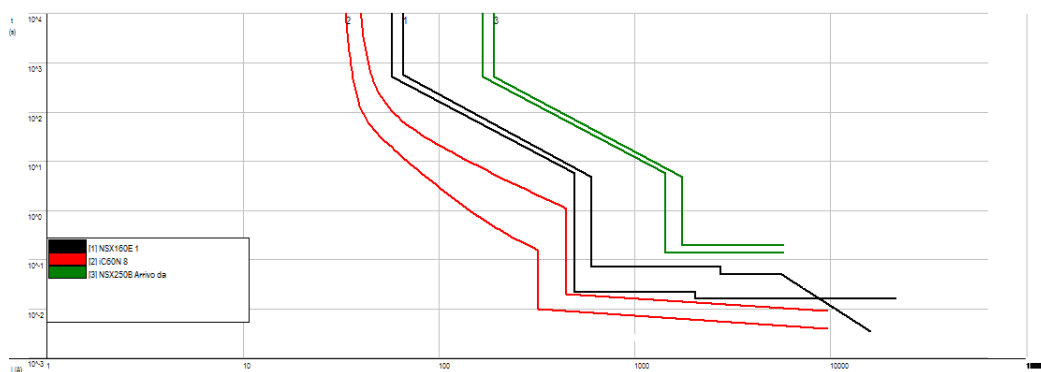


Fig. 3. 18: Livelli di selettività dal QRO ai carichi alimentati dal QPRP.

3.3 Reparto Degenze

Il Reparto Degenze considerato rappresenta una parte del padiglione adibito ad ospitare i pazienti ed è organizzato su tre livelli, ciascuno dei quali ospita venti stanze da due posti letto ciascuno, per un totale di sessanta posti letto.

Le camere di degenza sono classificate come locali di Gruppo 1 e in questo tipo di locali, non ci sono molte esigenze particolari in quanto il paziente deve essere assistito in operazioni di routine. Può capitare che debbano essere impiegate eventuali apparecchiature elettromedicali per svolgere delle analisi all'interno della stanza per esigenze specifiche e, quindi, sarà sufficiente prevedere una predisposizione impiantistica per far fronte a questa necessità.

Partendo dal Power Center, a protezione dell'intera linea trifase a 400 V sarà presente un interruttore magnetotermico differenziale.

Per quanto riguarda i criteri di scelta delle caratteristiche della linea e degli interruttori di protezione, si seguiranno gli stessi criteri già visti per il reparto operatorio. Sarà, dunque, necessario conoscere la totale potenza di dimensionamento, la corrente assorbita e, in base alla lunghezza della linea, coordinare il cavo e l'interruttore contenendo la caduta di tensione lungo la linea. Il Reparto Degenze presenta complessivamente una potenza di dimensionamento pari a circa 116 kW, ricavata dalla totale potenza installata tenuto conto dei coefficienti di contemporaneità. Considerando un $\cos\phi = 0,9$, la corrente totale di dimensionamento sarà pari a $I_b = 186$ A. Per quanto riguarda il collegamento del Quadro del Reparto Degenze al Power Center, sarà necessario, come visto per il Reparto Operatorio, soddisfare la relazione:

$$I_b \leq I_z$$

Le caratteristiche del cavo, la formazione della linea e le modalità di posa, sono riportate nel seguito:

Cavo:

- Tipo: FG7M1 Unipolare;
- Isolante: EPR;
- Formazione: 3 x (1x95) + 1 x 50 + 1 x 50;

- Lunghezza: 50 m
- Posa: Interrata in tubi o cunicoli;
- $I_z = 315$ A;

Come indicato dal costruttore, per tener conto degli sbalzi climatici, della resistenza termica del tipo di terreno in cui sarà posata la linea, si applica un coefficiente correttivo pari a 0,8 ottenendo una portata $I_z = 252$ A nelle determinate condizioni in cui è installato l'impianto.

A questo punto, considerando l'impedenza già calcolata mediante i dati di reattanza e resistenza chilometrica del cavo forniti dal costruttore tramite apposito data sheet, calcoliamo la caduta di tensione:

$$\Delta V\% = \frac{\sqrt{3}Z_{L2}I}{V} \cdot 100 = \frac{3,72}{400} \cdot 100 = 0,93\%$$

A questo punto si procede con la scelta dell'interruttore di protezione da installare a monte della linea considerata.

I dati più rilevanti sono riportati nel seguito:

Interruttore:

- Modello: NSX 250;
- Tipo: Magnetotermico Differenziale Estraibile;
- $I_n = 250$ A;
- Poli = 3;
- $I_{\Delta n} = 1$ A Tipo S;

Come per gli altri interruttori generali, l'interruttore in questione permette una temporizzazione regolabile in modo da garantire la selettività con gli interruttori a valle e salvaguardare la continuità dell'alimentazione. Questo interruttore, analogamente a quanto visto per il reparto operatorio, è posto all'interno del Power Center e deve permettere la selettività a monte con l'interruttore di macchina garantendo a valle un buon margine

temporale ed amperometrico per realizzare la selettività con gli interruttori di bassa tensione installati nei vari quadri di reparto.

Anche in questo caso, per perseguire un corretto coordinamento tra cavo e interruttore, si dovrà soddisfare:

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

Per quanto riguarda la regolazione della soglia termica di taratura dell'interruttore, si dovrà considerare il valore di I_0 (corrente di lungo ritardo) disponibile per la taglia di interruttori scelta. Per quanto riguarda gli interruttori da 250A, i valori di I_0 a disposizione, sono quelli riportati in Tab.3. 12:

I_n	Valori ammessi di I_0								
250 A	100	110	125	140	160	175	200	225	250

Tab.3. 12: Valori di I_0 ammessi per interruttori con $I_n = 250$ A.

Scegliendo un valore di $I_0 = 200$ A e tarando la soglia termica al 94% di tale corrente, si otterrà una corrente di regolazione termica pari a $I_r = 0,94 \cdot I_0 = 188$ A con la garanzia da parte del costruttore, di ottenere un intervento del dispositivo di protezione in un intervallo compreso tra $1,05 \cdot I_r$ e $1,2 \cdot I_r$. La soglia magnetica sarà tarata ad una corrente pari a $10 \cdot I_r = 1,88$ kA, ottenendo una caratteristica riportata in Fig. 3. 19:

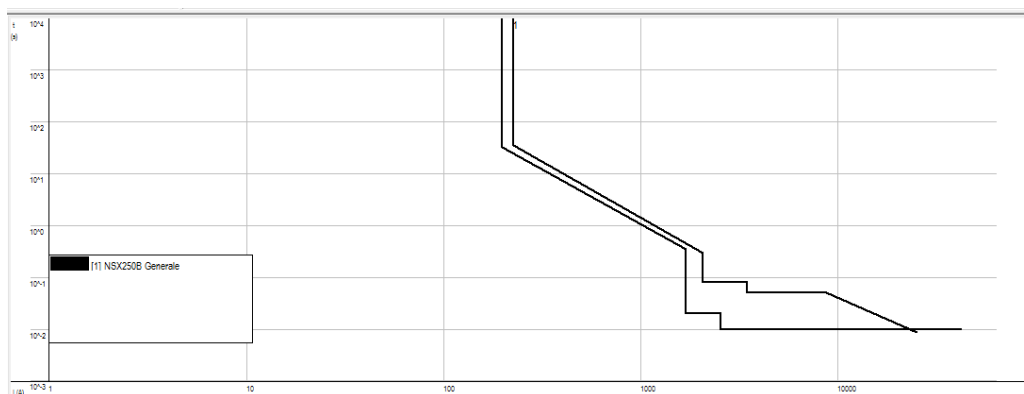


Fig. 3. 19: Curva interruttore NSX 250 E posto a protezione della linea alimentante il Reparto Degenze.

Come verifica, possiamo osservare che $1,2 \cdot I_r = 225,6 \text{ A}$, per cui la linea può sopportare questo valore di corrente senza subire una diminuzione della vita utile a causa di stress termici. E' garantita la selettività a monte con l'interruttore di protezione del trasformatore, tarato con una soglia istantanea pari a 4,32 kA ed una termica pari a 720 A.

Anche qui occorre verificare l'efficacia della protezione contro il cortocircuito, confrontando l'energia lasciata passare dall'interruttore in caso di guasto con quella sopportabile dal cavo.

Considerando la corrente di cortocircuito calcolata in precedenza pari a $I_{kL2} = 8 \text{ kA}$ che provoca l'intervento della soglia istantanea dell'interruttore pari a $t_i = 0,01 \text{ s}$, avremo:

$$I^2 t_i \leq K^2 S^2 \rightarrow 0,64 < 184,55$$

Data la validità della relazione, si può affermare che la conduttura è protetta.

A questo punto, stabilite le caratteristiche della linea e coordinata la protezione a monte, ci occupiamo del Quadro del Reparto Degenze (QRD) che rappresenta il quadro da cui saranno prelevate le partenze per le diverse utenze da servire.

Il QRD è un quadro di distribuzione secondaria, e si presenta come riportato in Fig. 3. 20:

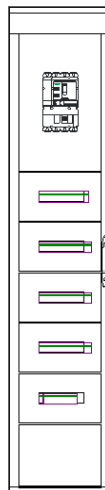


Fig. 3. 20: Fronte quadro QRD.

Anche qui sarà installato un interruttore in testa al quadro che avrà le stesse caratteristiche di quello presente nel Power Center a monte della linea principale. Il quadro sarà dimensionato per una corrente di cortocircuito pari a 10 kA e presenterà un grado di protezione IP 31 e IK 08. Gli ingombri saranno 400 x 2000 x 400 mm (Larghezza x Altezza x Profondità) e, a seguito della verifica termica effettuata, risulta una potenza dissipata dai dispositivi pari a 185,02 W termici a fronte di una potenza sopportabile dal quadro pari a 360 W.

Come già accennato, il reparto degenze non necessita di particolari accorgimenti per quanto riguarda la continuità. Il quadro in questione, pertanto, presenterà come utenze privilegiate soltanto le luci necessarie richieste dalla normativa vigente. Esse saranno alimentate tramite UPS in modo da garantire un minimo illuminamento disponibile anche in caso di assenza della rete.

Analogamente a quanto fatto per i quadri di reparto finora trattati, è necessario calcolare il valore della corrente di cortocircuito dei quadri di zona del Reparto Degenze. Per farlo, consideriamo la Fig. 3. 21:

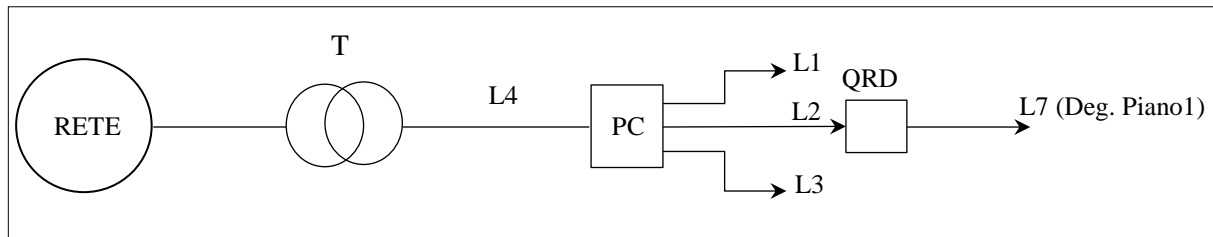


Fig. 3. 21:Schema rappresentante il lato MT, il trasformatore e le linee in BT in partenza da Power Center e dal QRD

Le caratteristiche della linea da considerare sono riassunte in Tab.3. 13:

	Lunghezza [m]	Sezione [mm ²]	Resistenza [Ω/km]	Reattanza [Ω/km]
Linea 7	20	25	0,795	0,0813

Tab.3. 13: Caratteristiche elettriche delle linee in partenza dal QRD

Possiamo ricavare i valori della correnti di cortocircuito al quadro del primo piano, considerando un'impedenza Z'' comprensiva del contributo della rete, del trasformatore, della linea L_4 e della L_2 :

$$Z'' = R'' + jX'' = (15,16 + j24,4) \text{ m}\Omega$$

Con

$$R'' = R_{TR} + R_R + R_{L4} + R_{L2} = (4,3 + 0,0369 + 0,326 + 10,5) \cdot 10^{-3} = 15,16 \text{ m}\Omega$$

$$X'' = X_{TR} + X_R + X_{L4} + X_{L2} = (18,7 + 0,369 + 0,44 + 4,87) \cdot 10^{-3} = 24,4 \text{ m}\Omega$$

Quadro Degenze Primo Piano

L'impedenza della linea sarà calcolata come segue:

$$Z_{L7} = R_7 + jX_7 = (15,9 + j1,63) \text{ m}\Omega \Rightarrow |Z_{L7}| = 15,9 \text{ m}\Omega$$

La corrente di cortocircuito sarà:

$$I_{kL7} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R'' + R_{L7})^2 + (X'' + X_{L7})^2}} = \frac{400 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(15,16 + 15,9)^2 + (24,4 + 1,63)^2}} = 5,67 \text{ kA}$$

3.3.1 Degenze

Le degenze, come accennato, sono classificate come locali medici di Gruppo 1 e, dal punto di vista della sicurezza, necessitano del livello di tensione ridotto a 25V per la protezione contro i contatti indiretti. Ciascuna camera di degenza non presenta particolari accorgimenti impiantistici se non la predisposizione di un attacco di prese radiologiche per apparecchiature elettromedicali che possono essere introdotte nella camera per eseguire degli esami localmente. Il locale considerato prevede la presenza di camere di degenza ospitanti due posti letto e, per ogni locale adibito al ricovero, ci saranno un filtro ed un bagno. Il carico complessivo di una camera completa di servizi è pari a circa 1,2 kW in cui sono stati considerati, al solito, un coefficiente di contemporaneità per le luci pari a 1. La corrente di dimensionamento assorbita sarà $I_b = 1,92 \text{ A}$. La potenza assorbita dal singolo piano, considerando la presenza di venti camere di degenza carichi luce dei corridoi e servizi di piano, sarà pari a 32 kW. A questa potenza corrisponde una corrente d'impiego pari a 51,3 A. Considerando che la linea che collega il QGD al QDP1 presenta le seguenti caratteristiche:

- Tipo: FG7OM1 Multipolare;
- Isolante: EPR;
- Formazione: 3 (1x25) + 1 x 25 + 1 x 25;
- Lunghezza: 20 m
- Posa: Su passarella perforata;

- $I_z = 127 \text{ A}$;

Allora l'interruttore scelto sarà:

- Modello: iC 60 N;
- Tipo: Magnetotermico Differenziale;
- $I_n = 63 \text{ A}$;
- Poli = 3;
- $I_{\Delta n} = 0,3 \text{ A}$ Tipo S;

La cui curva caratteristica è riportata in Fig. 3. 22:

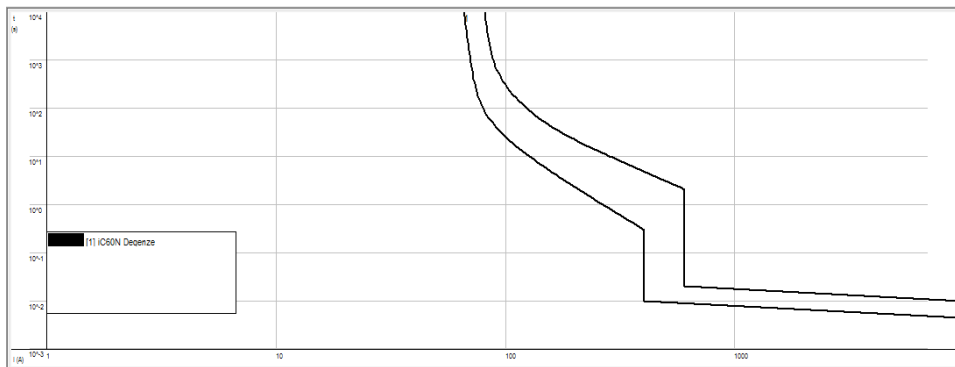


Fig. 3. 22: Curva intervento interruttore iC 60 N.

In Fig. 3. 23 si riporta il fronte quadro del QDP1 relativo al primo piano:



Fig. 3. 23: Fronte quadro QDP1.

Il quadro presenta un grado di protezione IP 31 e IK 08, una corrente nominale pari a 160 A e di cortocircuito pari a 10 kA. Analogamente a quanto fatto per gli altri quadri fino ad ora trattati, la potenza dissipata dai dispositivi di protezione risulta di 95,76 W termici su 360 W sopportabili dalla carpenteria.

Nel quadro generale del primo piano, sono alloggiate le partenze per le varie camere di degenza. Da qui, partiranno delle linee in cavo che arriveranno ai quadri delle camere. Si riportano le caratteristiche di tali linee:

Cavo:

- Tipo: FG7OM1 Multipolare;
- Isolante: EPR;
- Formazione: 3 x (1x4) + 1 x 4 + 1 x 4;
- Lunghezza: 10 m
- Posa: Su passarella perforata;
- $I_z = 49 \text{ A}$;

Anche qui, con gli stessi criteri adottati finora, si sceglie il dispositivo di protezione posto ai capi di ogni linea diretta alle varie camere di degenza. Non ci sono particolari tipologie di utenze da proteggere per cui, in presenza di carichi convenzionali, è ammesso l'uso di dispositivi non regolabili tarati in base alla corrente nominale del carico da proteggere. L'interruttore in questione garantisce un intervento in un intervallo di corrente compreso tra 5 e 10 I_n e le caratteristiche più rilevanti sono elencate di seguito:

- Modello: C 40 N;
- Tipo: Magnetotermico Differenziale;
- $I_n = 10 \text{ A}$;
- Poli = 3;
- $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$ Tipo G;

La curva caratteristica è riportata in Fig. 3. 24:

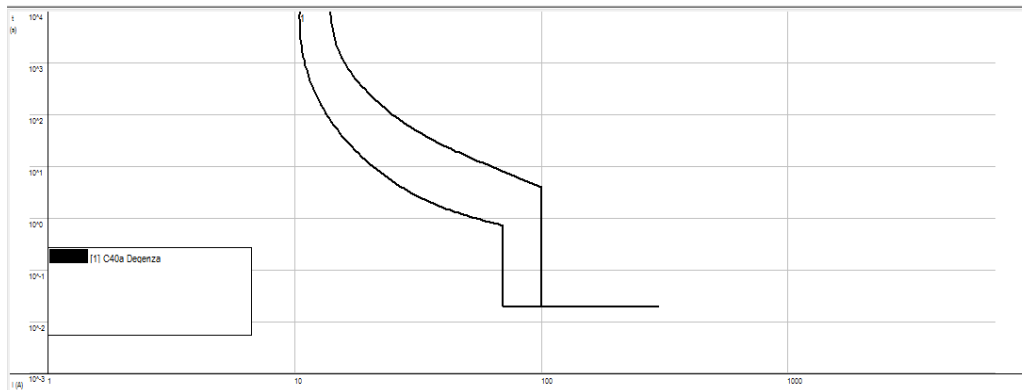


Fig. 3. 24: Curva intervento interruttore C 40 N.

A questo punto, calcoliamo la caduta di tensione e il livello di cortocircuito su quadro della singola camera di degenza facendo riferimento a Fig. 3. 25 e a

	Lunghezza [m]	Sezione [mm ²]	Resistenza [Ω/km]	Reattanza [Ω/km]
Linea 8	10	4	4,95	0,101

Tab.3. 14:

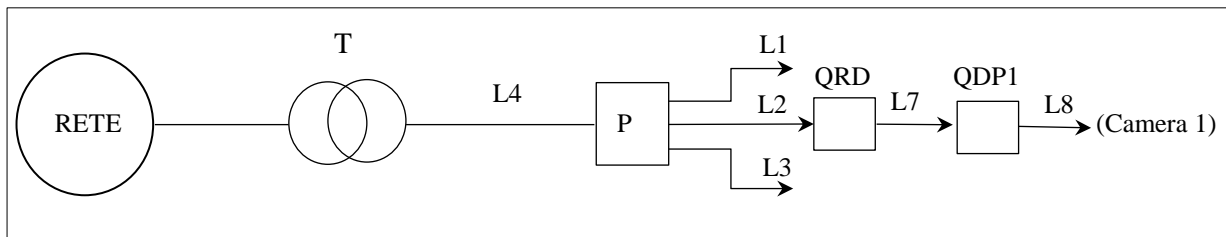


Fig. 3. 25: Schema rappresentante il lato MT, il trasformatore e le linee in BT in partenza da Power Center, dal QRD e dal QDP1

	Lunghezza [m]	Sezione [mm ²]	Resistenza [Ω/km]	Reattanza [Ω/km]
Linea 8	10	4	4,95	0,101

Tab.3. 14: Caratteristiche elettriche delle linee in partenza dal QDP1.

$$\Delta V\% = \frac{\sqrt{3}Z_{L8}I_b}{V} \cdot 100 = \frac{0,164}{400} \cdot 100 = 0,041 \%$$

Dove

$$Z_{L8} = R_8 + jX_8 = (49,5 + j1,01) \text{ m}\Omega \Rightarrow |Z_{L8}| = 49,5 \text{ m}\Omega$$

Il livello di cortocircuito in prossimità del quadro della camera di degenza, si calcola considerando l'impedenza totale, ottenuta sommando il contributo di Z'' e delle linee L_7 ed L_8 :

$$I_{KL7} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R'' + R_{L7} + R_{L8})^2 + (X'' + X_{L7} + X_{L8})^2}} = 2,7 \text{ kA}$$

Il fronte quadro relativo ad una camera di degenza è riportato in Fig. 3. 26:

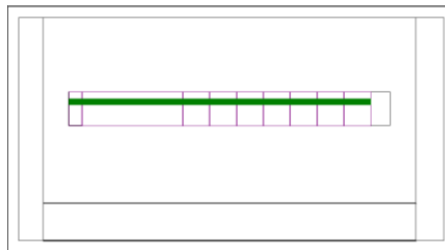


Fig. 3. 26: Fronte quadro camera di degenza.

Anche per questo quadro, è stata effettuata la verifica termica secondo la quale i dispositivi installati dissipano una potenza termica pari a 23,4 W su 43 W sopportabili dalla struttura. Il grado di protezione è IP 30 e gli ingombri sono 595 x 330 x 205 mm (Larghezza x Altezza x Profondità).

Gli interruttori installati in questo quadro, rappresentano le partenze delle varie linee prese e luce delle camere di degenza. Avranno tutti le stesse caratteristiche riportate di seguito:

- Modello: C 40 a ;
- Tipo: Magnetotermico Differenziale;
- $I_n = 6 \text{ A}$;
- Poli = 1;

- $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$;

Come visto per gli altri quadri, si riportano in Fig. 3. 27 le curve di tutti gli interruttori per verificare il perseguimento della selettività:

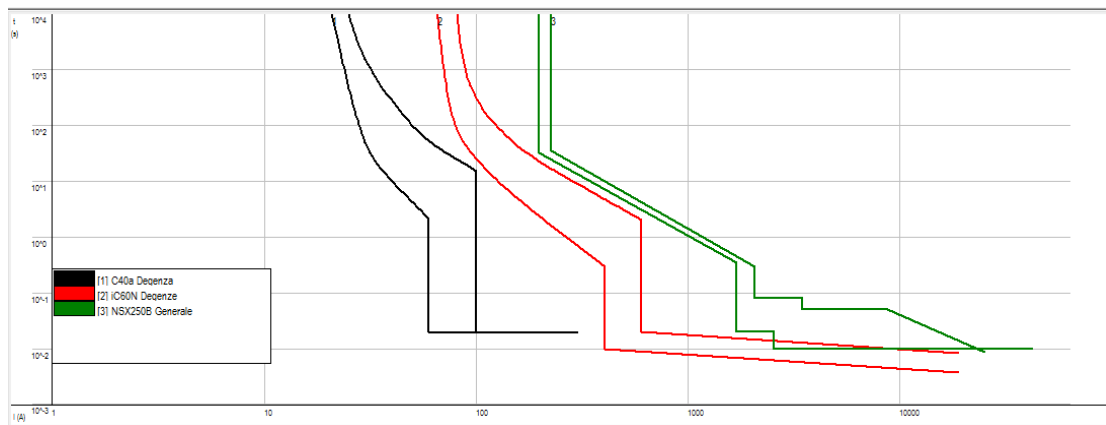


Fig. 3. 27: Curve di selettività relative ai quadri del reparto degenze.

Si può notare la sovrapposizione tra la curva del dispositivo generale installato nel quadro di padiglione (curva verde) e quello posto a protezione del primo piano (curva rossa). Come visto per il reparto operatorio, per ovviare a questo problema si potrebbe impostare la soglia istantanea ad OFF eliminando le intersezioni tra le caratteristiche.

In realtà, in questo caso in cui non ci sono particolari esigenze che obblighino all'installazione di interruttori elettronici, può essere conseguita la selettività attraverso un normale interruttore con sganciatore termomagnetico, con un vantaggio dal punto di vista economico.

L'interruttore scelto è uno scatolato con le seguenti tarature:

- Modello: NS 250 B;
- $I_n = 200 \text{ A}$;
- $I_r = 1 \cdot I_n = 200 \text{ A}$;
- $I_{sd} = 10 \cdot I_n = 2 \text{ kA}$;
- Poli: 3;
- $I_{\Delta n} = 1 \text{ A}$;

Le curve di intervento sono riportate in Fig. 3. 28:

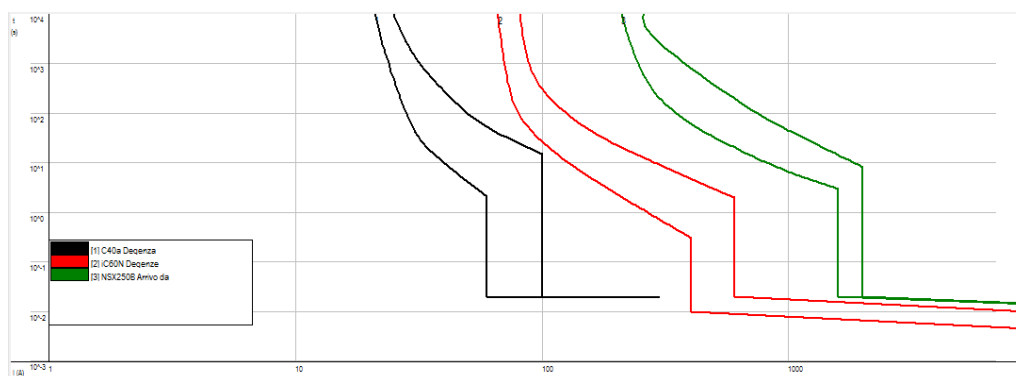


Fig. 3. 28: Curve degli interruttori. La selettività è stata conseguita tramite l'uso di interruttori con normale sganciatore termomagnetico.

In questo modo è comunque garantita la selettività e la sicurezza delle persone e dell'impianto. La possibilità dell'installazione di un interruttore termomagnetico al posto di uno elettronico, consentirà di risparmiare sul costo del dispositivo.

3.4 Reparto Diagnostica

Tutti i locali dove viene effettuata diagnostica, sono classificati dalla norma come locali di Gruppo 1. Questo genere di locali richiede una certa attenzione dal punto di vista impiantistico in quanto le apparecchiature utilizzate a scopo radiologico, presentano funzionamenti piuttosto particolari. Oltre ai consistenti livelli di potenza, si possono verificare assorbimenti di corrente variabili con forti picchi in funzione della modalità di funzionamento dell'apparecchio stesso, alternati a momenti in cui l'assorbimento risulta costante.

La presenza di assorbimenti impulsivi con picchi molto elevati, fa sì che si possano verificare delle perturbazioni sulla rete a monte o degli scatti intempestivi degli interruttori posti a protezione della linea con un notevole aumento dei costi.

Una soluzione a questo problema potrebbe essere quella di installare localmente una sorgente capace di fornire l'energia necessaria assorbita dal picco iniziale caratterizzato da una durata molto breve ma di alta intensità. Ciò, potrebbe essere realizzato con i supercondensatori che rappresentano degli accumulatori caratterizzati da alta densità di potenza e che riescono quindi a fornire elevate potenze per tempi brevi dell'ordine delle centinaia di millisecondi. Adottando un accumulo locale, ad esempio installato in prossimità dell'apparecchio radiologico, si riuscirebbe a fornire l'energia necessaria per far fronte ai picchi con evidenti benefici per la rete a monte [12]. Recentemente, alcuni apparecchi elettromedicali sono stati progettati e costruiti secondo quest'ottica, adottando l'accumulo all'interno della macchina stessa, in modo da non presentare più picchi di potenza durante lo svolgimento dell'esame con vantaggio sia per la scelta dell'interruttore di protezione che per tutta la rete elettrica.

Analogamente a quanto svolto per gli altri reparti, ci occupiamo ora di dimensionare la linea di alimentazione proveniente dal Power Center e l'interruttore posto a protezione della stessa. L'intero reparto diagnostico assorbe una potenza complessiva pari a 111,6 kW ed una corrente di 179 A calcolata al solito mediante l'uso dei coefficienti di contemporaneità e utilizzazione secondo i criteri adottati anche negli altri reparti.

Le caratteristiche del cavo, la formazione della linea e le modalità di posa, sono riportate nel seguito:

Cavo:

- Tipo: FG7M1 Unipolare;
- Isolante: EPR;
- Formazione: 3 x (1x95) + 1 x 95 + 1 x 50;

- Lunghezza: 100 m
- Posa: Interrata in tubi o cunicoli;
- $I_z = 315$ A;

Come indicato dal costruttore, per tener conto degli sbalzi climatici, della resistenza termica del tipo di terreno in cui sarà posata la linea, si applica un coefficiente correttivo pari a 0,8 ottenendo una portata $I_z = 252$ A nelle determinate condizioni in cui è installato l'impianto.

A questo punto, considerando l'impedenza della linea già calcolata in precedenza, calcoliamo la caduta di tensione:

$$\Delta V\% = \frac{\sqrt{3}Z_{L3}I_b}{V} \cdot 100 = \frac{7,17}{400} \cdot 100 = 1,79\%$$

A questo punto si procede con la scelta dell'interruttore di protezione da installare a monte della linea considerata riportando i dati più rilevanti nel seguito:

Interruttore:

- Modello: NS 250 B;
- Tipo sganciatore: Termo - magnetico;
- $I_n = 200$ A;
- Poli = 3;
- $I_r = 0,9 \cdot I_n = 180$ A;
- $I_{sd} = 10 \cdot I_r = 1,8$ kA;
- $I_{\Delta n} = 1$ A Tipo S;

La caratteristica di intervento del dispositivo è riportata in Fig. 3. 29:

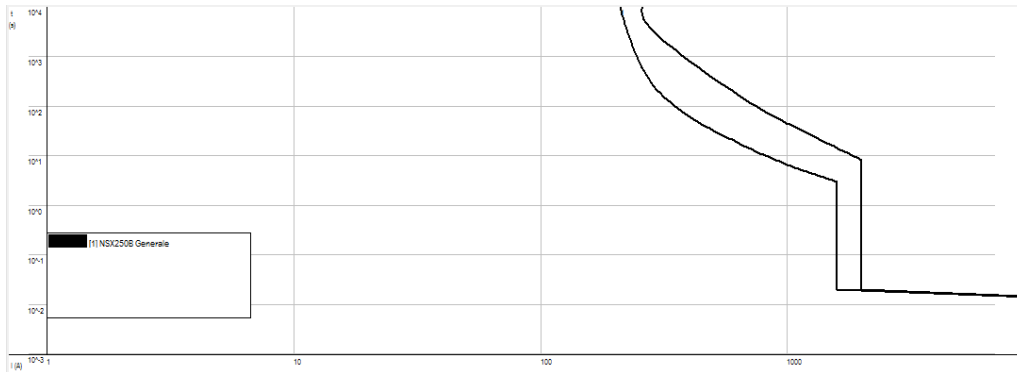


Fig. 3. 29: Curva interruttore NS 250 B.

Con le tarature scelte, è verificata la selettività con l'interruttore di protezione del trasformatore tarato ad una soglia termica pari a 720 A e una magnetica da 4,32 kA. Come visto per gli altri reparti, occorre verificare l'efficacia della protezione contro il cortocircuito, confrontando l'energia lasciata passare dall'interruttore in caso di guasto con quella sopportabile dal cavo. Considerando la corrente di cortocircuito calcolata in precedenza pari a $I_{kL3} = 5,9$ kA che provoca l'intervento della soglia istantanea dell'interruttore pari a $t_i = 0,01$ s, avremo:

$$I^2 t_i \leq K^2 S^2 \rightarrow 0,348 < 184,55$$

Data la validità della relazione, si può affermare che la conduttura è protetta. Il Quadro del Reparto Diagnostica (QRDG) è un quadro di distribuzione secondaria, e si presenta come riportato in Fig. 3. 30:



Fig. 3. 30: Fronte quadro QRDG.

L'interruttore generale ha le stesse caratteristiche di quello installato nel Power Center e, per raggiungere un maggiore livello di qualità dell'impianto, si può prevedere una selettività cronometrica in modo da permettere al solo interruttore del QRDG di intervenire in caso di guasto a valle di esso.

Il quadro sarà dimensionato per una corrente di cortocircuito pari a 10 kA e presenterà un grado di protezione IP 31 e IK 08. Gli ingombri saranno 400 x 2000 x 400 mm (Larghezza x Altezza x Profondità) e, a seguito della verifica termica effettuata, risulta una potenza dissipata dai dispositivi pari a 122,64 W termici a fronte di una potenza sopportabile dal quadro pari a 360 W.

Si prosegue ora, calcolando il valore della corrente di cortocircuito dei quadri di zona del Reparto di Diagnostica. In questa trattazione, ci focalizzeremo sul locale TAC, per cui considereremo il quadro del locale considerando la Fig. 3. 31:

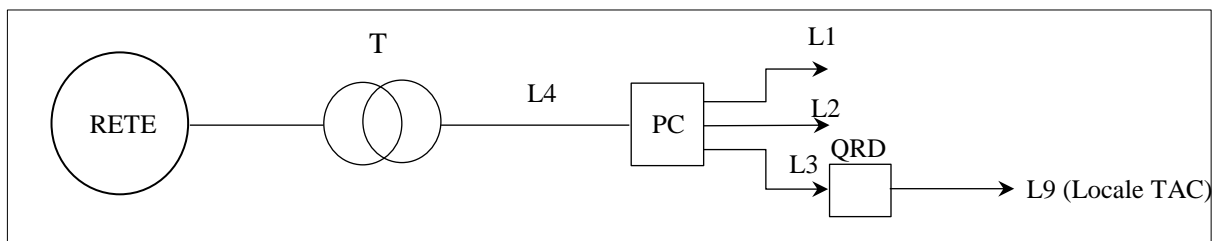


Fig. 3. 31: Schema rappresentante il lato MT, il trasformatore e le linee in BT in partenza da Power Center, dal QRDG

In Tab.3. 15 sono riassunte le caratteristiche della linea da considerare:

	Lunghezza [m]	Sezione [mm ²]	Resistenza [Ω/km]	Reattanza [Ω/km]
Linea 9	15	25	0,795	0,0813

Tab.3. 15: Caratteristiche elettriche delle linee in partenza dal QRDG.

Considerando un'impedenza $Z''' = 43,27 \text{ m}\Omega$, comprensiva del contributo della rete, del trasformatore, della linea L4 e della L3, possiamo ricavare il valore della corrente di cortocircuito al quadro del locale TAC.

Possiamo ricavare i valori della correnti di cortocircuito al quadro del locale TAC, considerando un'impedenza Z''' comprensiva del contributo della rete, del trasformatore, della linea L4 e della L3:

$$Z''' = R'' + jX''' = (25,7 + j29,25) \text{ m}\Omega$$

Con

$$R'' = R_{TR} + R_R + R_{L4} + R_{L3} = (4,3 + 0,0369 + 0,326 + 21) \cdot 10^{-3} = 25,7 \text{ m}\Omega$$

$$X'' = X_{TR} + X_R + X_{L4} + X_{L3} = (18,7 + 0,369 + 0,44 + 9,75) \cdot 10^{-3} = 29,25 \text{ m}\Omega$$

Quadro Locale TAC

$$Z_{L9} = R_9 + jX_9 = (11,9 + j1,22) \text{ m}\Omega \Rightarrow |Z_{L7}| = 11,9 \text{ m}\Omega$$

La corrente di cortocircuito sarà:

$$I_{kL9} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R''' + R_{L9})^2 + (X''' + X_{L9})^2}} = 4,75 \text{ kA}$$

3.4.1 Locale TAC

Il locale Tac, è il luogo in cui è presente il macchinario atto alle operazioni di diagnostica. Dal punto di vista progettuale, c'è una precisazione da effettuare riguardante alcune problematiche derivanti da questo genere di apparecchiature e che comportano particolari scelte a livello impiantistico. Gli apparecchi elettromedicali sono costituiti da dispositivi alimentati in corrente continua da un convertitore AC/DC interno all'apparecchio, quindi si potrebbe verificare la presenza di correnti di dispersione di tipo continuo che non tutti gli interruttori differenziali sono in grado di rilevare. Sarà necessario, per la linea che alimenta il macchinario della TAC, un interruttore differenziale di tipo B in grado di rilevare, oltre alle componenti alternati e pulsanti, quelle continue. Questo accorgimento vale per tutti quei dispositivi che operano in corrente continua e che necessitano di un convertitore. Sarà il caso, in ambito medico, di:

- Generatori di raggi X;
- Risonanza magnetica;
- TAC;

Il quadro del locale TAC, sarà costituito da una parte alimentata tramite alimentazione normale in cui sarà installato il macchinario, prese di forza motrice e alcuni gruppi di luci ed una parte, alimentata tramite UPS, per garantire la continuità in caso di mancanza della rete. I carichi collegati all'UPS saranno innanzitutto parte delle luci e prese che alimentano apparecchi ausiliari che non tollerano interruzioni dell'alimentazione.

Nella sua complessità, il locale TAC assorbe una potenza pari a 68,13 W con una corrente d'impiego pari a 109,26 A. Al solito, il calcolo della potenza di dimensionamento è effettuato tenendo conto di coefficienti di contemporaneità e utilizzazione pari a uno per le luci, pari a 0,3 per le prese e a 0,8 per il macchinario.

Considerando che la linea che collega il QRDG al QTAC presenta le seguenti caratteristiche:

- Tipo: FG7OM1 Multipolare;
- Isolante: EPR;
- Formazione: 3 (1x25) + 1 x 25 + 1 x 25;
- Lunghezza: 15 m
- Posa: Su passarella perforata;
- $I_z = 127$ A;

Considerando che non sono presenti particolari apparecchiature che, come nel caso dei trasformatori di isolamento installati nel reparto operatorio, presentano dei comportamenti che influenzano la scelta del dispositivo di protezione, si potrà scegliere l'interruttore sulla base della corrente nominale assicurandosi di non incorrere in scatti intempestivi a causa di intersezioni con le caratteristiche degli interruttori posti a monte e a valle.

In questo caso l'interruttore scelto sarà:

- Modello: C 120 N;
- Tipo: Magnetotermico Differenziale;
- $I_n = 125$ A;
- Poli = 3;
- $I_{\Delta n} = 0,1$ A;

La cui curva caratteristica è riportata in Fig. 3. 32:

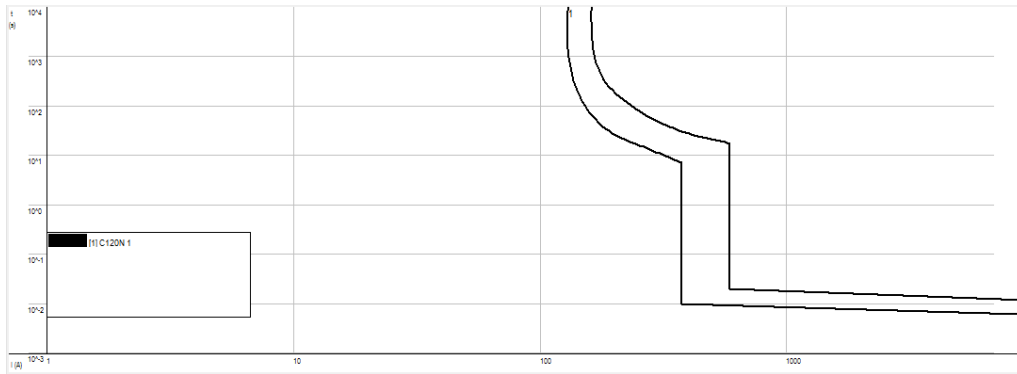


Fig. 3. 32: Caratteristica interruttore C 120 N.

Il dispositivo scelto non presenta una caratteristica regolabile e la soglia magnetica di intervento varia tra 3 e 5 I_n . In questo modo sarà garantita la selettività con l'interruttore generale posto a monte installato nel QRDG.

E' importante fare una precisazione. Questa scelta risulta corretta fintantoché sono impiegate apparecchiature radiologiche aventi dispositivi di peak shaving posti al loro interno. In tal caso non si incorre ad alcun assorbimento impulsivo da parte della macchina e la scelta dell'interruttore può essere effettuata senza alcun particolare accorgimento. Nel caso in cui le macchine presentino assorbimenti impulsivi, invece, sarà necessario valutare i picchi massimi e prendere adeguate precauzioni nella scelta della protezione in modo da non incorrere in scatti intempestivi durante le normali condizioni di funzionamento della macchina.

In Fig. 3. 33 si riporta il fronte quadro del QTAC relativo al locale in cui è presente il macchinario:



Fig. 3. 33: Fronte quadro QTAC.

Il quadro presenta un grado di protezione IP 31 e IK 08, una corrente nominale pari a 160 A e di cortocircuito pari a 10 kA. Analogamente a quanto fatto per gli altri quadri fino ad ora trattati, la potenza dissipata dai dispositivi di protezione risulta di 156,84 W termici su 360 W sopportabili dalla carpenteria. Le partenze alloggiati in questo quadro, alimentano direttamente i carichi. Esse saranno costituite da interruttori magnetotermici differenziali di tipo C40a come già visto per le utenze trattate negli altri reparti. Per concludere questa parte, si riportano in Fig. 3. 34 le curve degli interruttori per dare prova della selettività ottenuta:

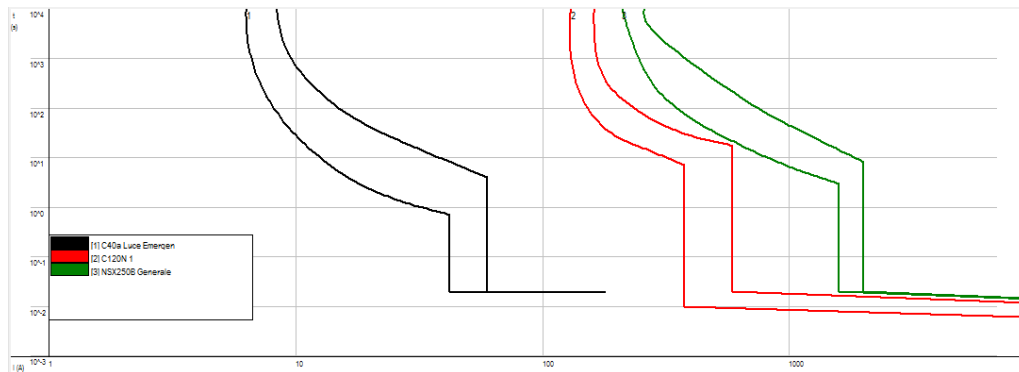


Fig. 3. 34: Curve di selettività del reparto Diagnosi

Come si può notare sono rispettati i criteri di selettività ed in caso di guasto ogni interruttore interverrà per proteggere la propria linea senza il pericolo di disservizi.

3.5 Scelta del Gruppo Elettrogeno

Vista la tipologia di impianto in esame e l'importanza della continuità del servizio, è necessario collegare alle sbarre BT un gruppo elettrogeno atto a garantire la continuità del servizio qualora si verificasse l'assenza di alimentazione da parte della rete di distribuzione principale. Negli impianti ospedalieri è doveroso prestare attenzione a questa problematica garantendo la massima continuità del servizio ai carichi privilegiati. Ciò assicura, infatti, un aumento del livello di sicurezza che l'intero sistema fornisce al paziente che si potrebbe trovare in condizioni di particolare vulnerabilità. Per quanto riguarda il dimensionamento della macchina si sceglie una potenza tale da alimentare tutte le utenze privilegiate e, al solito, si prevede un margine per eventuali ampliamenti dell'impianto. Convenzionalmente per la scelta della potenza di dimensionamento dell'alternatore, si stabilisce un $\cos\varphi = 0,8$ per tutti i carichi. La potenza apparente del generatore (A_{nG}), sarà data dalla relazione:

$$A_{nG} = \frac{P_c}{\cos\varphi}$$

Dove P_c rappresenta la potenza dei carichi privilegiati. Nel nostro caso, considerando per i carichi $P_c = 300 \text{ kW}$ e un margine di sovradimensionamento del 20% avremo:

$$A_{nG} = 1,2 \cdot \frac{P_c}{\cos\varphi} = 450 \text{ kVA} \Rightarrow 500 \text{ kVA}$$

Una volta identificata la potenza di interesse e quindi la taglia del generatore da impiegare, è necessario accertarsi del rispetto dei requisiti di selettività con gli interruttori a valle e dimensionare la protezione del generatore in modo da assicurarne l'intervento in caso di guasto. Per affrontare lo studio del gruppo elettrogeno dal punto di vista delle correnti di cortocircuito e scegliere correttamente il dispositivo di protezione da applicare, è necessario conoscere il comportamento della macchina in caso di guasto.

Nel caso in cui il guasto si verifichi in un punto distante dal generatore, l'impedenza di cortocircuito è costituita prevalentemente da quella della linea, la quale è costante nel tempo e di conseguenza lo sarà anche la corrente. Per guasti in prossimità dei morsetti dell'alternatore, invece, la situazione cambia in quanto, l'impedenza che domina il fenomeno è quella interna dell'alternatore che varia nel tempo e determina una variazione nel tempo dell'ampiezza della corrente di cortocircuito (Fig. 3. 35). La reattanza dell'alternatore aumenta in maniera continua, ma si distinguono tre differenti valori per ogni fase del guasto [13]:

- Reattanza subtransitoria X_d'' ;
- Reattanza transitoria X_d' ;
- Reattanza sincrona X_d ;

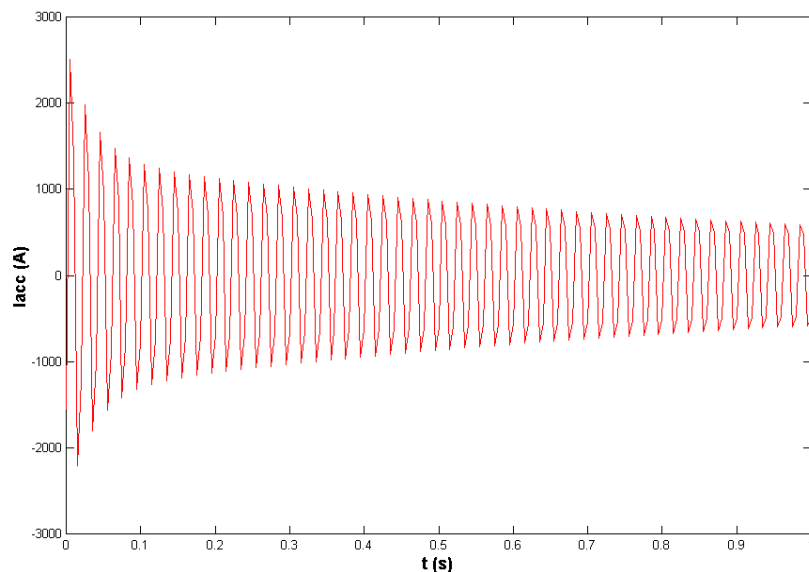


Fig. 3. 35: Andamento della corrente di cortocircuito per guasto ai morsetti di un alternatore. Nella prima fase, la reattanza che domina il fenomeno è la subtransitoria che comporterà alti valori di corrente. Successivamente, all'aumentare della reattanza, in fase transitoria, la corrente diminuirà fino a stabilizzarsi, a regime, ad un valore sinusoidale caratterizzato dalla reattanza sincrona.

Tali valori di reattanza sono solitamente espressi in percentuale e, nello specifico, la reattanza subtransitoria è quella di valore minore (7% ÷ 15%) che determina, quindi, il valore di corrente di cortocircuito maggiore (I_k'') per un durata che può variare da 50 a 150 ms; la reattanza transitoria ha un valore che varia dal 17% al 30% e determina una corrente (I_k')

ridotta rispetto alla precedente ma che può permanere anche per un secondo. La reattanza sincrona determina un valore di corrente a regime (I_k) ancora minore che non presenta alcuna importanza ai fini della scelta delle protezioni, in quanto il guasto dovrà essere estinto negli istanti precedenti. In realtà, per uno studio completo del comportamento dell'alternatore in caso di guasto, è necessario considerare un ulteriore parametro che ricopre un ruolo fondamentale in caso di guasto monofase di tipo fase-terra o fase-neutro, tale parametro è la reattanza omopolare X_0 che si può esprimere come frazione della reattanza subtransitoria e presenta un valore compreso nell'intervallo $(0,14 \div 0,25)X_d''$. Come si può notare, la reattanza omopolare ha un valore inferiore anche a quella subtransitoria e, dunque, la corrente di guasto monofase (I_{k1}'') avrà il valore più elevato. Per quanto riguarda il generatore scelto, vengono riportati nel seguito i dati di maggiore interesse:

$$A_{nG} = 500 \text{ kVA} \quad x_{d\%}'' = 10\%$$

$$V_n = 400 \text{ V} \quad x_{d\%}' = 20\%$$

$$I_n = 722 \text{ A} \quad x_{0\%} = 0,14 x_{d\%}''$$

Per il dimensionamento delle protezioni è necessario conoscere le correnti di cortocircuito nei casi più gravosi riassunti in Tab.3. 16:

Cortocircuito	Regime Subtransitorio	Regime Transitorio
Trifase	$I_k'' = \frac{I_n}{x_d''\%} 100$	$I_k' = \frac{I_n}{x_d'\%} 100$
Bifase	$I_{k2}'' = 0,866 I_k''$	$I_{k2}' = 0,866 I_k'$
Fase - Terra	$I_{k1}'' = (1,3 \div 1,4) I_k''$	$I_{k1}' = (1,4 \div 1,5) I_k'$

Tab.3. 16: Relazioni per il calcolo dei valori delle correnti di cortocircuito di maggiore interesse ai morsetti di un alternatore.

Per il dimensionamento degli interruttori, devono essere considerati i diversi valori di corrente di cortocircuito che saranno necessari per la scelta del potere di interruzione e delle altre grandezze caratteristiche. Per i motivi già visti nella scelta degli interruttori posti a protezione

del trasformatore, è necessario ricavare i valori di picco delle correnti di cortocircuito e, a favore di sicurezza, ci si pone nella condizione peggiore rappresentata dal valore massimo di corrente dato dall'involuppo dei picchi della corrente di cortocircuito e valutabile come:

$$I_p = 2\sqrt{2}I_k$$

A questo punto, si procede calcolando i diversi valori di corrente di cortocircuito necessari alla scelta degli interruttori e dei parametri di maggior rilievo:

- Corrente trifase ai morsetti dell'alternatore

$$I_k'' = \frac{I_n}{x_d''\%} 100 = 7,21 \text{ kA} \qquad I_p = 2\sqrt{2}I_k'' = 20,33 \text{ kA}$$

$$I_k' = \frac{I_n}{x_d'\%} 100 = 3,6 \text{ kA}$$

- Corrente di cortocircuito bifase ai morsetti dell'alternatore

$$I_{k2}'' = \frac{\sqrt{3}U_0}{2X_d''} 100 = \frac{\sqrt{3}}{2} I_k'' = 0,866 I_k'' = 6,25 \text{ kA}$$

$$I_{k2}' = 0,866 I_k' = 3,1 \text{ kA}$$

- Corrente monofase ai morsetti dell'alternatore

$$I_{k1}'' = \frac{3U_0}{(2X_d'' + X_0)} \cong (1,3 \div 1,4) I_k''$$

Da questa relazione possiamo ricavare il valore della corrente di cortocircuito ed il suo valore di picco:

$$I''_{k1} = 1,4 I''_k = 10 \text{ kA} \quad I_{p1} = 2\sqrt{2}I''_{k1} = 28 \text{ kA}$$

$$I'_{k1} = 1,4 I'_k = 5 \text{ kA}$$

Una volta calcolate le grandezze di interesse, sarà necessario stabilire tutte le caratteristiche dell'interruttore di protezione in modo da effettuare una scelta corretta. Per quanto riguarda il potere di interruzione, è necessario riferirsi alla massima corrente di cortocircuito che si può verificare e che, nel caso del gruppo elettrogeno è la corrente di cortocircuito monofase subtransitoria I''_{k1} . Quindi, se l'interruttore da scegliere non è ritardato, dovrà avere un potere di interruzione maggiore di quest'ultima ($I_{cu} \geq I''_{k1}$).

Se l'interruttore è ritardato, la corrente subtransitoria non dovrà provocare l'intervento del dispositivo, il quale dovrà sopportarla, per cui si dovrà scegliere un interruttore con una corrente ammissibile di breve durata $I_{cw} \geq I''_{k1}$. In questo caso l'interruttore si troverà ad interrompere la corrente transitoria, per cui dovrà verificarsi che $I_{cu} \geq I'_{k1}$.

In entrambi i casi l'interruttore sarà sottoposto alla massima corrente di cortocircuito, per cui dovrà avere $I_{cm} \geq I_{p1}$, dove I_{cm} è il potere di chiusura che deve essere pari al valore di picco della massima corrente di cortocircuito presunta che l'interruttore può stabilire. Tenuto conto di ciò, e considerando che l'interruttore impiegato presenterà un ritardo intenzionale ma solo per valori di corrente inferiori alla I''_{k1} , si dovrà rispettare:

$$I_{cu} \geq 10 \text{ kA}$$

$$I_{cm} \geq 28 \text{ kA}$$

Le caratteristiche dell'interruttore scelto sono riportate in Tab.3. 17:

CARATTERISTICHE
<i>Modello: NSX 630 F Micrologic 2.3 A</i>
$V_n = 690 V$
$I_n = 630 A$
$I_{cu} = 16 Ka$
$I_{cm} = 30 kA$
$I_{cw} = 25 kA (0,5 s)$
$I_{cw} = 17 kA (1 s)$

Tab.3. 17: Caratteristiche dell'interruttore del gruppo elettrogeno

Le soglie di taratura saranno scelte, al solito, come per i dispositivi di protezione fino ad ora trattati. La regolazione è eseguita sulla base della corrente $I_r = 630 A$, per cui avremo che la soglia magnetica ritardata sarà $I_{sd} = 4 \cdot I_r = 2,52 kA$, mentre quella istantanea $I_{ist} = 11 \cdot I_r = 6,9 kA$. In questo modo è garantita la protezione qualora dovesse verificarsi un guasto bifase che rappresenta il guasto caratterizzato dalla corrente di cortocircuito minore ($I'_{k2} = 3,1 kA$). La caratteristica dell'interruttore scelto è riportata in Fig. 3. 36:

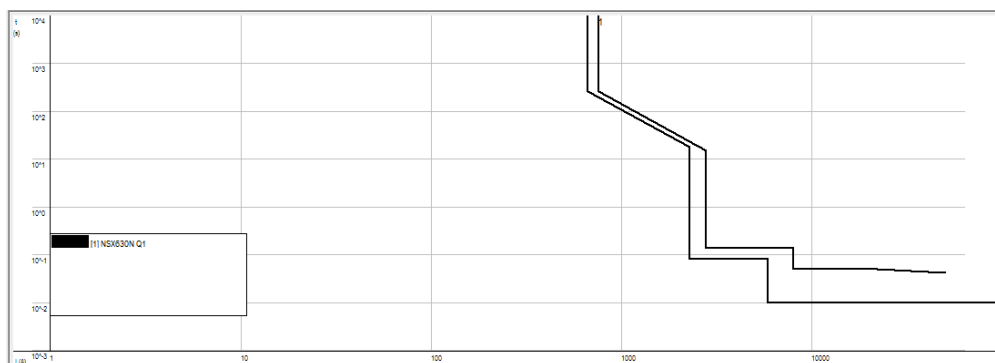


Fig. 3. 36: Caratteristica d'intervento dell'interruttore elettronico posto a valle del gruppo elettrogeno

Si può notare che con queste tarature, nel caso di guasto monofase, la componente subtransitoria ($I''_{k1} = 10 kA$) causerebbe l'intervento istantaneo della protezione. Questa

situazione è ammissibile in quanto l'interruttore scelto presenta un potere di interruzione $I_{cu} > 10 \text{ kA}$. A questo punto è necessario verificare che sia garantita la selettività con gli interruttori posti a valle e, per farlo, consideriamo la curva di intervento dell'interruttore di macchina e quella dell'interruttore generale del reparto diagnostica¹⁷ come mostrato in Fig. 3. 37:

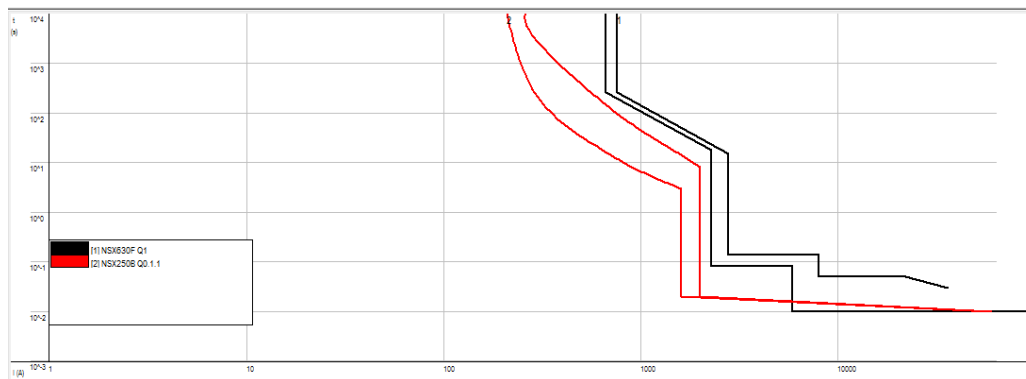


Fig. 3. 37 : Caratteristiche di intervento dell'interruttore del gruppo elettrogeno (nero) e del reparto diagnostica (rosso).

Si può notare un'intersezione tra le caratteristiche di intervento che potrebbe far sì che, per correnti di cortocircuito superiori alla soglia magnetica istantanea dell'interruttore del gruppo elettrogeno, intervenga l'interruttore a monte al posto del generale del reparto, con un conseguente fuori servizio di tutta la linea privilegiata. E' importante controllare, quindi, se questa situazione si possa effettivamente verificare e per farlo, sarà necessario calcolare il valore della corrente di cortocircuito in fondo alla linea che collega il gruppo elettrogeno al Power Center. La linea in questione è dimensionata sulla base della corrente di impiego assorbita dai carichi privilegiati, di valore $I_b = 481$ ¹⁸ e le caratteristiche principali sono di seguito elencate:

- Posa: Interrata;
- Formazione: $3 \times 400 \text{ mm}^2 + 2 \times 240 \text{ mm}^2$;
- $I_z = 700 \text{ A}$;
- Lunghezza: 20 m.

¹⁷ Si è preso come riferimento questo interruttore (NS 250 B) in quanto è l'interruttore di taglia maggiore installato all'interno del Power Center. Se la selettività è garantita con questo dispositivo, lo è di certo anche con gli altri.

¹⁸ La corrente assorbita dai carichi privilegiati vale $I_b = \frac{P_c}{\sqrt{3}V\cos\varphi} = 481 \text{ A}$

Per la valutazione della corrente di cortocircuito in fondo alla linea, è necessario conoscere i valori delle reattanze subtransitoria e omopolare date dalle seguenti relazioni:

$$X_d'' = \frac{x_{d\%}'' \cdot V_n^2}{100 \cdot A_n} = \frac{10 \cdot 400^2}{100 \cdot 500 \cdot 10^3} = 0,032 \Omega$$

$$X_0 = 0,14 X_d'' = 0,0045 \Omega$$

La corrente di cortocircuito sarà:

$$I_{k1}'' = \frac{V_n}{\sqrt{3} \sqrt{(R_N + R_F)^2 + \left(\frac{2X_d'' + X_0}{3} + X_N + X_F \right)^2}} = 5,75 \text{ kA}$$

Dove X_N ed R_N rappresentano rispettivamente la reattanza e la resistenza del conduttore di neutro e X_F ed R_F quelle del conduttore di fase. Considerando i valori di resistenza e reattanza chilometrici forniti dai costruttori, si riportano in Tab.3. 18 i rispettivi valori calcolati:

Conduttore	r [Ω /km]	x [Ω /km]	L [m]	R [m Ω]	X [m Ω]
Fase	0,0495	0,0876	20	0,99	1,75
Neutro	0,0817	0,0902	20	1,63	1,804

Tab.3. 18: Caratteristiche delle linee di collegamento tra gruppo elettrogeno e Power Center.

Poiché la massima corrente di cortocircuito verificabile a fondo linea è inferiore alla soglia di intervento istantaneo tarata a 6,9 kA, ne consegue che l'intersezione con le caratteristiche di intervento dei dispositivi posti a valle, non determinerà alcun problema di selettività¹⁹. Per concludere il dimensionamento dell'interruttore di macchina, è necessario effettuare un ultimo

¹⁹ Qualora la corrente di cortocircuito fosse stata tale da compromettere la selettività con gli interruttori a valle, si sarebbe potuto risolvere il problema tarando ad OFF la soglia istantanea.

controllo riguardo alla minima corrente di cortocircuito a fondo linea: tale corrente dovrà essere inferiore della soglia di intervento magnetico ritardato. La corrente in questione è la corrente di cortocircuito monofase transitoria, calcolabile tramite la relazione:

$$I'_{k1} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \sqrt{(R_N + R_F)^2 + \left(\frac{2X'_d + X_0}{3} + X_N + X_F\right)^2}} = 3,9 \text{ kA}$$

Con

$$X'_d = \frac{x'_{d\%} \cdot V_n^2}{100 \cdot A_n} = \frac{20 \cdot 400^2}{100 \cdot 500 \cdot 10^3} = 0,064 \Omega$$

Essendo la soglia magnetica dell'interruttore tarata a 2,52 kA, la protezione è assicurata. A questo punto, avendo effettuato tutti i controlli e tarato la protezione in base ai livelli e alle possibili tipologie di guasto, si può ritenere concluso il dimensionamento dell'interruttore di macchina. La sbarra di bassa tensione, completa di gruppo elettrogeno e trasformatori, si presenta come in Fig. 3. 38:

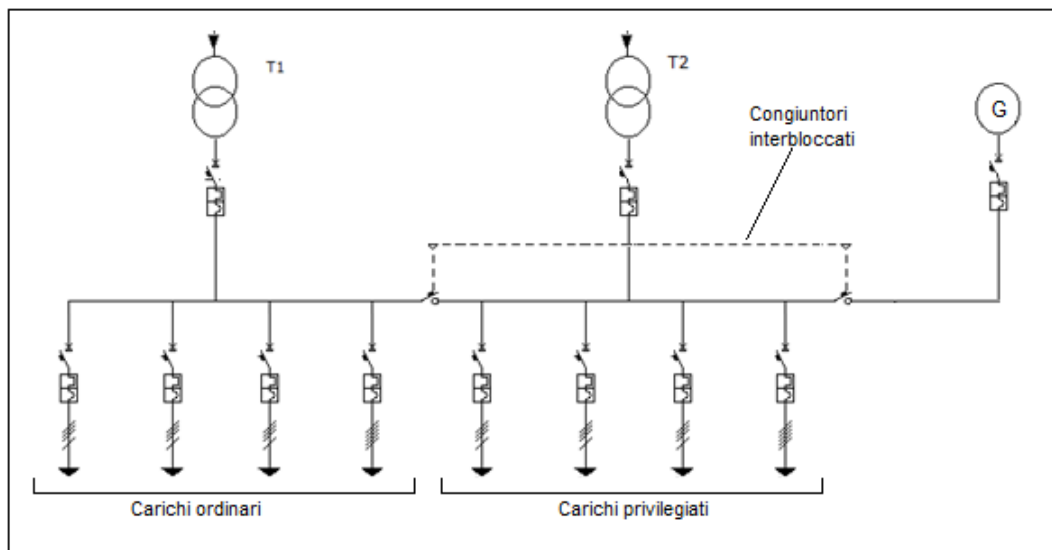


Fig. 3. 38:Schema complessivo della sbarra BT rappresentativo di carichi ordinari, privilegiati, trasformatori e gruppo elettrogeno.

Come mostrato in figura, sarà presente un congiuntore sul lato BT interbloccato con l'interruttore del gruppo elettrogeno. In caso di mancanza della rete, o al diminuire della tensione di alimentazione sotto alla soglia dell'80% della tensione nominale del sistema, il selettore che gestisce le commutazioni del gruppo comanda l'accensione. Tale comando è solitamente ritardato per evitare avviamenti indesiderati del gruppo per brevi mancanze di rete, ad esempio, a seguito di un buco di tensione molto breve dovuto a una manovra di apertura e richiusura delle protezioni del distributore sul lato di media tensione. Una volta passato il ritardo di tempo intenzionale, qualora si trattasse di un problema legato all'assenza di rete permanente, il gruppo inizia ad avviarsi. La logica prevede che siano possibili più tentativi per l'avvio del gruppo che potrebbe non partire al primo comando. Ovviamente, durante questo lasso di tempo, i carichi privilegiati sono alimentati mediante UPS. Una volta avviato il gruppo, dopo aver verificato che tutti i parametri di rete (tensione, frequenza e senso ciclico) siano tali da permettere al generatore di erogare potenza all'impianto, la logica di controllo comanda la commutazione dell'alimentazione dalla rete al gruppo e a tutti i carichi, ad esclusione di quelli ordinari, è garantita l'alimentazione fino al ritorno della rete.

Quando la tensione di rete rientra nei parametri ritenuti idonei, quindi al di sopra dell'80% della tensione nominale, è previsto un tempo di attesa preventivo in modo da evitare, come in fase di partenza, che si possa incorrere in uno spegnimento indesiderato del gruppo magari a causa di un ritorno momentaneo della tensione. La logica operativa prevede l'invio dell'ordine di apertura del commutatore lato gruppo, inviando l'ordine di chiusura del commutatore lato rete.

Da questo momento in poi, il gruppo è lasciato funzionare a vuoto fino al suo arresto.

3.6 Scelta degli UPS

Come già accennato al Cap.1, per garantire la continuità del servizio e la sicurezza all'interno di una struttura sanitaria, è necessario l'impiego di dispositivi che permettano di mantenere sempre alimentate alcune apparecchiature elettromedicali che potrebbero essere indispensabili per il corretto funzionamento degli organi vitali del paziente.

L'UPS è un dispositivo elettronico che agisce come interfaccia tra la rete e il carico e garantisce un'alimentazione elettrica di alta qualità a prescindere dalla presenza di eventuali perturbazioni in rete. Uno schema tipico dell'UPS è riportato in Fig. 3. 39 e mostra i diversi stadi di cui è composto:

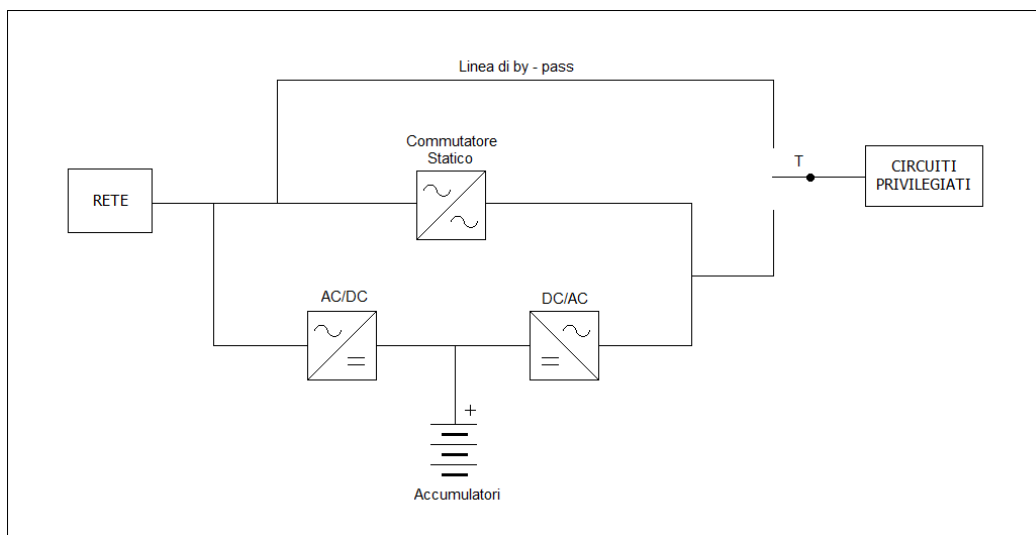


Fig. 3. 39:Schema completo di un UPS comprensivo di raddrizzatore, batteria, inverter. E' prevista la presenza di un commutatore statico e by-pass manuale.

La figura mostra lo schema completo di un UPS in cui si possono identificare:

- Un convertitore AC/DC (raddrizzatore) che esegue la conversione della tensione da alternata a continua, caricando in tampone la batteria di accumulatori. La presenza del convertitore, introduce negli impianti il problema dell'assorbimento armonico, limitato grazie all'inserzione di idonei filtri. Il controllo di potenza, che avviene per regolazione di fase, provoca a monte dell'UPS l'assorbimento di potenza reattiva.

- Una batteria di accumulatori che, in condizioni di assenza rete, alimenta l'inverter garantendo la continuità del servizio per i carichi posti a valle e appartenenti alla linea privilegiata.
- Un convertitore DC/AC (inverter) che converte la tensione continua in alternata. La tensione in uscita sarà stabilizzata in frequenza e in ampiezza in modo da garantire al carico un'alimentazione di qualità.
- Un commutatore statico permettere di commutare il carico direttamente in rete. Questa operazione avviene senza interruzione dell'alimentazione e rappresenta una misura preventiva in caso di avaria dell'inverter o di presenza di sovraccarico.
- Una linea di by-pass manuale permette, in caso di avaria o interventi di manutenzione, di alimentare il carico indipendentemente dall'UPS. L'UPS è quindi messo momentaneamente fuori servizio ma l'alimentazione del carico è comunque garantita.

A seconda delle modalità di funzionamento, gli UPS si dividono in due tipologie [14]:

- UPS off-line: in condizioni normali di funzionamento, il carico è alimentato dalla rete e, in caso di interruzione o distorsione d'onda viene automaticamente commutato sull'UPS in un tempo brevissimo (5÷10 ms). In questo tipo di UPS, il carico è soggetto alle perturbazioni della rete e quindi deve essere in grado di poterle sopportare. In presenza di carichi che non tollerano buchi di tensione o che necessitano di un'alimentazione di alta qualità e di una forma d'onda perfettamente sinusoidale, è sconsigliato l'uso dell'UPS offline.
- UPS on-line: in condizioni normali di funzionamento il carico è alimentato attraverso l'inverter. L'UPS è sempre in funzione fornendo un'alimentazione priva di perturbazioni. Il carico è esente da qualsiasi problema presente in rete e sarà interessato da una tensione sinusoidale a prescindere da ciò che accade a monte.

3.6.1 Criteri di dimensionamento

Per dimensionare correttamente l'UPS, è necessario basarsi su diversi aspetti che non riguardano soltanto il carico da alimentare o il suo comportamento in presenza di perturbazioni in rete, ma anche la tipologia di impianto in cui essi saranno installati. La norma CEI 64/8, infatti, prescrive che la sorgente di sicurezza debba garantire l'alimentazione al carico per un tempo di almeno 3 ore che può diminuire fino a un'ora, qualora sia associata ad essa la presenza di un gruppo elettrogeno. Nel nostro caso, essendo prevista l'installazione del gruppo, potremo considerare un UPS che abbia un sistema di accumulo tale da garantire il servizio per un'ora.

Il punto di partenza per la scelta dell'UPS è la conoscenza della potenza assorbita dai carichi privilegiati (P_c), per cui, considerando il $\cos\varphi$ del carico, si può determinare la minima potenza apparente necessaria:

$$A_n = \frac{P_c}{\cos\varphi}$$

E' buona prassi mantenere, come fatto anche per il gruppo elettrogeno, un margine di potenza per eventuali ampliamenti futuri dell'impianto, quindi, tenendo conto di un margine del 30%, la potenza apparente nominale della sorgente sarà:

$$A_{UPS} = 1,3 \cdot \frac{P_c}{\cos\varphi}$$

Un altro accorgimento riguarda il fatto che, in fase di carica, l'UPS assorbirà una corrente maggiore rispetto a quella di normale funzionamento, per cui è importante assicurarsi che la linea di alimentazione dell'UPS sia dimensionata in modo tale da sopportare tale condizione di funzionamento senza incorrere a sovratemperature e scatti intempestivi delle protezioni. Solitamente, a favore della sicurezza, si considera una corrente di impiego dell'UPS $I_b = 1,5 I_n$, con I_n corrente nominale del gruppo di continuità.

Gli UPS, come tutti i dispositivi elettronici, sono visti dalla sorgente di alimentazione come carichi non lineari. Ciò significa che la presenza di queste apparecchiature all'interno di un impianto provoca una distorsione della corrente a causa della presenza di armoniche a frequenza maggiore della fondamentale. Il parametro che tiene conto di questa problematica è detto THD (fattore di distorsione armonica): ogni UPS è contraddistinto da un proprio THD e la normativa prescrive che esso debba essere contenuto sotto la soglia del 5%. Nell'impianto considerato, l'installazione dell'UPS è necessaria in tutti e tre i padiglioni di interesse.

All'interno del Reparto Operatorio esso garantisce la continuità di una parte dei carichi luce, e dei sistemi IT-M rispettivamente di sala operatoria e locale preparazione e risveglio pazienti.

Nel Reparto Degenze deve essere garantita l'alimentazione di almeno un apparecchio illuminante per ogni camera e di una linea prese per eventuali esigenze del personale medico.

Nel Reparto Diagnostica, la continuità deve essere assicurata ancora una volta ad una parte dei carichi luce, ad una linea prese ed ai circuiti ausiliari delle macchine radiologiche.

A questo punto, secondo i criteri precedentemente descritti, verrà eseguita la scelta degli UPS sulla base delle potenze dei carichi da alimentare.

Per quanto riguarda il Reparto Operatorio, considereremo una sala operatoria ed un locale preparazione/risveglio pazienti come già fatto al *Par. 3.2.1*. La sezione IT-M di entrambi i locali è alimentata da un trasformatore medicale di potenza $A = 7,5 \text{ kVA}$ e di conseguenza ne risulta che gli UPS scelti saranno gli stessi. Considerando che, come visto al paragrafo 3.2.1, la potenza assorbita dai sistemi IT-M è pari a $P_{IT-M} = 6 \text{ kW}$, tenendo conto di un margine di potenza del 30%, avremo che:

$$A_{UPS} = 1,3 \cdot \frac{P_{IT-M}}{\cos\varphi} = 8,6 \text{ kVA}$$

In accordo con le taglie proposte dai costruttori, si sceglie una sorgente con $A_n = 10 \text{ kVA}$ le cui caratteristiche sono di seguito elencate:

- $A_n = 10 \text{ kVA}$;
- Capacità di sovraccarico: 2 min per $I = 1,25 I_n$ e 30 s per $I = 1,5 I_n$;

- Rendimento: 95 %;
- THD: < 3 %;
- Fattore di potenza: 0,99;
- Alimentazione in uscita: monofase.

L'UPS potrà essere installato all'interno del quadro elettrico rispettivamente di sala operatoria e del locale preparazione/risveglio pazienti o in prossimità degli stessi in apposito telaio dedicato. La corrente nominale assorbita sarà:

$$I_n = \frac{A_n}{\sqrt{3} \cdot V_n} = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 14,4 \text{ A}$$

Considerando che le linee di alimentazione che collegano il quadro principale del Reparto Operatorio ai quadri di Sala Operatoria e del locale Preparazione/Risveglio paziente presentano una $I_z = 127 \text{ A}$ (Par. 3.2.1), è rispettata anche la condizione di funzionamento in fase di carica delle batterie che prevedeva un dimensionamento della linea a monte considerando una $I_b = 1,5 I_n$.

A questo punto ci occupiamo del Reparto Degenze. Questo reparto sarà organizzato in modo tale da avere un gruppo di continuità per ogni piano. Come detto, sarà necessario alimentare un apparecchio illuminante per ogni camera di degenze e garantire la continuità ad una linea prese per camera. Solitamente, per evitare di sovradimensionare l'UPS e di dover prevedere la presenza di un numero elevato di linee privilegiate, si preferisce installare delle lampade autoalimentate laddove debba essere garantita la continuità del servizio per l'illuminazione dei locali. E' il caso delle degenze in cui saranno installati degli apparecchi illuminanti dotati di batteria interna caricata in tampone attraverso una linea dedicata in corrente alternata, eventualmente ridondata. In questo modo, in caso di assenza dell'alimentazione da parte della rete, sarà garantita la continuità attraverso la batteria interna che interverrà istantaneamente.

Va da sé che grazie a questo accorgimento, l'UPS dovrà essere dimensionato per le sole linee prese con un notevole vantaggio per i costi e gli ingombri. Ogni linea prese, assorbirà una potenza pari a 900^{20} W per ogni camera che, per l'intero piano, diventerà:

$$P_{prese} = 20 \cdot 900 = 18 \text{ kW}$$

E' necessario, però, considerare un ulteriore coefficiente di contemporaneità tra le varie camere di degenza in quanto è poco probabile che, contemporaneamente, tutte le camere stiano assorbendo la potenza di 900 W ciascuna. Si può dunque considerare un coefficiente di contemporaneità globale pari a 0,3 per tutti i gruppi prese, ottenendo una potenza totale dei carichi privilegiati P_c pari a:

$$P_c = 0,3 \cdot P_{prese} = 5,4 \text{ kW}$$

A questo punto, analogamente a quanto fatto in precedenza, si sceglie la potenza di dimensionamento dell'UPS:

$$A_{UPS} = 1,3 \cdot \frac{P_c}{\cos\varphi} = 8 \text{ kVA}$$

L'UPS scelto avrà le seguenti caratteristiche:

- $A_n = 8 \text{ kVA}$;
- Capacità di sovraccarico: 1 min per $I = 1,1 I_n$ e 4 s per $I = 1,5 I_n$;
- Rendimento: 95 %;
- THD: < 3 %;

²⁰ Per il gruppo di prese è stato applicato un coefficiente di utilizzazione pari a 0,5 e di contemporaneità pari a 0,6. Considerando che per le linee prese sono identificate solitamente da una potenza di 3kW, applicando i coefficienti sopra indicati avremo: $P = 3000 \cdot 0,5 \cdot 0,6 = 900 \text{ W}$

- Fattore di potenza: 0,99.

La corrente nominale assorbita sarà:

$$I_n = \frac{A_n}{\sqrt{3} \cdot V_n} = \frac{8 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 11,5 \text{ A}$$

Anche qui sarà rispettata la condizione di sopportabilità della corrente durante la fase di ricarica delle batterie in quanto la linea di collegamento tra il quadro principale del padiglione Degenze e il singolo piano presenta una $I_z = 127 \text{ A}$ (Par.3.3.1).

Infine, seguiremo gli stessi ragionamenti per il Reparto di Diagnostica. Come detto, in ogni locale di diagnostica dovrà essere garantita una parte dell'illuminazione della sala TAC, alcune prese di servizio e i circuiti ausiliari del macchinario principale per una potenza complessiva $P_c = 4 \text{ kW}$. La potenza dell'UPS sarà:

$$A_{UPS} = 1,3 \cdot \frac{P_c}{\cos\varphi} = 5,8 \text{ kVA}$$

Questo valore di potenza porterà alla scelta di un UPS con $A_n = 6 \text{ kVA}$ con le seguenti caratteristiche:

- $A_n = 6 \text{ kVA}$;
- Capacità di sovraccarico: 1 min per $I = 1,1 I_n$ e 4 s per $I = 1,5 I_n$;
- Rendimento: 95 %;
- THD: < 3 %;
- Fattore di potenza: 0,99.

La corrente nominale assorbita sarà data da:

$$I_n = \frac{A_n}{\sqrt{3} \cdot V_n} = \frac{6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 8,7 \text{ A}$$

Anche qui la portata del cavo che alimenta il quadro della sala TAC ($I_z = 127 \text{ A}$) è ampiamente maggiore di $1,5 I_n$.

3.6.2 Comportamento in caso di guasto

E' di rilevante importanza lo studio delle problematiche legate ai guasti nei circuiti a valle degli UPS i quali presentano un particolare comportamento in caso di sovracorrenti [15].

La sovraccaricabilità dell'UPS, ossia la sua capacità di alimentare il carico oltre le condizioni nominali, è subordinata all'entità della sovracorrente ed alla sua durata. Il costruttore fornisce i livelli di sovraccarico ammissibili sia in termini di durata che di valore massimo di corrente transitabile e, superato tale limite, viene comandata l'operazione di by-pass attraverso la quale il carico è commutato sulla rete principale o, se prevista, su una rete ausiliaria. Ovviamente questa rappresenta una condizione anomala di funzionamento che si verifica solo per emergenza o manutenzione.

Dopo un certo tempo, l'inverter viene riacceso e se le condizioni di sovraccarico non sono più presenti, il carico torna automaticamente ad essere alimentato dall'UPS.

E' importante notare come per un corretto coordinamento delle protezioni sia necessario conoscere il comportamento dell'UPS in caso di sovraccarico e di cortocircuito. In questo modo si conosceranno i livelli delle correnti di cortocircuito che realmente si verificano quando il carico è alimentato dall'inverter e sarà possibile scegliere le protezioni che soddisfano al meglio le condizioni di sicurezza. Il cortocircuito è una particolare condizione di funzionamento dell'UPS, caratterizzata da una erogazione di corrente limitata associata ad un livello di tensione ridotto. In presenza di cortocircuito sull'impianto a valle dell'UPS ed in mancanza della linea di riserva, l'inverter abbassa la tensione di uscita e limita la corrente a $1,5 \div 2I_n$ e, dopo un tempo impostato, solitamente 2 s a $1,5I_n$ e 20 s a $1,2I_n$, se non sono intervenute le protezioni a valle, l'inverter si blocca.

Per gli UPS dotati di commutatore statico, il carico è commutato istantaneamente in rete. L'alimentazione da parte della rete, fa sì che le correnti di cortocircuito non siano più limitate ed è garantita la protezione dal guasto attraverso l'intervento dei dispositivi di protezione installati nelle varie linee alimentanti il carico. Si riportano in Fig. 3. 40 le situazioni di guasto che si possono verificare a valle di un UPS modo da fornire una spiegazione esaustiva e chiarire meglio quanto finora affermato:

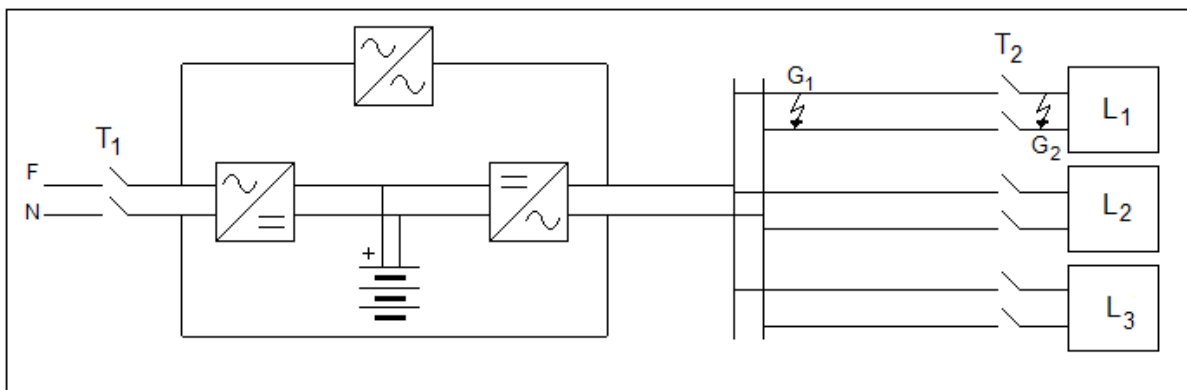


Fig. 3. 40: Esempi di guasto a valle di una linea alimentata da UPS. In presenza di commutatore statico, il guasto G_1 provoca la commutazione e l'intervento delle protezioni a monte dell'UPS. Per il guasto G_2 , se i dispositivi sono tarati opportunamente, si ha l'intervento della protezione T_2 , altrimenti, il commutatore statico commuterà la linea in rete e potranno intervenire sia T_1 che T_2 .

In Fig. 3. 40 è riportato il caso di un guasto a valle dell'UPS ma a monte della protezione del carico (G_1). Un guasto di questo genere determina la commutazione del carico in rete per mezzo del commutatore statico e di conseguenza l'intervento dell'interruttore T_1 . A questo punto l'UPS si trova, in assenza di rete, a funzionare in isola alimentando il carico tramite inverter e fornendo energia attraverso le batterie interne. Il guasto è così alimentato per un breve tempo fino all'intervento delle protezioni interne dell'UPS. In queste condizioni, l'intera linea privilegiata risulta fuori servizio.

Nel secondo caso mostrato in Fig. 3. 40, invece, si verifica un guasto ai morsetti del carico (G_2). Ora, se l'interruttore T_2 è tarato in modo da avere una soglia magnetica inferiore alla corrente limitata che l'UPS lascia scorrere in caso di guasto, si avrà l'intervento della protezione. In questo caso l'UPS continua a funzionare normalmente e tutti i carichi continuano ad essere alimentati. Se il dispositivo T_2 non interviene, ad esempio perché la corrente lasciata passare dall'UPS è inferiore alla sua soglia magnetica, il commutatore statico provvede a commutare il carico in rete alimentando il guasto tramite la linea di alimentazione

principale. A questo punto, se esiste selettività tra gli interruttori, T_2 apre, altrimenti interverranno sia T_1 che T_2 e l'UPS funzionerà in isola alimentando i carichi privilegiati attraverso il sistema di accumulo.

Per far fronte a questi problemi, è necessario controllare che la corrente massima lasciata passare dall'UPS ($1,5 \div 2 I_n$), causi l'intervento magnetico delle protezioni poste a monte dei carichi. Un accorgimento potrebbe essere l'uso di interruttori caratterizzati da curva B o C che garantiscono l'intervento magnetico qualora la corrente di guasto superi la soglia di $3 \div 5 I_n$ (curva B) o $5 \div 10 I_n$ (curva C), con I_n corrente nominale del dispositivo di protezione. Qualora non si raggiungesse comunque la protezione, è bene impiegare UPS con commutatore statico integrato in modo da proteggere la linea in seguito alla commutazione in rete come visto in precedenza. Analoghi ragionamenti valgono per la protezione a monte del gruppo di continuità. Per la corretta scelta della taratura dell'interruttore è necessario tenere conto del comportamento dell'UPS in presenza di sovracorrenti. La scelta della soglia magnetica è da effettuare sulla base della massima corrente che si può verificare ($1,5 \div 2 I_n$). L'interruttore a monte può essere di tipo magneto-termico, solitamente con curva B o C e la scelta della curva è fatta sulla base della corrente massima transitabile.

Un ulteriore aspetto, è quello relativo alla protezione dai contatti indiretti. L'installazione della sorgente di continuità può essere effettuata sostanzialmente in due modi a seconda dello stato del neutro. Possiamo avere il neutro passante Fig. 3. 41.a e isolato dalla rete Fig. 3. 41.b.

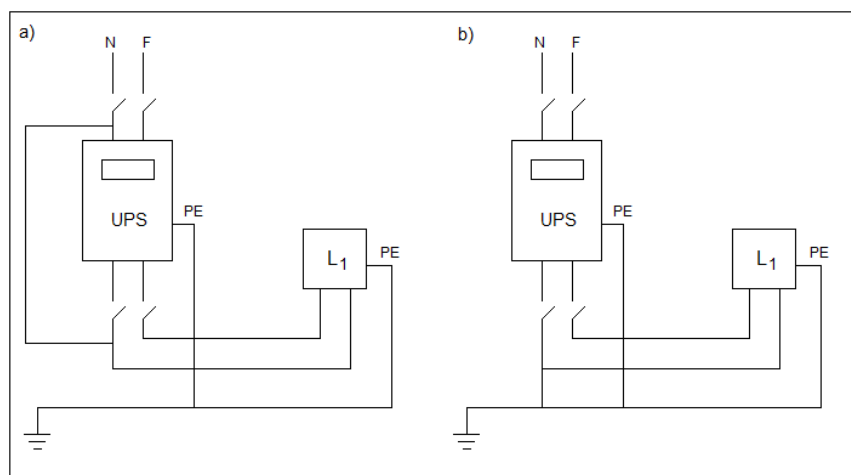


Fig. 3. 41: (a): UPS con neutro passante. Il neutro non viene interrotto a monte dell'UPS ma si avrà una certa continuità fino a valle del dispositivo. (b): UPS con neutro isolato. Il conduttore di neutro è interrotto a monte dell'UPS ed è eseguito un collegamento a valle tra il neutro ed il conduttore di protezione.

In generale, come già detto, il carico può essere alimentato tramite la rete (UPS off-line), tramite l'inverter con UPS alimentato dalla rete (UPS on-line) o in isola, ossia tramite l'inverter ma con alimentazione proveniente dalle batterie [16].

Nel caso di UPS a neutro passante (Fig. 3. 41.a) in condizioni di assenza di rete a causa dell'intervento di un dispositivo sull'impianto d'utente o di un problema sul lato del Distributore, si instaura il funzionamento in isola. Va da sé che il neutro può essere interrotto o non interrotto a seconda di quale sia la causa della disalimentazione della linea principale della sorgente di alimentazione. In caso di neutro interrotto, ci si trova ad avere un sistema IT temporaneo, per cui le correnti di guasto a terra sono trascurabili data la breve estensione dell'impianto sotto UPS. Il primo guasto a terra, pertanto, non è pericoloso e non è previsto neppure un dispositivo di controllo dell'isolamento come per i sistemi IT. La mancanza di quest'obbligo è dovuta al fatto che, essendo questa una situazione temporanea di funzionamento che si protrae per un tempo limitato fino all'avviamento del gruppo elettrogeno, è praticamente ritenuta nulla la probabilità di doppio guasto a terra. In pratica, essendo l'accumulo dell'UPS dimensionato per la durata di circa un'ora e considerando che il gruppo elettrogeno entra in servizio in un tempo molto inferiore, l'UPS funzionerà per un tempo talmente breve da far sì che si possa considerare nulla la possibilità di doppio guasto a terra e che quindi sia permesso l'esercizio di un sistema IT temporaneo senza l'uso di un dispositivo per il controllo dell'isolamento. Qualora, nella peggiore delle ipotesi, dovesse verificarsi il doppio guasto a terra, circolerebbero delle correnti di cortocircuito elevate tali da far sì che l'inverter si spenga in un tempo talmente breve (circa 10 ms) da non poter causare danni alle persone in caso di contatto.

Nel caso di UPS a neutro isolato si ottiene uno schema circuitale come in Fig. 3. 41. b. In questo caso il conduttore di neutro e di protezione risultano connessi tra loro a valle dell'UPS ottenendo un sistema TN locale. Un guasto a terra a valle dell'UPS provoca una corrente di cortocircuito che non interessa i dispersori locali ma si richiude attraverso l'UPS stesso che deve essere provvisto di un interruttore in grado di intervenire per guasti a terra. Ovviamente, affinché ciò sia possibile, la soglia di intervento deve essere coordinata con l'impedenza dell'anello di guasto della linea a valle.

Questa soluzione permette di considerare il sistema a valle dell'UPS come a sé stante rispetto alla parte a monte: in caso di guasto a valle, l'interruttore a monte della sorgente di sicurezza non interviene garantendo al sistema una maggiore continuità del servizio.

A prescindere dalla condizione del neutro, per la scelta dell'interruttore differenziale da installare in presenza di UPS, bisogna tener conto del fatto che tali dispositivi sono dotati di filtri di ingresso con correnti di dispersione che devono essere compatibili con la corrente nominale di $I_{\Delta n}$ dell'interruttore, altrimenti è necessario alzare la soglia di tale corrente per non incorrere in scatti intempestivi. L'interruttore differenziale a monte dell'UPS deve essere di tipo B, ossia in grado di rilevare anche correnti di guasto unidirezionali pulsanti e continue.

Passiamo ora ad applicare quanto detto. Sarà necessario controllare se, nelle utenze servite da UPS, siano installati interruttori che permettano la protezione in caso di guasto a valle della sorgente. Consideriamo quindi l'UPS della sala operatoria e del locale di preparazione/risveglio pazienti calcolando la corrente nominale e la massima corrente (I_M) transitabile in linea:

$$I_n = \frac{A_{UPS}}{V} = \frac{10 \cdot 10^3}{230} = 43,5 \text{ A}$$

$$I_M = 1,5 \cdot I_n = 65 \text{ A}$$

Considerando che, come visto al Par.3.2, i quadri in questione sono equipaggiati da interruttori modulari C40 a con correnti nominali comprese tra 6 e 10 A²¹ a seconda del carico da alimentare, ne consegue che scegliendo una curva di tipo B, si avrà un intervento sicuro del dispositivo di protezione. Prendendo come esempio il caso più sfavorevole caratterizzato dall'interruttore con corrente nominale maggiore, in caso di curva B avremo un intervento per correnti superiori a $(3 \div 5)I_n$, ossia soglie di taratura pari a $(30 \div 50) \text{ A}$. Si può notare che l'intervento è garantito in caso di guasto. Per quanto riguarda il reparto Degenze, eseguendo gli stessi calcoli otterremo:

$$I_n = \frac{A_{UPS}}{V} = \frac{8 \cdot 10^3}{230} = 34,8 \text{ A}$$

²¹ Le utenze privilegiate sono caratterizzate da carichi protetti da questi interruttori. Nel quadro in questione sono stati installati anche interruttori di taglia maggiore ma che proteggono carichi ordinari.

$$I_M = 1,5 \cdot I_n = 52 A$$

Gli interruttori a capo delle linee prese saranno dei C 40 a con $I_n = 6A$. Anche qui, adottando un interruttore con curva caratteristica di tipo B si garantisce l'intervento come visto nel caso precedente.

Nel Reparto Diagnostica, avremo un UPS da 6 kVA per il quale la corrente nominale e la massima saranno:

$$I_n = \frac{A_{UPS}}{V} = \frac{6 \cdot 10^3}{230} = 26 A$$

$$I_M = 1,5 \cdot I_n = 40 A$$

Considerando sempre gli stessi interruttori modulari, potremo garantire la protezione. Infatti, essendo alimentati piccoli carichi, gli interruttori impiegati nella sezione privilegiata del locale TAC avranno $I_n = 6 A$ con curva B, per cui la soglia di taratura magnetica sarà pari a $(18 \div 30) A$.

Qualora si fosse in presenza di interruttori non idonei, si potrebbe pensare ad un sovradimensionamento dell'UPS in modo da avere un valore di corrente tale da garantire l'intervento del dispositivo di protezione. In realtà, si può risolvere il problema anche prevedendo la presenza di un commutatore statico, senza che sia necessario sovradimensionare l'UPS. In questo caso, come visto, la sicurezza è comunque assicurata per cui la scelta può essere arbitraria e a discrezione di chi esegue il progetto.

4 – Impianto in Corrente Continua

Questa parte del lavoro è dedicata allo studio di fattibilità di una distribuzione in corrente continua all'interno dell'ospedale, per l'alimentazione dei carichi luce con particolare interesse rivolto alle camere di degenza. L'ospedale si compone di diversi padiglioni, per cui saranno trattate diverse soluzioni per capire quale sia quella che più si addice ad un'opera con tali caratteristiche.

Saranno prospettate nel seguito, diverse soluzioni per una possibile alimentazione in corrente continua e analizzate in modo da determinarne pregi e difetti di ognuna. Ovviamente, data la particolarità e la notevole estensione dell'ospedale in esame, nasceranno diverse problematiche legate all'affidabilità, alla qualità del servizio e al contenimento delle cadute di tensione. Questi problemi, legati a considerazioni tecniche ed economiche, porteranno alla scelta di una soluzione ritenuta complessivamente migliore per il caso in esame.

Le linee in corrente continua hanno un comportamento diverso da quelle in alternata a causa della natura della corrente circolante. Questo aspetto fa sì che debbano essere presi particolari accorgimenti dal punto di vista impiantistico soprattutto per la gestione dei guasti qualora fosse necessario garantire una certa continuità dell'alimentazione. A differenza della corrente alternata, dove l'intervento del dispositivo di protezione in caso di guasto si basa sull'estinzione naturale dell'arco al passaggio della corrente sinusoidale per lo zero, in corrente continua ciò non è possibile proprio per l'andamento costante nel tempo che non permette di identificare un istante ottimale per l'intervento del dispositivo. Nei paragrafi successivi tratteremo la problematica relativa alla messa in esercizio delle linee in corrente continua ed alla gestione dei guasti, valutando i rimedi esistenti e le modalità di funzionamento delle apparecchiature impiegate. Successivamente saranno effettuate delle considerazioni tecniche per le scelte eseguite nel progetto in questione e valutata la loro fattibilità dal punto di vista economico ed energetico.

4.1 Generalità sulla Corrente Continua

Il conflitto tra corrente continua ed alternata risale al diciannovesimo secolo quando iniziò il contrasto tra Thomas Edison e Nicola Tesla durante gli anni dell'aumento di richiesta di energia elettrica.

Il sistema di Edison prevedeva l'uso della corrente continua e gestiva la linea di alimentazione, all'epoca costituita soprattutto da carichi illuminanti, alla tensione uniformata di 110 Vdc. Le lampade prevedevano un'alimentazione di 100 V in modo da permettere alla linea di far fronte alle cadute di tensione derivanti dalla sua estensione. Con la crescita della domanda di energia durante gli anni dello sviluppo economico, questo sistema risultò poco adeguato per far fronte alle richieste del mercato. Il problema principale era dovuto al fatto che il trasporto di energia su larga scala diveniva sempre più difficoltoso all'aumentare della potenza da trasportare e della lunghezza delle linee: la trasmissione in corrente continua a 110 V presentava grosse perdite per effetto Joule e non permetteva di ricoprire le lunghe distanze necessarie a garantire una fornitura di energia su tutto il territorio.

Nicola Tesla, attraverso i suoi studi sulla corrente elettrica, elaborò il sistema che da allora prese il sopravvento sulla corrente continua e segnò la storia dell'energia elettrica su scala mondiale: la corrente alternata alla frequenza di 60 Hz. Tesla era convinto della superiorità della corrente alternata e la sua convinzione si basava sul fatto che le perdite nella trasmissione dell'energia dipendono dalla tensione. Di conseguenza, all'aumentare della tensione si potevano ottenere minori perdite.

Questa considerazione gli permise di prendere il sopravvento su Edison e sulla sua idea presentando un progetto che prevedeva di trasportare l'energia in corrente alternata per lunghe distanze alzandone il livello di tensione per poi abbassarla prima di distribuirla agli utenti finali. Questa operazione sarebbe stata possibile tramite l'uso di un trasformatore che avrebbe permesso l'innalzamento della tensione limitando le perdite lungo le linee di trasmissione.

Oggi lo scenario mondiale è molto cambiato, ma la corrente alternata sinusoidale rimane la forma d'onda prediletta per il trasporto dell'energia. Con lo sviluppo dell'elettronica, negli anni si è arrivati ad ottenere dispositivi funzionanti solo in corrente continua che per essere interfacciati alla rete elettrica di alimentazione hanno bisogno di uno stadio di conversione (convertitore AC/DC) in modo da adattarsi alla distribuzione disponibile. Per farsi un'idea più

generale, basta pensare a tutti i dispositivi di uso comune quali PC, telefoni cellulari, TV, laptop, illuminazione a LED che lavorano a livelli di bassissima tensione in continua (12, 24 o 48 V) ma che sono interfacciati alla rete elettrica a 400/230 V 50 Hz.

Di rilevante importanza, sempre a favore della distribuzione in corrente continua, è lo scenario attuale verso cui verte la produzione di energia. In qualche decennio, con l'avvento delle rinnovabili, si è passati da un sistema elettrico caratterizzato da grossi centri di produzione localizzati con linee di trasmissione che percorrono lunghe distanze per il trasporto dell'energia, ad un tipo di produzione distribuito grazie alla diffusione del fotovoltaico dovuta agli incentivi e alle scelte della Comunità Europea.

La tecnologia che meglio si sposa con un'eventuale distribuzione in corrente continua, è la generazione di energia tramite pannelli fotovoltaici o celle a combustibile che presentano una corrente prodotta di natura continua, successivamente convertita in alternata mediante un apposito inverter che interfaccia l'impianto di produzione alla rete elettrica. Se si pensa ad un'abitazione, si presenta una situazione analoga a quella illustrata in Fig.4.1:



Fig.4.1: Generazione di energia mediante impianto fotovoltaico. La corrente continua prodotta dall'impianto fotovoltaico è convertita in alternata attraverso l'inverter e distribuita ai carichi.

La corrente continua prodotta dai pannelli fotovoltaici deve essere convertita, tramite inverter, in corrente alternata ed immessa all'interno dell'impianto per l'alimentazione dei carichi. Una volta arrivata al carico, ad esempio un PC, la corrente è ancora una volta convertita in

continua tramite un raddrizzatore per l'alimentazione dei circuiti elettronici. Come si può notare, in questo caso sono presenti due trasformazioni che comportano delle perdite di potenza dovute ai convertitori caratterizzati da rendimenti di circa il 90 - 95%.

Nella Fig.4.2 è rappresentata la situazione che si verificherebbe qualora fosse possibile realizzare un impianto che preveda un'alimentazione in corrente continua:



Fig.4.2: Generazione mediante fotovoltaico e allaccio diretto dei carichi alimentati in corrente continua. Si può prevedere la presenza di convertitori DC/DC per i carichi che necessitano tensioni differenti da quella di produzione (es. Ricarica auto) e l'allaccio alla rete per i carichi funzionanti in alternata.

La corrente generata del fotovoltaico potrebbe essere direttamente convogliata nell'impianto dell'utente o, eventualmente, interfacciata al carico attraverso l'uso di convertitori DC/DC per stabilizzarla e garantire diversi livelli di tensione necessari all'alimentazione dei carichi. Ovviamente, per i carichi funzionanti in corrente alternata a causa della presenza di motori o trasformatori, dovrà essere prevista un'alimentazione diretta dalla rete elettrica.

Ulteriori considerazioni possono essere fatte parlando di trasporto di energia soprattutto su larga scala. La corrente continua permette di sfruttare maggiormente il cavo e trasportare più potenza, a pari sezione, rispetto alle soluzioni in corrente alternata. I cavi attraversati da una corrente costante non sono interessati da effetto pelle (fenomeno che dipende dalla frequenza) e non presentano elementi reattivi, il che permette di contenere le cadute di tensione lungo la linea di trasmissione potendone aumentare le distanze [17].

Tutto ciò garantisce la possibilità di ottenere un risparmio economico sia sui costi di installazione che di esercizio e, inoltre, un impianto che permette di ottenere perdite inferiori, comporta inferiori sprechi di energia e quindi maggiore efficienza del sistema.

Anche il minor numero di conduttori impiegati per la distribuzione rappresenta un vantaggio per la corrente continua, infatti, in continua è possibile trasferire energia impiegando una linea composta da due conduttori invece che da tre come nei tipici sistemi trifase. E' anche vero che, qualora si volessero rendere disponibili più livelli di tensione, sarebbe necessaria una distribuzione a tre conduttori caratterizzati dai potenziali $+V_{dc}$, 0 e $-V_{dc}$, ma comunque si ritornerebbe alla situazione attuale senza nessun aggravio economico.

Di notevole importanza è l'aspetto relativo alla sicurezza. E' stato detto come i livelli di tensione degli apparecchi alimentati in continua siano molto bassi a causa della presenza di componenti elettronici molto delicati, percorsi per questo motivo da correnti molto basse e tensioni che raramente superano i 48 V. Ciò significa che, oltre al vantaggio di evitare le perdite di conversione dovute al convertitore AC/DC, si ha il vantaggio di ottenere un sistema più sicuro. La norma CEI 64/8 stabilisce, infatti, che la massima tensione di contatto ammissibile in un sistema elettrico è pari a 50 V in corrente alternata (da ridurre a 25V in caso di ambienti particolari) e pari a 120 V in corrente continua (da ridurre a 60 V in caso di ambienti particolari). Si può notare che, alimentando le utenze in corrente continua, non solo si può disporre di un range di tensione molto maggiore rispetto all'alternata, ma è possibile far funzionare senza problemi la quasi totalità delle apparecchiature. Tutto ciò si traduce in un aumento della sicurezza e in un risparmio economico derivante dal fatto che non è richiesta l'installazione di dispositivi per la protezione dai contatti indiretti, in presenza di circuiti a tensione inferiore a quella di contatto.

Questa differenza stabilita dalla Norma riguardo le tensioni di contatto, deriva dalla reazione del corpo umano al passaggio della corrente che cambia a seconda della sua natura. L'effetto della corrente continua sul corpo umano è differente da quello della corrente alternata.

La natura costante della corrente continua fa sì che, in caso di contatto, si verifichi una maggiore compromissione dei tessuti interni, ma, a parità di intensità di corrente, il corpo umano riporta meno danni al passaggio della corrente continua piuttosto che a quello della corrente alternata.

Questa differenza è dovuta al fatto che le correnti pulsanti a 50 Hz risultano particolarmente dannose per il sistema nervoso in quanto provocano la tetanizzazione dei muscoli, mentre la

corrente continua ha prevalentemente un effetto di riscaldamento resistivo dei tessuti. Tenendo conto di queste considerazioni, la norma stabilisce valori di tensione diversi a seconda della natura della corrente presente nell'impianto. Ovviamente esistono anche degli svantaggi che limitano l'utilizzo della corrente continua. Alcuni sono di tipo tecnico ed altri legati alla natura della corrente che poco si presta a determinate applicazioni. Il primo limite riguarda il costo dei convertitori che, nonostante sia diminuito con la continua affermazione dei dispositivi elettronici, rappresenta ancora un limite in quanto non trascurabile rispetto al costo totale dell'impianto. Un altro limite è dovuto al fatto che al momento, tutte le linee di distribuzione presenti e tutte le apparecchiature sono in corrente alternata o comunque dotate di dispositivi di conversione AC/DC per l'interfacciamento alla rete. La scelta di omettere i convertitori e permettere l'allaccio direttamente in continua, dovrebbe essere accolta da tutti i costruttori e, per evitare di avere troppi livelli di tensione in continua che comporterebbero l'uso di convertitori DC/DC con perdite annesse, i livelli di tensione dovrebbero essere normalizzati in base alle varie esigenze. Dal punto di vista tecnico, invece, uno svantaggio deriva dall'andamento della corrente che, non presentando passaggi per lo zero come per la corrente alternata, fa diventare più difficoltosa l'interruzione.

Nel seguito, insieme alle possibili tipologie di reti, verranno trattati gli aspetti relativi all'interruzione della corrente continua in caso di guasto, con particolare attenzione rivolta ai dispositivi di protezione e ad i metodi di interruzione proposti dalle case costruttrici.

4.1.1 Interruzione della corrente continua

Consideriamo un circuito ohmico-induttivo come mostrato in Fig.4.3:

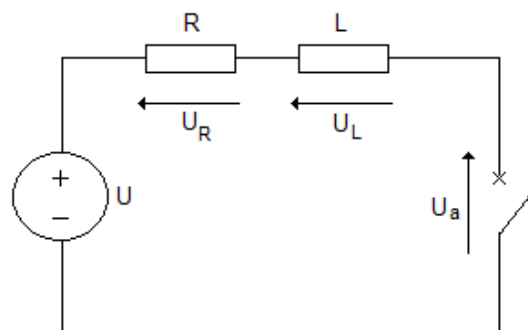


Fig.4.3: Tipico circuito R-L con alimentazione in continua alla tensione U . E' inoltre rappresentato il dispositivo di protezione sul quale si instaura una tensione U_a in fase di intervento.

Scrivendo le equazioni alla maglia, avremo che:

$$U = U_R + U_L + U_a$$

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + U_a \quad (4.1)$$

Dove:

- U: tensione di alimentazione;
- L: induttanza del circuito;
- R: resistenza del circuito;
- U_a : tensione d'arco.

Per permettere l'estinzione della corrente, sarà necessario raggiungere lo zero come accade in corrente alternata dove si ha un'estinzione naturale dell'arco proprio in questo istante.

La corrente continua, presentando un valore sempre costante nel tempo e quindi non caratterizzato da attraversamenti per lo zero, comporta l'inconveniente di non poter essere interrotta in maniera molto semplice richiedendo opportuni accorgimenti. Per ottenere l'annullamento della corrente, dovrà essere verificato che la sua derivata nel tempo abbia segno negativo:

$$\frac{di}{dt} < 0$$

E quindi, riscrivendo la (4.1) come:

$$L \frac{di}{dt} = U - Ri - U_a$$

ne consegue che intervenendo opportunamente sulla tensione d'arco, si può agire fino a far diventare negativo il primo membro dell'equazione. Così facendo, la corrente di cortocircuito presenterà un andamento decrescente fino ad annullarsi ottenendo l'estinzione del guasto.

La caratteristica tipica della corrente di cortocircuito in un circuito alimentato in continua è riportata in Fig.4.4:

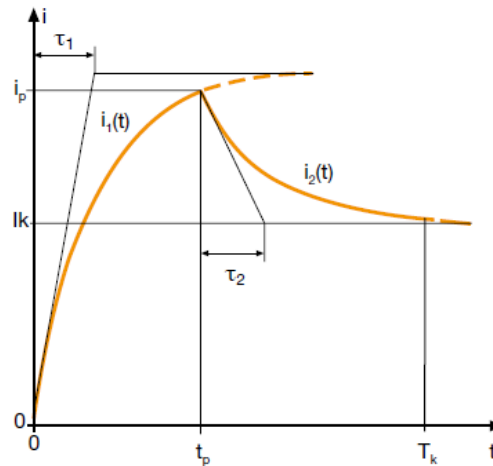


Fig.4.4: Andamento della corrente di cortocircuito in un sistema a corrente continua. Essa sarà contraddistinta da una fase di salita caratterizzata da una costante di tempo τ_1 ed una di discesa con costante di tempo τ_2 in seguito alla fase di intervento dell'interruttore.

L'andamento in figura è caratterizzato da due funzioni esponenziali aventi costanti di tempo che dipendono dalle caratteristiche della linea e del sistema di alimentazione. Nello specifico avremo un primo tratto identificato da $i_1(t)$ crescente con costante di tempo τ_1 , fino al raggiungimento del valore di picco i_p della corrente di cortocircuito al tempo t_p ed un tratto decrescente $i_2(t)$ con costante di tempo τ_2 . Si può individuare, inoltre, il valore I_k che rappresenta la corrente di cortocircuito in regime quasi stazionario.

Esistono dei valori di riferimento per la costante di tempo τ_1 , forniti dalla norma:

- 5 ms, cortocircuito veloce;
- 15 ms, valore standardizzato secondo la Norma CEI EN 60947-2;
- 30 ms, cortocircuito lento.

La costante di tempo di discesa τ_2 assume generalmente dei valori superiori. In Fig.4. 5 si riportano gli andamenti delle grandezze principali in gioco durante un cortocircuito in corrente continua [18]:

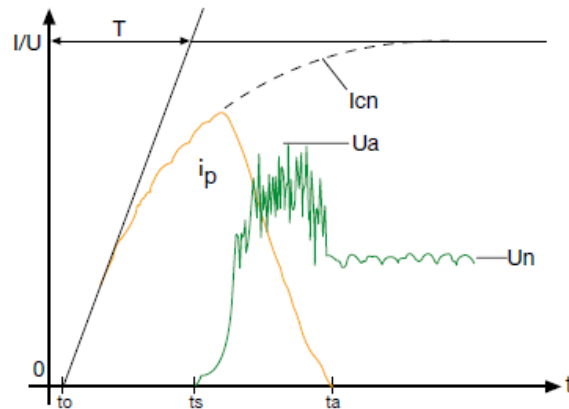


Fig.4. 5: Andamento della corrente di cortocircuito e della tensione d'arco in seguito all'intervento di un dispositivo di protezione in corrente continua.

Nell'istante t_0 , in cui si verifica il guasto, si riscontra un aumento della corrente i_p che cresce in maniera esponenziale secondo la costante di tempo del circuito. A partire dall'istante t_s , l'interruttore inizia la fase di intervento per cui si avrà che i contatti inizieranno ad aprirsi generando un arco. La tensione d'arco U_a inizierà ad aumentare e, per un breve istante, anche la corrente di cortocircuito continuerà ad aumentare raggiungendo il valore di picco per poi decrescere in dipendenza del valore sempre più elevato della resistenza d'arco. Ad un continuo aumento della resistenza d'arco, corrisponderà una diminuzione della corrente di cortocircuito finché, all'istante t_a , non si avrà la completa estinzione del guasto. Per ottenere un annullamento graduale della corrente di cortocircuito, è necessario agire sull'arco raffreddandolo ed allungandolo in modo da inserire nel circuito una resistenza sempre maggiore e tale da aumentare U_a . Lo studio del comportamento di un circuito in caso di guasto permette di adottare gli accorgimenti necessari alla scelta del tipo di interruttore da installare in modo da garantire un rapido intervento e il contenimento delle sovratensioni.

4.1.2 Tipi di rete in corrente continua

Quando si considera una rete in corrente continua, si hanno sostanzialmente tre configurazioni possibili in relazione alle modalità di collegamento a terra delle parti attive:

- rete isolata da terra;
- rete con una polarità connessa a terra;
- rete con il punto medio dell'alimentazione connesso a terra.

Le situazioni elencate sono mostrate in Fig.4.6:

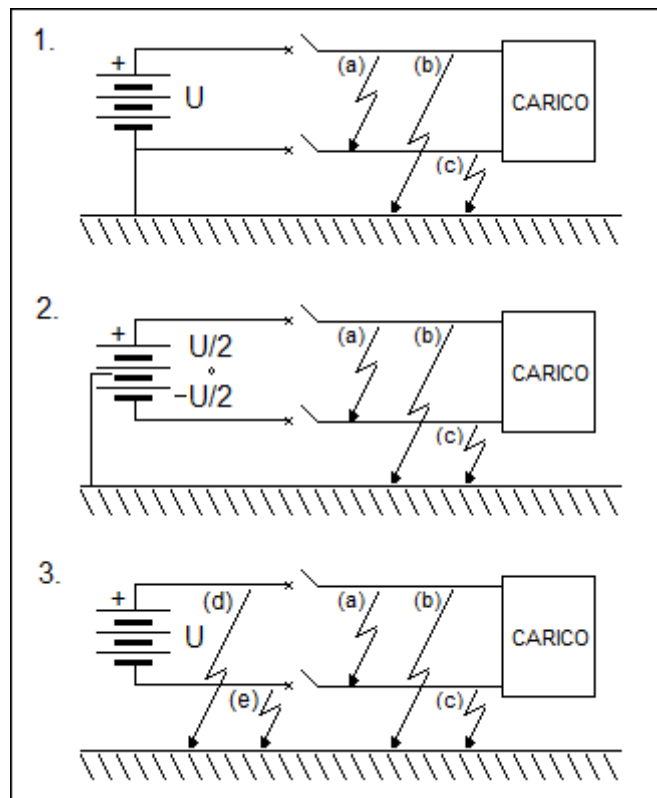


Fig.4.6:La figura mostra le tre situazioni possibili. 1) rete con polo negativo connesso a terra, 2) rete con punto intermedio dell'alimentazione connesso a terra e 3) rete isolata.

A seconda del tipo di rete, possono verificarsi diversi guasti che vanno presi in considerazione per la corretta scelta del dispositivo di protezione. Questi aspetti, insieme a quelli trattati nel paragrafo successivo, determineranno la scelta definitiva del dispositivo di protezione atto all'interruzione del circuito [19].

Valuteremo nel seguito i diversi tipi di guasto che possono verificarsi a seconda della tipologia di rete e vedremo come cambiano le cose in base alla tipologia di rete considerata.

Rete isolata da terra:

Questo tipo di rete è installato laddove sia necessario un certo livello di continuità del servizio, in quanto è in grado di funzionare in presenza di primo guasto a terra. Facendo riferimento alla Fig.4. 7, consideriamo i tipi di guasto che possono instaurarsi e valutiamo ciò che implicano ai fini della scelta dell'interruttore di protezione.

Guasto (a):

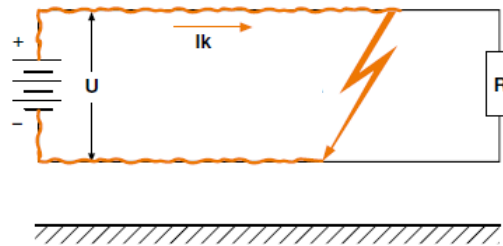


Fig.4. 7: Esempio di guasto tra due poli su una rete isolata. La corrente di cortocircuito dipenderà dalla resistenza dei conduttori e da quella interna della sorgente.

In questa condizione la corrente di cortocircuito è sostenuta dalla piena tensione di alimentazione U ed è attenuata soltanto dalle resistenze dei conduttori (R_c) e da quella interna della sorgente di alimentazione (R_i):

$$I_{ka} = \frac{U}{(R_i + 2R_c)}$$

Entrambe le polarità sono interessate dal guasto e per garantire il corretto intervento del dispositivo, tutti i poli dell'interruttore devono avere un potere d'interruzione maggiore di I_{ka} .

Guasto (b) o (c):

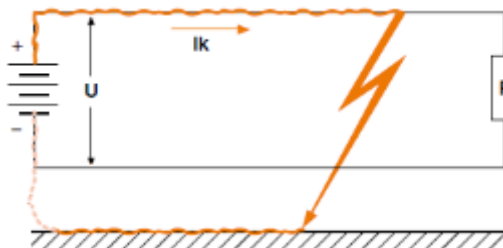


Fig.4. 8: Guasto verso terra su una rete isolata. La corrente di guasto non ha alcuna via di richiusura.

La Fig.4. 8 mostra un altro possibile guasto nel caso di rete isolata. In queste condizioni, il primo guasto a terra non comporta alcun problema per l'impianto che continua a funzionare normalmente poiché la corrente di guasto non ha alcuna via di richiusura.

In seguito al guasto la rete passa da isolata a collegata a terra senza conseguenze per il funzionamento. La corrente di guasto non assume in genere valori significativi, per cui non si verifica una tensione di contatto pericolosa, il che rappresenta un vantaggio per la protezione contro i contatti indiretti. Non è quindi necessaria l'interruzione dell'alimentazione sul primo guasto che dovrà comunque essere opportunamente segnalato mediante dispositivo di controllo dell'isolamento ed eliminato in modo da evitare che questo degeneri in un secondo guasto a terra. E' necessario un continuo monitoraggio dell'isolamento qualora si decida di impiegare una rete isolata in corrente continua.

Doppio guasto (b) + (e) o (c) + (d):

Questa condizione si presenta qualora non sia risolto tempestivamente il primo guasto poiché l'ipotesi di due guasti a terra simultanei è molto remota. La corrente di guasto, sostenuta dalla piena tensione di alimentazione U , dipenderà ancora una volta dalla resistenza dei conduttori e dalla resistenza interna della sorgente di alimentazione.

Nel caso di guasto (b) + (e), solo il polo del conduttore positivo sarà interessato dalla corrente di guasto mentre nel caso di guasto (c) + (d), solo il polo negativo. Ne consegue che tutti i poli dell'interruttori dovranno avere un potere di interruzione maggiore della corrente di cortocircuito presunta.

La condizione più gravosa da considerare, che determinerà la scelta dell'interruttore e delle tipologie di connessioni, è quella del guasto (a).

Il sistema dovrà essere dotato di un dispositivo di controllo dell'isolamento che avvisi in caso di primo guasto altrimenti, in caso di secondo guasto nelle condizioni più sfavorevoli, l'interruttore potrebbe trovarsi ad intervenire con un solo polo sulla totale tensione del sistema, il che è inaccettabile.

La Fig.4. 9 mostra quanto finora affermato:

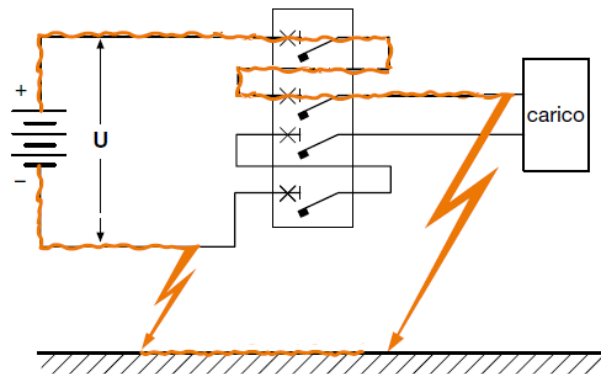


Fig.4. 9: Nel caso di doppio guasto, se non si è risolto il primo, l'interruttore potrebbe trovarsi ad intervenire con un unico polo sottoposto alla piena tensione U di alimentazione.

Rete con una polarità connessa a terra:

Guasto (a):

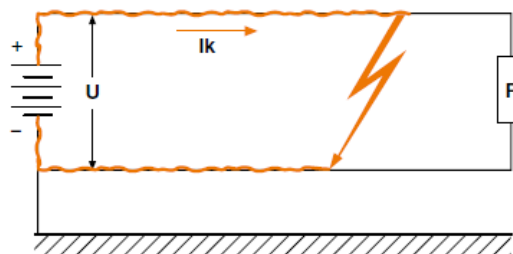


Fig.4. 10: Esempio di guasto tra due poli su una rete con polo negativo connesso a terra. La corrente di cortocircuito dipenderà dalla resistenza dei conduttori e da quella interna della sorgente.

La corrente di guasto nella situazione riportata in Fig.4. 10, è limitata dalle resistenze dei due conduttori e da quella della sorgente:

$$I_{ka} = \frac{U}{R_i + 2R_c}$$

Il potere di interruzione del dispositivo di protezione deve avere un potere di interruzione maggiore della I_{ka} , alimentata alla piena tensione di esercizio.

Guasto (b):

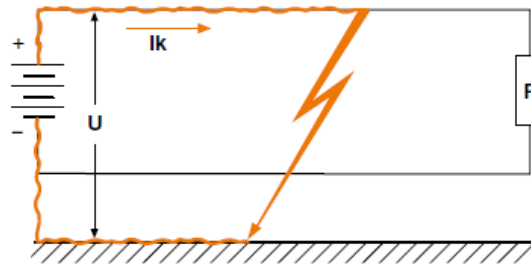


Fig.4. 11: Guasto della polarità non connessa a terra. La tensione U sostiene il guasto e la corrente sarà limitata dalla resistenza del conduttore, del terreno e della sorgente.

La Fig.4.11 mostra il caso di guasto della polarità non connessa a terra.

La corrente di guasto, sostenuta dalla piena tensione di alimentazione U , è limitata dalla resistenza del conduttore della linea a terra, dall'impedenza del terreno e da quella interna della sorgente di alimentazione. In questo caso una sola polarità è interessata dal guasto e di conseguenza dovrà avere un potere di interruzione maggiore della corrente di guasto presente.

Guasto (c):

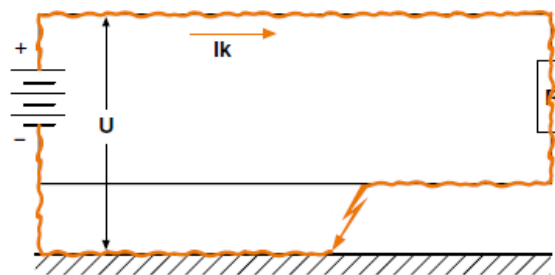


Fig.4. 12: Guasto sulla polarità connessa a terra. La corrente sarà limitata dalla resistenza del terreno e la tensione dalla caduta di tensione sul carico.

Nel caso in cui il guasto avvenga sulla polarità collegata a terra (Fig.4. 12), la corrente dipenderà dalla resistenza del terreno presentando un valore estremamente basso. Il guasto non sarà sostenuto dalla piena tensione U a causa della caduta di tensione sul carico.

La situazione peggiore è quella relativa al guasto (a), per cui, per la scelta dell'interruttore si dovrà prevedere alla protezione di entrambe le polarità scegliendo un potere di interruzione maggiore di I_{ka} . Nel caso in cui la rete sia connessa a terra nel punto intermedio dell'alimentazione, avremo una situazione come quella riportata in Fig.4.6 (2). Valutiamo in questo caso le tipologie di guasto verificabili evidenziandone gli aspetti più significativi.

Rete con polo intermedio connesso a terra:

Guasto (a):

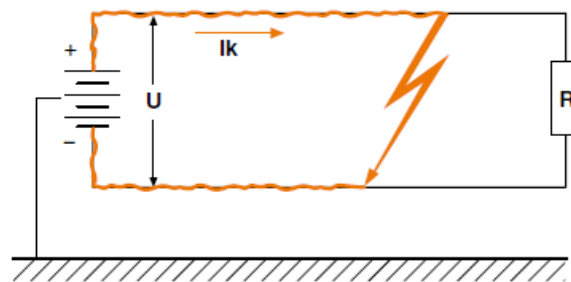


Fig.4. 13: La corrente di guasto, alimentata alla piena tensione U , dipenderà dalla resistenza dei conduttori e da quella interna dei cavi.

La corrente di guasto circolante nella situazione mostrata in Fig.4. 13, dipenderà dalla resistenza di cavi e della sorgente di alimentazione e sarà sostenuta dalla piena tensione U . Entrambe le polarità sono interessate dal guasto per cui sarà necessario che tutti i poli di entrambe le polarità abbiano un potere d'interruzione maggiore della corrente di cortocircuito.

Guasto (b) o (c):

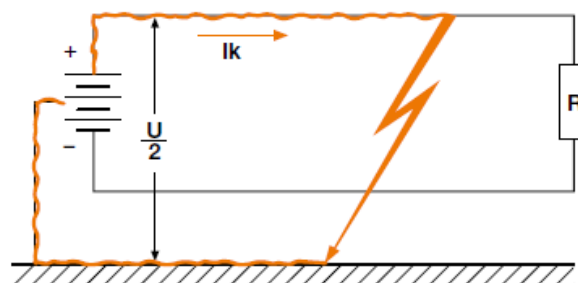


Fig.4. 14: Nel caso di guasto a terra, la corrente di guasto circolante sarà inferiore al caso precedente in quanto alimentata alla tensione $U/2$ e limitata dalla resistenza del terreno.

Nel guasto a terra la tensione che sosterrà il guasto sarà pari a $U/2$.

La situazione è meno grave del caso precedente e, in questo caso, è necessario che il polo che protegge la polarità sede del guasto abbia un potere di interruzione maggiore della corrente di cortocircuito alla tensione $U/2$. E' da notare che, nel caso di rete connessa a terra, il doppio guasto non è contemplato in quanto l'interruttore interviene all'instaurarsi del primo guasto.

4.1.3 Gli interruttori in corrente continua

La scelta dell'interruttore in corrente continua prevede una serie di considerazioni basate sull'analisi della tipologia di rete considerata, sul carico da alimentare e sulla tensione di esercizio del sistema.

Ciascun parametro determina le caratteristiche dell'interruttore di protezione da impiegare e per questo è necessario valutarle in maniera corretta. Il tipo di connessione della rete e il valore della tensione nominale di esercizio, permettono di determinare il numero di poli che devono prendere parte all'interruzione, la corrente di cortocircuito massima nel punto d'installazione stabilisce il potere d'interruzione da scegliere affinché l'apertura del circuito sia effettuata correttamente e la corrente di impiego del circuito fa sì che possa essere determinata la taglia, nonché la corrente nominale dell'interruttore.

Le indicazioni sul numero di poli da collegare in serie a seconda della tipologia di sistema impiegato e della tensione nominale, sono fornite dai costruttori dei dispositivi di protezioni e valutabili tramite i cataloghi. In Fig.4. 15 è riportato l'estratto del catalogo di un costruttore con le indicazioni riguardanti al numero di poli in serie da collegare in funzione della tipologia di circuito considerata [20]. In generale, il collegamento in serie dei poli fa sì che si possa dividere la tensione di alimentazione su ciascun polo per facilitare l'interruzione soprattutto nelle reti a tensione elevata. Il collegamento in serie permette inoltre di utilizzare la corrente nominale per tutti i poli che presenteranno lo stesso potere di interruzione. Il collegamento in parallelo, invece, permette di dividere la corrente su ciascun polo con notevoli vantaggi, soprattutto economici, sulla scelta della taglia dell'interruttore. Sarà possibile, infatti, incrementare la portata di corrente in ingresso all'interruttore che può aumentare di circa l'80%²² qualora siano impiegati due poli in parallelo.

²²I costruttori dei dispositivi stabiliscono un fattore di incremento della portata di corrente per poli in parallelo pari a circa 1,8 per 2 poli in parallelo

Tipo di rete			
Tipo	Rete collegata a terra		Rete isolata
Alimentazione	Una polarità (in questo caso quella negativa) collegata a terra (o elementi di conduzione esposti)		Un punto mediano collegato a terra
Polarità protette	1 (scollegamento di 1P)	2 (scollegamento di 2P)	2
Schemi (e tipi di guasto)			
Scelta dell'interruttore e del collegamento dei poli			
Compact NS			
24 V $\leq U_n \leq 250 V$			
250 V <math>< U_n \leq 500 V</math>			
500 V <math>< U_n \leq 750 V</math>			

Fig.4. 15: Estratto di una tabella per la scelta dei dispositivi di protezione in base alla topologia della rete ed alla tensione di esercizio. Identificando la riga e la colonna di interesse, si può determinare il numero di poli che parteciperanno all'interruzione e le modalità

Di contro avremo che, la scelta del collegamento in parallelo, determinerà la presenza dell'intera tensione di rete su ciascun polo e sarà necessario assicurarsi che essa sia inferiore alla tensione di tenuta. Con questa configurazione si possono ottenere soluzioni con elevate portate e tensioni ridotte. In Fig.4. 16 sono riportati due esempi illustrativi di collegamento in serie ed in parallelo dei poli di un interruttore in corrente continua:

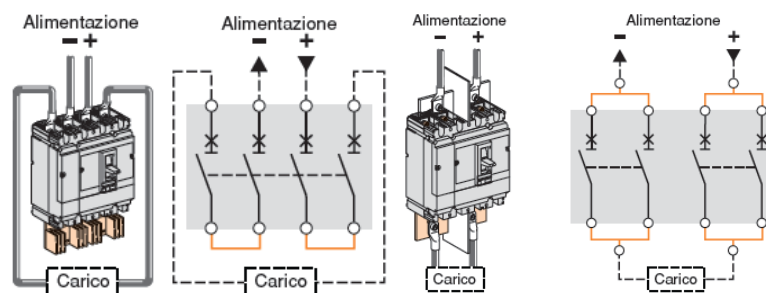


Fig.4. 16: A sinistra, interruttore con poli collegati in serie in modo da poter avere una suddivisione della tensione sui due poli, a destra interruttore con i poli collegati in parallelo in modo da avere una suddivisione della corrente e quindi ottenere un risparmio sulla scelta della corrente nominale

Come accade per gli interruttori in corrente alternata, anche per quelli in corrente continua è necessario scegliere il dispositivo corretto attraverso la valutazione di parametri elettrici che lo contraddistinguono e che caratterizzano la rete da proteggere.

4.1.4 Dimensionamento dei cavi

Come accade per la corrente alternata, anche in corrente continua è necessario dimensionare i cavi tenendo conto delle condizioni di posa, della corrente di impiego e del tipo di servizio che la linea deve effettuare. Per quanto riguarda la scelta dei parametri nominali del cavo e degli interruttori, ed il loro coordinamento, si applicano i medesimi accorgimenti già affrontati al Cap. 3. Sarà necessario, quindi, scegliere le grandezze rispettando le relazioni già esposte e verificare la tenuta dei cavi in termini di energia specifica passante sopportabile.

L'unico aspetto che differisce dal caso in alternata, è quello della caduta di tensione in linea. In questo caso, infatti, la caduta di tensione sulla linea non dovrà tenere conto dei parametri reattivi della linea di alimentazione, per cui, tenendo conto solo della resistenza chilometrica, dovrà essere rispettata la relazione:

$$\Delta V = 2 L r_l I_b$$

Dove:

- r_l : resistenza del cavo fornita dal costruttore ed espressa in $[\Omega/m]$;
- L : lunghezza della linea in metri.

Si può notare come in corrente continua sia più immediata la valutazione della caduta di tensione in quanto è sufficiente considerare il solo parametro resistivo del cavo per il conduttore positivo e negativo.

Per la scelta ed il coordinamento dei dispositivi per la protezione dai contatti indiretti, bisognerà tener conto del tipo di sistema considerando se quest'ultimo è connesso a terra o meno. Nello specifico avremo che per le reti connesse a terra dovrà essere verificato che la

corrente che provoca l'intervento del dispositivo di protezione sia inferiore della corrente di cortocircuito che si verifica in caso di guasto a terra (Fig.4. 11). Per le reti isolate, il guasto a terra non provoca alcun disservizio, quindi non è necessario l'intervento. E' da valutare, comunque, l'ipotesi di doppio guasto a terra qualora il primo non sia estinto in maniera tempestiva. In questo caso, sebbene molto remoto, andrà valutata la corrente di cortocircuito e tarato l'interruttore in modo che la corrente di intervento sia inferiore di quella presunta in caso di guasto.

Il più grande vantaggio derivante da un'eventuale distribuzione in corrente continua a bassissima tensione, è la protezione dai contatti indiretti. La Norma CEI 64-8/4, Art.413, che tratta il tema della protezione contro i contatti indiretti, prescrive nell'Art. 413.1.1.1 che *“non è necessaria l'interruzione automatica dell'alimentazione in tempi prestabiliti, se sulle masse non viene superato, in caso di guasto, il valore della tensione di contatto limite U_L ”*.

In questo lavoro, tutta la distribuzione in continua all'interno del reparto Degenze, sarà esercita a bassissima tensione secondo quanto prescritto dalla norma CEI 64/8. La suddetta afferma che nei corridoi, che sono classificati come locali di Gruppo 0, la tensione di contatto U_L deve essere pari al massimo a 50 V nei sistemi alimentati in corrente alternata e a 120 V in quelli in corrente continua, mentre per le camere di degenza, classificate come Gruppo 1, essa dovrà essere pari al massimo a 25 V e 60 V rispettivamente per sistemi alimentati in corrente alternata e continua. Da qui, si nota il vantaggio dell'uso della corrente che, data la sua natura, ci permette di impiegare tensioni più alte ma rispettare comunque le prescrizioni sulla sicurezza.

4.2 Illuminazione a LED

L'illuminazione a LED si basa sull'impiego di diodi capaci di emettere radiazioni luminose se percorsi da corrente grazie all'applicazione di una differenza di potenziale ai capi. In elettronica il LED (Light Emitting Diode) è un dispositivo che sfrutta le proprietà di alcuni materiali semiconduttori che producono fotoni attraverso un fenomeno di emissione spontanea²³. Il principio di funzionamento si basa sulla presenza della giunzione P-N, in cui gli elettroni e le lacune vengono iniettati in una zona di ricombinazione attraverso due regioni del diodo ricoperte con impurità di tipo diverso, e cioè di tipo N per gli elettroni e P per le lacune. Quando sono sottoposti ad una tensione diretta, per ridurre la barriera di potenziale della giunzione, gli elettroni della banda di conduzione del semiconduttore si ricombinano con le lacune della banda di valenza rilasciando energia sufficiente sotto forma di fotoni. A causa dello spessore ridotto del chip, un certo numero di questi fotoni è rilasciato ed emesso come luce. Inizialmente, data la scarsa quantità di luce emessa, i LED potevano essere impiegati solo come indicatori ma, nel corso degli anni, sono sempre state applicati dei miglioramenti fino ad arrivare al LED a luce bianca che oggi è impiegato per l'illuminazione di ambienti interni ed esterni. Le grandezze di riferimento dei LED sono la tensione ai capi V_F e la corrente di pilotaggio I_F ; la caratteristica tensione – corrente è riportata in Fig.4. 17:

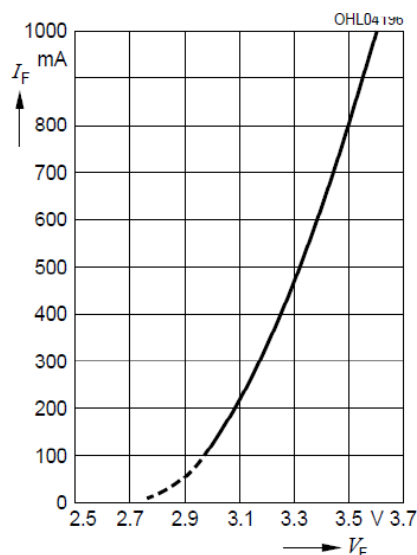


Fig.4. 17: Caratteristica tensione corrente dei LED.

²³ L'emissione spontanea è un processo in cui un atomo, o una molecola, compie una transizione da uno stato eccitato verso uno ad energia inferiore, emettendo un fotone.

Il controllo della corrente, di natura continua, è un aspetto di rilevante importanza in quanto dal valore della corrente di pilotaggio dipenderà l'intensità del flusso luminoso. Proprio per questo motivo, e poiché ad un aumento troppo alto di corrente corrisponde una diminuzione della vita utile del LED, è importante controllare la corrente circolante tramite raddrizzatori che permettono di mantenerla sempre in prossimità del suo valore nominale [21].

4.2.1 Alimentazione dei LED in corrente alternata

Per permettere la connessione alla rete elettrica, le lampade a LED, funzionanti in corrente continua, hanno bisogno di uno stadio DC/AC che gli permetta di essere interfacciate alla rete a corrente alternata a 50 Hz in modo da poter ricevere l'alimentazione. In realtà, non si tratta di un semplice convertitore ma lo schema risulta più complesso data la presenza di altri componenti all'interno dell'alimentatore. Uno schema completo relativo allo stadio di alimentazione di una stringa di LED è riportato in Fig.4. 18:

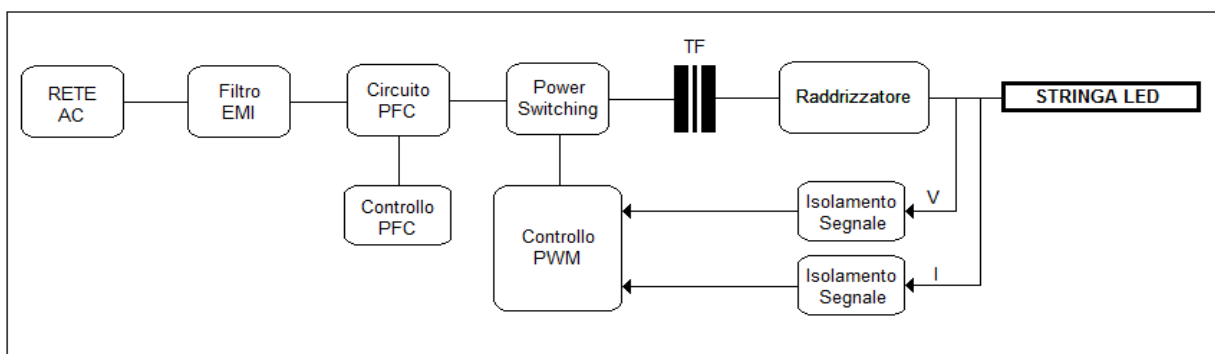


Fig.4. 18: Schema a blocchi dello stadio di alimentazione di una stringa di LED. Sarà presente una parte relativa al filtraggio delle armoniche ed uno stadio di raddrizzamento. Successivamente si avrà la conversione in alternata ad alta frequenza per l'alimentazione di un trasformatore che garantirà l'isolamento galvanico tra le due parti a tensioni diverse. Infine, l'alimentazione della stringa è garantita mediante un raddrizzatore che fornisce il corretto valore di tensione.

A partire dalla rete in alternata, il primo stadio è rappresentato da un filtro EMI che permette il filtraggio delle armoniche ad alta frequenza, riducendo l'immissione in rete dei disturbi di commutazione originati dai successivi stadi di conversione. E' necessario fornire l'alimentatore di questo filtro per rispettare le prescrizioni normative in ambito di inquinamento armonico. Il secondo stadio è il circuito PFC, costituito da un ponte raddrizzatore monofase e da un convertitore che realizza la correzione del fattore di potenza (PFC) garantendo un assorbimento di corrente sinusoidale dalla rete, in fase con la tensione di

linea. In uscita dal ponte si avrà una tensione continua sul bus, di valore solitamente pari a 400 V. A valle del bus in continua sarà presente lo stadio di alimentazione. Esso ha il compito di realizzare la conversione di potenza e l'isolamento galvanico per garantire la sicurezza vista la differenza di tensione tra il bus in continua e quella applicata alla stringa di LED. Di solito, infatti, in accordo con la norma CEI 64/8, questa tensione è la tensione di sicurezza che per impianti in corrente continua è pari a 120 V. Il blocco "Power Switching" ha il compito di fornire una tensione in alternata ad alta frequenza ai capi del trasformatore (TF). Il trasformatore ad alta frequenza garantirà l'isolamento tra le parti dell'alimentatore funzionanti a tensioni diverse, mentre il ponte raddrizzatore a valle consente di alimentare i LED con i valori di tensione e corrente desiderati.

4.2.2 Alimentazione dei LED in corrente continua

E' stato visto come, sia per garantire la sicurezza che per poter allacciare i LED alla rete di distribuzione, siano necessari più stadi di conversione per arrivare all'alimentazione della stringa di LED. I convertitori ed il trasformatore ad alta frequenza sono sedi di perdite che provocano, quindi, una diminuzione del rendimento del sistema complessivo. Qualora si potessero evitare questi stadi, si avrebbe certamente una riduzione delle perdite di potenza e di conseguenza un aumento del rendimento. Tramite l'alimentazione in corrente continua è possibile eliminare il primo stadio di conversione della tensione rappresentato dal ponte monofase a diodi ed arrivare ai capi del Power Switching direttamente con una tensione continua da 400 V_{dc}. In questo caso, essendo la stringa alimentata alla tensione di sicurezza di 120 V, sarà ancora necessario l'isolamento galvanico per motivi di sicurezza e quindi l'alimentatore si presenterebbe come mostrato in Fig.4. 19:

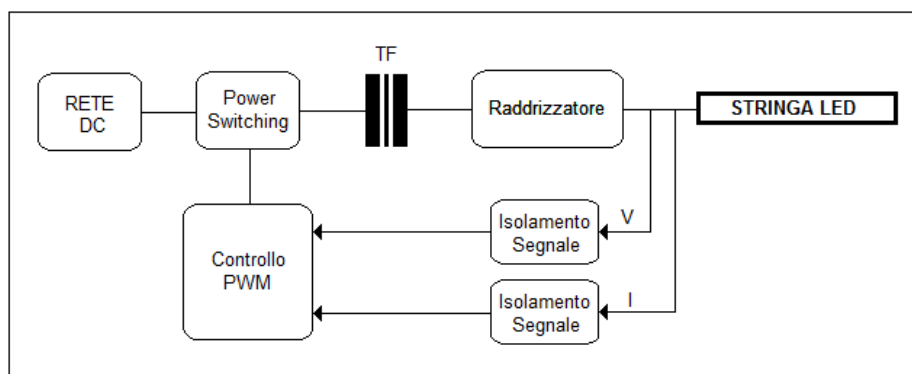


Fig.4. 19: Alimentando il carico mediante una linea in corrente continua, non è più necessario il raddrizzamento. L'alimentatore presenta ancora lo stadio di isolamento se la tensione della rete è molto maggiore rispetto a quella di alimentazione della stringa di LED.

Sarà previsto un inverter, per l'alimentazione del trasformatore ad alta frequenza TF e, nello stadio successivo, il raddrizzatore a diodi renderà disponibile la tensione continua necessaria all'alimentazione delle stringhe di LED.

Per semplificare ancora di più l'alimentatore ed ottenere un ulteriore vantaggio dal punto di vista energetico, è necessario far sì che la tensione della rete di alimentazione in continua sia di valore pressoché pari a quella della lampada (120 V) in modo da non avere più bisogno dello stadio di ondulazione e isolamento.

Questa soluzione può essere raggiunta aumentando la tensione ai capi della stringa di LED in modo da eguagliare la tensione di alimentazione (collegando più LED in serie per ogni stringa) o abbassando la tensione del bus in continua in modo da lavorare a tensione di sicurezza. In entrambi i casi, la situazione diverrebbe quella riportata in Fig. 4. 20:

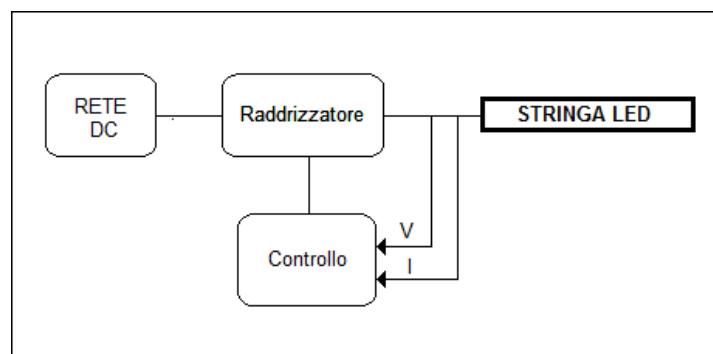


Fig.4. 20:Alimentando il carico mediante una linea in corrente continua, a tensione paragonabile a quella della stringa di LED, non sarà necessario neppure lo stadio di isolamento

In questo caso, l'alimentatore si semplifica ancora di più venendo meno la sezione relativa all'isolamento. Sarà necessaria la sola applicazione di uno stadio di conversione DC/DC qualora la tensione di alimentazione non fosse perfettamente uguale a quella della lampada o comunque per effettuare un controllo sulla corrente di alimentazione che, come visto, deve essere mantenuta costante in prossimità del suo valore nominale. Si può notare, quindi, una notevole semplificazione del dispositivo di alimentazione e una diminuzione delle perdite.

La scelta riguardante l'innalzamento della tensione del LED o la diminuzione della tensione del bus in continua, deriva dall'impiego e dalla tipologia di impianto considerato. Se si tratta di un impianto in cui si devono ricoprire lunghe distanze, è necessario lavorare a tensioni maggiori e quindi sarà opportuno provvedere all'aumento della tensione delle stringhe;

qualora ci fossero distanze brevi da ricoprire, si potrebbe lavorare a tensioni ridotte con notevoli vantaggi dal punto di vista delle protezioni dai contatti indiretti e dei costi dei dispositivi e degli isolamenti.

Basandosi su lampade a LED selezionate dai cataloghi di alcuni costruttori, è stato possibile effettuare un confronto e stimare l'entità del risparmio in termini di potenza confrontando l'assorbimento nel caso di alimentazione in continua ed in alternata. Per le lampade scelte, le caratteristiche sono riportate in Tab.4. 1:

Modello	Tipo di Alimentazione	Potenza assorbita [W]	Tensione di alimentazione [V]	Flusso luminoso [Lm]
LED 1	AC	44	230	4400
	DC	40	48	4400
LED 2	AC	25	230	1900
	DC	22	48	1900

Tab.4. 1: La Tabella riassume le caratteristiche dei LED impiegati con relativi valori di flusso luminoso, tensioni di alimentazione e potenze assorbite

Si può notare una differenza di potenza assorbita di 4 W per il modello LED 1 e di 3 W per il modello LED 2 ottenuta semplicemente cambiando la fonte di alimentazione. Questa differenza di potenza è imputabile allo stadio di alimentazione, sede di perdite nelle varie parti che lo compongono. Ommettendo tale stadio, avremmo un risparmio di circa il 9 % per il LED 1 e del 12% per il modello LED 2.

4.3 Camere di Degenza

Le camere di degenza sono definite dalla Norma CEI 64/8-7 sez. 710 come “*camere o gruppi di camere adibite ad uso medico nelle quali i pazienti sono alloggiati per la durata del loro soggiorno in un ospedale od in un altro ambiente ad uso medico*”.

Come già visto al capitolo precedente, esse sono classificate dalla medesima norma come locali di Gruppo 1 in quanto le parti delle apparecchiature elettromedicali applicate al paziente, sono destinate ad essere utilizzate esternamente o invasivamente in qualsiasi parte del corpo ad eccezione della zona cardiaca. Data la vulnerabilità del paziente ricoverato in una struttura sanitaria, è previsto che, all'interno dei locali di Gruppo 1 e quindi anche all'interno delle camere di degenza, sia osservato quanto affermato dalla Norma 64/8 la quale prevede che per la tensione di contatto limite convenzionale U_L deve valere la relazione:

$$U_L \leq 25 V \text{ in c. a.}$$

$$U_L \leq 60 V \text{ in c. c.}$$

Questo aspetto va a vantaggio della corrente continua e nel seguito ci si baserà soprattutto su di esso per le considerazioni relative alla trattazione eseguita.

4.3.1 Descrizione Generale

Il Reparto Degenze considerato nel presente lavoro, rappresenta il padiglione adibito ad ospitare i pazienti ed è organizzato su tre livelli, ciascuno dei quali ospita venti camere da due posti letto ciascuno, per un totale di 120 posti letto. Nel seguito considereremo dettagliatamente una camere di degenza posta al primo piano del reparto in questione. Nell'intero piano, oltre alle camere, saranno presenti due corridoi e ulteriori locali per i servizi generali di reparto. Ogni piano è organizzato allo stesso modo con una suddivisione delle camere in due lotti ciascuno rispettivamente per degenti uomini e donne.

La situazione generale è riportata in Fig.4. 21:



Fig.4. 21: La figura mostra la planimetria di un piano del padiglione degenze. Ci saranno 20 camere, due corridoi e altri servizi di piano.

Per quanto riguarda le singole camere, ognuna di esse presenta un locale adibito ai servizi igienici ed un filtro attraverso il quale si accede alla stanza. La Fig.4. 22 mostra il dettaglio di una camera di degenza con servizi annessi:

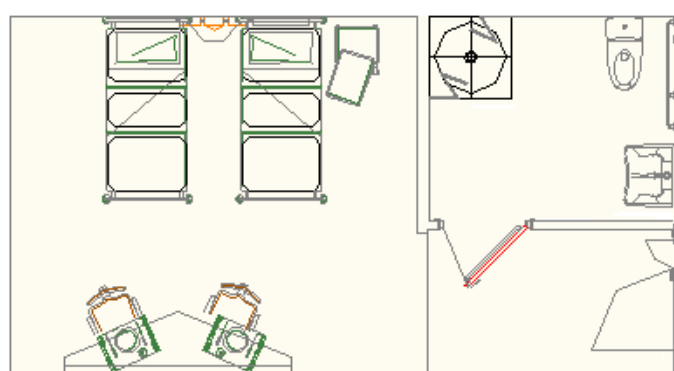


Fig.4. 22: Ogni camera di degenza sarà costituita da un filtro, un bagno e da un locale per il ricovero contenente due posti letto.

Secondo quanto prescritto dalla UNI EN 12464-1, dovrà essere rispettato un valore di illuminamento medio $E_m = 100$ lx per le camere di degenza, $E_m = 200$ lx per i corridoi, locali generici, bagni e toilette dei pazienti.

Per ottenere l'illuminamento indicato dalla norma, ciascun corridoio sarà illuminato mediante dieci lampade a LED da 44 W alimentate da due linee separate per garantire almeno il funzionamento di cinque lampade in caso di guasto; le camere di degenza saranno illuminate tramite gli appositi testa letto che montano un tubo a LED da 44 W ciascuno ed in più sarà

presente una luce generale da 25W per l'intera camera. Nel filtro e nel bagno saranno installate due lampade da 25 W, una per ciascun locale, ottenendo l'illuminamento stabilito. La camera di degenza presenterà una potenza installata di 163 W per la sola illuminazione. Inoltre, per i servizi di piano sono previsti altri 440 W di potenza installata dei soli carichi illuminanti. Il numero di lampade impiegato in ciascun locale è riportato in Tab.4. 2:

Locale	Lampade da 44 W	Lampade da 25 W
Corridoi	20	0
Camera	2	3
Servizi Generici	10	0
Intero Piano	70	66
Intero Padiglione	210	198

Tab.4. 2: Tabella riepilogativa del numero di lampade impiegate nel singolo piano e nell'intero padiglione.

In Tab.4. 3 sono riportati gli assorbimenti totali rispettivamente della singola camera di degenza, del primo piano e di tutto il padiglione considerato:

Locale	Potenza assorbita [W]	Quantità	Potenza totale [W]
Camera	163	20	3'260
Corridoi	440	2	880
Servizi Generali	440	1	440
Potenza Totale del Singolo Piano			4'580
Potenza Totale Parte del Padiglione Considerata			13'740

Tab.4. 3: In tabella sono riportati i valori di potenza dei carichi luce installati nel singolo piano e nell'intero padiglione.

Per quanto riguarda gli altri carichi, deve essere prevista una linea prese generale per la stanza a cui saranno connesse le utenze generiche e data la possibilità di connessione ad apparecchiature mediche che eventualmente dovranno essere introdotte all'interno della camera per particolari esigenze dei medici. Un'altra linea prese sarà destinata ai testa letto ed ai servizi igienici e filtro. L'organizzazione dei carichi luci e prese della singola camera è effettuata a partire dal quadro locale dedicato alla singola degenza come mostrato in Fig. 3. 26 (Cap.3) in cui saranno alloggiare sei partenze così distribuite:

- Alimentazione linea prese testaletti e servizi²⁴;
- Alimentazione linea prese mediche;
- Alimentazione linea luce testaletti e camera;
- Alimentazione linea luce servizi;
- 2 Riserve.

Ognuna delle linee appena elencate sarà protetta da un interruttore magnetotermico differenziale già dimensionato al capitolo precedente.

Per quanto riguarda l'intero piano, oltre alle luci dei corridoi, saranno previste due linee prese di servizio in modo da avere una presa in prossimità dell'ingresso di ogni camera. In più, per l'illuminazione di emergenza, saranno previste due linee luci che, a partire dal quadro del primo piano (QDP1), alimentino in tampone due gruppi di luci di sicurezza che forniranno un illuminamento medio $E_m = 5 \text{ lx}$ ad un metro di altezza dal piano di calpestio come previsto dal DM 18/9/02 Sez. 6. Queste luci entrano in funzione nel momento in cui viene meno l'alimentazione e devono garantire un funzionamento, grazie alle batterie interne, della durata di 2 ore permettendo l'evacuazione in caso di pericolo. Anche la camera, il filtro e il bagno ne sono provvisti.

In virtù di quanto detto sulla corrente continua e sui suoi benefici, soprattutto in ambito di sicurezza, entriamo nel merito del lavoro proponendo una soluzione alternativa a quella già

²⁴ Per "servizi" si intendono i servizi igienici e il filtro.

adottata nell'impianto. Ipotizzeremo nel seguito un'alimentazione in corrente continua dei carichi luce che, data la natura dei LED, si prestano perfettamente a questa applicazione. Il primo vantaggio derivante dalla soluzione adottata, è relativa al fatto che si potrà fare a meno dello stadio di conversione presente all'interno della lampada, ottenendo un risparmio energetico per l'alimentazione dei LED.

A parità di illuminamento medio, caratteristiche delle linee e carichi luci collegati, possiamo effettuare un confronto tra le potenze assorbite rispettivamente dal medesimo apparecchio illuminante alimentato in corrente alternata ed in corrente continua. In Tab.4. 4 riportiamo gli assorbimenti in entrambi i casi [22]:

Modello	Potenza assorbita in C.A. [W]	Potenza assorbita in C.C. [W]	ΔP [%]
LED 1	44	40	9%
LED 2	25	22	12%

Tab.4. 4: Confronto energetico sul consumo delle lampade rispettivamente alimentate in alternata ed in continua.

Stando a questi nuovi dati, possiamo calcolare la potenza assorbita dalla singola camera di degenza in caso di alimentazione in corrente continua. Sostituendo le lampade da 44 W con quelle da 40 W e le lampade da 25 W con quelle da 22 W possiamo ricompilare la Tab.4. 3, ottenendo la situazione riportata in Tab.4. 5:

Locale	Potenza assorbita [W]	Quantità	Potenza totale [W]	Variazione rispetto al caso in C.A. [%]
Camera	146	20	2'920	10,4
Corridoio	400	2	800	9,1
Servizi Generali	400	1	400	9,1
Potenza Totale del Singolo Piano			4'120	9,7
Potenza Totale Parte del Padiglione Considerata			12'360	9,7

Tab.4. 5: In tabella sono riportati i valori di potenza dei carichi luce installati nel singolo piano e nell'intero padiglione nell'ipotesi di alimentazione in continua.

Oltre a questi aspetti, c'è da considerare che l'uso di una tensione in continua di 48 V causerà un aumento della corrente circolante nel circuito rispetto al caso di alimentazione a 230 V in alternata. Sarà necessario valutare questo aspetto per capire se l'alimentazione in bassissima tensione determinerà un sovradimensionamento dell'impianto e tener conto anche di ciò nell'analisi economica. A tal proposito confronteremo nel seguito le due soluzioni tenendo conto della differenza di potenza assorbita dalle lampade a LED nel caso di alimentazione in alternata e in continua.

Per quanto riguarda l'illuminazione di una singola camera di degenza alimentata in corrente alternata, la situazione sarà quella illustrata in Fig.4. 23:

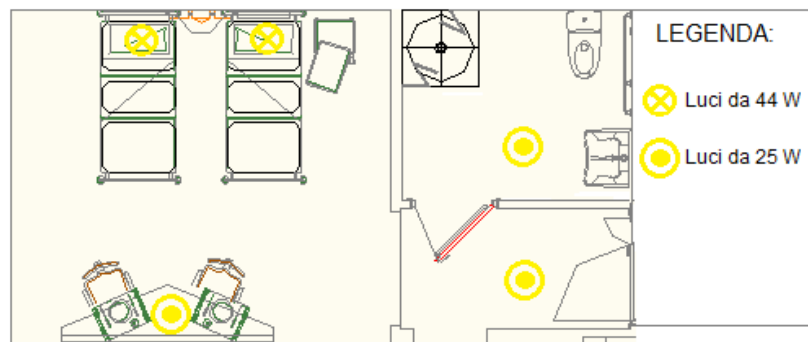


Fig.4. 23: Schema relativo ai carichi luce nella singola camera di degenza. Saranno presenti tre lampade da 25 W generali per i locali e due da 44 W per i testa letto.

La Fig.4. 24 mostra le linee di collegamento a partire dal quadro della singola camera posto nel filtro:

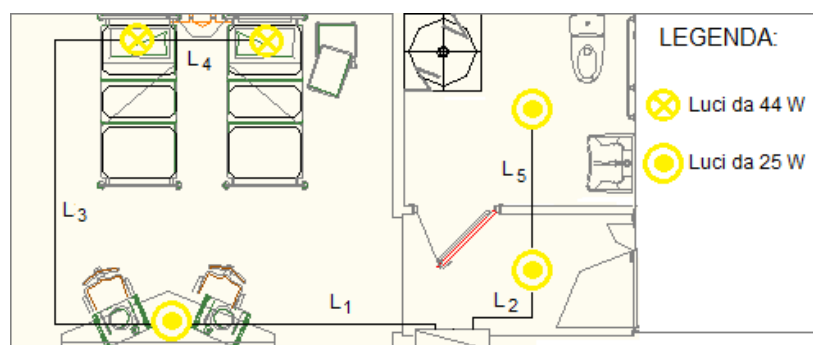


Fig.4. 24: Organizzazione delle linee di collegamento per l'alimentazione dei carichi luce nella singola camera dei degenza.

Calcoleremo nel seguito le potenze dissipate lungo le linee di collegamento. Innanzitutto sarà necessario ricavare le correnti I_{44} e I_{25} assorbite rispettivamente dalle lampade da 44 e da 25 W:

$$I_{44} = \frac{P_{44}}{V \cos \varphi} = \frac{44}{230 \cdot 0,9} = 0,21 \text{ A}$$

$$I_{25} = \frac{P_{25}}{V \cos \varphi} = \frac{25}{230 \cdot 0,9} = 0,12 \text{ A}$$

Considerando che la sezione dei cavi rappresentati in figura è pari a $1,5 \text{ mm}^2$, e che il cavo in questione è caratterizzato da una $r = 12,2 \text{ } \Omega/\text{km}$ e una $x = 0,168 \text{ } \Omega/\text{km}$, attraverso i dati delle linee riportati in Tab.4. 6, potremo valutare la potenza totale dissipata per effetto Joule.

Linea	Lunghezza [m]	Impedenza [Ω]	Potenza dissipata P_p [W]
L1	3	0,037	0,004
L2	5	0,061	0,034
L3	10	0,122	0,043
L4	3	0,037	0,003
L5	5	0,061	0,0017
Potenza totale dissipata			0,0857

Tab.4. 6: Caratteristiche delle linee e potenze dissipate per effetto Joule nelle linee di alimentazione dei carichi luce nel caso di alimentazione in alternata.

Per il calcolo delle potenze riportate in tabella sono state applicate le seguenti formule:

$$P_{P_{L1}} = 2R_1(2 I_{25})^2$$

$$P_{P_{L2}} = 2R_2(I_{25} + 2 I_{44})^2$$

$$P_{P_{L3}} = 2R_3(2I_{44})^2$$

$$P_{P_{L4}} = 2R_4I_{44}^2$$

$$P_{P_{L5}} = 2R_5I_{25}^2$$

Dove R_i rappresenta la resistenza totale della i -esima linea considerata.

Si può osservare che a fronte di una totale potenza installata di 163 W, la potenza persa complessiva è pari a 0,08 W che è un valore irrilevante corrispondente a meno dello 0,05 %.

Realizzando una linea alla tensione di 48 V in corrente continua, avremo un aumento delle correnti circolanti e sarà opportuno controllare se la sezione dei cavi sarà ancora sufficiente a sopportarla. Eseguendo gli stessi calcoli, ma considerando le potenze assorbite dalle lampade nel caso di alimentazione in continua che si riducono a 40 e 22 W rispettivamente per le lampade da 44 e 25 W, otterremo i valori riportati in Tab.4. 7:

Linea	Lunghezza [m]	Resistenza [Ω]	Potenza dissipata P_p [W]
L1	3	0,037	0,06
L2	5	0,061	0,55
L3	10	0,122	0,67
L4	3	0,037	0,05
L5	5	0,061	0,026

Tab.4. 7: Caratteristiche delle linee e potenze dissipate per effetto Joule nelle linee di alimentazione dei carichi luce nel caso di alimentazione in continua.

Avendo considerato le correnti assorbite alla tensione di 48V:

$$I_{40} = \frac{P_{40}}{V_{dc}} = \frac{40}{48} = 0,83 \text{ A}$$

$$I_{22} = \frac{P_{22}}{V_{dc}} = \frac{22}{48} = 0,46 \text{ A}$$

Si può notare che la corrente risulta quadruplicata rispetto al caso precedente ma, considerando che il cavo da 1,5 mm² presenta una $I_z = 24 \text{ A}$, possiamo ritenere ancora valevole la scelta di tale taglia.

Nel caso in questione si riscontra un aumento delle perdite che risultano pari a 1,35 W a fronte di una potenza complessivamente installata di 146 W, registrando un aumento di oltre 16 volte rispetto al caso precedente. E' importante prestare attenzione a come la diminuzione della tensione comporti un aumento di potenza dissipata che potrebbe divenire consistente in caso di carichi più importanti comportando un aumento della sezione dei cavi e, quindi, dei costi.

Considerando il contributo delle perdite calcolate, possiamo stimare la potenza complessivamente assorbita nel caso di alimentazione in alternata $P_{ass\ CA}$ e quella in continua $P_{ass\ DC}$:

$$P_{assCA} = P_{instCA} + P_{pCA} = 163 + 0,08 = 163,08 \text{ W}$$

$$P_{assDC} = P_{instDC} + P_{pDC} = 146 + 0,47 = 147,35 \text{ W}$$

Dove P_{inst} rappresenta la potenza complessiva installata in una camera di degenza e P_p la potenza persa lungo le linee di alimentazione.

Il risparmio percentuale $R_{\%}$ che si ottiene alimentando le lampade in corrente continua anziché in corrente alternata è stimabile come:

$$R_{\%} = \left(1 - \frac{P_{assDC}}{P_{assCA}}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{147,35}{163,08}\right) \cdot 100 = 10 \%$$

Ne risulta che, nonostante l'aumento delle perdite in linea dovuto alla diminuzione della tensione di impiego dell'impianto, il risparmio continua ad essere intorno al 10%. Questo risparmio è dovuto esclusivamente all'omissione dello stadio di conversione della lampada a LED reso possibile grazie all'alimentazione in continua.

4.4 Fornitura in Corrente Continua

Per garantire l'alimentazione di tutte le utenze alimentabili in corrente continua, nel nostro caso carichi luce, si possono pensare diverse soluzioni. La scelta finale dipende da molti fattori quali ad esempio il tipo di struttura su cui si opera, il livello di sicurezza da fornire, l'affidabilità che si vuole ottenere dall'impianto e soprattutto il fattore economico.

Tra le varie soluzioni possibili, si potrebbe pensare all'installazione di una linea di trasmissione in corrente continua che parta dal Power Center e fornisca energia alle apposite sezioni di impianto dei vari padiglioni. La linea in questione dovrebbe essere alimentata in corrente continua tramite un apposito convertitore AC/DC installato in cabina e dimensionato opportunamente per far fronte all'intera potenza installata per l'illuminazione. Per garantire continuità ed affidabilità all'impianto, il convertitore sarà ridondato in modo da permettere l'inserimento del secondo qualora si dovesse verificare un guasto su quello in servizio. La linea percorrerà tutto l'ospedale garantendo l'alimentazione ai quadri con connessione entra-esce come mostrato in Fig.4. 25:

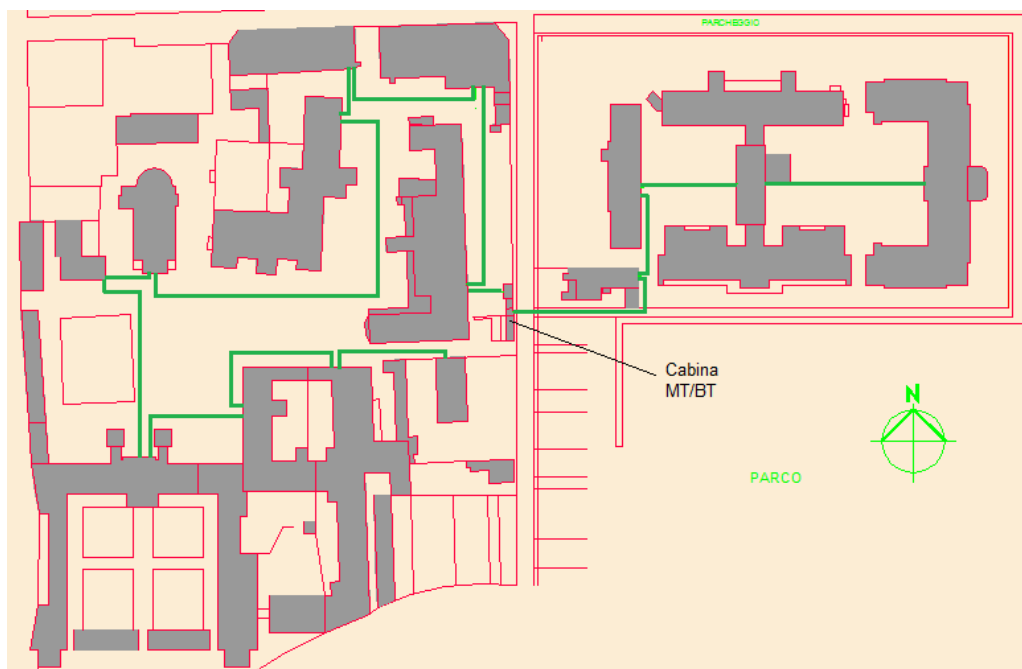


Fig.4. 25: Percorso cavi nel caso di alimentazione dei carichi luce mediante linea esterna generale in corrente continua. La linea percorrerà tutto l'ospedale fornendo energia ai quadri in modalità entra-esce.

Un'altra soluzione potrebbe essere quella di realizzare una linea in corrente continua che segua lo stesso percorso di quella in alternata, ma che trasporti la sola potenza necessaria all'alimentazione dei carichi luce.

Anche qui, la partenza dal Power Center presenterebbe in testa un raddrizzatore per permettere di convertire la corrente alternata in continua affinché sia distribuita al quadro del padiglione considerato. Questa soluzione differisce dalla precedente dal punto di vista dell'affidabilità: come per la linea in alternata, ogni reparto avrà una linea in corrente continua dedicata per l'alimentazione dei carichi. La situazione esposta è illustrata in Fig.4. 26:

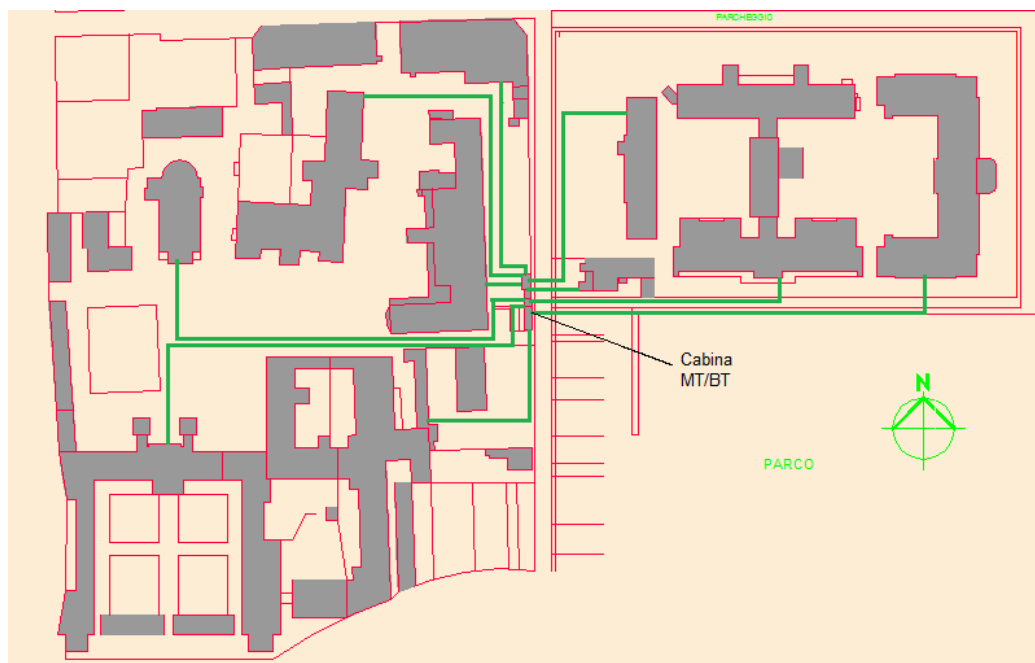


Fig.4. 26: Percorso cavi nel caso di alimentazione dei carichi luce mediante linee dedicate in corrente continua. Ogni padiglione avrà la propria linea proveniente dal Power Center alimentante il quadro principale.

Un'ulteriore soluzione potrebbe essere quella della realizzazione di isole in corrente continua all'interno dei padiglioni. In questo caso la distribuzione da Power Center rimarrebbe invariata e si avrebbe un'unica linea di alimentazione verso il reparto considerato. Lo stadio di conversione da alternata a continua, in questo caso, sarebbe installato direttamente all'interno del reparto in cui si svilupperebbe la linea in continua per i carichi luce.

La Fig.4. 27 mostra questa soluzione:

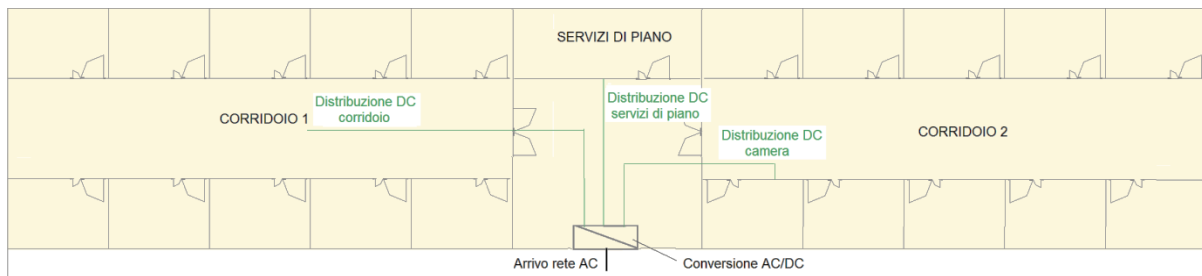


Fig.4. 27: Percorso cavi nel caso di alimentazione dei carichi luce mediante isole in continua. L'alimentazione al quadro di zona arriverà dalla linea generale in alternata ed in seguito sarà eseguita la conversione.

Come già detto, la soluzione ottimale dipende da molti fattori e deve essere scelta in base alle esigenze della struttura in esame. Nel seguito saranno analizzate le tre situazioni proposte e sarà individuata quella che più si presta all'ospedale in questione valutandone l'aspetto economico ed energetico.

4.4.1 Linea di Alimentazione Esterna

Affronteremo ora il caso sopra citato che prevede l'installazione di una linea di alimentazione esterna che percorre tutto l'ospedale fornendo energia ai carichi luce dei vari reparti.

La distribuzione avverrà su diversi livelli di tensione: la prima parte, rappresentata dalla linea esterna, sarà esercita alla tensione di $750 V_{dc}$ in quanto, dovendo ricoprire grandi distanze e trasportare una potenza elevata, l'uso di una tensione più alta sarà utile per l'abbattimento delle perdite e della taglia dei cavi da utilizzare.

In ogni quadro generale di padiglione sarà presente una sezione in corrente continua alimentata dalla linea in questione, che a sua volta fornirà alimentazione alle sezioni in continua dei vari quadri di zona a cui saranno connesse le lampade a LED. Per riuscire a mantenere sezioni dei cavi accettabili e ricoprire distanze che ci permettano di fornire l'alimentazione a tutti i carichi, la tensione sarà abbassata in prossimità di ogni quadro di zona per essere distribuita verso i carichi al livello di sicurezza di 48 V. Ciò permetterà di

diminuire il numero di stadi di conversione incorrendo in minori perdite dovute ai convertitori.

Per procedere con il dimensionamento, sarà innanzitutto necessario definire la corrente transitante attraverso la linea, ricavabile tramite la potenza di dimensionamento. Nel nostro caso, la potenza sarà riferita alle sole luci in quanto l'ipotesi di alimentazione in corrente continua è legata ai soli carichi illuminanti.

Per i padiglioni da noi trattati, i carichi luce²⁵ saranno:

- Reparto Operatorio: 6 kW;
- Reparto Degenze: 12,4 kW;
- Reparto Diagnostica: 6 kW;

La linea di distribuzione in corrente continua, però, sarà dimensionata per alimentare tutti i carichi luce dell'ospedale, di conseguenza andrà presa in considerazione la totale potenza relativa all'illuminazione dell'ospedale. Considerando che, come detto al Cap.3, il Power Center è dotato di 18 partenze di cui 5 riserve, avremo 10 linee da considerare oltre quelle relative ai padiglioni già trattati. Si può considerare, mediamente, una potenza dei carichi illuminanti $\bar{P} = 3,5 \text{ kW}$ ²⁶ per ogni partenza, ottenendo che la potenza complessivamente transitante nella linea in corrente continua P_{dc} sarà pari a:

$$P_{dc} = 10 \bar{P} + P_{Ill_{RO}} + P_{Ill_D} + P_{Ill_{DG}} = (35 + 6 + 4,6 + 6) \cdot 10^3 = 51,6 \text{ kW}$$

A questo punto è importante stabilire se la presenza della linea in corrente continua per l'alimentazione dei soli carichi luce ci permetterà di risparmiare sulla sezione dei cavi della

²⁵ Le potenze elencate sono già quelle relative agli assorbimenti delle lampade a LED alimentabili in corrente continua

²⁶ La scelta della potenza media è stata fatta tenendo conto che alcune linee in partenza dal Power Center alimentano carichi costituiti da motori (pompe, ascensori, centrale termica dell'ospedale) e che quindi l'assorbimento di potenza dovuto all'illuminazione sarà certamente minore rispetto ai padiglioni trattati. Si considera, quindi, una media di 3,5 kW per ogni utenza.

linea in alternata. Quest'ultima, infatti, si troverà a trasportare una potenza inferiore, per cui verificheremo se la sezione dei cavi dimensionati nel progetto in alternata risulta ancora idonea o sarà possibile diminuirla.

Per i padiglioni considerati in questo lavoro, si riportano in Tab.4. 8 i dati che si riferiscono alle potenze totali assorbite rispettivamente con e senza la quota parte dovuta all'illuminazione:

Reparto	Potenza totale [kW]	Corrente di impiego [A]	Potenza illuminazione ²⁷ [kW]	Potenza al netto dell'illuminazione [kW]	Nuova corrente di impiego [A]
Operatorio	80,7	125	6,6	74,1	119
Degenze	116	186	13,7	102,3	164
Diagnostica	111,6	179	6,6	105	168

Tab.4. 8: Differenza di potenza transiente nella linea in corrente alternata grazie alla presenza della linea in continua.

Considerando che per i reparti di Diagnostica e Degenze è stato impiegato un cavo da 95 mm^2 con $I_z = 252 \text{ A}$ e per il Reparto Operatorio uno da 70 mm^2 con una $I_z = 208 \text{ A}$ (Cap.3), risulta sconveniente ridurre le sezioni in quanto la differenza di corrente transiente non è molto significativa a causa delle basse potenze legate ai carichi luce. Infatti, volendo diminuire di una taglia i cavi, avremmo per i reparti di Diagnostica e Degenze un cavo da 70 mm^2 la cui $I_z = 208 \text{ A}$ differisce di poco dalla corrente di impiego; analoghi ragionamenti valgono per il reparto operatorio dove andrebbe scelta una sezione di 50 mm^2 avente $I_z = 168 \text{ A}$ ²⁸.

Diminuendo la sezione dei cavi non garantiremmo lo stesso livello di qualità presente prima della modifica, in più non sarebbe possibile garantire lo stesso margine disponibile per eventuali ampliamenti futuri dell'impianto.

²⁷ Alla potenza totale deve essere decurtata la potenza assorbita con i LED alimentati in corrente alternata. Essa sarà pari a 6,6 per il reparto operatorio e di diagnostica e 13,7 kW per le degenze come calcolato in Tab.4. 3.

²⁸ La sezione di 50 mm^2 prevede una $I_z = 210 \text{ A}$ ma, analogamente a quanto fatto al Cap.3 per tutti i cavi considerati, si è applicato un coefficiente moltiplicativo pari a 0,8 suggerito dal costruttore per tenere conto delle condizioni di posa che in questo caso è interrata.

Mantenendo le stesse sezioni, ci sarà comunque un vantaggio dovuto al fatto che le cadute di tensione lungo le linee in questione saranno più contenute ed anche le potenze dissipate saranno minori. Nella soluzione proposta, il carico luce distribuito tramite la linea in corrente continua comporterà minori perdite rispetto a prima in quanto transitante su una linea a tensione maggiore.

Sulla base delle valutazioni fatte finora, è possibile effettuare delle considerazioni sulla soluzione in analisi. Essendo l'ospedale organizzato in diversi blocchi che si sviluppano in un'area molto elevata, la linea in questione dovrebbe avere un'estensione di circa 1,6 km il che implicherebbe notevoli costi derivanti dall'uso di cavi con sezioni tali da consentire la limitazione delle cadute di tensione. Partendo dalla conoscenza del carico, possiamo effettuare il dimensionamento considerando che, vista la posizione del Power Center rispetto ai padiglioni, è opportuno prevedere due differenti linee alimentanti rispettivamente la parte Est ed Ovest dell'ospedale come mostrato in Fig.4. 28:

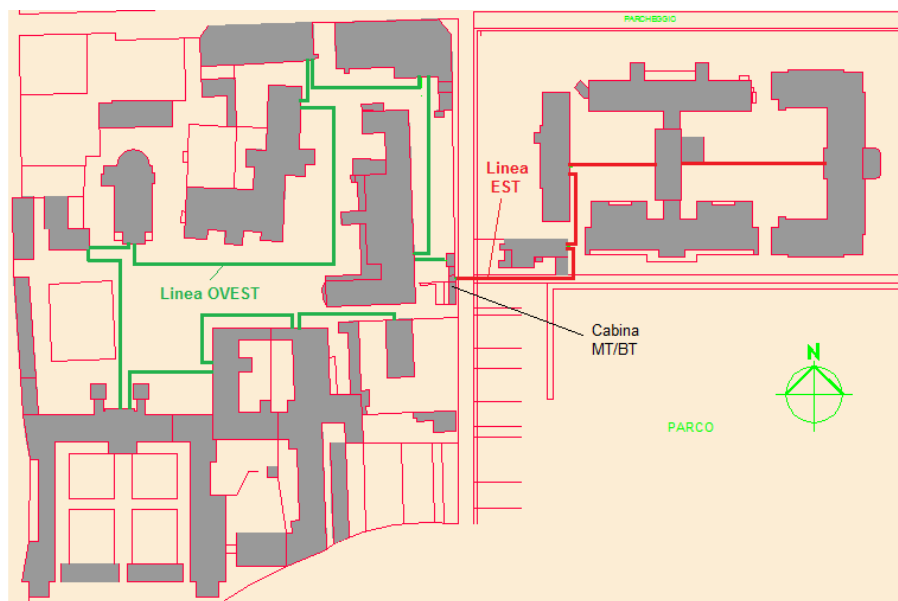


Fig.4. 28: Percorso cavi nel caso di suddivisione della linea esterna in due parti alimentanti rispettivamente alla EST ed OVEST dell'edificio.

Nella fattispecie avremo:

- Linea EST:

- $L = 400 \text{ m}$

- $P = 14,5 \text{ kW}$

- Linea OVEST:

- $L = 1200 \text{ m}$
- $P = 37 \text{ kW}$

Per la scelta delle caratteristiche delle linee, considereremo un carico concentrato a metà del percorso ed effettueremo i calcoli sulla base della corrente di impiego valutando le sezioni dei cavi in modo da avere una caduta di tensione massima del 2%, garantendo un ulteriore 2% per le linee interne ai relativi padiglioni. Analizzando la linea EST avremo:

$$I_{EST} = \frac{P_{EST}}{V_{dc}} = \frac{14,5 \cdot 10^3}{750} = 19,33 \text{ A}$$

Per avere una caduta di tensione pari al 2%, nell'ipotesi di carico concentrato a metà del percorso, dovrà essere rispettata la seguente relazione:

$$\Delta V_{\%} = \frac{2 r I_{EST} L/2}{V_{dc}} \cdot 100 = 2\%$$

A questo punto, possiamo ricavare la resistenza chilometrica r e conoscere la sezione del cavo ad essa associata:

$$r = \frac{\Delta V_{\%} \cdot V_{dc}}{100 \cdot 2 \cdot I_{EST} \cdot L/2} = \frac{2 \cdot 750}{100 \cdot 2 \cdot 19,33 \cdot 0,2} = 1,93 \text{ } \Omega/\text{km}$$

A questo valore di resistenza corrisponde una sezione di 16 mm^2 che presenta una $r = 1,24 \text{ } \Omega/\text{km}$ e $I_z = 104 \text{ A}$.

La caduta di tensione con il cavo scelto sarà:

$$\Delta V_{\%} = \frac{2 r I_{EST} L/2}{V_{dc}} \cdot 100 = \frac{2 \cdot 1,24 \cdot 19,33 \cdot 0,2}{750} \cdot 100 = 1,3 \%$$

A questo punto eseguiremo gli stessi calcoli per la linea OVEST. Le ipotesi saranno le medesime, ossia: la caduta di tensione dovrà essere inferiore al 2% ed il carico è considerato concentrato a metà del percorso. Avremo:

$$I_{OVEST} = \frac{P_{OVEST}}{V_{dc}} = \frac{37 \cdot 10^3}{750} = 49,3 \text{ A}$$

Per avere una caduta di tensione pari al 2%, nell'ipotesi di carico concentrato a metà del percorso, dovrà essere rispettata la seguente relazione:

$$\Delta V_{\%} = \frac{2 r I_{OVEST} L/2}{V_{dc}} \cdot 100 = 2\%$$

Da cui:

$$r = \frac{\Delta V_{\%} \cdot V_{dc}}{100 \cdot 2 \cdot I_{OVEST} \cdot L/2} = \frac{2 \cdot 750}{100 \cdot 2 \cdot 49,3 \cdot 0,6} = 0,25 \text{ } \Omega/\text{km}$$

A questo valore di resistenza corrisponde una sezione di 95 mm^2 che presenta una $r = 0,21 \text{ } \Omega/\text{km}$ $I_z = 315 \text{ A}$.

La caduta di tensione con il cavo scelto sarà:

$$\Delta V_{\%} = \frac{2 r I_{EST} L/2}{V_{dc}} \cdot 100 = \frac{2 \cdot 0,21 \cdot 49,3 \cdot 0,6}{750} \cdot 100 = 1,7 \%$$

Confrontando la portata dei cavi con la corrente di impiego effettivamente transitante, si può notare come i cavi risultano sotto sfruttati. Ciò accade a causa del contenimento delle cadute di tensione viste le elevate distanze da ricoprire. Considerando che il costo di cavi e posa è stimabile intorno a 6 €/m per i cavi da 16 mm² e a 20 €/m per quelli da 95 mm², avremmo un costo totale della linea in questione pari a:

$$C = 2 \cdot 400 \text{ m} \cdot 5,81 \frac{\text{€}}{\text{m}} + 2 \cdot 1200 \text{ m} \cdot 20,42 \frac{\text{€}}{\text{m}} = 53'656 \text{ €}$$

Dove la moltiplicazione per due, tiene conto della presenza del conduttore positivo e negativo. Questo risultato mostra uno svantaggio economico nei confronti di questa soluzione, in più, la presenza della linea generale di alimentazione che percorre l'intera struttura, connessa ai padiglioni in modalità entra - esci, comporterebbe un problema di affidabilità del sistema in caso di guasto come mostrato in Fig.4. 29.

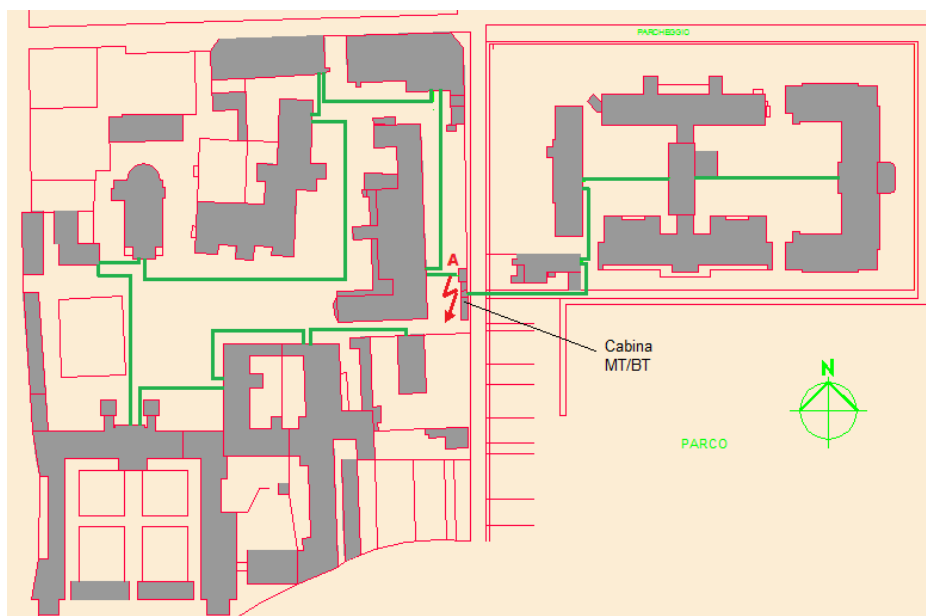


Fig.4. 29: Esempio di guasto sulla linea generale esterna. Un guasto in A causa il fuori servizio di tutti i carichi luce alimentati dalla linea OVEST.

Per un guasto in A, condizione più sfavorevole, si avrebbe il fuori servizio totale dell'intera linea e quindi la disalimentazione di tutti i carichi luce da essa alimentati. Per ovviare a questo problema si potrebbe pensare di ridondare la linea ma ciò comporterebbe un raddoppio dei costi, non solo dei cavi ma di tutti gli interruttori di protezione installati nei vari quadri. Inoltre, nel caso di linea ridondata, dovrebbe essere prevista la presenza di apparecchi di manovra automatici capaci di effettuare le commutazioni dalla linea principale a quella di servizio in caso di guasto, con conseguente aggravio economico.

Vista la difficoltà e gli elevati costi da sostenere per garantire un certo livello di affidabilità al sistema in esame, ne consegue che l'esercizio di una linea siffatta risulta poco conveniente in un'opera del genere. Le cause sono dovute essenzialmente all'estensione dell'ospedale che implica dei costi di realizzazione troppo elevati.

Un altro problema è dovuto al convertitore AC/DC in testa alla linea. L'installazione di un unico convertitore AC/DC fa sì che il sistema sia poco affidabile in quanto, in caso di guasto sullo stesso, si avrebbe il fuori servizio di tutti i carichi luce dell'intero ospedale. Per ovviare a questo problema, si potrebbe pensare di ridondarlo ed aumentare l'affidabilità dell'intero impianto, ma, ancora una volta si avrebbe un aumento dei costi sia per l'acquisto del dispositivo che per la necessità di impiegare interruttori in grado di commutare da una sorgente a quella di riserva in caso di guasto.

Un vantaggio legato a questa soluzione è senza ombra di dubbio la problematica degli ingombri. La conversione AC/DC centralizzata permette di installare un unico (o eventualmente due) convertitore riducendo gli spazi occupati rispetto a soluzioni che prevedono l'uso di più raddrizzatori dedicati per ogni linea. Sarebbe possibile, infatti, dedicare un unico quadro, o una parte di quello già esistente, alla conversione. L'uso di più convertitori, invece, implicherebbe un aumento degli spazi necessari all'alloggiamento dei dispositivi e quindi l'uso di carpenterie maggiori, locali più grandi e costi più elevati da sostenere.

Oltre agli aspetti tecnici, è necessario considerare anche quello energetico. Da questo punto di vista, la presenza di uno stadio di conversione a monte della linea principale ed uno in prossimità dei reparti, comporterebbe una doppia perdita a causa del rendimento dei convertitori (circa 95%).

Se si pensa che il vantaggio della distribuzione in continua si basa sulla possibilità di omettere lo stadio di conversione presente all'interno delle lampade in modo da evitare le perdite dei

convertitori e del trasformatore di isolamento (Par.4.2.2), esso sarebbe reso vano a causa delle perdite di dei convertitori AC/DC e DC/DC introdotti nell'impianto.

Abbiamo visto come, alimentando le lampade in continua, si riesca a risparmiare circa il 10 % in termini di energia assorbita dalla rete. Considerando la situazione prospettata in cui è presente una doppia conversione sull'impianto, la situazione risulterebbe quella mostrata in Fig.4. 30:

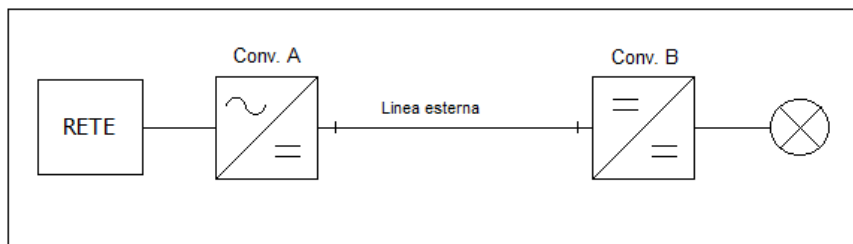


Fig.4. 30: Esempio di alimentazione di una lampada attraverso due stadi di conversione nell'impianto. Il conv. A rappresenta il raddrizzatore installato nel Power Center, mentre in conv. B quello installato nel quadro di zona del reparto degenze.

Come visto in Tab.4. 4, una lampada da 44 W in alternata, può essere alimentata in corrente continua presentando un assorbimento di 40 W grazie alla possibilità di omettere lo stadio di conversione ed isolamento. Introducendo due convertitori nell'impianto, avremo che la stessa lampada assorbirebbe dalla rete una potenza pari a:

$$P_{ill,D} = \frac{P_L}{\eta_A \cdot \eta_B} = \frac{40}{0,95 \cdot 0,95} = 44,3 \text{ W}$$

Dove η_A e η_B rappresentano i rendimenti dei due convertitori.

Ne consegue che la soluzione proposta, non solo risulta sconveniente dal punto di vista economico, ma anche da quello energetico in quanto l'assorbimento delle lampade è maggiore rispetto al caso in alternata.

Eventualmente, una soluzione del genere potrebbe essere applicata ad un ospedale monoblocco. In questo caso non ci sarebbe il problema delle distanze elevate, il problema del

contenimento delle cadute di tensione sarebbe marginale e ridondare la linea per aumentare l'affidabilità non comporterebbe un esborso consistente come nel caso trattato.

Probabilmente in un caso del genere si potrebbe riscontrare una convenienza derivante dal fatto che le potenze inferiori in gioco permetterebbero anche un sottodimensionamento della linea in corrente alternata garantendo un risparmio economico. Il vantaggio maggiore, però, deriverebbe dal fatto che in un ospedale monoblocco, sarebbe possibile lavorare a tensioni più basse e si eviterebbe uno stadio di conversione ottenendo un risparmio sia dal punto di vista economico che energetico.

Ovviamente il costo della linea in corrente continua e quello del convertitore restano gli investimenti maggiori, ma comunque comportano degli esborsi notevolmente minori rispetto al caso trattato in questo lavoro.

4.4.2 Linee Dedicare per ogni Padiglione

La soluzione in questione può sembrare, a primo impatto, molto simile alla precedente in quanto è prevista la presenza di linee esterne per la fornitura di energia in corrente continua ai quadri di padiglione. La prima differenza, che rappresenta allo stesso tempo un vantaggio ed uno svantaggio, è dovuta alla presenza di più linee di alimentazione, una per ogni padiglione.

Il vantaggio è legato al fatto che l'affidabilità del sistema complessivo raggiunge livelli molto alti, mentre lo svantaggio è di natura economica: la presenza di più linee comporta un notevole aumento dei costi.

La scelta di prevedere una linea dedicata all'alimentazione dei carichi luce di ogni padiglione, risolve, rispetto al caso di una sola linea esterna, il problema dell'affidabilità del sistema.

Qui, infatti, un guasto su una linea in continua come mostrato in Fig.4. 31, comporta il fuori servizio dei soli carichi alimentati dalla stessa e non la disalimentazione di tutti carichi luce dell'ospedale.

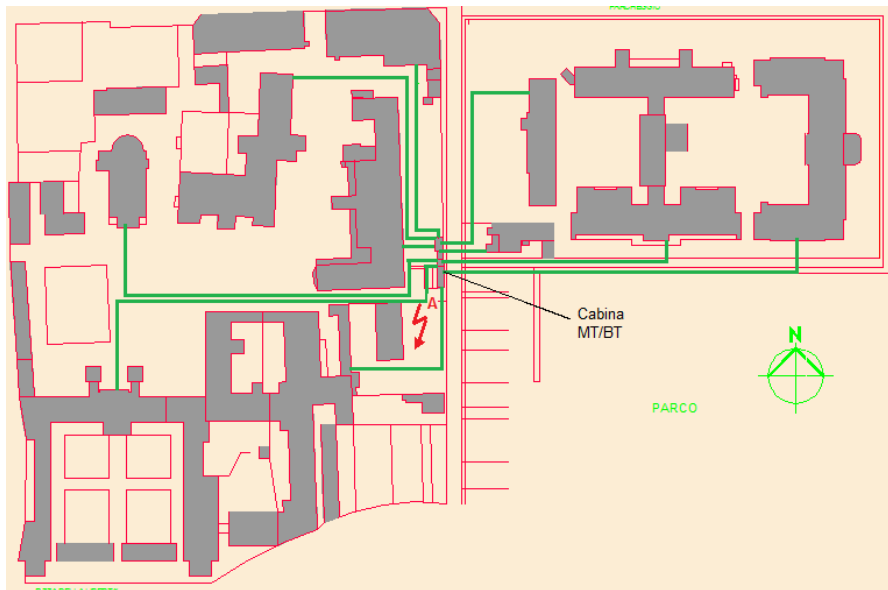


Fig.4. 31: Esempio di guasto nel caso di linee dedicate per ogni padiglione. Al verificarsi di un guasto in A, il disservizio è confinato al solo padiglione alimentato dalla linea considerata.

La ridondanza delle linee non sarà più necessaria in quanto si garantisce la stessa affidabilità che è garantita dal sistema in alternata. In più, ogni linea avrà in testa un proprio convertitore AC/DC comportando un ulteriore aumento della qualità dell'impianto e della sua affidabilità.

Impiegando linee dedicate, non sarà necessario l'uso di una tensione eccessiva per il trasporto della potenza che risulterà dell'ordine dei kW. Ciò comporterà un risparmio sull'acquisto dei convertitori il cui prezzo dipende anche dalla tensione di isolamento per la quale i componenti devono essere dimensionati.

Se si considera il reparto Degenze, a fronte di una potenza dei carichi illuminanti pari a $P_{illD} = 12,4 \text{ kW}$ trasportata alla tensione di 400 V, si avrà una corrente:

$$I_{illD} = \frac{P_{illD}}{V_{dc}} = \frac{12,4 \cdot 10^3}{400} = 31 \text{ A}$$

Tenendo conto del fatto che la linea sarà posata parallelamente a quella in alternata, si sceglierà un cavo avente le seguenti caratteristiche:

- Tipo: FG7OM1 Unipolare;

- Isolante: EPR;
- Formazione: 2 x 10 mm²;
- Lunghezza: 50 m
- Posa: Interrata in tubi o cunicoli;
- $I_z = 89$ A;

Come fatto per tutte le linee considerate, si applica un coefficiente correttivo pari a 0,8 per tener conto del tipo di posa del conduttore. La portata sarà ora $I_z = 71$ A. La sezione è scelta sulla base del fatto che si dovranno contenere le cadute di tensione vista la distanza da ricoprire. Conoscendo la resistenza per unità di lunghezza del cavo, di valore $r = 1,95$ Ω/km, possiamo valutare la resistenza totale del circuito e ricavare la caduta di tensione percentuale:

$$R_L = L \cdot r = 0,05 \cdot 1,95 = 0,1 \Omega$$

$$\Delta V\% = \frac{2R_L I_{LUD}}{V_{dc}} \cdot 100 = \frac{6,2}{400} \cdot 100 = 1,6 \%$$

La caduta di tensione è al di sotto della soglia del 2%, per cui si garantisce un buon margine per la distribuzione successiva all'interno del padiglione che sarà effettuata ad una tensione inferiore. Questo procedimento deve essere seguito per ogni reparto da alimentare e ognuna delle linee in questione avrà in testa il proprio convertitore AC/DC dedicato.

Da queste considerazioni si può già osservare che la soluzione in esame ha lo svantaggio di essere molto più costosa della precedente. Il numero di linee aumenta e la loro lunghezza totale sarà molto maggiore rispetto al caso precedente in quanto, per ogni padiglione, si dovrà partire dal Power Center e raggiungere i vari quadri. Inoltre, il costo di più convertitori di piccola taglia, è sempre maggiore rispetto a quello di un unico convertitore di potenza complessiva pari alla loro somma.

Rispetto alla singola linea esterna valutata nel caso precedente, questa soluzione comporta maggiori ingombri a causa della presenza di più convertitori ma allo stesso tempo offre un'affidabilità maggiore grazie alla suddivisione del carico su più linee. Si può pensare ad una soluzione del genere per impianti in cui si voglia un alto livello di affidabilità e non siano tollerati disservizi causati da guasti. Tutto ciò, ovviamente, andrà a discapito dei costi che aumentano notevolmente.

Una volta stabilita la potenza e la corrente transitante, si procede con il dimensionamento degli interruttori di protezione in testa alla linea. Sarà necessario conoscere, come nel caso di alimentazione in alternata, i valori delle correnti di cortocircuito ai vari quadri.

La differenza rispetto al dimensionamento in corrente alternata sta nel fatto che in questo caso dovrà essere installato un convertitore AC/DC che presenta un particolare comportamento in caso di sovracorrenti. Per questo dispositivo, infatti, valgono le stesse considerazioni fatte per gli UPS: le correnti di cortocircuito saranno limitate, in caso di guasto, ad un massimo di $1,5 I_n$ per il tempo previsto dall'algoritmo di gestione del convertitore che solitamente prevede lo spegnimento del dispositivo dopo 5 secondi.

Per questo motivo il primo passo richiede il dimensionamento del convertitore, la cui potenza sarà scelta sulla base della totale potenza assorbita dalle lampade installate nel padiglione, tenendo conto di un eventuale margine per far fronte ad eventuali ampliamenti futuri.

Tale convertitore dovrà avere una potenza pari a:

$$P_n = 1,2 P_{lud} = 1,2 \cdot 12,4 \cdot 10^3 = 14,8 \text{ kW}$$

In accordo con le taglie esistenti sul mercato, sarà scelto un a macchina di potenza pari a 15 kW.

A questo punto, possiamo calcolare la corrente nominale del raddrizzatore e ricavare il valore massimo della corrente di guasto transitante:

$$I_n = \frac{P_n}{V_{dc}} = \frac{15 \cdot 10^3}{400} = 37,5 \text{ A}$$

$$I_M = 1,5 I_n = 56 A$$

Dove I_M rappresenta la massima corrente circolante in presenza di guasto. Gli interruttori saranno dimensionati in base alla corrente di impiego della linea, già calcolata in precedenza e pari a $I_b = 31 A$.

Come è stato visto al paragrafo 4.1.3, la scelta dell'interruttore è subordinata, oltre che al livello di tensione e alla corrente di impiego, anche alla tipologia di rete considerata. Sono stati esposti i vantaggi delle diverse configurazioni e, in questo caso, si arriva alla conclusione che la linea che più si presta a garantire la continuità del servizio è quella isolata.

In caso di primo guasto, infatti, non è in alcun modo intaccata la continuità del servizio per via della mancanza di richiusura della corrente di guasto, quindi, a patto di prevedere un dispositivo per il controllo dell'isolamento, si può installare la rete senza connettere a terra il polo negativo.

Per la scelta del dispositivo di protezione, come visto, ci si baserà su:

- Tensione di impiego;
- Tipologia di rete;
- Corrente nominale.

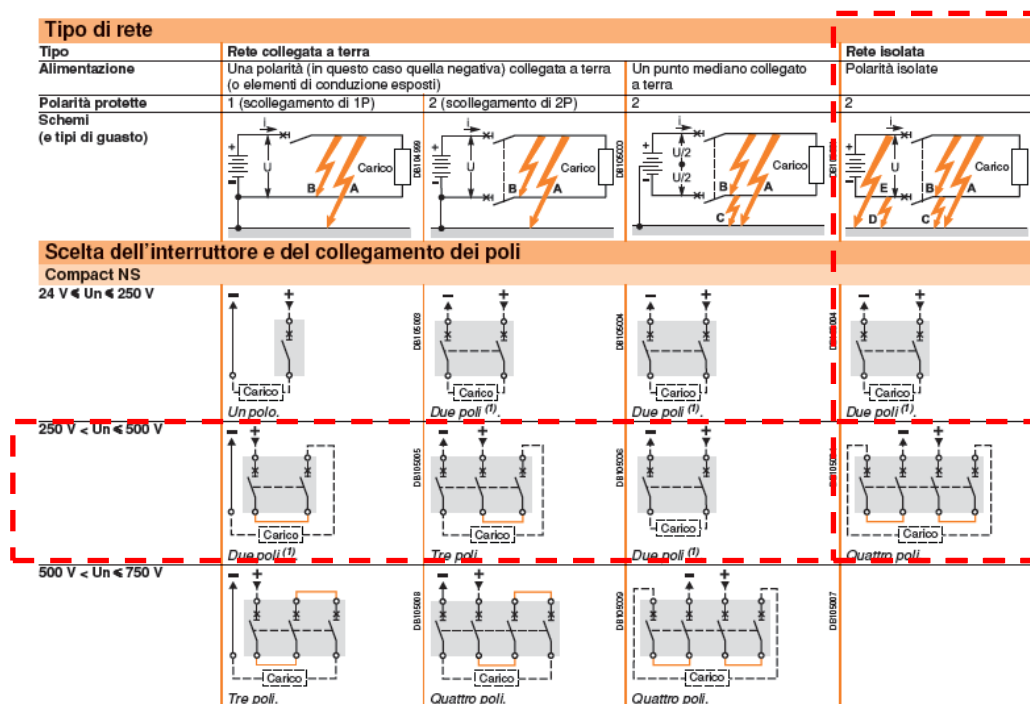


Fig.4. 32: per la scelta del numero di poli da impiegare nell'interruzione è necessario considerare la tipologia di sistema (nel nostro caso isolato) identificando la colonna d'interesse. Attraverso l'individuazione della tensione (400 V) si può identificare la riga e dall'incrocio delle due si può stabilire che l'interruttore dovrà avere 4 poli (due in serie per ogni polarità).

Dalla tabella illustrata in Fig.4. 32 indicata dai costruttori, si può stabilire che l'interruttore dovrà avere due poli collegati in serie per ogni polarità, per cui si sceglie un dispositivo avente le seguenti caratteristiche:

- Modello: S 200 M UC;
- Tipo: Magnetotermico;
- I_n : 32 A;
- Curva: Tipo Z^{29} ;
- $I_{sd} : (2,4 \div 3,6) I_n = (76,8 \div 115,2) A$

Questo interruttore non protegge la linea in caso di cortocircuito in quanto la soglia magnetica è troppo elevata. La corrente massima che può circolare è infatti limitata al valore di 56 A il che risulta un problema per il coordinamento delle protezioni.

²⁹ La curva di tipo Z garantisce l'intervento della soglia magnetica per valori di corrente pari a $(2,4 \div 3,6) I_n$.

In caso di guasto, quindi, interverrebbe la protezione interna del convertitore installata dal costruttore e tarata in modo tale da intervenire dopo 5 secondi in caso di correnti pari a $1,5 I_n$ e dopo 20 secondi per correnti di valore pari a $1,15 I_n$. Anche se fosse stato possibile l'intervento della protezione, l'entità del fuori servizio sarebbe stato il medesimo in quanto l'intera linea sarebbe comunque interrotta. La differenza sta nel fatto che, in caso di intervento dell'interruttore automatico, è possibile la ripresa del servizio (una volta risolto il guasto) tramite semplice riarmo del dispositivo; in caso di intervento delle protezioni interne del convertitore, spesso costituite da fusibili, è necessario l'intervento di un tecnico per la sostituzione.

Questa soluzione, come si può notare, presenta il grave difetto di non garantire una buona qualità del servizio, il che rappresenta una grossa limitazione soprattutto in questo genere di impianti.

Una possibile soluzione al problema, potrebbe essere quella di sovradimensionare il raddrizzatore in modo da innalzare il livello della massima corrente transitabile I_M fino al raggiungimento di un valore tale da permettere l'intervento del dispositivo di protezione. Nel nostro caso, dovrebbe essere verificato che:

$$I_M \geq I_{sd} = 115,2 A$$

Per cui, il convertitore dovrebbe avere una corrente nominale almeno pari a:

$$I_n = \frac{I_M}{1,5} = 76,8 A$$

A cui corrisponde una potenza:

$$P_n \geq V_{dc} \cdot I_n = 30,7 kW$$

Ciò vorrebbe dire un sovradimensionamento di oltre il 200% rispetto alla taglia necessaria. Va da sé che questa soluzione non è accettabile, quindi il problema dell'intervento dei dispositivi continua ad essere un problema fondamentale di questa soluzione. Le cause sono da imputare alla presenza della linea esterna che collega il Power Center al reparto in questione. Dovendo

installare una lunga linea prima di ripartire il carico alle varie utenze, si riscontra il problema appena visto relativo alla taratura della soglia magnetica dell'interruttore. Quando, invece, il convertitore si trova ad alimentare più utenze in partenza da esso, si avrà una suddivisione della corrente nominale tale da permettere la protezione dei carichi a valle (Fig. 4.33):

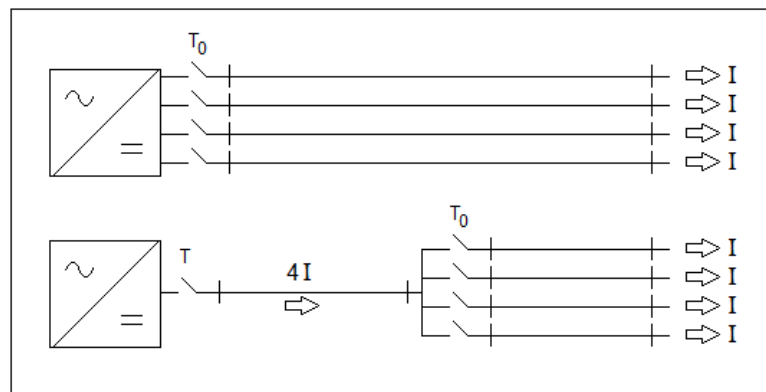


Fig.4. 33: La presenza di più linee in partenza dal convertitore fa sì che possa essere conseguita la protezione. Infatti, in questo caso, la corrente di impiego differisce di molto dalla nominale del convertitore permettendo la taratura dei dispositivi T_0 . Nel caso di singola linea, la scelta dell'interruttore T è difficoltosa se non c'è un buon margine tra la corrente nominale del convertitore e quella di impiego della linea.

Il dimensionamento dell'interruttore T , come visto, è difficoltoso in quanto la corrente circolante differisce di poco rispetto alla nominale del convertitore. Per questo motivo, anche scegliendo interruttori caratterizzati da curva di intervento di tipo Z , non si riesce ad ottenere l'intervento della soglia magnetica in caso di guasto. Suddividendo la corrente su più partenze, la situazione migliora in quanto la corrente transitante su ogni linea sarà tanto più inferiore a quella del convertitore, quanto maggiore è il numero delle linee in partenza. Di conseguenza risulta più semplice trovare un interruttore con una corrente nominale tale da permettere l'intervento della soglia magnetica in caso di guasto.

Ovviamente sarebbe impensabile applicare questa soluzione all'impianto in questione, in quanto vorrebbe dire aumentare il numero delle linee provenienti da Power Center ottenendo un aggravio economico non indifferente. Dal punto di vista energetico, ovviamente, si ripropone la stessa problematica vista nella soluzione precedente: la presenza di due stadi di conversione comporta un consumo energetico maggiore a causa delle perdite dei convertitori.

Questa problematica, insieme a quella già trattate in precedenza, fanno sì che la soluzione prospettata si veda più fattibile in ambienti caratterizzati da linee più corte e quindi distanze

più brevi da ricoprire come nel caso di ospedali monoblocco. Qui, infatti, non ci sarebbe il problema dell'installazione di cavi molto estesi e si potrebbe pensare ad una distribuzione mediante un maggior numero di linee organizzando opportunamente gli stadi di conversione ed i carichi in modo da conservare il vantaggio legato al risparmio energetico e permettere il corretto coordinamento dei dispositivi di protezione.

4.4.3 Realizzazione di isole in corrente continua

Dopo aver affrontato i due casi precedenti, si è arrivato alla conclusione che la presenza di linee di lunghezza troppo elevata rappresenta un punto critico per un'eventuale distribuzione in corrente continua all'interno dell'ospedale in esame. Valuteremo quindi la possibilità di realizzare una linea di alimentazione che si sviluppa solo all'interno del reparto e che sia caratterizzata da una conversione locale, all'interno dei quadri di zona. (Fig.4. 34). Vedremo che questa soluzione presenterà dei vantaggi economici considerevoli e sarà quella che meglio si presta ad essere impiegata in strutture caratterizzate da più padiglioni posti a distanze notevoli dal Power Center.

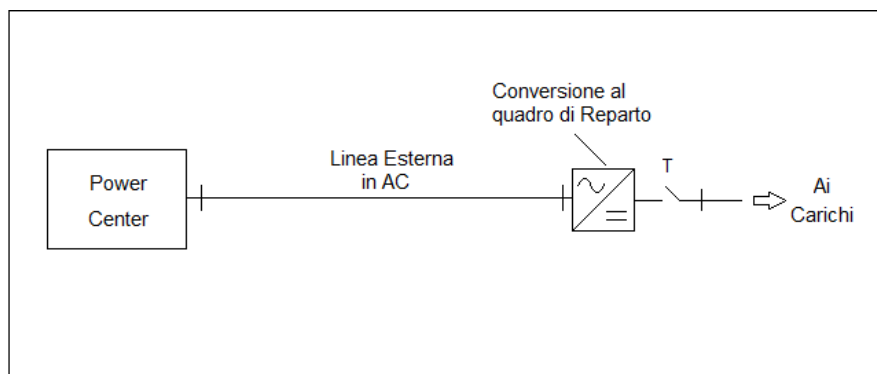


Fig.4. 34: In questa soluzione sarà presente un unico stadio di conversione. Il collegamento dal Power Center al quadro di zona è lasciato invariato rispetto al caso in alternata e la conversione avviene all'interno del reparto, nei quadri di zona.

Questa soluzione prevede la conversione della tensione ai vari quadri di zona, da $400 V_{ac}$ al valore di interesse per l'alimentazione dei carichi, nel nostro caso $48 V_{dc}$. Il primo vantaggio di questa soluzione è di non avere la necessità di una apposita linea esterna in corrente continua da abbinare a quella in alternata già esistente, il che comporta un notevole risparmio economico. In questo modo, può essere mantenuta la stessa linea di alimentazione in corrente

alternata senza alcuna modifica nel tratto di collegamento tra il Power Center ed il quadro di padiglione: essa, infatti, sarà percorsa da una corrente inferiore rispetto al caso di alimentazione dei carichi luce in alternata³⁰ e, di conseguenza, non necessiterà di alcun intervento. Ovviamente c'è da considerare che l'assenza della linea in continua comporterà anche un risparmio economico derivante dall'assenza dei dispositivi di protezione eventualmente necessari. In questo caso, infatti, saranno necessari solo gli interruttori all'interno di ciascun reparto che non comportano un aggravio economico poiché comuni a tutte le soluzioni proposte. L'assenza della linea di alimentazione esterna, oltre che un risparmio derivante dall'acquisto del cavo e degli interruttori, comporta un risparmio per le operazioni di posa e per l'acquisto del convertitore generale che caratterizzava le due precedenti soluzioni. Tale convertitore, dimensionato per la totale potenza assorbita dai carichi luce, sarebbe caratterizzato da un costo non trascurabile e, in più, comporterebbe le problematiche già trattate in quanto sede di perdite a causa del rendimento di circa il 95%.

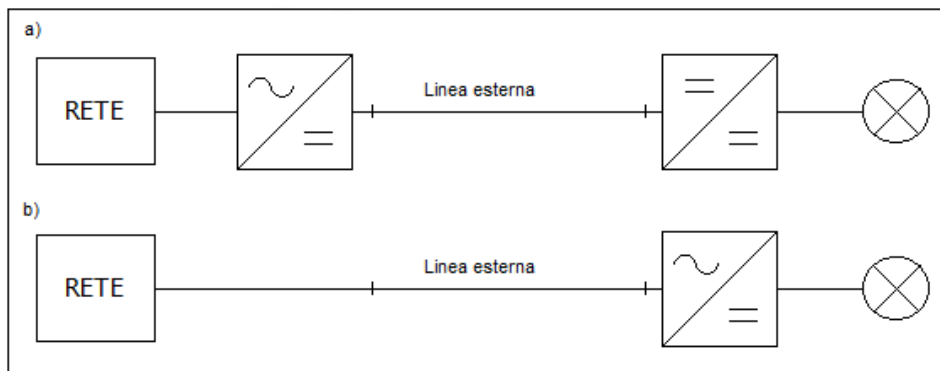


Fig.4. 35: Come visto, il caso a) comporta un aumento di energia richiesto dal carico rispetto al caso in alternata. Il caso b), presentando un unico stadio di conversione, permette di ridurre al minimo le perdite di conversione.

La Fig.4. 35 mostra la situazione relativa alla distribuzione in corrente continua realizzata in isola (b) confrontandola con quella descritta nei paragrafi precedenti (a). La realizzazione di isole in continua permetterà di impiegare un solo stadio di conversione al posto di due, superando lo svantaggio energetico che la presenza di due convertitori causava alle soluzioni

³⁰ Come è stato visto, alimentando le lampade in corrente continua, la potenza assorbita risulterà inferiore rispetto al caso di alimentazione in alternata e di conseguenza lo sarà anche la corrente. La differenza di potenza transitante attraverso la linea non è tale da poter ridurre la sezione del cavo che, quindi, rimane invariata.

precedentemente descritte³¹. Un altro punto a favore di questa soluzione è senz'altro l'affidabilità. Decentralizzando le conversioni, diminuisce la probabilità di disservizio o comunque, qualora si dovesse verificare un guasto su un convertitore, esso interesserebbe solo una parte limitata di impianto rispetto ai casi precedenti dove, per un guasto al convertitore generale della linea dedicata, rischierebbe di andare fuori servizio l'intero carico luci del padiglione o, nella peggiore delle ipotesi, di tutto l'ospedale³². E' anche vero che ridondando opportunamente i convertitori, nelle due situazioni precedenti, si potrebbe scongiurare il pericolo di fuori servizio, ma ciò comporterebbe comunque un aumento dei costi sia del macchinario che dei dispositivi di protezione che dovrebbero essere in grado di commutare automaticamente sul convertitore di riserva in caso di guasto. Va da sé che il costo di tali dispositivi è di gran lunga maggiore rispetto a quello di normali dispositivi di protezione e l'impianto risulterebbe più complesso. La soluzione relativa all'alimentazione in corrente continua in isola permette il risparmio anche su questo aspetto. Entriamo ora nel dettaglio per valutare dal punto di vista tecnico ed economico, la fattibilità della distribuzione in corrente continua considerando tutti i vari aspetti. Prenderemo come esempio una singola camera di degenza già analizzata nel dettaglio al paragrafo 4.3 e valuteremo tutti gli aspetti legati alle modalità di messa in opera dell'impianto come la scelta dei cavi, la valutazione delle cadute di tensione e la scelta dei dispositivi di protezione. Come detto, all'interno della camera saranno installate due lampade da 40 W per i testa letto e tre lampade da 22 W rispettivamente per la camera, il filtro ed il bagno. Si riporta la situazione descritta in Fig.4. 36:

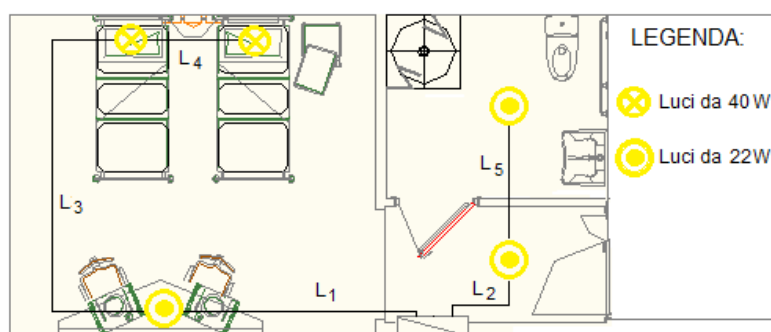


Fig.4. 36: La figura mostra il percorso cavi e la disposizione delle luci all'interno della singola camera di degenza.

³¹ E' stato visto come il doppio stadio di conversione penalizzasse le due precedenti soluzioni, causando un aumento dei consumi energetici rispetto al caso di alimentazione in alternata. (Fig.4.30). Questo problema è risolto nel caso in esame, grazie all'omissione di uno stadio di conversione.

³² Questo accadrebbe nell'ipotesi di linea di distribuzione generale (Par.4.4.1) dove tutta la linea luci fa capo ad un unico convertitore.

La figura mostra le partenze delle linee luci dal quadro di una singola camera. Le lampade sono organizzate in modo da essere alimentate da due linee luci caratterizzate dalle seguenti potenze:

- Linea luce 1: due lampade da 40 W e una da 22 W, per un totale di 102 W;
- Linea luce 2: due lampade da 22 W, per un totale di 44 W.

Lo schema rappresentativo delle linee luci di una camera con la relativa partenza dal convertitore, è riportato in Fig.4. 37:

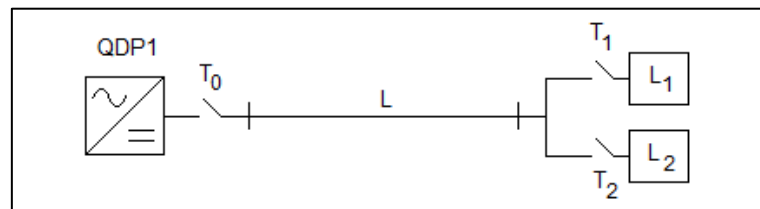


Fig.4. 37: Schema unifilare di una linea alimentante una degenza. La conversione avviene nel QDP1, T₀ rappresenta l'interruttore generale della singola camera di degenza (anch'esso all'interno del QDP1) mentre T₁ e T₂ rappresentano gli interruttori delle due linee luci della camera di degenza, L₁ ed L₂.

Il convertitore sarà alloggiato all'interno del quadro del primo piano (QDP1), T₀ rappresenta l'interruttore generale di una singola camera di degenza, L la linea che collega la camera al quadro, T₂ e T₁ gli interruttori posti a protezione delle due linee luci sopra elencate. A questo punto sarà necessario dimensionare gli interruttori T₀, T₁, T₂, la linea di collegamento ed il raddrizzatore stesso. Cominceremo con la linea attraverso la valutazione delle correnti di impiego dei carichi. Con riferimento alla Fig. 4.37, avremo che L₁ rappresenta la linea luce 1 caratterizzata da una potenza P_{L1} = 102 W e L₂ la linea luce 2 di potenza P_{L2} = 44 W. Per il dimensionamento della linea che collega il convertitore alla camera di degenza, è necessario procedere, come al solito, considerando le correnti assorbite dai carichi. Per il carico L₁ avremo:

$$I_{L1} = \frac{P_{L1}}{V_{dc}} = \frac{102}{48} = 2,1 \text{ A}$$

Avendo considerato una tensione di alimentazione fornita dal convertitore pari a 48 V. Analogamente, per il carico L_2 , la corrente vale:

$$I_{L2} = \frac{P_{L2}}{V_{dc}} = \frac{44}{48} = 0,9 \text{ A}$$

La corrente totale circolante sulla linea sarà:

$$I_T = I_{L1} + I_{L2} = 3 \text{ A}$$

Considerando una lunghezza $L = 5 \text{ m}$, si potrà impiegare un cavo di sezione $2,5 \text{ mm}^2$ con una portata $I_z = 26 \text{ A}$ ed una resistenza chilometrica $r = 7,98 \cdot 10^{-3} \text{ } \Omega/\text{m}$. La caduta di tensione percentuale varrà:

$$\Delta V_{\%} = \frac{2 r L I_T}{V_{dc}} \cdot 100 = 0,5 \%$$

Nonostante il basso valore di tensione utilizzato, la caduta di tensione risulta contenuta garantendo il rispetto del limite massimo del 4 %. Il cavo scelto presenta una portata molto più alta della corrente di impiego circolante nel circuito, ciò potrebbe portare alla considerazione dell'ipotesi di alimentare un gruppo di camere con un'unica linea. In questo lavoro si è deciso di alimentare singolarmente le camere in modo da avere una qualità del servizio maggiore ed effettuare un confronto più preciso con il caso in alternata dove è stata ipotizzata una linea dedicata per ogni stanza.

A questo punto è necessario scegliere gli interruttori di protezione da installare sia in testa alla linea (nel quadro del primo piano) che in partenza alle linee alimentanti i carichi (nel quadro della camera di degenza). Prima di ciò è necessario scegliere il convertitore da impiegare, in quanto, come visto per il dimensionamento degli UPS e per i convertitori della soluzione precedente, la corrente di cortocircuito è limitata dal dispositivo elettronico e quindi, per una corretta taratura delle protezioni è necessario conoscere tale corrente che dipenderà dalla corrente nominale e quindi dalla taglia del convertitore scelto.

In Tab.4. 5 è stata eseguita un'analisi dettagliata degli assorbimenti di potenza dei vari carichi luce, ottenendo una potenza installata per ogni piano pari a 4,1 kW. Questo dato rappresenta il punto di partenza per il dimensionamento del convertitore che sarà scelto, al solito, prevedendo un certo margine per eventuali ampliamenti futuri dell'impianto.

Considerando l'entità del carico, si sceglie di installare 2 convertitori aventi le seguenti caratteristiche:

- Tensione in: 400 Vac;
- Tensione out: 48 Vdc;
- Potenza: 2400 W;
- Rendimento: 95 %;
- Sovraccaricabilità: 1,5 In per 5 secondi;
- Dimensioni: 130 x 234 x 105 mm (Altezza x Larghezza x Profondità).

Dalla potenza totale dei convertitori, si riscontra un margine di circa il 20% per eventuali ampliamenti futuri.

E' ora possibile conoscere i livelli di cortocircuito nella nostra linea e di conseguenza scegliere e tarare opportunamente le protezioni. Procediamo, dunque, calcolando la corrente nominale del raddrizzatore:

$$I_n = \frac{P_n}{V_{dc}} = \frac{2400}{48} = 50 A$$

Di conseguenza la corrente massima verificabile, considerando un sovraccarico del 150% del convertitore, sarà:

$$I_M = 1,5 I_n = 75 A$$

A questo punto si presenta il problema già riscontrato nel caso precedente e nel caso dei dispositivi posti a valle degli UPS: sarà necessario assicurarsi che la soglia magnetica dell'interruttore scelto sia tale da far intervenire lo sganciatore qualora si verificasse la corrente massima I_M . Se così non fosse, si instaurerebbe un sovraccarico permanente del raddrizzatore che si spegnerebbe dopo 5 secondi causando un disservizio nell'intero impianto.

Nel nostro caso, considerando che le correnti nominali delle linee luci L1 ed L2 sono rispettivamente pari a 2,1 A e 0,9 A, sceglieremo i seguenti dispositivi di protezione:

- Modello: SN 201 L;
- Tipo: Magnetotermico modulare;
- $I_n = 4$ A;
- Curva: B;
- Poli: 2³³;

La curva B prevede un intervento per valori compresi tra 12 e 20 A garantendo il sicuro intervento del dispositivo di protezione. In realtà, in questo caso, si può notare che anche la scelta di un dispositivo con curva C garantirebbe l'intervento delle protezioni, in quanto la soglia magnetica interverrebbe per correnti comprese tra 5 e 10 I_n . Ciononostante, si preferisce scegliere un dispositivo con curva B, in modo da garantire un opportuno margine di selettività con l'interruttore a monte. L'interruttore posto a protezione della linea che collega il quadro del primo piano alla camera di degenza, a fronte di una corrente $I_T = 3$ A, presenterà le seguenti caratteristiche:

- Modello: SN 201 L;
- Tipo: Magnetotermico modulare;

³³ La scelta dei poli è eseguita in questo caso mediante la tabella riportata in Fig. 4.32. Si può notare che, intersecando il valore di tensione di 48 V con la tipologia di rete isolata, è previsto un interruttore previsto di due poli, uno per polarità.

- $I_n = 6 \text{ A}$;
- Curva: C;

La soglia magnetica sarà tarata in modo che lo sganciatore intervenga per valori di corrente compresi tra 30 e 60 A garantendo la protezione del circuito e la selettività con l'interruttore a valle.

Analoghi ragionamenti saranno seguiti per tutte le altre linee e, essendo tutte le camere caratterizzate dagli stessi assorbimenti, anche gli interruttori e le relative tarature presenteranno le medesime caratteristiche. E' interessante osservare come in questo caso sia stato possibile il coordinamento degli interruttori di protezione. Rispetto al caso precedente, infatti, si avrà in partenza dal convertitore un certo numero di linee che permetteranno di avere correnti di impiego molto minori rispetto alla nominale del convertitore.

Questa situazione risolve il problema riscontrato nella soluzione precedente dove non era possibile impiegare un interruttore in grado di garantire la protezione in caso di guasto. Ancora una volta, un punto a favore della realizzazione delle isole in continua. Possiamo considerare ora il caso delle linee luci del corridoio. La situazione relativa a questo ambiente è riportata in Fig.4. 38:

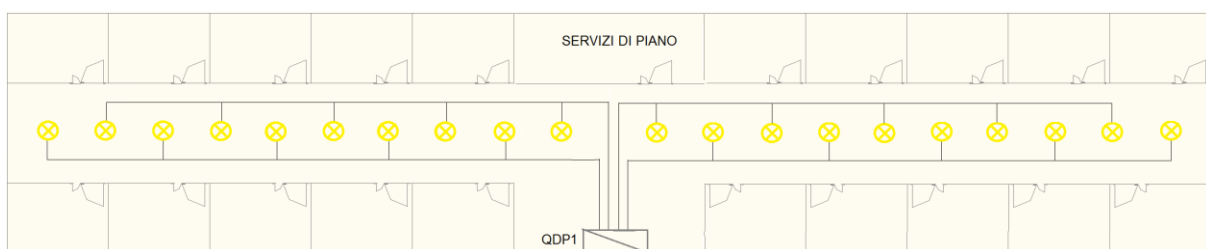


Fig.4. 38: Percorso cavi e organizzazione dei carichi luce nei corridoi.

Per garantire la continuità del servizio e una buona qualità dell'alimentazione per le linee destinate all'illuminazione dei corridoi, le lampade sono state organizzate in gruppi da cinque con un collegamento alternato in modo da non avere zone buie in caso di guasto su una linea. Per calcolare la caduta di tensione, la corrente di impiego e per scegliere la sezione dei cavi, ci

si pone nell'ipotesi cautelativa di considerare un carico concentrato a metà del percorso. Per chiarire meglio le idee, consideriamo la Fig.4. 39:

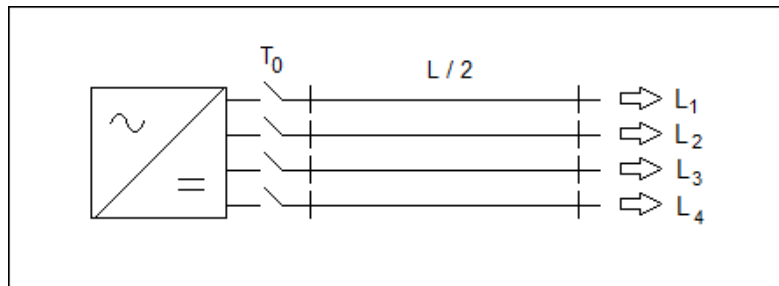


Fig.4. 39: Linee in partenza dal QDP1 nell'ipotesi di alimentazione di un carico concentrato posto a metà del percorso.

I carichi L_1 , L_2 , L_3 ed L_4 saranno tutti di uguale potenza considerando che sono composti da 5 lampade da 40 W ($P_L = 200$ W). Per cui, avremo che nella generica linea L circolerà la corrente:

$$I_L = \frac{P_L}{V_{dc}} = \frac{200}{48} = 4,2 \text{ A}$$

Anche qui si può impiegare un cavo da $2,5 \text{ mm}^2$ e valutare la caduta di tensione percentuale come:

$$\Delta V_{\%} = \frac{2 r I_T \frac{L}{2}}{V_{dc}} \cdot 100 = 1,74 \%$$

Dove la linea considerata avrà una lunghezza $L = 25$ m e la resistenza chilometrica del cavo è pari a $r = 7,98 \cdot 10^{-3} \Omega/\text{m}$. A questo punto possiamo dimensionare l'interruttore posto alla partenza di ogni linea considerando sempre i limiti imposti dal convertitore sulla massima corrente circolante già calcolata e pari a $I_M = 75$ A. Sulla base della corrente di impiego della linea considerata, si sceglie un interruttore con le seguenti caratteristiche:

- Modello: SN 201 L;
- Tipo: Magnetotermico modulare;
- $I_n = 6$ A;
- Curva: B;

La soglia magnetica sarà tarata in modo che lo sganciatore intervenga per valori di corrente compresi tra 18 e 30 A garantendo la protezione. Si fa notare che anche un interruttore con curva C (intervento tra 30 e 60 A) garantirebbe la protezione. Per i carichi luce dei servizi generici di piano, si ipotizzano cinque differenti linee luci (es. luce ascensore, uffici, ambulatori, toilette). Considerando che ciascuna linea alimenterà un carico da 80 W, ne consegue una corrente di impiego di 1,6 A e l'interruttore più adatto sarà lo SN 201 L applicato all'interno delle camere di degenza.

4.4.4 Valutazione economica

A questo punto valuteremo l'aspetto economico effettuando delle considerazioni relative ai costi ed ai risparmi riscontrati mediante l'impiego della corrente continua. Innanzitutto, partiremo considerando i costi da sostenere per la realizzazione dell'impianto in alternata e successivamente effettueremo il confronto con la soluzione in continua. Per quanto riguarda il carico luci, come visto, ogni camera di degenza avrà due linee protette da interruttori magnetotermici differenziali più uno generale installato sul quadro di piano. I corridoi avranno quattro linee con in testa altrettanti interruttori magnetotermici differenziali e lo stesso varrà per i servizi di piano in cui sono presenti cinque linee. Considerando per ogni piano un totale di 20 stanze, si può contare un numero di interruttori impiegati pari a 69. In Tab.4. 9 è riportato un riepilogo:

Interruttore	N° interruttori	Q.tà	TOTALE
Interno camere	2	20 camere	40
Generale camere	1	20 camere	20
Servizi di piano	1	5 linee	5
Luci corridoio	1	4 linee	4
Totale interruttori			69

Tab.4. 9: Riepilogo del numero di interruttori installati in un singolo piano.

Riguardo al numero delle lampade, in ogni camera saranno installate, come visto in Tab.4. 2, due apparecchi illuminanti da 44 W e 3 da 25 W. Nei corridoi ci saranno 20 lampade da 44 W

e per i servizi generici di piano, altre 10 lampade della stessa potenza. Considerando ancora venti camere di degenza per ogni piano, avremo:

- 70 lampade da 44 W;
- 60 lampade da 25 W;

Riassumiamo ora in Tab.4. 10 i costi da sostenere per la realizzazione di questa parte di impianto, rispettivamente per un singolo piano e per l'intero padiglione.

N° lampade da 44 W	Costo lampade 44 W	Costo totale
70	€ 195,00	€ 13'650
N° lampade da 25 W	Costo lampade 25 W	
60	€ 135,00	€ 8'100
N° interruttori	Costo interruttori	
69	€ 28,00	€ 1'932
Lunghezza dei cavi³⁴	Costo del cavo	
1.800 m	1 €/m	€ 1'800
Costo totale Singolo Piano		€ 25'482
Costo totale Padiglione		€ 76'446

Tab.4. 10: Costo per la realizzazione dell'impianto in alternata.

³⁴ La lunghezza totale è calcolata come somma delle lunghezze dei conduttori di fase, neutro e protezione. E' stata stimata una lunghezza delle linee di circa 600 m quindi, considerando 3 conduttori, si ottiene 1800 m.

Per concludere, possiamo stimare un costo annuo dell'energia assorbita dagli apparecchi illuminanti ipotizzando un numero di ore di funzionamento giornaliero pari a 15. Conoscendo la potenza assorbita dalle lampade e pari a $P = 4'580 \text{ W}$ (Tab. 4.3) avremo:

$$C_{AC} = P \cdot h \cdot c \cdot 365 = 4,58 \cdot 15 \cdot 0,20 \cdot 365 = 5.000 \text{ €}$$

Dove è stato considerato un costo dell'energia elettrica $c = 0,2 \text{ €/kWh}$.

A questo punto applicheremo gli stessi ragionamenti per l'impianto in corrente continua. Innanzitutto riscontreremo una diminuzione del prezzo degli apparecchi illuminanti dovuta al fatto che, come detto, non sarà presente lo stadio di conversione costituito dai raddrizzatori visti al Par. 4.2 e dal trasformatore di isolamento.

Attraverso l'interazione con alcuni costruttori di lampade a LED, si è stimato un risparmio di quasi il 20 % per questo accorgimento.

Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione riguarda il fatto che, l'aver realizzato un impianto alla tensione di sicurezza di 48 V in corrente continua, permetterà l'uso di soli interruttori magnetotermici al posto di interruttori magnetotermici differenziali impiegati nell'impianto in alternata con un notevole risparmio economico.

In più, la distribuzione in continua così come realizzata in questo impianto, presenta anche il vantaggio di essere caratterizzata dalla presenza di soli due conduttori, ottenendo un ulteriore risparmio dalla mancanza del conduttore di terra la cui lunghezza, come visto in Tab.4. 10, è pari a circa 600 m per piano.

Come contro, rispetto al caso in alternata, avremo un aggravio delle spese a causa della presenza dei convertitori AC/DC da installare a monte dell'impianto, su ogni quadro. Oltre all'esborso economico per l'acquisto, essi penalizzeranno i vantaggi ottenuti dall'omissione dello stadio di conversione per l'alimentazione delle lampade che permetteva di ottenere un risparmio di energia di circa il 10 % (Par.4.2.2). Una parte di questo vantaggio, infatti, sarà vanificato a causa delle perdite del convertitore caratterizzato da un rendimento, ovviamente, minore di uno.

A questo punto, tenendo presente che il numero degli interruttori e delle lampade sarà lo stesso anche per la distribuzione in continua, riportiamo in Tab.4. 11 il riassunto delle spese:

N° lampade da 40 W	Costo lampade 40 W	Costo totale
70	€ 159,00	€ 11'130
N° lampade da 22 W	Costo lampade 22 W	
60	€ 100,00	€ 6'000
N° interruttori	Costo interruttori	
69	€ 11,00	€ 759
Lunghezza dei cavi	Costo del cavo	
1.200 m	1 €/m	€ 1'200
Costo totale Singolo Piano		€ 19'089
Costo totale Padiglione		€ 57'267

Tab.4. 11: Costo per la realizzazione dell'impianto in continua.

Si può notare che, applicando un'alimentazione direttamente in corrente continua per i carichi luce, si otterrebbe un risparmio economico di circa il 25% sui costi di installazione.

In realtà, però, la scarsa diffusione della corrente continua nella distribuzione di bassa tensione, fa sì che sia necessario l'acquisto del convertitore che, come accennato, aggiungerà una spesa non indifferente per il sistema. Considerando i convertitori scelti al paragrafo precedente, dal costo di € 1.000 cad., avremo una spesa pari a € 2.000 per ciascun piano³⁵ e di € 6.000 per l'intero padiglione.

³⁵ Come detto al Par.4.4.3, è stato scelto di installare due convertitori per ogni piano garantendo una potenza di circa 5 kW.

Tenendo conto di ciò, le spese complessive saranno pari a:

- € 21'089 per il Primo Piano;
- € 63'267 per l'intero Padiglione;

A causa del costo del convertitore, il risparmio sui costi di installazione, passa dal 25 % al 17 %. A questo punto, possiamo stimare anche in questo caso il costo annuo dell'energia ipotizzando un numero di ore di funzionamento pari a 15 e considerando una potenza $P = 4120 \text{ W}$ (Tab.4. 5). Prima di stimare il costo dell'energia è necessario considerare che la potenza effettivamente assorbita dalla rete per alimentare le lampade, sarà affetta dal contributo del raddrizzatore. Per questo motivo è necessario considerare il rendimento del convertitore per ricavare l'effettiva energia assorbita dal singolo piano:

$$P_{ass} = \frac{P_{inst}}{\eta_{conv}} = \frac{4120}{0,95} = 4,34 \text{ kW}$$

Dove P_{inst} rappresenta la potenza installata al primo piano, η_{conv} il rendimento del convertitore AC/DC e P_{ass} la potenza assorbita dal singolo piano a causa della presenza del convertitore. Stando ai nuovi dati, il costo dell'energia sarà:

$$C_{DC} = P_{ass} \cdot h \cdot c \cdot 365 = 4,34 \cdot 15 \cdot 0,20 \cdot 365 = 4.752 \text{ €}$$

Si può notare che continua ad esserci un risparmio. Inizialmente, considerando solo l'assorbimento delle singole lampade, il risparmio energetico era stimato a circa il 10%, mentre con le problematiche introdotte relative al rendimento del convertitore, si riduce a poco più del 5%.

Il grafico di Fig.4. 40 riporta un confronto tra la distribuzione in alternata ed in continua tenendo conto dei costi di installazione e dell'energia in un anno.

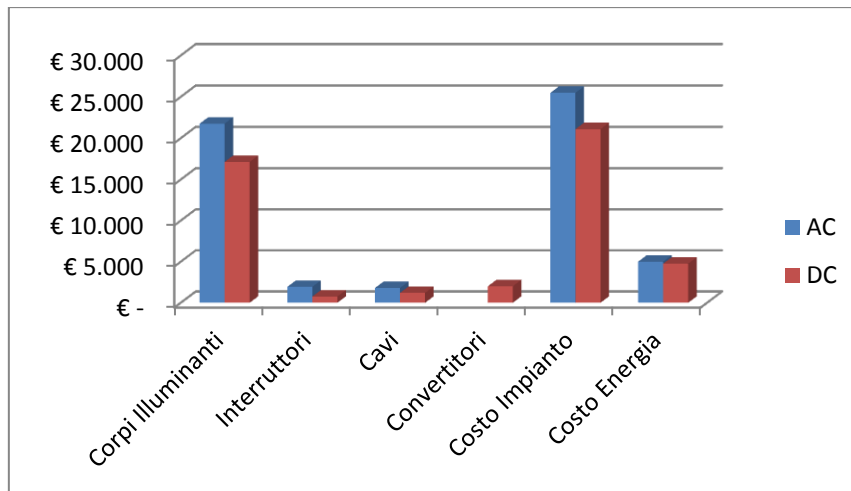


Fig.4. 40: Dettaglio dei costi da sostenere rispettivamente in corrente alternata (blu) e continua (rosso).

Si può notare chiaramente che i costi da sostenere in corrente continua sono inferiori su tutti i fronti. L'unico elemento penalizzante è il raddrizzatore che presenta un costo elevato e penalizza anche l'aspetto energetico rendendolo quasi paragonabile, dal punto di vista economico, a quello in alternata.

Rispetto al caso in alternata, la differenza maggiore in termini economici è data dal costo dei cavi che diminuisce grazie alla possibilità di impiegare solo due conduttori e da quello delle lampade, il cui costo cala grazie all'omissione dello stadio di conversione e isolamento.

Il risparmio sugli interruttori è dovuto al fatto che in alternata è necessario l'uso di dispositivi differenziali per la protezione dai contatti indiretti, mentre la tensione di esercizio di $48 V_{dc}$ ci permette l'uso di semplici interruttori magnetotermici con un notevole risparmio economico.

4.5 Conclusioni

Come si può riscontrare dai calcoli, il bilancio è positivo. Considerando l'intervallo temporale di un anno, si può stimare, rispettivamente per la soluzione in continua e per quella in alternata, una spesa comprensiva dei costi di installazione e dell'energia assorbita pari a:

$$I_{DC} + C_{DC} = 21'089 + 4'752 = 25'841 \text{ €}$$

$$I_{AC} + C_{AC} = 25'482 + 5'000 = 30'482 \text{ €}$$

Dove I_{DC} rappresenta il costo dell'installazione dell'impianto in corrente continua e I_{AC} quello dell'impianto in alternata. Si può notare che il risparmio è di circa il 15 %. Ovviamente, per gli anni successivi si avrà comunque un risparmio energetico del 5 % dovuto alla minore energia assorbita dalla rete.

Dalle analisi effettuate nei paragrafi precedenti, si è riscontrato che la soluzione che più si presta alla distribuzione in corrente continua all'interno di un edificio, è quella che prevede l'installazione di isole facenti capo ad uno o più convertitori e si è visto come sia proprio quest'ultimo, il punto critico dell'impianto a causa dei costi e del rendimento che diminuisce drasticamente i vantaggi derivanti dall'omissione dello stadio di conversione sulle lampade.

Ciononostante, installando un convertitore con adeguate caratteristiche, si possono riscontrare comunque risultati soddisfacenti. La presenza di un unico stadio di conversione è senz'altro vantaggiosa ai fini del consumo energetico e la scelta di una distribuzione in alternata fino al padiglione abbinata ad una successiva conversione in continua all'interno del piano, permette un risparmio nei costi di installazione rispetto alle altre soluzioni prospettate. Purtroppo, l'unico limite della corrente continua risulta la distribuzione e non si possono ottenere vantaggi maggiori a causa della sua scarsa diffusione.

Quanto finora affrontato, riguarda gli ambienti medici e, nella fattispecie, l'illuminazione a LED delle camere di degenza. Ovviamente, però, il discorso può essere esteso ed applicato in maniera più generale ad utenze anche di diversa tipologia.

In una visione futuristica in cui la distribuzione in bassa tensione possa essere effettuata sia in continua che in alternata senza il bisogno di introdurre uno stadio di conversione a nell'impianto dell'utente, infatti, i vantaggi sarebbero molto maggiori e di notevole importanza. Si potrebbe pensare di alimentare qualsiasi dispositivo di uso comune in corrente continua, basti pensare a TV, PC, laptop, lettori DVD ecc. ottenendo numerosi vantaggi quali ad esempio la possibilità di installare impianti a bassissima tensione raggiungendo massimi livelli di sicurezza, risparmiare sugli stadi di conversione di ogni utenza ottenendo di conseguenza una diminuzione dei prezzi delle apparecchiature, dovuta al fatto che i costruttori abbatterebbero i costi di produzione grazie all'omissione degli stadi di conversione AC/DC e degli stadi di isolamento annessi.

Ipotizzando di avere a disposizione un allaccio in corrente continua direttamente dalla rete di proprietà del Distributore, infatti, la situazione cambierebbe radicalmente. Prendendo come esempio la soluzione analizzata, il riepilogo dei costi si presenterebbe come riportato in Tab.4. 11. All'importo totale riportato in tabella, non ci sarebbe da aggiungere alcun costo del convertitore, ottenendo un risparmio sui costi d'installazione che passa dal 18% al 25%. Lo scenario complessivo diverrebbe come mostrato in Fig.4. 41:

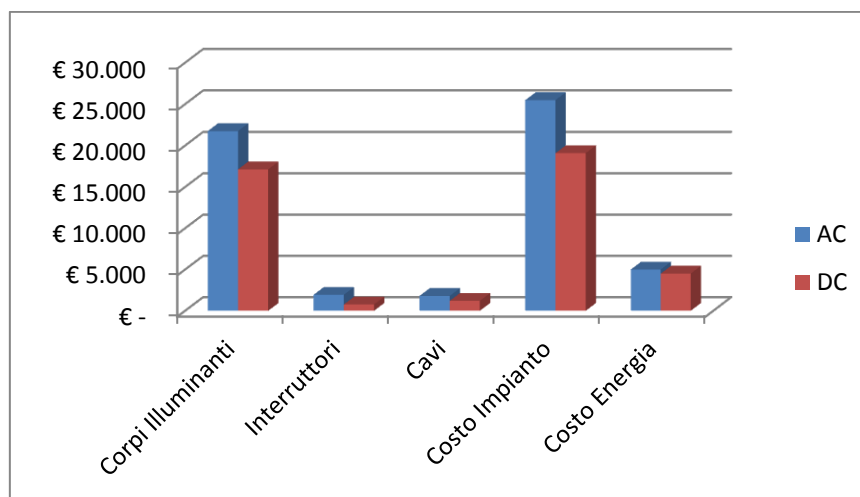


Fig.4. 41: Confronto tra soluzione in alternata ed in continua senza considerare il costo dei convertitori.

Si può notare come non compaia più l'unico punto debole della distribuzione in corrente continua, ossia il convertitore.

L'impatto positivo si ripercuoterebbe anche sul costo dell'energia in quanto, non dovendo considerare il rendimento del convertitore, si ha:

$$C_{DC} = P_{ass} \cdot h \cdot c \cdot 365 = 4,12 \cdot 15 \cdot 0,20 \cdot 365 = 4.511 \text{ €}$$

In queste condizioni, l'incremento del risparmio energetico è intorno al 5%. Effettuando ancora il confronto nell'intervallo temporale di un anno, avremmo:

$$I_{DC} + C_{DC} = 19'089 + 4'511 = 23'600 \text{ €}$$

$$I_{AC} + C_{AC} = 25'482 + 5'000 = 30'482 \text{ €}$$

Complessivamente si avrebbe un risparmio totale del 22,5 % contro il 15 % della situazione attuale. Anche negli anni successivi si avrebbe un miglioramento, in quanto il risparmio sul costo dell'energia passerebbe dal 5 al 10 %. Ovviamente, per la distribuzione in corrente continua a tensione di sicurezza, è opportuno fare attenzione alle distanze da ricoprire e alle sezioni dei cavi per evitare drastiche cadute di tensione nelle linee.

Nel caso esaminato, la distribuzione è stata eseguita alla tensione di 48 V per particolari esigenze dovute alla tensione di sicurezza che, in ambienti medici, deve essere inferiore ai 60 V. In ambienti ordinari, ad esempio in un'abitazione, tale limite è 120 V il che risolve in parte il problema legato alle distanze anche se, ovviamente, ogni caso è a sé stante e la valutazione è subordinata alla potenza del carico da alimentare ed ai livelli di tensione ammessi. Di certo, si è arrivati alla conclusione che la distribuzione in continua garantisce dei benefici soprattutto dal punto di vista energetico e della sicurezza, che si tramutano in risparmio economico tanto più consistente, quanto più aumenta l'importanza dell'impianto dal punto di vista dell'assorbimento. Ovviamente ogni caso necessita di uno studio a sé stante in quanto, al crescere della potenza richiesta dagli ambienti, potrebbe essere associato un incremento dei livelli di tensione con la perdita di alcuni vantaggi.

5 - Assorbimenti delle Apparecchiature Radiologiche

In questo capitolo sarà affrontata la problematica citata al Cap. 3 e relativa al comportamento di alcuni apparecchi elettromedicali impiegati a fini diagnostici che, durante la fase di esecuzione dell'esame, presentano degli assorbimenti impulsivi caratterizzati da una durata più o meno lunga a seconda dell'esame effettuato e del macchinario impiegato. Ciò potrebbe causare dei problemi sull'impianto che, se non opportunamente dimensionato, potrebbe essere sede di cadute di tensioni tali da non permettere il necessario valore di tensione di alimentazione ai capi del macchinario principale. I picchi di corrente assorbita potrebbero causare, oltre al problema delle cadute di tensione, anche l'intervento dei dispositivi di protezione durante le normali condizioni di funzionamento e di conseguenza l'impossibilità di effettuare l'esame. Per far fronte a questo problema, è necessario sovradimensionare la linea a monte per il contenimento delle cadute di tensione e scegliere opportunamente l'interruttore di protezione per evitare scatti intempestivi. La conseguenza è un ingente aumento dei costi di installazione. In questa parte del lavoro ci proporremo di risolvere il problema degli assorbimenti impulsivi mediante un'operazione di peak shaving attraverso un accumulo locale che sarà installato in prossimità della macchina in modo da fornire il picco di corrente necessario durante l'esame, ottenendo dei benefici sulla rete a monte che potrà essere dimensionata per una corrente di impiego minore.

Data la natura degli assorbimenti, caratterizzati da ampiezze elevate e tempi molto brevi, si potrebbe pensare all'applicazione dei supercondensatori che, essendo caratterizzati da una densità di potenza molto elevata, potrebbero avere delle caratteristiche tali da risolvere il problema. A tal proposito, nei successivi paragrafi sarà descritto il comportamento dei principali macchinari dal punto di vista degli assorbimenti in modo da capire al meglio quale sia la loro natura in funzione del tipo di macchinario considerato e della tipologia di esame da effettuare. In seguito all'analisi, si deciderà per quali delle applicazioni studiate sarà possibile applicare il supercondensatore come dispositivo di peak shaving, valutando i vantaggi ottenibili. Per la valutazione di eventuali benefici dal punto di vista economico, sarà considerato un caso reale in cui sia necessario il sovradimensionamento della linea per far fronte agli assorbimenti impulsivi, per poi confrontarlo con la soluzione che prevedrà l'impiego di dispositivi di peak shaving.

5.1 Comportamento delle Macchine

In questo paragrafo ci occuperemo dell'analisi del comportamento di alcune apparecchiature radiologiche durante la fase di esecuzione dell'esame. Come detto, non tutte le macchine presentano questo tipo di assorbimento di potenza dalla rete, ma alcune apparecchiature radiologiche prodotte da noti costruttori, non sono dotate di dispositivi di peak shaving e sono caratterizzate da assorbimenti che richiedono correnti impulsive durante il loro normale funzionamento. Nel seguito analizzeremo il comportamento di una macchina a Raggi X (RX) ed una TAC e, una volta studiata la tipologia di assorbimento attraverso rilievi effettuati sui macchinari di un istituto ospedaliero, si cercherà di individuare la tipologia di accumulo che più si presta a risolvere il problema [12].

5.1.1 Assorbimenti di una macchina RX

Questo tipo di macchina permette di effettuare diversi tipi di esami a partire dalle classiche radiografie singole, fino a quelle multiple in successione che possono arrivare anche ad essere 6 in un secondo. Va da sé che i risultati dei rilievi varieranno in base alla tipologia di esame in corso che influenzerà l'assorbimento della macchina. La Fig.5. 1 mostra il comportamento della macchina RX nel caso in cui è effettuata una singola radiografia. In questo caso si vede chiaramente il picco di corrente assorbito la cui ampiezza supera i 120 A, valore molto maggiore rispetto alla corrente nominale.

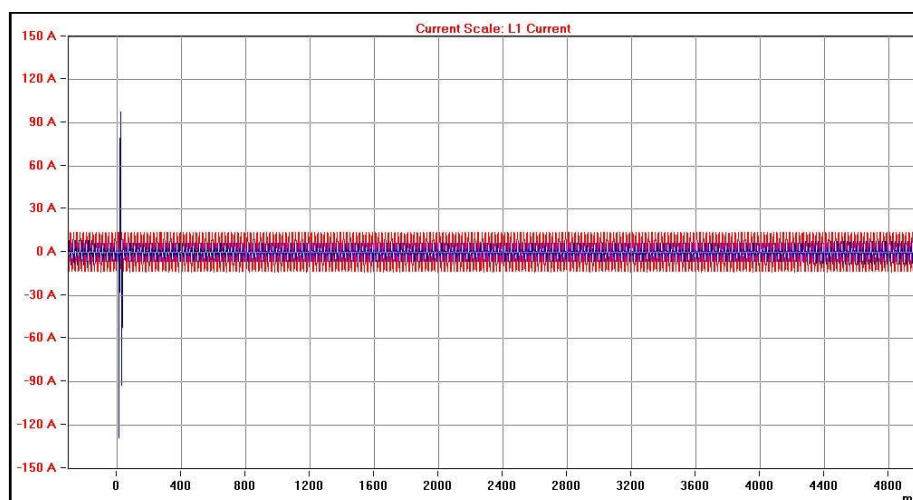


Fig.5. 1: Assorbimento della RX dalla rete nel caso di singola radiografia. Il rilievo sulle tre fasi è stato eseguito alla frequenza di campionamento di 12,5 kHz.

E' importante, dunque, tenere conto di questo aspetto e conoscere le massime correnti circolanti durante l'esecuzione dell'esame, in modo da prendere opportuni provvedimenti sull'impianto che, come vedremo, consisteranno nel sovradimensionare la linea a monte e il relativo interruttore di protezione.

Nel caso in cui si volesse prevedere l'applicazione di un dispositivo di accumulo locale, sarebbe opportuno conoscere la quantità di energia da fornire alla macchina durante questa fase, per cui, per una corretta analisi del problema ed un conseguente dimensionamento dell'accumulo, è necessario conoscere la durata dell'assorbimento impulsivo di corrente in modo da valutare l'energia assorbita in questa fase. A tal proposito, la Fig.5. 2 mostra un ingrandimento dell'istante in cui si verifica il picco in modo da poterne stimare la durata:

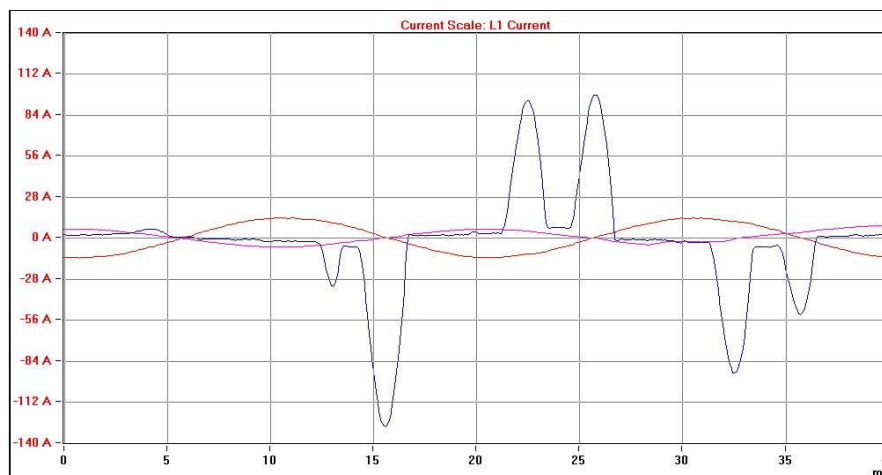


Fig.5. 2: Zoom relativo all'istante in cui si verifica l'assorbimento impulsivo.

Si può notare che i picchi interessano un periodo di tempo della durata di tre semionde della fase rappresentata in blu, per cui è possibile stimare una durata dell'assorbimento pari a 30 ms³⁶. A questo punto, conoscendo il valore della potenza assorbita, sarà possibile calcolare l'energia da accumulare e stabilire quindi le caratteristiche del sistema di accumulo.

Ovviamente, è importante precisare la dipendenza della corrente assorbita dalle condizioni in cui la macchina si trova ad operare: a seconda della zona del corpo umano interessata dall'esame, sarà richiesta una diversa intensità di radiazioni tanto maggiore quanto più è spessa la zona da analizzare.

³⁶ Alla frequenza di 50 Hz, il semiperiodo ha durata pari a 10 ms.

Gli assorbimenti di corrente varieranno, dunque, a seconda di questi aspetti e possono talvolta raggiungere valori ancora più elevati di quelli già visti. Un esempio è riportato in Fig.5. 3 dove si può notare che il picco di corrente supera di gran lunga i 120 A, raggiungendo valori di corrente prossimi a 160 A.

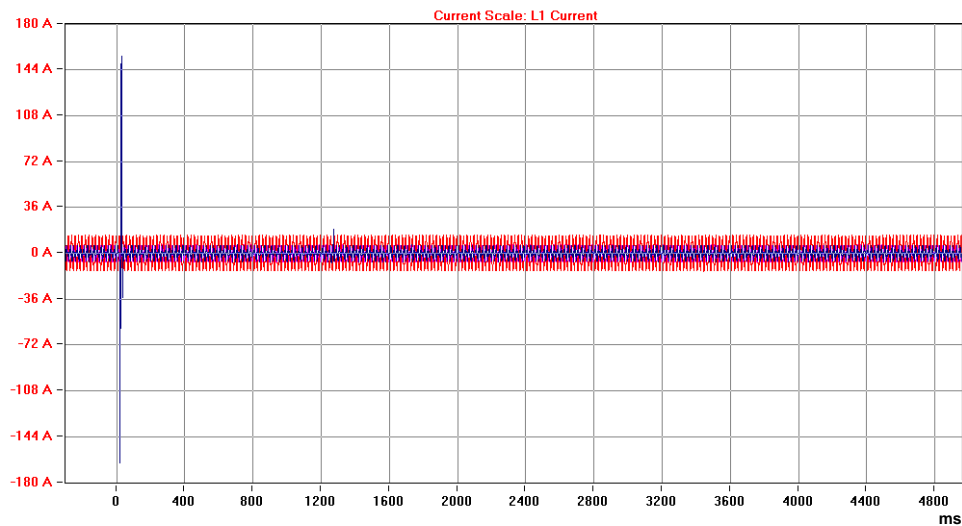


Fig.5. 3: Altro esempio di assorbimento impulsivo nel caso di unico esame.

Come accennato, la macchina RX può effettuare anche più di un esame in maniera consecutiva, ne consegue che gli assorbimenti visti fino ad ora si ripeteranno nel tempo a seconda del numero di acquisizioni fatte dalla macchina. Un esempio è riportato in Fig.5. 4, la quale mostra i risultati dei rilievi effettuati durante l'esecuzione in successione degli esami:

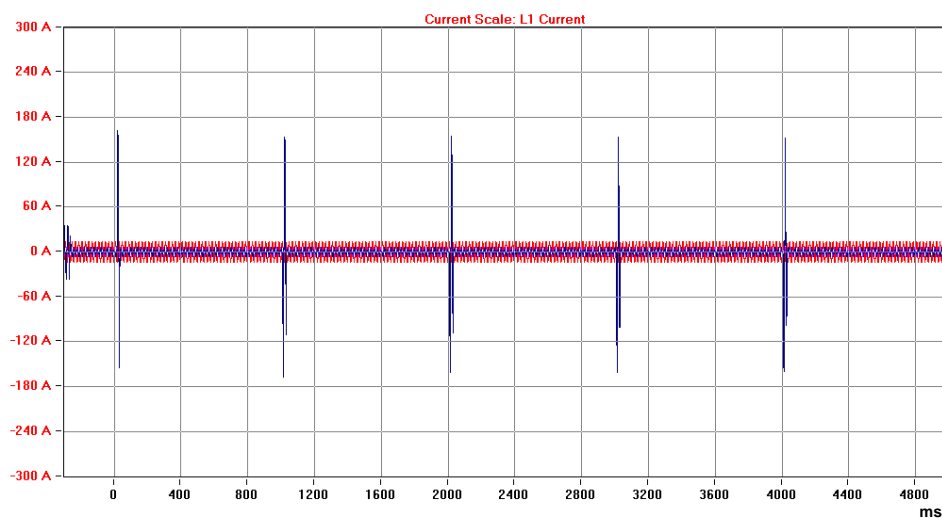


Fig.5. 4: Assorbimenti nel caso di esami effettuati in successione.

Anche in questo caso, l'ampiezza degli assorbimenti può variare come si può vedere in Fig.5. 5, in cui i valori di picco si discostano da quelli riscontrati in Fig.5. 4:

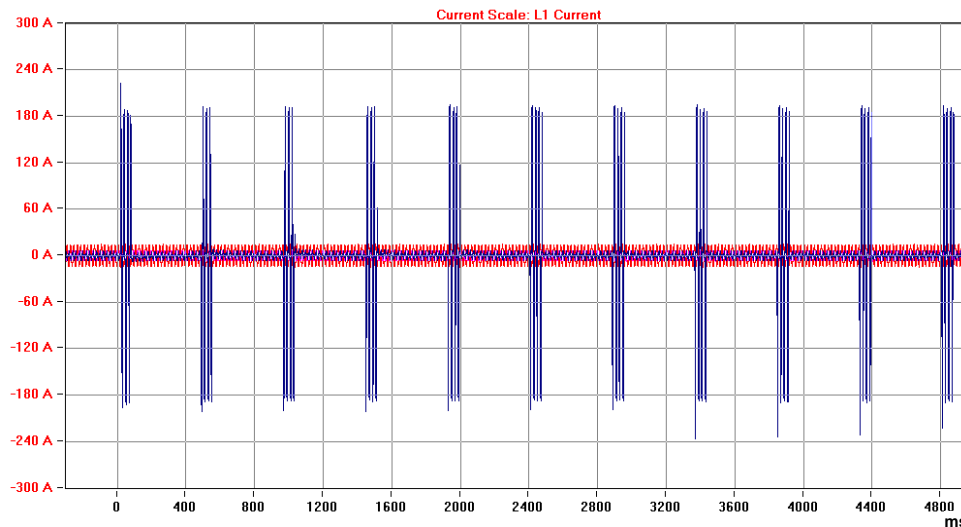


Fig.5. 5: Altro esempio di assorbimenti in caso di esami in successione.

Dall'analisi di tali rilievi si può considerare che, a prescindere dal numero di esami eseguiti e dal valore di corrente assorbito, questi assorbimenti presentano tutti ampiezze molto elevate per istanti di tempo brevissimi, dell'ordine delle decine di millisecondi. Va da sé che il supercondensatore, date le sue caratteristiche, si presta perfettamente per un'eventuale operazione di peak shaving applicata a questa macchina.

5.1.2 Assorbimenti di una TAC

La TAC (Tomografia Assiale Computerizzata), a differenza della macchina a raggi X, è impiegata per l'esecuzione di esami da effettuare su quelle parti di tessuto biologico poste dietro ad elementi che assorbono molte radiazioni, come ad esempio le ossa. Il circuito di potenza delle due macchine è molto simile e la principale differenza sta nel fatto che, nel caso della TAC, l'immagine è composta mediante un programma computerizzato che fornisce una risoluzione maggiore delle varie acquisizioni, effettuate in maniera continuativa e non singolarmente come visto per la RX. Ne deriva che la potenza assorbita dalla macchina è molto alta e che gli assorbimenti saranno più continui nel tempo rispetto alla macchina RX. In Fig.5. 6 è riportato l'andamento della corrente assorbita dalla TAC per un intervallo

temporale di circa 4 secondi che rappresenta la durata dell'esame. Si può notare come il comportamento dei due macchinari trattati sia molto diverso dal punto di vista degli assorbimenti, ma comunque entrambi introducono problematiche relative al dimensionamento della linea a monte ed ai relativi dispositivi di protezione.

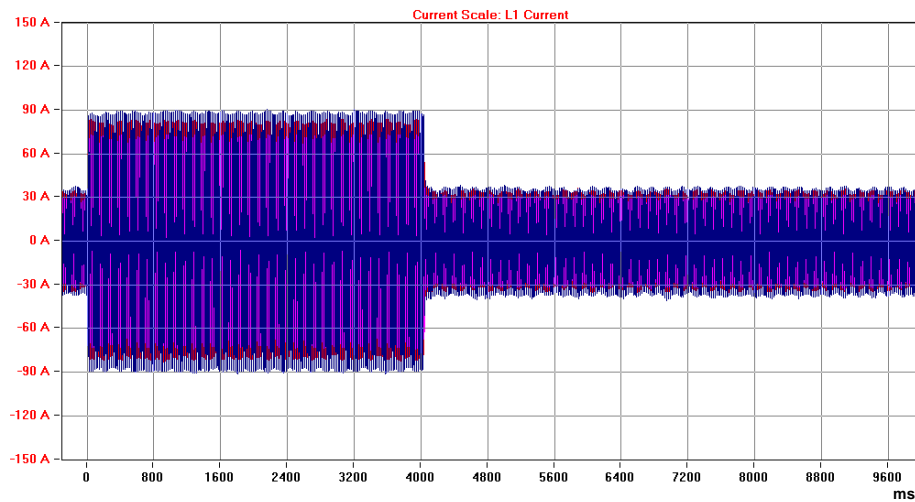


Fig.5. 6: Assorbimento tipico della TAC.

Come nel caso della macchina RX, anche qui, gli assorbimenti possono variare sia per quanto riguarda l'ampiezza che la durata.

La Fig.5. 7 mostra, infatti, un rilievo effettuato sullo stesso macchinario, ma caratterizzato da correnti di impiego e durata dell'esame molto maggiori:

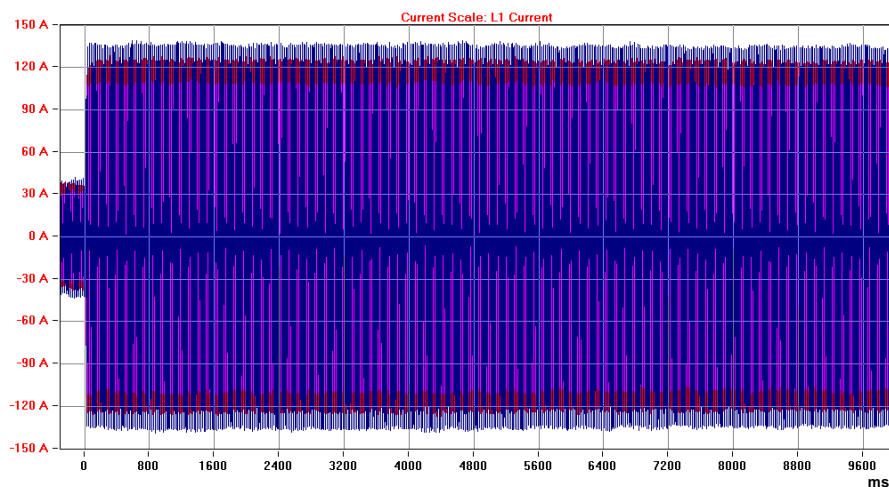


Fig.5. 7: Secondo esempio di assorbimento di una TAC.

Un ultimo caso può essere quello riportato in Fig.5. 8 che mostra gli assorbimenti della macchina durante un funzionamento caratterizzato da assorbimenti continuativi in diversi istanti di tempo:

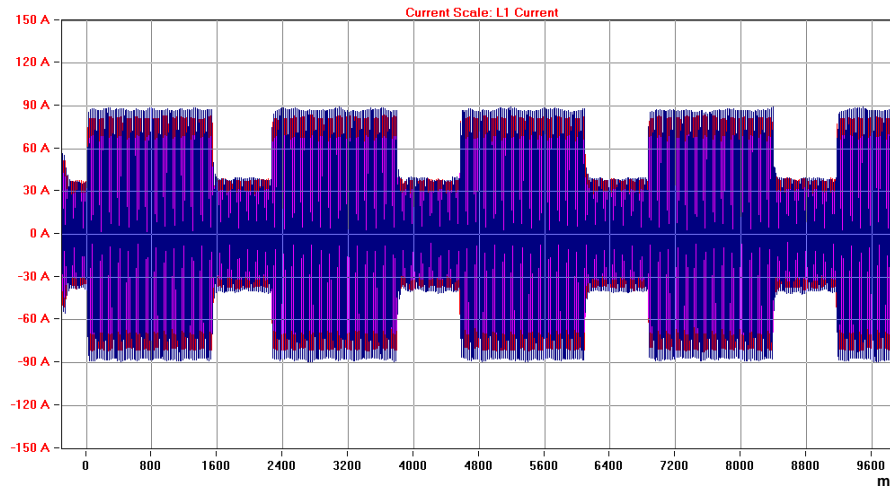


Fig.5. 8: Comportamento della TAC caratterizzata da assorbimenti continui in diversi istanti temporali.

Si può notare che, negli intervalli di tempo in cui non vengono eseguiti gli esami, il macchinario assorbe comunque una corrente costante che serve per il suo funzionamento in stand-by.

5.1.3 Analisi dei risultati

Dopo aver valutato il comportamento di entrambe le apparecchiature in esame, si è riscontrato come possa dare beneficio l'installazione di accumuli che forniscano energia localmente alle macchine per far fronte ai picchi durante la fase di assorbimento.

Nel caso della macchina a raggi X, il fenomeno è molto più accentuato in quanto i picchi sono molto superiori alla corrente nominale (si può arrivare a circa $20 I_n$) e la durata è di qualche decina di millisecondi (Par.5.1.3). Nel caso della TAC, gli assorbimenti hanno ampiezza minore se rapportati alla corrente di assorbimento della macchina durante la fase di stand-by e le durate risultano di molto maggiori in ragione del fatto che la TAC può effettuare esami della durata di tempo che varia da pochi secondi alle decine di minuti. Vista la lunga durata degli esami eseguibili attraverso la TAC, è da scartare l'ipotesi di applicazione dei supercondensatori per fornire l'energia relativa ai picchi di corrente. Le notevoli potenze in

gioco e l'elevata durata temporale, fanno sì che gli assorbimenti di questa macchina non siano degli impulsi ma presentino un alto contenuto energetico. Il supercondensatore, come vedremo, non può essere applicato in queste condizioni, in quanto presenta una bassa densità di energia rispetto ad altri sistemi di accumulo elettrochimico.

Ne consegue che l'uso del supercondensatore può essere applicato alla sola macchina RX, che è quella caratterizzata da assorbimenti che meglio si sposano con le peculiarità di tali dispositivi. Nei prossimi capitoli affronteremo lo studio di questi particolari elementi in modo da poter valutare la fattibilità della loro installazione all'interno dell'impianto in prossimità delle macchine radiologiche. In questo modo, fornendo energia localmente alla macchina, si otterranno dei benefici per quanto riguarda il dimensionamento della linea a monte e dell'interruttore che non dovranno essere sovradimensionati a causa delle sovracorrenti assorbite durante l'esame.

5.2 I Supercondensatori

In questo paragrafo ci si propone di dare una descrizione delle principali caratteristiche costruttive dei supercondensatori, fornendo una descrizione del loro principio di funzionamento. Per spiegare al meglio questi elementi, partiamo dal semplice condensatore in modo da descriverne gli aspetti di maggiore importanza, per poi affrontare quelli del supercondensatore in maniera chiara e lineare. I condensatori sono dei componenti elettrici che immagazzinano energia accumulando carica elettrica ed il loro funzionamento si basa sulla presenza di cariche di segno opposto alloggiata su due lamine, dette armature del condensatore, poste ad una certa distanza, all'interno della quale è presente un dielettrico. Fig.5. 9.

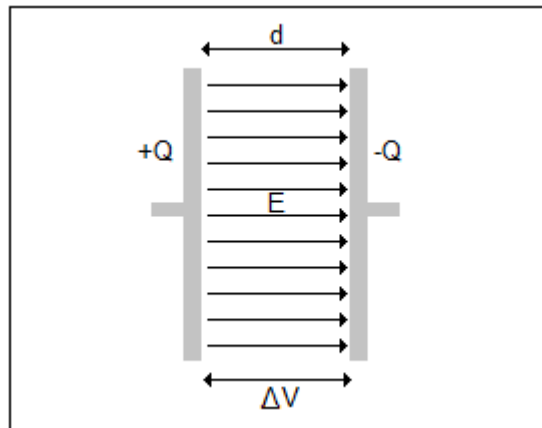


Fig.5. 9: Modello di un condensatore a facce piane parallele.

La presenza di cariche opposte determina un campo elettrostatico nel dielettrico e di conseguenza una differenza di potenziale tra le armature.

La capacità C del condensatore è espressa in Farad [F] ed il suo valore è calcolabile attraverso la formula:

$$C = \frac{Q}{\Delta V}$$

Dove:

- Q [C] rappresenta la carica accumulata tra le armature del condensatore;

- ΔV [V] è la differenza di potenziale tra le due armature.

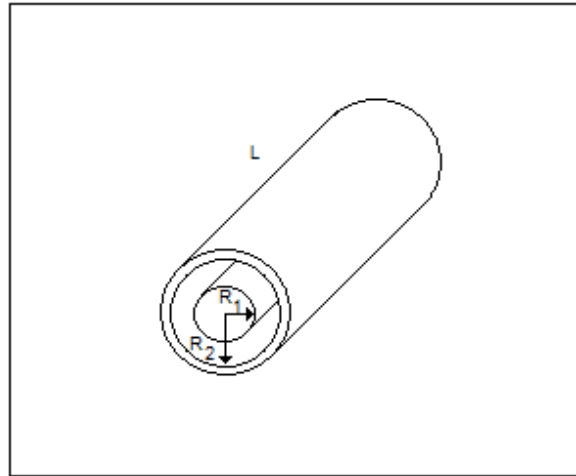


Fig.5. 10: Modello del condensatore cilindrico.

A seconda che il condensatore sia a facce piane parallele (Fig.5. 9) o ad armature cilindriche (Fig.5. 10), la capacità assume le seguenti espressioni:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \qquad C = 2\pi \epsilon_0 \epsilon_r \frac{L}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$$

Con:

- ϵ_0 : permeabilità dielettrica del vuoto;
- ϵ_r : permeabilità del dielettrico tra le due armature;
- A: superficie delle armature;
- d: distanza tra le armature in un condensatore piano;
- L: lunghezza del condensatore cilindrico;
- R_1 e R_2 : raggi delle armature interne ed esterne nei condensatori cilindrici.

Come detto, il condensatore è un elemento capace di accumulare energia e, dato un certo valore di tensione e di capacità, l'energia accumulata vale:

$$W = \frac{1}{2} Q V = \frac{1}{2} C V^2$$

Dalle espressioni della capacità, si può notare come essa dipenda dalla geometria del componente e dai dielettrici usati; di conseguenza l'energia, che dipende dalla capacità oltre che dalla tensione, varierà anch'essa al variare di questi fattori.

5.2.1 Il supercondensatore a doppio strato elettrico

I supercondensatori sono dei dispositivi elettrochimici capaci di accumulare energia elettrica presentando alte densità di potenza ed un numero elevato di cicli di carica e scarica senza presentare decadimenti delle prestazioni [23]. I supercondensatori più utilizzati, grazie alle loro prestazioni notevoli, sono quelli a doppio strato ed il loro principio di funzionamento si basa sul modello di Helmholtz, successivamente rielaborato da altri fisici che cercarono di studiare in maniera più approfondita il comportamento di questi dispositivi confrontandolo con i risultati sperimentali ottenuti in seguito a prove di laboratorio. Il modello di Helmholtz, elaborato nel 1879, schematizza quanto accade nei supercondensatori attraverso l'uso di due capacità in serie come mostrato in Fig.5. 11:

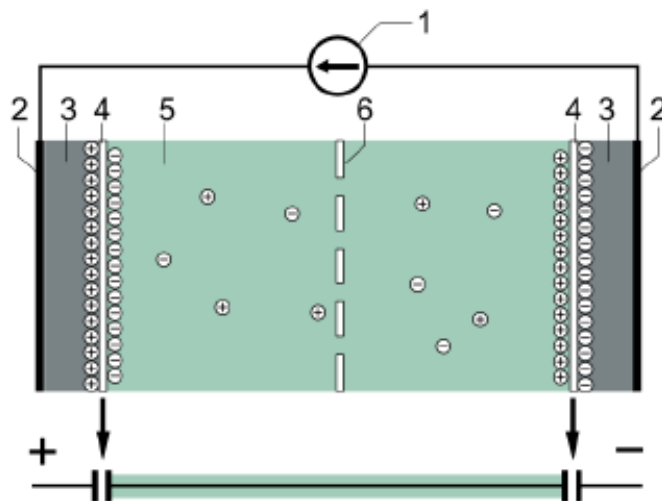


Fig.5. 11: Modello di Helmholtz.1) generatore, 2) morsetto di connessione, 3) elettrodo, 4) superficie di reazione, 5) elettrolita, 6) setto separatore.

In generale, la teoria del doppio strato consiste in una struttura composta da due elettrodi (Fig.5. 11 (2)) immersi in un liquido elettrolitico (5).

Helmholtz descrisse la teoria del doppio strato attraverso due condensatori in serie (Fig.5. 10 in basso). Ciascuna armatura esterna dei condensatori, corrispondeva ad un elettrodo mentre quella interna, allo strato di ioni addensati in prossimità della superficie di separazione (Fig.5. 11 (4)). In realtà, studi successivi riscontrarono che lo strato di ioni depositati sulla superficie (4), non poteva essere considerato concentrato come in figura ma risultava diffuso all'interno dell'elettrolita e di conseguenza non poteva essere descritto dall'armatura del condensatore. Così si passò, attraverso ulteriori studi, al modello di Grahame che descrive il doppio strato attraverso ipotesi che portano a risultati più simili a quelli riscontrati dai rilievi sperimentali.

Questo modello si basa sulle ipotesi che gli ioni siano disposti su tre differenti strati come illustrato in Fig.5. 12:

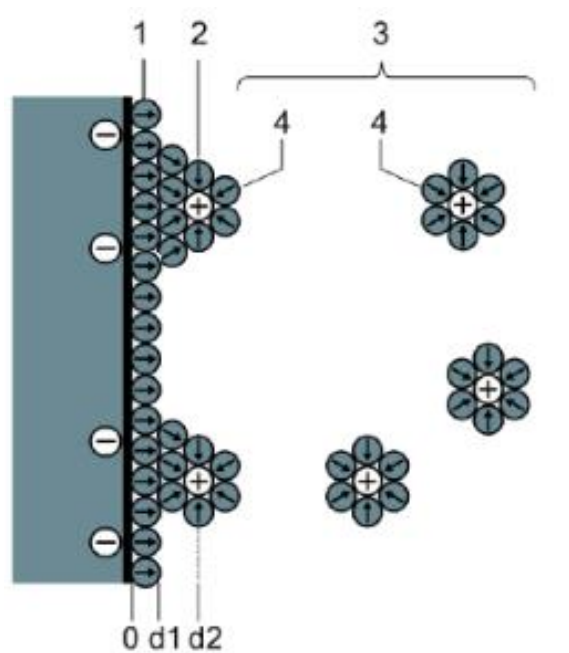


Fig.5. 12: Modello completo per lo studio del supercondensatore.

A partire dalla superficie dell'elettrodo, si può notare la presenza di un primo strato di Helmholtz interno (1) in cui gli ioni sono addensati sull'elettrodo e saranno caratterizzati da iterazioni a corto raggio (d_1); a distanze maggiori ci sarà un altro strato di Helmholtz esterno (2) con iterazioni a lungo raggio (d_2) in cui gli ioni sono più diffusi nello spazio ed, infine, un terzo strato dove si ha ancora una maggiore diffusione degli ioni (3). La figura mostra gli ioni

diffusi all'interno dell'elettrolita (4) all'interno del terzo strato. In generale, i due elettrodi di cui è composto il supercondensatore sono solitamente in alluminio e rivestiti di carbonio attivo in modo da garantire un'ampia superficie di scambio con l'elettrolita tra essi interposto.

In più, immerso nell'elettrolita, è presente un separatore che permette il transito degli ioni ed evita l'insorgere di correnti tra i due elettrodi che determinerebbe una perdita di carica energetica accumulata. Lo schema generale di un supercondensatore è riportato in Fig.5. 13:

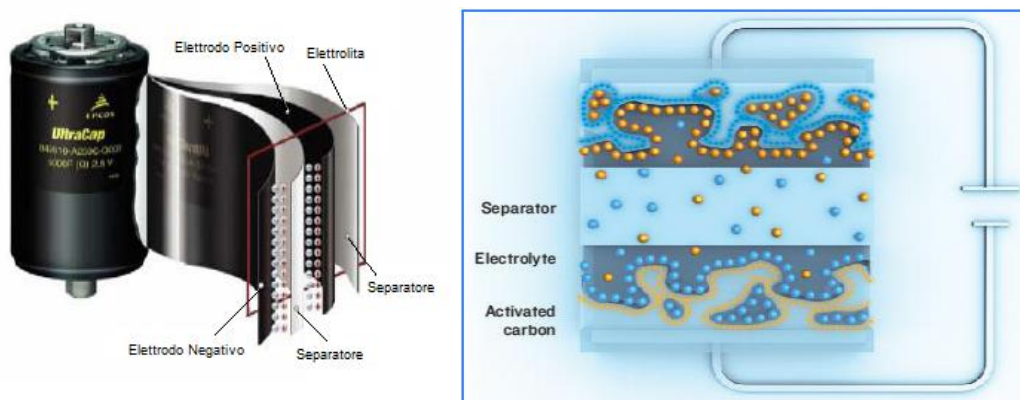


Fig.5. 13: Schema generale di un supercondensatore. A sinistra un supercondensatore reale e a destra il modello che ne descrive la struttura e mostra la presenza degli ioni e le interazioni con gli elettrodi.

5.2.2 Principio di funzionamento

Dopo aver illustrato il modello che meglio descrive il comportamento del supercondensatore e dei fenomeni all'interno, passiamo ad occuparci del funzionamento di questo elemento tenendo conto che, applicando una differenza di potenziale ai terminali si innesca il processo di separazione della carica che causa la formazione di un doppio strato di carica all'interfaccia tra l'elettrodo immerso nell'elettrolita e l'elettrolita stesso.

Come si può notare dalle relazioni esposte precedentemente per il calcolo della capacità, l'energia accumulabile è proporzionale alla superficie delle armature e inversamente proporzionale alla distanza alla quale gli elettrodi sono interposti. Ne consegue che, impiegando per gli elettrodi immersi nella soluzione elettrolitica dei materiali porosi come il carbone, si riesce ad aumentare la superficie di contatto tra l'elettrodo e la soluzione elettrolitica stessa fino a raggiungere valori elevatissimi. In questo modo si ottiene un

aumento notevole della capacità che risulta nettamente maggiore rispetto a quella dei normali condensatori, arrivando ad ottenere dei valori che raggiungono migliaia di Farad.

A causa delle modeste distanze tra le cariche di segno opposto, si genereranno all'interno del supercondensatore dei campi elettrici molto intensi: per questo motivo è necessario limitare la tensione tra gli elettrodi con una conseguente diminuzione dell'energia immagazzinabile. L'accumulo della carica avviene mediante un processo molto rapido di carica e scarica, ciò fa sì che durante la scarica, le cariche elettriche possano spostarsi molto velocemente fornendo ai supercondensatori il pregio di avere tempi di risposta molto più rapidi rispetto a quelli dei tradizionali accumulatori elettrochimici. Un ulteriore vantaggio di questa tecnologia è dato dal fatto che, non essendoci processi chimici di ossidoriduzione, la prospettiva di vita degli elettrodi, e quindi del componente, è molto alta rispetto agli altri tipi di accumulatori.

I supercondensatori, inoltre, sono caratterizzati da una densità di energia molto bassa ma da una potenza specifica molto elevata, ciò fa sì che, tenendo anche conto della rapidità con cui sono possibili la carica e la scarica, e del numero elevato di cicli a cui possono far fronte, questi componenti siano adatti ad applicazioni che, come quella studiata al paragrafo precedente e relativa agli assorbimenti delle macchine radiologiche, richiedono l'erogazione di potenze caratterizzate da picchi molto elevati per tempi brevi.

5.2.3 Confronti con gli accumuli elettrochimici

Rispetto alla tecnologia di accumulo di tipo elettrochimico, quella elettrostatica presenta alcune differenze, alcune vantaggiose e altre meno che determinano quindi le possibilità di impiego in base alle applicazioni considerate.

Per quanto riguarda la velocità di risposta, come accennato, avremo che gli accumuli elettrostatici, non essendo caratterizzati da reazioni chimiche, sono molto più rapidi a trasferire energia, fornendo un notevole vantaggio nel caso di applicazioni che necessitano di erogazioni caratterizzate da costanti di tempo molto basse.

Per quanto riguarda l'energia e la potenza specifica, avremo che gli accumuli elettrostatici sono caratterizzati da densità di potenze molto elevate a fronte di densità di energia molto basse e viceversa per gli accumuli elettrochimici. Di conseguenza, l'energia immagazzinabile in sistemi elettrostatici non è così elevata come quella dei sistemi elettrochimici per i motivi spiegati al paragrafo precedente e relativi alla limitazione della tensione a causa della

presenza di campi elettrici molto elevati. Un ulteriore vantaggio dei dispositivi elettrostatici, però, è rappresentato dal numero di cicli carica-scarica: non essendo caratterizzati da reazioni chimiche, questi ultimi sono interessati da una minore usura e quindi a sopportano molto meglio i cicli di lavoro, con un conseguente aumento della loro vita utile.

Anche in termini di efficienza, gli accumuli di tipo elettrostatico risultano migliori in quanto sviluppano meno perdite durante il loro funzionamento e per quanto riguarda le dimensioni e il peso, sono generalmente meno ingombranti. Dalla valutazione delle differenze tecniche, ne consegue anche una limitazione nelle applicazioni per quanto riguarda entrambe le tecnologie: i sistemi di accumulo di tipo elettrochimico risultano migliori nel caso in cui si voglia immagazzinare una grande quantità di energia da utilizzare per tempi lunghi, mentre i sistemi di accumulo di tipo elettrostatico sono più indicati per utilizzi brevi, frequenti e con potenze anche elevate.

Avremo quindi che, nel caso di operazioni di peak shaving come quelle da effettuare sulle apparecchiature elettromedicali analizzate al paragrafo precedente, gli elementi che più si prestano sono i dispositivi elettrostatici, mentre per gli UPS o comunque per i sistemi di storage in generale, è più indicato l'uso degli accumuli elettrochimici. A questo punto, dovendo effettuare l'analisi di un sistema in cui è impiegata una batteria di supercondensatori, studieremo nel seguito i criteri di dimensionamento degli stessi per far fronte ai picchi di potenza necessari al corretto funzionamento delle apparecchiature impiegate.

5.2.4 Criteri di dimensionamento

Per quanto riguarda i criteri di dimensionamento dei supercondensatori, è necessario partire dalla conoscenza del valore di potenza che si vuole ricoprire e la sua durata. La scelta del valore della capacità tale da fornire la corretta quantità di energia in seguito ad una richiesta da parte di un carico, è subordinata al valore di tensione massimo e minimo che si vuole raggiungere rispettivamente durante la fase di carica e di scarica dell'accumulo. Si cercherà di esporre i criteri di dimensionamento attraverso un caso semplice come quello di Fig.5. 14. La figura mostra la situazione relativa a un carico che richiede una certa potenza P_p per una durata t_p .

L'energia necessaria al soddisfacimento del picco è l'area sottesa dalla curva che nel caso in esame sarà:

$$W_p = P_p t_p$$

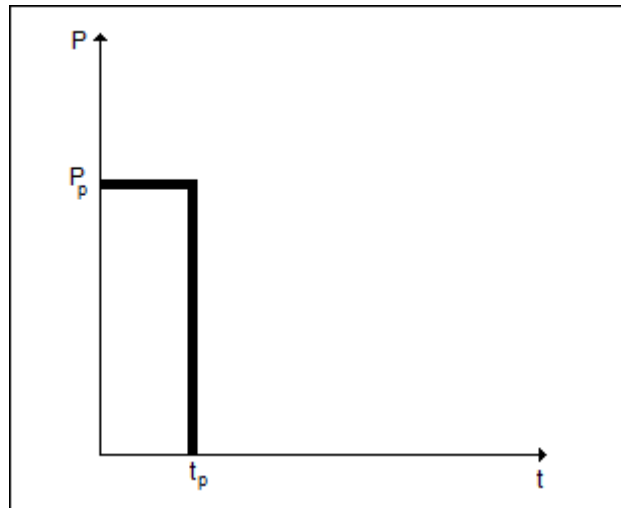


Fig.5. 14: Esempio di assorbimento impulsivo di potenza caratterizzato da un valore di picco P_p per un tempo t_p .

A questo punto, è necessario definire i livelli di tensione tra i quali l'accumulo lavorerà. Ipotizzando di operare tra una tensione iniziale V_i e una finale V_f , avremo che l'energia accumulata sarà data da:

$$W = \frac{1}{2} C (V_i^2 - V_f^2)$$

Dove le tensioni sono espresse in Volt, la capacità in Farad e l'energia in Joule. Risolvendo l'equazione rispetto all'incognita C, avremo il valore di capacità necessario a fornire l'energia al carico:

$$C = \frac{2 W}{(V_i^2 - V_f^2)}$$

Per tenere conto dei problemi precedentemente esposti e relativi alla limitazione della tensione della singola cella, è necessario prevedere più elementi da collegare in serie per

arrivare ad ottenere la tensione stabilita, per cui, considerando che i supercondensatori presentano una tensione di circa 2,5 V per cella, si ricava il numero di celle in serie n_s come:

$$n_s = \frac{V_i}{2,5}$$

A questo punto, dalla nota relazione della serie dei condensatori, ricaviamo il valore C_c di capacità della singola cella:

$$C_c = C n_s$$

Stabiliti il numero di celle in serie e la capacità del supercondensatore della singola cella, è concluso il dimensionamento della batteria di accumulatori in accordo con i valori di capacità messi a disposizione dai costruttori [24].

5.3 Impiego dei Supercondensatori negli Impianti

In questo paragrafo sarà valutata la fattibilità dell'impiego dei supercondensatori all'interno di un impianto in modo da fornire localmente l'impulso di energia all'apparecchio medicale e riuscire ad ottenere un vantaggio dal punto di vista del dimensionamento della rete a monte.

E' stato visto come alcuni dei principali produttori di apparecchiature elettromedicali di grossa potenza (TAC, risonanza magnetica, ecc.) non prevedano l'installazione di accumuli locali di energia all'interno dei dispositivi che presentano dei comportamenti che potrebbero creare dei problemi all'impianto. Dall'analisi degli assorbimenti affrontata al Par. 5.1, è risultato che l'elemento di accumulo che meglio si presta alla fornitura locale di energia è il supercondensatore che, grazie alle alte densità di potenza di cui dispone, è capace di fornire impulsi energetici caratterizzati da picchi di valore elevato. Lo scopo di questo paragrafo è effettuare un confronto tra una situazione che prevede l'installazione di un apparecchio elettromedicale che non sia equipaggiato da dispositivi di peak shaving e la medesima situazione, ma in cui sia installata una batteria di supercondensatori nell'impianto.

Vedremo che ci saranno dei benefici economici per il dimensionamento dell'impianto ma dovrà essere considerato anche il costo dei supercondensatori e del convertitore in modo da ottenere una panoramica generale della situazione e valutarne la fattibilità.

5.3.1 Macchina RX in impianto senza dispositivi di Peak Shaving

Si prenderà ora in considerazione un apparecchio radiologico della potenza $P_R = 23$ kW funzionante a $\cos\varphi = 0,9$ che assorbirà una corrente data da:

$$I_R = \frac{P_R}{\sqrt{3} V \cos\varphi} = \frac{23000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,9} = 36,9 A$$

Per far fronte ai picchi al momento dell'esecuzione dell'analisi sul paziente, come visto, si potrebbero verificare delle correnti impulsive di valore molto elevato a causa delle quali sarà

necessario effettuare un sovradimensionamento della linea a monte e dei relativi interruttori di protezione. Per effettuare il dimensionamento della linea a monte, ipotizziamo di porci in una situazione come quella mostrata in Fig.5. 15:

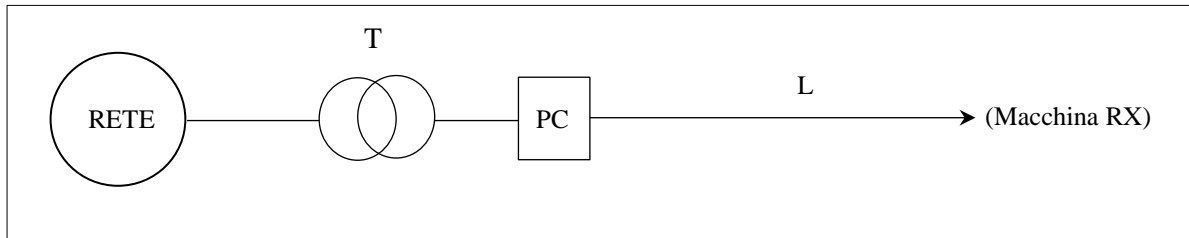


Fig.5. 15: Schema unifilare che mostra la linea L di alimentazione della macchina radiologica. Tale linea collega il Power Center (PC) alla macchina.

La linea da dimensionare avrà $L = 50 \text{ m} = 0,05 \text{ km}$, e collegherà il Power Center alla macchina radiologica. Stabilito il layout della parte di impianto interessata, si dovrà dimensionare la linea di collegamento in modo da garantire una caduta di tensione massima del 4% a partire dal quadro generale dell'impianto (PC) fino ai capi del macchinario.

La caduta di tensione dovrà, ovviamente, essere valutata nel caso di funzionamento della macchina e quindi in presenza del valore di corrente impulsivo. Sulla base di quanto visto al Par. 5.1, possiamo calcolare una corrente impulsiva pari a 15 volte la corrente di picco nominale:

$$I_p = 15 \cdot \sqrt{2} \cdot I_R = 782 \text{ A}$$

E' importante precisare che, per il calcolo della potenza di picco, ci si è posti nella condizione cautelativa di considerare sinusoidale l'andamento di Fig.5. 2 nonostante sia un andamento distorto. In questo modo, I_p rappresenta il picco di questa sinusoide e la potenza di dimensionamento sarà maggiorata rispetto a quella realmente assorbita dal carico. Come mostrato in Fig.5. 2, la macchina assorbe la corrente impulsiva mediante una sola delle tre fasi, di ciò andrà tenuto nel calcolo delle cadute di tensione. A questo punto, possiamo occuparci del dimensionamento della linea dedicata che dal Power Center alimenta questa utenza e valutare la sezione dei cavi da impiegare per garantire il corretto funzionamento del macchinario. Nel seguito ci riferiremo alla corrente di picco in modo da porci in una condizione cautelativa e sovradimensionare la linea per far fronte ad eventuali condizioni peggiori che si potrebbero verificare.

Imponiamo quindi una caduta di tensione percentuale inferiore del 4 % ricavando il valore di impedenza che dovrà presentare la linea di collegamento:

$$\Delta V\% = \frac{z_L L \frac{I_p}{\sqrt{2}}}{V_0} \cdot 100 \leq 4\%$$

La caduta di tensione è stata calcolata sulla fase interessata dall'assorbimento della corrente di picco, per cui V_0 rappresenta la tensione di fase, pari a 230 V. Rispettando su questa fase il limite del 4%, avremo la certezza di scegliere una sezione dei cavi tale da garantire la corretta alimentazione alla macchina. Risolvendo la precedente equazione rispetto a z_L avremo:

$$z_L = \frac{V_0 \Delta V\%}{L \frac{I_p}{\sqrt{2}} 100} = \frac{230 \cdot 4}{0,05 \cdot 551 \cdot 100} \leq 0,335 \text{ } \Omega/\text{km}$$

La sezione dei cavi che ci permette di rispettare tale relazione, è $S = 120 \text{ mm}^2$ caratterizzata da una $r = 0,164 \text{ } \Omega/\text{km}$ e una $x = 0,0939 \text{ } \Omega/\text{km}$. A questo punto avremo:

$$Z_L = \sqrt{(L \cdot r_L)^2 + (L \cdot x_L)^2} = 9,4 \text{ m}\Omega$$

La caduta di tensione percentuale sarà:

$$\Delta V\% = \frac{Z_L I_p}{V_0} \cdot 100 = 2,25 \%$$

Considerando che la portata di una linea da 120 mm^2 è pari a $I_z = 288 \text{ A}$ ³⁷, ne risulta che il cavo è ampiamente sovradimensionato se si considera che la corrente nominale

³⁷ Si fa notare che la portata è $I_z = 360 \text{ A}$ a cui è stato applicato, al solito, un coefficiente pari a 0,8 per tenere conto delle condizioni di posa.

dell'apparecchio radiologico è pari a circa 37 A. Si riassumono nel seguito le caratteristiche della linea di collegamento:

- Tipo: FG7OM1 Unipolare;
- Isolante: EPR;
- Formazione: 3 x (1x120) + 1 x 70 + 1 x 70;
- Lunghezza: 50 m
- Posa: Interrata in tubi o cunicoli;
- $I_z = 288$ A;

Oltre al sovradimensionamento del cavo, la presenza di macchinari che presentano assorbimenti di tipo impulsivo, comporteranno la scelta di un interruttore di taglia tale da non intervenire in presenza di queste correnti.

Sarà necessario tarare il dispositivo in modo da avere una soglia magnetica maggiore della corrente impulsiva. In questo caso, l'interruttore scelto dovrà avere le seguenti caratteristiche:

- Modello: C 120 N;
- Tipo: magnetotermico differenziale;
- $I_n = 80$ A;
- Poli = 3;
- $I_{sd} = 10 \cdot I_n = 800$ A;

Ovviamente, qualora nell'impianto fosse prevista la presenza di altri quadri a monte, sarebbe necessario garantire la selettività con tutti gli interruttori e tarare questi ultimi secondo i criteri appena visti. E' importante osservare quanto applicato per non incorrere in scatti intempestivi in condizioni normali di funzionamento, con conseguenti disservizi nell'impianto.

5.3.2 Macchina RX in impianto con l'impiego di dispositivi di Peak Shaving

Valuteremo ora l'ipotesi di applicare dei dispositivi di peak shaving per compensare il problema degli assorbimenti impulsivi e fornire l'energia alla macchina attraverso un sistema di accumulo opportunamente dimensionato e costituito da supercondensatori. Il primo passo è dunque dimensionare il sistema di accumulo in modo da poter scegliere la sezione dei cavi della linea a monte e l'interruttore posto a protezione della stessa, mediante la sola corrente nominale della macchina.

Come visto al Par. 5.2.4, sarà necessario conoscere la potenza installata al fine di calcolare l'energia necessaria a far fronte al picco di potenza impulsivo che i supercondensatori dovranno assicurare. La potenza da fornire alla macchina sarà quella necessaria a far fronte al picco e sarà valutata considerando la potenza totale assorbita da ciascuna fase. La formula generale per il calcolo della potenza di un sistema trifase è:

$$P = \frac{1}{2} (E_{1p} I_{1p} \cos\varphi_1 + E_{2p} I_{2p} \cos\varphi_2 + E_{3p} I_{3p} \cos\varphi_3)$$

Nel nostro caso, essendo il sistema simmetrico avremo $E_{1p} = E_{2p} = E_{3p} = \sqrt{2} V_0$ con V_0 tensione di fase pari a 230 V e $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_2 = \cos\varphi_3 = 0,9$. Come visto nei rilievi analizzati al Par.5.2, una fase presenterà un assorbimento squilibrato e le altre due assorbiranno una corrente pressoché pari alla nominale. La potenza di riferimento per il dimensionamento dell'accumulo sarà:

$$P_p = \frac{1}{2} \sqrt{2} V_0 (I_p + 2\sqrt{2} I_R) \cos\varphi =$$

$$= \frac{1}{2} \sqrt{2} \cdot 230 \cdot (782 + 2\sqrt{2} \cdot 36,9) \cdot 0,9 = 129,7 \text{ kW}$$

Sulla base di questa potenza, considerando una durata $t_p = 30$ ms, avremo che, in accordo con quanto visto al Par. 5.2.4, l'energia di dimensionamento della batteria di condensatori sarà:

$$W'_c = P_p t_p = 3,9 \text{ kJ} = 1,08 \text{ Wh}$$

E' importante precisare che, per il calcolo della potenza di picco, ci si è posti nella condizione cautelativa di considerare sinusoidale l'andamento di Fig.5. 2 nonostante sia un andamento distorto. In questo modo, I_p rappresenta il picco di questa sinusoide e la potenza di dimensionamento è maggiorata rispetto a quella realmente assorbita dal carico. E' stato visto che la macchina può effettuare più esami in maniera consecutiva, per cui è necessario sovradimensionare l'accumulo. In questo caso si è deciso di prevedere la possibilità di far fronte ad almeno 10 picchi, per cui l'energia sarà:

$$W_c = 10 W'_c = 39 \text{ kJ} = 10,8 \text{ Wh}$$

A questo punto, è necessario legare il valore di energia a quello della capacità totale del sistema di supercondensatori da installare:

$$C = \frac{2 W}{(V_i^2 - V_f^2)} = \frac{2 \cdot 39 \cdot 10^3}{(400^2 - 200^2)} = 0,65 \text{ F}$$

Dove si è deciso di lavorare tra una tensione massima pari a 400 V ed una minima pari a 200V in modo da poter erogare il 75% dell'energia immagazzinata. Adottando una batteria costituita da più elementi collegati in serie, il numero di supercondensatori da impiegare sarà ottenuto considerando la tensione di impiego del sistema pari a 400 V e quella massima della singola cella pari a 2,5 V:

$$n_s = \frac{400}{2,5} = 160$$

Il valore di capacità del singolo supercondensatore sarà:

$$C_s = C n_s = 104 F$$

A questo punto, fornendo localmente l'energia alla macchina, la situazione cambierà radicalmente. Con riferimento alla Fig.5. 15, potremo dimensionare la linea L sulla base della corrente nominale assorbita dalla macchina e pari a 36,9 A. La sezione del cavo di collegamento passerà da 120 mm² a 6 mm² con una $I_z = 61 \cdot 0,8 = 48,8$ A, dove $k = 0,8$ rappresenta il coefficiente che tiene conto delle condizioni di posa del cavo, in questo caso interrata. Le caratteristiche principali sono di seguito elencate:

- Tipo: FG7OM1 Tripolare;
- Isolante: EPR;
- Formazione: 3 x (1x6) + 1 x 6 + 1 x 6;
- Lunghezza: 50 m
- Posa: Interrata in tubi o cunicoli;
- $I_z = 48,8$ A;

Considerando che la linea presenta una lunghezza di 50 m e che la resistenza e la reattanza chilometrica sono rispettivamente $r = 3,39 \Omega/\text{km}$ e $x = 0,0955 \Omega/\text{km}$, avremo una caduta di tensione percentuale pari a:

$$\Delta V\% = \frac{\sqrt{3} Z_L I_n}{V} \cdot 100 = 2,71 \%$$

Dove

$$Z_L = \sqrt{(L \cdot r)^2 + (L \cdot x)^2} = 169,5 m\Omega$$

Ci occupiamo ora della scelta dell'interruttore. Considerando la corrente di impiego della macchina e dovendo rispettare la nota relazione:

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

Si sceglierà un interruttore avente corrente nominale $I_n = 40 \text{ A}$ con le seguenti caratteristiche:

- Modello: C 40 a;
- Tipo: magnetotermico differenziale;
- $I_n = 40 \text{ A}$;
- Poli = 3;
- $I_{sd} = 5 \cdot I_n = 200 \text{ A}$;

Si può notare come si possa conseguire un notevole risparmio economico sulla scelta della linea e degli interruttori da impiegare grazie all'installazione di supercondensatori che forniscono localmente l'energia necessaria a sostenere l'impulso in fase di esecuzione dell'esame. Questo vantaggio economico è in parte vanificato dal costo d'acquisto dei supercondensatori stessi e del convertitore: bisognerà tenere conto di tutti questi aspetti per effettuare una valutazione economica accurata.

5.3.3 Valutazione economica

In questa parte ci occuperemo di confrontare le due soluzioni valutandone la fattibilità dal punto di vista economico. Considereremo dapprima il costo da sostenere nel caso di una linea che alimenta l'apparecchio radiologico installato senza alcun dispositivo di peak shaving, e in seguito, ipotizzando di installare un sistema di accumulo, stimeremo il costo dell'impianto in modo da valutare la convenienza della soluzione proposta.

Nel primo caso, considerando la situazione studiata al Par.5.3.1, sarà necessario sostenere i costi riportati in Tab.5.1:

Descrizione	Q.tà	Prezzo	Prezzo Totale
Cavo 120 mm ² (Fase)	150 ³⁸ m	24,99 €/m	€ 3'748,50
Cavo 70 mm ² (Neutro)	100 m	16,28 €/m	€ 1'628,00
Interruttore C 120 N	1	193 €/pz.	€ 193,00
Costo totale della linea			€ 5'569,50

Tab.5.1: Tabella riepilogativa dei costi da sostenere nel caso di impianto senza dispositivo di peak shaving installato.

Nel caso in cui fosse prevista la presenza dei dispositivi di peak shaving, invece, la situazione diventerebbe quella prospettata al Par.5.3.2. Stando ai nuovi dati, si riportano in Tab.5. 2 i costi da sostenere in questo caso:

Descrizione	Q.tà	Prezzo	Prezzo Totale
Cavo 6 mm ²	50 ³⁹ m	10,72 €/m	€ 536,00
Interruttore C 40 a	1	193 €/pz.	€ 97,50
Supercondensatori	10,8 Wh	150 €/Wh	€ 1620,00
Convertitore	1	10'000 €	€ 10,000,00
Costo totale della linea			€ 12'253,50

Tab.5. 2: Tabella riepilogativa dei costi da sostenere nel caso di impianto con dispositivo di peak shaving installato.

³⁸ Considerando la lunghezza della linea pari a 50 m, essendo la linea trifilare, avremo una lunghezza di 150 m per i conduttori di fase di sezione 120 mm² e di 100 m per i conduttori di neutro e protezione, di sezione 70 mm².

³⁹ In questo caso, come visto al Par. 5.3.2, tutti i cavi avranno la medesima sezione di 6 mm², per cui può essere considerato un cavo pentapolare di lunghezza 50 m.

Si può notare come i costi di installazione aumentino notevolmente in questa soluzione. La causa di ciò è il convertitore. Esso, infatti, dovrà essere dimensionato per far fronte alla massima potenza assorbita dalla macchina che, come visto, è pari a circa 130 kW. In più, come mostrato in Fig.5. 16, questo convertitore dovrà essere bidirezionale in quanto, in fase di ricarica della batteria di supercondensatori, funzionerà da raddrizzatore ed in fase di erogazione di energia alla macchina, assumerà un funzionamento da inverter.

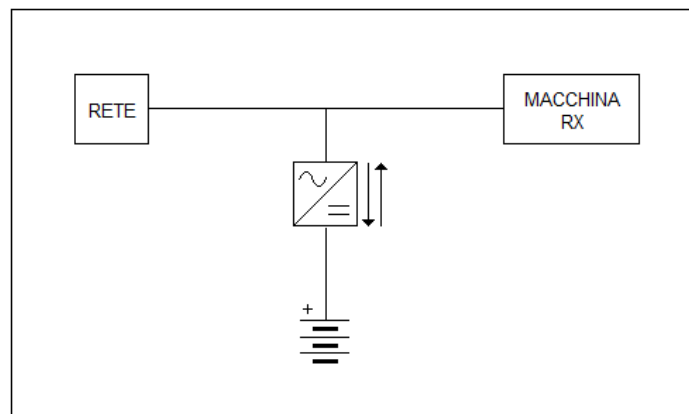


Fig.5. 16: Schema circuitale relativo al collegamento dei supercondensatori alla macchina radiologica. Il convertitore in figura è bidirezionale e potrà, quindi, funzionare sia da raddrizzatore in fase di ricarica dell'accumulo che da inverter nel caso di erogazione di potenza alla macchina.

Ne consegue, innanzitutto, un costo dovuto alla grossa taglia per la quale deve essere dimensionato, aggravato dal fatto che, per garantire il funzionamento sia da inverter che da raddrizzatore, il costo dei componenti aumenterà maggiormente.

5.4 Conclusioni

Si è visto come, nelle condizioni considerate in questo lavoro, applicando i supercondensatori per effettuare operazioni di peak shaving, non si riesca ad ottenere un vantaggio economico. Sarebbe interessante trovare una situazione limite, oltre la quale ci sia una convenienza economica nell'installazione di una batteria di supercondensatori. Questa soluzione sarebbe possibile solo per linee molto lunghe, per le quali il sovradimensionamento dei cavi per far fronte al contenimento delle cadute di tensione in linea, diverrebbe ancora più costoso dell'acquisto del convertitore bidirezionale, punto critico di questa applicazione. Ci proponiamo quindi, di trovare la lunghezza limite della linea, oltre la quale convenga installare il dispositivo di peak shaving nonostante il costo del convertitore. Valuteremo, quindi, quattro diverse situazioni caratterizzate da una lunghezza della linea crescente considerando l'aumento dei costi dovuto ai cavi di sezione sempre maggiore da impiegare. Ovviamente, entrambe le soluzioni risconteranno un aumento dei costi, e analizzeremo il loro andamento per valutare se esiste una lunghezza limite oltre la quale il costo della soluzione che prevede il sovradimensionamento cavi sia maggiore di quella che prevede l'installazione dei supercondensatori. Riportiamo in Fig.5. 17 quanto riscontrato in 4 diverse soluzioni considerate, mantenendo come punto comune per la scelta della sezione dei cavi, il rispetto della caduta di tensione limite del 4 %:

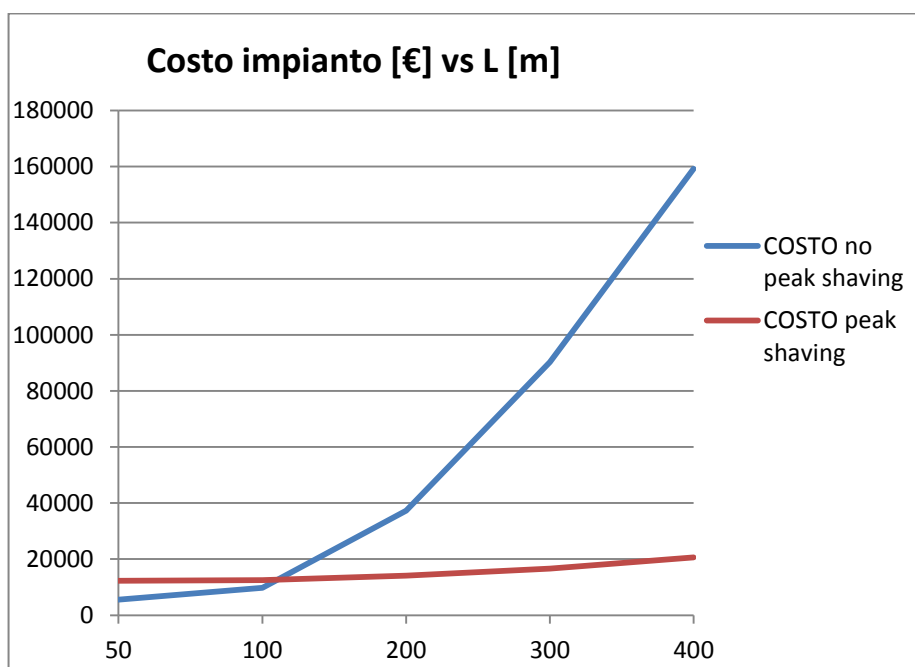


Fig.5. 17: Andamento dei costi di installazione per un impianto senza dispositivi di peak shaving installati (blu) contro la soluzione che prevede l'installazione di una batteria di supercondensatori (rosso).

Il punto di intersezione tra i grafici, rappresenta la lunghezza limite caratterizzata da un costo identico tra le due soluzioni. Per lunghezze della linea a monte maggiori di circa 100m, quindi, è conveniente l'installazione dei supercondensatori per fornire in maniera locale l'energia relativa agli assorbimenti impulsivi che la macchina presenta in fase di esecuzione dell'esame. Nonostante l'elevato costo del convertitore, quindi, si riesce comunque ad avere un risparmio grazie al fatto che, all'aumentare della lunghezza, la soluzione 1 (blu) necessita di sezioni dei cavi molto elevate e in alcuni casi, per il contenimento delle cadute di tensione, è necessaria l'installazione di cavi collegati in parallelo. Questa configurazione aumenta estremamente i costi fino ad arrivare, per lunghezze molto elevate, a costi che aumentano in maniera esponenziale.

I supercondensatori, quindi, date le loro caratteristiche, si prestano perfettamente al soddisfacimento di questo tipo di esigenze di peak shaving, ma, comunque, la loro installazione non è necessariamente conveniente dal punto di vista economico. Essa è infatti subordinata a valutazioni relative alla potenza del macchinario che implica il costo del convertitore da impiegare e alla lunghezza della linea che ci permette di confrontare i costi di installazione da sostenere nelle due possibili soluzioni.

Conclusioni

Dalle analisi effettuate in questo lavoro, si sono riscontrati dei vantaggi derivanti dall'uso di alcuni accorgimenti negli impianti, primo fra tutti la distribuzione in corrente continua.

Si è riscontrato come la convenienza e la fattibilità di una linea di alimentazione di questo genere sia legata non solo alla possibilità da parte del carico di essere alimentato in continua, ma anche alla topologia dell'impianto e alla sua estensione. Dalle soluzioni analizzate si è giunti alla conclusione che in un'opera costituita da più blocchi e caratterizzata da notevoli distanze da ricoprire, risulterebbe sconveniente installare delle linee esterne in corrente continua da abbinare a quelle in alternata già esistenti e necessarie all'alimentazione di carichi funzionanti solo in corrente alternata. Nonostante la distribuzione in continua permetta di trasportare una maggiore potenza grazie all'assenza della componente reattiva, questo vantaggio non può essere sfruttato a causa della necessaria presenza di una linea in alternata. Ne consegue che, qualora si abbia la necessità di ricoprire lunghe distanze e non sia possibile omettere la linea in alternata, è conveniente mantenere la classica distribuzione sinusoidale per fornire energia ai quadri generali dei padiglioni, per poi effettuare delle conversioni AC/DC localizzate in ogni reparto di interesse. In questo modo si realizzerebbero delle vere e proprie isole in corrente continua con la possibilità di sfruttare i conseguenti vantaggi di tale alimentazione dal punto di vista economico, della sicurezza e del risparmio energetico. Dall'analisi economica si è riscontrato un grande vantaggio dovuto all'adozione di questa soluzione, il che è molto importante in una società che bada sempre di più alla problematica del risparmio e dell'efficienza energetica.

Per quanto riguarda l'analisi effettuata sulle apparecchiature di diagnostiche e sull'eventualità dell'impiego dei supercondensatori per eseguire operazioni di peak shaving, la soluzione riscontrata non permette di stabilire univocamente il vantaggio economico. Il problema, infatti, è più complesso in quanto dipendente da diversi fattori: lunghezza delle linee di collegamento e potenza assorbita dall'apparecchiatura. Nel caso analizzato è stato riscontrato un vantaggio in presenza di linee di collegamento di lunghezza maggiore di 100 metri, ma tale lunghezza potrebbe diminuire all'aumentare della potenza di impiego della macchina e soprattutto della potenza assorbita durante l'esecuzione dell'esame che è quella che determina

il dimensionamento della batteria di supercondensatori e del convertitore da installare. Si è mostrato, infatti, come proprio quest'ultimo sia l'elemento critico di questa soluzione. Oltre alle problematiche che potrebbero nascere dall'implementazione del software di gestione della macchina, il vero elemento svantaggioso è l'elevato costo derivante dalle elevate potenze di picco cui la macchina deve far fronte. Il convertitore, infatti, deve essere dimensionato per l'intera potenza assorbita in fase di esecuzione dell'esame (centinaia di kW) il che comporta un esborso economico non indifferente. Questi aspetti fanno sì che ogni caso debba essere studiato indipendentemente, per valutare, in base ai costi del convertitore, alle distanze da ricoprire e alle massime potenze assorbite, la fattibilità e la convenienza dell'installazione di un provvedimento di questo genere direttamente sull'impianto.

Bibliografia

- [1] V. Carrescia, *Le guide blu - Locali medici*, Edizioni TNE.
- [2] ABB, «Corsi MED - Impianti elettrici nei locali ad uso medico» in *Corso MED*, Castel Maggiore (BO), 2014.
- [3] Elektro2000, «Elektro,» 2014. [Online]. Available: www.elektro.it.
- [4] ABB, «QT2 - Cabine MT/BT: teoria ed esempi di calcolo di cortocircuito,» *Quaderni Tecnici ABB*, 2014.
- [5] Catalogo Schneider Electric, *Prodotti per la configurazione di cabine MT/BT*, 2014.
- [6] Catalogo Schneider Electric, *Trasformatori in resina*, 2013.
- [7] M. Gandini, «Taratura dei dispositivi di protezione generale e di interfaccia secondo le disposizioni del distributore,» 2012.
- [8] Enel S.p.A., *DK 5600*.
- [9] Z. Martini, «Analisi dei carichi elettrici,» 2010. [Online]. Available: www.electroyou.it.
- [10] D. Scialdone, «protezione dei cavi dalle sovracorrenti,» *Editoriale Delfino*, p. 5.
- [11] ABB, «QT11 - Guida alla realizzazione di un quadro elettrico secondo le norme CEI,» *Quaderni tecnici ABB*, 2014.
- [12] G. Ubezio M. Brenna R. Faeanda A. Scarpa E. Tironi, «UPS adoption for supplying electrical X - Ray machines,» p. 7.
- [13] V. Carrescia, *Le Guide Blu - I Gruppi Elettrogeni*, TNE Edizione.
- [14] G. Saveri, «Gruppi generatori statici di energia BT (UPS) Pt. 1» vol. I, n. III,
- [15] G. Saveri, «Gruppi generatori statici di energia BT (UPS) Pt. 2» vol. II, n. III.
- [16] G. Saveri, «Gruppi generatori statici di energia BT (UPS) Pt. 3» vol. III, n. III.
- [17] R. Faranda E. Tironi C. Bossi F. Paletta A. Cadore M. Brenna, «Architettura e requisiti di una rete utente in CC: tipologia di impianti reali e analisi completa del case-study di un ospedale. - Parte 2» 2005.
- [18] ABB, «QT5 - Interruttori ABB per applicazioni in corrente continua,» *Quaderni tecnici ABB*, 2014.

- [19] S. Piras, «Dimensionamenti in corrente continua,» *Editoriale Delfino*, p. 8.
- [20] Catalogo Schneider Electric, “*Interruttori BT in corrente continua da 16 a 4000 A.*”
- [21] S. Garilli, Tesi di Laurea Specialistica: Alimentazione in corrente continua di un impianto di illuminazione pubblica con lampade a LED, Milano, Relatore: E. Tironi, 2014.
- [22] Catalogo Switch on Led, *lampade a LED*, 2014
- [23] G. Mazzoleni, *Tesi di Laurea Specialistica: Studio di fattibilità di un sistema a supercondensatori per l'alimentazione di veicoli ibridi serie*, Milano, Relatore: E. Tironi, 2009.
- [24] M. Technologies, «Gateway to a New Thinking in Energy Management - Ultracapacitors,» San Diego, 2005.

Ringraziamenti

Arrivato alla fine del lavoro, credo sia doveroso ringraziare alcune persone che mi sono state vicine nella vita universitaria e in quella privata.

Vorrei cominciare ringraziando il Prof. Tironi per cui nutro una profonda stima data la sua grande professionalità, disponibilità e ampia conoscenza della materia. E' stato un piacere lavorare ricevendo il suo supporto sempre prezioso.

Ringrazio l'Ing. Pagani, per tutte le spiegazioni e gli aiuti forniti durante questi mesi nonostante i suoi numerosi impegni. Lo ringrazio per l'esperienza che mi ha permesso di fare all'interno del suo studio che è stato allo stesso tempo formativa e divertente. A tal proposito, ringrazio Danilo, il Geom. Belloni, Luca, l'Arch. Colucci, le Sig. Tiziana e Laura per avermi fatto sentire sempre a mio agio ed avermi supportato durante la mia permanenza allo studio.

Un grazie va anche a Erica, Rosa, Vittoria e Angelina, persone speciali che conosco da anni e che mi hanno sempre incoraggiato fin dall'inizio dei miei studi.

Vorrei ringraziare Andrea C., Pasqualino, Margherita, Gordon, amici conosciuti all'università e con cui ho passato molti bei momenti che porterò con me sempre.

Grazie anche a Mario, Giorgio, Roberto e Andrea G., che hanno sempre creduto in me e non hanno mai smesso di sostenermi in ogni passo, anche quando le cose si facevano difficili.

Ringrazio Francesco che oltre ad essere un coinquilino esemplare, è stato per me come un fratello maggiore in questi anni.

Un grazie a Cìò, il mio fratello acquisito, Rosario, l'amico di una vita, Domenico, Salvatore, Antonio, Francesco e Daniele per essermi sempre stati vicino. Un ringraziamento particolare va anche a Rossella, Francesca e Annalisa ormai parte integrante della nostra compagnia.

Tutto ciò che ho fatto, però, lo devo a mio padre e mia madre che non smetterò mai di ringraziare per il loro supporto sempre presente e la loro capacità di darmi sempre i consigli giusti al momento giusto. Un immenso grazie anche a Miriam che mi sopporta sempre, ai miei familiari e ai miei nonni che hanno una grande stima di me.

Infine ringrazio Marta, che non ha mai smesso di starmi accanto e che è stata sempre con me accompagnandomi passo dopo passo lungo questo percorso. Devo ammettere che mi ha insegnato molto e credo che sia tra le persone migliori che conosca.

Grazie a tutti, senza di voi non sarebbe stata la stessa cosa.

Emanuele