

**POLITECNICO DI MILANO**  
**Facoltà di Ingegneria dei Processi Industriali**  
**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica**  
**Dipartimento di Elettrotecnica**



**EVOLUZIONE DEGLI IMPIANTI ELETTRICI NAVALI PER  
LE NAVI DA DIPORTO**

Relatori: Prof. Enrico Tironi

Prof. Enrico Ragaini

Tesi di Laurea Specialistica di:  
Angelo D'Avico  
Matr. 749186

Anno Accademico 2010-2011

*Dedicata a Laura e alla mia famiglia*

# INDICE

<b>1. Evoluzione degli impianti elettrici navali</b> .....	<b>6</b>
1.1. Classificazione .....	6
1.2. l'evoluzione degli impianti navali .....	9
1.2.1. propulsione diesel .....	12
1.2.2. propulsione elettrica .....	14
1.3. sistemi di distribuzione elettrica.....	16
<b>2. Studio del Megayacht All electric e possibile evoluzione dell'architettura elettrica</b> .....	<b>19</b>
2.1. generazione elettrica .....	23
2.1.1. sistemi di accumulo.....	25
2.1.2. generazione elettrica d'emergenza .....	27
2.1.2.1. esempio di impianti d'emergenza .....	32
2.1.3. confronto diesel batterie.....	34
2.1.3.1. considerazioni pratiche .....	39
2.2. sistema di distribuzione .....	40
2.2.1. Confronto in corrente alternata trifase fra distribuzione in cavo e sistema sbarre .....	41
2.2.1.1. Calcolo delle sezioni, dei pesi e degli ingombri .....	43
2.2.1.2. Parametri elettrici e valutazione dell'effetto Joule .....	44
2.2.2. Confronto tra distribuzione in corrente continua e corrente alternata trifase con le sbarre .....	45
2.2.2.1. Calcolo della caduta di tensione .....	46
2.2.2.2. Esempio di calcolo.....	47
2.2.2.3 Incidenza dell'effetto pelle.....	49
2.3. Propulsione elettrica .....	51
2.3.1. Confronto fra propulsione DC e AC.....	52
2.3.2. Convertitori utilizzati per la propulsione principale del Megayacht ACS 800-07LC .....	56
2.3.2.1. Rappresentazione del controllo DTC .....	57
2.3.2.2. Principio di funzionamento.....	58
<b>3. Calcoli di corto circuito</b> .....	<b>61</b>
3.1. Analisi di corto circuito per la rete di distribuzione in AC.....	61
3.1.1. IEC 61363-1 .....	62
3.1.1.1. Contributo al corto circuito delle macchine sincrone .....	63
3.1.1.2. Contributo al corto circuito dei motori .....	66
3.1.1.3. Influenza dei 'large motors' al corto circuito .....	67
3.1.1.4. Influenza dei 'small motors' al corto circuito.....	67
3.1.1.5. Calcolo del generatore equivalente .....	68

3.1.2. calcoli di corto con Excel.....	70
3.1.2.1. caratteristiche dei generatori.....	70
3.1.2.2. contributo al corto del generatore da 1042 kVA .....	72
3.1.2.3 contributo al corto del generatore da 581 kVA .....	74
3.1.2.4. corrente di corto al QEP .....	75
3.1.2.5. calcolo del generatore equivalente.....	76
3.1.2.6. corrente di corto del generatore equivalente.....	78
3.1.2.7. generatore equivalente a valle del trasformatore .....	79
3.1.2.8 corrente di corto a valle del trasformatore.....	81
3.1.3. Calcoli di corto circuito con DOC .....	83
3.1.3.1. caratteristiche del trasformatore .....	84
3.1.3.2. Caratteristiche generatori .....	85
3.1.3.3. normative navali di riferimento del DOC .....	86
3.1.3.4. valori della corrente di corto trifase.....	87
3.1.3.5. Scelta degli interruttori da installare nel QEP .....	89
3.2. Analisi di corto circuito per la rete di distribuzione in DC.....	90
3.2.1. Analisi del convertitore AC/DC .....	90
3.2.2. Analisi del convertitore DC/AC .....	91
3.2.3. Analisi del convertitore DC/DC .....	92
3.2.4. Considerazioni sul funzionamento degli interruttori in alternata a valle di un inverter .....	93
<b>4. Confronto fra la soluzione AC e DC per il Megayacht .....</b>	<b>95</b>
4.1. Confronto del sistema di distribuzione ( blindo-cavi) .....	98
4.2. Confronto dei drives per la propulsione principale .....	102
4.3. Confronto dei drives per l'alimentazione del bow-thruster .....	103
4.4. Sistemi di trasformazione .....	104
4.5. Confronto fra la soluzione AC e DC .....	105
<b>5. Conclusioni .....</b>	<b>106</b>
<b>APPENDICE A interruttori Emax .....</b>	<b>107</b>
A.1. caratteristiche costruttive Emax.....	107
A.2. Relè elettronici.....	108
A.3. Influenza della temperatura .....	112
A.4. Scelta del relè elettronico .....	114
A.5. Caratteristiche Emax seri X1 .....	118
A.6. Scelta del relè per la serie X1.....	120

<b>APPENDICE B <i>Apparecchi elettrici</i> .....</b>	<b>124</b>
B.1. Apparecchi elettrici .....	124
B.1.2. Definizione interruttore.....	124
B.1.3. Modalità di sgancio.....	125
B.1.4. Grandezze principali .....	126
B.1.5 Caratteristiche costruttive e principio di funzionamento .....	127
<b>Riferimenti bibliografici.....</b>	<b>129</b>

## INTRODUZIONE

La tesi ha come obiettivo la valutazione delle possibili evoluzioni degli impianti elettrici navali.

Le motivazioni che mi hanno spinto ad affrontare questa tematica sono molteplici, prima tra tutte la possibilità di lavorare ad un progetto fortemente innovativo in campo elettrico, dato che l'affermazione dell'architettura elettrica navale è stata introdotta solo recentemente; in secondo luogo la possibilità di poter applicare gran parte delle nozioni acquisite durante il mio percorso di laurea in quanto lo studio della struttura elettrica navale richiede conoscenze che spaziano dai sistemi di generazione all'utilizzazione dell'energia elettrica.

La trattazione è stata improntata su un confronto tra la struttura elettrica di un'attuale nave da diporto (Megayacht) e un'ipotetica architettura innovativa. Questo confronto è stato eseguito esclusivamente su base tecnica, in quanto, considerazioni di natura economica non sono state possibili poiché parte della soluzione proposta non è ancora disponibile in commercio.

La scelta di incentrare il lavoro su un'imbarcazione da diporto nasce dalla necessità di rendere la trattazione più consona ai tempi di una tesi senza perdere di validità per un'applicazione in futuro su navi più grandi il cui grado di elettrificazione (CE) è molto simile rispetto a quello del Megayacht considerato.

## 1. Evoluzione degli impianti elettrici navali

Gli impianti navali hanno subito una sempre più crescente elettrificazione negli ultimi vent'anni. Lo studio di un impianto può essere molto complesso e articolato poiché, all'interno della stessa nave in uno spazio ridottissimo, si trovano: generatori, motori di propulsione e servizi ausiliari, a differenza dei classici impianti terrestri in cui la generazione e l'utilizzazione avvengono a decine se non a centinaia di chilometri di distanza. Su una nave i concetti di affidabilità, sicurezza, stabilità e regolazione sono spinti al limite. Per poter conoscere e capire le problematiche che si riscontrano nella fase di progettazione di un impianto elettrico navale e quindi valutare le possibili evoluzioni, bisogna conoscere le sue caratteristiche principali. Lo scopo di questo primo capitolo è quello di fornire una panoramica generale delle attuali architetture elettriche navali che verranno utilizzate, nei capitoli successivi, come punto di partenza per studiare le possibili innovazioni tecnologiche nel sistema elettrico di una moderna nave All Electric Ship (AES). Come sarà meglio evidenziato nel seguito, la tesi si focalizza sull'impianto elettrico del Megayacht che grazie al suo elevato grado di elettrificazione può fornire, con opportuni accorgimenti, soluzioni applicabili anche per le moderne navi da crociera.

### 1.1 Classificazione

La nave è un mezzo di trasporto autonomo che può raggiungere notevoli dimensioni studiato per trasportare su acqua merci e/o persone.

Le navi possono essere classificate in quattro macro categorie:

- Navi da guerra
- Navi da pesca
- Navi da diporto
- Navi mercantili

### *navi da guerra [1.1.a.]*



Le flotte militari moderne (figura 1.1.a) sono costituite da una varietà di navi sempre più specializzate a seconda della strategia di guerra adottata. I principali obiettivi delle navi militari possono essere riassunti in questo modo:

- Intercettare e distruggere sottomarini nemici
- Trasporto della flotta aerea
- Trasporto delle truppe e mezzi terrestri

### *Navi da pesca [1.1.b.]*



Sono navi impiegate per la pesca commerciale (figura 1.1.b.). Le dimensioni, solitamente ridotte, non superano i 18 m di lunghezza. La maggior parte dei battelli con dimensioni significative vengono realizzate in acciaio. La propulsione di queste imbarcazioni, che prevedono per la pesca il traino di grandi reti, è fornita con motori diesel collegati direttamente all'albero dell'elica.

### *Navi da diporto [1.1.c.]*



Sono imbarcazioni private usate dai diportisti nautici (figura 1.1.c.). La classificazione è basata sia sulle dimensioni che dal tipo di propulsione:

- Navi: unità che hanno una lunghezza maggiore di 24 m.
- Imbarcazioni: unità che non sono classificate come navi e che superano i 7,5 m se a motore, i 10 m se a vela.

- Natanti: unità che hanno dimensioni inferiori ai 7,5 m se a motore e minori di 10 m se a vela.

La potenza del motore non modifica la categoria di appartenenza dell'unità considerata. Per le unità da diporto la tipologia di motore deve essere tale da rispettare una serie di requisiti di sicurezza a seconda del tipo di navigazione:



- *In alto mare*: la forza del vento può essere superiore a 8 (scala Beaufort) con onde di altezza maggiore di 4 m.
- *al largo*: progettate per crociere d'altura, in cui: la forza del vento può essere pari a 8 e l'altezza significativa delle onde può raggiungere i 4 m.
- *in prossimità della costa*: progettate per crociere in acque costiere, baie, fiumi e laghi, in cui la forza del vento può essere pari a 6; l'altezza significativa delle onde può raggiungere i 2 m.
- *in acque protette*: progettate per crociere su piccoli laghi, fiumi e canali, in cui: la forza del vento può essere pari a 4 e l'altezza significativa delle onde può raggiungere 0,5 m.

### Navi mercantili [1.1.d]



Le navi mercantili si suddividono in:

- navi da carico
- navi da crociera

Le navi da carico sono destinate all'esclusivo trasporto di merci (figura 1.1.d. a sinistra). Sono caratterizzate dall'aver numerose stive e speciali attrezzature in coperta per il carico e lo scarico delle merci, indipendentemente dalle attrezzature esistenti nei porti.

Si suddividono in:

- navi cisterna
- navi destinate al trasporto di carichi alterni
- navi per carico generale (General cargo)
- navi rinfusiere
- navi per carico solido imballato
- navi speciali

Le navi passeggeri (figura 1.1.d. a destra) sono quelle destinate al trasporto di passeggeri e, in piccola parte, di merci. A tale categoria appartengono i transatlantici.

Tutte le navi passeggeri, per il particolare uso cui sono destinate, sono dotate di apparecchiature per rendere agevole la vita a bordo. Sono dotate di: numerose cabine singole o collettive da destinarsi ai passeggeri, di ristoranti, bar, e quant'altro possa servire per permettere una traversata confortevole.

Spesso tali navi sono fornite di pinne stabilizzatrici, dette anche alette antirollio, che sono delle specie d'alettoni in lamiera, sporgenti perpendicolarmente al fasciame di carena e servono a smorzare il movimento di rollio rendendolo più dolce e meno fastidioso.

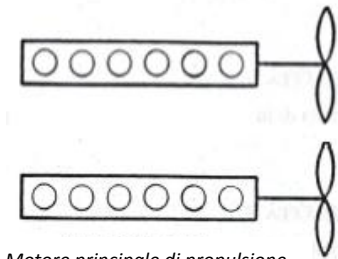
### 1.2. l'evoluzione degli impianti navali

Su tutte le navi sono installati impianti autonomi per la produzione di energia elettrica richiesta sia per la navigazione sia per le manovre in porto.

La potenza installata è variabile in base al tipo di nave e alle esigenze di servizio. Fino alla metà degli anni settanta gli impianti di propulsione erano costituiti da:

- turbine a vapore
- motori diesel a due o a quattro tempi

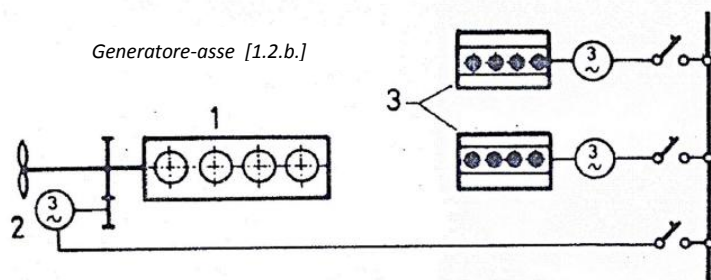
La produzione dell'energia elettrica a bordo veniva garantita da turboalternatori di potenza adeguata alimentati dal vapore dalle stesse caratteristiche termodinamiche di quello che alimentava la turbina principale di propulsione. Nel caso di limitata disponibilità di vapore, per esempio nelle manovre in porto, i turboalternatori dovevano essere affiancati da uno o più diesel-gen sets che provvedevano a soddisfare le esigenze di energia elettrica.



Motore principale di propulsione  
[1.2.a.]

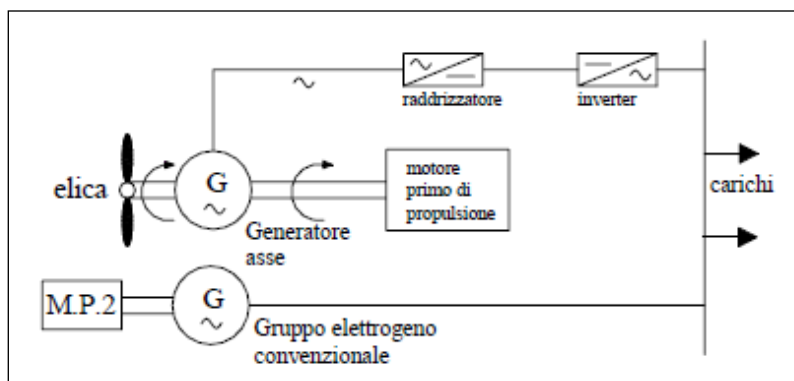
A partire dalla metà degli anni ottanta, in ambito navale, si diffusero in maniera massiccia i motori diesel (figura 1.2.a.) e si abbandonarono le turbine a vapore: si ottennero impianti denominati *unifuel* (riduzione dei costi di esercizio).

- 1 -> motore principale di propulsione
- 2 -> generatore asse
- 3 -> gen-sets



Generatore-asse [1.2.b.]

Sempre a metà degli anni ottanta fu introdotto il concetto di generatore-asse (figura 1.2.b.). Il generatore si azionava direttamente dal motore di propulsione. Tra le possibili soluzioni si prevedeva che l'alternatore ruotasse alla stessa velocità dell'elica quando veniva inserito lungo la linea d'assi o all'estremità del motore opposta a quella che azionava l'albero portaelica. Per una disposizione diversa si introdusse un moltiplicatore di giri per far ruotare il generatore asse ad una velocità di rotazione superiore a quella dell'elica.



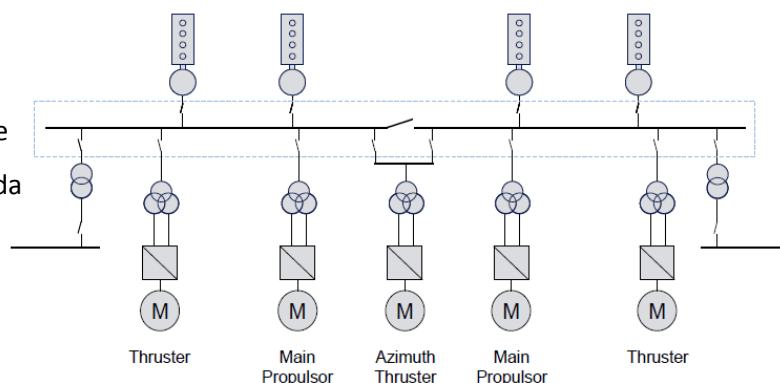
Schema dettagliato del sistema generatore-asse [1.2.c.]

Un problema di questo tipo di generazione era rappresentato dalla necessità di svincolare la tensione e la frequenza del sistema elettrico dalla velocità di rotazione dell'elica. In generale, per garantire una buona qualità del servizio, si dovette introdurre un sistema di conversione AC/DC e DC/AC (figura 1.2.c.) per la produzione di energia elettrica con tensione e frequenza costante. Questi convertitori avevano un range di operatività limitato esclusivamente alla navigazione e non nelle manovre in porto.

Il costo complessivo di questa soluzione era caratterizzato da diversi fattori:

- costo della stazione di conversione
- costo del sistema meccanico
- costo della manutenzione

Solo a partire dalla metà degli anni novanta la propulsione elettrica si è diffusa in maniera capillare nel settore navale. Questo è stato reso possibile da una rapida e continua evoluzione dell'elettronica di potenza. Fino ad allora introdurre la propulsione elettrica significava aumentare il costo



Schema elettrico di una generica nave AES [1.2.d.]

dell'impianto poiché, con l'utilizzo dei motori elettrici, si dovevano introdurre più macchine rotanti rispetto alla soluzione di propulsione tradizionale, senza la possibilità di controllare il motore in maniera rapida ed economica. Solo con l'introduzione dei drives è stato possibile spingersi verso un'elettificazione totale della nave (AES). I vantaggi ottenuti sono di seguito elencati:

- flessibilità di progettazione
- maggior sicurezza per il personale/passeggeri
- riduzione consumi combustibile
- riduzione della manutenzione

- maggior controllo automatico
- possibilità di operare in condizioni ambientali estreme

L'ultima innovazione rilevante in questo settore è l'introduzione del sistema azipod.

Il sistema Azipod è posizionato in un pod montato esternamente allo scafo che combina sia la funzione propulsiva sia il governo dell'elica centrale, del timone e delle eliche di manovra. La possibilità di riunire, in un unico gruppo, sistemi di norma installati separatamente consente di recuperare spazio a bordo da destinare a scopi diversi. Grazie alla collocazione del propulsore Azipod sotto lo scafo della nave è possibile ottenere un risparmio del 10% sui consumi di carburante rispetto ai sistemi di propulsione diesel-elettrici con linea alberi convenzionale.

Altri vantaggi:

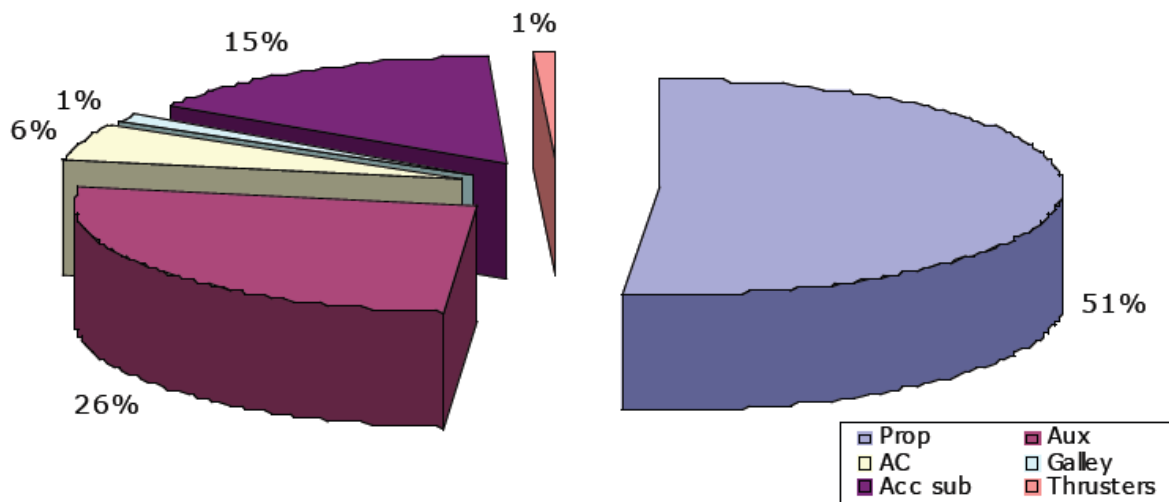
- performance dinamiche eccellenti
- possibilità di manovrare la nave con una rotazione completa di 360°
- eliminazione del timone e di tutti i suoi organi di controllo



*Sistema azipod [1.2.e.]*

*Esempio di manovra con azipod [1.2.f.]*





### 1.2.1. Propulsione diesel

Propulsione diesel significa che l'elica è messa in rotazione dal motore diesel mediante l'interposizione di giunti. All'aumentare della potenza richiesta si ha una graduale riduzione della velocità di rotazione dell'elica:

Per grandi navi mercantili si hanno velocità di circa  $55 \frac{\text{giri}}{\text{min}}$  mentre per navi più piccole le velocità si assestano sui  $150/180 \frac{\text{giri}}{\text{min}}$ . Soltanto con alcuni motori diesel è possibile accoppiare direttamente il motore all'elica. La diminuzione della velocità di rotazione può essere compensata:

- Aumentando il diametro dei cilindri
- Aumentando la corsa

Inevitabilmente questi accorgimenti portano ad un aumento dell'ingombro (sono richiesti spazi maggiori per la sala macchine).

Si preferisce la propulsione diesel rispetto a quella con turbina grazie ai ridotti consumi (convenienza economica). Il motore può girare in entrambi i versi di rotazione.

L'accoppiamento è diretto (motori 2T) oppure indiretto (motori 4T) a seconda delle potenze richieste. Nel caso della soluzione a due tempi il motore è più ingombrante.



Esempio di giunto meccanico [1.2.1.g.]

Il collegamento meccanico all'elica è realizzato con appositi giunti (figura 1.2.1.g.) in grado di trasmettere il moto fra due assi di rotazioni incidenti in un punto e di assorbire le vibrazioni durante il funzionamento. Nel caso della propulsione diesel tradizionale, i consumi sono maggiori rispetto alle soluzioni adottate per le navi moderne (AES).

Per ridurre le emissioni di  $NO_x$  senza compromettere l'efficienza termica bisogna adottare i seguenti accorgimenti:

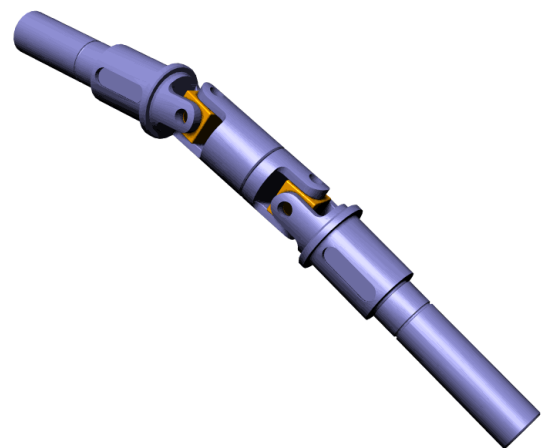
- aumento della temperatura in camera all'inizio dell'iniezione per ridurre il ritardo di accensione
- iniezione ritardata e di durata limitata per ottimizzare la combustione
- miglioramento dell'atomizzazione del combustibile
- modifica della camera di combustione per migliorare il miscelamento aria-combustibile
- iniezione diretta di acqua



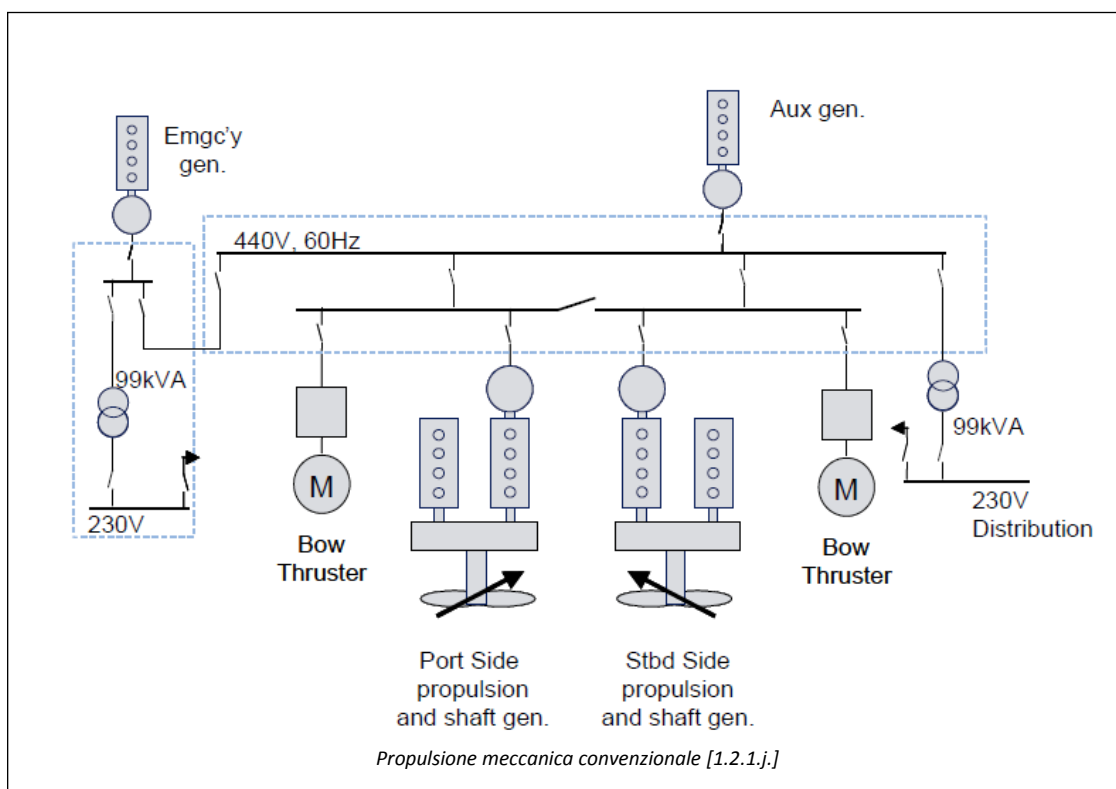
Motori diesel [1.2.1.h.]

La propulsione diesel non consente il disaccoppiamento delle varie macchine rotanti. Oltre ai problemi di spazi e vibrazioni, bisogna anche considerare tutti quei dispositivi meccanici che servono per interfacciare l'elica al motore. Questo problema comporta l'installazione del *giunto cardanico*, incrementando gli svantaggi della propulsione tradizionale:

- Aumento vibrazione
- Frequente manutenzione
- aumento del rumore



Giunto cardanico [1.2.1.i.]

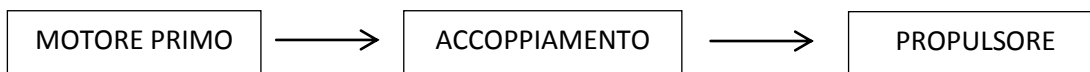


Come ben evidenziato dallo schema 1.2.1.j., il grado di elettrificazione di una nave fino agli anni novanta era molto limitato. Il sistema elettrico, per questi tipi di nave, risulta essere poco capillare: è presente solo per alimentare i carichi luce o carichi con forza motrice ridotta.

Con la propulsione diesel non si riesce a fornire la coppia desiderata in tutto il range delle velocità. Si dovrà tener conto, pertanto, sia nelle manovre sia nelle ripartenze di questo ulteriore fattore.

### 1.2.2 Propulsione elettrica

A partire dagli ultimi vent'anni si è diffuso un nuovo sistema di propulsione: quella elettrica. Per ogni elica è previsto un proprio azionamento:



In questo caso il motore primo è costituito da un motore elettrico il cui valore di potenza, data una tensione costante, è legato al valore di corrente assorbita.

L'accoppiamento può essere un elemento meccanico (per esempio un giunto) in grado di modificare i valori di coppia, di giri e il senso di rotazione. Nel caso delle moderne navi (AES: all electric ship), il controllo dell'elica e quindi della regolazione del motore può essere gestita da convertitori statici. Grazie all'evoluzione dell'elettronica di potenza queste tecnologie si stanno diffondendo anche sui grandi yachts. Le caratteristiche del convertitore, così come per il giunto meccanico, dipendono dalle caratteristiche dell'elica. Se si passa da PF (pale fisse) a PO (pale orientabili) si può ottenere un azionamento meno complesso ma sarà necessario installare un sistema aggiuntivo per la regolazione delle pale.

La soluzione AES richiede, in genere, un numero di macchinari maggiore rispetto alla soluzione meccanica con un incremento dei costi/ingombri. La propulsione elettrica, da sola, non basta a giustificare la scelta. Per una valutazione obiettiva sulla convenienza o meno di questa innovazione, bisogna considerare tutti i vantaggi diretti/indiretti che si ottengono con questa nuova soluzione.

Con i motori elettrici di propulsione si può disaccoppiare meccanicamente la generazione dalla propulsione. Questo fattore è importante per una gestione ottimale dei pesi. Siccome si utilizzano due assi meccanici differenti per la generazione e la propulsione le velocità degli assi possono essere diverse fra loro. In conseguenza di ciò, si possono mantenere velocità dell'asse-generatore costanti (almeno teoricamente): si lavora nel punto di ottimo del generatore diesel minimizzando i consumi e l'inquinamento.

Con la sostituzione degli assi con i 'cavi elettrici' è possibile svincolare la taglia e il numero dei generatori principali rispetto ai motori propulsivi. La scelta dei generatori diesel e dei relativi alternatori può essere eseguita sulla base della massima convenienza economica in funzione dell'affidabilità richiesta senza essere troppo vincolata alle caratteristiche del motore di propulsione.

Per le navi da crociera o per i megayachts la soluzione AES è particolarmente indicata data l'elevata potenza richiesta dai servizi ausiliari. In questi casi, la convenienza nell'elettrificazione della nave è resa ancora più conveniente dalla riduzione della potenza totale dei motori primi da installare a bordo. L'abbandono della soluzione "meccanica" e dei relativi dispositivi (giunti) permette, non solo di ottenere andature flessibili a seconda delle condizioni di navigazione, ma anche di ridurre consumi e manutenzioni (in particolare se la nave deve operare in condizioni estreme: si pensi ad esempio alle continue sollecitazioni nelle navi rompighiaccio).

Riassumendo, i principali vantaggi derivanti dall'introduzione della propulsione elettrica sono:

- Riduzione dei vincoli di volume e posizione rispetto alla soluzione dell'azionamento meccanico a vantaggio del carico/passeggeri e della manovrabilità della nave
- Riduzione di rumori e vibrazione grazie all'eliminazione delle parti meccaniche
- Frazionamento ottimale della potenza dei motori primi per ottenere il massimo rendimento nelle diverse condizioni di funzionamento
- Aumento della disponibilità della potenza elettrica ai servizi ausiliari
- Maggior grado di automazione con conseguente riduzione del personale

L'immediata conseguenza dell'elettrificazione navale, a causa dell'utilizzo dei convertitori, è sicuramente un notevole incremento delle distorsioni armoniche che producono una serie di effetti indesiderati:

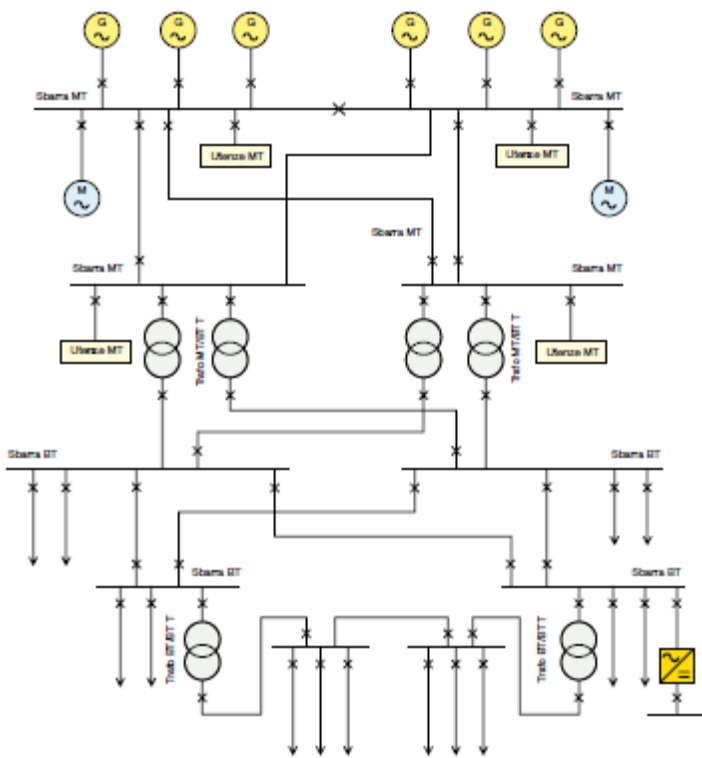
- Aumento delle perdite nel rame e nel ferro
- Vibrazioni meccaniche
- Maggior rumore elettrico
- Disturbi diretti e EMI ai sistemi di bassa potenza quali ad esempio quelli di misura, saranno necessari filtri induttivi/capacitivi



### 1.3. Modalità di trasmissione dell'energia elettrica a bordo su una generica nave All Electric Ship

La realizzazione del sistema elettrico di distribuzione deve consentire di ottenere a bordo, così come per gli impianti terrestri, un buon grado di sicurezza e stabilità. Per stabilire le modalità di alimentazione dei vari carichi bisogna conoscere il tipo di carico che si vuole alimentare:

- Carichi essenziali di elevata potenza (ad esempio i motori di propulsione)
- Impianti di grossa potenza che servono per svolgere le funzioni principale della nave (ad esempio l'impianto di condizionamento)
- Sottostazione per l'alimentazione dei piccoli carichi motore/luci tipicamente in BT



Schema tipico di distribuzione navi mercantili [1.3.a]

La potenza a bordo nave può essere generata in MT o in BT. Nel caso di generazione in media, come ad esempio nelle grandi navi mercantili, la maggior parte della potenza è destinata ai motori di propulsione anche se le sottostazioni MT/BT nelle moderne AES hanno raggiunto valori notevoli quasi dello stesso ordine di grandezza della propulsione (navi da crociera). Con l'aumento dei servizi e dei comfort aumenta anche il grado di affidabilità richiesto. Tutto ciò porta ad un'alimentazione ridondata delle sottostazioni che verranno alimentate da diverse sbarre in MT. In caso di guasto si dovranno prevedere opportuni dispositivi di protezione per consentire, nel più breve tempo possibile, l'apertura della sezione guasta.

La selettività è una prerogativa essenziale per gli impianti navali data la mancanza di un nodo di potenza infinita solitamente presente nelle valutazioni degli impianti terrestri. La distribuzione utilizzata per le unità da diporto è in BT (690 V), mentre per le grandi navi mercantili è necessario passare ad una distribuzione primaria in MT per ridurre la corrente trasmessa, a parità di potenza, e diminuire la corrente di guasto.

La distribuzione finale in bassa tensione è realizzata con valori pari a 400/230 V. È previsto anche una distribuzione in continua con tensioni normalizzate a valori pari a 48/110/125 V. La produzione, così come la distribuzione dell'energia elettrica, è effettuata con valori di frequenze pari a 50/60 Hz. Nelle navi militari, per apparecchiature speciali, si utilizzano circuiti particolari funzionanti a frequenze elevate (400Hz).

Negli impianti navali si suddivide la distribuzione in due grandi famiglie:

- Distribuzione primaria

- Distribuzione secondaria

La distribuzione primaria è trifase senza neutro. Il sistema con centro stella (C.S.) isolato consente di ridurre il valore delle correnti disperse e di corto circuito, diminuisce gli sforzi elettrodinamici fra le sbarre e fra gli avvolgimenti di macchina (ancoraggi meno restrittivi). Il principale svantaggio di questa soluzione è quello di avere, nel caso di guasto monofase a terra, valori di tensioni sulle fasi sane che possono raggiungere il valore della concatenata ( aumento della tensione di fase di oltre il 73%) con problemi di isolamento se non si dovesse intervenire tempestivamente. Negli impianti navali i vantaggi offerti dalla soluzione a centro stella isolato sono superiori agli svantaggi. In futuro, con il continuo aumento della tensione, si potrebbe prendere in considerazione l'ipotesi di una distribuzione in A.T. che, come avviene attualmente negli impianti terrestri, sono realizzati con C.S. a terra.

La rete di distribuzione secondaria prevede il collegamento del C.S. a terra. Questa soluzione consente di ridurre il rischio per le persone (si ricorda che l'estensione della rete secondaria è superiore a quella primaria). In questo caso si avranno delle correnti di corto maggiori rispetto alla soluzione con C.S. isolato. Questa condizione non deve trarre in inganno perchè i valori di corrente in BT sono molto più contenuti rispetto a quelli che si otterrebbero nei circuiti di MT a causa dei differenti livelli di tensione. In definitiva ciò che era svantaggioso, dal punto di vista economico, nella distribuzione primaria è meno penalizzante nei circuiti secondari: il costo degli apparecchi in B.T., al variare della corrente di corto da interrompere, non è paragonabile a quello che si ha in M.T.

A seconda del tipo di carico da alimentare e dal flusso di potenza, i sistemi di distribuzione primaria sono realizzabili con schemi differenti:

- Radiale semplice
- Radiale con sottoquadri
- Radiale con sottostazioni

In funzione del grado di affidabilità richiesto nelle varie parti dell'impianto, possono essere aggiunti dei collegamenti per l'alimentazione di riserva che può essere realizzata con:

- Anello chiuso di riserva
- Anello aperto di riserva
- Collegamento di riserva all'utente

i quadri elettrici possono classificarsi in due tipologie:

- Quadro elettrico principale (QEP)
- Quadro elettrico d'emergenza (QEE)

Entrambi i quadri dovranno essere installati il più vicino possibile rispetto alla propria sorgente d'alimentazione. Il quadro elettrico (QE) consente di collegare i generatori alle linee di distribuzione dei vari utenti.

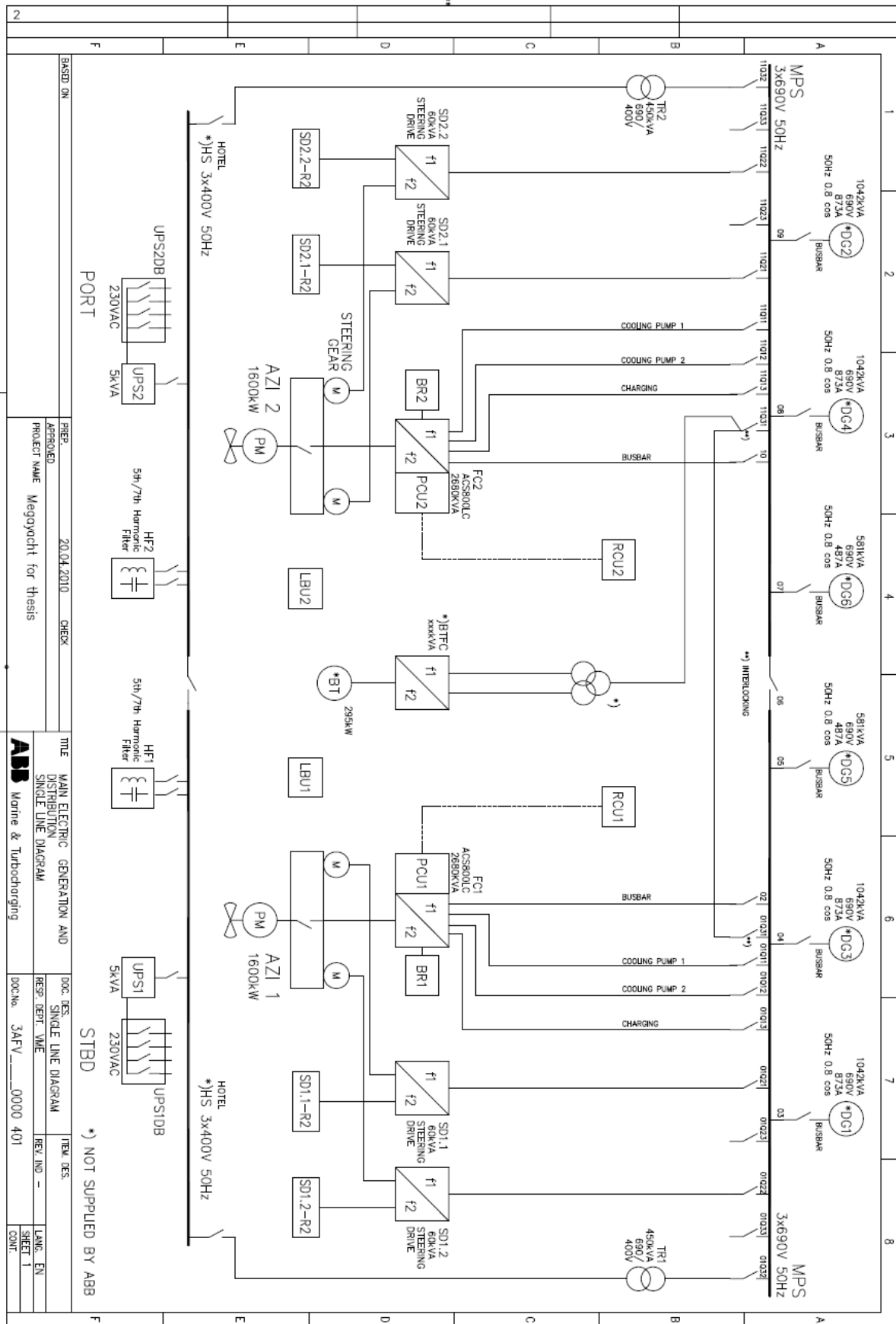


*Quadro elettrico principale a bordo nave [1.3.b.]*

Come si può vedere nell'immagine 1.3.b., ogni quadro è composto da un certo numero di armadi affiancati, ciascuno dei quali è realizzato con telaio e pannelli di copertura metallici. Le linee di alimentazione sono installate nella parte superiore dell'armadio mentre quelle di distribuzione escono dal basso.

2. Studio del Megayacht All electric e possibile evoluzione dell'architettura elettrica

Si prende come riferimento la struttura elettrica di un grande yacht di lunghezza pari a 55 m.



Schema elettrico [2.a.]

Caratteristiche di generazione:

Tabella [2.b.]

	unità di misura	generatore 1	generatore 2
numero		4	2
potenza nominale	kVA	1042	581
tensione nominale	V	690	690
fattore di potenza		0,8	0,8
frequenza	Hz	50	50
reattanza subtransitoria	p.u.	0,1	0,1
reattanza transitoria	p.u.	0,18	0,18
resistenza storica	$\Omega$	0,0045	0,01
costante di tempo subtransitoria	s	0,02	0,016
costante di tempo transitoria	s	0,22	0,2
costante di tempo DC	s	0,037	0,03

Parametri dei trasformatori per i servizi ausiliari:

Tabella [2.c.]

	unità di misura	trasformatore
potenza nominale	kVA	450
tensione primaria	V	690
tensione secondaria	V	400
tensione di corto circuito	%	4,5
perdite nel rame	kW	4

Parametri della propulsione:

- thruster 1-2:

$$P = 1600 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi = 0,8$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot 690 \cdot \cos\varphi} = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 690 \cdot 0,8} = 1673,5 \text{ A}$$

- Bow thruster:

$$P = 295 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi = 0,8$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot 690 \cdot \cos\varphi} = \frac{295 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 690 \cdot 0,8} = 308,5 \text{ A}$$

Le dimensioni del Megayacht, così come le caratteristiche del suo impianto elettrico, rendono la trattazione più semplice rispetto ad una moderna nave da crociera in cui la generazione è in MT. Lo schema elettrico 2.a. è utilizzato per studiare:

- Il funzionamento delle moderne navi AES
- La possibile evoluzione dell'architettura dell'impianto elettrico

La peculiarità dello yacht preso in esame è quello di raggiungere un coefficiente di elettrificazione (CE) molto elevato, al pari delle moderne navi da crociera, consentendo l'impiego delle soluzioni che verranno nel seguito proposte anche per le navi mercantili/passeggeri.



*Megayacht [2.d.]*

Il CE è espresso come rapporto fra la potenza elettrica installata e la taglia della nave. La potenza elettrica è espressa in kW ed è ottenuta dalla somma della potenza elettrica dei generatori installati a bordo mentre la taglia della nave è espressa dalle Tonnellate di Stazza Lorda.

Come per le grandi navi mercantili anche nei megayachts la generazione è suddivisa in due gruppi, ciascuno dei quali sarà costituito da tre generatori.

Per la propulsione, che ovviamente sarà elettrica, si utilizzano due thruster principali con un sistema azipod. L'elica è messa in rotazione da un motore sincrono a magneti permanenti che è interfacciato alla rete principale mediante drives.

Oltre alla propulsione principale c'è anche il bow-thruster la cui alimentazione avviene in maniera analoga ai main thruster.

Durante le condizioni di normale funzionamento l'interruttore che separa le due semisbarre principali dovrà essere nella posizione di aperto. I carichi, compresa la propulsione, dovranno essere suddivisi in maniera simmetrica. Nelle situazioni in cui l'integrità del sistema elettrico è messa in pericolo, come ad esempio l'avaria di un gruppo elettrogeno, si provvederà alla chiusura dell'interruttore di sbarra (l'operazione è automatica). Il motivo per il quale normalmente si esercisce con due semisbarre anziché una è molto semplice: si deve limitare la corrente di corto circuito.

In caso di guasto con congiuntore chiuso, come meglio evidenziato nel capitolo successivo, la corrente di corto



*Megayacht in costruzione [2.e.]*

circuito può assumere valori nell'ordine di diverse decine di kA. Dal punto di vista pratico questo porta ad un incremento del costo degli interruttori da installare poiché dovrà essere dimensionato per una corrente sicuramente maggiore rispetto a quella che passerebbe se il guasto fosse alimentato da un solo gruppo di generatori (congiuntore aperto).

La suddivisione impiantistica dei generatori in due gruppi distinti è una scelta quasi obbligata negli impianti elettrici navali; in tal caso, a differenza degli impianti terrestri, le distanze in gioco sono molto limitate di conseguenza un corto al quadro elettrico principale potrebbe avere conseguenze permanenti per la funzionalità dell'impianto, dato che la generazione avviene a pochi metri di distanza.

*Osservazione:* la somma delle potenze richieste dai carichi supera quella che può essere fornita dai sei generatori. Per il dimensionamento dell'impianto elettrico occorre tener conto del coefficiente di utilizzazione e in maniera analoga a quanto avviene negli impianti terrestri bisogna considerare che i carichi elettrici non funzioneranno contemporaneamente. Ad esempio, quando viene messo in funzione il bow-thruster la propulsione principale si presume spenta proprio perché l'accensione del thruster da 295 kVA è richiesta solo per manovre in porto. I servizi ausiliari (in totale sono circa 900 kVA) non richiederanno sempre la massima potenza e quindi la potenza preventivata per i SA sarà inferiore a quella installata (ragionamento analogo a quanto avviene negli impianti civili).

L'architettura elettrica navale, in particolare nel nord Europa, si sta indirizzando verso un sistema di distribuzione diverso rispetto a quello adottato nel Megayacht, ovvero un sistema in DC che risulta, almeno teoricamente, più vantaggioso rispetto all'alternata.

L'introduzione sul mercato di questi nuovi sistemi è resa possibile non solo grazie ad un continuo e rapido sviluppo dei convertitori di potenza ma anche da una serie di fattori che concorrono, con pesi diversi, a propendere verso la soluzione DC:

- Diffusione delle lampade al LED (consumano di meno e sono alimentabili direttamente in continua)
- Diffusione, soprattutto nelle navi passeggeri, di dispositivi elettronici per l'intrattenimento e il comfort
- Necessità di ridurre le interferenze armoniche
- Propulsione elettrica: necessità di drives con un DC-Link
- Generazione ad alta frequenza (200 Hz o 400 Hz)
- Introduzione di batterie e supercondensatori
- Alimentazione diretta dei sistemi di accumulo

L'analisi dell'architettura in DC verrà condotta in questo capitolo suddividendo in diverse parti l'impianto elettrico del Megayacht. L'obiettivo non è quello di fornire una soluzione globale, ma soluzioni che possano essere introdotte in maniera svincolata rispetto all'architettura della restante parte dell'impianto. Lo studio, come si vedrà nei paragrafi successivi, potrà portare a concludere che l'innovazione ipotizzata non

sia economicamente o tecnicamente conveniente; questo però non vuol dire che in futuro, con l'evoluzione della tecnologia, non possa essere introdotta sul mercato.

Il confronto fra le soluzioni attuali e le innovazioni si concentrano su tre parti fondamentali del megayacht:

- La generazione elettrica
- Il sistema di distribuzione
- La propulsione elettrica

### 2.1. Generazione elettrica

Negli ultimi anni l'elettrificazione della nave sta divenendo sempre più significativa e massiccia. Per consentire il suo funzionamento durante la navigazione e garantire tutti quei servizi denominati SA, bisogna accuratamente dimensionare la centrale elettrica di bordo, la cui taglia di potenza sta raggiungendo valori impensabili fino a poco tempo fa. Ovviamente l'energia elettrica deve essere fornita da dispositivi presenti a bordo, questo significa che la centrale elettrica di bordo dovrà soddisfare in maniera autonoma le richieste del carico. Durante la fase di progettazione del Megayacht si dovrà applicare, alla potenza totale prevista, sia un coefficiente maggiorativo per un eventuale ampliamento futuro sia un ulteriore margine che permetta di avere disponibile, nel caso di avaria di uno dei gruppi diesel-generatore, una potenza superiore dagli altri gruppi rimasti in funzione.

Attualmente la generazione elettrica a bordo nave è realizzata, come nel caso del Megayacht, con gruppi elettrogeni che sono costituiti da un diesel accoppiato ad un generatore sincrono. Durante la fase di progettazione bisogna tener in considerazione un secondo aspetto importante: il punto di lavoro ottimale del diesel è intorno al 75%-80% del suo valore nominale. Questo consente da un lato di

ridurre i consumi lavorando nel punto di ottimo e dall'altro di avere una riserva di potenza da poter utilizzare in condizioni critiche o di avaria di un gruppo.

Ovviamente anche la macchina elettrica (Synchronous generators) dovrà essere dimensionata in base alla taglia del diesel e del tipo di servizio richiesto. Si precisa comunque che la generazione diesel, su particolari tipi di navi, è sostituita da turbine a gas che permettono di ottenere prestazioni migliori sia come velocità di punta, sia come manovrabilità durante la navigazione.

Dallo schema elettrico del Megayacht si può notare che la potenza è prodotta da sei gruppi elettrogeni che a loro volta vengono suddivisi in due sezioni (quella di sinistra e di destra) ciascuna composta da tre generatori. Durante le condizioni di funzionamento normali le due sezioni sono elettricamente separate da un interruttore automatico che divide la sbarra al QEP in due parti. Nelle navi più grandi, come ad esempio quelle mercantili, i due gruppi di generatori principali sono separati anche fisicamente (posti in locali differenti) sempre per motivi di affidabilità.



*Motore diesel [4.1.a.]*



L'alternatore è messo in rotazione dal motore diesel con taglie variabili di 581 kW e 1042 kW con rendimento di circa il 95%. Al variare delle condizioni di carico i regolatori di macchina dovranno intervenire:

- Sul flusso di combustibile in ingresso al variare della potenza elettrica
- Sulla tensione d'eccitazione per controllare sia la tensione che la potenza reattiva fornita.

L'alternatore sarà progettato per generare in BT (690 V). Sulle navi mercantili, a causa delle elevate potenze richieste, la tensione di generazione può essere in MT ( 6-11 kV).

In quest'ultima parte del paragrafo si vogliono analizzare le modifiche che si potrebbero introdurre, nel caso di una distribuzione in DC, nel settore della generazione elettrica principale del Megayacht.

È importante sottolineare che per la generazione si utilizzeranno sempre macchine in alternata e che solo in futuro con l'evoluzione delle fuel cells si potrà pensare di sostituire il sincrono con una generazione in DC eliminando anche i convertitori raddrizzatori. Con le tecnologie attuali la produzione in continua potrebbe realizzarsi con le dinamo che però non sono né tecnicamente né economicamente convenienti rispetto al classico generatore sincrono che resta una macchina relativamente poco costosa, compatta e di facile costruzione. In ambito navale inoltre la necessità di ridurre i pericoli di incendio e di esplosione ha come conseguenza l'eliminazione di tutti i contatti striscianti delle macchine rotanti che su una dinamo sono sempre presenti per il funzionamento del collettore a lamelle, a differenza del sincrono in cui gli unici contatti sono quelli per l'eccitazione e la cui eliminazione può essere ottenuta con l'utilizzo dei magneti permanenti.

Per collegare l'alternatore al sistema di distribuzione in continua sarà sufficiente disporre di convertitori raddrizzatori (uno per ogni generatore).

Con la trasmissione DC nasce quindi la possibilità di interfacciare sistemi a frequenza diversa, i generatori così come i carichi rotanti saranno in grado di lavorare a frequenze diverse:  $f = 400 \text{ Hz}$ .

Il funzionamento a frequenza elevata significa diminuire il volume, il peso e quindi il costo dei nuclei ferrosi. Oltre ad un tornaconto economico, un minor volume della macchina significa occupare meno spazio da poter destinare al carico pagante.

Se tutti i carichi (motori) in AC fossero progettati per un funzionamento a frequenza maggiore, si otterrebbe, come conseguenza, un incremento dei vantaggi sopra citati.

La generazione dovrà essere esclusivamente affidata a macchine sincrone a magneti permanenti che rispetto ai tradizionali sincroni con l'eccitatrice permettono di:

- Ridurre l'ingombro
- Ridurre il pericolo di esplosione

Senza l'utilizzo dell'eccitatrice si eliminano, non solo i contatti striscianti, ma anche i generatori ausiliari/trasformatori che garantivano l'eccitazione necessaria.

*Vantaggi:*

- riduzione delle macchine da installare
- riduzione dei volumi occupati
- riduzione dei costi di manutenzione

Di contro, l'impossibilità di controllare l'eccitazione durante le condizioni critiche (per esempio i corti circuiti), provoca problemi di stabilità alla rete.

Quest'effetto può essere ridotto con l'adozione di un idoneo sistema di accumulatori/supercondensatori che permettano di livellare i picchi di energia/potenza senza gravare sulla generazione e sul suo sistema di eccitazione.

Dimensionamento del sincrono:

Tensione di fase:  $E_{of} = 2NEc = 4.44Nf \Phi$

Flusso di macchina:  $\phi = 2\tau LB/\pi$

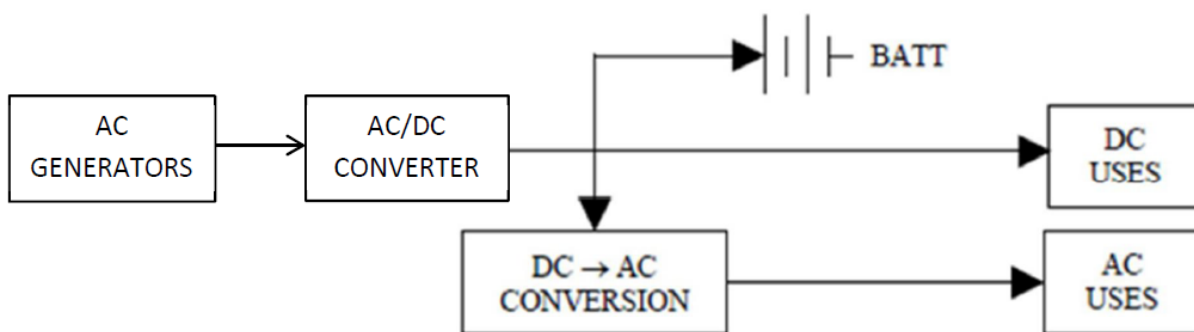
$\tau \rightarrow$  passo polare

$L \rightarrow$  lunghezza pacco lamellare di statore

$B \rightarrow$  valore massimo induzione al traferro

Un incremento di frequenza, a parità di tensione di macchina porta ad una riduzione di flusso. Ridurre il flusso significa avere una macchina più piccola.

Nello studio delle possibili architetture del Megayacht, la generazione ad alta frequenza è stata solo accennata poiché non si dispongono in commercio di sincroni in grado di soddisfare le esigenze di potenza della nave presa in esame. Si sono trovati generatori a 400 Hz solo in ambito aeronautico ma con valori troppo contenuti (inferiori ai 200 kVA) per un'applicazione pratica in ambito navale.



Rappresentazione schematica di un futuro impianto elettrico navale [2.1.a.]

### 2.1.1 Sistemi di accumulo

L'evoluzione tecnologica delle batterie per la trazione elettrica ha permesso la loro introduzione in ambito navale. Fino ad oggi il loro impiego è stato limitato all'alimentazione di quei dispositivi ritenuti fondamentali (ad esempio i sistemi di avviamento dei generatori in caso di black-out: pompe del circuito dell'olio). In futuro si prospetta la possibilità di poter sostituire il generatore d'emergenza (diesel+alternatore) con un gruppo di batterie.

La soluzione con gruppo diesel implica l'installazione del gruppo stesso sui ponti alti della nave per evitare che, in caso di collisione/allagamento, venga a mancare l'energia a bordo. Con l'utilizzo delle batterie si potrebbe ridurre la criticità dei pesi del diesel-generatore grazie alla molteplice dislocazione delle stesse nei ponti alti.

Per la scelta delle batterie da installare, occorre considerare due parametri fondamentali:

- Capacità: si misura in Ah ed evidenzia l'intensità di corrente e il tempo in cui questa è disponibile. Fissato il valore di tensione della batteria è possibile ricavare la potenza.
- Densità di energia accumulabile: si esprime in Wh/kg ed è naturalmente un indice di grande importanza (pesi e ingombro degli accumulatori).

Un pregio fondamentale degli accumulatori è l'assenza d'inquinamento durante la navigazione. Questo tema è particolarmente sentito nel settore privato (yacht) per la possibilità di accedere alle zone protette.

Dal punto di vista elettrico, l'utilizzo delle batterie potrebbe portare ad una maggior stabilità della rete.

Quando si parla di un impianto elettrico navale si deve pensare ad un rete "debole", in cui non ci sia alcun nodo a potenza infinita. Questa situazione è causata dall'aver dei carichi con potenze dello stesso ordine della generazione. Attacchi/distacchi improvvisi di carico possono portare a variazioni di frequenza e tensione che possono disturbare gli altri carichi collegati. Gli accumulatori potrebbero svolgere un ruolo di primaria importanza, in maniera analoga a quanto si sta facendo per gli impianti terrestri, livellando i picchi di energia e/o di potenza (in tal caso si devono introdurre i supercondensatori). Si prenda come riferimento l'andamento qualitativo riportato nel grafico 2.1.1.a.

*Benefici:*

- Livellamento potenza del sistema
- Rafforzamento della rete e della sua stabilità
- Attenuazione dei disturbi e delle oscillazioni critiche

*Caratteristiche:*

- Controllo della potenza attiva
- Controllo della potenza reattiva

*Applicazioni:*

- Regolazione della frequenza
- Peak shaving
- Riserva in caso di black out

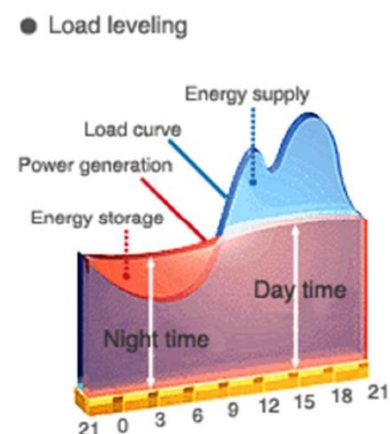


Grafico [2.1.1.a.]

In definitiva maggior stabilità della rete significa anche maggior economicità di navigazione. Se durante le fasi di brusche variazioni di carico le batterie "coprono" queste oscillazioni, vuol dire che la generazione principale potrà lavorare in maniera costante nel punto di massima economia del diesel.

Infine, un ultimo vantaggio significativo rappresentato dagli accumulatori è l'assenza delle vibrazioni e quindi del rumore. Questo aspetto è, per la generazione d'emergenza diesel-alternatore, ancora più amplificato dal fatto che il gruppo dovrà essere posizionato nei ponti alti della nave.

Per la scelta delle batterie bisogna valutare:

- Costo di manutenzione
- Efficienza ad alta intensità di carica/scarica
- Mantenimento della carica durante lunghi periodi di non utilizzo
- Maggior resistenza ai cicli di carica/scarica
- Valore energia immagazzinabile

### 2.1.2. Generazione elettrica d'emergenza

in questo paragrafo si mettono in evidenza le caratteristiche dell'impianto elettrico d'emergenza del Megayacht. I dati riportati fanno riferimento alle *RINA RULES*. Terminata questa parte introduttiva si procederà, nel successivo paragrafo, al dimensionamento in termini di peso e volume della sorgente d'emergenza del Megayacht sia con il classico diesel-gen sets sia con un parco batterie.

Durante le condizioni normali di funzionamento, il quadro elettrico d'emergenza (QEE), viene alimentato direttamente dal quadro elettrico principale (QEP) mediante l'interconnessione con un interruttore automatico in grado di intervenire in caso di sovraccarico/corto circuito disaccoppiando le sbarre. Per rendere disponibile la potenza elettrica d'emergenza sono necessari accorgimenti che permettano di togliere l'alimentazione a tutti i carichi non considerati fondamentali per il sicuro funzionamento dell'imbarcazione.

La potenza d'emergenza deve essere in grado di fornire simultaneamente energia ai tutti i dispositivi ritenuti essenziali e il cui funzionamento avvenga esclusivamente mediante alimentazione elettrica.

I tempi di funzionamento richiesti dalla normativa durante le condizioni d'emergenza sono di seguito riportati:

- 3 ore per l'illuminazione d'emergenza in tutti i punti di raccolta per l'evacuazione ad esempio in prossimità delle scialuppe.
- 18 ore quando si utilizza una distribuzione elettrica fatta a zone. L'alimentazione del sistema d'illuminazione può venir meno nel momento in cui si adottano lampade dotate di batterie che, durante le condizioni normali di funzionamento, vengono continuamente caricate.

Questi requisiti sono applicati:

- 1) lungo le vie di fuga quali scale ed uscite d'emergenza, ascensori, montacarichi, sala macchine e stazione elettrica principale
- 2) Nelle stazioni di controllo comprese quelle adibite per la sala macchine e per lo stesso quadro d'emergenza
- 3) A tutto il sistema antincendio

- 4) Pompa di sentina
  - 5) Le luci di navigazione e tutti i dispositivi luminosi necessari per prevenire le collisioni specificati all'interno dell'International Regulations for Preventing Collisions at Sea.
  - 6) L'installazioni radio e i sistemi per le comunicazioni esterne
  - 7) Tutti i sistemi per le comunicazioni interne
  - 8) I dispositivi per la navigazione, inclusi quelli per l'assistenza al decollo/atterraggio eventualmente presenti
  - 9) I dispositivi per la gestione dei segnali nelle condizioni d'emergenza compresi gli eventuali allarmi sonori
- **30 min:** è il tempo previsto per il funzionamento delle porte stagne automatiche, in contemporanea con gli altri sistemi di allarme (la chiusura delle porte stagne può non avvenire in contemporanea).

Tutti i dispositivi sopra elencati, non alimentati direttamente dal QEE, devono essere alimentati da sistemi di accumulo (batterie) in grado di fornire l'energia richiesta per il periodo previsto.

Alimentare i sistemi di comunicazione significa garantire le comunicazioni fra il ponte di comando e quelli inferiori (per esempio la sala macchine).

Il sistema elettrico a bordo nave può essere suddiviso in due circuiti separati, uno per l'alimentazione principale e l'altro per quella d'emergenza.

La manovrabilità su un'imbarcazione è un elemento fondamentale. Questo requisito è soddisfatto grazie ad una doppia alimentazione, sia elettrica che elettrodinamica, dei dispositivi di controllo del timone. L'alimentazione di questi circuiti avviene principalmente dal QEP, anche se è richiesto il collegamento di almeno un circuito al quadro d'emergenza.

*Definizione di condizione d'emergenza: condizione nella quale i dispositivi che garantiscono l'operatività e l'abitabilità della nave non sono in grado di funzionare a causa di un guasto all'alimentazione elettrica principale.*

*Definizione di quadro d'emergenza: è un quadro elettrico che in caso di guasto all'alimentazione principale è direttamente alimentato da una fonte elettrica ausiliaria o da dispositivi che consentano la transizione dell'alimentazione, da quella principale a quella secondaria, senza discontinuità della stessa per i carichi essenziali.*

Per condizioni operative ed abitative normali si intendono tutte le condizioni che consentono il funzionamento ed il controllo della trazione per una navigazione sicura. Questa sicurezza dovrà essere prevista e mantenuta anche per il carico pagante, assicurando l'alimentazione al sistema antincendio e alle pompe di sentina. Condizioni normali significa anche consentire il controllo, qual'ora fosse necessario, agli organi delle scialuppe di salvataggio e a tutti quei dispositivi essenziali per un funzionamento d'emergenza dell'imbarcazione.

### *Altre caratteristiche della sorgente elettrica d'emergenza*

Quando le alimentazioni elettriche principali sono installate in due o più compartimenti non contigui fra loro e che permettono nelle condizioni più gravose (allagamento simultaneo di compartimenti contigui) sia l'alimentazione dei servizi d'emergenza sia una regolazione e un controllo indipendente dagli altri, allora si può evitare l'installazione della 'centrale d'emergenza' a patto di soddisfare i seguenti requisiti:

- Soddisfare le caratteristiche che sarebbero richieste nel caso in cui fosse presente l'alimentazione d'emergenza
- Alimentazione di almeno due compartimenti non contigui

Il generatore d'emergenza potrebbe essere usato eccezionalmente per alimentare, per brevi periodi, quei circuiti che non sarebbero alimentati in condizioni d'emergenza:

- Situazione di black-out
- Partenza della nave
- Parallelo con la generazione principale

I generatori d'emergenza potrebbero essere utilizzati per l'alimentazione in porto di alcuni carichi della nave, nel rispetto delle regolamentazioni dell'autorità locale (problemi d'inquinamento in porto).

L'alimentazione d'emergenza deve essere in grado di fronteggiare i transitori dei carichi ritenuti essenziali durante il loro avvio simultaneo, mantenendoli funzionanti per il periodo specificato.

Quando la potenza elettrica d'emergenza è richiesta per ripristinare la propulsione della nave, questa deve essere fornita contemporaneamente a quella richiesta dagli altri carichi. La ripartenza dell'imbarcazione deve essere prevista entro 30 minuti dal momento del black-out.

La sorgente d'emergenza può essere un vero e proprio generatore d'emergenza oppure una batteria di accumulatori. Nel primo caso, bisogna rispettare i seguenti requisiti:

- Il generatore dovrà essere collegato al motore primo per il quale è previsto un proprio serbatoio di combustibile indipendente da quelli utilizzati per la propulsione principale.
- La temperatura di infiammabilità del combustibile non dovrà essere inferiore ai 43°C.
- L'avvio del sistema d'emergenza deve avvenire in maniera automatica appena viene a mancare l'alimentazione principale, consentendo di alimentare direttamente dal QEP tutti i servizi ritenuti fondamentali.
- Il sistema d'emergenza, sia motore primo che batterie, dovrà essere in grado di portare il generatore nella condizione di funzionamento nominale nel più breve tempo possibile e comunque non superiore a 45 s, evitando che i transitori elettrici possano portare ad un black-out del sistema d'emergenza.

Nel caso in cui si utilizzassero batterie d'accumulatori come sorgente d'emergenza, bisogna soddisfare i seguenti requisiti:

- Fornire l'energia senza che la sua tensione ecceda il  $\pm 12\%$  rispetto al valore nominale.

- La connessione delle batterie al QEE dovrà avvenire istantaneamente in caso di guasto.
- Garantire l'alimentazione immediata ai carichi ritenuti fondamentali.

La protezione dei circuiti d'emergenza si basa sulla stessa logica di quelli principali, in particolare il guasto in un circuito non deve causare disservizi sugli altri carichi.

Nel caso di sovraccarico del generazione d'emergenza, la sua disalimentazione dal quadro non è immediata ma è segnalata con allarmi visivi e sonori. L'eventuale apertura dell'interruttore per sovraccarico è accompagnata da una richiusura automatica. Le batterie sono sempre presenti a bordo nave, o come sorgente d'emergenza, o come fonte per l'avviamento delle macchine partendo dalla condizione di black-out. In genere le batterie sono predisposte per l'alimentazione ridondante di carichi ritenuti di primaria importanza, proprio per questo generalmente non è prevista la protezione dal sovraccarico ma solo dal corto circuito.

Ci sono alcuni servizi che devono essere mantenuti attivi anche in caso di situazioni particolarmente critiche (incendio/collisione). In caso di pericolo bisogna consentire il controllo e l'alimentazione: dei sistemi di allarme, del sistema antincendio che dovrà sempre funzionare, delle porte taglia fuoco e di quelle stagne. I cavi che connettono le pompe antincendio al QEE dovranno essere resistenti al fuoco poiché dovranno passare in zone ad alto rischio d'incendio.

Quando i conduttori portano un valore di corrente pari a quella nominale prevista, allora la c.d.t. dalla sbarra del quadro principale (o quello d'emergenza) verso tutti i carichi collegati, non dovrà eccedere il  $\pm 6\%$  della tensione nominale. Per i circuiti d'alimentazione delle luci di navigazione, la variazione di tensione non dovrà superare il  $\pm 5\%$  della tensione nominale in condizioni normali di funzionamento. Per i circuiti alimentati da batterie, con tensione delle stesse inferiori ai 55 V, la c.d.t. ammessa aumenta fino al  $\pm 10\%$ .

Negli impianti navali, come noto, si hanno carichi con potenze nell'ordine di quella del generatore installato per la loro alimentazione. L'alternatore durante il suo funzionamento, da vuoto a carico nominale, dovrà mantenere il valore di tensione e di  $\cos\varphi$  entro il  $\pm 2,5\%$  rispetto ai valori nominali. Questa tolleranza aumenta al  $\pm 3,5\%$  durante il funzionamento del generatore d'emergenza.

La tensione di macchina, può superare il valore imposto dalla normativa e raggiungere una variazione del  $\pm 3\%$  della tensione nominale, purchè tale variazione non duri più di 1,5 s. Questi riferimenti sono meno restrittivi nel caso di funzionamento dell'alternatore d'emergenza, il quale può raggiungere variazioni più ampie ( $\pm 4\%$ ) per un tempo massimo pari a 5 s.

La centrale elettrica d'emergenza, con tutti i sistemi di trasformazione, conversione e distribuzione della potenza, dovrà essere installata sui ponti alti della nave in modo da ridurre al minimo le probabilità di messa fuori servizio per collisione. Tutti i dispositivi che concorrono all'alimentazione d'emergenza sono, come precedentemente detto, all'interno di un unico locale. Per ridurre al minimo i pericoli d'incendio/esplosione non si potranno affiancare i vari macchinari a meno di utilizzare macchinari con

classe A60. La disposizione del QEP, degli alternatori principali e dei sistemi di distribuzione, deve essere progettati in maniera tale che un evento dannoso, quale per esempio un incendio, non metta fuori servizio l'alimentazione d'emergenza e il suo sistema di controllo e distribuzione.

La collocazione del sistema d'emergenza dovrà garantire, nel caso di guasto o incendio dello stesso, l'integrità sei sistemi di navigazione, comunicazione e di quelli adibiti alla sicurezza a bordo nave (quali ad esempio il sistema d'illuminazione), che dovranno essere alimentati dal QEP. L'installazione del quadro d'emergenza dovrà avvenire il più vicino possibile alla sua sorgente d'alimentazione. I cavi predisposti per l'alimentazione dei circuiti d'emergenza non devono attraversare gli spazi destinati all'alimentazione elettrica principale, per esempio la sala macchina con motore primo, alternatore e serbatoio del combustibile. Questa specifica è fondamentale se si pensa all'obiettivo della sorgente d'emergenza: alimentare i carichi nel caso di guasti all'alimentazione elettrica principale. Tuttavia è consentito il passaggio dei circuiti d'emergenza all'interno dello stesso locale della generazione principale se il dispositivo da alimentare dovrà essere mantenuto in funzione anche in seguito ad un guasto della sorgente d'alimentazione (motore primo + alternatore).

Il quadro d'emergenza, come quello principale, dovrà essere installato in modo tale da essere facilmente accessibile dal personale. Uno spazio opportuno, e senza ostacoli, dovrà essere lasciato di fronte al quadro per consentire agevolmente le manovre da parte del personale. Generalmente, la parte frontale del quadro, dovrà essere installata a non meno di un metro dalla parete opposta. Quando gli interruttori utilizzati all'interno del quadro sono di natura estraibile, bisogna verificare che nella posizione di 'interruttore estratto', la distanza dalla parete non sia inferiore a 0,5 metri. I valori di distanza sopra riportati, sono variabili a seconda dell'imbarcazione considerata, pertanto, per navi di ridotte dimensioni si può prendere in considerazione l'ipotesi di ridurre i valori sopra forniti.

Quando necessario, anche uno spazio posteriore al quadro di almeno 0,6 metri deve essere previsto per favorire le operazioni di manutenzione. In definitiva, le distanze del quadro dalle pareti del locale devono essere tali da garantire la sicurezza anche durante le condizioni più gravose (corto circuito), evitando la formazione di miscele infiammabili/esplosive all'interno del locale d'emergenza.

Il quadro dovrà essere schermato con griglie isolanti, poste frontalmente e posteriormente allo stesso, per garantire la sicurezza anche quando la tensione superi il valore previsto.

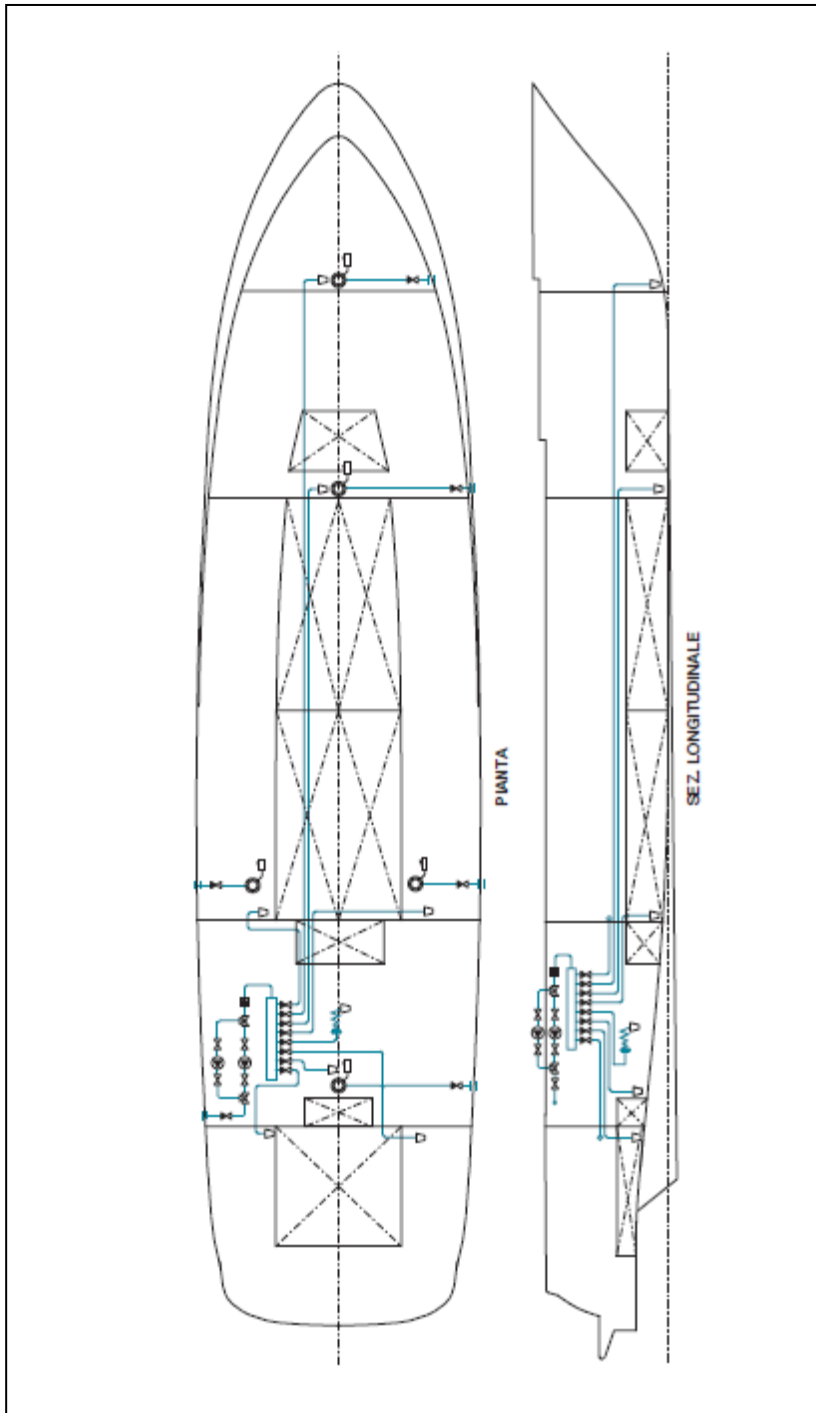
La resistenza d'isolamento richiesta fra ogni singola sbarra e la terra, e fra le varie sbarre connesse ai vari poli, non deve essere inferiore ad  $1 M\Omega$ .

I motori utilizzati per la generazione di emergenza, devono soddisfare una serie di specifiche più restrittive; una di queste è quella che prevede un corretto funzionamento del motore anche con avviamento alla temperatura di  $0^{\circ}\text{C}$ .



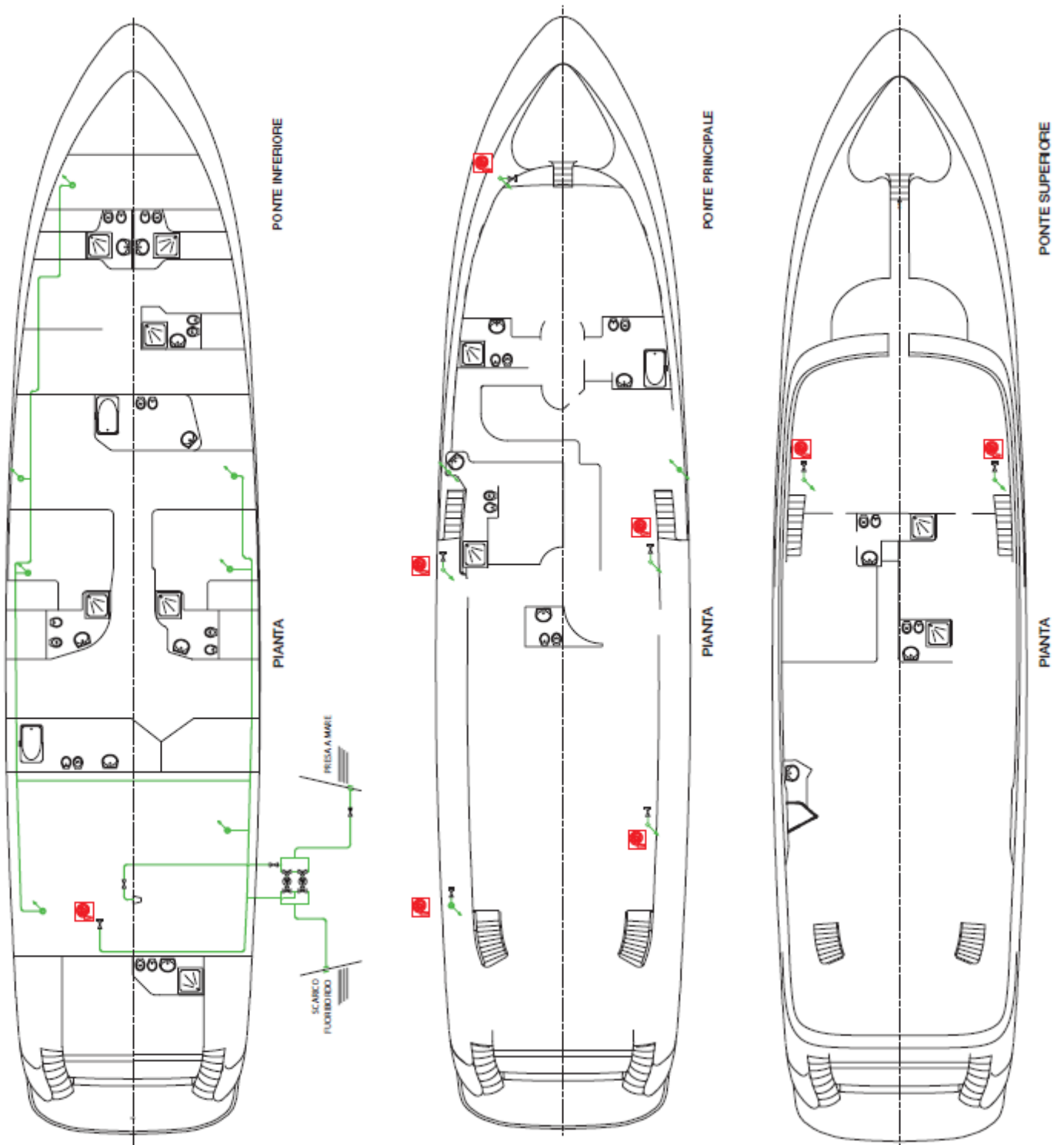
### 2.1.2.1. Esempio di impianti d'emergenza del Megayacht

Impianto di Sentina del Megayacht [2.1.2.1.a.]



	E/Pompa
	Valvola a sfera
	Valvola di non ritorno
	Valvola a tre vie
	Pigna di aspirazione
	Filtro
	Pompa a immersione
	Interruttore a galleggiante
	Collettore flessibile
	Collettore
	Scarico fuoribordo

Impianto anti-incendio del Megayacht [2.1.2.1.b.]



	E/Pompa
	Valvola a sfera
	Valvola di non ritorno
	Valvola a 3 vie
	Valvola idrante antincendio
	Salita verticale
	Discesa verticale
	Manichetta

### 2.1.3. Confronto soluzione diesel-batterie

Si vogliono valutare le caratteristiche del generatore d'emergenza che dovrà essere installato a bordo del Megayacht. Il primo passaggio fondamentale è individuare il valore della potenza da installare. Indicativamente si può ritenere sufficiente una potenza d'emergenza pari a circa il 10% di quella elettrica installata:

$$P_{el\ emerg} = A_{el\ tot} * \cos\varphi * 0.1 = 5330 * 0.8 * 0.1 = 426,9\ kW$$

$$P_{mot} = \frac{P_{el\ emerg}}{0.8} = \frac{426,9}{0.8} = 533\ kW$$

Come evidenziato dal fascicolo Rina Rules (sezione C), i principali carichi durante la condizione d'emergenza dovranno essere alimentati per un periodo di 18 ore. Il tempo di funzionamento del diesel-generator set è necessario per definire il consumo di combustibile e quindi il volume da destinare al serbatoio d'emergenza.

I calcoli sono stati eseguiti considerando il seguente generatore:

- Diesel generator set CATERPILLAR

*Caratteristiche [2.1.3.a.]*

<b>SPECIFICATIONS</b>	
<b>CAT SR4B GENERATOR</b>	
Frame Size.....	596
Excitation.....	Self Excited
Pitch.....	0.8667
Number of poles.....	4
Number of bearings.....	Single Bearing
Insulation.....	UL 1446 Recognized Class H with tropicalization and antiabrasion
IP Rating.....	Drip Proof IP22
Alignment.....	Pilot Shaft
Overspeed capability - % of rated.....	180
Wave form.....	Less than 5% deviation
Paralleling kit/Droop transformer.....	Standard
Voltage regulator.3 Phase sensing with selectable volts/Hz	
Voltage regulation.....	Less than +/- 1/2% (steady state) Less than +/- 1% (no load to full load)
Telephone Influence Factor.....	Less than 50
Harmonic distortion.....	Less than 5%
<b>CAT DIESEL ENGINE</b>	
3412C TA V-12, 4-stroke-cycle watercooled diesel	
Bore - mm.....	137.20 mm (5.4 in)
Stroke - mm.....	152.40 mm (6.0 in)
Displacement - L.....	27.02 L (1648.86 in <sup>3</sup> )
Compression Ratio.....	13.0:1
Aspiration.....	TA
Fuel system.....	Pump and Lines
Governor type.....	PEEC - Cat Electronic

Si riportano i dati tecnici di funzionamento del generatore:

Open Generator Set - - 1500 rpm/50 Hz/400 Volts	DM0626	
<b>Package Performance</b> Genset Power rating @ 0.8 pf Genset Power rating with fan	680 kVA 544 kW	
<b>Fuel Consumption</b> 100% load with fan 75% load with fan 50% load with fan	145.1 L/hr 111.2 L/hr 78.5 L/hr	38.3 Gal/hr 29.4 Gal/hr 20.7 Gal/hr
<b>Cooling System<sup>1</sup></b> Air flow restriction (system) Air flow (max @ rated speed for radiator arrangement) Engine coolant capacity Radiator coolant capacity Engine Coolant capacity with radiator/exp. tank	0.12 kPa 1236 m <sup>3</sup> /min 57.0 L 84.0 L 141.0 L	0.48 in. water 43649 cfm 15.1 gal 22.2 gal 37.2 gal
<b>Exhaust System</b> Combustion air inlet flow rate Exhaust stack gas temperature Exhaust gas flow rate Exhaust flange size (internal diameter) Exhaust system backpressure (maximum allowable)	41.3 m <sup>3</sup> /min 528.2 ° C 116.3 m <sup>3</sup> /min 203.2 mm 6.7 kPa	1458.5 cfm 982.8 ° F 4107.1 cfm 8.0 in 26.9 in. water
<b>Heat rejection</b> Heat rejection to coolant (total) Heat rejection to exhaust (total) Heat rejection to atmosphere from engine Heat rejection to atmosphere from generator	328 kW 529 kW 100 kW 25.6 kW	18653 Btu/min 30084 Btu/min 5687 Btu/min 1455.9 Btu/min
<b>Alternator<sup>2</sup></b> Motor starting capability @ 30% voltage dip Frame Temperature Rise	1732 skVA 596 105 ° C	189 ° F
<b>Lube System</b> Sump refill with filter	69.0 L	18.2 gal
<b>Emissions<sup>3</sup></b> NOx mg/nm <sup>3</sup> CO mg/nm <sup>3</sup> HC mg/nm <sup>3</sup> PM mg/nm <sup>3</sup>	2899.4 mg/nm <sup>3</sup> 177.8 mg/nm <sup>3</sup> 86.9 mg/nm <sup>3</sup> 44.5 mg/nm <sup>3</sup>	

Tabella [2.1.3.b.]

I valori riportati nella tabella 2.1.3.b. sono riferiti ad una temperatura ambiente di 40°C. in caso di funzionamento a valori differenti si potranno avere variazioni di comportamento all'avviamento oltre ad un declassamento delle caratteristiche a regime. I valori d'emissioni inquinanti si riferiscono ad una condizione di funzionamento costante, per cui non corrispondono a quelli reali poiché al variare del carico elettrico si modificherebbe la quantità di combustibile impiegato e quindi la percentuale di emissioni inquinanti.

In base al tipo di avviamento e funzionamento richiesto si definiscono le seguenti condizioni:

- **Standby Power:** potenza disponibile con carico variabile durante l'interruzione della sorgente primaria. Il valore medio della potenza fornita è del 70% rispetto al valore della *standby power*. Il numero di ore di funzionamento è di 200 ore/anno, con un massimo pari a 500 ore/anno.
- **Prime Power:** potenza disponibile con carico variabile per un tempo indefinito. La potenza media d'uscita è pari al 70% di quella dichiarata come *prime power rating*. Il valore di picco consentito normalmente è pari al 100% di potenza dichiarata, è tuttavia tollerato un sovraccarico del 10% per un massimo di 1 ora ogni 12 ore. La durata del sovraccarico non dovrà comunque superare le 25 ore annuali.
- **Continuous Power:** potenza disponibile con carico variabile per un tempo indefinito. La potenza disponibile è compresa fra il 70% e il 100% di quella dichiarata. Il valore di picco consentito è pari al

100% della potenza complessiva e può essere mantenuto indiscriminatamente durante tutto il periodo di funzionamento.

*Diesel generator sets [2.1.3.c.]*



Dimensioni del diesel-generator:

lunghezza → 4,48 m

altezza → 1,99 m

**Volume occupato → 16,05 m<sup>3</sup>**

profondità → 1,8 m

peso → 5651 kg

Le dimensioni del locale dovranno essere sovradimensionate in quanto bisogna tenere in considerazione:

- spazi necessari per la manutenzione
- spazi da destinare al sistema di raffreddamento
- spazi per lo stoccaggio del combustibile.

Valutazione delle dimensioni del serbatoio:

si valutano le condizioni peggiori, si ipotizza un funzionamento del generatore d'emergenza al massimo della sua potenza per le 18 ore richieste.

$$V_{\text{serbatoio}} = C_{\text{orario}} * n_{\text{ore}}$$

$C_{\text{orario}}$  → consumo orario (si assume il consumo al 100% di funzionamento: 145,1 l/h)

$n_{\text{ore}}$  → ore di funzionamento pari a 18 ore.

$$V_{\text{serbatoio}} = 145,1 * 18 = 2612 \text{ l}$$

Bisogna aggiungere al volume della macchina precedentemente calcolato il volume del serbatoio:

$$V_{\text{tot}} = V + V_{\text{serbatoio}} = 16,05 + 2,612 = 18,66 \text{ m}^3$$

Si calcola il peso aggiuntivo dovuto alla presenza del combustibile. Per calcolarlo bisogna conoscere la densità del gasolio.

$$d_{gasolio} = 0,85 \frac{kg}{l}$$

$$m_{gasolio} = d_{gasolio} * V_{serbatoio} = 0,85 * 2612 = 2220 \text{ kg}$$

La massa complessiva del sistema d'emergenza può essere stimata nel seguente modo:

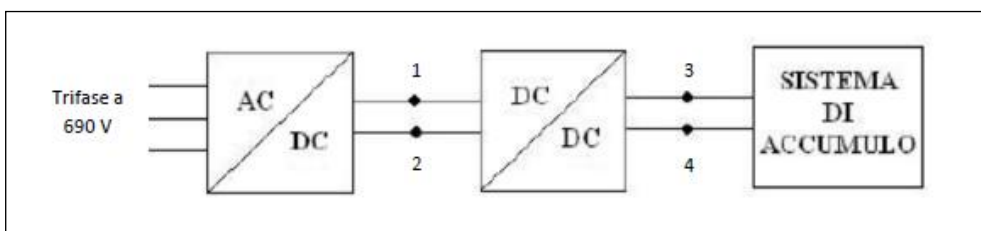
$$m_{tot} = m + m_{gasolio} = 5651 + 2220 = 7871 \text{ kg}$$

A fronte dello studio di una nave in DC si può pensare di sostituire il diesel-generator d'emergenza con un sistema di accumuli, in particolare batterie. L'idea nasce negli ultimi anni grazie ad un forte sviluppo delle batterie per la trazione elettrica. Con l'introduzione delle batterie al posto del generatore d'emergenza si possono ottenere una serie di vantaggi sia durante la cosiddetta 'situazione d'emergenza', sia durante le condizioni ordinarie di funzionamento, cioè durante l'alimentazione diretta dei carichi dal quadro elettrico principale:

- Si possono fronteggiare le forti variazioni di carico in modo da mantenere costante la generazione principale permettendo non solo l'abbattimento delle sostanze inquinanti ma anche una diminuzione del consumo.
- Riduzione dei tempi d'intervento durante le condizioni d'emergenza.
- Riduzione delle vibrazioni a bordo nave grazie all'utilizzo di sistemi statici d'energia.
- I carichi funzionanti su un'imbarcazione in porto sono in genere tali da richiedere il funzionamento del solo generatore d'emergenza. Con l'introduzione dei sistemi d'accumulo questa energia potrebbe essere fornita direttamente dalle batterie, si eliminano tutti i problemi d'inquinamento (in conformità con i tempi di fermata in porto).

Si ipotizza di inserire fra la rete in alternata di bordo e l'accumulo un raddrizzatore a ponte trifase di Graetz ed un convertitore in corrente continua di tipo Buck-Boost.

Schema di distribuzione [2.1.3.c.]



La tensione  $V_{12}$  a valle del raddrizzatore è pari a  $1,5 * 690 \approx 1000V$ , mentre la tensione fra il convertitore DC/DC e il sistema di accumulo sarà compresa, per un buon funzionamento del sistema, fra due valori:

$$V_{min} = 0,7 * 1000 = 700 \text{ V}$$

$$V_{max} = 0,9 * 1000 = 900 \text{ V}$$

Per la scelta del sistema di accumulo ci si riferisce alle batterie fornite da *European batteries*.

Module	Config.	Cells	Nominal Capacity	Nominal Energy	Nominal Voltage <sup>*)</sup>	Mass	Dimensions (mm) W x H x L
EBattery 80	2(16s2p)	64	84 Ah	8,6 kWh	102,4 V	82,2 kg	2(170 x 317 x 556)
EBattery 80	2(8s4p)	64	168 Ah	8,6 kWh	51,2 V	83,5 kg	2(170 x 317 x 556)
EBattery 80	2(4s8p)	64	336 Ah	8,6 kWh	25,6 V	83,4 kg	2(170 x 317 x 556)
EBattery 200	5(16s2p)	160	84 Ah	21,5 kWh	256,0 V	205,6 kg	5(170 x 317 x 556)
EBattery 200	5(8s4p)	160	168 Ah	21,5 kWh	128,0 V	208,6 kg	5(170 x 317 x 556)
EBattery 200	5(4s8p)	160	336 Ah	21,5 kWh	64,0 V	208,5 kg	5(170 x 317 x 556)
EBattery 1000	24(8s4p)	768	168 Ah	103,2 kWh	614,4 V	1010 kg	24(170 x 317 x 556)
EBattery 1000	24(4s8p)	768	336 Ah	103,2 kWh	307,2 V	1010 kg	24(170 x 317 x 556)

Tabella [2.1.3.d.]

Si calcolano i moduli che dovrebbero essere installati per soddisfare il valore di energia richiesto.

La potenza che il generatore d'emergenza deve erogare è pari a 533 kW. In base alle regolamentazioni contenute nel Rina Rules part C, si deve garantire l'alimentazione dei carichi per un determinato numero di ore. Per eseguire un raffronto oggettivo fra i due sistemi presi in esame, si considera, anche in questo caso, un numero di ore di funzionamento pari a 18. Il modulo scelto dovrà fornire una tensione compresa fra 700 V e 900 V. Si sceglie un modulo *Ebattery 200* con tensione nominale pari a 256 V. per ottenere il valore di tensione richiesto si installano tre moduli in serie per ottenere una tensione pari a  $V_{stringa} = 3 * 256 = 768 V$ .

$$E_{richiesta} = P_{emergenza} * n_{ore} = 533 * 18 = 9594 kWh$$

$$n_{moduli} = \frac{E_{richiesta}}{E_{modulo}} = \frac{9594}{21,5} = 446 \text{ moduli}$$

Siccome è stata ipotizzata l'installazione di tre moduli in serie, significa che in totale si dovranno avere circa 149 stringhe.

Ogni singolo modulo è composto da cinque sotto moduli disposti in serie ciascuno dei quali è caratterizzato da 32 celle (16 in serie e 2 stringhe in parallelo).

Dimensione sotto modulo *Ebattery200*:

lunghezza → 0,556 m

altezza → 0,317 m

profondità → 0,17 m

**volume occupato → 0,03 m<sup>3</sup>**

Calcolo del volume complessivo (ogni batteria è costituita da 5 sotto moduli):

$$V_{tot} = V * n_{sm} * n_{mod} = 0,03 * 5 * 446 = \mathbf{66,82 m^3}$$

$n_{sm}$  → numero sotto moduli

$n_{mod}$  → numero moduli

Peso del sistema di accumulo:

$$m_{tot} = m_{mod} * n_{mod} = 205,6 * 446 = \mathbf{91698 \text{ kg}}$$

Con dei rapidi e semplici conti si vede che non è possibile sostituire interamente il generatore d'emergenza con le batterie d'accumulatori poiché si ottengono dei volumi e dei pesi spropositati per un Megayacht. Una soluzione potrebbe essere quella di continuare a mantenere la generazione d'emergenza con motore Diesel, mentre le batterie consentirebbero di fronteggiare le variazioni d'energia per permettere, ai motori principali, un funzionamento costante (riduzione dei consumi). In definitiva le batterie, almeno per il momento, potrebbero essere utilizzate come supporto alla generazione principale e non a quella d'emergenza.

Se il generatore, e quindi anche il motore diesel, funzionasse a carico costante si ridurrebbero i consumi (minor costo del combustibile) come evidenziato nei seguenti calcoli:

	carico richiesto	consumo [l/h]	consumo [gal/h]
1	100%	145,1	38,3
2	75%	111,2	29,4
3	50%	78,5	20,7

Tabella [2.1.3.e.]

*N.B: i valori espressi in galloni sono riferiti all'unità U.S.*

$$1 \text{ U.S. liquid gallon} = 3,78 \text{ l}$$

Si valuta il consumo specifico per unità di carico richiesto ( $c_u$ ):

$$c_{u1} = \frac{C_{u1}}{\text{carico}\%} = \frac{145,1}{100} = 1,451 \frac{\text{l}}{\text{h}\%}$$

$$c_{u2} = \frac{C_{u2}}{\text{carico}\%} = \frac{111,2}{75} = 1,483 \frac{\text{l}}{\text{h}\%}$$

$$c_{u3} = \frac{C_{u3}}{\text{carico}\%} = \frac{78,5}{50} = 1,57 \frac{\text{l}}{\text{h}\%}$$

Il minimo valore di consumo è rilevato in corrispondenza del funzionamento 100% di carico. Ovviamente più ci allontaniamo dal punto di ottimo più aumenta il consumo specifico.

L'incremento di consumo passando dal primo al secondo caso è di circa dell'1% mentre, se si passa dal 100% a metà del carico, l'incremento di consumo è più evidente (8%). Al variare del regime di marcia si hanno variazioni di consumo ancora più significative.

#### 2.1.3.1. Considerazioni pratiche

Bisogna osservare che l'esempio è riferito ad un generatore d'emergenza cioè con valori di potenza e consumo ridotti rispetto a quelli riferiti alla generazione principale che nel complesso supera i 4 MW.

Se si riuscisse mediante l'accumulo a garantire una generazione costante si ridurrebbe, non solo la taglia dei generatori (non devono essere sovradimensionati per i picchi), ma anche il volume delle macchine e del relativo serbatoio.

L'idea di usare solo batterie/supercondensatori per la generazione d'emergenza attualmente è impossibile. In futuro, grazie ai progressi nell'ambito della trazione elettrica, non è detto che non si possano introdurre



gli accumuli anche in ambito navale. Affinché questo possa avvenire si dovranno utilizzare batterie con elevata densità di energia. Quelle utilizzate nell'esempio hanno valori di circa  $105 \frac{kWh}{kg}$ , quelli che si dovrebbero avere per un'applicazione pratica dovrebbero essere di circa  $1000 \frac{kWh}{kg} \div 1250 \frac{kWh}{kg}$ .

## 2.2. Sistema di distribuzione

In questo capitolo si studiano, con degli esempi pratici, le diverse modalità con le quali è possibile distribuire energia a bordo. Come già precedentemente visto, la distribuzione nelle navi AES avviene mediante dei cavi in AC la cui flessibilità d'installazione ha permesso una rapida affermazione in ambito navale. In particolare, riferendosi all'esempio del Megayacht, la distribuzione è resa particolarmente difficoltosa a causa della struttura della nave. La generazione, così come in tutte le navi, avviene nei ponti bassi (in totale ci sono quattro ponti nel megayacht); dal QEP i cavi dovranno risalire ai sottoquadri e infine alle utenze. Il problema è che il percorso di distribuzione non è lineare: ogni 2-3 metri si modifica il piano di posa causando ripetute torsioni dello stesso cavo. Oltre a spazi e condizioni di posa critiche, su una nave bisogna utilizzare cavi speciali che non propaghino l'incendio e che siano atossici. Per attraversare i vari compartimenti, in particolare quelli stagni, bisogna utilizzare opportuni sistemi di contenimento idrostatico. Tutti questi fattori concorrono a rendere particolarmente critica la distribuzione negli impianti elettrici navali e rendono più difficile introdurre cambiamenti significativi in questo settore anche se negli ultimi anni si sta diffondendo l'idea di sostituire il sistema di distribuzione in cavo in AC con un sistema sbarre in DC, consentendo l'eliminazione del QEP.

L'introduzione di un sistema di distribuzione in continua potrebbe risultare vantaggioso grazie ad una serie di fattori:

- Riduzione delle perdite grazie all'eliminazione dell'effetto pelle
- Trasmissione della sola potenza attiva: si ottiene una  $I_{DC}$  tanto minore rispetto alla  $I_{AC}$  quanto più piccolo è il valore del  $\cos\varphi$  dell'impianto in alternata
- Riduzione dei pesi e degli spazi da dedicare alla distribuzione
- Nel caso del sistema sbarre c'è la possibilità di eliminare il QEP
- Minor costo di manutenzione delle sbarre rispetto ai cavi
- Riduzione delle c.d.t.

L'impiego delle blindo è reso possibile grazie alle significative innovazioni:

- l'introduzione del battente idrostatico
- riduzione del carico d'incendio di almeno un ordine di grandezza rispetto alla soluzione in cavo.

L'idea è quella di costituire una dorsale primaria di sezione adeguata e delle prese intermedie per prelevare potenza nei vari punti di snodo del sistema elettrico con opportuni elementi di sezionamento. L'ipotesi di introdurre le blindo, seppur ancora teorica, viene analizzata nella prima parte del capitolo in cui si

confrontano pregi e difetti dei due sistemi (cavi e sbarre) in corrente alternata trifase. Nella seconda parte invece si studiano le differenze fra la distribuzione AC e DC nel caso in cui si utilizzassero solo le sbarre.

La trattazione si conclude con un esempio di calcolo della caduta di tensione in continua e in alternata per la dorsale di distribuzione primaria del megayacht; infine si riportano delle considerazioni sull'influenza dell'effetto pelle che verrebbe eliminato nel caso in cui si distribuisse in corrente continua.

### 2.2.1. Confronto in corrente alternata trifase fra distribuzione in cavo e sistema sbarre

Lo studio è condotto considerando una distribuzione in AC trifase. I parametri utilizzati sono riportati nelle tabelle dei costruttori per impianti navali ad alta potenza.

I cavi e le blindo dovranno essere dimensionati per trasmettere la potenza del generatore da 1042 kVA del Megayacht:

- $A = 1042 \text{ kVA}$
- $V = 690 \text{ V}$
- $I = \frac{A}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{1042 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 690} = 872 \text{ A}$

Tabelle pirelli marine cables [2.2.1.a.]

Cable n x mm <sup>2</sup>	Diameter of conductor approx *) mm	Maximum conductor resistance at +20 °C Ω/km	Current rating at +45 °C **) A	Nominal diameter over braiding mm	Nominal diameter approx mm	Weight of cable approx kg/km	Minimum bending radius mm
2 x 1,5	1,5	12,1	17	7,8	10,0	140	60
2 x 2,5	2,0	7,41	24	8,5	11,0	175	65
3 x 1,5 <sup>#</sup>	1,5	12,1	14	8,2	10,5	165	65
3 x 2,5 <sup>#</sup>	2,0	7,41	20	9,0	11,5	205	70
3 x 6	3,1	3,08	34	11,5	14,0	350	85
3 x 10	4,0	1,83	47	14,0	17,0	530	100
3 x 16	5,1	1,15	63	16,0	19,0	760	115
3 x 25 *)	4,9/8,1	0,734	84	19,5	23,0	1200	135
3 x 35 *)	5,8/9,5	0,529	102	22,0	25,5	1500	150
3 x 50 *)	6,6/10,8	0,391	126	23,5	27,5	1950	165
3 x 70 *)	8,0/13,0	0,270	158	27,0	31,5	2700	190
3 x 95 *)	9,4/15,2	0,195	193	30,5	35,0	3550	210
3 x 120 *)	10,5/17,1	0,154	224	33,0	38,0	4350	230
3 x 150 *)	11,6/18,8	0,126	256	37,5	42,5	5350	255

Parametri elettrici [2.2.1.b.]

1	2	3	4	5	6	7	8
Size n x mm <sup>2</sup>	Resistance at 20 °C max Ω/km	Resistance at 85 °C max Ω/km	Inductance approx mH/km	Reactance at 50 Hz approx Ω/km	Reactance at 60 Hz approx Ω/km	Impedance at 50 Hz, +85 °C approx Ω/km	Impedance at 60 Hz, +85 °C approx Ω/km
3 x 1,5	12,1	15,2	0,331	0,104	0,125	15,2	15,2
3 x 1,5 S	12,1	15,2	0,331	0,104	0,125	15,2	15,2
3 x 2,5	7,41	9,30	0,311	0,0976	0,117	9,30	9,30
3 x 2,5 S	7,41	9,30	0,311	0,0976	0,117	9,30	9,30
3 x 6	3,08	3,87	0,278	0,0873	0,105	3,87	3,87
3 x 10	1,83	2,30	0,264	0,0828	0,0994	2,30	2,30
3 x 16	1,15	1,44	0,253	0,0794	0,0953	1,45	1,45
3 x 25*)	0,734	0,922	0,282	0,0887	0,1065	0,926	0,928
3 x 35*)	0,529	0,664	0,273	0,0856	0,1028	0,670	0,672
3 x 50*)	0,391	0,491	0,264	0,0828	0,0994	0,498	0,501
3 x 70*)	0,270	0,339	0,254	0,0797	0,0956	0,348	0,352
3 x 95*)	0,195	0,245	0,252	0,0791	0,0950	0,257	0,263
3 x 120*)	0,154	0,193	0,246	0,0774	0,0929	0,208	0,215
3 x 150*)	0,126	0,158	0,245	0,0769	0,0923	0,176	0,183

- Conductor: Stranded conductor of plain annealed copper wires.
- Annealed: sector shaped conductor of plain copper wires (3 x 25 mm<sup>2</sup>...).
- Insulation: XLPE plastic (1,5...16 mm<sup>2</sup>) EPDM rubber (25 mm<sup>2</sup>...)
- Inner covering: Plastic, textile and/or woven glass tapes
- Armour: Braid of annealed copper wires
- Outer sheath: Grey polyolefine plastic, SHF1
- Rated voltage: 0.6/ 1 kV

Per quanto riguarda i condotti sbarre, si considera il catalogo *Zucchini high power*.

RAME										
		barratura singola						barratura doppia		
Corrente nominale	I <sub>n</sub> [A]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000	5000
Ingombro carcassa	L x H [mm]	130x130	130x130	130x130	130x170	130x170	130x220	130x380	130x440	130x480
Tensione di impiego	U <sub>i</sub> [V]	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Tensione di isolamento	U <sub>i</sub> [V]	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Frequenza	f [Hz]	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60
Corrente ammissibile di breve durata guasto trifase (1 s)	I <sub>kw</sub> [kA]rms	45	50	60	85	88	88	170	176	176
Corrente ammissibile di cresta guasto trifase	I <sub>k</sub> [kA]	95	110	132	187	194	194	374	387	387
Corrente ammissibile di breve durata di guasto monofase (1 s)	I <sub>kw</sub> [kA]rms	27	30	36	51	53	53	102	106	106
Corrente ammissibile di cresta guasto monofase	I <sub>k</sub> [kA]	57	66	79	112	116	116	224	232	232
Energia specifica ammissibile per guasto trifase	W [MA <sup>2</sup> s]	2025	2500	3600	7225	7744	7744	28900	30976	30976
Resistenza di fase	R <sub>φ</sub> [mΩ/m]	0,041	0,032	0,032	0,024	0,020	0,016	0,012	0,010	0,008
Reattanza di fase (50 Hz)	X [mΩ/m]	0,023	0,017	0,017	0,015	0,014	0,011	0,007	0,006	0,006
Impedenza di fase	Z [mΩ/m]	0,047	0,037	0,037	0,028	0,024	0,019	0,014	0,012	0,010
Resistenza di fase a equilibrio termico	R <sub>t</sub> [mΩ/m]	0,045	0,037	0,040	0,029	0,024	0,019	0,015	0,013	0,010
Resistenza di neutro	R <sub>n</sub> [mΩ/m]	0,041	0,032	0,032	0,024	0,020	0,016	0,012	0,010	0,008
Impedenza di fase a equilibrio termico	Z [mΩ/m]	0,050	0,041	0,043	0,033	0,028	0,022	0,016	0,014	0,012
Resistenza conduttore di protezione (PE 1)	R <sub>pe</sub> [mΩ/m]	0,125	0,125	0,125	0,113	0,113	0,101	0,075	0,069	0,065
Resistenza conduttore di protezione (PE 2)	R <sub>pe</sub> [mΩ/m]	0,036	0,036	0,036	0,028	0,028	0,023	0,014	0,012	0,011
Resistenza conduttore di protezione (PE 3)	R <sub>pe</sub> [mΩ/m]	0,050	0,050	0,050	0,041	0,041	0,033	0,021	0,018	0,017
Reattanza conduttore di protezione (50 Hz)	X <sub>pe</sub> [mΩ/m]	0,054	0,054	0,054	0,044	0,044	0,032	0,022	0,017	0,016
Resistenza anello di guasto (PE 1)	R <sub>g</sub> [mΩ/m]	0,170	0,162	0,165	0,142	0,137	0,120	0,090	0,082	0,075
Resistenza anello di guasto (PE 2)	R <sub>g</sub> [mΩ/m]	0,081	0,073	0,076	0,057	0,052	0,042	0,029	0,025	0,021
Resistenza anello di guasto (PE 3)	R <sub>g</sub> [mΩ/m]	0,095	0,087	0,090	0,070	0,065	0,052	0,036	0,031	0,027
Reattanza anello di guasto (50 Hz)	X <sub>g</sub> [mΩ/m]	0,077	0,071	0,071	0,059	0,058	0,043	0,029	0,023	0,022
Impedenza anello di guasto (PE 1)	Z <sub>g</sub> [mΩ/m]	0,186	0,177	0,179	0,154	0,149	0,128	0,094	0,085	0,078
Impedenza anello di guasto (PE 2)	Z <sub>g</sub> [mΩ/m]	0,111	0,102	0,104	0,082	0,078	0,060	0,041	0,034	0,030
Impedenza anello di guasto (PE 3)	Z <sub>g</sub> [mΩ/m]	0,122	0,112	0,114	0,092	0,087	0,068	0,046	0,039	0,035
Resistenza omopolare fase - N	R <sub>o</sub> [mΩ/m]	0,170	0,155	0,155	0,115	0,120	0,098	0,083	0,071	0,062
Reattanza omopolare fase - N	X <sub>o</sub> [mΩ/m]	0,159	0,151	0,151	0,114	0,098	0,065	0,056	0,055	0,042
Impedenza omopolare fase - N	Z <sub>o</sub> [mΩ/m]	0,233	0,216	0,216	0,162	0,155	0,118	0,100	0,090	0,075
Resistenza omopolare fase - PE	R <sub>o</sub> [mΩ/m]	0,507	0,429	0,429	0,331	0,283	0,221	0,177	0,178	0,144
Reattanza omopolare fase - PE	X <sub>o</sub> [mΩ/m]	0,201	0,177	0,177	0,143	0,150	0,124	0,111	0,094	0,086
Impedenza omopolare fase - PE	Z <sub>o</sub> [mΩ/m]	0,545	0,464	0,464	0,361	0,320	0,253	0,209	0,201	0,168
Fattore di caduta di tensione con carico distribuito ΔV = k · L · I <sub>n</sub> <sup>2</sup> · 10 <sup>-4</sup> [V]	cosφ = 0,70	41,3	33,0	34,6	27,1	23,5	18,5	13,2	11,5	9,8
	cosφ = 0,75	42,1	33,8	35,5	27,7	23,9	18,8	13,5	11,8	9,9
	cosφ = 0,80	42,8	34,5	36,3	28,1	24,2	19,1	13,8	12,1	10,0
	cosφ = 0,85	43,3	35,0	37,0	28,4	24,4	19,2	14,0	12,2	10,1
	cosφ = 0,90	43,4	35,3	37,3	28,5	24,4	19,2	14,1	12,3	10,1
	cosφ = 0,95	42,9	35,1	37,2	28,2	23,9	18,8	14,0	12,2	9,8
cosφ = 1,00	38,6	32,1	34,4	25,4	21,2	16,7	12,7	11,2	8,7	
Peso (PE 1)	p [kg/m]	28,9	32,6	32,6	41,8	47,9	60,6	79,0	93,4	116,7
Peso (PE 2)	p [kg/m]	38,4	42,1	42,1	54,2	60,3	76,8	103,4	122,3	148,6
Peso (PE 3)	p [kg/m]	32,0	35,7	35,7	45,8	51,9	65,9	87,0	102,8	127,1
Carico d'Incendio	[kWh/m]	4,5	5,5	5,5	8	8,2	10,5	16	19	21
Grado di protezione	IP	55	55	55	55	55	55	55	55	55
Classe di resistenza termica dei materiali isolanti		F	F	F	F	F	F	F	F	F
Perdite per effetto Joule a corrente nominale	P [W/m]	86	111	186	225	294	361	451	619	750
Temperatura Ambiente min/MAX	[°C]	-5/50	-5/50	-5/50	-5/50	-5/50	-5/50	-5/50	-5/50	-5/50

**Norme e Conformità:**  
IEC/EN 60439-1 & 2; DIN VDE 0660 500 & 502


**Prodotto Idoneo ai Climi Caldo umido Costante/Ciclico:**  
DIN IEC 68 part 2-3; DIN IEC 68 part 2-30

**Grado di Protezione:**  
IP55; linee di trasporto IPx7 disponibili con accessori su richiesta


**Isolamento e trattamento superficiale dei conduttori:**  
Conduttori isolati per tutta la lunghezza, alluminio ramato e stagnato

**Materiale Involucro condotto:**  
Lamiera 1,5mm di acciaio zincato preverniciato o acciaio INOX (disponibile su richiesta con verniciatura speciale e/o con spessore di 2mm)


In: corrente nominale riferita alla temperatura ambiente di 40°C  
ΔV: per il calcolo vedere pag. 97



(\*)  
PE 1  
Versione standard



(\*)  
PE 2  
Extra terra in RAME



(\*)  
PE 3  
Extra terra in ALLUMINIO

Tabella [2.2.1.c.]

### 2.1.1.1. Calcolo delle sezioni, dei pesi e degli ingombri

Un primo step per verificare quali fra i due sistemi di distribuzione risulti essere più vantaggioso è sicuramente quello di fare un confronto di volume occupato e di peso che su un'imbarcazione sono aspetti fondamentali e decisivi.

#### *Soluzione con cavi:*

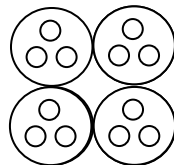
Siccome, nel nostro esempio, un singolo cavo è insufficiente a portare gli ampere richiesti, si sceglie di usare una distribuzione con cavi multipolari. Il criterio col quale si procede è quello di contenere da un lato il volume complessivo dei cavi che dovranno essere installati e dall'altro quello di ridurre al minimo il numero dei cavi in parallelo che dovranno essere utilizzati, in quanto, un numero eccessivamente elevato potrebbe portare, non solo ad una serie di disturbi e interferenze elettromagnetiche, ma anche ad un declassamento delle caratteristiche dei cavi per il fatto che sono presenti troppi circuiti adiacenti l'uno all'altro.

La scelta ottimale dipende anche dal valore di corrente nominale che si deve garantire. In questo caso una scelta di compromesso è rappresentata dal seguente cavo:  $3 * 120 \text{ mm}^2$ . La sua corrente nominale, pari a 224 A, è insufficiente per condurre gli 872 A che sono invece richiesti, pertanto saranno necessari 4 cavi in parallelo:  $n_{cavi} = \frac{I_n}{I_{cavo}} = \frac{872}{224} = 3,89 \rightarrow$  (si approssima a quattro). In realtà la corrente che il cavo può trasmettere sarà influenzata dal tipo di posa, dalla temperatura ambiente e dal numero di circuiti adiacenti.

- sezione occupata:  $S = n_{cavi} * (\pi * r_{tot}^2) = 4 * (\pi * 19^2) = 4537 \text{ mm}^2$

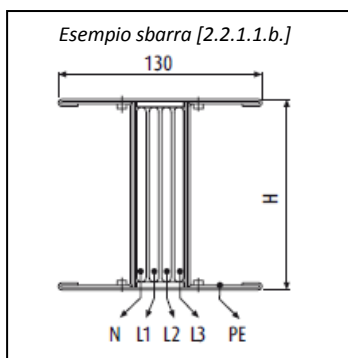
La sezione effettivamente occupata sarà maggiore di quello calcolato in quanto bisognerà considerare che per ogni generatore da 1042 kVA saranno necessari quattro cavi di sezione circolare che determineranno degli spazi non utilizzati.

*Esempio installazione cavi [2.2.1.1.a.]*



- Massa complessiva:  $m_{tot} = n_{cavi} * m_{unitaria} = 4 * 4,35 = 17,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$

#### *Soluzione con sbarre:*



A differenza del caso precedente i conduttori, anziché essere tre, sono quattro (in questo caso è presente anche il neutro). Questa situazione non porta ad una modifica dello studio poiché, come si può facilmente dedurre dall'immagine a fianco riportata, la sbarra del neutro possiede sia una massa che un volume nettamente inferiori rispetto alla struttura complessiva. Le dimensioni delle sbarre, come riportato in tabella, sono  $130 * 130 \text{ [mm}^2\text{]}$  per portate fino a 1250 A.

Per portare gli Ampere richiesti si utilizza un condotto sbarre in rame di portata pari a 1000 A.

- sezione occupata:  $S = n_{sbarre} * (L * H) = 1 * (130 * 130) = 16900 \text{ mm}^2$
- Massa complessiva:  $m_{tot} = n_{sbarre} * m_{unitaria} = 32,6 = 32,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$

Come emerge in maniera evidente dai calcoli, sia come sezione occupata e quindi volume, sia come massa, prevale la convenienza ad utilizzare i cavi anziché le sbarre. Si sottolinea che la sezione di  $16900 \text{ mm}^2$  non è quella effettivamente occupata dalle sbarre di rame, ma quella richiesta per l'installazione complessiva del condotto compreso il suo sostegno/isolamento.

Osservazione: la corrente trasportabile con le sbarre (1000 A) è maggiore rispetto a quella che si potrebbe garantire con quattro cavi in parallelo (896 A), questa 'lieve' differenza di dimensionamento dei sistemi di distribuzione però non riesce a giustificare la forte disparità di spazio e peso delle sbarre rispetto ai cavi.

#### 2.2.1.2. Parametri elettrici e valutazione dell'effetto Joule

*cavi in condizioni di equilibrio termico:*

- $r = 0,158 \Omega/\text{km}$
- $x_{50 \text{ Hz}} = 0,0774 \Omega/\text{km}$

Siccome i cavi multipolari utilizzati sono quattro, i valori sopra riportati sono da dividere per il numero degli stessi cavi:

- $r' = \frac{r}{n_{cavi}} = \frac{0,158}{4} = 0,0395 \Omega/\text{km}$
- $x'_{50 \text{ Hz}} = \frac{x_{50 \text{ Hz}}}{n_{cavi}} = \frac{0,0774}{4} = 0,01935 \frac{\Omega}{\text{km}}$

*Sbarre in condizione di regime termico:*

- $r = 0,045 \Omega/\text{km}$
- $x_{50 \text{ Hz}} = 0,023 \Omega/\text{km}$

Anche in questo caso le caratteristiche tecniche, sono a favore dei cavi che hanno valori di resistenza e reattanza minori rispetto alla soluzione con sbarre. Tutto questo si traduce non solo in una riduzione delle perdite per effetto joule (proporzionali ai parametri resistivi), ma anche ad una diminuzione delle cadute di tensione che permettono di fornire al carico un valore di tensione prossimo a quello nominale richiesto.

### 2.2.2. Confronto tra distribuzione in corrente continua e corrente alternata trifase con le sbarre

Il confronto fra le due tipologie di distribuzione è molto articolato in quanto bisogna tener conto di una serie di parametri elettrici e meccanici.

Lo studio viene eseguito fissando il valore di potenza da trasmettere. Fissata la tensione di esercizio trifase ( $V$  = valore della concatenata), quella in continua è stata assunta pari al valore massimo dell'alternata ( $\sqrt{2} * V$ ). Questa ipotesi è lecita se si pensa di adottare, per i due sistemi, il medesimo isolamento (quello in alternata dovrà ovviamente essere tarato sul valore di cresta della sinusoide e non sul valore efficace della concatenata). Per contro, la scelta di riferire i due sistemi alla medesima tensione d'isolamento diminuisce i vantaggi economici degli isolatori dato che ora devono essere della medesima taglia. In realtà il numero di quelli effettivamente utilizzati sarà minore in continua (minor costo) poiché si usano due conduttori anziché tre.

Prima di proseguire si sottolinea che lo studio è condotto ipotizzando un sistema di distribuzione a sbarre e il primo confronto che si sceglie di studiare è quello relativo al peso delle sbarre da impiegare. La scelta non è casuale in quanto un minor peso del materiale utilizzato comporterà non solo una riduzione dei costi ma anche degli ingombri (si riducono gli spazi occupati che su un'imbarcazione sono sempre molto limitati).

*Conduttori in corrente continua:*

corrente che circola:

$$I_{c.c.} = \frac{P}{\sqrt{2} * V}$$

Potenza dissipata:

$$\Delta P = 2 * R_L * I^2 = 2 * \rho * \frac{L}{S} * \frac{P^2}{2 * V^2}$$

Si esplicita il valore della sezione:

$$S = 2 * \rho * \frac{L}{\Delta P} * \frac{P^2}{2 * V^2}$$

Peso dei conduttori:

$$G_{c.c.} = 2 * L * \gamma * S = 2 * L * \gamma * 2 * \rho * \frac{L}{\Delta P} * \frac{P^2}{2 * V^2} = 2 * k$$

*Conduttori in corrente alternata trifase:*

corrente che circola:

$$I_{c.a.} = \frac{P}{\sqrt{3} * V * \cos\phi}$$

Apparentemente sembra che il valore di corrente in alternata sia inferiore a quello in continua. In realtà tutto dipende dal tipo di impianto considerato perché la diminuzione di corrente in alternata (dovuta alla presenza di  $\sqrt{3}$  al denominatore) è controbilanciata dal fattore di potenza. Il f.d.p. limite, dal punto di vista del valore di corrente che risulta conveniente alla distribuzione AC è pari a  $\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0,816$ ; al di sotto di tale valore  $I_{ac} < I_{ac}$ . Ovviamente questa differenza diviene sempre più marcata man mano che si riduce il fattore di potenza dell'impianto considerato.

Questo comporta sicuramente una riduzione delle perdite per effetto joule dell'impianto, che a parità di corrente, sono minore nel caso della continua poiché viene introdotto un coefficiente moltiplicativo pari a 2 anziché 3 impiegato nel caso dell'alternata.

Potenza dissipata:

$$\Delta P = 3 * R_L * I^2 = 3 * \rho * \frac{L}{S} * \frac{P^2}{3 * V^2 * \cos\varphi}$$

Sezione necessaria:

$$S = 3 * \rho * \frac{L}{\Delta P} * \frac{P^2}{3 * V^2 * \cos\varphi^2}$$

Peso dei conduttori:

$$G_{c.a.} = 3 * L * \gamma * S = 3 * L * \gamma * 3 * \rho * \frac{L}{\Delta P} * \frac{P^2}{3 * V^2 * \cos\varphi^2} = \frac{3 * k}{\cos\varphi^2}$$

Siccome il valore di fattore di potenza è una quantità sempre inferiore all'unità allora il peso dei conduttori in continua sarà sempre inferiore rispetto al peso di quelli in alternata trifase.

In particolare, anche nelle condizioni più sfavorevoli per la continua ( $\cos\varphi = 1$ ) si ottiene un peso dei conduttori in alternata maggiore del 50% rispetto a quelli che sarebbero necessari in continua. Questo vantaggio aumenta maggiormente se ipotizziamo condizioni di funzionamento reali, cioè un  $\cos\varphi < 1$ .

#### 2.2.2.1. Calcolo della caduta di tensione

Per eseguire valutazioni più precise in merito alla distribuzione in continua, bisogna studiare le ripercussioni elettriche sull'impianto navale.

Un aspetto importante è il valore della caduta di tensione che si manifesta lungo una linea al variare del sistema di distribuzione. In corrente continua il calcolo è molto semplice:

caduta di tensione:

$$\Delta U = R_L * I$$

Calcolo della resistenza:

$$R_L = \rho * \frac{2 * L}{S}$$

la lunghezza viene moltiplicata per due (occorre tener conto anche della c.d.t. del ritorno):

L → lunghezza della linea [m]

S → sezione della linea [ $mm^2$ ]

$\rho$  → resistività del materiale utilizzato [ $\frac{\Omega * mm^2}{m}$ ]

Quest'ultimo parametro dipende dalla temperatura:

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

$\rho_0$  → resistività del materiale riferita alla temperatura di riferimento (a 0°C vale circa 0,016 per il rame)

$\alpha$  → coefficiente di temperatura [ $^{\circ}C^{-1}$ ] (per il rame vale  $4,3 * 10^{-3}$ )

$\Delta\theta$  → variazione di temperatura fra quella di funzionamento e quella di riferimento

La temperatura massima di funzionamento, per i conduttori, può essere assunta pari a quella che può essere raggiunta dall'isolamento dei cavi.

In corrente alternata, si utilizza una formula approssimata denominata caduta di tensione industriale.

L'errore introdotto è trascurabile fintanto che si considerano piccole cadute di tensioni percentuali.

Caduta di tensione con la formula approssimata:

$$\Delta U = k * I * L * (r_L * \cos\varphi + x_L * \sin\varphi)$$

$k \rightarrow$  coefficiente che vale  $\sqrt{3}$  in corrente alternata trifase

$I \rightarrow$  corrente di linea




$L \rightarrow$  lunghezza della linea presa in esame

$r_L \rightarrow$  resistenza unitaria di linea (calcolata con la stessa procedura esplicitata in corrente continua)

$x_L \rightarrow$  reattanza unitaria di linea (ricavata dalle tabelle)

$\varphi \rightarrow$  angolo di sfasamento fra tensione e corrente di linea

### 2.2.2.2. Esempio di calcolo

		HR C1 [3L+N 100%+PE (involucro)]					HR C2 [3L+N 50%+PE (involucro)]				
		barratura singola					barratura doppia				
Corrente nominale (installazione standard)		In [A]	1000	1250	1600	2000	2500	3000	3200	4000	5000
Portata per installazione differente		In [A]	700	875	1120	1400	1575	2100	2240	2800	3500
Ingombro condotto		b x H [mm]	235x151	235x171	235x181	235x221	235x251	340x181	340x181	340x221	340x271
Tensione di impiego/isolamento		Ue [V]	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Frequenza		f [Hz]	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60
Corrente ammissibile di breve durata per guasto trifase (1s)		I <sub>sc</sub> [kA]rms	40	50	50	60	70	90	90	90	100
Corrente ammissibile di cresta guasto trifase		I <sub>sc</sub> [kA]	84	105	105	132	154	198	198	198	220
Corrente ammissibile di breve durata per guasto monofase (1 s)		I <sub>sc</sub> [kA]rms	24	30	30	36	42	54	54	54	60
Corrente ammissibile di cresta guasto monofase		I <sub>sc</sub> [kA]	50	63	63	76	88	119	119	119	132
Energia specifica ammissibile per guasto trifase		PI [MA <sup>2</sup> s]	1600	2500	2500	3600	4900	8100	8100	8100	10000
Resistenza di fase a 20° C		R <sub>20</sub> [mΩ/m]	0,032	0,029	0,028	0,021	0,016	0,014	0,012	0,009	0,007
Resistenza del neutro a 20° C		R <sub>20</sub> [mΩ/m]	0,032	0,029	0,028	0,021	0,016	0,028	0,025	0,019	0,013
Reattanza di fase		X [mΩ/m]	0,097	0,076	0,074	0,074	0,040	0,031	0,031	0,026	0,023
Reattanza di neutro		X <sub>n</sub> [mΩ/m]	0,097	0,076	0,074	0,074	0,040	0,062	0,062	0,052	0,046
Resistenza di fase a equilibrio termico		R <sub>t</sub> [mΩ/m]	0,043	0,040	0,038	0,029	0,021	0,019	0,017	0,013	0,009
Resistenza conduttore di protezione		R <sub>pe</sub> [mΩ/m]	0,119	0,112	0,109	0,098	0,078	0,091	0,091	0,084	0,075
Reattanza conduttore di protezione		X <sub>pe</sub> [mΩ/m]	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,110	0,110	0,110	0,110
Resistenza anello di guasto fase-Pe		R <sub>0</sub> [mΩ/m]	0,161	0,152	0,147	0,126	0,099	0,110	0,108	0,096	0,084
Reattanza anello di guasto fase-Pe (50 Hz)		X <sub>0</sub> [mΩ/m]	0,227	0,206	0,204	0,204	0,170	0,141	0,141	0,136	0,133
Resistenza anello di guasto fase-neutro		R <sub>0</sub> [mΩ/m]	0,074	0,069	0,066	0,050	0,037	0,047	0,041	0,031	0,022
Reattanza anello di guasto fase-neutro (50 Hz)		X <sub>0</sub> [mΩ/m]	0,227	0,206	0,204	0,204	0,170	0,172	0,172	0,162	0,156
Fattore di caduta di tensione con carico distribuito ΔV = k·I <sub>a</sub> ·10 <sup>-4</sup> [V]	k [V/m/A]10 <sup>-4</sup>	cosφ = 0,70	85,5	71,1	68,9	63,1	37,5	30,7	29,3	23,6	19,6
		cosφ = 0,75	83,3	69,3	67,2	60,9	36,6	30,2	26,6	23,0	18,9
		cosφ = 0,80	80,0	67,0	64,9	58,3	35,4	29,3	27,7	22,2	18,0
		cosφ = 0,85	75,7	63,9	61,8	54,8	33,7	28,2	26,4	21,0	16,9
		cosφ = 0,90	68,9	59,6	57,6	50,2	31,5	26,6	24,7	18,6	15,6
		cosφ = 0,95	61,4	53,2	51,4	43,5	28,2	24,0	22,1	17,3	13,4
		cosφ = 1,00	37,0	34,4	33,0	24,7	18,2	16,5	14,5	10,8	7,6
Peso		p [kg/m]	34,2	36,4	37,7	46,5	60,3	59,0	64,6	81,0	108,2
Carico d'Incendio		[kWh/m]	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	6,6	6,6	6,6	6,6
Grado di protezione (CEI EN60529)		IP	30-31	30-31	30-31	30-31	30-31	30-31	30-31	30-31	30-31
Perdite per effetto Joule a corrente nominale		P [W/m]	128	186	293	343	395	515	513	601	660



Si vuole valutare con un esempio pratico le differenti c.d.t. che si ottengono fra la distribuzione in continua e quella in alternata.

Ipotesi:

- sistema di distribuzione con blindo sbarre.
- La c.d.t. è calcolata su un percorso di 50 m fra la generazione e il quadro elettrico principale.
- flusso di potenza trasmesso è pari a 5,33 MVA.

Si calcolano le cadute di tensione lungo la linea di distribuzione primaria del Megayacht. Il valore della potenza da trasmettere è pari alla somma di quella generata e tensione pari a 690 V.

$$A_n = 1042 * 4 + 581 * 2 = 5330 \text{ kVA (in totale ci sono sei generatori)}$$

*Primo caso: corrente alternata trifase*

$$I = \frac{A}{\sqrt{3} * V} = \frac{5,33 * 10^6}{\sqrt{3} * 690} = 4460 \text{ A}$$

Si sceglie una sbarra di 5000 A con le seguenti caratteristiche:

$$r_L = 0,007 \frac{m\Omega}{m} \text{ a } 20^\circ\text{C}$$

$$x_L = 0,023 \frac{m\Omega}{m}$$

si riporta la resistenza alla temperatura di funzionamento assunta pari a 100°C

$$r'_L = r_L * (1 + \alpha * \Delta\theta) = 0,007 * (1 + 0,0043 * 80) = 0,0095 \frac{m\Omega}{m}$$

Calcolo della caduta di tensione in trifase: si considera un fattore di potenza pari a 0,8 che è quello di generazione.

$$\Delta V = kIL * (r'_L * \cos\varphi + x_L * \sin\varphi) = \sqrt{3} * 4460 * 50 * (0,0095 * 0,8 + 0,023 * 0,6) * 10^{-3} = 8,27V$$

c.d.t. in percentuale:

$$\Delta V\% = \frac{\Delta V}{V} * 100 = \frac{7,76}{690} * 100 = 1,19\%$$

*Secondo caso: corrente continua*

La tensione del sistema in c.c. si assume pari al valore massimo della tensione in c.a. del caso precedente:

$$V_{c.c.} = \sqrt{2} * V = \sqrt{2} * 690 = 976 \text{ V}$$

La tensione di isolamento delle sbarre riportate nella tabella è pari a 1000 V, questo significa che la distribuzione in continua può essere effettuata ad un valore di tensione superiore ( $\sqrt{2} * 1000$ ). Il livello di tensione al quale si riferiscono i calcoli è 976 V, in quanto consente una valutazione più razionale delle c.d.t. rilevate.

Si sottolinea, prima di procedere con il calcolo della corrente, che il flusso di potenza considerato è pari a  $4 * 10^6 \text{ MW}$ ; si considera solo la potenza attiva prodotta in quanto è la sola che può essere trasmessa in corrente continua.

Calcolo della corrente:

$$I_{c.c.} = \frac{P}{V_{c.c.}} = \frac{4,264 * 10^6}{976} \approx 4369 \text{ A}$$

Il valore della resistenza si ipotizza pari a quello in alternata riportata alla temperatura di riferimento:

$$r'_L = 0,0095 \frac{m\Omega}{m}$$

Caduta di tensione:

$$\Delta V_{c.c.} = 2 * L * r'_L * I_{c.c.} = 2 * 50 * 0.0095 * 10^{-3} * 4369 = 4,16 V$$

c.d.t. percentuale:

$$\Delta V\% = \frac{\Delta V}{V_{c.c.}} * 100 = \frac{4,16}{976} * 100 \approx 0.43\%$$

Nel calcolo della caduta di tensione non si considera il valore della reattanza che doveva essere considerato in alternata.

Il contributo di reattanza e resistenza, come riportato in tabella, diminuisce all'aumentare della sezione. Con sezioni elevate, a causa delle elevate correnti trasmesse, il decremento della componente resistiva è più marcato di quella reattiva. il contributo reattivo prevale su quello resistivo.

Nonostante la reattanza nel calcolo della c.d.t. alternata sia moltiplicata per 0,6, il valore complessivo ( $x_L * 0,6$ ) sarà sempre maggiore al decremento subito dal termine resistivo ( $0,2 * r_l$ ).

Se si considera che la corrente trasmessa in continua è minore (a parità di potenza) di quella in alternata allora il valore della sua caduta di tensione è normale che sia minore. L'unico coefficiente che favorisce l'alternata è il valore  $\sqrt{3}$  rispetto al parametro 2 utilizzato in continua. Questo elemento da solo non riporta il valore della c.d.t. in continua a livello dell'alternata.

In definitiva:  $\Delta V_{DC} < 50\% \Delta V_{AC}$

*Osservazioni:* In alternata il valore della caduta di tensione è abbondantemente al di sotto del limite del 4% imposto dalla normativa, in continua si riesce ad ottenere un valore ancor più contenuto che si traduce in una maggiore qualità del servizio.

### 2.2.2.3 Incidenza dell'effetto pelle per conduttori cilindrici

Uno dei possibili vantaggi nella distribuzione in DC è sicuramente l'eliminazione dell'effetto pelle che in questo paragrafo viene riferito ad un conduttore cilindrico omogeneo anche se analoghe considerazioni possono essere fatte per le blindo sbarre.

Uno dei possibili vantaggi nella distribuzione in DC è sicuramente l'eliminazione dell'effetto pelle. Se da un punto di vista teorico questo fenomeno già a 50 Hz è presente, bisogna capire e valutare gli effettivi vantaggi passando ad una distribuzione in continua.

La distribuzione uniforme della densità di corrente (J) all'interno del conduttore rende minimo il valore della resistenza. Solo in corrente continua la relazione V-I è rappresentabile da una retta con pendenza costante, questo vuol dire che in DC la resistenza del cavo assume un valore costante al variare delle condizioni di esercizio.

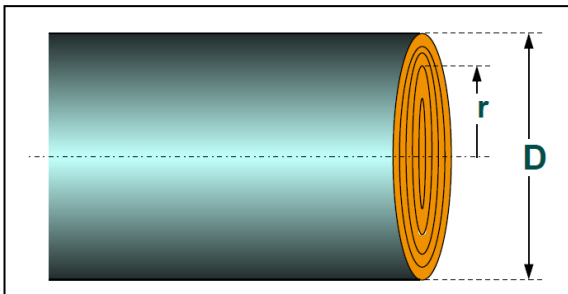
In corrente alternata, invece, il valore della densità di corrente è influenzato dal campo magnetico generato dalla stessa corrente che attraversa il cavo: la densità di corrente è variabile nella sezione del conduttore. Si

può in tal caso ricavare il valore di  $R_{AC}$  sul valore calcolato o misurato delle perdite in corrente alternata →

$$R_{AC} = \frac{P_{AC}}{k \cdot I^2}$$

K: coefficiente di valore pari a 2 o 3 a seconda che si consideri una distribuzione in monofase (2 fili) o trifase (3 fili).

Il conduttore, come rappresentato in figura, viene suddiviso in tanti conduttori coassiali elementari di area uguale, isolati fra loro e elettricamente in parallelo.



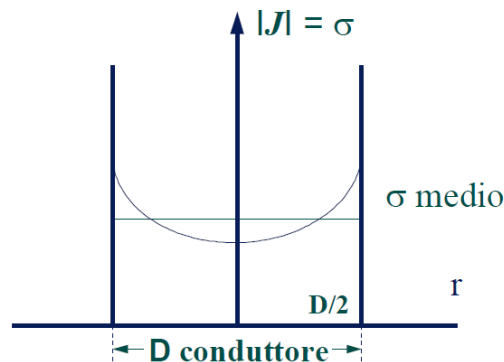
Esempio di distribuzione della corrente [2.2.2.3.a.]

La distribuzione della corrente non uniforme è dovuta alla variabilità del parametro induttivo. L'induttanza diminuisce passando dai conduttori elementari posti vicino all'asse ai conduttori elementari situati vicino al bordo del cilindro.

La variabilità dell'induttanza al variare del punto del conduttore considerato è legata al flusso concatenato.

Il flusso è massimo per i conduttori elementari centrali ed è minimo per quelli più esterni.

In definitiva la corrente tenderà a fluire nelle zone che offriranno un valore di impedenza più basso e cioè passerà prevalentemente nelle zone di periferia. La disuniformità della corrente è tanto più accentuata quanto più elevato è il valore della reattanza e cioè la frequenza di alimentazione del circuito.



Distribuzione della densità di corrente in un conduttore cilindrico in corrente alternata [2.2.2.3.b.]

Parametri che maggiormente influenzano l'effetto pelle:

- **Frequenza:** All'aumentare di  $f$ , a parità di conduttore considerato, aumenta il peso della reattanza del circuito rispetto al valore di  $R_{DC}$  che rimane inalterato.
- **Resistività:** all'aumentare della resistività  $\rho$  del materiale (per esempio dovuto ad un incremento della temperatura di lavoro) il contributo di  $R_{DC}$  aumenta rispetto al valore di  $X$  (attenuazione dell'effetto pelle).
- **Permeabilità magnetica:** a parità di caduta di tensione magnetica, al crescere di  $\mu$  aumenta il valore del flusso e quindi anche dell'induttanza. Si peggiora l'effetto pelle.

Per studiare il fenomeno dell'effetto pelle bisogna considerare lo spessore di penetrazione del materiale:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 * \rho}{2 * \pi * f * \mu}} = 9,39 \text{ mm}$$

$\rho \rightarrow$  resistività del rame  $17,4 * 10^{-3} \Omega * mm$

$f \rightarrow$  frequenza di alimentazione 50 Hz

$\mu \rightarrow$  permeabilità magnetica del vuoto  $4 * \pi * 10^{-7} \frac{H}{m}$

Calcolo della resistenza in corrente alternata alla frequenza di 50 Hz:

$$R_{AC} = R_{DC} * \left(1 + \frac{1}{48} * \left(\frac{r}{\delta}\right)^4\right)$$

Tipicamente negli impianti navali vengono utilizzati più cavi multipolari in parallelo per poter collegare il generatore al quadro elettrico principale (QEP). Una sezione realistica in funzione della quale eseguire il calcolo, è quella di considerare conduttori con sezione pari a  $120 \text{ mm}^2$  (il raggio corrisponde a circa  $6,18 \text{ mm}$ ).

Si calcola il termine fra parentesi per valutare l'incremento subito dalla resistenza a causa dell'effetto pelle:

$$\left(1 + \frac{1}{48} * \left(\frac{6,18}{9,39}\right)^4\right) = 1,0039 * 10^{-3}$$

Un incremento del 4‰ del valore di resistenza è molto contenuto, pertanto a 50 Hz la disuniforme distribuzione della corrente dovuto all'effetto pelle si può ritenere del tutto trascurabile.

### 2.3. Propulsione elettrica

La terza parte dello studio dell'impianto elettrico del Megayacht riguarda il sistema di propulsione. L'azionamento dell'elica, nella soluzione AES, avviene mediante un motore elettrico (sincrono) che è calettato all'albero senza l'interposizione di giunti meccanici. Il controllo è eseguito da un drive AC/AC con collegamento DC-link.

Con l'introduzione della distribuzione in continua si può pensare di alimentare direttamente il motore con un solo stadio (inverter) risparmiando volume, peso e costo del drive rispetto alla soluzione attualmente adottata. La riduzione dei componenti statici per il controllo della propulsione determina una riduzione di calore dissipato: saranno necessari sistemi di raffreddamento sottodimensionati riducendo anche le dimensioni del locale per l'installazione dei drives. In realtà grazie ad un sistema blindo in continua si può pensare di utilizzare direttamente dei motori DC eliminando lo stadio di inverter del sincrone. Quest'idea viene analizzata nel paragrafo successivo che permette di evidenziare pregi e difetti della soluzione offerta dal motore DC e AC e dai rispettivi drives di alimentazione, i cui principali vantaggi possono essere così riassunti:

- Risparmio di energia: è possibile controllare la velocità e la coppia del motore in funzione del tipo di funzionamento richiesto.

- Migliore controllo: i drives impiegati consentono di raggiungere valori di velocità e coppia desiderati mantenendo elevati standard di precisione. Si aumenta il livello di qualità e manovrabilità dell'azionamento.
- Ridotta manutenzione: la capacità di variare velocità e coppia porta a minor vibrazioni/consumi: si diminuisce la probabilità di rotture delle parti meccaniche (minor sollecitazioni)
- Sistema più efficiente: con l'introduzione dei convertitori si possono eliminare ingranaggi e giunti meccanici che portano non solo ad una ridotta affidabilità del sistema, ma anche ad un maggior costo di manutenzione oltre che ad elevate vibrazioni e rumorosità. Si eliminano inoltre tutti i dispositivi di avviamento tradizionali. La corrente d'avviamento viene limitata in modo più efficiente oltre ad ottenere buone caratteristiche allo spunto.

### 2.3.1. Confronto fra propulsione DC e AC

Con lo sviluppo dei controllori digitali (microprocessore) sono stati introdotti una serie di azionamenti in corrente alternata raggiungendo i livelli di prestazioni del controllore DC.

Il mercato degli AC drives, rispetto a quello in continua, ha subito negli ultimi anni una forte crescita. Si vogliono ora valutare le differenti caratteristiche dei due azionamenti.

Per eseguire il confronto si considerano i seguenti parametri:

- Costo totale del sistema VSDs (variable speed drives)
- Costo di manutenzione
- Livello di efficienza
- Spazio occupato
- Risposta dinamica
- Dissipazione del sistema di controllo
- EMC (electromagnetic compatibilità)
- Riduzione dei consumi e dell'inquinamento

Ai fini dello studio si considera, per gli azionamenti DC, un motore a eccitazione indipendente esterna, mentre per gli azionamenti AC, si considerano convertitori a modulazione della larghezza d'impulso (PWM) che alimentano motori asincroni trifasi.

Prima di addentrarsi nel confronto bisogna sottolineare che la soluzione DC, che prevede un motore a corrente continua, presenta inevitabilmente una serie di svantaggi:

- Presenza delle spazzole (contatti striscianti). Col tempo si usurano (devono essere sostituite periodicamente); inoltre può nascere il fenomeno della scintillazione quando le spazzole commutano tra due diversi anelli collettori soprattutto se deve essere trasmessa una elevata potenza al motore.
- Velocità massima limitata
- Problemi di robustezza dovuti alla presenza del gruppo collettore-spazzole

- Bassa coppia/potenza specifica

Nonostante questi difetti, il motore in continua è ancora largamente diffuso nelle applicazioni industriali grazie ad un controllo semplice, economico e preciso; inoltre con le nuove tecnologie è possibile utilizzare spazzole che hanno un numero di ore di funzionamento (vita utile) variabile fra le 7000 e le 12000 ore.

Per quanto riguarda il motore AC, si evidenziano le seguenti caratteristiche:

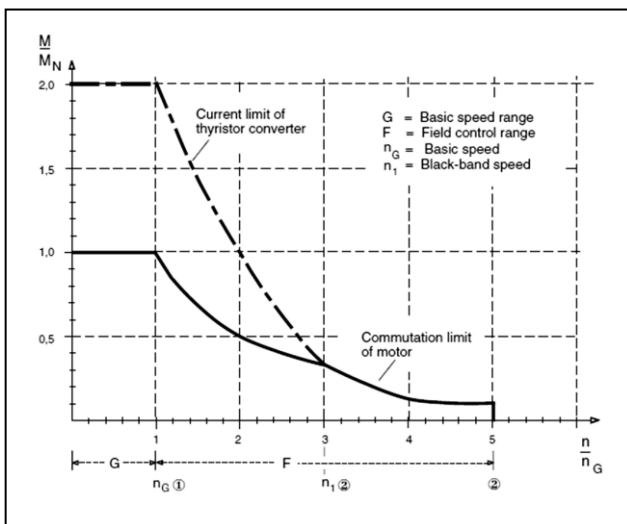
Svantaggi:

- Perdite rotoriche
- Basso rendimento sotto carico pesante
- Scorrimento sempre presente
- Controllo costoso

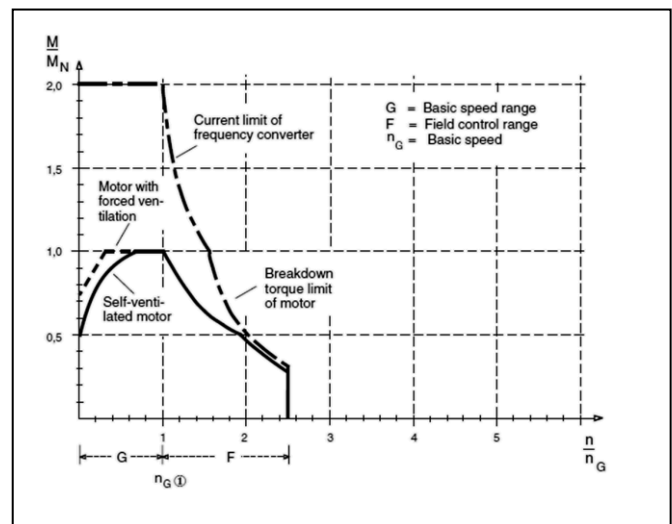
Vantaggi:

- Manutenzione praticamente assente
- Motore robusto
- Elevata potenza specifica
- Poco costoso
- Costruzione relativamente semplice
- È in grado di sopportare sovraccarichi

DC DRIVE (torque) [2.3.1.a.]



AC DRIVE (torque) [2.3.1.b.]



Le caratteristiche dei motori utilizzati sono riportate nella tabella 2.3.1.c. in cui si evidenziano le principali caratteristiche:

- Momento d'inerzia
- Dimensioni albero (riportate in mm)
- Peso in funzione del grado di protezione

Tabella [2.3.1.c.]

Example	M <sub>N</sub> Nm	P kW	n rpm	DC Motor					AC Motor			
				DC Motor Type	J <sub>rotor</sub> kgm <sup>2</sup>	Shaft height H	Weight kg		AC Standard Motor Type	J <sub>rotor</sub> kgm <sup>2</sup>	Shaft height H	Weight kg (IP54)
1	71	15	2000	DMP112-4L	0.05	112	110	115 ①	180M4	0.161	180	175
2	579	125	2000	DMP180-4LB	0.69	180	455	575 ②	315SMA4	2.30	315	870
3	1570	329	2000	DM1225S	3.00	225	1032	1252 ②	355SMA4	8.20	355	1800
4	3565	560	1500	DMA+315M	10.68	315	2100	2595 ②	450LG4	25.00	450	3980

Come si vede dai valori riportati nella tabella le dimensioni dell'albero, così come il momento d'inerzia, sono più contenute nel caso DC rispetto al motore AC. Questo influenza profondamente il comportamento dinamico della macchina oltre che il tempo di risposta alle perturbazioni.

A titolo di esempio si esegue il calcolo del tempo di avviamento con il motore DC/AC riportati nella prima riga della tabella:

*momento d'inerzia delle masse*

ciascuna particella di un corpo in rotazione possiede una certa energia cinetica, la somma di queste energie cinetiche infinitesime fornisce quella totale del corpo:

$E_c = \frac{1}{2} * \int r^2 * dm * \omega^2$  in cui  $\int r^2 * dm$  è il momento d'inerzia J. La massa elementare più conveniente per il calcolo è costituita da una guaina cilindrica di spessore infinitesimo dr, di raggio r, di altezza L e densità  $\delta$ :

$V = \pi * r^2 * L \rightarrow dm = \delta * dv = \delta * \pi * L * 2 * r * dr$ , per un cilindro pieno si otterrà:

$$J = \int_0^R r^2 * dm = 2 * \delta * \pi * L \int_0^R r^3 * dr = 2 * \delta * \pi * L * \frac{R^4}{4} = \frac{1}{2} * \delta * \pi * L * R^2 * R^2 = \frac{1}{2} * M * R^2$$

J → momento d'inerzia [kg \* m<sup>2</sup>]

M → massa [kg]

R → raggio del cilindro [m]

tempo di avviamento:

$$t_a = \frac{(J_{mot} + J_{est}) * \Delta n}{M_A * 9,55} \text{ [s]}$$

9,55 è il coefficiente di equivalenza della velocità di rotazione del motore e permette di passare da  $\frac{\text{giri}}{\text{min}}$  a  $\frac{\text{rad}}{\text{s}} \rightarrow \frac{2\pi}{60}$  ma siccome è riportato al denominatore si deve ricavare l'inverso  $\rightarrow \frac{2\pi}{60} \cong 9,55 \text{ rad/s}$

$\Delta n$  → variazione di velocità che corrisponde alla velocità nominale del motore [giri/min]

$M_A$  → coppia accelerante che corrisponde a quella nominale [N\*m]

*caratteristiche motore DC:*

$J_{mot}$  → 0,05 kg \* m<sup>2</sup> → momento d'inerzia del motore in DC riportato nella tabella 2.3.1.c.

$J_{est}$  → 0,15 kg \* m<sup>2</sup> → momento d'inerzia ipotizzato della massa calettata sull'albero motore

$M_A$  → 71 N\*m

$\Delta n = 2000 \text{ giri/min}$

$$t_a = 0,59 \text{ s}$$

Caratteristiche motore AC:

$J_{mot} \rightarrow 0,161 \text{ kg} * \text{m}^2$  -> momento d'inerzia del motore in AC riportato nella tabella 2.3.1.c.

$J_{est} \rightarrow 0,15 \text{ kg} * \text{m}^2$  -> momento d'inerzia ipotizzato della massa calettata sull'albero motore

$$M_A \rightarrow 71 \text{ N*m}$$

$$\Delta n = 2000 \text{ giri/min}$$

$$t_a = 0,917 \text{ s}$$

L'inerzia del motore in continua è ridotta rispetto ai motori in AC, in particolare a fronte di variazioni di velocità è possibile raggiungere il regime in tempi ridotti.

L'applicazione degli AC drives è fortemente consigliata per tutti quei luoghi di lavoro in cui il motore lavorerebbe in condizioni ambientali critiche.

Punto di forza degli azionamenti DC è sicuramente il peso e le dimensioni ridotte rispetto a quelli in alternata oltre al fatto che i motori in AC hanno un grado di protezione (IP 54) maggiore rispetto alla soluzione in continua (IP23) e questo porta ad un ulteriore incremento di peso e di dimensioni della soluzione AC.

- IP23: protezione contro la penetrazione di corpi estranei con un diametro superiore a 12 mm. Protezione contro gocce d'acqua con incidenza di 60°.
- IP54: Protezione totale alla penetrazione di corpi solidi. Protezione contro la penetrazione di liquidi, gocce, vapori o spruzzi in qualsiasi direzione. La penetrazione di polveri e liquidi non deve danneggiare l'apparecchiatura.

Un'ulteriore differenza fra le due tipologie di motore si ha quando si introduce la classe d'isolamento.

La classe di isolamento di un motore elettrico dipende dalla qualità dei materiali isolanti che vengono utilizzati; permette di stabilire la massima temperatura ammissibile, durante il funzionamento della macchina, per evitare il suo danneggiamento. I motori DC sono realizzati con una classe d'isolamento H, mentre quelli in alternata hanno una classe pari a B. I motori AC hanno un'efficienza maggiore rispetto a quelli in continua.

Definizione delle classi di isolamento dei motori:

- Classe E:  $T_{max} = 75^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$
- Classe B:  $T_{max} = 80^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$
- Classe F:  $T_{max} = 100^\circ\text{C} \pm 15^\circ\text{C}$
- Classe H:  $T_{max} = 125^\circ\text{C} \pm 15^\circ\text{C}$

Questi valori sono definiti con una temperatura ambiente pari a 40°C. Se il valore della temperatura reale fosse superiore a quella ipotizzata, allora la potenza nominale del motore deve essere decrementata di un valore di circa il 12% ad ogni innalzamento della temperatura ambiente di 10 °C.



Dallo studio condotto sui pregi/difetti dei motori DC e AC e dai relativi azionamenti si può affermare che la scelta migliore non è univoca, ma varia a seconda della situazione nella quale ci si trova ad operare.

Nelle applicazioni navali, la scelta di un azionamento in alternata diventa obbligata, non tanto per il funzionamento del convertitore, quanto per i pregi del motore asincrono. Con l'assenza dei contatti striscianti si riduce notevolmente il pericolo di incendio/esplosione che su un'imbarcazione è un requisito fondamentale. Inoltre, a causa dei ridotti spazi messi a disposizione per le macchine si cercherà di ridurre al minimo la manutenzione; questa esigenza è soddisfatta con la soluzione in alternata (motore semplice e robusto).

L'introduzione delle nuove tecniche di controllo permettono, anche al motore AC, dei tempi di controllo ridottissimi come per l'azionamento in continua. Questo è stato reso possibile grazie allo sviluppo dell'elettronica e dei sistemi a microprocessore che sono stati introdotti su scala industriale a partire dagli anni novanta.

### 2.3.2. Convertitori utilizzati per la propulsione principale del Megayacht ACS 800-07LC

In questo capitolo si studiano le caratteristiche della propulsione elettrica principale attualmente adottata nel megayacht. La logica di controllo che viene illustrata è valida anche per tutti gli altri azionamenti AC/AC con collegamento DC-link (ad esempio per il bow-thruster). La nuova architettura del Megayacht (con distribuzione DC) si limita ad eliminare, come precedentemente annunciato, lo stadio raddrizzatore d'ingresso, mantenendo identica la logica di controllo.

Per controllare i motori di propulsione si utilizza un azionamento in AC con logica DTC (Direct Torque Control). Questa soluzione rappresenta oggi una delle migliori logiche da implementare per il controllo a velocità variabile in corrente alternata. Inizialmente le prestazioni migliori, quali ad esempio rapide risposte di coppia e precise variazioni di velocità, erano ottenute con gli azionamenti in DC, che presentavano però l'inconveniente di dover usare dei motori in continua: poco robusti, costosi e soggetti a manutenzione frequente.

L'azionamento utilizzato in alternata consente di eseguire un controllo diretto di coppia agendo direttamente sulle sue variabili di controllo che sono:

- Coppia del motore
- Flusso di magnetizzazione

La peculiarità principale di questo controllo è l'assenza del modulatore e dell'encoder/tachimetrica. Questo comporta un risparmio di costo oltre che un incremento di affidabilità: il numero dei componenti è drasticamente ridotto. L'assenza del modulatore, oltre ad una riduzione della complessità elettrica dell'azionamento, consente di velocizzare la comunicazione dei segnali tensione/frequenza.

Per un corretto funzionamento della tecnologia DTC sono necessari due parametri fondamentali:

- Hardware molto veloce per elaborare i segnali digitali (DSP)
- Modello matematico del motore avanzato

L'azionamento sopra descritto presenta le seguenti prestazioni dinamiche:

- *Risposta di coppia.* Data una variazione del riferimento nominale di coppia pari al 100%, l'azionamento può raggiungere il valore specificato in 1-2 ms (al di sotto dei 40 Hz), a differenza del controllo vettoriale con encoder e dell'azionamento in DC che prevedevano dei tempi con un ordine di grandezza superiore (si passa ad oltre 100 ms nel caso di controllo PWM ad anello aperto).
- *Controllo preciso della coppia alle basse frequenze.* La velocità può essere controllate fino a frequenze inferiori a 0,5 Hz si garantisce un valore di coppia fino al 100% fino a velocità nulla.
- *Ripetibilità della coppia.* L'azionamento è in grado, a fronte del medesimo segnale di riferimento di coppia, di assicurare una ripetibilità dell'1-2 % della coppia nominale sull'intero campo di velocità.
- *Precisione statica di velocità.* In presenza di carico costante l'errore di velocità, fra quella di riferimento e quella effettiva, è pari al 10% dello scorrimento del motore.
- *Precisione dinamica in velocità.* Tale valore è 0,3-0,4 % di secondi e corrisponde all'integrale della variazione di velocità quando viene applicata la coppia nominale.

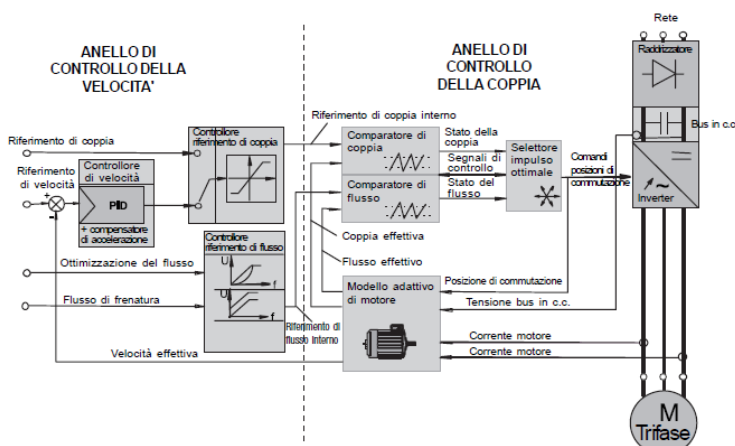
Equipaggiando il controllo con un encoder è possibile ridurre gli errori di velocità statica e dinamica di 3-7 volte.

L'azionamento DTC consente inoltre un rapido avvio indipendentemente dallo stato elettromagnetico e meccanico del motore. Il controllo dei motori con la tecnica DTC porta a un risparmio in termini energetici: si massimizza il rendimento complessivo (controllore+motore).

Le variabili per eseguire il controllo vengono acquisite direttamente dal motore 40000 volte al secondo.

Ogni  $25\mu s$  viene trasmessa all'inverter una sequenza di commutazione ottimale per raggiunge il valore di coppia richiesto.

### 2.3.2.1. Rappresentazione del controllo DTC



Rappresentazione del controllo [2.3.1.1.a.]



Drives di potenza [2.3.2.a.]

Uno dei blocchi principali è il 'modello adattativo del motore' che influenza il livello di precisione che si ottiene durante il funzionamento.

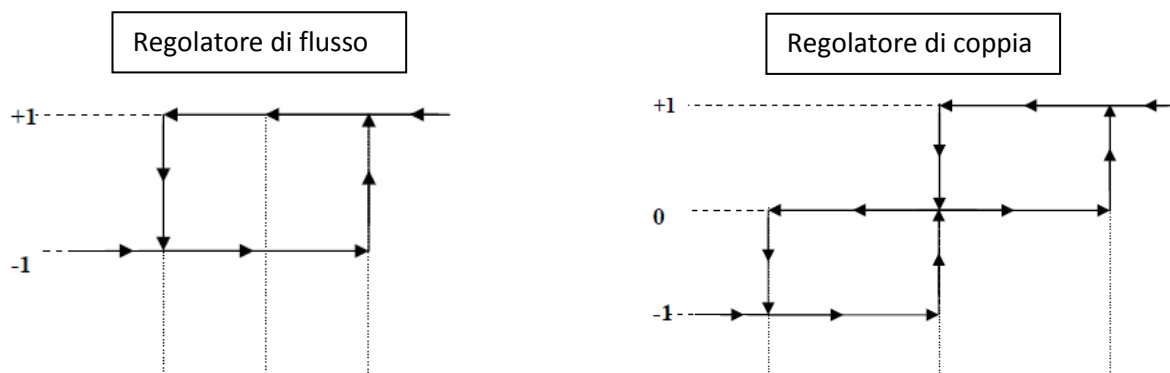
Prima della messa in funzione bisogna fornire al modello del motore le informazioni, quali ad esempio: la resistenza di statore, l'induttanza, i coefficienti di saturazione e l'inerzia.

In uscita da questo blocco si ottengo:

- I valori di flusso
- I valori di coppia effettiva
- il valore della velocità d'albero.

La tecnologia DTC non ha uno schema di commutazione prestabilito, ma determina le combinazioni ad ogni ciclo di controllo. Le configurazioni che bisogna fornire ai rami dell'inverter per poter applicare il controllo voluto sono ottenute mediante una precisa valutazione dell'errore esistente fra coppia e modulo del flusso statorico stimato rispetto ai valori presi come riferimento. In definitiva la configurazione finale si basa sull'impiego di regolatori di flusso e di coppia.

### 2.3.2.2. Principio di funzionamento



Il regolatore di flusso è un semplice regolatore ad isteresi. Quando il modulo del flusso statorico stimato ( $\varphi_{stim}$ ) è minore del riferimento inferiore ( $\varphi_s - \Delta\varphi$ ) allora il regolatore si trova in posizione -1, quando  $\varphi_{stim}$  è maggiore ( $\varphi_s + \Delta\varphi$ ) lo stato in uscita è +1. Nel primo caso la tensione che si dovrà fornire porterà ad un innalzamento del flusso, viceversa, con lo stato +1, si provvederà ad abbassare il suo valore.

Per il regolatore di coppia, se il valore stimato è minore del riferimento inferiore di banda ( $C_{EM} - \Delta C_{EM}$ ), allora ci si trova nello stato -1 e al motore si applicano le configurazioni per aumentare la coppia fino al valore di riferimento. Una volta raggiunto quest'ultimo valore ( $C_{EM}$ ), il regolatore fornisce come stato '0' e al motore saranno applicate configurazioni tali da mantenere il valore di coppia costante. Quando si supera il valore di banda superiore, lo stato in uscita è pari a 1 e si dovrà provvedere a diminuire la coppia.

La configurazione completa da applicare nei vari settori a seconda degli stati dei regolatori è riassunta nella tabella 2.3.2.2.a. di seguito riportata.

Stato flusso	Stato coppia	Settore 1	Settore 2	Settore 3	Settore 4	Settore 5	Settore 6
-1	-1	2	3	4	5	6	1
-1	0	0	0	0	0	0	0
-1	+1	6	1	2	3	4	5
+1	-1	3	4	5	6	1	2
+1	0	0	0	0	0	0	0
+1	+1	5	6	1	2	3	4

Tabella di controllo [2.3.2.2.a.]

La tecnica DTC presenta dei limiti dovuti essenzialmente agli effetti delle configurazioni che non tengono conto della posizione del flusso statorico nei vari settori, pertanto, una medesima configurazione produce effetti diversi a seconda della posizione del flusso stimato.

Se la posizione del vettore flusso si trova all'inizio del settore, la configurazione porterà ad un notevole incremento di rotazione del vettore e quindi un aumento di coppia. Al contrario, la medesima configurazione applicata al vettore a fine settore, produce una notevole variazione del modulo del flusso e variazione di coppia contenute. Questo limite potrebbe essere superato procedendo alla suddivisione del piano in 12 parti anziché 6. Questa soluzione, sebbene non porti ad una risoluzione completa del problema, consente di avere un comportamento più omogeneo dell'azionamento e ripple di coppia ancora più contenuti.

Un limite ancora più critico del precedente è dovuto all'insensibilità del controllo alla velocità di rotazione del motore. In particolare si viene ad avere un comportamento asimmetrico durante le variazioni di coppia. Nel caso di velocità positive, le configurazioni del livello di inverter che portano ad un incremento di coppia, producono un effetto più attenuato rispetto alla rispettiva configurazione inversa. Nel caso di velocità negative si otterranno considerazioni analoghe alle precedenti, anche in questo caso con ripple di coppia considerevole. L'effetto delle velocità si ripercuote anche sulla configurazione di mantenimento di coppia (configurazione nulla) che porta a variazioni di coppia tanto più consistenti quanto maggiore è  $\omega_m$ .

Principio di funzionamento di un controllore DTC:

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\Phi_s}{dt} \longrightarrow \Delta\bar{\varphi}_s \cong \bar{v}_s \Delta T$$

Si considero l'equazione del circuito statorico. Siccome si trascura il parametro resistivo, la variazione del flusso statorico ha la stessa direzione del vettore tensione applicato. La variazione di tempo invece è riferita al tempo di campionamento.

Per aumentare il valore istantaneo della coppia è necessario applicare alla macchina un vettore tensione che abbia una rilevante componente tangenziale rispetto al verso di rotazione del flusso statorico (si deve

ottenere un valore di velocità di rotazione del vettore flusso superiore alla velocità elettrica dell'albero). Viceversa, per ridurre il valore della coppia è necessario applicare una tensione che abbia una ridotta componente tangenziale (nulla o al limite negativa).

Configurazioni possibili:

- La coppia deve aumentare, il flusso deve aumentare: sarà selezionato un vettore tensione avente componenti tangenziale e radiale positive.
- La coppia deve aumentare, il flusso deve diminuire: sarà selezionato un vettore tensione avente componente tangenziale positiva e radiale negativa.
- La coppia deve diminuire, il flusso deve aumentare: sarà selezionato un vettore tensione con componente tangenziale negativa o nulla e componente radiale positiva o nulla.
- La coppia deve diminuire, il flusso deve diminuire: sarà selezionato un vettore tensione con componenti tangenziale e radiale negative o nulle.

Le configurazioni nulle, a causa della caduta di tensione statorica, portano ad un deflussaggio della macchina.

### 3. Calcoli di corto circuito

In questo capitolo si analizza la condizione di guasto più gravosa per l'impianto elettrico del Megayacht: il corto circuito. La conoscenza delle correnti di guasto consente di stabilire le caratteristiche dell'interruttore e del relativo relè che concorrono a definire il costo dell'impianto elettrico del Megayacht. Lo scopo dello studio è di valutare quale, fra i due sistemi di distribuzione (AC e DC), sia più sicuro, affidabile ed economico.

Il primo paragrafo del capitolo è dedicato ai calcoli in AC nella condizione di corto più gravosa cioè il corto circuito trifase dato che il centro stella per la distribuzione primaria è isolato. Il secondo paragrafo si occupa delle correnti di guasto nel caso di una distribuzione in DC senza però procedere al calcolo numerico poiché non si conosce, in modo approfondito, il comportamento dei convertitori in caso di guasto. Verranno ipotizzate, sempre per la rete in continua, alcune condizioni di funzionamento per capire, almeno genericamente, le ripercussioni del guasto sull'impianto elettrico e si analizzerà molto brevemente il concetto di selettività degli interruttori a valle dei convertitori.

#### 3.1. Analisi di corto circuito per la rete di distribuzione in AC

I calcoli di corto circuito in alternata sono stati eseguiti:

- Manualmente (con l'ausilio di Excel)
- Con DOC (software di calcolo di ABB)

La normativa di riferimento per i calcoli di corto negli impianti navali in AC trifase è la IEC 61363 che è già presente all'interno del software aziendale. Per poter eseguire i conti manualmente bisogna capire i metodi e le ipotesi di calcolo utilizzate. Per maggior chiarezza si riporta, nel primo paragrafo del capitolo, una sintesi della normativa IEC 61363 mentre nella seconda parte della trattazione, sempre per i calcoli in alternata in cui si utilizza il DOC, è possibile confrontare i risultati del software con quelli ottenuti manualmente e procedere al dimensionamento delle apparecchiature di protezione da installare.

Lo studio si focalizza nel punto più critico: il quadro elettrico principale. Un guasto in questo punto dell'impianto sarebbe sicuramente critico poiché confluirebbero tutte le correnti fornite dai generatori collegati che, a causa delle impedenze molto limitate, provocano picchi di corrente fino a 100 kA.

I valori di correnti ottenuti sono stati poi utilizzati per la scelta degli interruttori per l'alimentazione dei vari montanti: main thruster, bow thruster e servizi ausiliari. Il valore di corrente, per gli apparecchi da installare sui montanti dei generatori all'interno del QEP, sarà pari a quello calcolato al quadro meno il contributo al corto del generatore per il quale si vuole dimensionare il suo interruttore. Analoghe procedure di calcolo, sempre in alternata, sono state eseguite per la valutazione della corrente di guasto a valle dei due trasformatori da 450 kVA. In tal caso il trasformatore, grazie alla sua impedenza interna, consente di ridurre la corrente di guasto e quindi gli sforzi elettrodinamici.

Per approfondire lo studio dedicato ai guasti in AC si rimanda all'appendice A e B riportate a fine tesi in cui si elencano i parametri elettrici degli apparecchi utilizzati ed un breve cenno teorico sulle loro caratteristiche costruttive e di funzionamento.

### 3.1.1. IEC 61363-1

La normativa fornisce delle procedure standard per il calcolo della corrente di corto circuito in ambito navale/piattaforme offshore. I calcoli di seguito riportati, potranno essere impiegati in tutti i sistemi con frequenza pari a 50 o 60 Hz, eserciti con differenti livelli di tensione, comprendendo nelle valutazioni sia elementi attivi (generatori e motori) sia elementi passivi. Il punto di neutro del sistema potrà essere connesso direttamente allo scafo della nave, collegato mediante impedenza, oppure isolato.

I calcoli nella normativa, riportano le condizioni di corto più gravose e poiché la maggior parte dei sistemi navali sono eserciti a neutro isolato, allora la condizione peggiore è quella del corto circuito trifase simmetrico. La corrente di guasto sarà caratterizzata da una componente alternata e da una unidirezionale il cui valore dipende non solo dalle condizioni iniziali ma anche dal tipo di circuito che si determinerà dopo il guasto.

I risultati ottenuti con tale normativa hanno un buon grado di accuratezza fino a 100ms dall'istante di guasto, oltre tale valore per una valutazione corretta del corto, bisognerà tener in considerazione anche il sistema di eccitazione del generatore che interverrà in maniera automatica per sostenere la tensione alla sbarra.

Una corretta valutazione della corrente di corto è fondamentale nei sistemi navali in quanto sono isolati dalla rete terrestre, ed eventuali guasti vicino alla generazione, se non tempestivamente eliminati, potrebbero portare ad un'incompleta manovrabilità della nave oltre che ad un serio pericolo di incendio, con elevati costi per ripristinare il corretto funzionamento dell'impianto.

Le formule di calcolo che sono riportate nella normativa si basano sulle seguenti ipotesi semplificative:

- Tutte le capacità del sistema sono trascurate. Questo è lecito in quanto si sta parlando di sistemi con cavi di lunghezza trascurabile rispetto ai tradizionali impianti terrestri.
- Nell'istante di corto circuito, il valore di tensione nel punto di guasto è assunto a potenziale nullo.
- Si trascura l'impedenza d'arco durante il corto.
- Il guasto si verifica simultaneamente su tutte e tre le fasi.
- Tutti i generatori contribuiscono al corto con una componente attiva e reattiva legata alla condizione di pre-guasto.
- Tutti i componenti reagiscono linearmente al corto.

I guasti più gravi si verificano in corrispondenza dei generatori. In questa situazione, la corrente di corto circuito complessiva può essere ottenuta considerando la condizione subtransitoria, transitoria e di regime.

Questi differenti contributi al corto sono dovuti alle variazioni della reattanza di macchina a causa delle correnti indotte nel rotore possono essere considerate come sovraeccitazioni transitorie della macchina

sincrona. Queste correnti indotte verranno smorzate esponenzialmente in funzione delle costanti di tempo che dipenderanno dalle gabbie smorzatrici, dall'avvolgimento rotorico e da quello statorico.

Per una precisa valutazione delle correnti di guasto in prossimità dei generatori sincroni bisognerebbe impiegare un modello equivalente per tener conto delle grandezze in quadratura e non solo di quelle sull'asse diretto. In pratica si accettano calcoli meno complessi, considerando cioè solo i parametri diretti, in quanto la perdita di accuratezza è al massimo del 10%.

Nel caso dei generatori è necessario considerare la completa evoluzione della corrente di corto per valutare correttamente gli sforzi elettrodinamici a cui devono essere sottoposti gli avvolgimenti di macchina e i cavi. Si assume come valore di picco quello che si verifica con  $t=T/2$  dal momento del guasto. In questo istante di tempo si dovrà calcolare il valore di picco della corrente di corto per determinare il potere di chiusura dell'interruttore da installare, mentre il valore di  $I_{cu}$  (potere di interruzione nominale estremo) e  $I_{cs}$  (potere di interruzione nominale di servizio) dipenderanno solo dal valore efficace della componente alternata sub transitoria dato che durante l'operazione di apertura dell'interruttore (assunta nell'istante  $t=10ms$ ) la componente transitoria e di regime non sono intervenute significativamente.

Anche i motori contribuiscono al corto in maniera tanto più significativa quanto maggiore è la loro potenza rispetto a quella nominale dell'impianto.

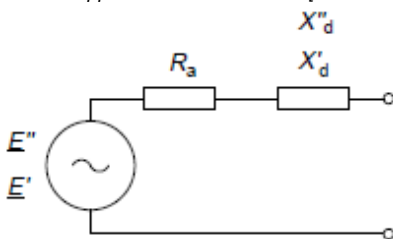
La normativa suddivide i motori in due categorie:

- *Small motors*
- *Large motors*

I piccoli motori possono essere raggruppati e rappresentati con un solo motore equivalente che tenga conto di tutti i contributi. Viceversa, i motori con potenza rilevante devono essere considerati come sorgenti separate durante il guasto.

### 3.1.1.1. Contributo al corto circuito delle macchine sincrone

Rappresentazione circuitale [3.1.1.1.a.]



Per i calcoli di corto circuito delle macchine sincrone bisogna tenere in considerazione delle condizioni precedenti al guasto. Il valore della tensione fornito dalla macchina durante il corto non sarà quello nominale, ma assumerà un valore legato sia alla corrente di pre-guasto sia dall'impedenza di macchina in quel preciso istante.

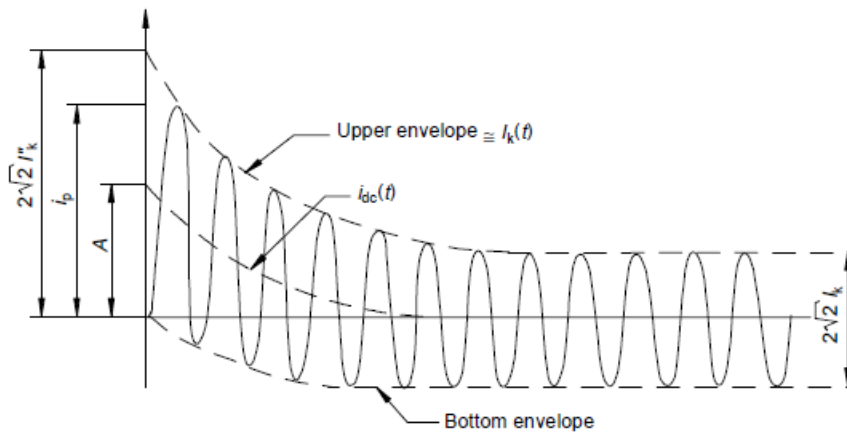


Il valore di impedenza comprenderà sia il valore di resistenza che di reattanza; quest'ultima sarà costante all'interno del periodo in cui ci mettiamo (subtransitorio-transitorio-regime).

Il decremento della corrente di corto è ovviamente legato alle costanti di tempo:

- $T_d'' \rightarrow$  caratterizza lo smorzamento iniziale della corrente di corto e il suo valore dipende principalmente dall'effetto dell'avvolgimento smorzatore.
- $T_d' \rightarrow$  è la seconda costante di tempo che governa la corrente nella seconda fase del corto circuito. L'effetto di smorzamento è dato dal circuito di eccitazione. Tipicamente il suo valore è molto elevato: 10/15 volte  $T_d''$ .
- $T_{dc} \rightarrow$  caratterizza lo smorzamento della componente unidirezionale. Il suo valore dipende dall'effetto dell'avvolgimento statorico.

Andamento tipico di corto circuito trifase [3.1.1.1.b.]



Il valore massimo della corrente di corto circuito è ottenuto quando il sincro, nelle condizioni di pre-guasto, lavora nelle condizioni nominali in termini di carico, tensione, frequenza e fattore di potenza.

Durante il calcolo del corto circuito, viene considerato solo il suo involucro superiore che permette di ricavare il valore massimo di corto. La corrente così definita viene calcolata nel seguente modo:

$$i_k(t) = \sqrt{2} * I_{ac}(t) + i_{dc}(t)$$

$i_{dc}$  -> valore istantaneo della componente di guasto unidirezionale

$i_{ac}$  -> valore istantaneo della componente di guasto alternata

$i_{dc}$  -> valore istantaneo della corrente di guasto riferita alla curva superiore dell'involucro

$$I_{ac}(t) = (I_{kd}'' - I_{kd}') * e^{\frac{-t}{T_d''}} + (I_{kd}' - I_{kd}) * e^{\frac{-t}{T_d'}} + I_{kd}$$

$I_{kd}''$  -> valore efficace di corrente sub transitoria

$I_{kd}'$  -> valore efficace di corrente transitoria

$I_{kd}$  -> valore efficace della corrente di regime

Le costanti di tempo sono quelle fornite dal costruttore della macchina e per ora non vengono modificate dato che si considera un guasto ai morsetti dell'alternatore.

Bisogna ricavare il valore della componente subtransitoria, transitoria e di regime.

Il valore della tensione dipende dalle condizioni precedenti al guasto:

$$I''_{kd} = E''_{q0} / Z''_d = E''_{q0} / (R_a^2 + X''_d)^{1/2}$$

$$I'_{kd} = E'_{q0} / Z'_d = E'_{q0} / (R_a^2 + X'_d)^{1/2}$$

$$\begin{array}{l} E''_{q0} = \underline{U}_0 / \sqrt{3} + I_0 Z''_d \\ E'_{q0} = \underline{U}_0 / \sqrt{3} + I_0 Z'_d \end{array} \longrightarrow \begin{array}{l} E''_{q0} = \left[ \left( \frac{U_0}{\sqrt{3}} \cos \phi_0 + R_a I_0 \right)^2 + \left( \frac{U_0}{\sqrt{3}} \sin \phi_0 + X''_d I_0 \right)^2 \right]^{1/2} \\ E'_{q0} = \left[ \left( \frac{U_0}{\sqrt{3}} \cos \phi_0 + R_a I_0 \right)^2 + \left( \frac{U_0}{\sqrt{3}} \sin \phi_0 + X'_d I_0 \right)^2 \right]^{1/2} \end{array}$$

Per la componente unidirezionale si applica la seguente formula:

$$i_{dc}(t) = \sqrt{2} (I''_{kd} - I_0 \sin \phi_0) e^{-t/T_{dce}}$$

$I_0$  → corrente nominale di macchina

$\phi_0$  → sfasamento tensione e corrente all'istante del guasto

Se il corto circuito dovesse avvenire a valle di un cavo o di un trasformatore (componenti passivi), si avranno delle nuove impedenze che si dovranno sommare a quelle del generatore, modificando non solo il valore della corrente di corto, ma anche la sua evoluzione nel tempo dato che si modificano anche le costanti di tempo.

N.B: le formule sopra riportate per calcolare l'involuppo superiore sono ancora valide, a patto di considerare nelle formule anche le resistenze e le reattanze dei componenti passivi.

Le nuove costanti di tempo possono essere calcolate come segue:

$$T''_e = \frac{[(R_a + R)^2 + (X''_d + X)^2] X'_d T''_d}{[(R_a + R)^2 + (X''_d + X)(X'_d + X)] X''_d}$$

Costante di tempo subtransitoria

$$T'_e = \frac{[(R_a + R)^2 + (X'_d + X)^2] X_d T'_d}{[(R_a + R)^2 + (X'_d + X)(X_d + X)] X'_d}$$

Costante di tempo transitoria

$$T_{dce} = [T_{dc} + X / (2 \pi f R_a)] / (1 + R/R_a)$$

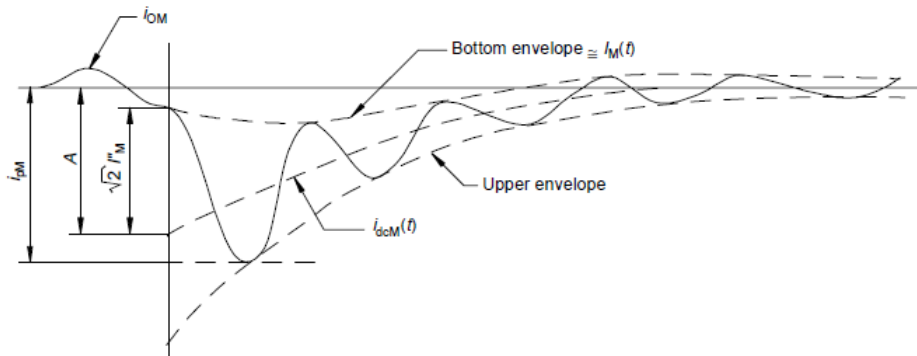
Costante di tempo unidirezionale

oppure

$$T_{dce} = (X''_d + X) / 2 \pi f (R_a + R)$$

### 3.1.1.2. Contributo al corto circuito dei motori a induzione

Andamento tipico della corrente di corto trifase [3.1.1.2.a.]



A differenza dei generatori, la corrente di corto del motore ad induzione è caratterizzata da un andamento subtransitorio seguito dall'andamento di regime. Il contributo al corto dei motori è fortemente limitato dall'assenza del circuito di eccitazione. La corrente di guasto è dovuta alla rotazione della macchina e dal flusso concatenato col rotore che non può variare istantaneamente ma decresce esponenzialmente a causa delle forze elettromotrici indotte nell'avvolgimento rotorico che si oppongono alle variazioni di flusso. Al cessare delle correnti transitorie indotte nel rotore, non si possono più generare le f.e.m. allo statore e pertanto si avrà un brusco decadimento della corrente di corto da parte del motore fino a ritenere il suo contributo trascurabile da un certo istante di tempo in avanti. Siccome l'apertura degli interruttori deve essere tempestiva per evitare tutta una serie di problemi (elettrodinamici-termici), l'apertura del dispositivo avverrà quando il contributo del motore non è trascurabile e quindi dovrà essere considerato nei calcoli.

Involuppo superiore della corrente di motore durante il guasto:

$$i_M(t) = \sqrt{2} i_{acM}(t) + i_{dcM}(t)$$

la componente a.c. può essere calcolata con la seguente formula:

$$i_{acM}(t) = I''_M e^{-t/T''_M}$$

$T''_M \rightarrow$  costante di tempo subtransitoria, consente di capire la rapidità con la quale decresce la componente a.c. (dipende principalmente dal circuito rotorico)

$$T''_M = \frac{(X_R + X_S)}{\omega_r R_R}$$

Per un calcolo accurato del contributo del motore, bisogna considerare la corrente che circola nella condizione di pre-guasto e calcolare la reale tensione che il motore fornisce al circuito di corto:

$$E''_M = (U_{rM}/\sqrt{3}) - I_M Z''_M \longrightarrow E''_M = \left[ \left( \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}} \cos \phi_M - R_M I_M \right)^2 + \left( \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}} \sin \phi_M - X''_M I_M \right)^2 \right]$$

Per ottenere l'involuppo completo della corrente del motore, bisogna calcolare anche l'andamento della componente continua. Questo valore dipenderà, come nel caso del generatore, dalle condizioni nominali di

funzionamento della macchina nel momento in cui avviene il guasto.

$$i_{dcM}(t) = \sqrt{2} (I''_M + I_{rM} \sin \phi_M) e^{-t/T_{dcM}} \quad \text{con} \quad T_{dcM} = \frac{(X_R + X_S)}{\omega_r R_S}$$

$T_{dcM}$  -> Costante di tempo unidirezionale. Il cui effetto è principalmente dato dall'avvolgimento statorico.

Se i dati che si conoscono dei motori sono insufficienti per eseguire un calcolo preciso del contributo al corto circuito come è stato sopra mostrato, si può procedere con delle approssimazioni, differenziando però lo studio a seconda che si tratti di grandi o piccoli motori.

La classificazione è ovviamente legata anche alla rete alla quale il motore è connesso. In generale si definisce *large motor* un motore con potenza maggiore di 100kW o che abbia una potenza maggiore del 15% della potenza resa disponibile dai generatori.

### 3.1.1.3. Influenza dei 'large motors' al corto circuito

impedenza del motore (valori semplificativi forniti dalla norma validi sia per il 50 che per il 60 Hz):

$$z''_M = 0,16 \text{ p.u.}$$

$$x''_M = 0,15 \text{ p.u.}$$

$$r_s = 0,034 \text{ p.u.}$$

$$r_R = 0,021 \text{ p.u.}$$

$$r_M = r_s + r_R = 0,055 \text{ p.u.}$$

Costanti di tempo:

$$f=50 \text{ Hz} \rightarrow T''_M = 22,4 \text{ ms} \quad T_{dcM} = 14,08 \text{ ms}$$

$$f=60 \text{ Hz} \rightarrow T''_M = 18,67 \text{ ms} \quad T_{dcM} = 11,73 \text{ ms}$$

corrente di corto:

$$I''_M = 6,25 I_{rM}$$

valori massimi ( $t=T/2$ )

$$I_{acM} = 4,00 I_{rM}$$

$$I_{pM} = 10 I_{rM}$$

Come si può vedere, la corrente di pre-guasto viene trascurata.

### 3.1.1.4. Influenza dei 'small motors' al corto circuito

I piccoli motori connessi alla stessa sbarra, possono essere considerati come un motore equivalente, avente come valore di corrente nominale la somma delle correnti dei singoli motori. La norma fornisce i valori che caratterizzano il motore equivalente.

impedenza del motore (valori semplificativi forniti dalla norma validi sia per il 50 che per il 60 Hz):

$$z''_M = 0,2 \text{ p.u.}$$

$$x''_M = 0,188 \text{ p.u.}$$

$$r_s = 0,043 \text{ p.u.}$$

$$r_R = 0,027 \text{ p.u.}$$

$$r_M = r_s + r_R = 0,07 \text{ p.u.}$$

Costanti di tempo:

$$f=50 \text{ Hz} \rightarrow T_M'' = 22,4 \text{ ms} \quad T_{dcM} = 14,08 \text{ ms}$$

$$f=60 \text{ Hz} \rightarrow T_M'' = 18,67 \text{ ms} \quad T_{dcM} = 11,73 \text{ ms}$$

calcolo della corrente di corto:

$$I_M'' = 5I_{rM}$$

Calcolo i valori massimo ( $t=T/2$ )

$$I_{acM} = 3,2I_{rM}$$

$$I_{pM} = 8I_{rM}$$

Come si può vedere, la corrente di pre-guasto viene trascurata.

### 3.1.1.5. Calcolo del generatore equivalente

Le formule fornite dalla normativa consentono di ricavare il valore della corrente di corto sulla sbarra principale alla quale risultano collegati non solo i generatori ma anche i grossi motori/motore equivalente.

L'impianto sarà caratterizzato da diversi livelli di tensione o comunque da diversi sottoquadri, nei quali si dovranno usare altri dispositivi di protezione. Occorre quindi valutare l'effetto complessivo al corto circuito dei componenti attivi, la norma fornisce una serie di considerazioni e formule per la rappresentazione del generatore equivalente.

*Generatore equivalente:*

il primo passo è quello di valutare la corrente complessiva sia a.c che d.c.

il valore di questi due componenti del generatore equivalente non sono altro che la somma aritmetica dei contributi delle singole macchine calcolate fino ad ora:

$$I_{ac}(t)_{To} = \sum I_{acG}(t) + \sum I_{acM}(t)$$

$$i_{dc}(t)_{To} = \sum i_{dcG}(t) + \sum i_{dcM}(t)$$

i parametri del generatore equivalente che si calcoleranno, dovranno essere in grado di rappresentare un unico generatore che produca gli effetti dei singoli motori/generatori durante il corto.

L'andamento della corrente di corto del generatore equivalente sarà pertanto caratterizzata dagli stessi andamenti: subtransitorio-transitorio-regime. Ovviamente il valore efficace delle tre componenti di corrente così come le costanti di tempo, dovranno tener conto della dinamica di tutte le macchine.

$$I_{ac}(t)_* = (I_*'' - I_*') e^{-t/T_{d_*}''} + (I_*' - I_{k_*}) e^{-t/T_{d_*}'} + I_l$$

$$I_*'' = \sum_i^n I_{kdi}'' + \sum_j^n I_M''$$

$$I_*' = \sum_j^n I_{kdi}'$$

$$I_{k_*} = \sum_i^n I_{kdi}$$

$$M_* = (I_*'' - I_*')$$

$$N_* = (I_*' - I_{k_*})$$

E quindi si ottiene:

$$I_{ac}(t)_* = M_* e^{-t/T_{d*}} + N_* e^{-t/T'_{d*}} + I_{k*}$$

calcolo della costante di tempo subtransitoria:

occorre definire una una funzione valida per ogni singolo generatore:

$$K''(t) = (I''_{kd} - I_{kd}) e^{-t/T'_{d*}} + I_{k*} \longrightarrow$$

Sulla normativa all'interno della formula compare la costante di tempo subtransitoria equivalente. Questo è un errore in quanto ci stiamo riferendo ad un solo generatore.

esprimo la funzione per il generatore equivalente:

$$K''(t)_* = M_* e^{-t/T_{d*}} + I'_* \longrightarrow K''(t)_* = \sum_i^n K''(t) + \sum_j^n I''_M e^{-t/T'_j} \longrightarrow$$

Col termine 'i' si indicano i generatori

Col termine 'j' si indicano i motori

Si esplicita l'incognita  $T''_{d*}$  valutandola nell'istante più critico:  $t_x = T/2$

$$T''_{d*} = -t_x / \ln [(K''(t_x)_* - I'_*) / M_*]$$

Calcolo della costante di tempo transitoria:

si parte dall'equazione precedente:

$$I_{ac}(t)_* = (I''_* - I'_*) e^{-t/T''_{d*}} + (I'_* - I_{k*}) e^{-t/T'_{d*}} + I_l$$

a differenza di prima, abbiamo una sola incognita ( $T''_{d*}$ ), per cui la si può facilmente ricavare dalla formula inversa.

Ricordando che:

$$I_{ac}(t_x)_* = \sum_i^n I_{ac}(t_x)_i + \sum_j^n I_{acM}(t_x)_j$$

e sostituendo si ottiene:

$$T''_{d*} = -t_x / \ln \left\{ \left[ I_{ac}(t_x)_* - (M_* e^{-t_x/T'_{d*}} + I_{k*}) \right] / N_* \right\}$$

Calcolo della costante di tempo unidirezionale:

$$I_{dc}(t_x)_* = \sqrt{2} I''_* e^{-t_x/T_{dc*}} \quad I_{ac}(t_x)_* = \sum_i^n I_{dc}(t_x)_i + \sum_j^n I_{dc}(t_x)_j$$

sostituendo e dalla formula inversa si ottiene:

$$T_{dc*} = -t_x / \ln [I_{dc}(t_x)_* / (\sqrt{2} I''_*)]$$

Calcolo dei parametri equivalenti di macchina:

$$Z''_* = U_0 / (\sqrt{3} I''_*)$$

$$Z'_* = U_0 / (\sqrt{3} I'_*)$$

$$Z_* = U_0 / (\sqrt{3} I_k)$$

Per ottenere la parte reale e immaginaria si deve introdurre un nuovo parametro:

$$c_3 = 1 / (2 \pi f T_{dc*})$$

dal quale si ricava la reattanza subtransitoria equivalente:

$$X''_* = Z''_* / (1 + c_3^2)^{1/2}$$

e di conseguenza si ricavano tutti gli altri parametri:

$$R_* = X''_* / 2 \pi f T_{dc*} = c_3 X''_*$$

$$X'_* = (Z'^2 - R^2)^{1/2}$$

$$X_* = (Z^2 - R^2)^{1/2}$$

### 3.1.2. calcoli di corto con Excel

I calcoli di corto circuito, così come riportato nella norma IEC 61363, riguardano esclusivamente la condizione di corto circuito trifase, con corto simultaneo sulle tre fasi. La componente di corto sarà caratterizzata da una componente asimmetrica (variabile sinusoidalmente) e da una componente aperiodica.

L'obiettivo è quello di calcolare il valore di corto:

- Alla sbarra principale che rappresenta il valore più gravoso
- A valle dei trasformatori

Una volta terminati i calcoli di corto sarà possibile scegliere l'interruttore più idoneo tenendo in considerazione sia il valore di picco che il valore efficace della componente simmetrica.

I calcoli sono stati eseguiti dapprima manualmente, riportando i risultati in tabelle e grafici excel, successivamente, si è utilizzato il programma DOC di ABB SACE, riuscendo in tal modo a dimensionare in modo rapido ed efficace gli interruttori necessari.

#### 3.1.2.1. caratteristiche dei generatori

<i>Tabella [3.1.2.1.a.]</i>	<b>unità di misura</b>	<b>Generatore 1</b>	<b>Generatore 2</b>
<b>U0</b>	<b>V</b>	690	690
<b>U0f</b>	<b>V</b>	398.4	398.4
<b>frequenza</b>	<b>Hz</b>	50	50
<b>Potenza</b>	<b>kVA</b>	1042	581
<b>impedenza nominale</b>	<b>Ω</b>	0.46	0.82
<b>In</b>	<b>A</b>	871.9	486.1
<b>I effettiva</b>	<b>A</b>	697.5	388.9
<b>Ikd rms</b>	<b>A</b>	2615.6	1458.4
<b>Ra</b>	<b>Ω</b>	0.0045	0.01
<b>x''d p.u.</b>	<b>%</b>	0.1	0.1
<b>x'd p.u.</b>	<b>%</b>	0.18	0.19
<b>Xs</b>	<b>%</b>	non noto	non noto
<b>X''d</b>	<b>Ω</b>	0.047	0.084
<b>X'd</b>	<b>Ω</b>	0.084	0.15
<b>cosΦ</b>		0.8	0.8
<b>sinΦ</b>		0.6	0.6

Tabella [3.1.2.1.b.]

	unità di misura	generatore 1	generatore 2
$E''q0$	V	421.1	421.8
$E'q0$	V	438.4	439.6
$Z'' d$	$\Omega$	0.047	0.085
$Z' d$	$\Omega$	0.084	0.15
$I''kd rms$	A	8993.5	4963.5
$I'kd rms$	A	5206.9	2862.6
$Ikd rms$	A	2615.6	1458.4
$T''e$	s	0.02	0.016
$T'e$	s	0.22	0.2
$Tdc e$	s	0.037	0.03

Osservazioni:

il valore di  $Ikd rms$  non è fornito dal costruttore del generatore, pertanto si ipotizza di considerare un valore pari a tre volte la corrente nominale.

I valori della tensione di pre-guasto, come mostrato nella tabella 3.1.2.1.b., sono maggiori rispetto al valore della tensione nominale poiché sono calcolati partendo dal valore nominale di macchina al quale va sommato la c.d.t. dovuta al parametro resistivo e dalla reattanza subtransitoria/transitoria a seconda che si calcoli la  $E''q0$  o la  $E'q0$ . Le costanti di tempo impiegate nei calcoli sono pari a quelle di macchina in quanto si trascurano i parametri dei cavi di collegamento dato che si sta parlando di un'imbarcazione di lunghezza limitata 55m. Nei calcoli di corto vengono trascurati tutti i motori che, durante la fase di corto, potrebbero contribuire ad incrementare il valore della corrente di picco alla sbarra principale a causa dell'energia interna accumulata che si riverserebbe in rete nei primissimi ms, in questo caso, invece, i due motori principali dal 1600 kW ciascuno, sono interfacciati con la rete tramite dei convertitori (collegamento in corrente continua) che consente di disaccoppiare le due parti di rete.



### 3.1.2.2. contributo al corto del generatore da 1042 kVA

I valori sotto riportati, sono riferiti al generatore da 1042 kVA. Si calcola il valore di corrente nei primi 100 ms con step di 1 ms. il valore di corrente che a 50 Hz serve per il dimensionamento degli interruttori è valutato in  $t = T/2 = 10\text{ms}$ .

Valori della corrente di guasto [3.1.2.2.a.]

t [s]	I <sub>ac</sub> [A]
0	8993.5
0.001	8797.2
0.002	8609.9
0.003	8431.3
0.004	8260.9
0.005	8098.2
0.006	7943.0
0.007	7794.9
0.008	7653.4
0.009	7518.4
<b>0.01</b>	<b>7389.5</b>
...	...
...	...
0.085	4436.6
0.086	4426.0
0.087	4415.6
0.088	4405.4
0.089	4395.3
0.09	4385.3
0.091	4375.5
0.092	4365.8
0.093	4356.3
0.094	4346.8
0.095	4337.5
0.096	4328.3
0.097	4319.3
0.098	4310.3
0.099	4301.4
0.1	4292.7

t [s]	I <sub>dc</sub> [A]
0	12126.9
0.001	11803.5
0.002	11488.8
0.003	11182.4
0.004	10884.2
0.005	10594.0
0.006	10311.5
0.007	10036.5
0.008	9768.9
0.009	9508.4
<b>0.01</b>	<b>9254.9</b>
...	...
...	...
0.085	1219.1
0.086	1186.6
0.087	1154.9
0.088	1124.1
0.089	1094.1
0.09	1065.0
0.091	1036.6
0.092	1008.9
0.093	982.0
0.094	955.0
0.095	930.3
0.096	905.5
0.097	881.4
0.098	857.9
0.099	835.0
0.1	812.7

t [s]	I <sub>p</sub> [A]
0	24845.6
0.001	24244.6
0.002	23665.0
0.003	23106.1
0.004	22566.8
0.005	22046.6
0.006	21544.6
0.007	21060.1
0.008	20592.5
0.009	20141.1
<b>0.01</b>	<b>19705.2</b>
...	...
...	...
0.085	7493.4
0.086	7445.9
0.087	7399.6
0.088	7354.3
0.089	7310.0
0.09	7266.7
0.091	7224.5
0.092	7183.1
0.093	7142.7
0.094	7103.2
0.095	7064.5
0.096	7026.7
0.097	6989.8
0.098	6953.6
0.099	6918.2
0.1	6883.5

$$\rightarrow I_p = \sqrt{2}I_{ac}(t) + I_{dc}(t)$$

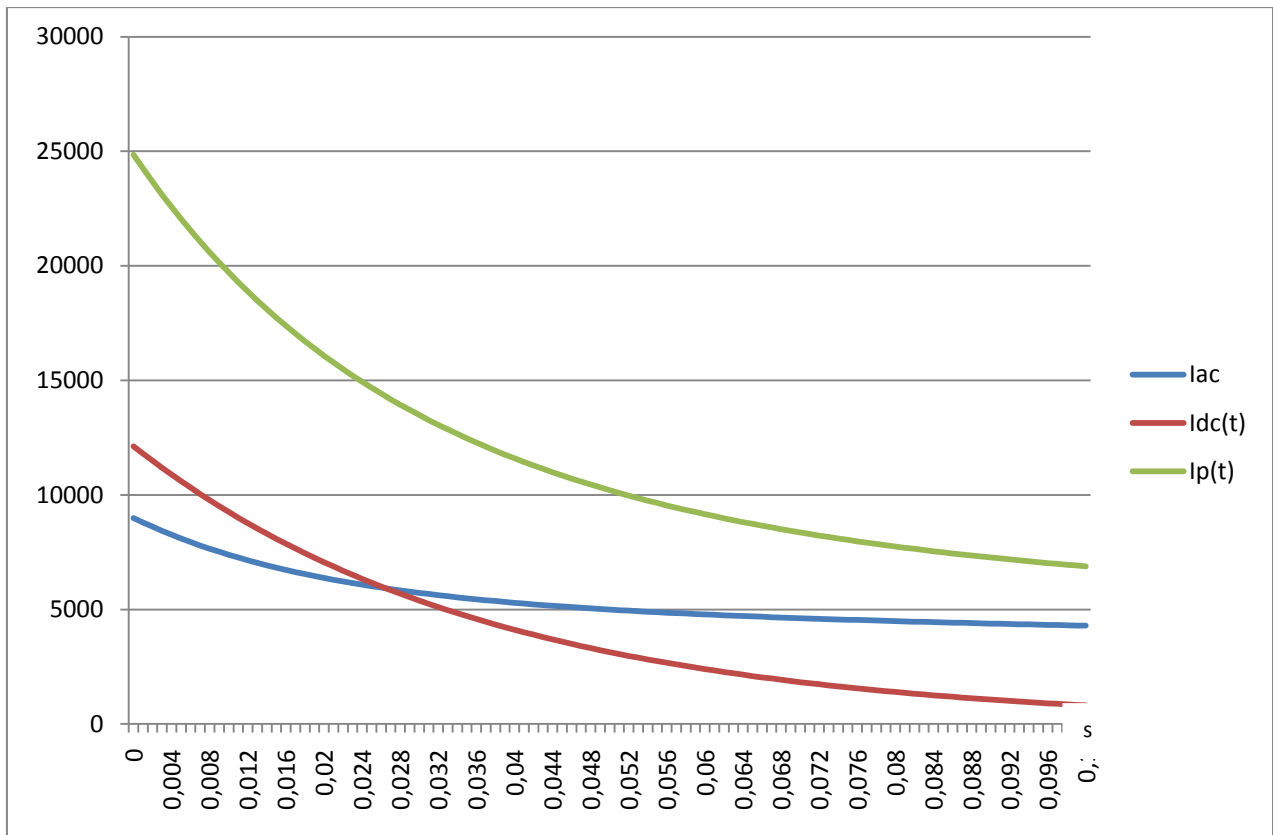
Inviluppo della corrente di corto del generatore da 1042 kVA [3.1.2.2.b]:

$i_{dc}$  -> componente unidirezionale di corto circuito

$i_{ac}$  -> componente alternata di corto circuito

$i_p$  -> componente di picco di corto circuito  $i_p = \sqrt{2}i_{ac} + i_{dc}$

A



Osservazioni:

il valore della tensione durante il guasto, e di conseguenza i valori di corrente che sono stati calcolati, sono riferiti al caso in cui la corrente erogata dal generatore sia pari all'80% di quella nominale. Questa è un'ipotesi di calcolo, poiché si ritiene improbabile che durante il guasto tutti e sei i generatori siano al massimo della propria potenza.

Questa considerazione è valida anche per i generatori da 581 kVA.

### 3.1.2.3 contributo al corto del generatore da 581 kVA

il valore di corrente che a 50 Hz serve per il dimensionamento degli interruttori è valutato  $t = T/2 = 10ms$

Valori della corrente di guasto [3.1.2.3.a.]

t [s]	Iac [A]
0	4963.5
0.001	4829.1
0.002	4702.4
0.003	4583.0
0.004	4470.4
0.005	4364.3
0.006	4264.2
0.007	4169.7
0.008	4080.7
0.009	3996.6
<b>0.01</b>	<b>3917.2</b>
...	...
...	...
0.08	2406.1
0.081	2400.5
0.082	2395.0
0.083	2389.5
0.084	2384.1
0.085	2378.8
0.086	2373.5
0.087	2368.3
0.088	2363.2
0.089	2358.1
0.09	2353.1
0.091	2348.1
0.092	2343.2
0.093	2338.3
0.094	2333.5
0.095	2328.7
0.096	2324.0
0.097	2319.3
0.098	2314.6
0.099	2310.0
0.1	2305.4

t [s]	I <sub>dc</sub> [A]
0	6689.5
0.001	6470.1
0.002	6258.0
0.003	6052.9
0.004	5854.4
0.005	5662.5
0.006	5476.9
0.007	5297.3
0.008	5123.6
0.009	4955.7
<b>0.01</b>	<b>4793.2</b>
...	...
...	...
0.08	464.8
0.081	449.5
0.082	434.8
0.083	420.5
0.084	406.7
0.085	393.4
0.086	380.5
0.087	368.0
0.088	356.0
0.089	344.3
0.09	333.0
0.091	322.1
0.092	311.5
0.093	301.3
0.094	291.4
0.095	281.9
0.096	272.6
0.097	263.7
0.098	255.0
0.099	246.7
0.1	238.6

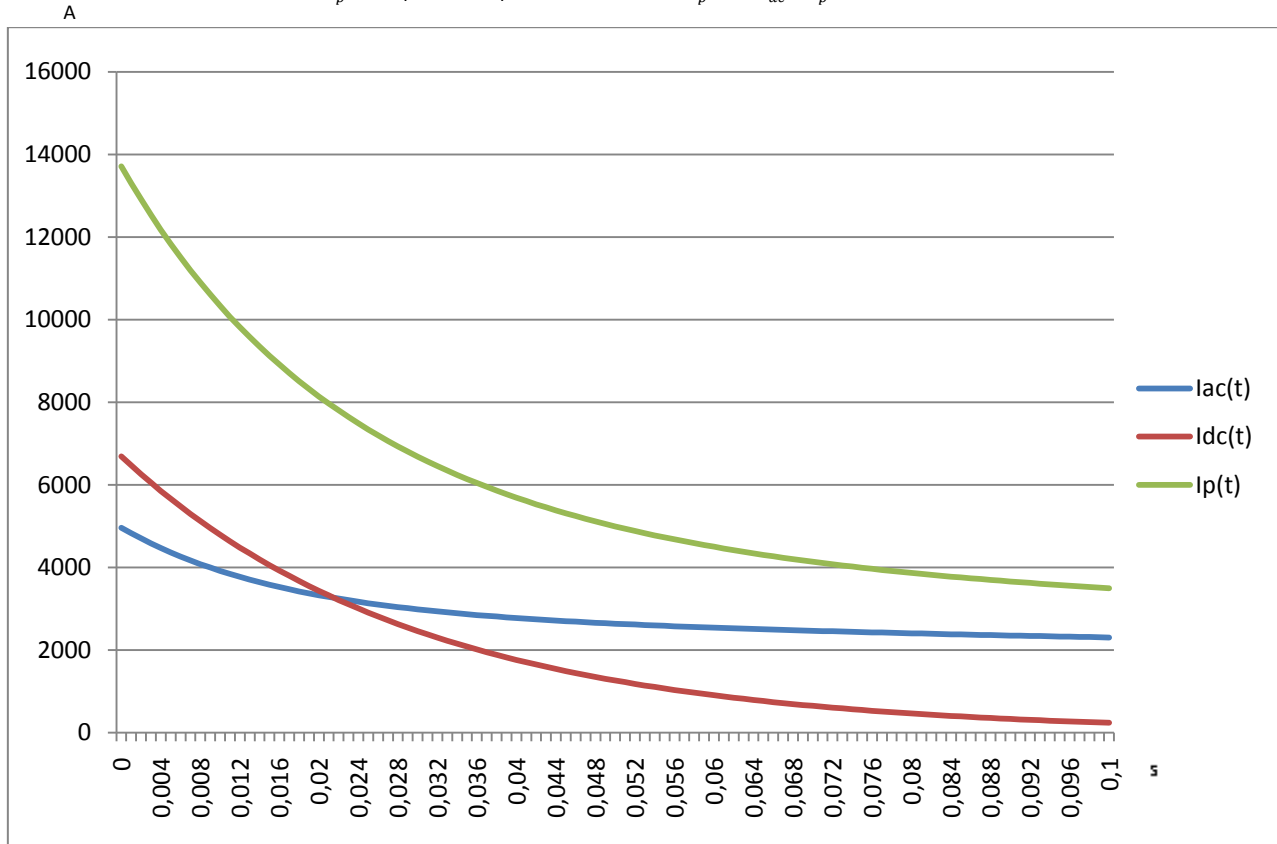
t [s]	I <sub>p</sub> [A]
0	13709.0
0.001	13299.5
0.002	12908.2
0.003	12534.2
0.004	12176.6
0.005	11834.6
0.006	11507.4
0.007	11194.3
0.008	10894.6
0.009	10607.8
<b>0.01</b>	<b>10333.1</b>
...	...
...	...
0.08	3867.6
0.081	3844.4
0.082	3821.8
0.083	3799.9
0.084	3778.4
0.085	3757.6
0.086	3737.2
0.087	3717.4
0.088	3698.1
0.089	3679.2
0.09	3660.8
0.091	3642.9
0.092	3625.4
0.093	3608.2
0.094	3591.5
0.095	3575.2
0.096	3559.3
0.097	3543.7
0.098	3528.5
0.099	3513.6
0.1	3499.0

Inviluppo della corrente di corto del generatore da 581 kVA [3.1.2.3.b]:

$i_{dc}$ -> componente unidirezionale di corto circuito

$i_{ac}$ -> componente alternata di corto circuito

$i_p$ -> componente di picco di corto circuito  $i_p = \sqrt{2}i_{ac} + i_p$



### 3.1.2.4. corrente di corto al QEP

Si può procedere ora al contributo equivalente durante il guasto sulla sbarra principale (QEP). I valori di corrente riportati sono ottenuti facendo una somma algebrica (caso peggiore) della corrente di corto dei singoli generatori. Ai fini del calcolo, si considera sia il valore della componente alternata, sia il valore complessivo di picco.

Tabella [3.1.2.4.a.]

	$I_{ac}(T/2)$ [A]	n° componenti	$I_{ac}$ QEP [A]
<b>generatore 1042</b>	7389.4	4	29557.6
<b>generatore 581</b>	3917.2	2	7834.4
<b>totale</b>			37392

Tabella [3.1.2.4.b.]

	$I_p(T/2)$ [A]	n° componenti	$I_p$ QEP [A]
<b>generatore 1042</b>	19705.2	4	78820.6
<b>generatore 581</b>	10333.1	2	20666.2
<b>totale</b>			99486.8

Si calcola il valore di impedenza equivalente al quadro elettrico principale, determinata dalla presenza di tutti e sei i generatori:

$$Z_{eq\ QEP} = \frac{U_n}{\sqrt{3} * I_{ac\ QEP} (T/2)} = \frac{690}{\sqrt{3} * 37392,44} = 0,0107\ \Omega$$

Per quanto concerne i dispositivi di protezione (in questo caso interruttori automatici) si considera che in corrispondenza del QEP siano previste delle protezioni per ciascuna linea sia in arrivo che in partenza.

In particolare, nel caso di linea in arrivo del generatore 1, la protezione dovrà essere dimensionata in maniera tale da avere un potere d'interruzione maggiore o uguale a 37392-7834,4 $\cong$  30003 A e un potere di chiusura superiore a 99486,8-19705,2 $\cong$ 79782 A. Anche per le linee in arrivo dal generatore 2 valgono le stesse considerazioni, potere d'interruzione maggiore o uguale di 37392-3917,2 $\cong$ 33475 A e potere di chiusura superiore a 99486,8-10333,1 $\cong$ 89154 A.

Per le linee in partenza dallo stesso quadro invece, il valore di corto è determinato da tutti i generatori che sono in funzione in quel momento, per cui tali interruttori dovranno avere:

potere d'interruzione  $\geq$  37392 A

potere di chiusura  $\geq$  99487 A

### 3.1.2.5. calcolo del generatore equivalente

Riepilogo dei risultati ottenuti, necessari per il calcolo dei parametri del generatore equivalente:

<i>Tabella [3.1.2.5.a]</i>			
	<b>unità di misura</b>	<b>generatore 1</b>	<b>generatore 2</b>
<b>U0</b>	<b>V</b>	690	690
<b>I<sub>ac</sub> (T/2)</b>	<b>A</b>	7389.4	3917.3
<b>I<sub>dc</sub> (T/2)</b>	<b>A</b>	9254.9	4793.2
<b>I''<sub>kd rms</sub></b>	<b>A</b>	8993.5	4963.5
<b>I'<sub>kd rms</sub></b>	<b>A</b>	5206.8	2862.5
<b>I<sub>kd rms</sub></b>	<b>A</b>	2615.6	1458.4
<b>numero generatori</b>		4	2
<b>T''<sub>d</sub></b>	<b>s</b>	0.02	0.016
<b>f</b>	<b>Hz</b>	50	50
<b>T/2</b>	<b>s</b>	0.01	0.01
<b>K''</b>	<b>A</b>	7503.6	3987.1

Per il calcolo della corrente di corto a valle dei trasformatori 690/400, è necessario rappresentare il comportamento della rete a monte con un unico generatore equivalente (tabella 3.1.2.5.b). Anche in questo caso le formule di calcolo utilizzate derivano dalla IEC 61363 che permette di sostituire i sei generatori (quattro da 1042 kVA e due da 581 kVA) con uno equivalente.

*Tabella [3.1.2.5.b.]*

	<b>unità di misura</b>	<b>generatore equivalente</b>
<b>I''*</b>	<b>A</b>	45901.1
<b>I'*</b>	<b>A</b>	26552.6
<b>I*</b>	<b>A</b>	13379.4
<b>M*</b>	<b>A</b>	19348.5
<b>N*</b>	<b>A</b>	13173.1
<b>K''*</b>	<b>A</b>	37988.6
<b>T'd*</b>	<b>s</b>	0.019
<b>I<sub>ac</sub>*(T/2)</b>	<b>A</b>	37392.4
<b>T'd*</b>	<b>s</b>	0.22
<b>I<sub>dc</sub>*</b>	<b>A</b>	46606.2
<b>T<sub>dc</sub>*</b>	<b>s</b>	0.03
<b>c3</b>	<b>/</b>	0.11
<b>Z''*</b>	<b>Ω</b>	0.0087
<b>Z'*</b>	<b>Ω</b>	0.015
<b>Z*</b>	<b>Ω</b>	0.03
<b>X''*</b>	<b>Ω</b>	0.0086
<b>R*</b>	<b>Ω</b>	0.00091
<b>X'*</b>	<b>Ω</b>	0.015
<b>X*</b>	<b>Ω</b>	0.03

\*parametri del generatore equivalente

### 3.1.2.6. corrente di corto del generatore equivalente

Con i nuovi parametri si calcolano i valori di corto circuito ottenuti col generatore equivalente, e si verifica che essi siano uguali a quelli ottenuti considerando i sei generatori singolarmente. il valore di corrente che a 50 Hz serve per il dimensionamento degli interruttori è valutato in  $t = T/2 = 10ms$ .

Valori della corrente di guasto [3.1.2.6.a.]

t [s]	I <sub>ac</sub> * [A]
0	45901.1
0.001	44849.1
0.002	43848.1
0.003	42895.6
0.004	41989.1
0.005	41126.2
0.006	40304.7
0.007	39522.5
0.008	38777.7
0.009	38068.2
<b>0.01</b>	<b>37392.4</b>
...	...
...	...
0.08	22762.0
0.081	22705.2
0.082	22649.4
0.083	22594.4
0.084	22540.4
0.085	22487.2
0.086	22434.7
0.087	22383.1
0.088	22332.2
0.089	22282.0
0.09	22232.5
0.091	22183.7
0.092	22135.5
0.093	22087.8
0.094	22040.8
0.095	21994.4
0.096	21948.5
0.097	21903.1
0.098	21858.2
0.099	21813.8
0.1	21769.9

t [s]	I <sub>dc</sub> * [A]
0	64914.0
0.001	62798.5
0.002	60751.8
0.003	58771.9
0.004	56856.5
0.005	55003.6
0.006	53211.0
0.007	51476.8
0.008	49799.2
0.009	48176.2
<b>0.01</b>	<b>46606.2</b>
...	...
...	...
0.08	4583.2
0.081	4433.9
0.082	4289.4
0.083	4149.6
0.084	4014.3
0.085	3883.5
0.086	3756.9
0.087	3634.5
0.088	3516.1
0.089	3401.5
0.09	3290.6
0.091	3183.4
0.092	3079.6
0.093	2979.3
0.094	2882.2
0.095	2788.2
0.096	2697.4
0.097	2609.4
0.098	2524.4
0.099	2442.1
0.1	2362.5

t [s]	I <sub>p</sub> * [A]
0	129828.1
0.001	126224.8
0.002	122762.6
0.003	119435.6
0.004	116238.2
0.005	113164.9
0.006	110210.6
0.007	107370.3
0.008	104639.2
0.009	102012.9
<b>0.01</b>	<b>99487.0</b>
...	...
...	...
0.08	36773.6
0.081	36543.9
0.082	36320.5
0.083	36103.0
0.084	35891.3
0.085	35685.2
0.086	35484.5
0.087	35289.1
0.088	35098.6
0.089	34913.1
0.09	34732.2
0.091	34555.9
0.092	34383.9
0.093	34216.3
0.094	34052.7
0.095	33893.0
0.096	33737.2
0.097	33585.1
0.098	33436.6
0.099	33291.6
0.1	33149.9

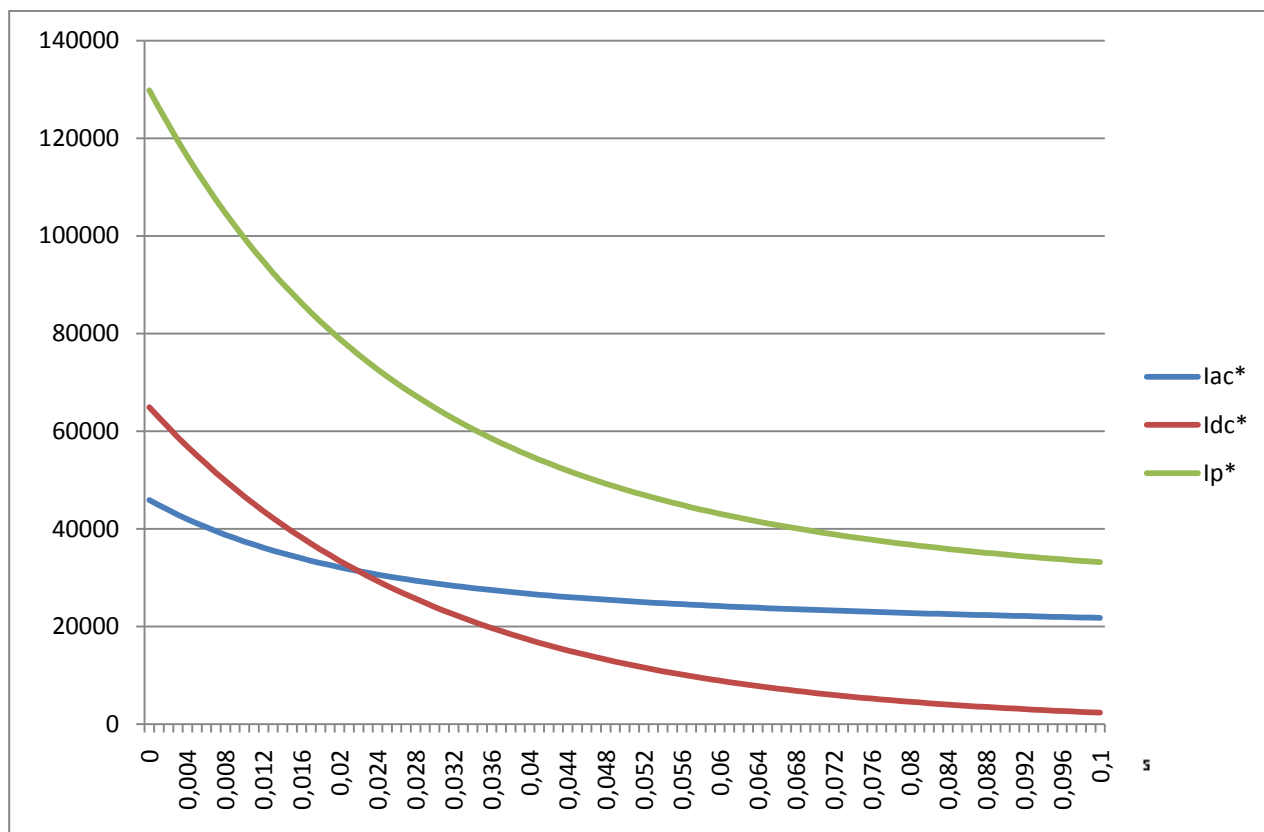
Involuppo della corrente di corto del generatore equivalente [3.1.2.6.b.]:

$i_{dc}$ -> componente unidirezionale di corto circuito

$i_{ac}$ -> componente alternata di corto circuito

$i_v$ -> componente di picco di corto circuito  $i_v = \sqrt{2}i_{ac} + i_v$

A



Come si può facilmente vedere dalla tabella 3.1.2.6.a. e dal grafico 3.1.2.6.b., il valore di corto del generatore equivalente coincide perfettamente con i valori ottenuti con i singoli generatori solo ed esclusivamente in  $T/2$ . In tutti gli altri istanti si otterranno valori tanto più approssimati quanto più ci allontaniamo da  $T/2$ . Questa situazione è determinata dal metodo di calcolo contenuto all'interno della normativa. Poiché il potere d'interruzione di corto circuito di un interruttore è individuato in  $T/2$ , allora si prende questo valore di corrente come riferimento per calcolare i parametri del generatore equivalente che presenterà, solo ed esclusivamente in corrispondenza di 10 ms ( $f=50$  Hz), gli stessi valori di corrente ottenuti come somma algebrica dai singoli generatori. Questa approssimazione è accettabile dato che la taratura dell'interruttore si baserà sui valori di corto nei primi istanti del guasto. Se l'interruzione del circuito avvenisse dopo diverse decine di ms, probabilmente, a causa delle elevate correnti in gioco i circuiti sarebbero già danneggiati, favorendo il pericolo d'incendio e di conseguenza verrebbe meno la sicurezza a bordo della nave.

### 3.1.2.7. generatore equivalente a valle del trasformatore

Calcolati i parametri del generatore equivalente, si può procedere alla valutazione della corrente di corto circuito a valle dei trasformatori le cui caratteristiche sono state sopra riportate.

Prima di procedere con i calcoli è importante osservare che:



se il trasformatore è abbastanza piccolo e la sua impedenza piuttosto elevata, allora il contributo al corto dovuto agli elementi collegati lato primario del trasformatore possono essere trascurati e l'avvolgimento secondario può ritenersi alimentato da una rete a potenza infinita. Viceversa, per trasformatori di elevata potenza e piccola reattanza, bisogna considerare la mutua influenza durante la condizione di guasto fra i due avvolgimenti (primario e secondario).

La normativa non fornisce un'interpretazione univoca nella definizione di grande o piccolo trasformatore, pertanto, la scelta di far rientrare il trasformatore in questione nella categoria più appropriata dipende volta per volta dalle caratteristiche impiantistiche.

In generale si può definire trasformatore con impedenza trascurabile se la sua impedenza determina una variazione del valore di corto fra primario e secondario entro il  $\pm 5\%$ .

Prima di procedere con i calcoli occorre calcolare il valore delle varie costanti di tempo inglobando anche i parametri del trasformatore.

Il primo passaggio è ricavare i parametri del trasformatore che insieme a quelli del generatore equivalente verranno riportati al secondario.

*Tabella [3.1.2.7.a.]*

	<b>unità di misura</b>	<b>valori</b>
<b>potenza</b>	kVA	450000
<b>V2n</b>	V	400
<b>I2n</b>	A	649.5
<b>vcc</b>	%	4.5
<b>Pcc</b>	W	4000
<b>Ztr sec</b>	$\Omega$	0.016
<b>Rtr sec</b>	$\Omega$	0.0032
<b>Xtr sec</b>	$\Omega$	0.016

Nel seguito si riporta una tabella contenente tutti i parametri necessari per il calcolo delle nuovi costanti di tempo. Ovviamente si dovranno considerare anche i parametri del trasformatore (R e X aggiuntive).

Tabella [3.1.2.7.b.]

	unità di misura	valori
<b>V1</b>	V	690
<b>V2</b>	V	400
<b>frequenza</b>	Hz	50
<b>R* sec</b>	$\Omega$	0.00031
<b>Ragg</b>	$\Omega$	0.0032
<b>X''d*sec</b>	$\Omega$	0.003
<b>X'd*sec</b>	$\Omega$	0.0050
<b>Xd*sec</b>	$\Omega$	0.010
<b>Xagg</b>	$\Omega$	0.016
<b>T''d*</b>	s	0.019
<b>T'd*</b>	s	0.22
<b>Tdc*</b>	s	0.030
<b>K</b>	/	1.725
<b>Z''eq sec</b>	$\Omega$	0.019
<b>Z'eq sec</b>	$\Omega$	0.021
<b>Ze eq sec</b>	$\Omega$	0.026
<b>T''eq tot</b>	s	0.03
<b>T'eq tot</b>	s	0.35
<b>Tdc eq tot</b>	s	0.017

### 3.1.2.8 corrente di corto a valle del trasformatore

Si riportano nella seguente tabella i parametri fondamentali per il calcolo delle componenti di corrente durante il guasto:

Tabella [3.1.2.8.a.]

	unità di misura	valori
<b>Uo</b>	V	400
<b>f</b>	Hz	50
<b>Z'' eq sec</b>	$\Omega$	0.019
<b>Z' eq</b>	$\Omega$	0.021
<b>Z eq</b>	$\Omega$	0.026
<b>I''eq sec</b>	A	12215.3
<b>I'eq sec</b>	A	10994.3
<b>Ieq sec</b>	A	8910.0
<b>T''eq tot</b>	s	0.03
<b>T'eq tot</b>	s	0.35
<b>Tdc eq tot</b>	s	0.017

il valore di corrente che a 50 Hz serve per il dimensionamento degli interruttori è valutato  $t = T/2 = 10ms$

Valori della corrente di guasto [3.1.2.8.a.]

t [s]	Iac sec [A]
0	12215.2
0.001	12168.8
0.002	12123.8
0.003	12080.0
0.004	12037.6
0.005	11996.3
0.006	11956.3
0.007	11917.4
0.008	11879.6
0.009	11842.8
<b>0.01</b>	<b>11807.2</b>
...	...
...	...
0.08	10648.7
0.081	10641.2
0.082	10633.8
0.083	10626.5
0.084	10619.4
0.085	10612.3
0.086	10605.3
0.087	10598.4
0.088	10591.5
0.089	10584.8
0.09	10578.2
0.091	10571.6
0.092	10565.1
0.093	10558.7
0.094	10552.3
0.095	10546.1
0.096	10539.9
0.097	10533.7
0.098	10527.6
0.099	10521.6
0.1	10515.7

t [s]	I <sub>dc</sub> sec [A]
0	17275.0
0.001	16291.8
0.002	15364.6
0.003	14490.2
0.004	13665.6
0.005	12887.8
0.006	12154.4
0.007	11462.7
0.008	10810.3
0.009	10195.1
<b>0.01</b>	<b>9614.9</b>
...	...
...	...
0.08	159.0
0.081	150.0
0.082	141.4
0.083	133.4
0.084	125.8
0.085	118.6
0.086	111.9
0.087	105.5
0.088	99.5
0.089	93.8
0.09	88.5
0.091	83.5
0.092	78.7
0.093	74.2
0.094	70.0
0.095	66.0
0.096	62.2
0.097	58.7
0.098	55.4
0.099	52.2
0.1	49.2

t [s]	I <sub>p</sub> sec [A]
0	34550.0
0.001	33501.2
0.002	32510.3
0.003	31574.1
0.004	30689.3
0.005	29853.3
0.006	29063.2
0.007	28316.4
0.008	27610.6
0.009	26943.4
<b>0.01</b>	<b>26312.8</b>
...	...
...	...
0.08	15218.6
0.081	15199.0
0.082	15180.0
0.083	15161.7
0.084	15143.9
0.085	15126.7
0.086	15110.1
0.087	15093.9
0.088	15078.3
0.089	15063.1
0.09	15048.3
0.091	15034.0
0.092	15020.1
0.093	15006.5
0.094	14993.3
0.095	14980.5
0.096	14967.9
0.097	14955.7
0.098	14943.8
0.099	14932.1
0.1	14920.7

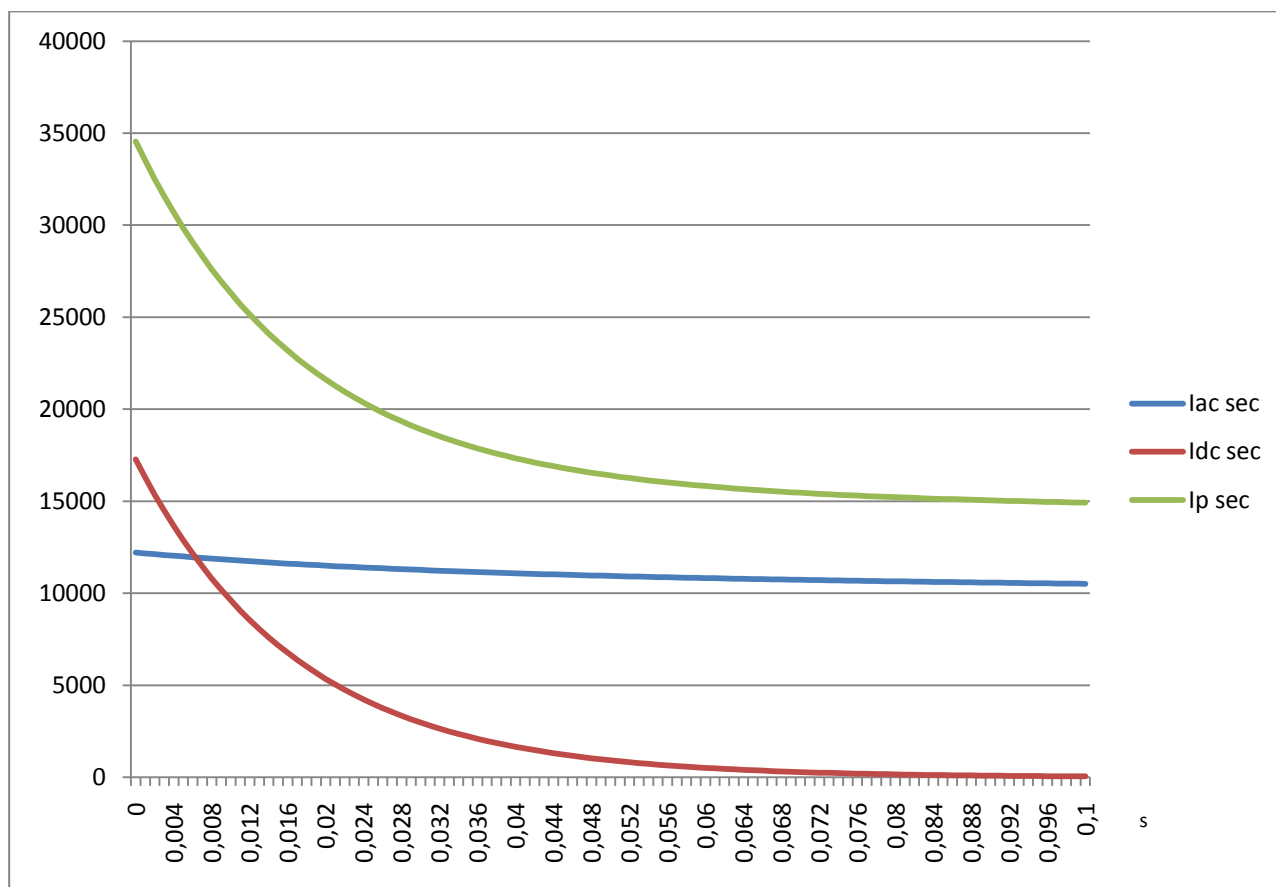
Involuppo della corrente di corto a valle del trasformatore [3.1.2.8.b.]:

$i_{dc}$  -> componente unidirezionale di corto circuito

$i_{ac}$  -> componente alternata di corto circuito

$i_p$  -> componente di picco di corto circuito  $i_p = \sqrt{2}i_{ac} + i_p$

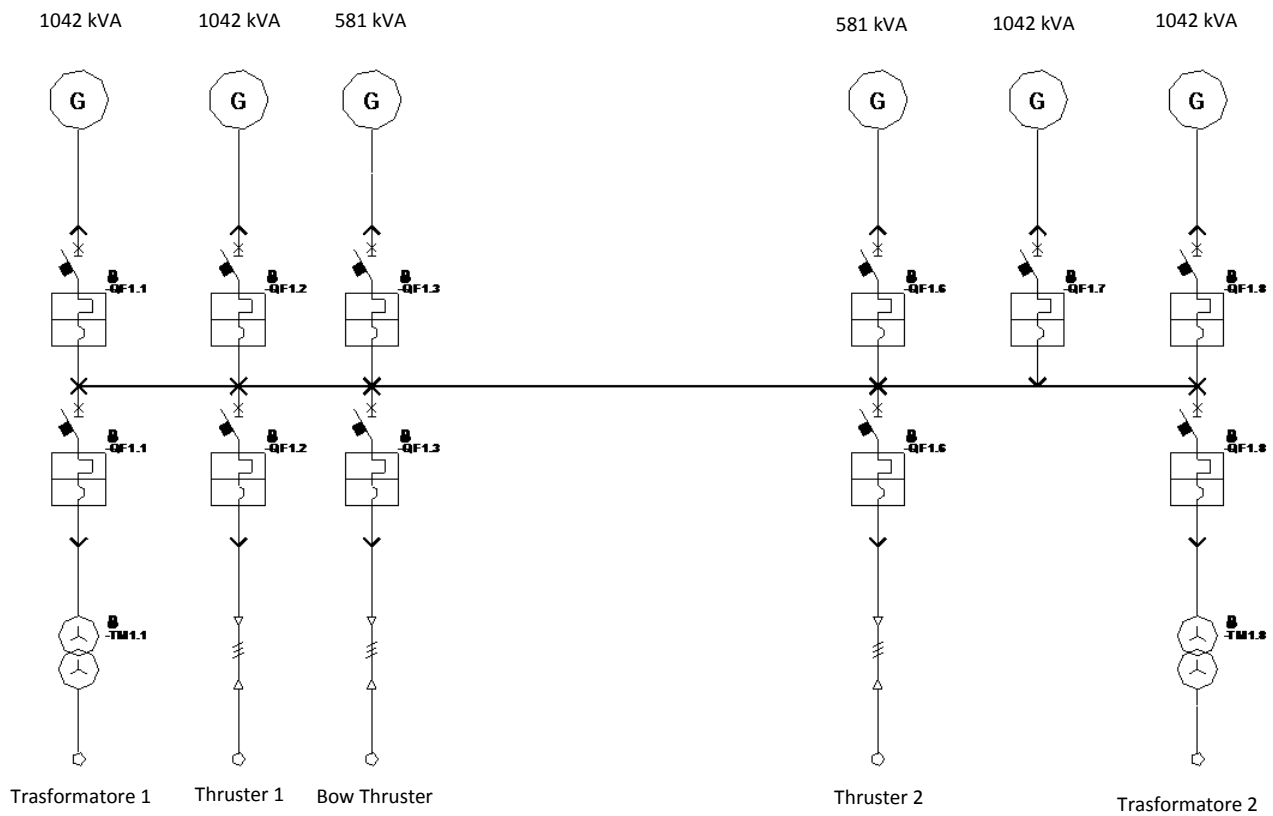
A



### 3.1.3. Calcoli di corto circuito con DOC

Mediante il software DOC si vogliono verificare i calcoli di corto circuito che sono stati eseguiti manualmente per l'impianto elettrico del Megayacht. Il primo passaggio fondamentale è la realizzazione dell'impianto e la specifica dei parametri. Per semplificare i passaggi e per concentrarsi sulla parte più interessante e critica (ossia i calcoli di corto in prossimità del quadro elettrico principale), si assumono le seguenti ipotesi di lavoro:

- La distribuzione dei generatori è simmetrica (tre sulla parte sinistra e 3 sulla parte di destra in maniera tale da avere un bilanciamento delle potenze)
- Si considerano solo i carichi principali: 2 main thruster, 1 bow thruster, 2 trasformatori.
- L'alimentazione dei motori avviene con l'interposizione di un convertitore, pertanto i motori di propulsione potranno essere schematizzati come carichi passivi.
- Tutti i carichi sopra menzionati, si ipotizzano funzionanti a  $\cos\varphi = 0,8$ .



Schema elettrico realizzato con DOC [3.1.3.a]

### 3.1.3.1. caratteristiche dei trasformatori

Trasformatore [3.1.3.1.a.]

Modello

MT/MT       Trifase  
 MT/bt       Monofase LL  
 bt/bt       Monofase LN

Avvolgimento: Stella  
 Tensione nominale: 690 [V]  
 Vn a vuoto: 400 [V]  
 Presa: 0 [%]  
 Numero di fasi: LLL  
 Sistema di distribuzione: IT

Primario: Stella  
 Secondario: Stella  
 Tensione nominale: 400 [V]  
 Vn a vuoto: 400 [V]  
 Presa: 0 [%]  
 Numero di fasi: LLLN  
 Sistema di distribuzione: IT

Potenza nominale: 450 [kVA]  
 Vcc%: 4 [%]  
 Perdite: 0.888 [%] [Aiuto](#)

### 3.1.3.2. Caratteristiche generatori

Generatore da 1042 kVA [3.1.3.2.a.]

Tensione nominale	$V_n$	690	[V]
Frequenza nominale	$f_n$	50	[Hz]
Potenza apparente nominale	$S_n$	1042	[kVA]
Fattore di potenza nominale	$\cos\phi_n$	0.8	
Fattore di partecipazione alle perdite	$F_b$	100	[%]
Resistenza d'armatura a 20°C	$R_a$	0.004463	[ $\Omega$ ]
Reattanza subtransitoria satura diretta	$x_d''$	10.2	[%]
Reattanza subtransitoria satura quadratura	$x_q''$	10.2	[%]
Reattanza transitoria diretta satura	$x_d'$	18.4	[%]
Reattanza sincrona diretta satura	$x_d$	135	[%]
Reattanza di sequenza inversa satura	$x_2$	10	[%]
Reattanza di sequenza omopolare	$x_0$	5	[%]
Costante di tempo subtransitoria	$T_d''$	20	[ms]
Costante di tempo transitoria	$T_d'$	222	[ms]
<input type="checkbox"/> Centro stella disponibile			
Simbolo	Stand-alone		

Generatore da 581 kVA [3.1.3.2.b.]

Tensione nominale	$V_n$	690	[V]
Frequenza nominale	$f_n$	50	[Hz]
Potenza apparente nominale	$S_n$	581	[kVA]
Fattore di potenza nominale	$\cos\phi_n$	0.8	
Fattore di partecipazione alle perdite	$F_b$	100	[%]
Resistenza d'armatura a 20°C	$R_a$	0.00959	[ $\Omega$ ]
Reattanza subtransitoria satura diretta	$x_d''$	10.3	[%]
Reattanza subtransitoria satura quadratura	$x_q''$	10.3	[%]
Reattanza transitoria diretta satura	$x_d'$	18.7	[%]
Reattanza sincrona diretta satura	$x_d$	135	[%]
Reattanza di sequenza inversa satura	$x_2$	10	[%]
Reattanza di sequenza omopolare	$x_0$	5	[%]
Costante di tempo subtransitoria	$T_d''$	16	[ms]
Costante di tempo transitoria	$T_d'$	196	[ms]
<input type="checkbox"/> Centro stella disponibile			
Simbolo	Stand-alone		

### 3.1.3.3. normative navali rispettate dagli interruttori ABB utilizzati

Il software consente di eseguire, oltre ai calcoli di corto circuito, anche il dimensionamento delle apparecchiature che dovranno essere installate all'interno del quadro elettrico principale (QEP).

La scelta degli interruttori è stata eseguita tenendo conto del tipo di impianto. Poiché si fa riferimento ad un'imbarcazione, nel caso specifico uno yacht, si dovranno rispettare le normative navali sia italiane, sia quelle dei più importanti registri navali a livello europeo/mondiale, dato che, ancora oggi, non è stato riconosciuto un univoco organismo internazionale ma la legislazione è affidata ai singoli Paesi.

Si riportano le norme e le certificazioni degli interruttori utilizzati (gli Emax serie E ed X1):



Gli interruttori SACE Emax ed i loro accessori rispondono alle Norme internazionali IEC 60947, EN 60947 (armonizzate in 30 paesi del CENELEC), CEI EN 60947 e IEC 61000 e conformi alla direttiva CE:

- “Low Voltage Directives” (LVD) nr. 73/23 EEC
- “Electromagnetic Compatibility Directive” (EMC) nr. 89/336 EEC.

Le principali versioni degli apparecchi sono omologati dai seguenti Registri Navali:

- RINA (Registro Italiano Navale)
- Det Norske Veritas
- Bureau Veritas
- Germanischer Lloyd
- Loyd’s Register of Shipping
- Polskij Rejester Statkow
- ABS (American Bureau Shipping)
- RMRS (Russian Maritime Register of Shipping)
- NK (Nippon Kaiji Kyokai)

La serie Emax dispone anche di una gamma che è stata sottoposta a certificazione secondo le rigide normative americane UL 1066; inoltre, è certificata dall'ente certificatore russo GOST (Russia Certificate of Conformity) e ha ottenuto il certificato China CCC (China Compulsory Certification). La certificazione di conformità alle Norme di prodotto sopra menzionate viene effettuata, nel rispetto della Norma europea EN 45011, dall'organismo di certificazione italiano ACAE (Associazione per la Certificazione delle Apparecchiature Elettriche), riconosciuto dall'ente europeo LOVAG (Low Voltage Agreement Group), e dall'organismo di certificazione svedese SEMKO riconosciuto dall'ente internazionale IECEE.



### 3.1.3.4. valori della corrente di corto trifase

Nelle figure 3.1.3.4.a., 3.1.3.4.b. e 3.1.3.4.c. , si riportano i valori della corrente di corto circuito calcolata nei vari punti dell'impianto.

Tensione nominale	<input type="text" value="690"/>	[V]
Tensione calcolata	<input type="text" value="690"/>	[V]
Sfasamento	<input type="text" value="0"/>	[°]
I <sub>b</sub>	<input type="text" value="3526.85"/>	[A]
Fattore di potenza richiesto	<input type="text" value="0.8"/>	<input type="button" value="Correzioni"/>

Valori al quadro elettrico principale [3.1.3.4.a.]

GetString(): unable to get string	
I <sub>2k</sub>	<input type="text" value="46.5085"/> [kA]
I <sub>k</sub>	<input type="text" value="6.9274"/> [kA]
I <sub>p</sub>	<input type="text" value="102.2257"/> [kA]
	[10ms]
I <sub>dc</sub>	<input type="text" value="48.9790"/> [kA]
I <sub>ac</sub>	<input type="text" value="37.6703"/> [kA]
I <sub>kt</sub>	<input type="text" value="102.2257"/> [kA]

Le condizioni più gravose durante il corto si verificano sulla sbarra del QEP. In tale punto si hanno tutti i contributi dei generatori (condizione peggiore).

I valori importanti, per la scelta di un interruttore, sono quelli ricavati in corrispondenza dei 10ms in condizioni di corto:

$$I_{cs} = I_{ac} \left( \frac{T}{2} = 10ms \right) = 37,67 \text{ kA}$$

$$I_{cm} = I_p \left( \frac{T}{2} = 10ms \right) = 102,23 \text{ kA}$$

Con I<sub>2k</sub> si indica il valore della componente simmetrica del corto all'istante iniziale, mentre I<sub>k</sub> è la componente di corto di regime dopo lo smorzamento di tutti i fenomeni transitori.

Valori di corto sul montante generatore da 1042 kVA [3.1.3.4.b.]

Tensione nominale	<input type="text" value="690"/>	[V]
Tensione calcolata	<input type="text" value="690"/>	[V]
Sfasamento	<input type="text" value="0"/>	[°]
I <sub>b</sub>	<input type="text" value="689.49"/>	[A]
Fattore di potenza richiesto	<input type="text" value="0.9"/>	<input type="button" value="Correzioni"/>

GetString(): unable to get string	
I <sub>2k</sub>	<input type="text" value="37.3968"/> [kA]
I <sub>k</sub>	<input type="text" value="5.5730"/> [kA]
I <sub>p</sub>	<input type="text" value="82.1993"/> [kA]
	[10ms]
I <sub>dc</sub>	<input type="text" value="39.4773"/> [kA]
I <sub>ac</sub>	<input type="text" value="30.2246"/> [kA]
I <sub>kt</sub>	<input type="text" value="82.1993"/> [kA]



Come si può facilmente vedere dal confronto fra le correnti di guasto rilevate al QEP e ai morsetti del generatore 1, si ottengono valori differenti di corto. Il calcolo eseguito da DOC, ha come obiettivo principale il dimensionamento degli apparecchi, per cui il valore di corrente calcolato non è il valore reale nel punto in cui ci siamo messi, ma rappresenta il valore di corrente che attraversa l'interruttore. Nell'ultima tabella sopra riportata, l'apparecchio sul montante del generatore1, in caso di guasto ai morsetti dello stesso, sarà interessato dai contributi provenienti dagli altri cinque generatori, per poi confluire nel punto di guasto nel quale ci sarà anche il contributo del generatore A.

Proviamo a verificare quanto affermato con valori reali.

L'esempio è riferito ai due più importanti valori di corrente per la scelta dell'interruttore:

- $I_{ac}$
  - $I_p$
- Entrambi riferiti a T/2

Si rappresenta mediante una tabella il valore delle correnti considerate:

Tabella [3.1.3.4.c.]

	QEP	morsetti gen A	contributo gen A
<b>I<sub>ac</sub> [kA]</b>	37,67	30,22	7,4
<b>I<sub>p</sub> [kA]</b>	102,23	82,2	19,7

$$I_{ac\ teorica} = 30,22 + 7,4 = 37,62\ kA$$

$$I_{p\ teorica} = 82,2 + 19,7 = 101,9\ kA$$

Si ottengo dei valori molto prossimi a quelli calcolati con DOC, quindi le considerazioni iniziali riguardo il metodo di calcolo, sono state confermate.

Valori di corto sul montante generatore da 581 kVA [3.1.3.4.d.]

Tensione nominale	<input type="text" value="690"/>	[V]
Tensione calcolata	<input type="text" value="690"/>	[V]
Sfasamento	<input type="text" value="0"/>	[°]
I <sub>b</sub>	<input type="text" value="384.447"/>	[A]
Fattore di potenza richiesto	<input type="text" value="0.9"/>	<input type="button" value="Correzioni"/>

GetString(): unable to get string

I <sub>2k</sub>	<input type="text" value="41.4780"/>	[kA]
I <sub>k</sub>	<input type="text" value="6.1728"/>	[kA]
I <sub>p</sub>	<input type="text" value="90.6380"/>	[kA]
	<input type="text" value="[10ms]"/>	
I <sub>dc</sub>	<input type="text" value="42.9620"/>	[kA]
I <sub>ac</sub>	<input type="text" value="33.7282"/>	[kA]
I <sub>kt</sub>	<input type="text" value="90.6380"/>	[kA]

Tabella [3.1.3.4.e.]

	QEP	morsetti gen A	contributo gen A
<b>I<sub>ac</sub> [kA]</b>	37,67	33,73	3,92
<b>I<sub>p</sub> [kA]</b>	102,23	90,64	10,33

$$I_{ac\ teorica} = 33,73 + 3,92 = 37,65\ kA$$

$$I_p\ teorica = 90,64 + 10,33 = 101,97\ kA$$

Per il dimensionamento dei dispositivi posti sulle partenze del QEP si utilizzano le correnti di corto calcolate alla stessa sbarra (contributo di tutti e 6 i generatori).

### 3.1.3.5. Scelta degli interruttori da installare nel QEP

Montante generatore 1042 kVA: E1B 1000 PR122-LSI 1000A

Montante generatore 581 kVA: E1N 1000 PR122-LSI 630A

Montante trasformatore 450 kVA: E1N 1000 PR122-LSI 630A

Montante main thruster: E2N 2000 PR121-LSI 2000A

Montante bow thruster: X1N 630 PR331 LSI 400A

Tabella [3.1.3.5.a.]

	$I_n$	$I_{cu}$	$I_{cs}$	$I_{cw} (3\ s)$	$I_{cm}$
	kA	kA	kA	kA	kA
montante generatore 1042 kVA	1000	42	42	36	88,2
montante generatore 581 kVA	1000	50	50	36	105
montante trasformatore 450 kVA	1000	50	50	36	105
montante main thruster	2000	55	55	42	121
montante bow thruster	630	50	42	42 (a 1 s)	105

### 3.2. Analisi di corto circuito per la rete di distribuzione in DC

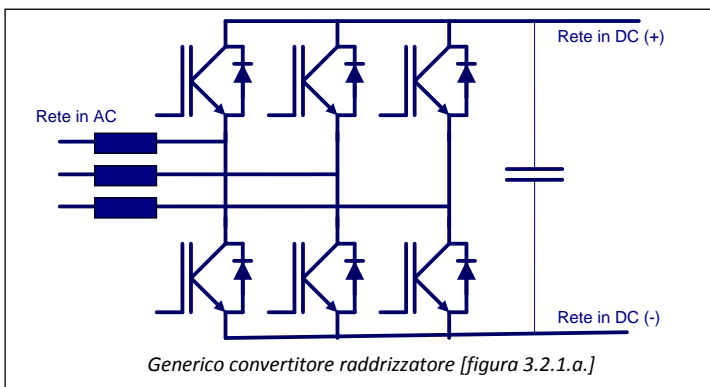
Lo studio delle condizioni di guasto per la distribuzione DC, a differenza di quanto eseguito per l'alternata, non può essere condotto con l'applicazione di normative o formule specifiche perché il comportamento dei convertitori è ancora in fase di studio. La trattazione dell'argomento in questo paragrafo si limita solo a elencare i problemi che si riscontrano per la protezione di una rete in DC e fornire delle valutazioni teoriche sulle possibili soluzioni nel caso in cui si ipotizzi che il convertitore limiti la corrente di corto circuito.

In riferimento al Megayacht la rete può essere schematizzata nel seguente modo:

- Convertitore AC/DC ( per interfacciare i generatori al DC-bus)
- Convertitori DC/AC per carichi attivi (servono per alimentare i motori di propulsione)
- Convertitori DC/DC per i servizi ausiliari (tipicamente sono carichi passivi)

Si cerca di valutare, seppur in maniera qualitativa, il comportamento dei convertitori in caso di guasto lungo la dorsale in continua. Lo studio, particolarmente innovativo, è reso difficoltoso proprio dall'utilizzo dei convertitori che sono dispositivi non lineari e tempo variante. Per il Megayacht bisognerà prevedere delle isole in alterata che saranno alimentate con convertitori DC/AC i cui metodi di protezione saranno identici a quelli ipotizzati per il convertitore di propulsione in quanto l'unica differenza, oltre al valore della potenza, è la presenza di carichi passivi anziché attivi e che quindi non contribuiranno al guasto.

#### 3.2.1. Analisi del convertitore AC/DC



Le prime considerazioni vengono eseguite sui convertitori AC/DC (figura 3.2.1.a.) che sono installati in corrispondenza di ogni generatore. Ai morsetti d'uscita del dispositivo è presente un condensatore che durante le condizioni di normale funzionamento consente di mantenere il valore della tensione sul DC-bus il più

possibile costante. Proprio tale elemento durante la condizione di corto circuito sulla rete in continua potrebbe fortemente influenzare la corrente di guasto soprattutto nei primissimi istanti. Si ipotizza, per eseguire questa trattazione, che a valle del convertitore AC/DC, cioè sulla rete in continua, sia installato un interruttore automatico di protezione. Nel caso di corto circuito franco sul DC-bus la corrente fornita dalla sezione in alternata circolerebbe fino a raggiungere un valore teoricamente infinito; in realtà tale valore è limitato dalle impedenze delle valvole, dei cavallotti e degli stessi conduttori. I valori che si raggiungono con tale configurazione sono tali da portare alla sicura distruzione delle valvole prima che l'interruttore DC possa intervenire, portando ad una riparazione o sostituzione del convertitore, il che significa mettere fuori servizio il generatore dal quale era alimentato. Questa condizione è critica per il Megayacht poiché, come sottolineato più volte, la generazione e i carichi hanno potenze dello stesso ordine di grandezza, pertanto

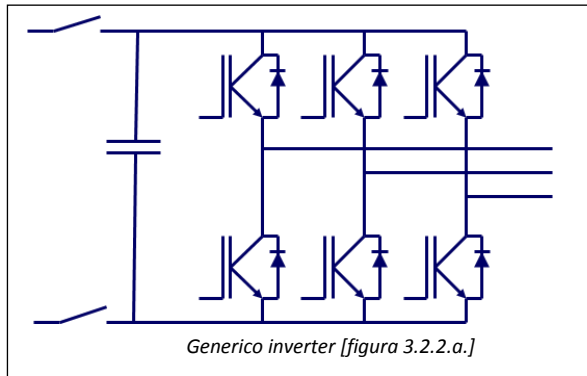
l'assenza di un solo generatore determinerebbe il distacco di alcuni carichi. Una possibile soluzione potrebbe essere quella di coordinare la funzione del classico interruttore elettromeccanico con gli interruttori statici (IGBT) i cui tempi di manovra sono tre ordini di grandezza inferiori. Qualora i tempi di intervento dell'interruttore statico non siano sufficienti per eliminare il guasto senza provocare danni, allora sarà necessario coordinare induttanze e capacità al fine di limitare le brusche variazioni di corrente e tensione anche se quest'aspetto è ancora in fase di studio.

### 3.2.2. Analisi del convertitore DC/AC

La seconda categoria di convertitori che si vogliono studiare sono quelli per l'alimentazione DC/AC dei motori di propulsione (figura 3.2.2.a.).

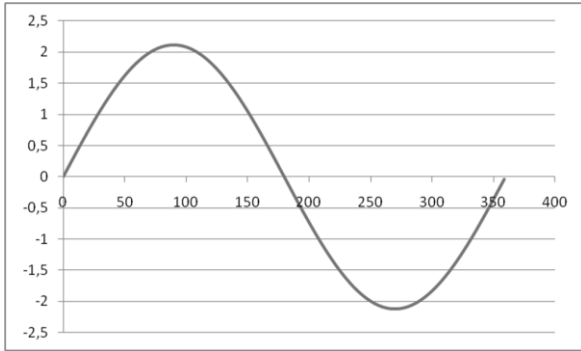
A monte del convertitore (lato DC) viene installato un interruttore di protezione. Un eventuale corto circuito potrà essere:

- Interno al convertitore
- Esterno al convertitore

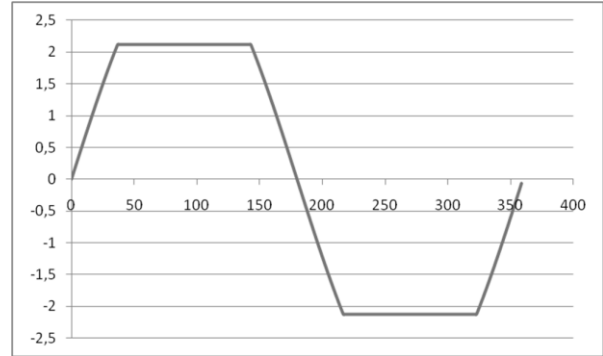


Nel primo caso, si potrebbe verificare un guasto sul condensatore in continua che determina nella sezione guasta una corrente di corto proveniente principalmente dai convertitori AC/DC di generazione in grado di determinare lo sgancio dell'interruttore sul lato DC. Questa condizione è valida se la  $I_n$  dell'interruttore (dotato di relè elettronico) è minore di tre volte rispetto a quella di corto, cioè se la potenza del convertitore DC/AC considerato è minore di quella fornita sul DC-bus. Nel caso di guasto interno al convertitore ma che interessa le valvole (IGBT), entrerà in funzione il circuito di spegnimento delle stesse, e grazie ad un'opportuna logica di controllo si potrà comandare la bobina di sgnacio dell'interruttore sezionando in tal modo il convertitore.

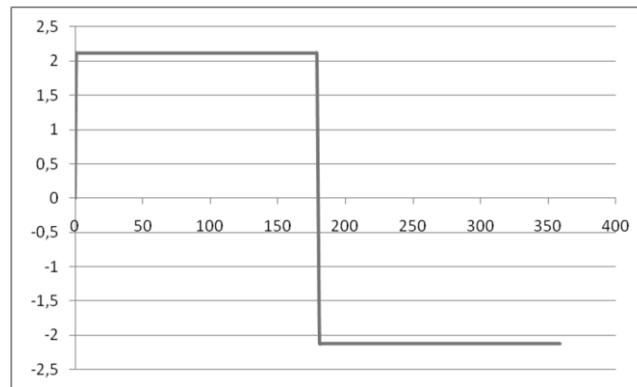
Nel caso di guasto esterno, sempre nella sezione in continua, l'interruttore installato sarà interessato dalla corrente proveniente dal condensatore posto in ingresso al convertitore il cui valore di corrente e di durata è fortemente variabile in funzione della tipologia di materiale utilizzato, inoltre potrebbe fluire la corrente del carico attivo, tramite il convertitore, nella sezione di guasto (lato DC). In questa situazione, se il valore di corrente fosse troppo elevato, le valvole si guasterebbero, 'proteggendo' in tal modo l'interruttore lato DC. Nel caso di guasto franco esterno e sul lato AC, il convertitore è in grado di fornire un valore di corrente compreso fra il 150% e il 200% del suo valore nominale per un certo periodo di tempo (alcuni secondi) dopodiché si spegne ( si veda a titolo di esempio gli andamenti qualitativi riportate nei grafici 3.2.2.).



Condizione di sovraccarico pari a  $1,5I_n$  [3.2.2.b.]



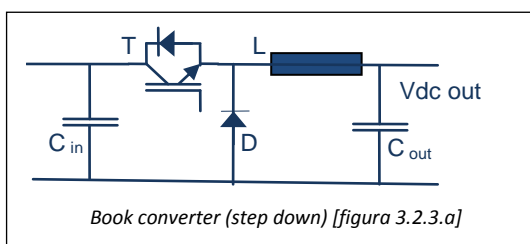
Condizione di sovraccarico superiore a  $1,5I_n$  [3.2.2.c.]



Condizione di corto circuito netto lato AC [3.2.2.d.]

Nell'impianto del Megayacht a valle dei convertitori DC/AC è installato un unico carico: il motore di propulsione. In questa circostanza, i classici interruttori per le reti AC non sono in grado di aprire in poche decine di ms poiché la corrente di corto circuito assume gli stessi ordini di grandezza di un leggero sovraccarico. L'erogazione di una corrente di guasto per diversi secondi sul Megayacht è intollerabile in quanto si avrebbe un reale pericolo di surriscaldamento e incendio. Il guasto esterno lato AC è ancora in fase di studio, si può comunque dire che un metodo per far intervenire l'interruttore potrebbe essere quello di dotare il convertitore di opportuni condensatori in modo tale da ottenere, in caso di guasto, una brusca variazione di tensione che provochi picchi di corrente consentendo l'apertura dell'interruttore. Una seconda strada potrebbe essere quella di introdurre degli interruttori *intelligenti* in grado di distinguere la corrente di sovraccarico da quella di corto circuito utilizzando una seconda variabile di controllo: la tensione ai morsetti del carico. Nel caso in cui ci fosse un guasto franco si avrebbe una corrente fornita dal convertitore pari a  $I_{corto} = 1,5$  o  $2 I_n$  e la tensione lato carico crollerebbe, permettendo in tal modo di discriminare questa situazione da quella di semplice sovraccarico.

### 3.2.3. Analisi del convertitore DC/DC



Si valuta ora il comportamento dei convertitori DC/DC per l'alimentazione dei circuiti ausiliari in continua il cui circuito è rappresentato 3.2.3.a. Si ipotizza che i carichi alimentati siano prevalentemente passivi, in modo tale

da poter trascurare la corrente che fluirebbe dalla sezione d'uscita (carichi in DC) a quella d'ingresso (DC-bus). Quest'ipotesi, in riferimento allo schema elettrico del Megayacht è valida se si pensa che i convertitori che si stanno analizzando sono adibiti all'alimentazione dei SA il cui valore di forza motrice può essere trascurato rispetto a tutti i carichi passivi presenti. In definitiva nel caso di guasto a monte del dispositivo (DC-bus) l'unico contributo di corrente proveniente dal convertitore potrebbe essere dato dal condensatore a causa della brusca variazione di tensione determinata dal guasto e che sarà tanto più critica quanto più il guasto sarà netto. Nel caso di corto a valle (lato carichi), la corrente potrà assumere valori molto elevati in funzione dell'impedenza offerta dall'anello di guasto, e comunque sarà in grado di raggiungere valori tali da determinare la distruzione delle valvole prima che l'interruttore posto fra il convertitore e la sezione in cui è avvenuto il corto possa intervenire. In questo caso, una possibile soluzione potrebbe essere offerta dall'introduzione dei medesimi accorgimenti precedentemente elencati per il convertitore AC/DC di interfacciamento fra il generatore e la rete in continua.

#### 3.2.4. Considerazioni sul funzionamento degli interruttori in alternata a valle di un inverter

In quest'ultimo paragrafo del capitolo si focalizza l'attenzione sul funzionamento dei classici interruttori in alternata nel caso in cui fossero installati a valle di un inverter in grado di fornire una potenza durante il guasto molto più limitata rispetto a quella fornita dalla tradizionale rete AC.

Gli inverter, così come tutti i convertitori, sono dispositivi non lineari che sono realizzati da valvole. Il funzionamento intrinseco di questi elementi determina dei valori di corto circuito molto ridotto (pari a 1,5 volte la corrente nominale). Il coordinamento e le protezioni dei convertitori per un impianto navale realizzato in DC è reso difficoltoso se si adottano i medesimi apparecchi (fusibili, int. Termomagnetici) utilizzati nei classici impianti. Con tali dispositivi la rilevazione del guasto in continua si può realizzare solo con l'inserimento nell'impianto di condensatori in grado di fornire picchi di corrente durante le variazioni di tensioni determinate dal guasto. Questi picchi (140 kA) sono piuttosto elevati in modo da rendere sicuro il funzionamento delle protezioni la cui soglia d'intervento è di 3-4 In . La soluzione con i fusibili, utilizzata principalmente nel Nord Europa, presenta l'inevitabile svantaggio di dover sostituire manualmente il dispositivo ogni qualvolta intervenga, con tempi di ripristino dell'impianto sicuramente elevati. Il vantaggio dell'impiego di convertitori che limitano, almeno teoricamente, la corrente di guasto, è quello di ridurre il valore degli sforzi elettrodinamici ai quali i sistemi di distribuzione saranno sottoposti. Attualmente il problema rappresentato dall'impossibilità di rilevare correnti così piccole sembra essere superato dall'utilizzo dei relè elettronici che sono in grado di avvertire il guasto e di conseguenza intervenire, in tempi ridottissimi (da qualche ms a qualche decina di ms a seconda della tipologia di interruttore). La scelta dei sistemi di protezione per garantire la massima selettività dell'impianto è legata al tipo e al numero dei convertitori oltre che al numero di carichi che bisogna alimentare. Si utilizza come esempio lo schema di figura 3.2.4.a.:

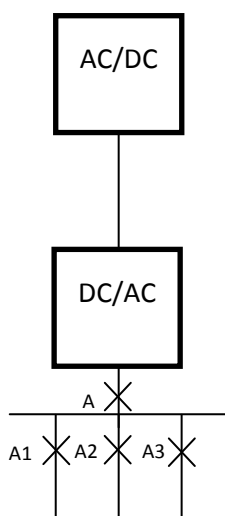


Figura [3.2.4.a.]

Se si ipotizza il guasto a valle dell'inverter è possibile, con interruttori equipaggiati con relè elettronici, ottenere la selettività:

1° caso: guasto a valle di A1. Si ipotizza che i tre interruttori a valle di A alimentino carichi uguali. In caso di corto a valle di A1, si può garantire solo il suo intervento poiché la curva del relè (A1) è più a 'sinistra' rispetto a quella dell'interruttore A che ha una corrente nominale maggiore dato che si trova a monte.

2° caso: Guasto a valle di A. il corto non viene avvertito dagli interruttori a valle per cui si apre l'interruttore generale. Il problema nasce se si vuole discriminare la situazione di corto da quella di sovraccarico.

Se si avesse una corrente di sovraccarico pari a  $1,5 I_n$ , il convertitore non avvertirebbe alcuna differenza rispetto al caso di corto.

Per poter far lavorare il circuito anche con questi sovraccarichi, dovuti per esempio all'avvio di più macchine che portano ad una corrente di spunto maggiore di quella nominale, si potrebbe cercare di sovradimensionare il convertitore affinché, la sua corrente di "sovraccarico" pari a  $1,5 I_n$  sia maggiore di quella richiesta dal sistema di distribuzione durante l'avviamento. Con tale soluzione si potrebbe mantenere il funzionamento in condizioni di sovraccarico per un tempo stabilito dal progettista e non legato alle esigenze funzionali dell'inverter.

Ovviamente lo studio della rete in DC con i convertitori è molto articolato e richiede conoscenze sul loro funzionamento che sono in fase di studio. Sembra, almeno per il momento, che si stia affermando la tendenza di delegare la protezione del circuito a logiche di controllo piuttosto che a grandezze fisiche (come ad esempio la corrente) che, grazie alle elevate forze elettrodinamiche prodotte sui contatti hanno costituito fino ad oggi un metodo per l'apertura dei contatti del dispositivo durante il guasto. Se le considerazioni sui corto circuiti in DC fossero confermate, gli interruttori che sarebbero necessari nella nuova architettura presenterebbero, rispetto alla soluzione AC, un volume, un peso e un costo nettamente inferiore anche se un confronto numerico con la soluzione AC attualmente non è realizzabile.

Le protezioni dovranno possedere la capacità di discriminare il proprio intervento a seconda che il guasto sia interno o esterno al convertitore per poter garantire l'alimentazione dei carichi da una seconda sorgente (ad esempio un secondo convertitore). Tutte queste considerazioni e valutazioni sono valide solo nel rispetto dell'ipotesi iniziale: il convertitore limita la corrente di guasto a  $1,5 I_n$ , anche se studi recenti sembrano smentire, almeno in parte, questa condizione di funzionamento per alcune tipologie di drives.

#### 4. Confronto fra la soluzione AC e DC per il Megayacht

Schema elettrico in AC:

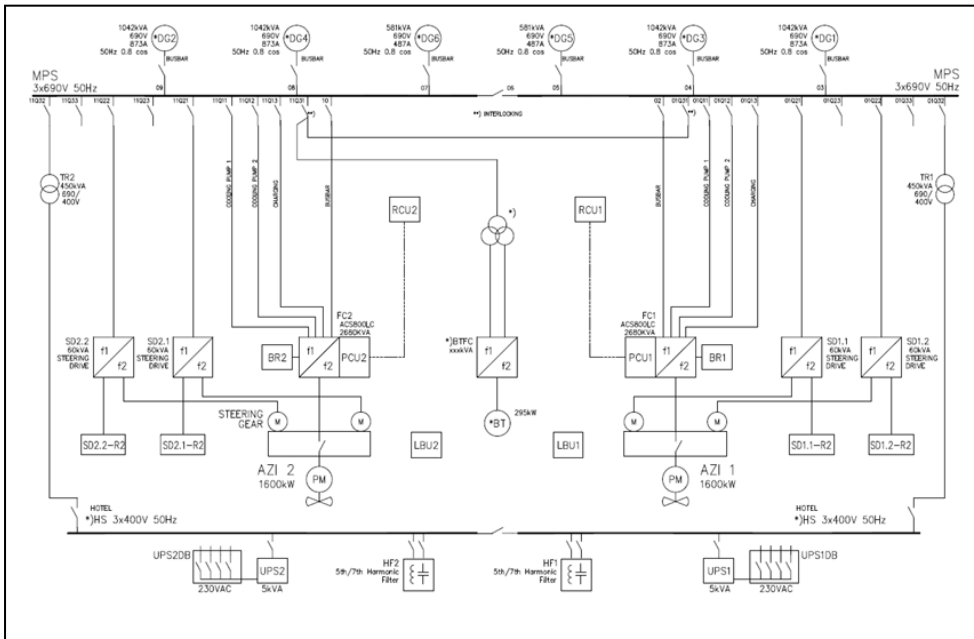


Figura [4.a.]

Possibile schema elettrico in DC del Megayacht

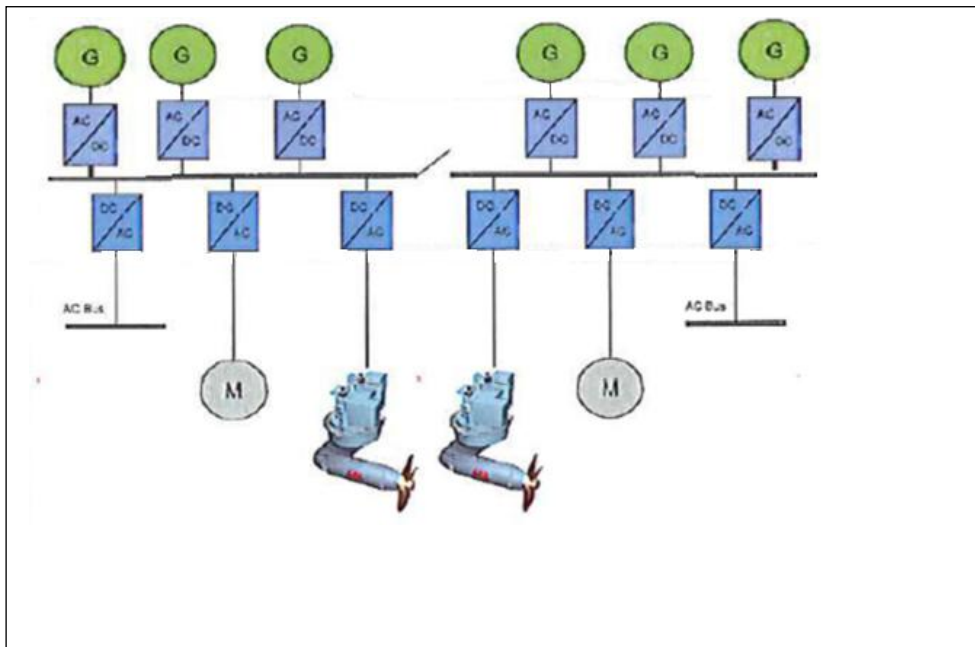


Figura [4.b.]

in questo capitolo si studiano le due configurazioni elettriche (AC e DC) del Megayacht per verificare quale dei due sistemi risulti essere più vantaggioso dal punto di vista tecnico. L'analisi verrà condotta concentrandosi su tre parti fondamentali:

- Sistema di distribuzione



- Sistema di trasformazione
- Sistemi di propulsione

Prima di procedere nella trattazione si valutano i dispositivi da inserire a valle della generazione per poter consentire la distribuzione in DC dato che in alternata non è necessario alcun accorgimento. Per ogni generatore si deve installare un convertitore raddrizzatore che consentirà al singolo diesel-gen sets di lavorare in maniera indipendente dagli altri. I convertitori che interfacciano la generazione al sistema sbarre devono essere di potenza elevata. Attualmente sul mercato sono disponibili convertitori AC/DC per la trazione elettrica o per tutte quelle applicazioni industriali che utilizzo un motore in continua. Questa condizione è valida anche negli impianti navali in quanto la propulsione delle navi assume valori molto elevati (paragonabili alla generazione).

Per la scelta del raddrizzatore bisognerà calcolare il valore di potenza attiva che si vuole trasmettere. Si ottiene un valore di corrente inferiore rispetto a quello che si otteneva in alternata poiché non bisogna più tener conto della potenza reattiva.

Ogni raddrizzatore dovrà essere dimensionato per trasmettere la propria potenza ( quella del suo generatore) alla tensione fissata (Si ipotizza di avere un DC bus a 1000V).

Il Megayacht presenta due tipologie di generatori: quattro da 1042 kVA (generatore 1) e due da 581 kVA (generatore 2). La condizione di lavoro nominale è con  $\cos\varphi = 0,8$ . Conoscendo le potenze attive e il livello di tensione per la trasmissione si può calcolare il valore della  $I_{DC}$ .

$$\text{Generatore 1} \rightarrow P_1 = A_1 * \cos\varphi = 1042 * 0.8 = 833,6 \text{ kW} \rightarrow I_1 = \frac{P_1}{V} = \frac{833,6 * 1000}{1000} = 833,6 \text{ A}$$

$$\text{Generatore 2} \rightarrow P_2 = A_2 * \cos\varphi = 581 * 0.8 = 464,8 \text{ kW} \rightarrow I_1 = \frac{P_1}{V} = \frac{464,8 * 1000}{1000} = 464,8 \text{ A}$$

Entrambi i convertitori dovranno essere alimentati a 690 V che corrisponde al valore di tensione generata. Per questo motivo i convertitori scelti sono della classe DCS 500 il cui valore massimo di tensione, ottenibile in funzione della tensione d'ingresso, è compreso in un certo range e riportato nella seguente tabella.

Tensione collegamento sistema $U_{VN}$	Tensione in cc (raccomandazioni)		Tensione in cc nominale senza carico $U_{dio}$	Classe di tensione DCS 500 raccomandata $y=$
	$U_{dmax 2-Q}$	$U_{dmax 4-Q}$		
230	265	240	310	4
380	440	395	510	4
400	465	415	540	4
415	480	430	560	4
440	510	455	590	5
460	530	480	620	5
480	555	500	640	5
500	580	520	670	5
525	610	545	700	6
575	670	600	770	6
600	700	625	810	6
660	765	685	890	7
690	800	720	930	7
790	915	820	1060	8
1000	1160	1040	1350	9
1190	1380	1235	1590	1

Tabella [4.c.]

Le caratteristiche della tensione in continua sono state calcolate sulla base delle seguenti ipotesi:

- $UVN$  = tensione nominale trifase di ingresso
- Tolleranza di tensione  $\pm 10\%$
- Caduta di tensione interna circa  $1\%$

Poiché l'alimentazione avviene a  $690\text{ V}$  allora, nell'ipotesi di lavorare su due quadranti, si otterrà una  $V_{DC} = 800\text{ V}$ .

In funzione della reale tensione si devono calcolare i valori effettivi delle correnti circolanti nel bus in continua:

$$I_1' = I_1 * \frac{V_{ipotizzata}}{V_{DC}} = 833,6 * \frac{1000}{800} = 1042\text{ A}$$

$$I_2' = I_2 * \frac{V_{ipotizzata}}{V_{DC}} = 464,8 * \frac{1000}{800} = 581\text{ A}$$

Convertitore per il generatore 1:

- *Tipologia*: convertitore a due quadranti
- $I_{DC} = 900\text{ A}$
- $V_{DC} = 800\text{ V}$
- $P = 720\text{ kW}$
- *Rated frequency*:  $50\text{ Hz}$  or  $60\text{ Hz}$
- *Dyn. frequency range*:  $50\text{ Hz}$ :  $\pm 5\text{ Hz}$ ;  $60\text{ Hz}$ :  $\pm 5\text{ Hz}$
- Ambient temperature:  $0$  to  $+40^\circ\text{C}$  ( $32\dots 104^\circ\text{F}$ )
- Storage temperature:  $-40$  to  $+55^\circ\text{C}$  ( $-40\dots 130^\circ\text{F}$ )
- Relative humidity:  $5$  to  $95\%$ , no condensation
- Degree of protection: IP 00

Convertitore per il generatore 2:

- *Tipologia*: convertitore a due quadranti
- $I_{DC} = 1500\text{ A}$
- $V_{DC} = 800\text{ V}$
- $P = 1200\text{ kW}$
- *Rated frequency*:  $50\text{ Hz}$  or  $60\text{ Hz}$
- *Dyn. frequency range*:  $50\text{ Hz}$ :  $\pm 5\text{ Hz}$ ;  $60\text{ Hz}$ :  $\pm 5\text{ Hz}$
- Ambient temperature:  $0$  to  $+40^\circ\text{C}$  ( $32\dots 104^\circ\text{F}$ )
- Storage temperature:  $-40$  to  $+55^\circ\text{C}$  ( $-40\dots 130^\circ\text{F}$ )
- Relative humidity:  $5$  to  $95\%$ , no condensation
- Degree of protection: IP 00

Il convertitore, qual'ora dovesse soddisfare determinati gradi di protezione, può essere installato all'interno di un quadro.



Frame A5

Dimensions						kg	Module frame size
mm			Inches				
H	D	W	H	D	W		
420	195	273	16.54	7.67	10.75	8	C1 (25...75 A)
469	228	273	18.46	8.97	10.75	12	C1 (100...140A)
505	361	273	19.88	14.21	10.75	29	C2
652	384	273	25.66	15.11	10.75	42	C2b
1050	410	510	41.34	16.14	20.07	110	A5
1750	410	460	68.90	16.14	18.11	180	A6
1750	570	760	68.90	22.44	29.92	315	A7

Tabella [4.d.]

Entrambi i generatori saranno collegati a moduli A5 con le seguenti caratteristiche:

- Volume  $\rightarrow V = H * D * W = 0,42 * 0,195 * 0,273 = 0,0224 \text{ m}^3$
- Peso  $\rightarrow 110 \text{ kg}$

Se si moltiplicano tali valori per il numero di convertitori da installare si ottiene:

- Volume totale  $\rightarrow 0,134 \text{ m}^3$
- Peso totale  $\rightarrow 660 \text{ kg}$

A valle dei convertitori sono installate due dorsali per la distribuzione primaria che, come sottolineato nei precedenti capitoli, saranno indipendenti fra loro (durante il normale funzionamento il congiuntore è nella posizione di aperto). Ogni dorsale dovrà portare, nella condizione più gravosa, la corrente proveniente dai generatori che la alimentano che nel caso del Megayacht saranno tre (due da 1042 kVA e uno da 581 kVA).

#### 4.1. Confronto del sistema di distribuzione (blindo DC-cavi AC)

Per i calcoli si utilizzano i cataloghi di *Zucchini high power* (tabella 2.2.1.c.) . Ogni singola sbarra dovrà essere dimensionata per la seguente corrente nominale:

$$I_n = \frac{A_{1042} * 2 + A_{581}}{V_{DC}} * \cos\varphi = \frac{1042 * 2 + 581}{800} * 0,8 = 2665 \text{ A}$$

Nel calcolo sono stati utilizzati sistemi sbarre *high power* che, rispetto a quelli normali, avranno un peso maggiore del 33% ma una riduzione del volume occupato di circa il 20%. Su una nave, il punto più critico per l'impianto elettrico è proprio lo spazio ridotto, per questo motivo si prediligono le sbarre *high power* anche se pesano di più.

Dal catalogo si sceglie una sbarra con barratura doppia con le seguenti caratteristiche:

- Materiale conduttore: rame
- $I_n = 3200 \text{ A}$
- $U_e = 1000 \text{ V}$
- $f = 50 / 60 \text{ Hz}$

- Resistenza di fase:  $R_{20^{\circ}C} = 0,012 \frac{m\Omega}{m}$
- Resistenza di fase:  $R_{85^{\circ}C} = 0,015 \frac{m\Omega}{m}$
- Reattanza di fase:  $X_{50 Hz} = 0,007 \frac{m\Omega}{m}$
- Weight:  $79 \frac{kg}{m}$
- Temperatura ambiente min/max: -5/50 °C
- Section:  $49400 mm^2$

Per confrontare la soluzione sbarre rispetto a quella tradizionale si ipotizza che il QEP, presente esclusivamente nel caso dei cavi, sia posto ad una distanza di 25 metri rispetto alla generazione.

Si riportano ora le caratteristiche dei cavi che vengono normalmente utilizzate per interfacciare i generatori al quadro.

Si prendono come riferimento le tabelle Pirelli Marine Cables:

Tabella [4.1.a.]

Cable n x mm <sup>2</sup>	Diameter of conductor approx *) mm	Maximum conductor resistance at +20 °C Ω/km	Current rating at +45 °C **) A	Nominal diameter over braiding mm	Nominal diameter approx mm	Weight of cable approx kg/km	Minimum bending radius mm
2 x 1,5	1,5	12,1	17	7,8	10,0	140	60
2 x 2,5	2,0	7,41	24	8,5	11,0	175	65
3 x 1,5 <sup>#</sup>	1,5	12,1	14	8,2	10,5	165	65
3 x 2,5 <sup>#</sup>	2,0	7,41	20	9,0	11,5	205	70
3 x 6	3,1	3,08	34	11,5	14,0	350	85
3 x 10	4,0	1,83	47	14,0	17,0	530	100
3 x 16	5,1	1,15	63	16,0	19,0	760	115
3 x 25 *)	4,9/8,1	0,734	84	19,5	23,0	1200	135
3 x 35 *)	5,8/9,5	0,529	102	22,0	25,5	1500	150
3 x 50 *)	6,6/10,8	0,391	126	23,5	27,5	1950	165
3 x 70 *)	8,0/13,0	0,270	158	27,0	31,5	2700	190
3 x 95 *)	9,4/15,2	0,195	193	30,5	35,0	3550	210
3 x 120 *)	10,5/17,1	0,154	224	33,0	38,0	4350	230
3 x 150 *)	11,6/18,8	0,126	256	37,5	42,5	5350	255

- Generatore da 1042 kVA

$$A = 1042 \text{ kVA}$$

$$V = 690 \text{ V}$$

$$I = \frac{A}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{1042 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 690} = 871,9 \text{ A}$$

Si utilizzano cavi da  $120 mm^2$  le cui caratteristiche elettriche sono sotto riportate:

- Resistance at 20°C :  $0,154 \frac{m\Omega}{m}$
- Resistance at 85 °C:  $0,193 \frac{m\Omega}{m}$
- Reactance at 50 Hz:  $0,0774 \frac{m\Omega}{m}$
- Current rating: 224 A
- Nominal diameter: 38 mm
- Nominal section:  $1134 mm^2$
- Weight of cable:  $4,35 \frac{kg}{m}$

In totale si installano quattro cavi da  $120 \text{ mm}^2$ :

- Total nominal section:  $4537 \text{ mm}^2$
- Total weight:  $17,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$
- Total current rating:  $896 \text{ A}$
- total resistance at  $85 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $0,048 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$

- *Generatore da 581 kVA*

$$A = 581 \text{ kVA}$$

$$V = 690 \text{ V}$$

$$I = \frac{A}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{581 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 690} = 486,2 \text{ A}$$

Si utilizzano cavi da  $150 \text{ mm}^2$  le cui caratteristiche elettriche sono sotto riportate:

- Resistance at  $20^\circ\text{C}$  :  $0,126 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$
- Resistance at  $85 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $0,158 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$
- Reactance at  $50 \text{ Hz}$ :  $0,0769 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$
- Current rating:  $256 \text{ A}$
- Nominal diameter:  $42,5 \text{ mm}$
- Nominal section:  $1418 \text{ mm}^2$
- Weight of cable:  $5,35 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$

In totale si installano due cavi da  $150 \text{ mm}^2$ :

- Total nominal section:  $2837 \text{ mm}^2$
- Total weight:  $10,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$
- Total current rating:  $512 \text{ A}$
- total resistance at  $85 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $0,079 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$

per il calcolo del volume, del peso occupato e delle dissipazioni elettriche bisogna tener in considerazione che le sbarre sono due mentre i cavi sono: quattro per il generatore 1 e due per il generatore 2.

Riassumendo:

	numero	sezione	lunghezza	volume	peso	perdite	perdite tot
		$\text{m}^2$	m	$\text{m}^3$	kg	W/m	W
<b>sbarra</b>	2	0.0494	25	1.235	1975	213	5326
<b>cavo 120 mm<sup>2</sup></b>	16	0.004573	25	0.114	108.75	27,37	684.25
<b>cavo 150 mm<sup>2</sup></b>	4	0.001418	25	0.03545	133.75	28,02	700.3

In definitiva:

	<b>sezione</b>	<b>volume</b>	<b>peso</b>	<b>perdite</b>
	$m^2$	$m^3$	kg	W
<b>sbarre</b>	0.0988	2.47	3950	10652
<b>cavi</b>	0.07884	1.97	2275	13749

Tabella [4.1.c.]

Osservazioni:

I parametri delle sbarre sono stati presi dal catalogo zucchini per sistemi trifasi. I valori delle sbarre (sezione, peso e volume) che verranno installati nella soluzione DC saranno minori (di circa il 30%) di quelli riportati in tabella dato che in continua sono sufficienti due conduttori anziché tre. Dalla tabella sopra riportata è evidente che la soluzione offerta dalle blindo in DC è vantaggiosa, almeno per il momento, solo per le perdite per effetto joule.

Per completare lo studio dei sistemi di distribuzione bisogna considerare l'eliminazione del QEP. Il quadro è un apparato pesante e voluminoso.



interno quadro [4.1.e.]

Ipotizzando un sistema di distribuzione BT a 690 V si può ritenere accettabile un quadro con dotato del congiuntore di sbarra con le seguenti caratteristiche:

- width: 3200 mm
- height: 2200 mm
- depth: 1400 mm
- weight breaker: 600 kg
- weight breaker connector: 210 kg
- weigh busbar : 950 kg
- **total volume: 9,86 m<sup>3</sup>**
- **total weight: 1760 kg**

Nel caso di distribuzione DC il quadro sarà assente anche se si dovranno prevedere opportune 'cassette' per il sezionamento e la protezione del circuito che porteranno ad un volume e un peso lievemente superiore rispetto ai 3950 kg calcolati per le sbarre. Il sistema di distribuzione con cavi, se si considera anche il quadro, ha una massa complessiva pari a 4025 kg ed un volume di circa  $11 m^3$  nettamente superiore a quello delle sbarre pari a  $2,47 m^3$ . La distribuzione primaria è più vantaggiosa con il sistema sbarre DC ma per una valutazione completa bisogna tener conto di tutti i convertitori DCS installati a valle dei generatori e che saranno considerati nella tabella finale.

#### 4.2. Confronto dei drives per la propulsione principale

I convertitori dei main-thruster sono quelli con potenza più elevata. Ci sono due azionamenti, uno per ogni thruster, del tipo :

- $P_n = 1600 kW$
- $I_n = 1697 A$
- $I_{max} = 2538 A$

##### Azionamento AC:

- $P_n = 1600 kW$
- Height: 2003 mm
- Width with LC unit: 1430 mm
- Depth: 644 mm
- Weight: 1040 kg
- Volume:  $1,85 m^3$



ACS800-07LC-2030-7

##### Azionamento DC:

- $P_n = 1600 kW$
- Height: 880 mm
- Width: 210 mm
- Depth: 475 mm
- Weight: 381 kg
- Volume:  $0,1 m^3$



ACS800-104LC-2030-7

La soluzione in AC prevede due convertitori (raddrizzatore e inverter) che sono collegati con un bus in continua a differenza della soluzione DC in cui si usa solo l'inverter. Questo significa non solo riduzione del volume e del peso, ma anche dei disturbi armonici senza il bisogno dell'installazione dei filtri.

Per l'alimentazione dell'inverter direttamente in DC bisogna verificare che:

$$710 < V_{DC} < 930 \rightarrow \text{condizione verificata } V_{DC} = 800 V$$

Entrambi i convertitori, per rispettare le condizioni di funzionamento, prevedono un raffreddamento a liquido (LC unit). Questo significa introdurre un dispositivo in più che occupa spazio e peso ma che

comunque non supera le dimensioni e il peso che il drive assumerebbe senza il sistema di raffreddamento. Se non si utilizzasse la LC unit bisognerebbe disporre di un opportuno sistema di raffreddamento ad aria forzata all'interno del locale dei convertitori che sarà di volume maggiore rispetto a quello necessario all'ACS 800LC proprio per la necessità di far circolare più aria.

Caratteristiche del sistema del liquid cooling unit:

- Max dissipated losses: 70 kW
- Massflow: 103 l/min
- Liquid quantity 8 l
- Height: 2003 mm
- Depth: 644 mm
- Width: 300 mm
- Volume: 0,39 m<sup>3</sup>
- Weight: 200 kg



[4.2.a.]

#### 4.3. Confronto dei drives per l'alimentazione del bow-thruster

Il bow-thruster richiede una potenza di 295 kW

Azionamento AC: ACS800-02-0400-5

- $P_n = 315 \text{ kW}$
- Height: 2024 mm
- Width: 347 mm
- Depth: 622 mm
- Weight (with cabinet): 450 kg
- Volume: 1 m<sup>3</sup>

Azionamento DC: ACS800-104-0400-7

- $P_n = 315 \text{ kW}$
- Height: 1397 mm
- Width: 245 mm
- Depth: 596 mm
- Weight: 130 kg
- Volume: 0,2 m<sup>3</sup>



[4.3.a.]

Gli azionamenti per il bow-thruster non prevedono un sistema di raffreddamento a liquido. Questo significa avere un rapporto volume/potenza sicuramente maggiore rispetto a quello ottenuto per gli azionamenti del main-thruster con LC unit. Per evitare il raggiungimento di elevate temperature sarà necessario un volume maggiore, a parità di potenza, non solo per il dispositivo ma anche per il locale di installazione.



#### 4.4. Sistemi di trasformazione

Sia in alternata che in continua è necessario fornire livelli di tensioni differenti per alimentare i servizi ausiliari. Nel caso del Megayacht si prevedono due elementi per la trasformazione della tensione per ovvi motivi di affidabilità.

##### *Soluzione in AC:*

in alternata si utilizzano due trasformatori con  $A_n = 450 \text{ kVA}$  ciascuno.

Nelle tabelle utilizzate non c'è la potenza richiesta (450 kVA) per cui si scelgono trasformatori di taglia superiore.

Si riportano le caratteristiche del trasformatore utilizzato:

- $A_n = 500 \text{ kVA}$
- Fe losses: 1120 W
- Cu losses: 6500 W
- $v_{cc} \% = 5\%$
- Length: 1300 mm
- Height: 700 mm
- Depth: 1200 mm
- Volume:  $1,1 \text{ m}^3$
- Weight: 1350 kg



*Trasformatore [4.4.a.]*

##### *Soluzione in DC:*

in continua si sostituiscono i trasformatori con dei 'chopper' cioè dei convertitori DC/DC i cui livelli di tensione/potenza richiesti sono troppo elevati per utilizzare quelli disponibili in commercio. In continua si dovranno comunque prevedere delle isole in alternata, ciascuna indipendente dalle altre, per l'alimentazione mediante inverter dei carichi AC. Eliminare i trasformatori significa risparmiare ferro e rame per gli avvolgimenti, ciò si traduce in un risparmio di peso e volume. I convertitori per i servizi ausiliari sia DC/DC sia DC/AC che non sono inseriti in questa valutazione, perché non disponibili sul mercato, non modificherebbero di molto la soluzione in DC in termini di peso e volume poiché la potenza dei SA (900 kVA) è molto piccola rispetto a quella totale generata (5330 kVA).

#### 4.5. Confronto fra la soluzione AC e DC

<i>AC solution [4.5.a]</i>	<b>peso</b>	<b>volume</b>
	kg	m <sup>3</sup>
<b>Convertitori DCS</b>	0	0
<b>cavi</b>	2275	1,97
<b>propulsion drives</b>	2480	4,48
<b>bow thruster drive</b>	450	1
<b>QEP</b>	1760	9,86
<b>trasformatori</b>	2700	2,2
<b>totale</b>	<b>9665</b>	<b>19,51</b>

<i>DC solution [4.5.b.]</i>	<b>peso</b>	<b>Volume</b>
	kg	m <sup>3</sup>
<b>Convertitori DCS</b>	660	0,134
<b>Sistema blindo</b>	3950	2,47
<b>propulsion drives</b>	1162	0,98
<b>bow thruster drive</b>	130	0,2
<b>QEP</b>	0	0
<b>trasformatori</b>	0	0
<b>totale</b>	<b>5902</b>	<b>3,784</b>

Confrontando i risultati delle tabelle 4.5.a. e 4.5.b. è facile verificare la convenienza della soluzione in DC con una riduzione del 40% di peso e dell' 80% di volume anche se poi dovranno essere tenuti in considerazione gli elementi che nella soluzione DC non sono stati considerati poiché non disponibili commercialmente.

## 5. Conclusioni

Lo studio si è concluso con una valutazione tecnica fra le soluzioni fornite in AC e in DC anche se i calcoli riportati nell'ultimo capitolo sono solo indicativi e vogliono fornire uno strumento per capire la convenienza tecnica nell'approfondire l'argomento. In questa tesi, utilizzando lo schema elettrico del Megayacht, si sono fornite soluzioni diverse per l'architettura elettrica navale, alcune di esse hanno un immediato riscontro pratico (ad esempio l'introduzione del sistema blindo) altre potranno essere introdotte in un futuro molto prossimo (ad esempio la generazione ad alta frequenza) e altre ancora solo quando ci saranno evoluzioni tecnologiche tali da rendere tecnicamente conveniente la soluzione ipotizzata (ad esempio le fuel cells e i sistemi d'accumulo); il settore che subirà meno cambiamenti dall'eventuale introduzione della distribuzione DC è quello della propulsione elettrica che come logica di controllo e di funzionamento sarà identica a quella attualmente utilizzata nelle moderne navi AES, a patto di eliminare il suo stadio raddrizzatore d'ingresso.

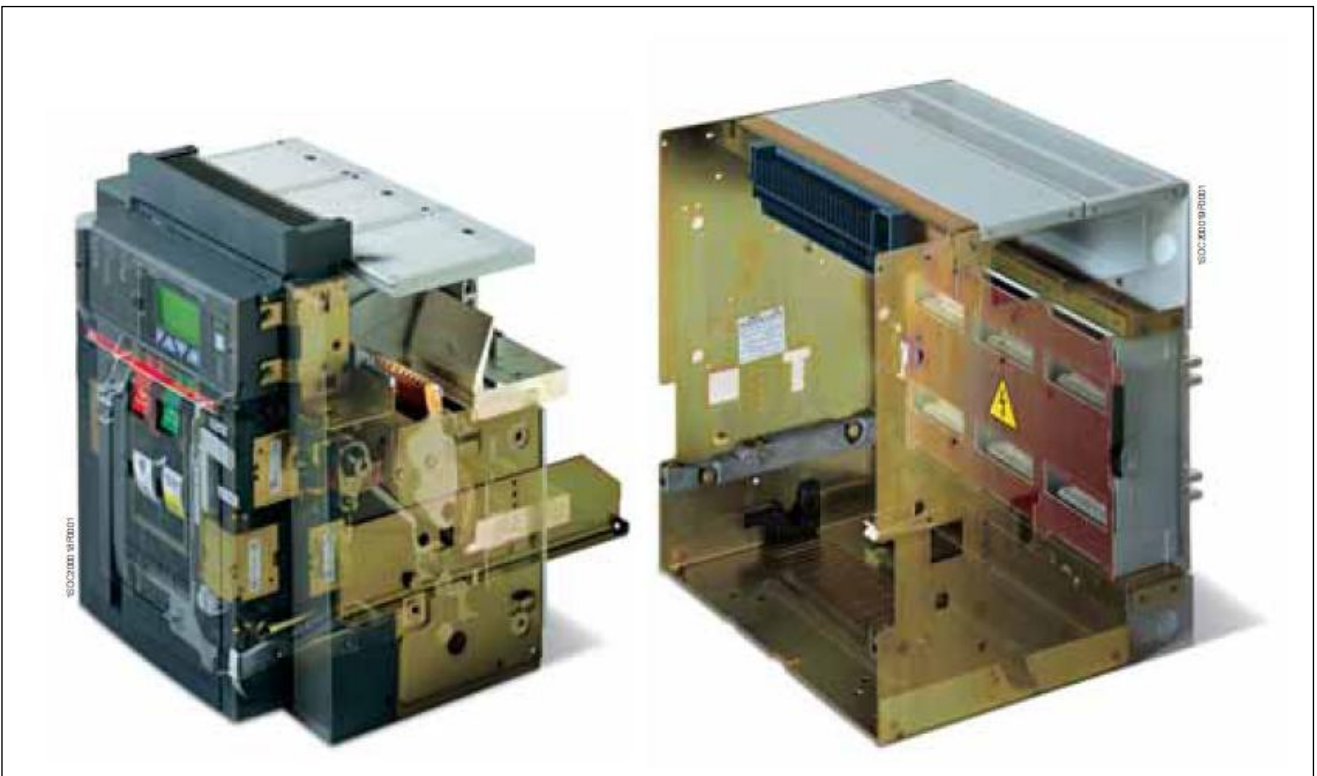
La mancanza dei convertitori DC/DC per l'alimentazione dei servizi ausiliari non ha permesso di concludere il confronto nel quarto capitolo che comunque resta favorevole alla soluzione in continua. È importante sottolineare che la soluzione DC è vantaggiosa soprattutto se la propulsione è elettrica; in caso contrario il sistema blindo, i convertitori DCS e le cassette di derivazione delle sbarre (quest'ultime non considerate nella valutazione tecnica) risultano avere un peso prossimo alla soluzione in alternata anche se il volume in DC rimarrà presumibilmente minore. Le valutazioni fra la soluzione AC e DC sono state condotte sulla base delle caratteristiche tecniche (peso e volume) anche se non bisogna trascurare un parametro molto importante: il costo della nuova architettura in DC. Proprio per la mancanza sul mercato dei dispositivi necessari per la struttura elettrica del Megayacht si rimanda a studi più approfonditi l'economicità o meno della soluzione proposta. Si sottolinea che l'architettura in continua con sistema blindo potrebbe essere economicamente conveniente anche se il costo delle apparecchiature risultasse maggiore dell'alternata poiché il notevole risparmio di spazio può essere dedicato a passeggeri/merci aumentando di fatto il volume destinato al 'carico pagante'.

## APPENDICE A

Si riportano le caratteristiche principali , sia elettriche sia meccaniche, degli interruttori in AC che sono stati scelti per realizzazione del quadro principale del Megayacht. Vengono riportate anche le curve di intervento del relè elettronico evidenziando le soglie di intervento del termico e del magnetico.

### A.1. caratteristiche costruttive Emax

La struttura dell'interruttore, realizzata in lamiera di acciaio, è estremamente compatta e consente una notevole riduzione degli ingombri. La sicurezza è incrementata attraverso l'adozione del doppio isolamento dalle parti in tensione e la totale segregazione delle fasi tra loro. Le dimensioni si caratterizzano per la stessa altezza e la stessa profondità per tutti gli interruttori della medesima esecuzione.



Rappresentazione Emax [A.1.a.]

Il comando che viene utilizzato è del tipo ad accumulo di energia , la manovra viene eseguita mediante molle precaricate. Le molle possono essere caricate o manualmente o mediante un motore elettrico. Le molle, adibite all'apertura dei contatti, si caricano durante la manovra di chiusura.

Con il comando accessoriatato di sganciatori di chiusura, di apertura, e del motoriduttore per la carica delle molle, la manovra dell'interruttore può essere effettuata a distanza ed eventualmente gestita da un sistema di supervisione e controllo.

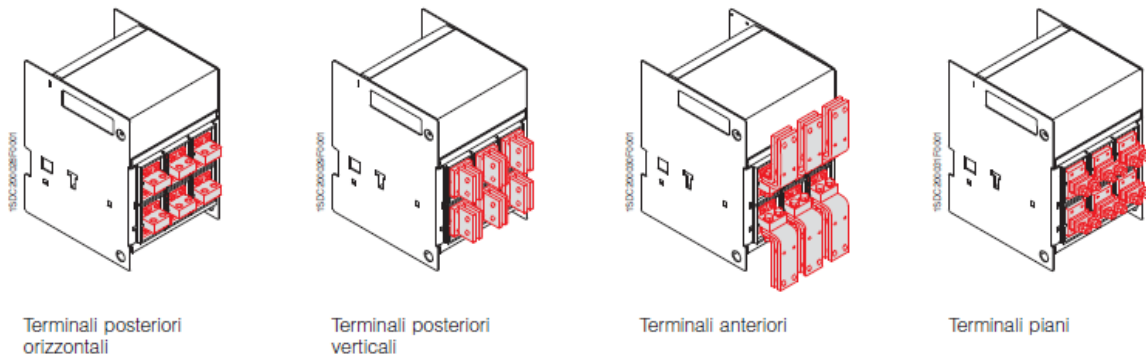
Cicli di manovra senza ricaricare le molle:

- partendo da interruttore aperto (0) e molle cariche: chiusura-apertura

- partendo da interruttore chiuso (I) e molle cariche: apertura-chiusura-apertura.

Le necessità in ambito navale portano all'utilizzo d'interruttori estraibili che presenta le seguenti connessioni:

*Interruttore estraibile [A.1.b.]*



Ogni tipo di interruttori dispone di terminali realizzati con sbarre di rame argentato aventi uguali dimensioni indipendentemente dalle correnti nominali degli interruttori.

Per esigenze particolari, legate all'uso degli interruttori in ambienti corrosivi, è disponibile la soluzione con terminali dorati.

#### A.2. Relè elettronici

Un ruolo importante per definire le caratteristiche di protezione degli interruttori è lo sganciatore. Per gli Emax della serie E, sono stati impiegati relè elettronici:

- PR121
- PR122
- PR123

I relè elettronici, rispetto a quelli tradizionali, permettono una miglior gestione dell'impianto nelle condizioni di pericolo, un controllo più preciso, esteso ed accurato, sono in grado di comunicare fra loro e garantire, al variare dei parametri circuitali, la miglior protezione (per esempio il funzionamento con un numero di generatori ridotto).

In generale, la protezione si compone di:

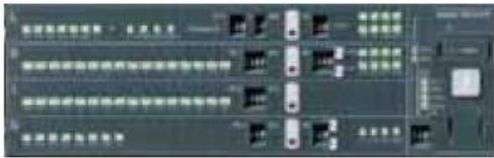
- 3 o 4 sensori di corrente di nuova generazione (bobine di Rogowsky);
- sensori di corrente esterni (es. per il neutro esterno, protezione differenziale o protezione contro il guasto a terra);
- un'unità di protezione a scelta tra PR121/P, PR122/P e PR123/P con modulo di comunicazione
- opzionale tramite protocollo Modbus o Fieldbus (solo PR122/P e PR123/P), e anche tramite connessione wireless;

- un solenoide di apertura che agisce direttamente sul comando dell'interruttore

caratteristiche degli sganciatori elettronici:

- funzionamento senza necessità di alimentazione esterna
- tecnologia a microprocessore
- elevata precisione
- sensibilità al vero valore efficace della corrente
- indicazione della causa di intervento e memoria dei dati di intervento
- intercambiabilità tra tutte le tipologie di sganciatori
- taratura del neutro regolabile

**PR121**




Protezione PR121/P PR121/P PR121/P

**L I** **L S I** **L S I G**

---

**PR122**



Protezione PR122/P PR122/P PR122/P PR122/P

**L I** **L S I** **L S I G** **L S I Rc**

Per tutte le versioni **U OT M**

**Nuovi moduli disponibili:**

Misura	opz.	<b>UV OV RV RP UF OF</b>
Comunicazione	opz.	
Segnalazione	opz.	
Bluetooth (coll. wireless)	opz.	

*Relè elettronici [A.2.a.]*

Caratteristiche			
Funzioni di protezione	PR121	PR122	PR123
<b>L</b> Protezione contro il sovraccarico con intervento ritardato a tempo lungo inverso <i>Relè elettronici [2.3.6.a.]</i>	■	■	■
<b>S</b> Protezione selettiva contro corto circuito con intervento ritardato a tempo breve inverso o indipendente	■	■	■
<b>S</b> Seconda Protezione selettiva contro corto circuito con intervento ritardato a tempo breve inverso o indipendente			■
<b>I</b> Protezione contro corto circuito istantaneo con soglia di corrente di intervento regolabile	■	■	■
<b>G</b> Protezione contro guasti a terra	residual	■	■
	source ground return	■	■
<b>Rc</b> Protezione differenziale <sup>(1)</sup>		opz. <sup>(2)</sup>	■
<b>D</b> Protezione contro il corto circuito direzionale con ritardo regolabile			■
<b>U</b> Protezione contro lo sbilanciamento delle fasi		■	■
<b>OT</b> Protezione contro la sovratemperatura		■	■
<b>UV</b> Protezione da minima tensione		opz. <sup>(3)</sup>	■
<b>OV</b> Protezione da massima tensione		opz. <sup>(3)</sup>	■
<b>RV</b> Protezione da tensione residua		opz. <sup>(3)</sup>	■
<b>RP</b> Protezione da inversione di potenza attiva		opz. <sup>(3)</sup>	■
<b>M</b> Memoria termica per le funzioni L e S		■	■
<b>UF</b> Protezione da minima frequenza		opz. <sup>(3)</sup>	■
<b>OF</b> Protezione da massima frequenza		opz. <sup>(3)</sup>	■
<b>Misure</b>			
Correnti (fasi, neutro, guasto a terra)		■	■
Tensione (fase-fase, fase-neutro, residua)		opz. <sup>(3)</sup>	■
Potenza (attiva, reattiva, apparente)		opz. <sup>(3)</sup>	■
Fattore di potenza		opz. <sup>(3)</sup>	■
Frequenza e fattore di picco		opz. <sup>(3)</sup>	■
Energia (attiva, reattiva, apparente, contatore)		opz. <sup>(3)</sup>	■
Calcolo armonico (visualizzazione forma d'onda e modulo delle armoniche)			■
<b>Marcatura eventi e dati di manutenzione</b>			
Marcatura eventi con l'istante in cui si sono verificati	opz. <sup>(4)</sup>	■	■
Memorizzazione eventi in ordine cronologico	opz. <sup>(4)</sup>	■	■
Conteggio del numero di manovre e usura dei contatti		■	■
<b>Comunicazione con sistema di supervisione e controllo centralizzato</b>			
Impostazione a distanza dei parametri delle funzioni protettive, di configurazione unità, di comunicazione		opz. <sup>(5)</sup>	opz. <sup>(5)</sup>
Trasmissione misure, stati e allarmi da interruttore a sistema		opz. <sup>(5)</sup>	opz. <sup>(5)</sup>
Trasmissione degli eventi e dei dati di manutenzione da interruttore a sistema		opz. <sup>(5)</sup>	opz. <sup>(5)</sup>
<b>Autodiagnosi</b>			
Allarme e sgancio per sovratemperatura dello sganciatore		■	■
Controllo stato dello sganciatore	■	■	■
<b>Interfaccia con l'utilizzatore</b>			
Predisposizioni parametri tramite dip switches	■		
Predisposizione parametri tramite tasti e visore a cristalli liquidi		■	■
Segnalazioni di allarme per le funzioni L, S, I e G	■	■	■
Segnalazione di allarme di una delle seguenti protezioni: tensione: minima, massima, residua; inversione di potenza attiva, sbilanciamento di fase, sovratemperatura		opz. <sup>(3)</sup>	■
Gestione completa dei preallarmi e degli allarmi per tutte le funzioni protettive e di autocontrollo		■	■
Password di abilitazione per impiego con modalità "READ" (consultazione) oppure "EDIT" (consultazione e impostazione)		■	■
<b>Controllo carichi</b>			
Attacco distacco carichi in funzione della corrente che attraversa l'interruttore		■	■
<b>Selettività di zona</b>			
Attivabile per le funzioni protettive S, G e (solo per PR123) D		■	■

**Dati comuni**

Tensioni	
Tensione nominale di impiego <b>Ue</b>	[V] 690 -
Tensione nominale di isolamento <b>Ui</b>	[V] 1000
Tensione nominale di tenuta ad impulso <b>Uimp</b>	[kV] 12
Temperatura di impiego	[°C] -25...+70
Temperatura di stoccaggio	[°C] -40...+70
Frequenza <b>f</b>	[Hz] 50 - 60
Numero poli	3 - 4
Esecuzione	Fissa - Estraibile

Caratteristiche dell'Emax (E1 e E2) [A.2.c.]

		E1		E2			
Livelli di prestazione		B	N	B	N	S	L
Correnti: max. corrente ininterrotta nominale (a 40 °C)	[A]	800	800	1600	1000	800	1250
	[A]	1000	1000	2000	1250	1000	1600
	[A]	1250	1250		1600	1250	
	[A]	1600	1600		2000	1600	
	[A]				2000		
	[A]						
	[A]						
Portata del polo neutro per interruttori tetrapolari	[%lu]	100	100	100	100	100	100
<b>Potere di interruzione nominale limite in corto circuito I<sub>cu</sub></b>							
220/230/380/400/415 V ~	[kA]	42	50	42	66	85	130
440 V ~	[kA]	42	50	42	66	85	110
500/525 V ~	[kA]	42	50	42	55	65	85
660/690 V ~	[kA]	42	50	42	55	65	85
<b>Potere di interruzione nominale di servizio in corto circuito I<sub>cs</sub></b>							
220/230/380/400/415 V ~	[kA]	42	50	42	65	85	130
440 V ~	[kA]	42	50	42	65	85	110
500/525 V ~	[kA]	42	50	42	55	65	65
660/690 V ~	[kA]	42	50	42	55	65	65
Corrente ammissibile nominale di breve durata I <sub>cw</sub>	(1s) [kA]	42	50	42	55	65	10
	(3s) [kA]	36	36	42	42	50	-
<b>Potere di chiusura nominale in corto circuito (valore di cresta) I<sub>cm</sub></b>							
220/230/380/400/415 V ~	[kA]	88,2	105	88,2	143	187	286
440 V ~	[kA]	88,2	105	88,2	143	187	242
500/525 V ~	[kA]	88,2	105	88,2	121	143	187
660/690 V ~	[kA]	88,2	105	88,2	121	143	187
<b>Categoria di utilizzo</b> (secondo IEC 60947-2)		B	B	B	B	B	A
<b>Attitudine al sezionamento</b> (secondo IEC 60947-2)		■	■	■	■	■	■
<b>Protezione di massima corrente</b>							
Sganciatori elettronici per applicazioni in AC		■	■	■	■	■	■
<b>Tempi di manovra</b>							
Durata di chiusura (max)	[ms]	80	80	80	80	80	80
Durata di interruzione per I < I <sub>cw</sub> (max) <sup>(1)</sup>	[ms]	70	70	70	70	70	70
Durata di interruzione per I > I <sub>cw</sub> (max)	[ms]	30	30	30	30	30	12
<b>Dimensioni di ingombro</b>							
Fisso: H = 418 mm - P = 302 mm L (3/4 poli)	[mm]	296/386			296/386		
Estraibile: H = 461 mm - P = 396,5 mm L (3/4 poli)	[mm]	324/414			324/414		
<b>Pesi</b> (interruttore completo di sganciatori e sensori di corrente, accessori esclusi)							
Fisso 3/4 poli	[kg]	45/54	45/54	50/61	50/61	50/61	52/63
Estraibile 3/4 poli (compresa la parte fissa)	[kg]	70/82	70/82	78/93	78/93	78/93	80/95

		E1 B-N			E2 B-N-S				E2 L	
Max. corrente ininterrotta nominale (a 40°C)	[A]	800	1000-1250	1600	800	1000-1250	1600	2000	1250	1600
Vita meccanica con regolare manutenzione ordinaria	[Nr. manovre x 1000]	25	25	25	25	25	25	25	20	20
Frequenza manovre	[Manovre/ora]	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Vita elettrica	(440 V ~) [Nr. manovre x 1000]	10	10	10	15	15	12	10	4	3
	(690 V ~) [Nr. manovre x 1000]	10	8	8	15	15	10	8	3	2
Frequenza manovre	[Manovre/ora]	30	30	30	30	30	30	30	20	20



#### Grado di protezione degli interruttori Emax

- IP20: per l'interruttore in esecuzione fissa o estraibile, esclusi i terminali.
- IP30: per le parti frontali degli interruttori mediante mostrina.

Nelle parti fisse degli interruttori in versione estraibile, sono stati realizzati otturatori automatici che si possono bloccare mediante lucchetto per permettere la manutenzione sul lato carico o sul lato alimentazione della parte fissa. A richiesta è possibile richiedere un grado di protezione IP54 sia per la soluzione fissa sia per quella estraibile.

Di seguito viene riportata la tabella con l'elenco dei gradi di protezione IP secondo la Norma CEI 70-1: prima posizione: protezione contro il contatto di corpi solidi estranei e contro l'accesso a parti pericolose

<b>cifra</b>	<b>Protezione del materiale protezione delle persone</b>
0	non protetto
1	Protetto contro corpi solidi di dimensioni superiori a 50 mm. Protetto contro l'accesso con il dorso della mano
2	Protetto contro corpi solidi di dimensioni superiori a 12 mm. Protetto contro l'accesso con un dito
3	Protetto contro corpi solidi di dimensioni superiori a 12 mm. Protetto contro l'accesso con un attrezzo
4	Protetto contro corpi solidi di dimensioni superiori a 1 mm. Protetto contro l'accesso con un filo
5	protetto contro la polvere e protetto contro l'accesso con un filo
6	totalmente protetto contro la polvere protetto contro l'accesso con un filo

Tabella [A.2.d.]

Seconda posizione: protezione contro la penetrazione di liquidi

<b>cifra</b>	<b>protezione del materiale</b>
0	non protetto
1	protetto contro la caduta verticale di gocce d'acqua
2	protetto contro la caduta di gocce d'acqua con inclinazione di 15°
3	protetto contro la pioggia
4	protetto contro gli spruzzi d'acqua
5	protetto contro i getti d'acqua
6	protetto contro le ondate
7	protetto contro gli effetti dell'immersione
8	protetto contro gli effetti della sommersione

Tabella [A.2.e.]

#### A.3. Influenza della temperatura

Un aspetto molto importante nell'impiantistica è la temperatura di funzionamento dell'apparecchiatura. Un interruttore reale è costituito da una serie di elementi che, durante la conduzione, sono attraversati da correnti molto elevate che provocano dissipazioni, cioè calore che determina un innalzamento della temperatura dell'apparecchiatura/quadro e talvolta anche un declassamento della taglia dell'interruttore. Per maggior chiarezza si riporta una tabella in cui si forniscono le potenze di dissipazione per gli interruttori

Emax utilizzati su tutti i montanti dell'impianto ad esclusione del Bow Thruster che è alimentato dall'interruttore X1.

Tabella [A.3.a.]

Potenza dissipata			
Interruttore	Taglia	Fisso 3/4 Poli	Estraibile 3/4 Poli
	[A]	[W]	[W]
<b>E1 B-N</b>	800	65	95
	1000	96	147,2
	1250	150	230
	1600	253	378
<b>E2 B-N-S</b>	800	29	53
	1000	44,8	83,2
	1250	70	130
	1600	115	215
<b>E2 L</b>	1250	105	165
	1600	170	265

Proprio in funzione della temperatura, l'interruttore potrà essere caratterizzato da una portata continuativa diversa rispetto a quella nominale dichiarata, e questo dipende:

- dal tipo di ambiente.
- dalle caratteristiche del quadro
- dalle dimensioni dei terminali di collegamento.

Anche in questo caso, in funzione della temperatura ambiente sarà possibile conoscere la reale corrente che l'interruttore sarà in grado di portare per un tempo indefinito:

Tabella [A.3.b.]

Tipologia	Terminali verticali				Terminali orizzontali e anteriori			
	Portata continuativa [A]			Sezione sbarre [mm <sup>2</sup> ]	Portata continuativa [A]			Sezione sbarre [mm <sup>2</sup> ]
	35°C	45°C	55°C		35°C	45°C	55°C	
<b>E1B/N 08</b>	800	800	800	1x(60x10)	800	800	800	1x(60x10)
<b>E1B/N 10</b>	1000	1000	1000	1x(80x10)	1000	1000	1000	2x(60x8)
<b>E1B/N 12</b>	1250	1250	1250	1x(80x10)	1250	1250	1200	2x(60x8)
<b>E1B/N 16</b>	1600	1600	1500	2x(60x10)	1550	1450	1350	2x(60x10)
<b>E2S 08</b>	800	800	800	1x(60x10)	800	800	800	1x(60x10)
<b>E2NS 10</b>	1000	1000	1000	1x(60x10)	1000	1000	1000	1x(60x10)
<b>E2NS 12</b>	1250	1250	1250	1x(60x10)	1250	1250	1250	1x(60x10)
<b>E2B/N/S 16</b>	1600	1600	1600	2x(60x10)	1600	1600	1530	2x(60x10)
<b>E2B/N/S 20</b>	2000	2000	1800	3x(60x10)	2000	2000	1750	3x(60x10)
<b>E2L 12</b>	1250	1250	1250	1x(60x10)	1250	1250	1250	1x(60x10)
<b>E2L 16</b>	1600	1600	1500	2x(60x10)	1600	1500	1400	2x(60x10)

I valori della tabella sono riferiti ad apparecchi estraibili, installati in quadro non segregato, con grado di protezione fino a IP31 e dimensioni: 2300\*800\*900 [mm] riferito ad interruttori da E1 a E3 compreso.

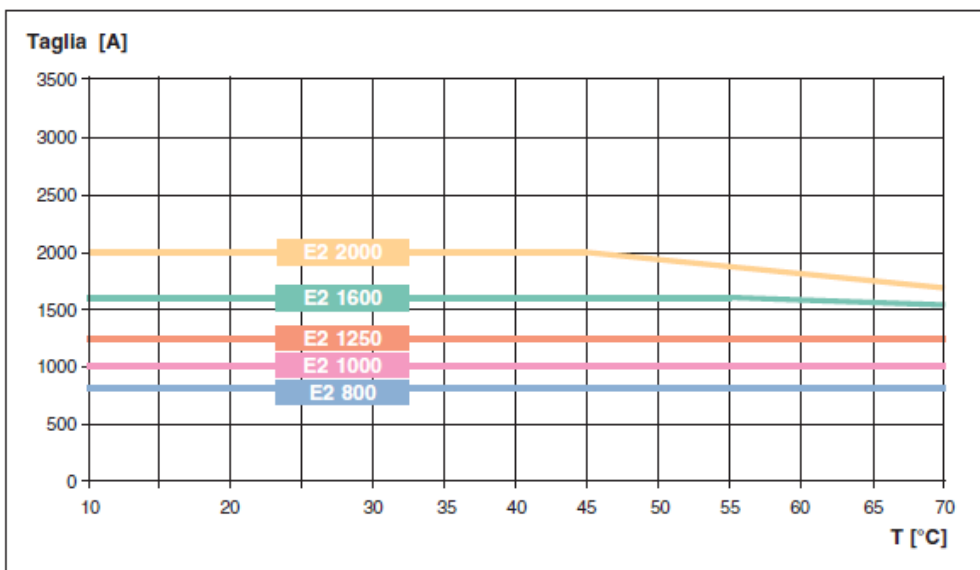
Se l'apparecchio dovesse trovarsi a funzionare ad una temperatura superiore ai 40°C bisogna declassarlo (riduzione della portata dell'apparecchio).

*Interruttore Emax E1 estraibile [A.3.c.]*

Temperatura [°C]	E1 800		E1 1000		E1 1250		E1 1600	
	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]
10	100	800	100	1000	100	1250	100	1600
20	100	800	100	1000	100	1250	100	1600
30	100	800	100	1000	100	1250	100	1600
40	100	800	100	1000	100	1250	100	1600
45	100	800	100	1000	100	1250	98	1570
50	100	800	100	1000	100	1250	96	1530
55	100	800	100	1000	100	1250	94	1500
60	100	800	100	1000	100	1250	92	1470
65	100	800	100	1000	99	1240	89	1430
70	100	800	100	1000	98	1230	87	1400

*Interruttore Emax E2 estraibile [A.3.d.]*

Temperatura [°C]	E2 800		E2 1000		E2 1250		E2 1600		E2 2000	
	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]
10	100	800	100	1000	100	1250	100	1600	100	2000
20	100	800	100	1000	100	1250	100	1600	100	2000
30	100	800	100	1000	100	1250	100	1600	100	2000
40	100	800	100	1000	100	1250	100	1600	100	2000
45	100	800	100	1000	100	1250	100	1600	100	2000
50	100	800	100	1000	100	1250	100	1600	97	1945
55	100	800	100	1000	100	1250	100	1600	94	1885
60	100	800	100	1000	100	1250	98	1570	91	1825
65	100	800	100	1000	100	1250	96	1538	88	1765
70	100	800	100	1000	100	1250	94	1510	85	1705



**A.4. Scelta del relè elettronico**

Nell’impianto progettato con DOC si sono scelti, oltre agli interruttori, anche i relè di protezione. Le caratteristiche di questi dispositivi non dipendono solo dalla corrente di guasto da interrompere, ma anche dalla flessibilità nel settaggio delle curve di protezione.

Per gli interruttori Emax della serie E sono stati impiegati due tipologie di relè elettronici:

- PR121
- PR122

Caratteristiche del relè PR121:

**Funzioni di protezione**

Lo sganciatore PR121 offre le seguenti funzioni di protezione:

- sovraccarico (L);
- corto circuito selettivo (S);
- corto circuito istantaneo (I);

### Sovraccarico (L)

La protezione da sovraccarico con intervento ritardato a tempo lungo inverso L è del tipo  $I^2t = k$ ; sono disponibili 25 soglie di corrente e 8 curve.

Ogni curva è individuata dal tempo di intervento in corrispondenza della corrente  $I = 3 \times I_1$  ( $I_1$  = soglia impostata).

### Corto circuito ritardato (S)

La protezione da corto circuito selettivo S può essere predisposta con curve a tempo d'intervento differente:

- Intervento indipendente dalla corrente ( $t = k$ ).
- Curva ad energia specifica passante costante ( $t = k/I^2$ ).

Sono disponibili 15 soglie di corrente e 8 curve, si può ottenere una regolazione molto fine. Ogni curva è così individuata:

- per curva ( $t = k$ ) dal tempo di intervento per  $I > I_2$ ;
- per curva  $t = k/I^2$  dal tempo di intervento per  $I = 10 \times I_n$

I<sub>n</sub> = corrente nominale dell'interruttore

La funzione è escludibile con la combinazione dei dip switch corrispondente alla scritta "OFF".

### Corto circuito istantaneo regolabile (I)

La protezione I dispone di 15 soglie di intervento ed è escludibile (posizione "OFF" dei dip switch).

Tabella [A.4.a.]

Funzioni di protezione e valori di regolazione - PR121					
Funzione	Soglia di intervento	Tempo di intervento*	Escludibilità	Relazione $t=f(I)$	
<b>L</b> Protezione da sovraccarico	$I_1 = 0,4 - 0,425 - 0,45 - 0,475 - 0,5 - 0,525 - 0,55 - 0,575 - 0,6 - 0,625 - 0,65 - 0,675 - 0,7 - 0,725 - 0,75 - 0,775 - 0,8 - 0,825 - 0,85 - 0,875 - 0,9 - 0,925 - 0,95 - 0,975 - 1 \times I_n$	Con $I_f = 3 \times I_1$ $t_1 = 3 - 12 - 24 - 36 - 48 - 72 - 108 - 144 \text{ s}^{(1)}$	-	$t = k/I^2$	
	Tolleranza <sup>(2)</sup>	Sgancio tra $1,05$ e $1,2 \times I_1$ $\pm 10\%$ $I_f \leq 6 \times I_n$ $\pm 20\%$ $I_f > 6 \times I_n$			
<b>S</b> Protezione selettiva da corto circuito	$I_2 = 1 - 1,5 - 2 - 2,5 - 3 - 3,5 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 8,5 - 9 - 9,5 - 10 \times I_n$	Con $I_f > I_2$ $t_2 = 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8 \text{ s}$	■	$t = k$	
	Tolleranza <sup>(2)</sup>	$\pm 7\%$ $I_f \leq 6 \times I_n$ $\pm 10\%$ $I_f > 6 \times I_n$ Il migliore dei due dati: $\pm 10\%$ o $\pm 40 \text{ ms}$			
<b>I</b> Protezione istantanea da corto circuito	$I_3 = 1 - 1,5 - 2 - 2,5 - 3 - 3,5 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 - 13 - 14 - 15 \times I_n$	Con $I_f = 10 \times I_n$ $t_2 = 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8 \text{ s}$	■	$t = k/I^2$	
	Tolleranza <sup>(2)</sup>	$\pm 7\%$ $I_f \leq 6 \times I_n$ $\pm 10\%$ $I_f > 6 \times I_n$ $\pm 15\%$ $I_f \leq 6 \times I_n$ $\pm 20\%$ $I_f > 6 \times I_n$			
<b>I</b> Protezione istantanea da corto circuito	$I_3 = 1,5 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 - 13 - 14 - 15 \times I_n$	Istantaneo	■	$t = k$	
	Tolleranza <sup>(2)</sup>	$\pm 10\%$ $\leq 30 \text{ ms}$			
<b>G</b> Protezione da guasto a terra	$I_4 = 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,6 - 0,8 - 0,9 - 1 \times I_n$	Con $I_f > I_4$ $t_4 = 0,1 - 0,2 - 0,4 - 0,8 \text{ s}$	■	$t = k$	
	Tolleranza <sup>(2)</sup>	$\pm 7\%$ Il migliore dei due dati: $\pm 10\%$ o $\pm 40 \text{ ms}$			
<b>G</b> Protezione da guasto a terra	$I_4 = 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,6 - 0,8 - 0,9 - 1 \times I_n$	$t_4 = 0,1 @ 4,47 I_4$ , $t_4 = 0,2 @ 3,16 I_4$ , $t_4 = 0,4 @ 2,24 I_4$ , $t_4 = 0,8 @ 1,58 I_4$	■	$t = k/I^2$	
	Tolleranza <sup>(2)</sup>	$\pm 7\%$ $\pm 15\%$			

Soglie e tempi di intervento [A.4.b.]

Soglia di intervento	Tempo di intervento
L Sgancio tra 1,05 e 1,2 x I <sub>n</sub>	± 20%
S ± 10%	± 20%
I ± 15%	≤ 60ms
G ± 15%	± 20%

Il relè è autoalimentato mediante dei sensori di corrente installati sull'interruttore. Un'alimentazione esterna risulta essere necessaria quando si vogliono attivare altre funzioni di protezione che richiedono potenza maggiore.

Grafico delle funzioni LSI ad energia costante [A.4.c.]

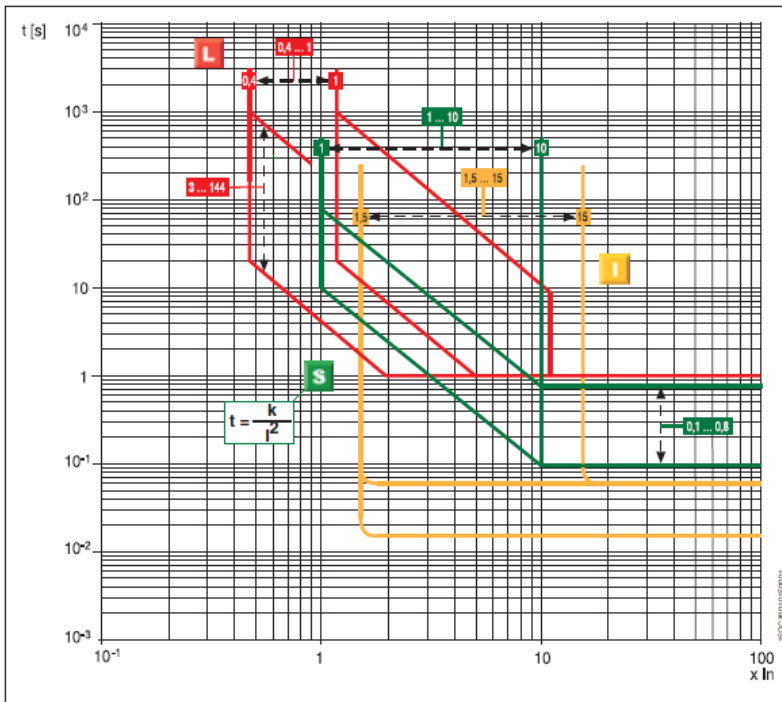
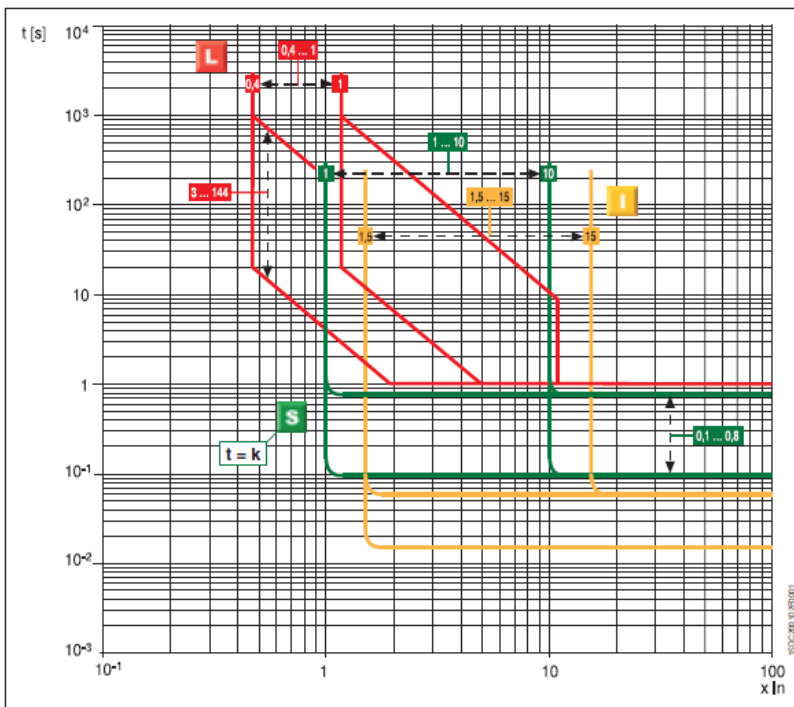


Grafico delle funzioni LSI a tempo costante [A.4.d.]



Si valutano ora le caratteristiche del relè PR122. La protezione offerta da questo relè, a differenza del precedente, consente di fornire una maggior flessibilità alle soglie L,S,I.

Tabella [A.4.e.]

Funzioni di protezione e valori di regolazione - PR122							
Funzione	Soglia di intervento	Step di soglia	Tempo d'intervento	Step tempo	Poss. escl.	Relazione Memoria termica	Selettività di zona
<b>L</b>	Protezione da sovraccarico	$I1 = 0,4 \dots 1 \times I_n$	Con $I_f = 3 \times I1$ $t1 = 3 \text{ s} \dots 144 \text{ s}$ $\pm 10\%$ $I_f \leq 6 \times I_n$ $\pm 20\%$ $I_f > 6 \times I_n$	3 s <sup>(1)</sup>	-	$t = k/I^2$	■ -
	Tolleranza <sup>(2)</sup>	Sgancio tra 1,05 e 1,2 x I1					
<b>S</b>	Protezione selettiva da corto circuito <sup>(4)</sup>	$I2 = 0,6 \dots 10 \times I_n$	Con $I_f > I2$ $t2 = 0,05 \text{ s} \dots 0,8 \text{ s}$ $t2_{sel} = 0,04 \text{ s} \dots 0,2 \text{ s}$ Il migliore dei due dati: $\pm 10\%$ o $\pm 40 \text{ ms}$	0,01 s 0,01 s	■	$t = k$	- ■
	Tolleranza <sup>(2)</sup>	$\pm 7\%$ $I_f \leq 6 \times I_n$ $\pm 10\%$ $I_f > 6 \times I_n$					
<b>I</b>	Protezione istantanea da corto circuito	$I3 = 1,5 \dots 15 \times I_n$	Istantaneo $\leq 30 \text{ ms}$	-	■	$t = k$	- -
	Tolleranza <sup>(2)</sup>	$\pm 10\%$					
<b>G</b>	Protezione da guasto a terra	$I4^{(5)} = 0,1^* \dots 1 \times I_n$	Con $I_f > I4$ $t4 = 0,1 \text{ s} \dots 1 \text{ s}$ $t4_{sel} = 0,04 \text{ s} \dots 0,2 \text{ s}$ Il migliore dei due dati: $\pm 10\%$ o $\pm 40 \text{ ms}$	0,05 s 0,01 s	■	$t = k$	- ■
	Tolleranza <sup>(2)</sup>	$\pm 7\%$					
<b>Rc</b>	Protezione da corrente differenziale <sup>(7)</sup>	$I_d = 3-5-7-10-20-30 \text{ A}$	$t_d = 0,06-0,1-0,2-0,3-0,4-0,5-0,8 \text{ s}$ <sup>(8)</sup>	-	■	$t = k$	- -
	Tolleranza <sup>(2)</sup>	$\pm 10\%$					
<b>OT</b>	Protezione da sovratemperatura	non impostabile	istantaneo	-	-	$\text{temp} = k$	- -
<b>U</b>	Protezione da sbilanciamento di fase	$I_6 = 5\% \dots 90\%$	$t_6 = 0,5 \text{ s} \dots 60 \text{ s}$ Il migliore dei due dati: $\pm 20\%$ o $\pm 100 \text{ ms}$	0,5 s	■	$t = k$	- -
	Tolleranza <sup>(2)</sup>	$\pm 10\%$					

Grafico delle funzioni LSI ad energia costante [A.4.f.]

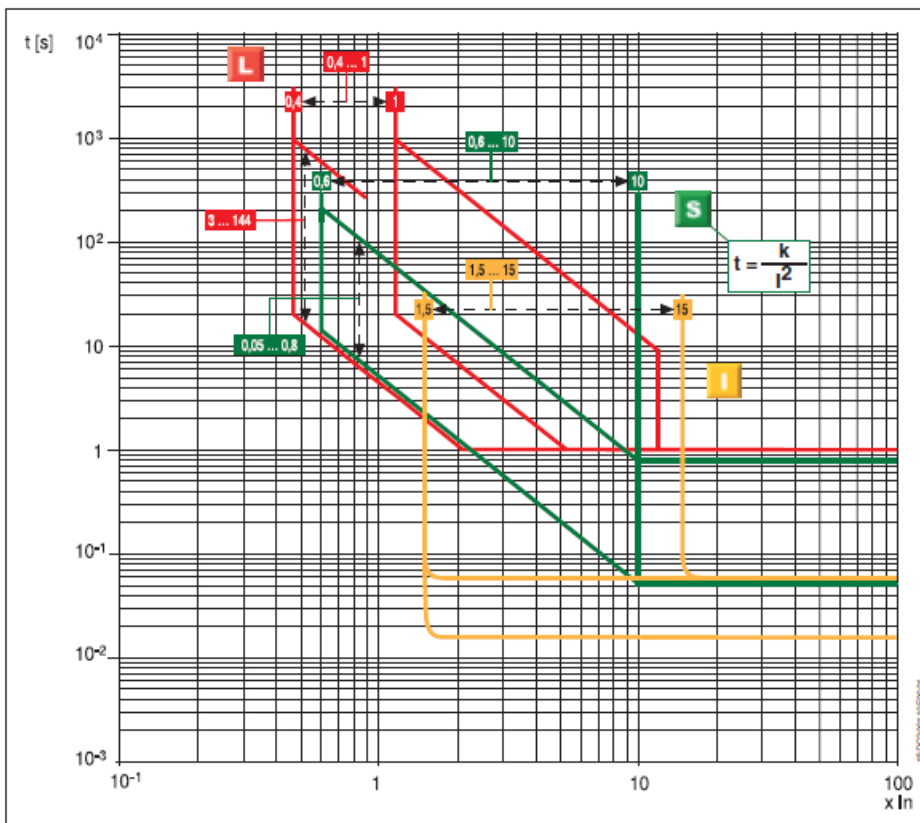
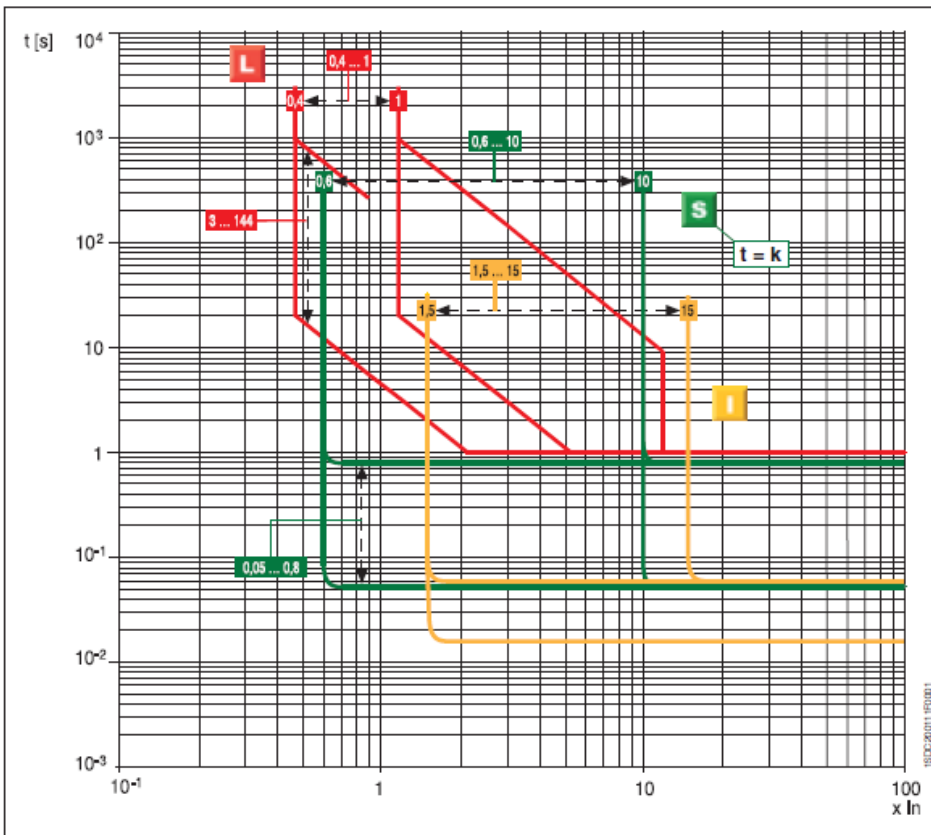


Grafico delle funzioni LSI a tempo costante [A.4.g.]



### A.5. Caratteristiche Emax seri X1

Si riportano le caratteristiche dell'interruttore Emax serie X1 utilizzato per l'alimentazione del Bow thruster

Tabella [A.5.a.]

Dati comuni		
<b>Tensioni</b>		
Tensione nominale di impiego <b>Ue</b>	[V]	690 ~
Tensione nominale di isolamento <b>Ui</b>	[V]	1000
Tensione nominale di tenuta ad impulso <b>Uimp</b>	[kV]	12
<b>Temperatura di impiego</b>	[°C]	-25...+70
<b>Temperatura di stoccaggio</b>	[°C]	-40...+70
<b>Frequenza f</b>	[Hz]	50 - 60
<b>Numero poli</b>		3 - 4
<b>Esecuzione</b>		Fissa - Estraibile

Tabella [A.5.b.]

Interruttore automatico Emax X1		X1		
Livelli di prestazione		B	N	L
<b>Correnti: corrente ininterrotta nominale (a 40 °C) I<sub>n</sub></b>	[A]	630	630	630
	[A]	800	800	800
	[A]	1000	1000	1000
	[A]	1250	1250	1250
	[A]	1600	1600	1600
Portata del polo neutro per interruttori tetrapolari	[%I <sub>n</sub> ]	100	100	100
<b>Potere di interruzione nominale limite in corto circuito I<sub>cu</sub></b>				
220/230/380/400/415 V ~	[kA]	42	65	150
440 V ~	[kA]	42	65	130
500/525 V ~	[kA]	42	50	100
660/690 V ~	[kA]	42	50	60
<b>Potere di interruzione nominale di servizio in corto circuito I<sub>cs</sub></b>				
220/230/380/400/415 V ~	[kA]	42	50	150
440 V ~	[kA]	42	50	130
500/525 V ~	[kA]	42	42	100
660/690 V ~	[kA]	42	42	45
Corrente ammissibile nominale di breve durata I <sub>cw</sub> (1s)	[kA]	42	42	15
<b>Potere di chiusura nominale in corto circuito (valore di cresta) I<sub>cm</sub></b>				
220/230/380/400/415 V ~	[kA]	88,2	143	330
440 V ~	[kA]	88,2	143	286
500/525 V ~	[kA]	88,2	105	220
660/690 V ~	[kA]	88,2	105	132
<b>Categoria di utilizzo</b> (secondo IEC 60947-2)		B	B	A
<b>Attitudine al sezionamento</b> (secondo IEC 60947-2)		■	■	■
<b>Protezione di massima corrente</b>				
Sganciatori elettronici per applicazioni in AC		■	■	■
<b>Tempi di manovra</b>				
Durata di chiusura (max)	[ms]	80	80	80
Durata di interruzione per I < I <sub>cw</sub> (max) <sup>(1)</sup>	[ms]	70	70	70
Durata di interruzione per I > I <sub>cw</sub> (max)	[ms]	30	30	12
<b>Dimensioni di ingombro</b>				
Fisso: H = 268 mm - P = 181 mm - L (3/4 poli)	[mm]	210/280		
Estraibile: H = 343 mm - P = 254 mm - L (3/4 poli)	[mm]	284/354		
<b>Pesi</b> (interruttore completo di sganciatori e sensori di corrente, accessori esclusi)				
Fisso 3/4 poli	[kg]	11/14		
Estraibile 3/4 poli (compresa la parte fissa)	[kg]	32/42,6		

		X1			
<b>Corrente ininterrotta nominale (a 40 °C) I<sub>n</sub></b>	[A]	630-800	1000-1250	1600	
<b>Vita meccanica</b> con regolare manutenzione ordinaria	[Nr. manovre x 1000]	12,5	12,5	12,5	
Frequenza manovre	[Manovre/ora]	60	60	60	
<b>Vita elettrica</b>	(440 V ~)	[Nr. manovre x 1000]	6	4	3
	(690 V ~)	[Nr. manovre x 1000]	3	2	1
Frequenza manovre	[Manovre/ora]	30	30	30	



## A.6. Scelta del relè per la serie X1

Tabella [A.6.a.]

PR331/P



PR331/P

PR331/P

PR331/P

Protezione **L** **I** **MCR\*** **L** **S** **I** **MCR\*** **L** **S** **I** **G** **MCR\***

\* opzionale

### Funzioni di protezione e valori di regolazione - PR331/P

Funzione	Soglia di intervento	Tempo di intervento*	Escludibilità	Relazione $t=f(I)$
<b>L</b> Protezione da sovraccarico	$I1 = 0,4 - 0,425 - 0,45 - 0,475 - 0,5 - 0,525 - 0,55 - 0,575 - 0,6 - 0,625 - 0,65 - 0,675 - 0,7 - 0,725 - 0,75 - 0,775 - 0,8 - 0,825 - 0,85 - 0,875 - 0,9 - 0,925 - 0,95 - 0,975 - 1 \times I_n$	Con $I_f = 3 \times I1$ $t1 = 3 - 12 - 24 - 36 - 48 - 72 - 108 - 144 \text{ s}^{(1)}$	—	$t=k/I^2$
Tolleranza <sup>(2)</sup>	Sgancio tra 1,05 e 1,2 x I1	$\pm 10\%$ $I_f \leq 6 \times I_n$ $\pm 20\%$ $I_f > 6 \times I_n$		
<b>S</b> Protezione selettiva da corto circuito	$I2 = 0,6 - 0,8 - 1,2 - 1,8 - 2,4 - 3 - 3,6 - 4,2 - 5 - 5,8 - 6,6 - 7,4 - 8,2 - 9 - 10 \times I_n$	Con $I_f = 10 \times I_n$ $t2 = 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8 \text{ s}$	■	$t=k/I^2$
Tolleranza <sup>(2)</sup>	$\pm 7\%$ $I_f \leq 6 \times I_n$ $\pm 10\%$ $I_f > 6 \times I_n$	$\pm 15\%$ $I_f \leq 6 \times I_n$ $\pm 20\%$ $I_f > 6 \times I_n$		
<b>I</b> Protezione istantanea da corto circuito	$I3 = 1,5 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 - 13 - 14 - 15 \times I_n$	$\leq 30 \text{ ms}$	■	$t=k$
Tolleranza <sup>(2)</sup>	$\pm 10\%$			
<b>G</b> Protezione da guasto a terra	$I4 = 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,6 - 0,8 - 0,9 - 1 \times I_n$	$I_f = 4,47 \times I4$ $I_f = 3,16 \times I4$ $I_f = 2,24 \times I4$ $I_f = 1,58 \times I4$ $t4 = 0,1 \text{ s}$ $t4 = 0,2 \text{ s}$ $t4 = 0,4 \text{ s}$ $t4 = 0,8 \text{ s}$	■	$t=k/I^2$
Tolleranza <sup>(2)</sup>	$\pm 7\%$	$\pm 15\%$		
<b>MCR*</b> Protezione da chiusura su corto circuito	$I5 = 6,0 - 6,1 - 6,2 - 6,3 - 6,4 \dots 14,5 - 14,6 - 14,7 - 14,8 - 14,9 - 15 \times I_n$	$\leq 30 \text{ ms}$	■	$t=k$
Tolleranza <sup>(2)</sup>	$\pm 10\%$			

Grafico delle funzioni LSI ad energia costante [A.6.b.]

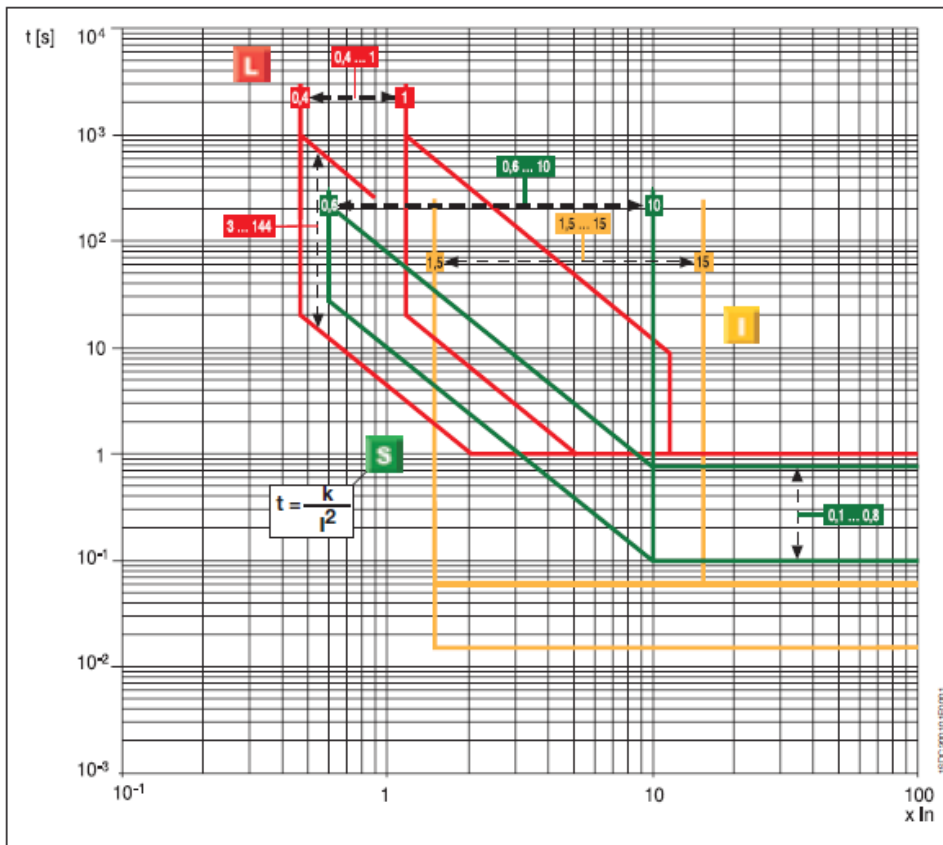


Grafico delle funzioni LSI a tempo costante [A.6.c.]

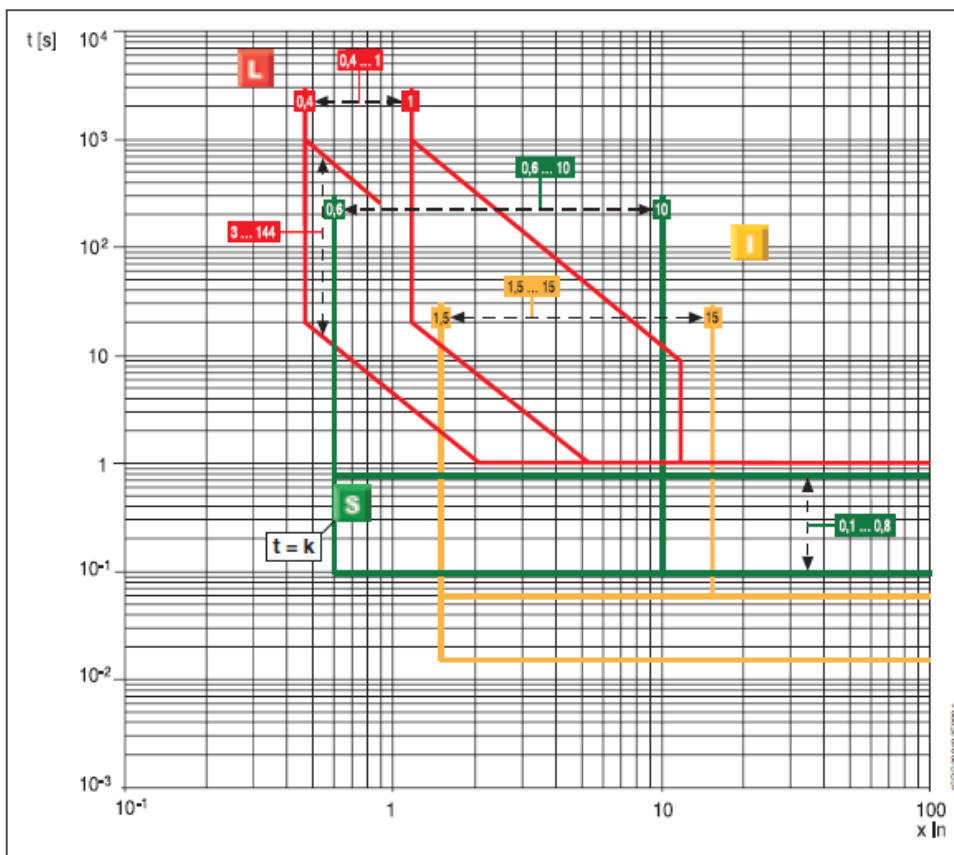


Tabella [A.6.d.]

Potenza dissipata			
Interruttore	lu	Fisso	Estraibile
	[A]	3/4 Poli [W]	3/4 Poli [W]
<b>X1 B-N</b>	630	31	60
	800	51	104
	1000	79	162
	1250	124	253
	1600	203	415
<b>X1 L</b>	630	61	90
	800	99	145
	1000	155	227
	1250	242	354

Portata dell'interruttore in quadro in funzione delle dimensioni dei terminali e del quadro stesso:  
si ipotizza l'installazione dell'apparecchio con terminali verticali.

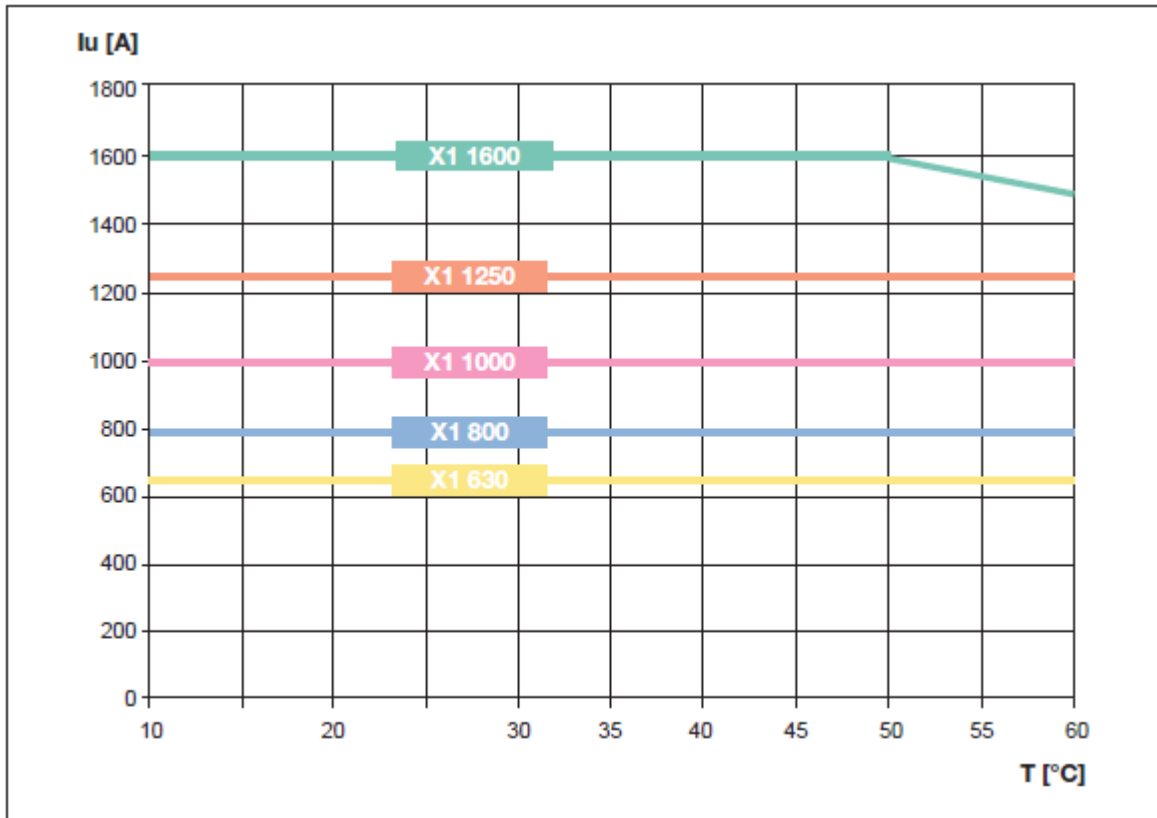
Tabella [A.6.e.]

X1 Terminali verticali in quadro ArTù K (H=1800, L=500, P=600) IP31					
	35° C	45° C	55° C	sbarre	sezione
<b>X1 B/N/L 06</b>	630	630	630	2x40x5	400
<b>X1 B/N/L 08</b>	800	800	800	2x50x5	500
<b>X1 B/N 10</b>	1000	1000	1000	2x50x8	800
<b>X1 L 10</b>	1000	1000	1000	2x50x8	800
<b>X1 B/N 12</b>	1250	1250	1250	2x50x8	800
<b>X1 L 12</b>	1250	1205	1050	2x50x8	800
<b>X1 B/N 16</b>	1520	1440	1330	2x50x10	1000

Variazione della corrente ininterrotta nominale in funzione della temperatura:

Tabella [A.6.f.]

Temperatura [°C]	X1 630		X1 800		X1 1000		X1 1250		X1 1600	
	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]	%	[A]
10	100	630	100	800	100	1000	100	1250	100	1600
20	100	630	100	800	100	1000	100	1250	100	1600
30	100	630	100	800	100	1000	100	1250	100	1600
40	100	630	100	800	100	1000	100	1250	100	1600
45	100	630	100	800	100	1000	100	1250	100	1600
50	100	630	100	800	100	1000	100	1250	100	1600
55	100	630	100	800	100	1000	100	1250	98	1570
60	100	630	100	800	100	1000	100	1250	95	1520



*Andamento della corrente d'interruttore al variare della temperatura [A.6.g.]*

## APPENDICE B

### B.1. Apparecchi elettrici

L'apparecchio elettromeccanico è costituito da più dispositivi meccanici coordinati per compiere determinate funzioni in cui lo stadio finale di uscita è costituito da apparecchi elettrici.

Le operazioni di apertura e chiusura dei contatti sono realizzate mediante effetti elettromagnetici, elettrodinamici o termici della corrente elettrica, energia meccanica di provenienza esterna, oppure energia manuale.

L'apparecchio è un dispositivo fondamentale all'interno di un impianto elettrico, poiché deve garantire non solo la continuità di esercizio in determinate condizioni, ma anche l'interruzione del circuito qualora si dovesse verificare una condizione di guasto per la quale l'interruttore è chiamato ad intervenire.

#### B.1. 1. Tipologie di prove

Durante il processo produttivo, l'interruttore dovrà essere sottoposto ad una serie di prove per verificare che corrisponda agli standard imposti dalla normativa di riferimento.

Le prove che possono essere eseguite si suddividono nelle seguenti categorie:

- *Prove di tipo:* permettono di verificare che il progetto risponda a determinate specifiche (ad esempio le grandezze caratteristiche nominali). Queste prove vengono condotte su uno o più apparecchi (rappresentativi della produzione) seguendo modalità e condizioni specificate.
- *Prove di routine (prove individuali):* sono prove che vengono effettuate su ciascun prodotto, non sono di tipo distruttivo e consentono, al termine della produzione, di testare il corretto funzionamento e la sicurezza (isolamento).
- *Prove di campionatura:* sono della stessa tipologia delle prove di routine, sono condotte su campioni prelevati in modo casuale fra i vari lotti di produzione. In genere tali prove sono condotte in accordo fra produttore e utilizzatore.
- *Prove speciali:* sono richieste per gli apparecchi che devono essere installati in luoghi particolari. Le caratteristiche dell'apparecchio devono essere testate per verificare la rispondenza a condizioni più restrittive di funzionamento.

#### B.1.2. Definizione interruttore

L'interruttore elettromeccanico si può definire come un dispositivo elettromeccanico di chiusura e interruzione, capace di stabilire, portare e interrompere correnti sotto condizioni nominali, e anche di stabilire, portare per un determinato tempo e interrompere correnti sotto condizioni anormali del circuito quali, ad esempio, quelle di corto circuito.

Gli apparecchi che vengono utilizzati nel programma DOC, sono ovviamente interruttori per circuiti trifase. In tal caso, non tutti i poli dell'interruttore risultano ugualmente sollecitati, sia dal punto di vista della corrente che devono interrompere, sia per quanto riguarda l'energia d'arco e la tensione che si presenta ai capi di ciascun polo dopo l'estinzione della corrente. L'impedenza può essere considerata principalmente

induttiva. Si ipotizza che l'interruttore operi in modo da interrompere la corrente al suo zero naturale nelle tre fasi e che, dopo la separazione dei contatti, la corrente venga interrotta al primo passaggio per lo zero.

Si riportano nel seguito le principali definizioni che caratterizzano un interruttore elettromeccanico:

- *Polo*: una delle vie conduttrici, separate e isolate una dall'altra, che costituisce parte del circuito principale.
- *Circuito principale*: parti conduttrici di un interruttore facenti parti dello stesso circuito che l'interruttore è chiamato ad aprire/chiudere.
- *Posizione di chiuso*: posizione dell'interruttore nella quale la continuità del circuito principale è assicurata nel modo previsto.
- *Posizione di aperto*: posizione dell'interruttore nella quale la distanza fra i contatti è assicurata nel modo previsto per raggiungere il grado di isolamento dichiarato.
- *Operazione*: passaggio di un contatto mobile dalla posizione di aperto a quella di chiuso o viceversa.
- *Richiusura automatica*: insieme di operazioni che l'interruttore deve eseguire quando, dopo l'apertura, i contatti vengono richiusi automaticamente entro un determinato tempo.
- *Distanza in aria*: distanza in aria più breve, misurata fra due parti conduttrici, mediante un filo immaginario teso fra di esse.

### B.1.3. Modalità di sgancio

Per l'esecuzione della manovra, occorre applicare una certa energia. L'operazione può essere portata a termine mediante tre differenti modalità:

- *Operazione manuale dipendente*: operazione compiuta solo ed esclusivamente con energia manuale applicata direttamente, tale che, la velocità e la forza dell'operazione risultano dipendenti dall'azione dell'operatore.
- *Operazione dipendente, a energia non manuale*: manovra eseguita da mezzi non manuali, dove il completamento dell'operazione è dipendente dalla continuità dell'alimentazione di energia agli organi di azionamento.
- *Operazione ad energia accumulata*: energia necessaria alla manovra, viene precedentemente immagazzinata nel dispositivo di azionamento, in modo tale da permettere la completa apertura. Quest'ultima tipologia di operazione a sua volta si classifica in funzione del mezzo in cui l'energia viene immagazzinata, il modo in cui la stessa energia viene prodotta, e infine nel modo in cui viene liberata.
- *Operazione manuale indipendente*: l'energia necessaria alla manovra è di tipo manuale, la quale dovrà essere precedentemente accumulata in modo da poterla rilasciare, quando richiesto, in maniera continuativa (forza e velocità dell'operazione sono sostanzialmente indipendenti dall'azione dell'operatore).

- *Operazione non manuale indipendente*: anche in questo caso la manovra è eseguita in modo da mantenere forza e velocità dell'operazione costanti ma, a differenza di prima, l'energia accumulata viene fornita da una sorgente esterna.

La classificazione fra operazione dipendente e indipendente è molto importante per individuare le caratteristiche dell'apparecchio nelle condizioni anormali di funzionamento (corto circuito).

Gli interruttori di bassa tensione si differenziano in base al tipo di sgancio:

- *Interruttori a sgancio libero*: i contatti mobili ritornano e rimangono nella posizione di aperto quando l'operazione di apertura viene iniziata dopo l'operazione di chiusura, anche con il mantenimento del comando di chiusura.
- *Interruttore a sgancio condizionato*: rappresenta un requisito di sicurezza inferiore rispetto allo sgancio libero, poiché consente lo sgancio solo quando sono soddisfatte determinate condizioni (per esempio quando i contatti sono completamente chiusi).

La manovra può essere compiuta e portata a termine mediante il meccanismo di azionamento e lo sganciatore: Il primo elemento racchiude tutte le parti operative di un dispositivo di apertura/chiusura dell'apparecchio, ossia le parti che trasmettono la forza ai contatti, il secondo, invece, è una parte meccanica direttamente collegata con l'interruttore che intervenendo rimuove gli organi di ritenuta e provoca l'apertura o la chiusura dell'interruttore.

Gli sganciatori possono a loro volta suddividersi in diverse famiglie in funzione:

- *Dell'alimentazione*: sganciatori di sovracorrente (tipo serie) e sganciatori di minima tensione (in derivazione).
- *Della funzione*: sganciatori di apertura o chiusura.
- *Del ritardo*: sganciatori a intervento istantaneo o ritardato.

#### B.1.4. Grandezze principali

Nelle tabelle dei vari interruttori, riportate per gli apparecchi scelti con il DOC, sono presenti una serie di grandezze le cui definizioni principali vengono qui sotto riportate:

- *Corrente termica*: valore di corrente che il circuito principale (poli) di un apparecchio è chiamato a portare continuamente pur rispettando le condizioni d'installazione ed uso.
- *Corrente presunta*: corrente che percorrerebbe il circuito se ciascun collegamento interno all'interruttore fosse caratterizzato da un'impedenza trascurabile.
- *Corrente di picco presunta*: valore di picco della corrente presunta rilevato durante il transitorio che segue l'istante di chiusura.
- *Massima corrente di picco presunta*: valore della corrente di picco presunta che si verifica in seguito alla chiusura del dispositivo nella condizione più gravosa.
- *Corrente presunta simmetrica*: è la componente simmetrica della corrente presunta.

- *Corrente presunta interrotta*: valore di corrente valutato all'istante in cui avviene la separazione metallica dei contatti ed è individuata dal valore efficace della componente alternata e dal valore percentuale della componente unidirezionale, con costante di tempo che deve essere specificata.
- *Potere di chiusura*: è il più elevato valore della corrente di picco presunta che l'interruttore è in grado di stabilire in determinate condizioni circuitali e di tensione.
- *Potere d'interruzione*: è il più alto valore efficace della componente simmetrica della corrente che l'interruttore può interrompere sotto una data tensione. Tale valore è valutato, nel caso del 50 Hz, in corrispondenza di 10ms.
- *Potere d'interruzione di corto circuito*: potere d'interruzione dell'interruttore quando il corto è stabilito ai morsetti dell'apparecchio stesso.
- *Corrente ammissibile di breve durata*: valore efficace della componente simmetrica della corrente che l'interruttore può portare in maniera continuativa, restando nella posizione di chiuso, per un tempo specificato. Questo valore non può mai essere superiore rispetto al potere d'interruzione dell'apparecchio. In funzione di tale parametro sarà possibile coordinare le protezioni dell'impianto in maniera da garantire la selettività.

#### B.1.5 Caratteristiche costruttive e principio di funzionamento

Va sottolineato il fatto che, negli impianti reali, bisogna valutare attentamente la dissipazione che si verifica sui contatti dell'interruttore durante il funzionamento dell'impianto elettrico. Questa situazione porta, se non sono previsti adeguati sistemi di raffreddamento, ad un declassamento della taglia dell'interruttore. Per evitare ciò, si deve fare particolare attenzione al dimensionamento dei contatti che condizionano pesantemente il valore della resistenza di contatto. Tale parametro è influenzato, non solo dal tipo di materiale utilizzato, ma anche dalla forma, dalle dimensioni e dal percorso seguito dai filetti di corrente per passare da un polo all'altro.

La resistenza di contatto è composta a sua volta dalla resistenza superficiale (fortemente influenzata dallo stato di usura delle superfici e dalla forza di contatto che viene esercitata).

La forza di contatto, oltre ad influenzare la resistenza superficiale, influenza l'entità e la durata del rimbalzo dell'elemento mobile che è quindi in grado di alterare sia le prestazioni del contatto (cioè dell'apparecchio), sia la vita utile dell'interruttore oltre al livello di corrente al quale si garantisce la repulsione elettrodinamica fra la parte fissa e mobile del contatto. In definitiva la forza di contatto dovrà essere sempre la massima consentita compatibilmente con il tipo di materiale utilizzato e da tutti i requisiti che concorrono a definire le prestazioni dell'apparecchio. In pratica è conveniente ottenere elevate pressioni per ridurre al minimo la resistenza superficiale.

Il tempo entro il quale avviene l'estinzione della corrente di guasto è determinato dal valore della forza elettrodinamica di repulsione fra i contatti. Questa forza deve essere tale da superare la forza di contatto durante le condizioni anormali di funzionamento per portare alla separazione degli elementi del contatto. Il

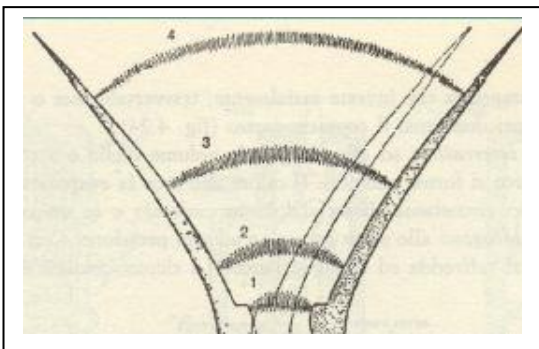


valore della forza di separazione dei poli non può essere eccessivamente elevato se si vogliono evitare fenomeni dannosi per l'interruttore (ad esempio lo strappamento dell'arco).

Gli apparecchi di protezione si differenziano, oltre ai materiali utilizzati, anche per la funzione del mezzo impiegato per l'estinzione dell'arco. L'interruzione dell'arco in bassa tensione è garantita solitamente da piastre metalliche di materiale ferromagnetico che attraggono l'arco, lo segmentano, lo allungano e quindi favoriscono il suo raffreddamento. Durante l'estinzione dell'arco tutte le parti di un interruttore devono concorrere all'estinzione dell'arco (le pareti della camera d'estinzione, sottraggono calore e facilitano il suo raffreddamento emettendo gas inerti).

Per gli interruttori installati nel QEP sono richiesti metodi di estinzione d'arco più efficaci dato che si raggiungono valori elevati della corrente di corto circuito; si devono introdurre ad esempio bobine di soffio magnetico.

*Funzionamento della bobina di soffio magnetico:*



*Schematizzazione dell'arco [B.1.5.a.]*

Quando il contatto mobile abbandona il contatto fisso, si produce un arco che per effetto termico si sposta verso l'altro, trasferendosi sui contatti ausiliari e determinando così l'inserzione di una bobina di soffio che, percorsa dalla corrente d'arco, produce un campo magnetico ortogonale in grado allungare l'arco verso l'alto e indirizzarlo verso piastre isolanti di materiale ceramico con elevata capacità termica.

Queste piastre sono sagomate in modo tale da garantire, man mano che l'arco si sposta, un percorso più lungo e tortuoso per assottigliare, allungare e raffreddare più velocemente l'arco stesso, consentendo l'interruzione definitiva al primo passaggio per lo zero della corrente.

Nel caso in cui la corrente da interrompere non fosse particolarmente elevata, le bobine di soffio magnetico potrebbero non intervenire adeguatamente dato che il loro principio di funzionamento si basa sull'intensità della corrente da interrompere.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] ABB Norway, *On board DC grid: the step forward in Power generation and propulsion*
- [2] ABB Norway, *On board DC grid: a significant step forward in electric propulsion increasing vessel efficiency up to 20%*
- [3] Enrico Tironi, *Protezione dai guasti polifase degli impianti elettrici con convertitori*, dipartimento di elettrotecnica Politecnico di Milano
- [4] European Batteries, *Catalogo per la scelta delle batterie al litio-ioni*
- [5] ABB drives, *guide for users of variable-speed drives (VSDs)*
- [6] ABB catalogo tecnico, *Emax interruttori automatici aperti di bassa tensione*
- [7] J. S. Chalfant and C. Chrysostomidis, *Analysis of Various All-Electric-Ship Electrical Distribution System Topologies*, Massachusetts Institute of Technology (MIT) Cambridge, MA, USA
- [8] C. Chrysostomidis, Julie Chalfant, David Hanthorn, James Kirtley and Matt Angle 1/2010  
*Architectural Model to Enable Power System Tradeoff Studies*
- [9] ABB Marine, *Experience with Azipod propulsion systems on board marine vessels*
- [10] Ing. Alf Kåre Ådnanes, *A Survey of Concepts for Electric Propulsion in Conventional and Ice Breaking OSVs*, ABB business unit Norway
- [11] Jan Fredrik Hansen and Thomas N Nielsen, *Fuel efficient LNGC propulsion using variable speed electric propulsion drives*, ABB Marine Norway
- [12] Marco Piattelli, *Impianti elettrici sulle navi*, Tilgher Genova
- [13] ABB Bergamo, *Q.T. generalità sui sistemi e sulle installazioni di bordo*
- [14] Rina rules part C, *Machinery, Systems and fire protection*

[15] IEC 61363, *Electrical installations of ships and mobile and fixed offshore units-Procedures for calculating short-circuit currents in three phase a.c.*

[16] ABB, *Raccolta di guide tecniche per azionamenti in a.c.*

## RINGRAZIAMENTI

*Dopo un ciclo quinquennale di studi accademici riccamente formativi ed educativi, la tesi di laurea specialistica, oltre alla trattazione di uno specifico argomento, mi offre l'opportunità di ringraziare quanti hanno contribuito al raggiungimento di questo mio desiderato obiettivo tanto importante per il mio avvenire professionale.*

*Sento l'urgenza di ringraziare il mio relatore, prof. Enrico Tironi, che, in collaborazione con ABB SACE, mi ha permesso, grazie alle sue risolutive indicazioni, di trattare un tema interessante, ambizioso ed innovativo.*

*Con il medesimo entusiasmo desidero ringraziare il prof. Enrico Ragaini, tutor aziendale nonché docente presso il Politecnico di Milano, per i suggerimenti utili nel dirimere i miei dubbi nati durante la stesura del lavoro e per le solidali 'trasferte lavorative'.*

*Sono grato ad ABB SACE di Bergamo che mi ha fornito, durante questi sei mesi di tesi, il necessario supporto logistico e l'indispensabile professionalità del gruppo di lavoro messi a disposizione: in particolare i Sigg. Antonio Fidigatti e Corrado Gatti per l'interessamento mostrato nei confronti del mio lavoro e per la loro capacità nel formulare valide e puntuali soluzioni.*

*Un ringraziamento speciale va a tutti i miei compagni di corso con i quali c'è stato un sincero rapporto collaborativo, in particolare ringrazio: Andrea, Claudio, Denis, Fabio, Giacomo, Luca L., Luca M., Pierluigi e Roberto.*

*Ringrazio, infine, con affetto Laura e tutta la mia famiglia che mi hanno incoraggiato, durante le immancabili difficoltà, a raggiungere questo significativo traguardo accademico.*

*Molte sono le cose che sono riuscito ad approfondire con questo lavoro, altre avrebbero meritato un lasso di tempo più ampio considerata la valenza innovativa dell'argomento trattato.*

*Spero, a lavoro compiuto, di aver confermato le attese e di essere stato all'altezza di quanto mi è stato chiesto di fare, di certo l'impegno e la passione da parte mia non sono mancati.*