

# **POLITECNICO DI MILANO**

**Facoltà di Ingegneria dei Processi Industriali**

**Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Elettrica**



**Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta  
per un dispositivo statico di compensazione**

**Tesi di Laurea di:**

**Niccolò CENTRI**

**Matr. 740845**

**Relatore: Prof. Ing. Federica Foiadelli**

**Anno Accademico 2010-2011**

Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

## INDICE

<i>Introduzione</i>	5
<i>Capitolo 1- Qualità della tensione e analisi dei principali disturbi di rete</i>	
1.1- <i>Introduzione</i>	7
1.2- <i>Definizioni e acronimi utilizzati nel capitolo</i>	7
1.2.1- <i>Definizioni EMC di base</i>	7
1.3- <i>Caratterizzazione fisica dei disturbi</i>	9
1.3.1- <i>Armoniche e interarmoniche</i>	9
1.3.1.1- <i>Armoniche</i>	9
1.3.1.2- <i>Principali fonti di armoniche industriali</i>	12
1.3.1.3- <i>Propagazione delle armoniche nelle reti</i>	12
1.3.1.4- <i>Leggi di composizione delle armoniche</i>	13
1.3.1.5- <i>Inter-Armoche</i>	14
1.3.2- <i>Variazioni di tensione e flicker</i>	15
1.3.2.1- <i>Descrizione del fenomeno</i>	15
1.3.2.2- <i>Sorgenti di variazione di tensione e flicker</i>	16
1.3.2.3- <i>Propagazione delle variazioni di tensione e dei flicker</i>	17
1.3.3- <i>Squilibri di tensione</i>	18
1.3.3.1- <i>Descrizione del fenomeno</i>	18
1.3.3.2- <i>Sorgenti di squilibri di tensione</i>	19
1.3.3.3- <i>Propagazione dello squilibrio di tensione</i>	19
1.4- <i>Buchi di tensione e brevi interruzioni</i>	19
1.5- <i>Sovratensioni</i>	19
1.5.1- <i>Generalità</i>	19
1.5.2- <i>Sovratensioni temporanee</i>	20
1.5.3- <i>Sovratensioni transitorie</i>	21
1.6- <i>Variazioni della frequenza di rete</i>	22
1.7- <i>Componenti di corrente continua</i>	23
<i>Capitolo 2- Studio sulle origini e gli effetti delle interruzioni e dei buchi di tensione.</i>	
2.1- <i>Introduzione</i>	25
2.2- <i>Fenomenologia</i>	25
2.2.1- <i>Documenti normativi</i>	25
2.2.1.1- <i>Definizioni</i>	25
2.3- <i>Buchi di tensione</i>	27
2.3.1- <i>Caratterizzazione dei buchi di tensione</i>	27
2.3.2- <i>Propagazione dei buchi di tensione nelle reti di trasmissione e distribuzione</i>	30
2.3.2.1- <i>Propagazione nelle reti di trasmissione AAT/AT</i>	30
2.3.2.2- <i>Propagazione nelle reti MT</i>	30
2.3.3- <i>Classificazione dei buchi di tensione</i>	30
2.4- <i>Fenomeni che danno origine a buchi di tensione</i>	31
2.4.1- <i>Misurazione statistica dei buchi di tensione</i>	32
2.5- <i>Relazione tra disturbi e caratteristiche di rete</i>	37
2.6- <i>Interruzioni di tensione</i>	38
2.6.1- <i>Fenomeni che danno origine a interruzioni di tensione</i>	38
2.7- <i>Procedura per la stima del numero di buchi di tensione</i>	39
2.8- <i>Stima del numero atteso di interruzioni della tensione</i>	40
2.9- <i>Effetti di buchi e interruzioni di tensione sulle apparecchiature</i>	41
2.10- <i>Desensibilizzazione di apparecchi e processi</i>	41
2.11- <i>Messa a terra del neutro tramite bobina di Petersen</i>	43

*Capitolo 3- Dispositivi DVR per la compensazione statica dei disturbi di rete*

3.1- Considerazioni preliminari	46
3.2- Elementi costitutivi di un DVR	47
3.3- Equazioni fondamentali di un sistema DVR	48
3.4- Modelli operativi dei sistemi DVR	49
3.4.1- Modalità di protezione	49
3.4.2- Modalità di standby	50
3.4.3- Modalità di iniezione	50
3.5- Strutture di controllo per i DVR	50
3.6- Schemi di regolazione per i DVR	52
3.6.1- Controllo nelle coordinate d-q	53
3.6.2- sincronizzazione con il PLL	53
3.6.2.1- Struttura generale del PLL	53
3.6.2.2- Schema adottato per il PLL	55
3.7- Filtri di uscita dell'inverter del DVR	56
3.8- Modalità di identificazione del buco di tensione	57
3.9- Schema di principio di un sistema DVR	58

*Capitolo 4- Studio dei sistemi di accumulo attualmente installati nelle principali applicazioni Automotive*

4.1- Introduzione	60
4.2- Descrizione dei sistemi di accumulo	60
4.2.1- Accumulatori al piombo acido	63
4.2.1.1- Struttura, funzionamento e caratteristiche	64
4.2.2- Batterie al Nichel-Cadmio	68
4.2.3- Batterie a Nichel-Metallo ioduro	69
4.2.4- Batterie Nichel-Zinco	71
4.2.5- Accumulatori al sodio	71
4.2.5.1- Batterie sodio Nichel-Cloruro	71
4.2.5.2- Batterie Sodio-Zolfo	72
4.2.5.3- Accumulatori ZEBRA	73
4.2.6- Accumulatori al Litio	73
4.2.6.1- Accumulatori al Litio-Ioni	74
4.2.6.2- Accumulatori al Litio-Polimeri	76
4.2.7- Accumulatori REDOX	77
4.2.7.1- Batterie REDOX a flusso	77
4.2.7.2- Accumulatori REDOX al vandanio	78
4.2.8- Batterie alluminio-aria	79
4.3- Accumulatori di tipo elettrostatico	79
4.4- Il controllo delle batterie	81
4.4.1- Stato di carica delle batterie	82
4.4.1.1- Modelli circuitali	82
4.4.1.2- Metodi coulometrici	83
4.4.1.3- Metodo della misura della resistenza interna	83
4.4.1.4- Metodo della misura della tensione a vuoto	84
4.4.1.5- Metodo della misura della tensione di cella	84
4.4.2- Equalizzazione delle batterie	84
4.4.2.1- Equalizzazione passiva	85
4.4.2.2- Equalizzazione attiva	86

*Capitolo 5- Analisi statistica delle interruzioni di tensione relative all'anno 2009*

<i>5.1- Presentazione dello studio</i>	<i>90</i>
<i>5.2- Analisi</i>	<i>91</i>
<i>5.2.1- Elenco dei dati raccolti</i>	<i>91</i>
<i>5.2.2- Elaborazione statistica dei dati raccolti</i>	<i>96</i>
<i>5.3- Conclusioni</i>	<i>103</i>

*Capitolo 6- Simulazione di intervento di un DVR in seguito al verificarsi di un buco di tensione*

<i>6.1- Premessa</i>	<i>105</i>
<i>6.2- Progettazione del circuito</i>	<i>105</i>
<i>6.2.1- Disegno del circuito di prova</i>	<i>106</i>
<i>6.3- Parametri</i>	<i>107</i>
<i>6.4- Caratterizzazione del buco di tensione</i>	<i>110</i>
<i>6.5- Costruzione del sistema di controllo</i>	<i>110</i>
<i>6.6- Realizzazione del modello</i>	<i>112</i>
<i>6.7- Analisi dei risultati</i>	<i>113</i>
<i>6.8- Problematiche energetiche</i>	<i>115</i>
<i>Conclusioni</i>	<i>117</i>
<i>Bibliografia</i>	<i>118</i>
<i>Indice delle figure</i>	<i>120</i>

## INTRODUZIONE

Questa tesi vuole affrontare, in modo più esaustivo possibile, i vari aspetti che riguardano i problemi della qualità della fornitura elettrica.

Il lavoro è stato suddiviso in cinque capitoli principali.

Nel primo capitolo, si è scelto di fornire una rapida panoramica di tutte le problematiche riguardanti i disturbi condotti nella rete elettrica, in modo particolare, si sono analizzate le sorgenti e le modalità di propagazione dei disturbi legati alle armoniche, ai flicker, agli squilibri di tensione, alle sovratensioni e alle variazioni di frequenza.

Nel secondo capitolo, si sono analizzate nel dettaglio le origini e gli effetti che buchi di tensione e delle microinterruzioni possono avere ai danni della rete elettrica; ciò è stato possibile innanzitutto definendo i fenomeni a livello normativo e poi contestualizzando gli eventi a seconda delle reti in cui questi tendono a formarsi. Tutto ciò si è concluso con una raccolta di dati inerenti all'incidenza dei buchi a seconda del tipo di rete, del tipo di isolamento, dell'ampiezza del guasto e della sua durata. Queste premesse hanno posto le basi teoriche per lo svolgimento degli studi seguenti.

Il terzo capitolo ha preso in esame i sistemi statici di compensazione, analizzandone in particolar modo gli aspetti costruttivi e le problematiche. In un secondo momento si sono poi analizzati i diversi tipi di compensazione possibile a seconda della potenza attiva iniettabile. Le nozioni contenute in questo capitolo, unitamente a quelle descritte nel capitolo quattro, sono state di grande utilità ai fini della simulazione.

Nel capitolo quattro, si è deciso di analizzare più o meno dettagliatamente i diversi tipi di sistemi di accumulo statico presenti sul mercato, suddividendoli in base al principio di funzionamento (elettrochimico o elettrostatico) e ai diversi componenti necessari per le reazioni interne. Nella seconda parte si è poi intrapresa un'analisi dei vari tipi di controlli effettuabili sullo stato di carica ed di equalizzazione delle singole celle.

Nel capitolo cinque, si è condotto uno studio statistico con lo scopo, (dato un insieme di dati riguardanti le potenze, le energie e le zone in cui si sono verificate delle interruzioni del servizio elettrico), di verificare la probabilità che in una data macrozona, si verifichi un'interruzione di tensione con una potenza e un'energia compensabili da un dispositivo DVR. L'analisi ha preso in esame campioni provenienti da tutta Italia suddividendoli in base alla diversa provenienza e gravosità.

Nel sesto e ultimo capitolo, l'intenzione principale è stata quella di effettuare una veloce prova sperimentale sulle possibilità di applicazione di un dispositivo DVR. Il lavoro è stato svolto utilizzando un circuito dimensionato ad hoc, al fine di poter determinare il comportamento del

compensatore a fronte di un buco di tensione considerato standard, con una sorgente di alimentazione ausiliaria considerata variabile, in quanto derivata da batterie installate su autovetture di tipo elettrico collegate alla rete sensibile al disturbo simulato.

# CAPITOLO 1

## QUALITA' DELLA TENSIONE E ANALISI DEI PRINCIPALI DISTURBI DI RETE

### 1.1 INTRODUZIONE

Il presente capitolo affronta l'aspetto della qualità della tensione fornita agli utenti dal "gestore" della rete elettrica di trasmissione e distribuzione.

Sono presi in esame i principali disturbi condotti con particolare riferimento a quei disturbi con propensione a sommarsi fra di loro (per esempio: armoniche, flicker, ecc.) e di conseguenza che presentano un rischio reale di superare soglie non compatibili con le apparecchiature sensibili ormai largamente diffuse in rete.

Nel capitolo non verrà però affrontato il fenomeno dei buchi di tensione, l'argomento infatti verrà approfondito nei capitoli successivi in quanto principale argomento della disamina.

### 1.2 DEFINIZIONI E ACRONOMI UTILIZZATI NEL CAPITOLO

Per una migliore comprensione di questo testo si ritiene utile riportare alcune definizioni di base comunemente usate nella compatibilità elettromagnetica (EMC) e alcuni acronimi utilizzati nello stesso

#### 1.2.1 DEFINIZIONI EMC DI BASE[5]

**- Disturbo elettromagnetico**

Fenomeno elettromagnetico che può degradare la prestazione di un dispositivo, di un'apparecchiatura o di un sistema.



**- Compatibilità elettromagnetica (EMC)**

Capacità di un dispositivo o di un'apparecchiatura o di un sistema di funzionare correttamente nel relativo ambiente elettromagnetico, senza introdurre disturbi intollerabili nell'ambiente stesso o provarli agli altri apparecchi ivi presenti.

**- Livello di Compatibilità elettromagnetica**

Valore specificato di un disturbo elettromagnetico, che ha alta probabilità di non essere superato (95%, salvo diversa indicazione) applicato ad un dispositivo, apparecchiatura o sistema.

Tale livello costituisce un valore di riferimento che consente di determinare sia i i di immunità di dispositivi, apparecchi e sistemi nell'impianto utilizzatore che le loro emissioni.

**- Emissione**

Processo attraverso il quale viene emesso un determinato disturbo da una sorgente.

(Sebbene le sorgenti dei disturbi siano sempre singoli dispositivi o apparecchi, nella presente descrizione in molti casi l'emissione é riferita al Punto di Accoppiamento Comune (PAC), come risultato globale del funzionamento dell'impianto utilizzatore).

**- Livello di emissione**

Livello di un determinato disturbo elettromagnetico emesso da una sorgente, misurato in modo specificato.

**- Immunità**

Capacità di un dispositivo, apparecchiatura o sistema di funzionare senza degrado delle prestazioni in presenza di un determinato disturbo elettromagnetico.

**- Suscettibilità**

Degradazione delle prestazioni di un dispositivo, apparecchiatura o sistema causata da un determinato disturbo elettromagnetico.

### **1.3 CARATTERIZZAZIONE FISICA DEI DISTURBI**

I disturbi condotti nelle reti di trasporto e distribuzione dell'energia elettrica AAT, AT, MT e BT sono alterazioni dell'ampiezza o della forma d'onda della tensione che, prodotti da una sorgente, si propagano lungo una rete di alimentazione, viaggiando sui conduttori di linea e in molti casi anche attraverso i trasformatori, per cui possono spesso trasferirsi tra reti a differente livello di tensione.

I disturbi considerati nel seguito sono:

- armoniche e inter-armoniche
- variazioni di tensione e flicker
- squilibrio di tensione
- buchi di tensione e brevi interruzioni
- sovratensioni
- variazioni della frequenza di rete
- componenti di corrente continua
- segnali intenzionalmente iniettati in rete.

#### **1.3.1 ARMONICHE E INTER-ARMONICHE**

##### **1.3.1.1 ARMONICHE[4]**

###### **Descrizione del fenomeno**

Le armoniche sono tensioni o correnti sinusoidali con frequenza pari ad un multiplo intero (ordine) della frequenza fondamentale di funzionamento del sistema elettrico, la cui presenza determina una distorsione della forma d'onda della tensione di alimentazione.

Le armoniche in un sistema di distribuzione sono generate in piccola parte dal sistema stesso e per la maggior parte da apparecchi utilizzatori e possono risultare costanti o variare nel tempo in

base alle condizioni di funzionamento dei singoli apparecchi che le generano e del numero di apparecchi disturbanti attivi in ogni istante.

Le armoniche di corrente iniettate in rete dalle varie sorgenti, nel percorrere le impedenze della rete, danno luogo a delle cadute che praticamente rappresentano le armoniche di tensione.

Per le reti elettriche, le armoniche che prevalentemente vengono considerate sono quelle comprese fra gli ordini 2 e 40 (100 – 2000 Hz per le reti con frequenza fondamentale di 50 Hz).

Le armoniche sono valutate (con riferimento alla tensione):

- individualmente mediante la loro ampiezza relativa ( $U_h$ ) espressa in volts o % / p.u. della fondamentale ( $U_1$ ), dove  $h$  é l'ordine dell'armonica
- globalmente attraverso il fattore di distorsione totale, calcolato mediante la seguente espressione[4]:

$$THDV = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} V h^2}$$

La stessa valutazione vale per le correnti espresse in Arms o in % / p.u. riferite a una corrente di riferimento.

La valutazione globale della corrente vale[4]:

$$THDI = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} I h^2}$$

### Sorgenti di armoniche

Le principali sorgenti di correnti armoniche nelle reti sono:

- carichi commutati elettronicamente: raddrizzatori, convertitori, regolatori in AC, ciclo convertitori;
- carichi con caratteristiche non lineari: apparecchiature a saturazione magnetica, lampade a scarica, forni ad arco, saldatrici ad arco, trasformatori;
- carichi inseriti e disinseriti da organi di manovra: condensatori, filtri e motori a induzione.

Esiste nelle reti anche una modestissima generazione di tensione armonica dovuta a: generatori, motori e trasformatori; il loro contributo non é considerato in questa analisi.

## **Raddrizzatori, convertitori, cicloconvertitori e regolatori**

Queste apparecchiature sono le maggiori responsabili dell'inquinamento armonico nelle reti.

Le frequenze armoniche caratteristiche e la relativa ampiezza sono funzione di molti parametri quali:

- realizzazione monofase o trifase
- numero di impulsi lato rete di alimentazione
- tipo di spianamento sul lato DC (quando esiste lo stadio DC): induttivo alto, induttivo medio, induttivo basso, induttivo-capacitivo, capacitivo
- angolo di accensione  $\alpha$  (in presenza di controllo)
- rapporto di corto circuito (rapporto fra la potenza di corto circuito lato alimentazione e la potenza nominale lato DC).

Queste apparecchiature possono essere suddivise in due grandi famiglie meglio descritte in seguito:

- apparecchiatura di larga diffusione, piccola potenza, generalmente di tipo monofase
- apparecchiatura di limitata diffusione, di potenza superiore alla decina di kW, generalmente di tipo trifase.

### **Apparecchiature di larga diffusione e piccola potenza**

Questa apparecchiatura nell'ambito domestico / terziario quali piccoli alimentatori monofasi a spianamento capacitivo e altre apparecchiature controllate elettronicamente rappresentano oggi una delle maggiori cause di inquinamento armonico delle reti di distribuzione pubblica; infatti pur risultando quasi sempre di modesta potenza il loro numero e' alquanto elevato e pure alto e' il loro grado di contemporaneità.

Va tenuto presente che la quasi totalità di queste apparecchiature esistenti sul mercato presentano emissioni armoniche naturali derivanti dallo stato attuale della tecnologia impiegata.

### **Apparecchiature di limitata diffusione ed elevata potenza**

Le apparecchiature di grossa potenza si riscontrano soprattutto nell'ambito industriale.

Gli ordini armonici caratteristici contenuti nella corrente lato rete di alimentazione dei ponti convertitori trifasi sono dati da[1]:

$$h = 1 \pm n * p_l$$

dove:

h: ordine dell'armonica caratteristica di corrente lato rete di alimentazione

$p_i$ : numero di impulsi del convertitore lato rete di alimentazione

n numero intero 0, 1, 2, 3, .....

L'ampiezza di tali armoniche, come già detto, e' funzione delle caratteristiche di realizzazione dei ponti; essa risulta:

$$I_h = \frac{1}{h}$$

### **1.3.1.2 PRINCIPALI FONTI DI ARMONICHE INDUSTRIALI**

#### **Forni ad arco in AC**

A causa della caratteristica tensione-corrente dell'arco, questo carico rappresenta anche una considerevole sorgente di emissione armonica.

#### **Forni ad arco in DC**

L'emissione armonica di questi forni e' strettamente dettata dalla tipologia dei ponti di conversione adottati.

#### **Altre sorgenti di armoniche**

Altre sorgenti di armoniche sono rappresentate da:

- lampade a fluorescenza lineari;
- lampade fluorescenti compatte;
- saldatrici ad arco;
- manovre di trasformatori o altri elementi saturabili;
- manovre di banchi di condensatori/filtri.

### **1.3.1.3 PROPAGAZIONE DELLE ARMONICHE NELLE RETI**

La distorsione armonica della tensione in un punto della rete elettrica è principalmente la conseguenza delle cadute di tensione prodotte dalle armoniche di corrente nel percorrere le impedenze della rete.

Va evidenziato che le armoniche si propagano sia dai livelli di tensione superiori verso quelli inferiori che viceversa.

Alcune armoniche possono subire un processo di amplificazione in determinati punti della rete elettrica dove si manifesta una condizione di risonanza, ciò può comportare amplificazioni della distorsione relativa a un'armonica di una data frequenza.

Da un punto di vista concettuale, la propagazione delle armoniche di tensione in qualsiasi rete e' governata dal rapporto fra l'impedenza di trasferimento del nodo monitorato rispetto al nodo iniettore e l'impedenza vista nel nodo iniettore.

#### **1.3.1.4 LEGGI DI COMPOSIZIONE DELLE ARMONICHE**

Il livello di disturbo armonico nelle reti e' fortemente influenzato dalla modalit  di composizione dei contributi provenienti dalle diverse sorgenti di disturbo esistenti in una rete. Nonostante la diversa natura delle armoniche la distorsione armonica di tensione in un qualsiasi punto del sistema di distribuzione e' il risultato della combinazione vettoriale delle tensioni armoniche dovute alle singole sorgenti delle armoniche stesse.

Date queste considerazioni   possibile quindi scrivere una legge di combinazione di carattere generale[1],[3]:

$$U_h = (\sum_i (U_{hi})^\alpha)^{1/\alpha}$$

dove:

$U_h$  = e' la tensione armonica risultante, di ordine h, per il gruppo di emissioni individuali considerate

$U_{hi}$  = sono le emissioni individuali di ordine h, considerate

$\alpha$  = e' l'esponente che caratterizza la legge di combinazione delle varie componenti individuali. L'esponente  $\alpha$  dipende: principalmente dal valore di probabilit  che la grandezza risultante non sia superata e dal campo di variazione dell'ampiezza e fase dei singoli componenti armonica.

### **1.3.1.5 INTER-ARMONICHE**

#### **Descrizione del fenomeno**

Le inter-armoniche sono tensioni o correnti sinusoidali con frequenza diversa da un multiplo intero della fondamentale la cui presenza determina una distorsione (modulazione) della forma d'onda della tensione di alimentazione.

Nei sistemi di trasmissione e distribuzione le inter-armoniche di interesse per i disturbi condotti si presentano in un campo di frequenza da 0 a 9 kHz; in questo rapporto sono descritte quelle nella banda 0 - 2000 Hz.

Le inter-armoniche di corrente sono originate da due differenti processi:

- variazione ciclica di carico che origina correnti inter-armoniche vicine alla fondamentale e alle armoniche caratteristiche;
- commutazione non sincrona di ponti convertitori di potenza;

#### **Sorgenti di inter-armoniche**

Le principali sorgenti di inter-armoniche nelle reti sono:

- carichi commutati elettronicamente.
- carichi con caratteristiche non lineari e/o non stazionarie.

#### **Regolatori con controllo a pacchetti di cicli**

Sono sempre più usati per il controllo accurato di processi produttivi; generalmente la potenza interessata è modesta.

#### **Forni ad arco in AC**

Il forno ad arco, oltre a generare armoniche, a causa della non ripetitività del suo ciclo operativo genera inter-armoniche presentando di fatto uno spettro continuo.

#### **Propagazione delle inter-armoniche nelle reti**

Per quanto riguarda la propagazione delle inter-armoniche vale quanto riportato per le armoniche.

Generalmente le inter-armoniche interessano maggiormente le reti BT e parzialmente quelle MT.

## 1.3.2 VARIAZIONI DI TENSIONE E FLICKER

### 1.3.2.1 DESCRIZIONE DEL FENOMENO[5]

#### **Variazioni di tensione**

Le variazioni di tensione possono essere classificate in due gruppi: lente e rapide.

Le **variazioni lente** sono deviazioni "medie" dal valore nominale dell'ampiezza della tensione di consegna entro una fascia predefinita (per esempio del  $\pm 10\%$ ) rispetto alla tensione dichiarata; esse sono determinate dalla variazione lenta dei carichi e dalla corrispondente azione di regolazione effettuata dai variatori sotto carico dei trasformatori.

Il tempo in cui si verifica la variazione è come minimo dell'ordine della decina di secondi.

Le **variazioni rapide** sono abbassamenti o aumenti bruschi di qualche percento della tensione preesistente, generalmente seguiti, se abbassamenti, da un ritorno a un valore intermedio tra quello preesistente e tra il minimo raggiunto.

Tali variazioni sono generalmente causate dalla commutazione dei carichi (partenza motori in particolare), dal funzionamento di carichi con ciclo operativo particolarmente variabile.

Una valutazione approssimata, e' data dall'espressione seguente[5]:

$$\Delta V_{\text{al PAC}} = (Z_{\text{rete al PAC}} / Z_{\text{equiv. variazione di carico al PAC}}) * \cos(\phi_{Z_{\text{rete al PAC}}} - \phi_{Z_{\text{equiv. variazione di carico al PAC}}})$$

#### **Flicker**

Il flicker e' originato dalla fluttuazione della tensione. Si definisce fluttuazione di tensione una serie di variazioni rapide (uguali o diverse) della tensione.

Fluttuazioni di tensione che presentano frequenze di modulazione del 50 Hz, comprese tra 0.5 e 40 Hz, danno origine al fenomeno del flicker (sfarfallio), ovvero della sensazione visiva provocata dalle fluttuazioni della intensità di illuminazione delle lampade.

Le lampade a incandescenza sono fra le più sensibili, in quanto in termini percentuali una variazione nella tensione di alimentazione causa una variazione di intensità luminosa più di tre volte maggiore[5].



Il livello di sensazione istantanea di flicker è una funzione quadratica dell'ampiezza della variazione luminosa e quindi della fluttuazione di tensione che la genera.

### **1.3.2.2 SORGENTI DI VARIAZIONI DI TENSIONE E FLICKER**

Le fluttuazioni di tensione e il flicker sono prodotte dalla variazione dei carichi e in particolare i carichi industriali sono la causa più importante.

Il flicker può essere originato anche dall'effetto combinato di una popolazione di carichi connessi allo stesso sistema di distribuzione, anche se ogni singolo carico preso individualmente non origina flicker.

I principali carichi con propensione a originare flicker sono i seguenti:

#### **Reti AAT di trasmissione**

- forni ad arco in AC e DC
- laminatoi.

#### **Reti AT di trasmissione e distribuzione**

- forni ad arco in AC e DC
- laminatoi
- grossi cicloconvertitori
- grossi impianti di saldatrici
- manovra di: grossi carichi, banchi di condensatori shunt, linee, trasformatori, ecc..

#### **Reti MT di distribuzione**

- saldatrici
- grossi motori con partenza a piena tensione di linea (AC)
- grossi motori di azionamenti con partenza soft o a piena tensione di linea
- attrezzature per trattamento rottame
- attrezzature di miniera
- manovra di: carichi relativamente grossi, banchi di condensatori shunt, ecc.
- forni a resistenza.

### Reti BT di distribuzione

- carichi domestici e assimilabili con controllo automatico del ciclo di carico
- motori con partenza a piena tensione di linea (AC)
- motori di azionamenti con partenza soft o a piena tensione di linea
- piccole saldatrici
- manovra di: carichi relativamente grossi, banchi di condensatori shunt, ecc.
- piccoli forni a resistenza
- generiche piccole apparecchiature con controllo a treni di cicli.

Fra tutti i carichi sopra elencati quelli più critici sono sicuramente i forni ad arco e le grosse saldatrici a resistenza in quanto possono influenzare estese aree di rete.

#### 1.3.2.3 PROPAGAZIONE DELLE VARIAZIONI DI TENSIONE E DEL FLICKER

Le variazioni di tensione e il flicker si propagano nelle reti allo stesso modo.

Con riferimento al flicker, da un punto di vista concettuale, la propagazione in qualsiasi rete e' determinata dal rapporto fra l'impedenza di trasferimento del nodo monitorato rispetto al nodo di emissione e l'impedenza vista nel nodo di emissione.

Fra differenti livelli di tensione il trasferimento avviene sempre dal livello di tensione superiore a quello inferiore.

Considerando le affermazioni eseguite, e' stata definita una legge di carattere generale per la composizione di singole emissioni di flicker; essa viene applicata sia a flicker di breve termine ( $P_{st}$ ) che di lungo termine ( $P_{lt}$ ). Con riferimento al  $P_{st}$  la legge e' la seguente[4]:

$$P_{st} = \left( \sum_i P_{sti}^\alpha \right)^{\frac{1}{\alpha}}$$

dove:

$P_{st}$ : e' la severità di flicker risultante del gruppo di emissioni individuali considerato

$P_{sti}$ : sono le emissioni di flicker individuali del gruppo considerato

$\alpha$ : e' un coefficiente che dipende dalla natura delle sorgenti di flicker le cui emissioni sono da sommare. Praticamente il valore formalizzato a livello della letteratura internazionale e attualmente utilizzato a livello generale e'  $\alpha = 3$ .

$\alpha = 3$ : si usa quando si ritiene basso il rischio di coincidenza delle variazioni rapide di tensione

$\alpha = 2$ : si usa in presenza di coincidenza di processi stocastici particolari, per esempio forni ad arco in fusione contemporanea

$\alpha = 1$ : si usa in presenza di ripetitiva coincidenza di variazioni di tensione.

### 1.3.3 SQUILIBRIO DI TENSIONE

#### 1.3.3.1 DESCRIZIONE DEL FENOMENO

Lo squilibrio di tensione (o corrente) si verifica quando esiste una diversità delle ampiezze delle tensioni di fase o del normale sfasamento di 120 gradi tra le fasi, per cui il sistema trifase non risulta più simmetrico.

Generalmente il grado di squilibrio e' definito tramite il rapporto fra la componente di sequenza inversa (o omopolare) e quella diretta.

Lo squilibrio di tensione in una rete di trasmissione o distribuzione può essere espresso nel modo seguente[1]:

$$U_u = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 * \beta}}{1 + \sqrt{3 - 6 * \beta}}} \quad \text{con} \quad \beta = \frac{U_{LL1-2}^4 + U_{LL2-3}^4 + U_{LL3-1}^4}{(U_{LL1-2}^2 + U_{LL2-3}^2 + U_{LL3-1}^2)^2}$$

oppure:

$$U_u = U_{neg} = \frac{1}{3} \times (\overline{V_{L1}} + \alpha^2 \times \overline{V_{L2}} + \alpha \times \overline{V_{L3}})$$

La prima espressione dà lo squilibrio espresso in p.u. della tensione esistente durante la misura; la seconda espressione dà lo squilibrio espresso nell'unità di misura in cui e' espressa la tensione durante la misura.

### **1.3.3.2 SORGENTI DI SQUILIBRIO DI TENSIONE**

Le principali sorgenti di squilibrio sono la ripartizione non equilibrata dei carichi monofasi sulla BT e i carichi monofasi alimentati fase-fase sulla MT e BT.

### **1.3.3.3 PROPAGAZIONE DELLO SQUILIBRIO DI TENSIONE**

La propagazione dello squilibrio di tensione nelle reti praticamente è uguale a quella del flicker; lo squilibrio si trasferisce dai livelli di tensione superiori a quelli di tensione inferiori e non viceversa.

## **1.4 BUCHI DI TENSIONE E BREVI INTERRUZIONI**

Questo specifico disturbo è oggetto di un'analisi più approfondita di un altro punto dell'elaborato e pertanto si rimanda a tale capitolo tutto ciò riguarda la descrizione dettagliata del fenomeno, la sua origine e la sua propagazione.

## **1.5 SOVRATENSIONI**

### **1.5.1 GENERALITÀ**

In questo punto sono descritte le sovratensioni inerenti alle reti di trasporto e distribuzione dell'energia elettrica.

Le sovratensioni, come bene esprime la parola stessa, sono sopraelevazioni della tensione conseguenti a modificazioni dello stato elettrico della rete elettrica. Sono generalmente classificate in relazione alla loro durata, ma anche in relazione ad altri parametri quali: tempo di fronte (tempo necessario per raggiungere circa il valore massimo), loro origine, contenuto energetico, modalità di impatto sul componente di rete o apparecchiatura dell'utente.

Le sovratensioni sono originate sia da eventi esterni al sistema elettrico quali fulminazioni e altre cause che da eventi interni come manovre e guasti intrinseci ai componenti. Nelle reti AAT hanno più peso le sovratensioni di origine interna, mentre il contrario si verifica per le reti BT.

La loro propagazione e' soprattutto funzione delle frequenze presenti nella sovratensione, della struttura di rete e delle caratteristiche dei componenti.

La loro limitazione e' funzione della natura della sovratensione: per esempio le sovratensioni temporanee sono generalmente controllate agendo sulla struttura o su operazioni condotte sulla rete, mentre le sovratensioni transitorie sono limitate ai livelli protettivi assicurati da scaricatori e spinterometri.

Gli effetti delle sovratensioni consistono principalmente nelle sollecitazioni degli isolamenti: cedimento dielettrico con guasto permanente, invecchiamento accelerato del dielettrico, guasti ripetuti in presenza di isolamenti autoripristinanti. Non secondario, soprattutto per la BT, e' l'effetto di interferenza su apparecchiature sensibili causandone il degrado delle prestazioni a causa del trasferimento induttivo/capacitivo dovuto a fronti ripidi, alte frequenze.

Nel seguito e' riportata una sintesi dei tipi di sovratensioni che ci si può attendere nelle reti elettriche di trasmissione e distribuzione, classificandole per durata (classificazione più usata a livello impiantistico) e indicandone le principali cause che le originano.

L'analisi riguarda le sovratensioni fase terra, presentandole in due grandi famiglie:

- sovratensioni temporanee
- sovratensioni transitorie.

## **1.5.2 SOVRATENSIONI TEMPORANEE**

### **Reti AT e AAT**

Si manifestano soprattutto in presenza di perdita di carico, energizzazione di trasformatori e guasti monofasi a terra; interessano prevalentemente le reti poco magliate, con lunghe linee e bassa potenza di corto circuito.

### **Reti MT**

In reti a neutro isolato o a terra tramite resistenza/reattanza, possono durare tempi molto lunghi (anche qualche ora). La loro ampiezza raggiunge valori di circa 1.8 p.u. se originate da guasto monofase a terra e valori fino a 2.5 - 3.5 p.u.

## **Reti BT**

Generalmente le reti BT presentano il neutro direttamente a terra e questo contribuisce a contenere il rischio che si verifichino sovratensioni di questo tipo con ampiezza superiore a 1.2 p.u..

### **1.5.3 SOVRATENSIONI TRANSITORIE**

#### **Reti AT e AAT**

Le maggiori ampiezze si presentano alla richiusura rapida trifase di linee e all'apertura di piccole correnti induttive (strappamento di corrente).

#### **Reti MT**

Nella sintesi di seguito riportata le sovratensioni sono raggruppate in relazione alla durata del transitorio.

#### **Transitori di lunga durata ( $>100 \mu\text{s}$ )**

Queste sovratensioni sono principalmente originate da: operazioni di fusibili, manovre ,applicazione di guasto con e senza arco a terra, trasferimenti da AT a MT attraverso l'accoppiamento magnetico dei trasformatori.

#### **Transitori di media durata (da $>1\mu\text{s}$ a $\leq 100 \mu\text{s}$ )**

La loro origine e' principalmente dovuta a:

- induzione elettromagnetica di fulminazioni che cadono nelle vicinanze delle linee (la maggior parte) e fulminazioni dirette (piuttosto rare).
- operazioni di interruttori con propensione all'apertura per lo zero.

#### **Reti BT**

Nella sintesi di seguito riportata le sovratensioni sono raggruppate in relazione alla durata del transitorio.

#### **Transitori di lunga durata ( $>100 \mu\text{s}$ )**

Sono originati principalmente da:

- operazioni di fusibili limitatori

- manovre di banchi di condensatori
- trasferimenti da MT a BT attraverso l'accoppiamento magnetico dei trasformatori .

### **Transitori di media durata (da $>1\mu\text{s}$ a $\leq 100\mu\text{s}$ )**

La loro origine e' principalmente dovuta a:

- induzione elettromagnetica di fulminazioni che cadono nelle vicinanze delle linee BT
- fulminazioni dirette sui conduttori ovviamente fuori da ogni controllo
- accoppiamento resistivo che in presenza di correnti di fulminazioni in percorsi con resistenza di terra comune origina sovratensioni

### **Transitori di breve durata ( $< 1\mu\text{s}$ )**

La loro origine e' principalmente:

- apertura di piccole correnti induttive o di modeste lunghezze di conduttori nella rete BT
- apertura e chiusura in BT di contatti con "gap" in aria (rele', contattori) che danno delle successioni di aperture e riaccensioni.

## **1.6 VARIAZIONI DELLA FREQUENZA DI RETE**

Le variazioni di frequenza sono scostamenti della frequenza di alimentazione dalla frequenza nominale della rete e dipendono quasi sempre da eventi che riguardano essenzialmente il sistema di generazione e trasmissione.

Per la rete nazionale interconnessa alla rete europea, le variazioni di frequenza transitorie sono dovute principalmente a: distacco di grossi gruppi generatori, applicazione di guasti in AAT e AT, apertura di interconnessioni importanti e commutazione di grossi carichi. Queste variazioni transitorie sono compensate in tempi relativamente rapidi (qualche secondo) dalla regolazione dei motori primi dei gruppi generatori. Successivamente le potenze di scambio tra reti interconnesse vengono riequilibrate in tempi dell'ordine del minuto dalle centrali preposte alla regolazione secondaria frequenza-potenza. La regolazione frequenza-potenza provvede generalmente ad annullare il valor medio degli scarti di potenza trasferita tra reti interconnesse a seguito delle variazioni di frequenza.

## **1.7 COMPONENTI DI CORRENTE CONTINUA**

Sulla base dell'esperienza fino ad ora acquisita, componenti di tensione e corrente continua riscontrate nelle reti sono quasi sempre poco significative.



# CAPITOLO 2

## STUDIO SULLE ORIGINI E GLI EFFETTI DELLE INTERRUZIONI E DEI BUCI DI TENSIONE

### 2.1 INTRODUZIONE

Il presente capitolo si propone di evidenziare le cause principali di eventi quali le interruzioni ed i buchi di tensione che contribuiscono ad abbassare il livello di qualità della fornitura di energia elettrica.

In tale argomentazione si potranno quindi gettare le basi per lo studio dei diversi modi possibili al fine di limitare e in alcuni casi eliminare l'incidenza che questi fenomeni hanno sulle utenze della rete.

### 2.2 FENOMENOLOGIA

#### 2.2.1 DOCUMENTI NORMATIVI

##### 2.2.1.1 DEFINIZIONI [3],[4],[6]

**Buco di tensione[6]:** riduzione temporanea della tensione in un punto della rete elettrica sotto una determinata soglia. Se durante un buco la tensione scende sotto una soglia di interruzione, l'evento è considerato essere sia un buco che un'interruzione.

**Buco di tensione[3]:** riduzione improvvisa della tensione in un punto del sistema elettrico superiore ad una determinata soglia, seguita dal ritorno della tensione al valore nominale dopo un breve intervallo di tempo. Generalmente la soglia corrisponde al valore minimo della tensione nella banda di tolleranza. Un buco di tensione è un disturbo elettromagnetico bidimensionale, il cui livello è determinato dall'ampiezza della riduzione e dalla sua durata.

**Buco di tensione nella fornitura:** riduzione improvvisa della tensione di alimentazione ad un valore compreso tra il 90 e 1 % della tensione nominale, seguita dal ritorno al valore nominale dopo un breve periodo di tempo.

**“Voltage sag”**: variazione del valore r.m.s. di ampiezza tra il 10 e il 90 % del valore nominale e di durata compresa tra 0,5 cicli e un minuto.

**Tensione di riferimento di un buco di tensione**: valore specificato rispetto al quale l'ampiezza, la soglia ed altri valori vengono espressi in termini percentuali o p.u.. Come tensione di riferimento viene di solito usata la tensione nominale.

**Soglia di inizio di un buco di tensione**: valore r.m.s. di tensione in un sistema elettrico per definire l'inizio di un buco. Tipicamente per questa soglia è utilizzato un valore compreso fra 0,85 e 0,95 della tensione di riferimento.

**Soglia di fine di un buco di tensione**: valore r.m.s. di tensione in un sistema elettrico per definire la fine di un buco. Tipicamente per questa soglia è utilizzato il valore 0 o 0,01 della tensione di riferimento sopra la soglia di inizio.

**Tensione residua** (secondo le norme IEC 61000-2-8 draft): valore minimo della tensione r.m.s. registrata durante un buco o una breve interruzione. La tensione residua può essere espressa in volt o in percentuale del valore p.u. della tensione di riferimento.

**Tensione residua**: valore minimo della tensione r.m.s. registrata durante un buco o una breve interruzione. La tensione ritenuta può essere espressa in volt o in percentuale del valore p.u. della tensione dichiarata.

**Ampiezza di un buco di tensione**: differenza tra la tensione di riferimento e la tensione residua. L'ampiezza può essere espressa in volt o in percentuale del valore p.u. della tensione di riferimento.

**Durata di un buco di tensione**: tempo tra l'istante in cui la tensione in un punto della rete scende sotto la soglia d'inizio e l'istante in cui sale sopra la soglia di fine

**“Sliding reference voltage”**: valore della tensione r.m.s. in un punto della rete calcolata con continuità in uno specifico intervallo per rappresentare il valore della tensione immediatamente

precedente il buco, da usare come valore di riferimento. Lo specifico intervallo è molto più lungo della durata di un buco.

**Valore r.m.s.:** radice quadrata della media dei quadrati dei valori istantanei della quantità considerata su un determinato intervallo.

$U_{rms(1/2)}$  (secondo le norme IEC 61000-4-30 draft) : valore della tensione r.m.s. misurata su un ciclo e ricalcolata ogni mezzo ciclo.

**Interruzione breve:** condizione in cui la tensione ad un terminale della rete è inferiore all' 1 % della tensione nominale per una durata fino a tre minuti.

**Interruzione:** riduzione della tensione in un punto della rete sotto un valore di soglia.

**Soglia di interruzione:** valore di tensione r.m.s. in una rete di alimentazione specificato come frontiera sicché un buco in cui la tensione su tutte le fasi scende sotto di esso è classificato come breve interruzione.

### 2.2.1.2 VALORI CARATTERISTICI DEI BUCI DI TENSIONE.

#### Tensione r.m.s. funzione del tempo

La tensione r.m.s è ottenuta come media dei campioni di tensione su una finestra di una certa durata.

In forma matematica l'ampiezza della tensione r.m.s calcolata su un ciclo è:

$$V_{rms}(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^{i=k} v(i)^2}$$

ove N è il numero di campioni per ciclo e  $v(i)$  è la forma d'onda della tensione registrata.

#### Ampiezza e durata di un evento

Si definisce tensione residua come la minima tensione r.m.s. calcolata durante l'evento. Per determinare la durata di un evento sono state definite due soglie: soglia di inizio e soglia di fine di un buco di tensione. Il buco inizia quando la tensione diventa inferiore alla soglia di inizio e

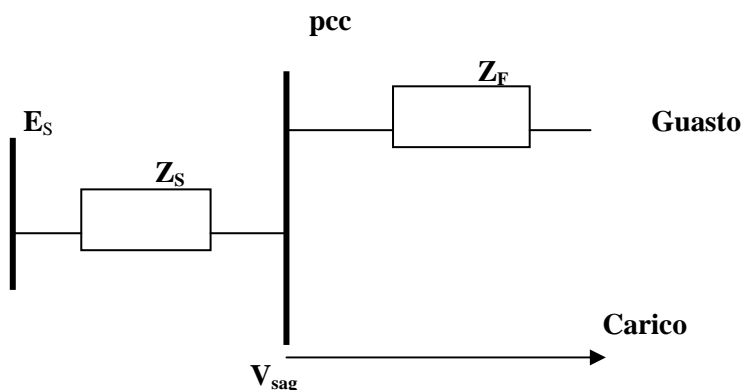
termina quando la tensione supera la soglia di fine. La durata dell'evento è la differenza tra i tempi di inizio e fine del buco.

## 2.3 BUCHI DI TENSIONE

### 2.3.1 CARATTERISTICHE DEI BUCHI DI TENSIONE [6]

I buchi di tensione provocano degli effetti sui macchinari meno gravi rispetto a quelli causati dalle interruzioni della tensione, però il loro numero può essere in un anno molte volte superiore. Per tener conto dell'andamento piuttosto irregolare della tensione durante il guasto, l'ampiezza del buco di tensione è definita come la radice della media quadratica dei valori di tensione dopo che si è verificato il buco di tensione, cioè come la radice della media dei quadrati della tensione residua durante il guasto

Per stimare l'ampiezza di un buco di tensione in un sistema radiale in seguito ad un guasto trifase si può utilizzare il modello semplificato mostrato in figura 1.



Nello schema che verrà successivamente utilizzato nell'elaborazione, sono evidenziate le varie componenti che concorrono alla simulazione, in particolare si notano:

- Il punto di comune accoppiamento (pcc) tra il feeder guasto e il carico soggetto al conseguente abbassamento di tensione;
- L'impedenza equivalente di sistema ( $Z_S$ );
- L'impedenza di guasto ( $Z_F$ ).

L'analisi intuitiva del circuito ci permette di osservare che la caduta di tensione si propaga essenzialmente dai livelli a tensione maggiore verso quelli inferiori, e che la corrente nel carico

prima e durante il guasto viene trascurata; pertanto le due impedenze  $Z_F$  e  $Z_S$  sono attraversate dalla stessa corrente di guasto e la tensione nel PCC è data da[3]:

$$\bar{V}_{sag} = \frac{\bar{Z}_F}{\bar{Z}_F + \bar{Z}_S} \text{ p.u.}$$

L'ampiezza del buco è il valore assoluto del fasore  $\bar{V}_{sag}$  nell'equazione appena enunciata.

Il buco è quindi più profondo se il guasto è elettricamente vicino al carico o quando il livello di guasto è piccolo (grande  $Z_S$ ).

Generalizzando il discorso si può concludere che guasti in rete causano buchi di tensione profondi se si verificano vicino ai carichi, poco profondi invece se si verificano in punti distanti, mentre l'ampiezza dei buchi dovuti a guasti sulla rete di trasmissione è molto variabile.

I buchi di tensione sono dunque caratterizzati dalla durata, la cui misura pone alcuni problemi poiché non vi è un cambiamento brusco della tensione, ma un passaggio graduale; è pertanto necessario definire una soglia oltre la quale misurare la durata del buco.

I buchi di tensione si possono raggruppare in base alla loro origine, qualora si disegni un diagramma dell'ampiezza dei buchi in relazione alla durata (asse x: durata in secondi; asse y: tensione in p.u.).

È stato proposto a livello internazionale di raggruppare i buchi di tensione in 5 classi[3]:

- Classe Y : ampiezza fra l'80 e il 90 %, durata fra 20 ms e 3 s
- Classe X : ampiezza fra il 40 e l'80 %, durata fra 20 ms e 150 ms
- Classe S : ampiezza fra il 40 e l'80 %, durata fra 150 ms e 600 ms
- Classe T : ampiezza fra 0 e il 40 %, durata fra 20 ms e 600 ms
- Classe Z : ampiezza fra 0 e il 80 %, durata fra 600 ms e 3 s

Il numero di eventi per anno è ottenuto per ognuna delle 5 classi. Le 5 classi sono mostrate nella figura seguente(2),[3]:

Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

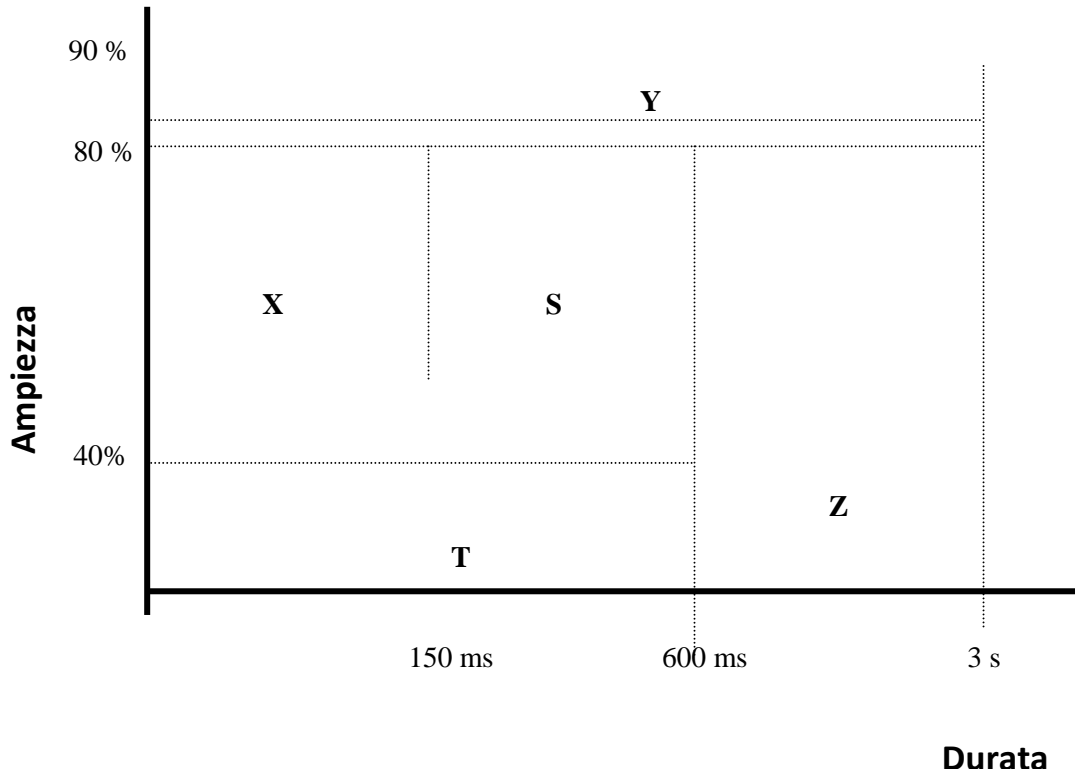


Fig. 2 : raggruppamenti dei buchi di tensione a seconda dell'ampiezza e della durata secondo la classificazione internazionale.

La figura successiva mostra le probabili cause dei buchi in base all'ampiezza e alla durata degli stessi(fig. 3)[3].

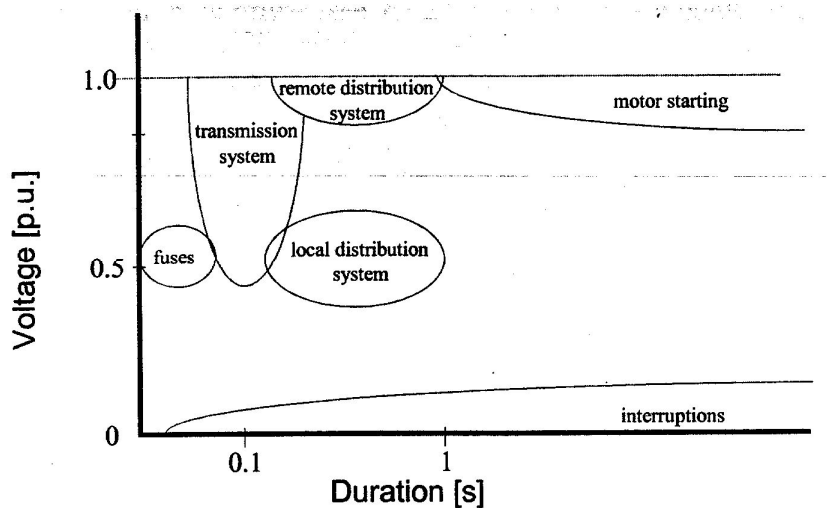


Fig. 3 : Probabili cause di buco di tensione a seconda della loro ampiezza e della durata dell'evento.

### **2.3.2 PROPAGAZIONE DEI BUCHI DI TENSIONE NELLE RETI DI TRASMISSIONE E DISTRIBUZIONE**

La conoscenza delle modalità di propagazione dei buchi di tensione nella rete è necessaria per poter valutare il numero atteso di eventi nei nodi della rete.

La propagazione dei buchi all'interno dello stesso livello di tensione è governato principalmente dall'impedenza fra due nodi della rete alla frequenza di lavoro. In generale i buchi si propagano senza attenuazione nel verso del flusso della corrente, mentre si propagano nella direzione inversa con una grande attenuazione.

#### **2.3.2.1 PROPAGAZIONE IN RETI DI TRASMISSIONE AAT/AT**

All'interno dello stesso livello di tensione i buchi si propagano dalla sbarra sede di guasto ad una differente sbarra monitorata, anche distante centinaia di chilometri, con una attenuazione proporzionale al rapporto tra l'impedenza della sbarra sede di guasto e l'impedenza di trasferimento della sbarra monitorata.

#### **2.3.2.2 PROPAGAZIONE IN RETI MT**

Un guasto che avviene su un "feeder" MT causa lo scatto di numerosi dispositivi di protezione. Gli utenti serviti dalla sbarra guasta subiscono, al minimo, una breve interruzione, mentre gli utenti alimentati dagli altri "feeders" saranno soggetti ad uno o più buchi di tensione in funzione della natura del guasto.

#### **2.3.2.3 PROPAGAZIONE ATTRAVERSO TRASFORMATORI**

La forma di un buco di tensione ai capi del secondario dipende dal collegamento del trasformatore e dalla natura del guasto sul primario.

La propagazione di buchi di tensione dalla Media all'Alta tensione è apprezzabile, come già ribadito prima, solo quando la potenza di corto circuito dell'alta tensione è molto bassa.

### 2.3.3 CLASSIFICAZIONE DEI BUCHI DI TENSIONE[3]

Il carico è spesso collegato ad un livello di tensione inferiore a quella del punto del guasto, pertanto il collegamento degli avvolgimenti del trasformatore tra il PCC e i carichi influenza la forma del buco come vista al carico.

La classificazione riportata è derivata assumendo le seguenti convenzioni:

- Condizioni stazionarie che consentono l'analisi mediante i fasori;
- Le componenti di sequenza 0 della tensione non si propagano ai terminali dei carichi;
- Si trascura la corrente nel carico prima, durante e dopo il guasto;
- L'impedenza  $Z_S$  è uguale per le sequenze positiva e negativa;
- I guasti sono monofasi, trifasi e bifase non a terra;

La classificazione risultante quindi individua 4 tipi di buchi, indicati con le lettere da A a D, e può essere così riepilogata:

- Tipo A. E' dovuto ad un guasto trifase: l'ampiezza della tensione decresce ugualmente su tutte le fasi e non vi sono sfasamenti.
- Tipo B. Diminuisce la tensione di una sola fase, mentre le altre due rimangono invariate.
- Tipo C. Questo è il buco che viene sentito da un carico connesso a stella in seguito ad un guasto bifase senza trasformatori tra questi due punti: la tensione su una fase rimane invariata, mentre i fasori delle altre due tensioni si muovono uno verso l'altro.
- Tipo D. Questo buco è caratteristico di un carico collegato a triangolo affetto da un guasto bifase. Tutte le tensioni di fase variano rispetto a quelle che si hanno prima del guasto.

### 2.4 FENOMENI CHE DANNO ORIGINE A BUCHI DI TENSIONE

La principale causa dei buchi di tensione in una rete è rappresentata dai guasti ed in qualche caso dai sovraccarichi transitori dovuti allo spunto di grossi motori o inserzione di grossi carichi.

Le cause di guasto per una rete MT possono essere principalmente ricondotte a due grosse categorie:



- Cause esterne dovute ad eventi naturali o accidentali;
- Cause interne dovute a guasti interni ai componenti della rete o a manovre intempestive nell'impianto.

I guasti possono essere classificati a loro volta in base al numero di fasi coinvolte e al tempo di permanenza del circuito:

- monofasi
- polifasi
- autoestinguenti (estinzione spontanea prima dell'intervento delle protezioni)
- transitori (0,3 secondi)
- semipermanenti (30-180 secondi)
- permanenti

I buchi di tensione si propagano senza attenuazioni dai livelli superiori a quelli inferiori di tensione soprattutto quando vi sono i trasformatori abbassatori con lo stesso collegamento sul primario e sul secondario.

Come già detto il disturbo viene in parte veicolato dalla rete ed in parte prodotto dall'ambiente industriale ed il disturbo complessivo è dato dalla somma dei due contributi.

Nel caso dei buchi generati dall'impianto industriale questi sono principalmente dovuti a partenze di motori alimentati direttamente a 50 Hz oppure dall'energizzazione dei trasformatori o grossi banchi di condensatori.

Anche se la maggior parte dei buchi di tensione ha origine sulla rete di distribuzione, una sensibile percentuale di questi dipende anche dal sistema di trasmissione e dagli utenti, in questi casi un guasto sulla rete AT produce un buco di tensione avvertibile su tutta la rete alimentata dalle sbarre.

#### **2.4.1 MISURAZIONE STATISTICA DEI BUCHI DI TENSIONE.**

Le tabelle esposte qui sotto sono il risultato di alcuni di questi studi statistici e risulteranno di particolare interesse durante lo svolgimento dell'elaborato, in quanto permetteranno di valutare la fattibilità di un sistema atto a compensare i disturbi dovuti a questi fenomeni (fonte CESI).

- La tabella 1 mostra il numero massimo di eventi registrato in corrispondenza di ogni coppia durata – ampiezza;
- La tabella 2 riporta la media del numero di eventi per ogni cella;

Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

- La tabella 3 mostra il numero massimo di eventi in ogni cella dopo aver scartato i 5 % valori più alti registrati per quella cella, cioè il numero di eventi che ha il 95 % di probabilità di non essere superato. In calce alla tabella è dato numero di eventi totali in tutti i siti che probabilisticamente non viene superato nel 95 % dei casi.

Le tabelle 4, 5 e 6 presentano gli analoghi valori per reti miste.

Tensione residua (% della tensione di riferimento)	Durata (secondi)					
	$0.01 < \Delta t \leq 0.1$	$0.1 < \Delta t \leq 0.5$	$0.5 < \Delta t \leq 1$	$1 < \Delta t \leq 3$	$3 < \Delta t \leq 20$	$20 < \Delta t \leq 60$
$90 > u \geq 70$	63	38	8	1	1	0
$70 > u \geq 40$	8	29	4	0	0	0
$40 > u \geq 0$	6	17	1	3	0	0
$u = 0$ (interruzioni)	1	1	2	1	1	10

Massimo numero di eventi per sito: 124

Tabella 1 Rete con cavi sotterranei : incidenza dei buchi di tensione , numero massimo per anno

Tensione residua (% della tensione di riferimento)	Durata (secondi)					
	$0.01 < \Delta t \leq 0.1$	$0.1 < \Delta t \leq 0.5$	$0.5 < \Delta t \leq 1$	$1 < \Delta t \leq 3$	$3 < \Delta t \leq 20$	$20 < \Delta t \leq 60$
$90 > u \geq 70$	13.4	9.5	0.4	0.2	0.1	0
$70 > u \geq 40$	1.5	5.9	0.3	0	0	0
$40 > u \geq 0$	0.1	1.8	0.2	0.2	0	0
$u = 0$ (interruzioni)	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.7

Massimo numero di eventi per sito: 35

Tabella 2 Rete con cavi sotterranei: incidenza dei buchi di tensione, numero medio per anno

Tensione residua (% della tensione di riferimento)	Durata (secondi)					
	$0.01 < \Delta t \leq 0.1$	$0.1 < \Delta t \leq 0.5$	$0.5 < \Delta t \leq 1$	$1 < \Delta t \leq 3$	$3 < \Delta t \leq 20$	$20 < \Delta t \leq 60$
$90 > u \geq 70$	23	19	3	1	0	0
$70 > u \geq 40$	5	19	1	0	0	0
$40 > u \geq 0$	1	8	1	0	0	0
$u = 0$ (interruzioni)	0	0	1	0	1	1

Massimo numero di eventi per sito: 63

Tabella 3 Rete con cavi sotterranei: incidenza dei buchi di tensione, numero corrispondente al valore per anno con probabilità di non essere superato nel 95 % dei casi

**Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione**

Tensione residua (% della tensione di riferimento)	Durata (secondi)					
	$0.01 < \Delta t \leq 0.1$	$0.1 < \Delta t \leq 0.5$	$0.5 < \Delta t \leq 1$	$1 < \Delta t \leq 3$	$3 < \Delta t \leq 20$	$20 < \Delta t \leq 60$
$90 > u \geq 70$	111	99	20	8	3	1
$70 > u \geq 40$	50	59	14	3	1	0
$40 > u \geq 0$	5	26	11	4	1	1
$u = 0$ (interruzioni)	5	25	104	10	15	24

**Massimo numero di eventi per sito: 306**

Tabella 4 Rete mista: incidenza dei buchi di tensione , numero massimo per anno

Tensione residua (% della tensione di riferimento)	Durata (secondi)					
	$0.01 < \Delta t \leq 0.1$	$0.1 < \Delta t \leq 0.5$	$0.5 < \Delta t \leq 1$	$1 < \Delta t \leq 3$	$3 < \Delta t \leq 20$	$20 < \Delta t \leq 60$
$90 > u \geq 70$	26.8	27.6	3.4	1.2	0.3	0.02
$70 > u \geq 40$	3.1	15.1	1.3	0.4	0.02	0
$40 > u \geq 0$	0.4	6.5	1	0.4	0.1	0.02
$u = 0$ (interruzioni)	0.3	3.5	7.4	1.2	1.1	2.1

**Massimo numero di eventi per sito: 103**

Tabella 5 Rete mista: incidenza dei buchi di tensione , numero medio per anno

Tensione residua (% della tensione di riferimento)	Durata (secondi)					
	$0.01 < \Delta t \leq 0.1$	$0.1 < \Delta t \leq 0.5$	$0.5 < \Delta t \leq 1$	$1 < \Delta t \leq 3$	$3 < \Delta t \leq 20$	$20 < \Delta t \leq 60$
$90 > u \geq 70$	61	68	12	6	1	0
$70 > u \geq 40$	8	38	4	1	0	0
$40 > u \geq 0$	2	20	4	2	1	0
$u = 0$ (interruzioni)	0	18	26	5	4	9

**Massimo numero di eventi per sito: 256**

Tabella 6 Rete mista: incidenza dei buchi di tensione, numero corrispondente al valore per anno con probabilità di non essere superato nel 95 % dei casi

Le tabelle 7 e 8 [3] presentano i risultati per le reti MT con cavi sotterranei.

Le tabelle 9,10 e 11 [3] presentano i risultati per le reti MT con cavi aerei, 12 con cavi interrati.

**Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione**

Tensione residua (% della tensione di riferimento)	Durata (secondi)						
	$0.02 < \Delta t \leq 0.1$	$0.1 < \Delta t \leq 0.5$	$0.5 < \Delta t \leq 1$	$1 < \Delta t \leq 3$	$3 < \Delta t \leq 20$	$20 < \Delta t \leq 60$	$60 < \Delta t \leq 180$
$90 > u \geq 85$	105	34	8	20	43	11	10
$85 > u \geq 70$	64	54	28	2	0	0	0
$70 > u \geq 40$	65	126	9	2	0	0	0
$40 > u \geq 1$	26	53	3	1	0	0	0
$1 > u \geq 0$ (interruzioni)	0	9	5	6	3	1	2

Tabella 7 Rete MT con cavi sotterranei: incidenza dei buchi di tensione, numero massimo per anno

Tensione residua (% della tensione di riferimento)	Durata (secondi)						
	$0.02 < \Delta t \leq 0.1$	$0.1 < \Delta t \leq 0.5$	$0.5 < \Delta t \leq 1$	$1 < \Delta t \leq 3$	$3 < \Delta t \leq 20$	$20 < \Delta t \leq 60$	$60 < \Delta t \leq 180$
$90 > u \geq 85$	37,4	12,1	1,8	1,9	4,2	1,2	1,1
$85 > u \geq 70$	24,0	20,4	4,4	0,5	0	0	0
$70 > u \geq 40$	14,2	19,7	2,1	0,2	0	0	0
$40 > u \geq 1$	5,6	12,5	0,8	0,1	0	0	0
$1 > u \geq 0$ (interruzioni)	0	0,8	0,7	0,6	0,7	0,2	0,5

Tabella 8 Rete MT con cavi sotterranei: incidenza dei buchi di tensione, numero medio per anno

Tensione residua (% della tensione di riferimento)	Durata (secondi)						
	$0.02 < \Delta t \leq 0.1$	$0.1 < \Delta t \leq 0.5$	$0.5 < \Delta t \leq 1$	$1 < \Delta t \leq 3$	$3 < \Delta t \leq 20$	$20 < \Delta t \leq 60$	$60 < \Delta t \leq 180$
$90 > u \geq 85$	541	61	24	25	53	51	10
$85 > u \geq 70$	1532	203	136	20	7	1	1
$70 > u \geq 40$	1146	225	38	26	8	1	1
$40 > u \geq 1$	97	424	31	28	5	1	3
$1 > u \geq 0$ (interruzioni)	2	20	7	27	27	6	10

Tabella 9 Rete MT aerea: incidenza dei buchi di tensione, numero massimo per anno

**Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione**

Tensione residua (% della tensione di riferimento)	Durata (secondi)						
	$0.02 < \Delta t \leq 0.1$	$0.1 < \Delta t \leq 0.5$	$0.5 < \Delta t \leq 1$	$1 < \Delta t \leq 3$	$3 < \Delta t \leq 20$	$20 < \Delta t \leq 60$	$60 < \Delta t \leq 180$
$90 > u \geq 85$	47,1	11,7	2,3	1,2	1,5	1,1	0,2
$85 > u \geq 70$	63,9	28,1	5,3	1,0	0,2	0	0
$70 > u \geq 40$	36,5	31,9	3,6	1,1	0,2	0	0
$40 > u \geq 1$	10,4	24,2	2,5	0,8	0,2	0	0
$1 > u \geq 0$ (interruzioni)	0	0,8	0,3	1,1	1,4	0,4	0,6

Tabella 10 Rete MT aerea: incidenza dei buchi di tensione, numero medio per anno

Tensione residua (% della tensione di riferimento)	Durata (secondi)						
	$0.02 < \Delta t \leq 0.1$	$0.1 < \Delta t \leq 0.5$	$0.5 < \Delta t \leq 1$	$1 < \Delta t \leq 3$	$3 < \Delta t \leq 20$	$20 < \Delta t \leq 60$	$60 < \Delta t \leq 180$
$90 > u \geq 85$	150	37	9	6	3	2	1
$85 > u \geq 70$	238	93	14	5	1	0	0
$70 > u \geq 40$	141	128	15	5	1	0	0
$40 > u \geq 1$	55	113	12	4	1	0	0
$1 > u \geq 0$ (interruzioni)	0	4	1	6	7	2	3

Tabella 11 Rete MT aerea: incidenza dei buchi di tensione, numero corrispondente al valore per anno con probabilità del 95 % di non essere superato

Tensione residua (% della tensione di riferimento)	Durata (secondi)							
	$0.02 \leq \Delta t < 0.1$	$0.1 \leq \Delta t < 0.25$	$0.25 \leq \Delta t < 0.5$	$0.5 \leq \Delta t < 0.75$	$0.75 \leq \Delta t < 1$	$1 \leq \Delta t < 3$	$3 \leq \Delta t < 20$	$20 \leq \Delta t < 180$
$90 > u \geq 85$	1,67	0,33	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
$85 > u \geq 70$	3,67	3,33	0,67	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
$70 > u \geq 40$	0,67	2,67	0,33	1,33	0,00	1,33	0,00	0,00
$40 > u \geq 10$	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$10 > u \geq 0$ (interruzioni)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabella 12 Rete MT con cavi sotterranei: incidenza dei buchi di tensione, numero massimo per anno

## Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

Tensione residua (% della tensione riferimento)	Durata (secondi)							
	0.02 ≤ Δt	0.1 ≤ Δt	0.25 ≤ Δt	0.5 ≤ Δt	0.75 ≤ Δt	1 ≤ Δt	3 ≤ Δt	20 ≤ Δt
	< 0.1	< 0.25	< 0.5	< 0.75	< 1	< 3	< 20	< 180
90 > u ≥ 85	1,17	0,17	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00
85 > u ≥ 70	3,67	2,50	0,50	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
70 > u ≥ 40	0,33	1,33	0,17	1,00	0,00	0,67	0,00	0,00
40 > u ≥ 10	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10 > u ≥ 0 (interruzioni)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabella 13 Rete MT con cavi sotterranei: incidenza dei buchi di tensione, numero medio per anno

### 2.5 RELAZIONI TRA DISTURBI E CARATTERISTICHE DI RETE

Le interazioni fra disturbi e rete elettrica sono influenzate dalle diverse caratteristiche della rete stessa.

In ogni caso ogni azione comporta una serie di conseguenze da valutare con attenzione per evitare il peggioramento globale della qualità quando si considerino tutti gli elementi che la definiscono.

Per quanto riguarda la struttura, per ridurre il numero o le conseguenze dei buchi di tensione, la più idonea è caratterizzata da:

- Ridotta lunghezza media delle linee MT;
- Ridotto numero di linee alimentate da ciascuna cabina primaria;
- Esercizio a sbarre separate;
- Opportuna scelta delle linee attestate sulla stessa semisbarra di cabina primaria;
- Riduzione del numero dei componenti isolanti;
- Elevata potenza di cortocircuito.

I primi due punti implicano la realizzazione di un elevato numero di cabine primarie.

Quanto previsto nel terzo punto è applicato quasi ovunque.

Il quinto punto comporta la necessità di avere il minor numero possibile di isolamento.

Il sesto permette di ridurre la profondità dei buchi di tensione a spese però di pesanti sollecitazioni dei componenti ed in particolare degli interruttori.

## **2.6 INTERRUZIONI DI TENSIONE**

Le interruzioni di tensione possono essere brevi (durata inferiore a 3 minuti) o lunghe (durata superiore a 3 minuti).

In condizioni normali di esercizio il numero annuale di brevi interruzioni della tensione fornita può variare da qualche decina a parecchie centinaia. La durata di circa il 70 % delle brevi interruzioni è inferiore al secondo, mentre le interruzioni lunghe accidentali sono di solito originate da cause esterne o da eventi che non possono essere previsti dal fornitore, ed è per questo che non è possibile indicare i valori tipici per la frequenza annuale e per la durata delle lunghe interruzioni. Ciò detto però si verifica che in condizioni normali la frequenza annuale di tali interruzioni può variare da meno di dieci a un massimo di 50 eventi, a seconda delle zone considerate.

L'effetto delle variazioni di tensione si fa sentire principalmente nei seguenti soggetti industriali:

- motori asincroni alimentati direttamente alla frequenza di rete;
- calcolatori, PLC, processori;
- sistemi di controllo;
- azionamenti elettrici;
- illuminazione con lampade a scarica;
- apparecchiature elettroniche in generale;
- relè di protezione e controllo.

### **2.6.1 FENOMENI CHE DANNO ORIGINE A INTERRUZIONI DELLA TENSIONE**

Brevi interruzioni della tensione sono provocate da interventi dei dispositivi di protezione associati con una richiusura automatica in seguito a guasti sulle linee.

La principale causa delle interruzioni della fornitura di energia elettrica è la perdita dell'isolamento dei dispositivi dei sistemi di potenza e dei cavi elettrici.

Nella maggior parte dei casi l'effetto del guasto consiste nel provocare una corrente di corto circuito che deve essere eliminata sconnettendo dal sistema il componente difettoso.

Le cause di guasto possono essere classificate in due categorie: esterne o interne. Nel primo caso le cause del guasto sono naturali o accidentali e sono indipendenti dall'impianto di generazione

della potenza; nel secondo caso l'origine del guasto è interno al sistema, per esempio l'avaria di un componente.

Tra le cause esterne si possono menzionare:

- condizioni climatiche
- cause varie ed accidentali : contatti, collisioni.

Le cause interne di guasti sono principalmente dovute alla perdita dell'isolamento di linee, cavi, trasformatori. Altre cause sono imputabili a malfunzionamenti delle protezioni o a errori umani.

Un altro tipo di classificazione, analogamente a quanto espresso per i buchi di tensione, può essere quello che discrimina il fenomeno delle interruzioni in base alla durata, ossia un guasto si dice transitorio quando la parte di rete che ne è affetta viene isolata per un breve periodo dopo del quale è rienergizzata e recuperata alla normale operatività. Al contrario se si verifica un guasto ed è necessario riparare o sostituire dei componenti prima di ridare tensione, il guasto si dice permanente.

Guasti autoestinguenti possono aver luogo sulle linee AT e MT. Tali guasti scompaiono dopo pochi istanti al massimo.

Un guasto può essere del tipo indicato in seguito:

- monofase : fase - terra (o – neutro),
- bifase : fase – fase, con o senza collegamento a terra,
- trifase : fra le tre fasi con o senza collegamento a terra.

Una distinzione è spesso fatta tra guasti monofasi e polifasi (comprendendo questi ultimi i guasti bi- e trifase).

## **2.7 PROCEDURE PER LA STIMA DEL NUMERO DI BUCHI DI TENSIONE**

Il sistema di trasporto dell'energia elettrica è composto da trasmissione e distribuzione; le principali differenze tra i due sistemi sono la tensione di lavoro e l'interconnessione, infatti, la trasmissione è un sistema interconnesso di linee ad alta tensione che terminano a sottostazioni; la maggior parte delle sbarre delle sottostazioni è pertanto alimentato da più linee che si congiungono da differenti nodi di potenza e quindi il grado di affidabilità è alto poiché la stessa può essere mantenuta ad una sbarra anche in caso di perdita di una linea o di un generatore.



La distribuzione è invece un sistema radiale, predisposto per alimentare le diverse zone di utilizzo, che scala la tensione dalla trasmissione mediante un trasformatore.

Un buco di tensione risulta spesso dal passaggio di una corrente di guasto attraverso l'impedenza del sistema di potenza al punto di guasto. Pertanto si verificano buchi per guasti sia nel sistema di trasmissione che di distribuzione. In dipendenza dal sistema in cui si verifica un guasto, questi può influenzare un numero grande o relativamente piccolo di utenti.

Per quanto riguarda i fenomeni nelle linee di trasmissione, quanto più lontano è il punto di guasto dal punto in esame, tanto meno severo sarà il valore dell'ampiezza del buco di tensione.

Un guasto nel sistema radiale di distribuzione si comporta in modo differente; a causa dell'impedenza del trasformatore e della configurazione radiale la maggior parte dei guasti influenza solo gli utenti a valle del trasformatore. Questo include tutti gli utenti sugli altri circuiti alimentati dal trasformatore.

Gli utenti sul circuito guasto, su una linea munita di dispositivi di protezione, vedranno un buco seguito da un'interruzione permanente o temporanea della tensione.

I dati relativi ai buchi di tensione, necessari per valutare la compatibilità, possono essere dedotti da misure storiche o da procedure di previsione.

E' è possibile utilizzare procedure differenti, che utilizzano programmi di calcolo:

I dati necessari per condurre tale studio sono:

- struttura della rete,
- caratteristiche fisiche dei componenti della rete
- tassi di guasto delle linee e delle stazioni.

## **2.8 STIMA DEL NUMERO ATTESO DI INTERRUZIONI DELLA TENSIONE**

La valutazione del numero di interruzioni attese in un punto della rete viene effettuata considerando che le interruzioni possono essere dovute o ad una mancanza di alimentazione della sbarra cui il nodo in esame è collegato o ad una interruzione fra la sbarra ed il nodo.

Per quanto riguarda la mancata alimentazione della sbarra si valutano tutte le possibilità di alimentare la stazione da parte delle stazioni ad essa collegate.

A partire quindi dalla conoscenza dei dati statistici relativi ai guasti dei componenti della rete si calcola la probabilità che la stazione in esame non venga alimentata da nessuna delle stazioni adiacenti per un tempo superiore al secondo.

## 2.9 EFFETTI DI BUCHI ED INTERRUZIONI DI TENSIONE SULLE APPARECCHIATURE

I buchi di tensione e le interruzioni brevi possono comportare interventi intempestivi dei relè di minima tensione, dei contattori, irregolarità nel funzionamento dei motori, malfunzionamenti di apparati elettronici digitali, spegnimento di lampade a scarica con ritardo di riaccensione.

Le conseguenze dei buchi di tensione e delle interruzioni brevi sono molto variabili, a seconda della tipologia degli impianti elettrici e delle singole apparecchiature, nonché del processo produttivo ed in particolare del grado di integrazione dell'automazione.

I vari tipi di impianti maggiormente interessati da questi fenomeni possono essere:

- impianti di illuminazione con lampade a scarica.
- motori asincroni dove si produce un momentaneo rallentamento.
- motori sincroni.
- contattori, che con la loro ricaduta spesso provocano un arresto intempestivo del motore.
- sistemi elettronici di controllo ed elaborazione, questi sono i carichi più sensibili alle interruzioni brevi che, in assenza di opportune precauzioni, provocano arresti di funzionamento con necessità di rielaborazione o ricostruzione delle informazioni perdute

## 2.10 DESENSIBILIZZAZIONE DI APPARECCHI E PROCESSI

Per limitare i buchi di tensione e le interruzioni si possono utilizzare vari metodi tra i quali distinguiamo:

per la rete di alimentazione

- aumento della potenza di corto circuito;
- riduzione della lunghezza delle linee aeree;

per la rete interna all'utente

- introduzione di adeguato coordinamento fra le protezioni d'impianto con la rete di alimentazione al fine di minimizzare i tempi di eliminazione dei guasti;
- riduzione delle cadute di tensione dovute ad avviamenti di grossi carichi mediante alimentazioni privilegiate;
- **interporre fra rete e carico un gruppo di continuità o utilizzare dei sistemi di tipo innovativo, come quelli ricercati in questa tesi, basati sull'elettronica di potenza che**

**migliorino la qualità dell'alimentazione e riducano la probabilità di malfunzionamento delle reti.**

In una installazione industriale sono presenti, contemporaneamente, macchine e sistemi di comando, controllo e regolazione.

Per rendere insensibili i sistemi di comando ai disturbi condotti occorre alimentarli con adeguati gruppi di continuità.

Nei casi in cui l'inerzia del processo sia insufficiente a mantenere i macchinari in funzione per un tempo sufficiente alla rialimentazione, le possibili soluzioni di desensibilizzazione sono:

- l'alimentazione delle apparecchiature per mezzo di un sistema di continuità rotante con accumulatore inerziale capace di sostenere il carico per interruzioni fino a 1 s.

I dispositivi di emergenza per alimentare i sistemi di comando durante i buchi o le interruzioni si basano sull'accumulo di energia; possono essere di vario tipo:

- gruppo rotante con volano.
- Alimentatori di potenza senza interruzioni UPS (Uninterruptible Power Supply). Si presentano con varie tipologie costruttive fra le quali possiamo distinguere le seguenti:

- i sistemi off-line ;

si presentano come sistemi a doppia conversione che funzionano con by-pass normalmente chiuso. L'apertura dell'interruttore avviene in caso di assenza di tensione della rete: in questo caso il carico deve essere in grado di sopportare una breve interruzione.

- i sistemi a singola conversione;

la configurazione a singola conversione è rappresentata da un sistema DC-AC singolo che alimenta la batteria in presenza della piena tensione di rete, mentre assorbe energia dalla batteria per alimentare il carico durante un buco di tensione.

- i sistemi a doppia conversione .

I sistemi a doppia conversione presentano una cascata di conversione CA/CC e CC/CA con un sistema di accumulo elettrochimico che in presenza di un buco di tensione alimenta l'inverter (conversione CC/CA) e sostiene la rete per il tempo necessario al ripristino delle

condizioni nominali della rete, mentre durante il funzionamento normale rimane in tampone alla rete ricaricandosi. Questa configurazione si presta a funzionare con molteplici modalità.

La soluzione ad UPS(fig. 4) tradizionale presenta però alcuni inconvenienti:

- si ha assorbimento di corrente distorta dalla rete;
- perdite elevate associate agli stadi di conversione;
- problemi di selettività per guasti o sovraccarichi a valle dell'UPS in quanto varia la caratteristica del generatore equivalente a seconda che si alimenti il carico tramite UPS o rete.

Per far fronte a questi problemi e garantire una maggiore funzionalità ed efficienza ai sistemi di sostentamento della rete sono stati progettati e sviluppati sistemi innovativi.



Fig. 4 : Schema di principio di un UPS collegato a un carico sensibile, il sistema è composto anche da un ATS in grado di commutare l'alimentazione del carico da rete a gruppo elettrogeno, durante l'avvio del generatore l'UPS ha il compito di sostenere il carico senza variazioni di tensione eccessiva (>95%).

## 2.11 MESSA A TERRA DEL NEUTRO MEDIANTE BOBINE DI PETERSEN

La messa a terra del neutro della rete MT mediante bobine di Petersen(fig. 5) permette di contrastare la corrente capacitiva circolante nel punto di guasto introducendo una componente induttiva capace di limitare i disagi dovuti alle brevi interruzioni.

La riduzione della corrente di guasto comporta:

- l'aumento della probabilità che il guasto si autoestingua prima dell'apertura dell'interruttore di linea MT, con conseguente riduzione del numero di interruzioni per i clienti,
- diminuzione della probabilità di riaccensione dei guasti.

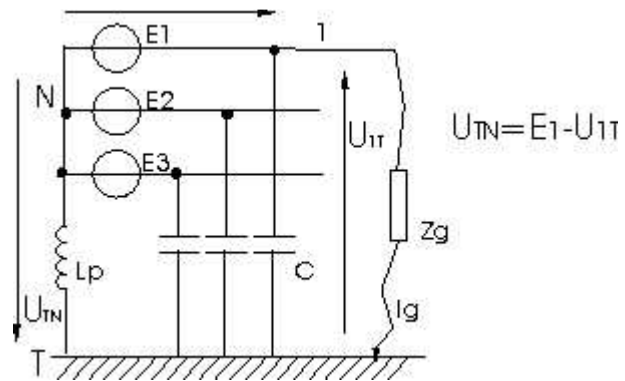


Fig.5 : Inserzione di una bobina di Petersen al centro stella del generatore.

# CAPITOLO 3

## DISPOSITIVI DVR PER LA COMPENSAZIONE STATICA DEI DISTURBI DI RETE

### 3.1 CONSIDERAZIONI PRELIMINARI[15],[17]

Il presente capitolo si propone di spiegare e sviluppare modelli mono e trifase di dispositivi per la compensazione di potenza. Questi dispositivi saranno principalmente rivolti alla risoluzione dei problemi presentati dai buchi di tensione parziali in reti di media tensione, in particolare si analizzeranno i sistemi DVR[4],[5] (Dynamic Voltage Restorer)(5).

Come già accennato nei capitoli 1 e 2, tra problemi di power quality quelli relativi agli abbassamenti di tensione devono considerarsi fra i disturbi più gravi. Per superare questi problema negli anni si è introdotto il concetto di dispositivi di alimentazione statici per la compensazione della tensione di rete. Uno di questi dispositivi è il Restauratore di tensione dinamica (DVR), che è il più efficiente ed efficace dispositivo moderna concezione utilizzato nelle reti di distribuzione elettrica.

Il DVR inietta tensione nel sistema al fine di regolare la tensione al lato del carico. È normalmente installato in un sistema di distribuzione tra i morsetti del carico critico da proteggere e il punto di accoppiamento comune (PCC).

I DVR di recente concezione possono in oltre effettuare anche diverse funzioni di compensazione dei disturbi armonici, e di limitazione dei transitori delle correnti di guasto.

L'inserzione in rete di un DVR(fig. 6) è di tipo serie tramite trasformatore che, in caso di buchi di tensione sulla rete a monte, introduce, indipendentemente sulle tre fasi, una tensione che si aggiunge a quella a monte preesistente, riportandone il valore a valle entro un intervallo prefissato in pochi millisecondi. La regolazione è di tipo continuo e le possibili strutture di controllo per il dispositivo sono riportate nei paragrafi successivi.

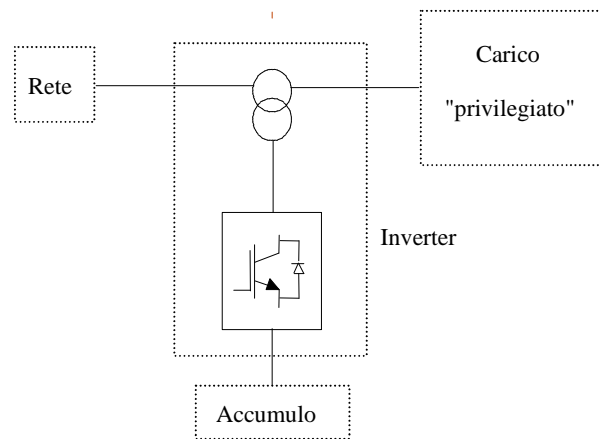


FIG. 6 . Schema di principio di un sistema DVR

L'accumulo, in genere, è di entità medio-bassa ed è basato su batterie di condensatori o chimiche con tempi di compensazione variabili tra le poche centinaia di millisecondi ed il secondo. Normalmente i dimensionamenti sono relativi alla compensazione di buchi di tensione con profondità massima dell'ordine del 50% della nominale[18].

L'energia quindi richiesta nella fase di compensazione viene prelevata dal condensatore lato continua, il cui dimensionamento è dipendente dalla durata e profondità del buco di tensione massimo che si vuole compensare.

Per quanto riguarda l'analisi dell'alimentazione dell'accumulo energetico infine, va ricordato che sebbene sia possibile realizzare una struttura di regolazione che permetta all'inverter di alimentare direttamente anche la sezione di accumulo lato continua durante il funzionamento normale della rete, è preferibile utilizzare, in generale, un circuito di alimentazione esterno, che nel nostro caso sarà costituito dalla totalità delle batterie in quel momento collegate al dispositivo. La motivazione principale di questo accorgimento è quella della riduzione delle perdite, in quanto in una soluzione con circuito ausiliario esterno è possibile mantenere tutti gli interruttori in una posizione di aperto, evitando perciò tutte le perdite di commutazione che avvengono durante i cicli di conversione.

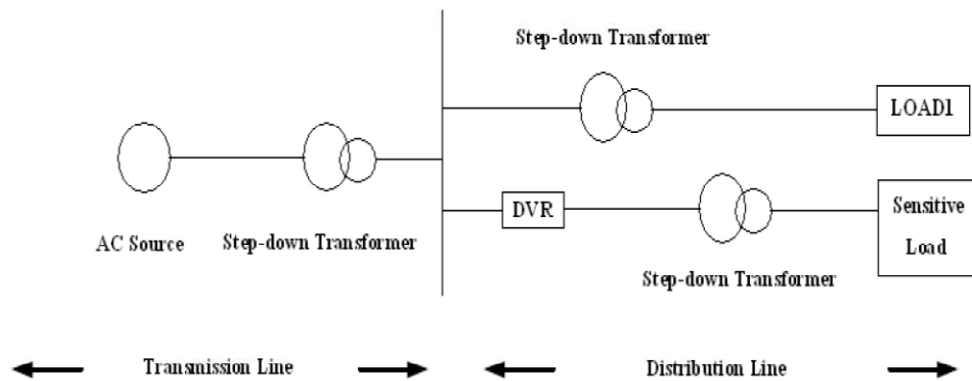


Fig. 7 : Inserzione di un DVR a monte di un carico privilegiato rispetto a un guasto su di una linea alimentante un'altra utenza.

### 3.2 Elementi costitutivi di un DVR[18],[19]

#### - Trasformatore BOOSTER

L'iniezione Booster è un trasformatore appositamente progettato appositamente con il tentativo di limitare i disturbi legati al rumore e alle perdite a vuoto.

I suoi compiti principali sono:

- collegare il DVR alla rete di distribuzione tramite gli avvolgimenti di media tensione, iniettando le tensioni imposte dai convertitori
- fornire una separazione galvanica fra la struttura di controllo e la rete.

#### - Filtro

Consente di limitare il contenuto armonico della tensione imposta dal convertitore.

#### -VSC ( Convertitore e Accumulo)

Il VSC è un sistema elettronico di potenza è costituito da un dispositivo di accumulo e da uno di commutazione, può generare una tensione sinusoidale a qualsiasi frequenza desiderata, grandezza e angolo di fase.

Nell'applicazione del DVR, il VSC è usato per sostituire temporaneamente la tensione di alimentazione o per sopperirne a una sua parziale mancanza.

Vi sono quattro principali tipi di dispositivi di commutazione:

- Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET),
- Gate Turn-Off tiristori (GTO),
- Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)



- Integrated Gate Commutated Thyristors (IGCT)
- Circuito di carica dell'accumulatore statico.
- Circuiti di controllo e protezione.



Fig. 8 : Esempio di quadro contenete un trasformatore serie di tipo BOOSTER.

### 3.3 EQUAZIONI FONDAMENTALI DI UN SISTEMA DVR[20]

Considerando il circuito equivalente esposto in figura, le equazioni fondamentali sono descritte in modo semplificato dalla formula:

$$V_{DVR} = V_L + Z_{TH}I_L - V_{TH}$$

**Dove:**

$V_L$  = Tensione richiesta ai capi del carico;

$Z_{TH}$  = Impedenza equivalente de' anello;

$I_L$  = Corrente del carico;

$V_{TH}$  = Tensione del carico nel momento in cui si verifica l'evento dannoso.

La corrente di carico è data da :

$$I_L = \frac{[P_L + jQ_L]}{V}$$

Considerando anche le fasi si può scrivere in oltre che:

$$V_{DVR} < 0 = V_{L<0} + Z_{TH<(\beta-\theta)} - V_{TH<\delta}$$

Con:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\theta_L}{P_L} \right)$$

### 3.4 MODELLI OPERATIVI DEI SISTEMI DVR

La funzione di base del DVR è quella di iniettare un  $V_{DVR}$  generata da un convertitore a commutazione forzata in serie alla tensione del bus per mezzo di un trasformatore booster.

Le ampiezze istantanee delle tre tensioni di iniezione vengono generalmente controllate in modo da eliminare eventuali effetti dannosi trasmissibili alla tensione di carico. Ciò significa che, come già accennato, ogni disturbo di tensione generato dalla rete elettrica viene compensato da un equivalente di tensione generato dal convertitore e iniettato a livello di media tensione attraverso il trasformatore booster.

I DVR dispongono di tre modalità di funzionamento che sono:

- modalità di protezione;
- modalità di attesa;
- iniezione / modalità boost.

#### 3.4.1- MODALITÀ DI PROTEZIONE(9)[18]

Se la sovracorrente sul lato del carico supera il limite consentito a causa di corto circuito sul carico o un'elevata corrente di spunto, il DVR viene isolato dai sistemi utilizzando gli interruttori di bypass (S2 e S3 si apre) e la chiusura di un percorso alternativo per la corrente (S1 sarà chiuso).

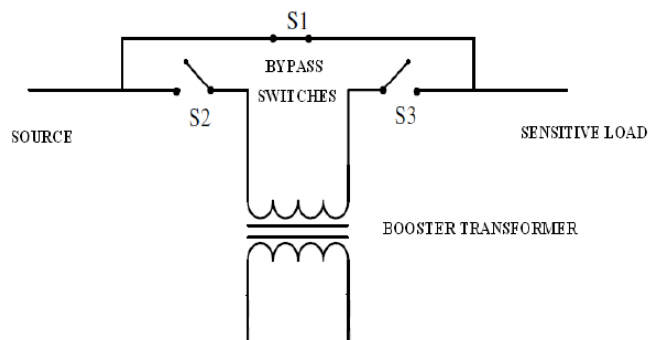


FIG. 9 : Topologia del circuito di protezione del DVR in caso di guasto o sovraccarico sulla rete sensibile.

### 3.4.2- MODALITÀ DI STANDBY ( $V_{VDR}=0$ )(10)

La modalità standby del trasformatore booster pone l'avvolgimento a bassa tensione in cortocircuito attraverso il convertitore. Nessuna commutazione dei semiconduttori si verifica in questa modalità di funzionamento e la corrente a pieno carico passa attraverso il primario.

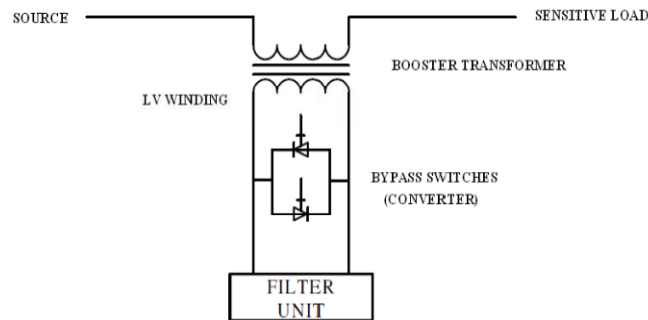


Fig. 10 : Modalità di standby del DVR, nel caso in cui non sia richiesto nessun tipo di intervento di Power Quality.

### 3.4.3- MODALITÀ DI INIEZIONE

Consiste nell'iniezione di una tensione di compensazione attraverso il trasformatore booster a causa del rilevamento di un disturbo della tensione di alimentazione

## 3.5 STRUTTURE DI CONTROLLO PER I DVR(11), [4],[5]

Le principali tecniche di compensazione per dispositivi DVR sono riconducibili alle seguenti quattro soluzioni:

- **Compensazione della tensione preesistente** (o "compensazione esatta"). Scopo del DVR è quello di ripristinare la tensione di rete con modulo e fase uguale a quella precedente il buco di tensione.
- **Compensazione in fase.** Il DVR genera una tensione sempre in fase con la tensione di rete misurata, anche durante il buco di tensione.
- **Compensazione con minima energia.** Si realizza una compensazione che richiede l'erogazione della minima energia da parte dell'elemento di accumulo. Le modalità di

realizzazione di questa compensazione sono molteplici e si basano principalmente sul fatto che iniettando una tensione in quadratura rispetto alla corrente di carico non si richiede alcuna erogazione di potenza da parte del DVR. In pratica ciò permette un rifasamento del carico visto complessivamente dalla rete a monte del DVR.

Analizzando le prime e principali tre tecniche di compensazione, si può inoltre sottolineare che:

- la compensazione esatta richiede una tensione maggiore dell'ampiezza del buco a causa della rotazione di fase della tensione durante il buco stesso;
- la tecnica di compensazione in fase permette una minimizzazione della tensione generata dal DVR;
- la compensazione con minima energia comporta l'iniezione di una tensione in quadratura rispetto alla corrente del carico al fine di minimizzare le richieste del sistema di compensazione.

Considerando ciò che è stato affermato fino ad ora si può sostenere che per quanto riguarda i sistemi DVR la compensazione esatta è da preferirsi alle altre sebbene questa non sia sempre energeticamente conveniente.

Una soluzione, di semplice realizzazione, può essere individuata nell'implementazione di un controllo tale che, durante il funzionamento del dispositivo DVR, la fase della tensione di riferimento sul carico sia sempre determinata da un PLL (Phase Locked Loop), il cui aggancio viene bloccato sul valore di fase verificatosi durante il buco di tensione stesso. In questo modo, durante la compensazione del disturbo, la tensione generata dal DVR risulta esattamente uguale a quella preesistente.

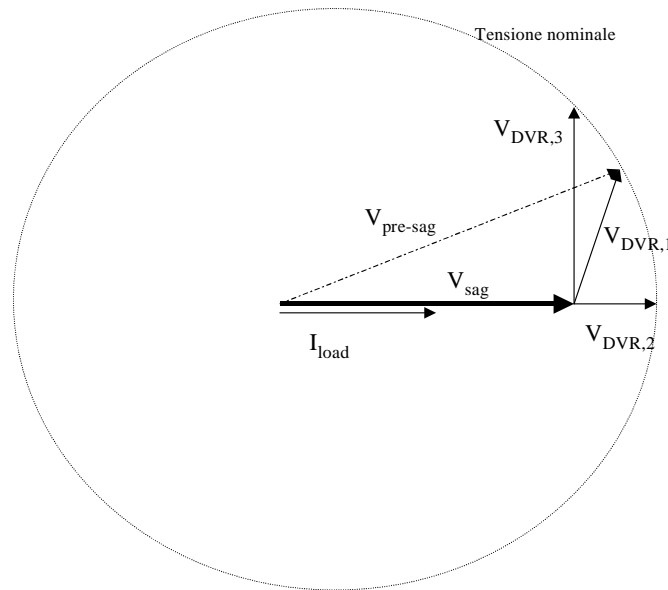


Fig. 11 : Diagramma fasoriale dei tre tipi di compensazione a seconda del tipo di inserzione che si vuole attuare con il sistema DVR.

### 3.6 SCHEMI DI REGOLAZIONE PER IL DVR[22]

La funzione principale del DVR è, come già accennato, quella di regolare la tensione durante il buco di tensione considerando che, durante il funzionamento regolare della rete, il DVR funzioni in stand-by.

In generale, la regolazione del DVR richiede, a parte un algoritmo per l'identificazione del buco di tensione, due elementi principali che sono il regolatore di tensione e il Phase Locked Loop (PLL) per la generazione del riferimento per la tensione da applicare. Per quanto riguarda il controllo di tensione, vi sono teoricamente due approcci possibili:

- **controllo a catena chiusa della tensione del carico.** La tensione del carico viene misurata e confrontata con un riferimento; un opportuno regolatore genera quindi la tensione di riferimento per il modulatore dell'inverter.
- **controllo a catena aperta.** Rappresenta lo schema di regolazione più semplice. Partendo dalla generazione di un riferimento di tensione mediante un PLL e dalla misura della tensione di rete esistente si calcola, per differenza, la tensione che il DVR deve iniettare in serie. Questa metodologia non pone particolari vincoli di stabilità anche se la precisione della regolazione può essere inferiore.

### 3.6.1 CONTROLLO NELLE COORDINATE d-q(12)

Il controllo a catena aperta [5] può essere convenientemente realizzato nelle coordinate d-q rotanti secondo la sequenza positiva della tensione di rete. Supponendo di realizzare una struttura di compensatore per reti MT a neutro isolato (o a terra mediante impedenza), la struttura di controllo può essere realizzata come riportato nella figura seguente:

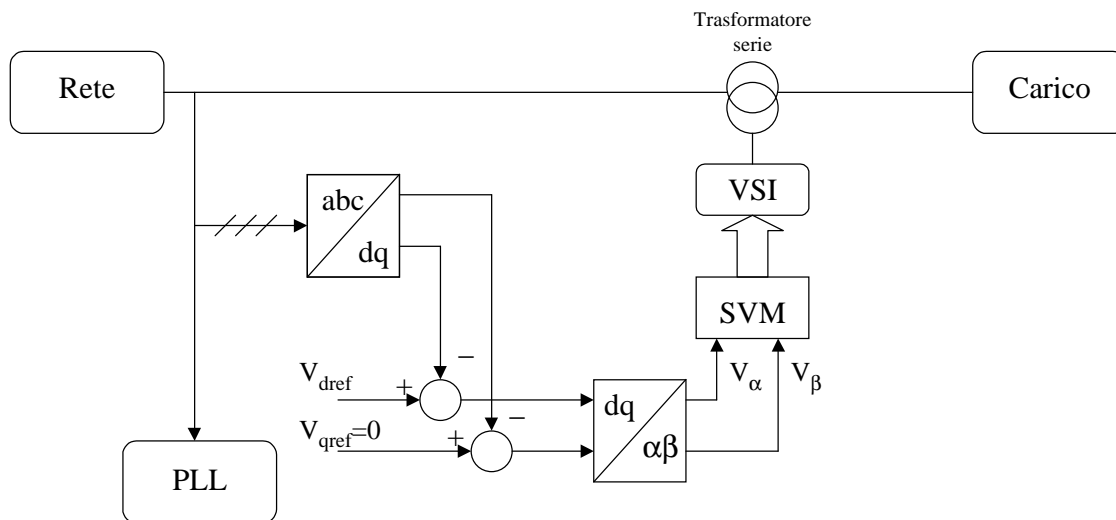


Fig. 12 : Schema di controllo ad anello aperto nelle coordinate d-q

### 3.6.2 SINCRONIZZAZIONE CON IL PLL

Prima di introdurre lo schema del PLL, si riportano alcuni principi generali in modo da rendere più comprensibile la metodologia utilizzata.

#### 3.6.2.1 STRUTTURA GENERALE DEL PLL[16]

Un PLL ("Phase Locked Loop" o "Ciclo ad Aggancio di Fase")[5],[6] è un sistema a controreazione, avente in ingresso un segnale periodico di frequenza  $f_i$ , che regola un "Oscillatore Controllato in Tensione" (VCO) in modo che questo abbia una frequenza  $f_o$  uguale a quella del

segnale di ingresso. Lo sfasamento  $\phi$  tra  $f_i$  ed  $f_o$  costituisce il segnale di errore. La struttura tipica di un PLL è mostrata in figura(13).

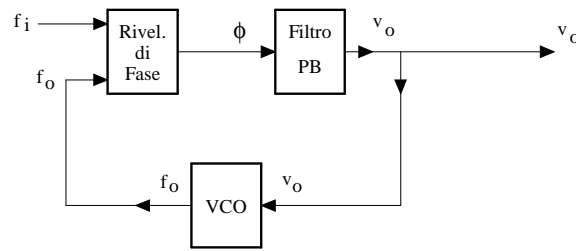


Fig. 13 :Struttura generale di un PLL.

L'evoluzione nel tempo dei due segnali(12) periodici con frequenze  $f_i$  ed  $f_o$  può essere rappresentata, da due vettori rotanti  $V_i$  e  $V_o$ . Per definizione, le pulsazioni  $\omega_i = 2\pi \cdot f_i$  e  $\omega_o = 2\pi \cdot f_o$  sono le velocità angolari istantanee dei due vettori.

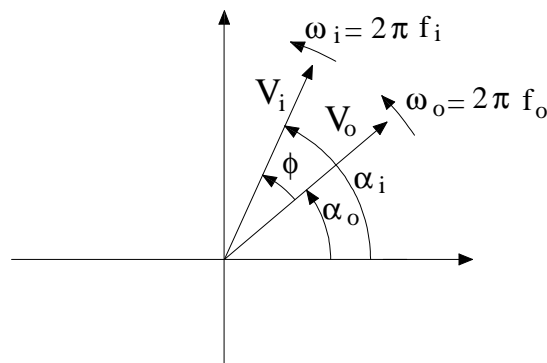


Fig. 14 : Evoluzione nel tempo dei segnali di tensione con periodi diversi. Il DVR deve fare in modo che le frequenze di iniezione coincidano con quelle dell'alimentazione.

Dalle precedenti figure si evidenzia quindi come il rivelatore di fase del PLL svolga la funzione di integratore delle due frequenze istantanee  $f_i$  ed  $f_o$ , generando la differenza delle due fasi  $\alpha_i$  ed  $\alpha_o$ .

Uno schema del rivelatore di fase è riportato nella figura(14)

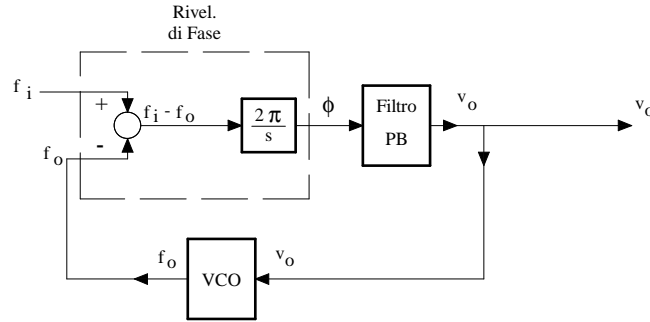


Fig. 15 : Schema di un rivelatore di fase.

### 3.6.2.2 SCHEMA ADOTTATO PER IL PLL

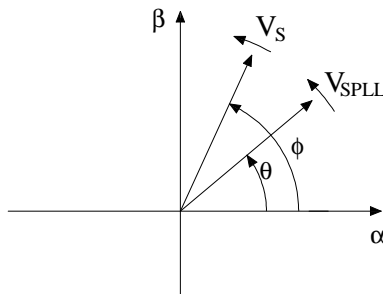
Lo schema descritto precedentemente può essere facilmente esteso a sistemi trifase tenendo conto che il rivelatore di fase è direttamente dato dalla componente in quadratura della tensione di rete. Con riferimento alla figura riportata nel seguito, ove  $V_S$  rappresenta la tensione di rete e  $V_{SPLL}$  la tensione di riferimento del PLL, si nota che l'errore di fase è dato dalla formula:

$$\varphi - \theta = \tan^{-1} \left( \frac{v_{s\beta}}{v_{s\alpha}} \right) - \theta \approx \sin(\varphi - \theta) = v_{s\beta} \cos \theta - v_{s\alpha} \sin \theta$$

errore che rappresenta proprio la coordinata q in un sistema di riferimento ad assi rotanti così definito:

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix}$$





In queste condizioni il PLL può essere direttamente realizzato con lo schema di figura (fig. 16), ove una componente integrale nel regolatore permette un perfetto aggancio alle tensioni di rete.

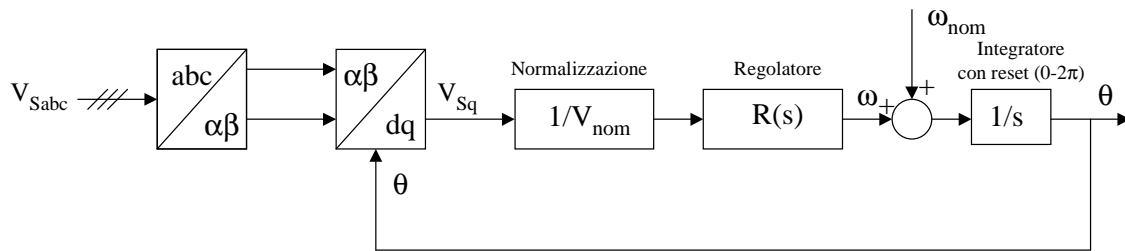


Fig. 16 : Schema di realizzazione di un PLL.

### 3.7- FILTRI DI USCITA DELL'INVERTER DEL DVR[15]

Il dimensionamento del filtro di uscita dell'inverter (sia induttivo che capacitivo) dipende fortemente sia dalla tipologia che dalla frequenza di commutazione raggiungibile dai componenti di potenza.

Analizzando alcuni aspetti principali che i filtri devono possedere per un corretto svolgimento del loro compito si possono evidenziare le seguenti caratteristiche:

- un filtro di uscita di tipo capacitivo deve essere fortemente smorzato in quanto l'inverter è in stand-by durante l'assenza del buco di tensione ed il carico "vede" in serie alla linea un'impedenza costituita dal parallelo dell'induttanza di dispersione del trasformatore e dal condensatore di filtro;
- il filtro può, in generale, essere inserito sia lato inverter che lato rete. Per quanto riguarda un confronto tra le due soluzioni, si possono mettere in evidenza i seguenti fattori:
  - 1 un filtro inserito lato inverter va dimensionato per la bassa tensione, mentre nel caso di inserimento lato linea il dimensionamento deve essere realizzato per la tensione di rete (MT) e quindi con maggior problemi di isolamento;
  - 2 posizionando il filtro lato inverter si realizza un miglior filtraggio delle frequenze di commutazione generate dall'inverter in quanto l'impedenza del trasformatore crea una sorta di disaccoppiamento verso il carico.
  - 3 l'inserzione del filtro lato rete, offre due notevoli vantaggi. Il primo è associato al fatto che durante il funzionamento in "stand-by" la totale impedenza del sistema di compensazione è determinata solo dall'impedenza di corto circuito del trasformatore. Il

secondo è associato al fatto che durante il funzionamento del DVR la caduta di tensione sul filtro di uscita risulta inferiore.

- nel caso di un dimensionamento del filtro realizzato per l'inserzione lato rete, tenendo conto che il DVR funziona solo durante i buchi di tensione, è possibile ammettere una maggiore distorsione di tensione alle frequenze di commutazione.

### **3.8- MODALITA' DI IDENTIFICAZIONE DEL BUCO DI TENSIONE**

Il sistema DVR richiede una elevata velocità di risposta nell'identificazione del buco di tensione al fine di poter intervenire tempestivamente e ripristinare la tensione nominale sul carico, tale problematica ammette alcune soluzioni descritte qui a seguito:

- valutazione del modulo della tensione nelle coordinate d-q. Il modulo del vettore è direttamente proporzionale al valore efficace della tensione e può rappresentare un indice della presenza o meno del buco di tensione.
- raddrizzamento della tensione di rete e filtraggio della tensione raddrizzata (per l'eliminazione delle componenti armoniche).
- utilizzo di una media mobile pari a 10ms sulla tensione raddrizzata con una valutazione del valore efficace fase per fase.

Volendo poi comporre un algoritmo per verificare il metodo migliore (fase per fase) tale da permettere l'identificazione del buco di tensione in un eventuale simulazione, è risultato deve essere costituito da:

- misura delle singole tensioni concatenate e loro filtraggio;
- identificazione (fase per fase) dell'attraversamento per lo zero della tensione di rete;
- misura del valore efficace (fase per fase);
- utilizzo di tale valore per l'identificazione del buco di tensione.

### 3.9 SCHEMA DI PRINCIPIO DI UN SISTEMA DVR[5],[4]

Tenendo conto di quanto detto in precedenza sull'argomento DVR, si riporta in seguito uno schema di principio(fig. 18), e uno a blocchi(fig. 17), relativi a un generico sistema di compensazione, alimentato da una fonte di energia in c.c., chiamato a compensare i buchi di tensione provenienti dalla rete.

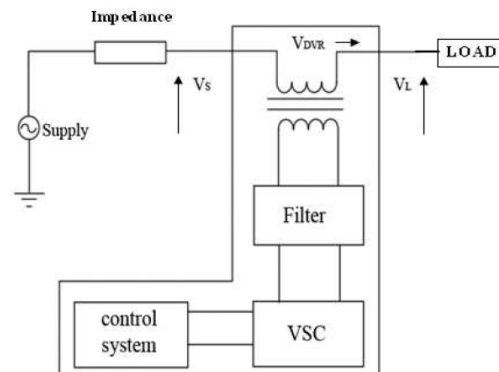


Fig. 17 : Schema a blocchi di un sistema DVR

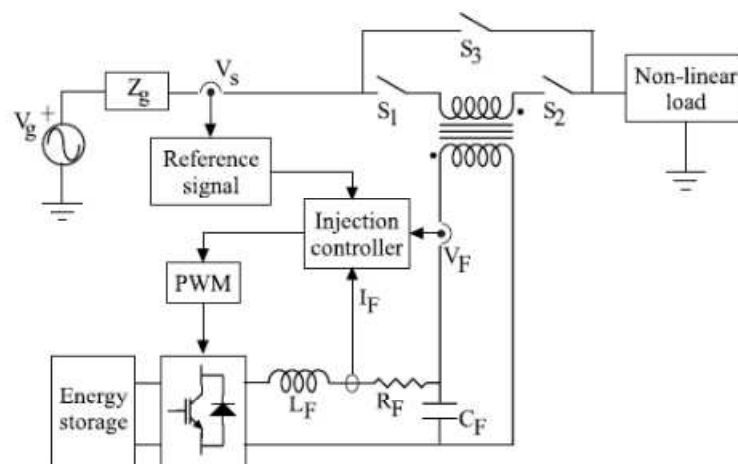


Fig. 18 : Schema di principio di un DVR, in cui si può notare, la presenza del filtro in derivazione al ponte controllato, e la presenza dell'interruttore controllato per le diverse configurazioni di funzionamento

## CAPITOLO 4

### STUDIO DEI SISTEMI DI ACCUMULO ATTUALMENTE INSTALLATI NELLE PRINCIPALI APPLICAZIONI AUTOMOTIVE.

#### 4.1 INTRODUZIONE[8]

Il seguente capitolo si propone di esporre lo stato dell'arte riguardante i vari sistemi di accumulo installati all'interno dei più comuni veicoli plug-in[7]. L'analisi di tali sistemi ci aiuterà a calcolare la quantità di energia accumulata, potenzialmente disponibile per un eventuale utilizzo in sede di compensazione elettrica dei disturbi.

Tenendo conto di quanto già esposto nei capitoli precedenti appare ovvio infatti, che la base per un'efficiente compensazione dei disturbi elettrici è costituita da un buon accumulo di energia statica, resa disponibile istante per istante dalla presenza di dispositivi elettrochimici installati a monte dei vari sistemi di compensazione.

A seguito perciò esporremo le diverse tecnologie già esistenti, evidenziando per ognuna le potenzialità e i relativi difetti.

La discussione prenderà quindi in esame:

- a) Accumulatori di tipo elettrochimico[8]
  - Accumulatori al litio
  - Accumulatori al piombo
  - Accumulatori al nichel (MH e Cd)
  - Accumulatori al sodio
  - Accumulatori al vanadio
  - Accumulatori all'alluminio
  
- b) Accumulatori di tipo elettrostatico
  - Supercondensatori

Oltre a ciò verrà esposta anche una parte inerente al controllo circuitale installato all'interno di ogni vettura necessario al buon funzionamento e alla migliore resa dei sistemi di accumulo.

#### 4.2 DESCRIZIONE DEI SISTEMI DI ACCUMULO.

Il sistema di accumulo dell'energia incide fortemente sull'energia immagazzinabile (espressa normalmente in kWh), è il principale parametro che determina l'autonomia, mentre la potenza di picco erogabile (espressa normalmente in kW) stabilisce un limite alle prestazioni ottenibili (fig. 19).

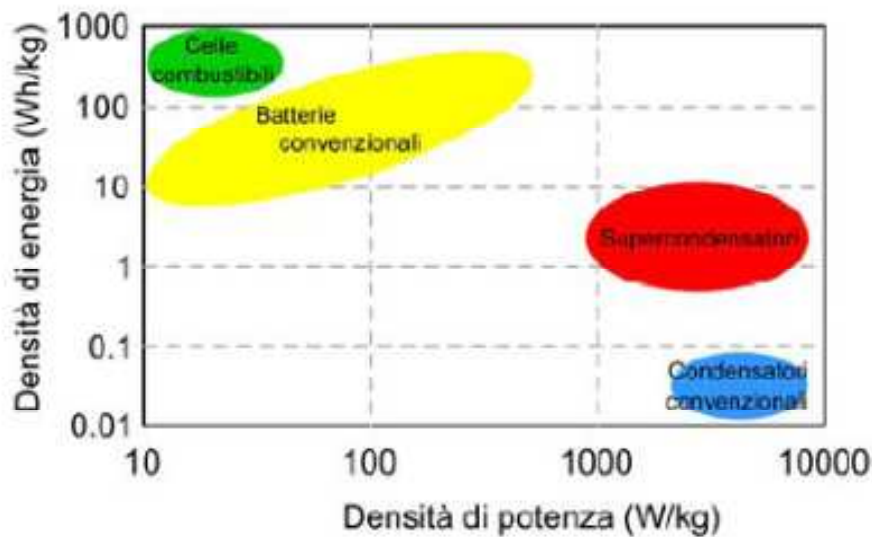


Fig. 19 : diagramma della disponibilità di energia/potenza ricavabile da differenti fonti di alimentazione statiche.

Generalmente un sistema di accumulo dell'energia è composto da due tipi differenti di accumulatori:

- Accumulatori di tipo elettrochimico (batterie).

Permettono di immagazzinare, con un peso ed un volume ragionevoli, elevate quantità di energia. La qualità del pacco di batterie si misura con due parametri: la capacità specifica in peso (Wh/kg), che esprime la quantità di energia immagazzinata per unità di peso e la capacità specifica in volume (Wh/m<sup>3</sup>), che esprime lo stesso concetto ma rapportato all'unità di volume.

- Accumulatori di tipo elettrostatico (supercondensatori).

Assicurano elevatissime potenze di picco, ma con capacità specifiche in peso o volume, relativamente basse. In sostanza garantiscono la possibilità di fare fronte ad elevate richieste di potenza per tempi brevi.

Un buon sistema di accumulo dell'energia per veicoli deve poter garantire, con peso e volume contenuti, una grande capacità di immagazzinamento dell'energia, e un'elevata potenza di picco, deve essere quindi una giusta commistione di accumulatori elettrici e statici.

### **Accumulatori di tipo elettrochimico[2].**

Esistono diversi tipi di accumulatori elettrochimici, ed i parametri che le caratterizzano in termini di prestazioni, sono i seguenti:

- Capacità (C): È il prodotto dell'intensità di corrente erogata per il tempo necessario a scaricare completamente l'accumulatore a quella data corrente. Viene misurata in ampère-ora (Ah) ed è una misura della quantità di carica elettrica ( $1 Ah = 3600 coulomb$ ). Tale capacità varia fortemente in relazione all'entità della corrente di scarica. Per questo motivo spesso è indicata con un pedice che indica il tempo totale di scarica (in ore) a corrente differente da quella nominale.
- Tasso di scarica (C/x): è la corrente che scarica completamente una batteria carica in x ore (a meno della variazione di capacità con la corrente di scarica). Per esempio una batteria di capacità pari a 90Ah ad un tasso di scarica C/2 (spesso indicato con 0,5C) eroga, nel caso ideale, una corrente di 45A.
- Stato di carica (SoC, state of charge): è la percentuale di energia residua immagazzinata nelle batterie.
- Profondità di scarica (DoD, depth of discharge): è il valore complementare allo stato di carica SoC.
- Tasso di autoscarica: è la percentuale di cui diminuisce, nel periodo indicato (normalmente mese o anno) la quantità di energia accumulata nella batteria lasciata a riposo (es. 2,5% al mese).

- Numero di cicli di carica/scarica: è il numero di cicli di carica e scarica completi che la batteria può sopportare prima che la sua capacità decada ad un valore sensibilmente minore di quello nominale (normalmente il 50%).
- Effetto memoria (lazy battery): Alcuni tipi di batterie ricaricabili, se ripetutamente caricate prima che la loro carica sia completamente esaurita, “ricordano” la capacità energetica precedente alla ricarica, ovvero, se di una batteria completamente carica si utilizza al 60% e successivamente si sottopone a ricarica, il 40% dell’energia somministrata non viene riconosciuta e risulta quindi inutilizzabile. Le batterie maggiormente soggette a questo fenomeno sono quelle al nichel-cadmio e, in misura minore quelle al nichel-metallo idruro (NiMH). Nelle prime il fenomeno è dovuto alla crescita delle dimensioni dei cristalli di cadmio, diminuendo così la superficie interessata dalle reazioni elettrochimiche. L’effetto della crescita delle dimensioni dei cristalli è più pronunciato se la batteria viene lasciata sotto carica per giorni, o viene ripetutamente scaricata in maniera incompleta. Nelle batterie al litio tale effetto non si verifica in quanto non si ha alcuna modificazione delle dimensioni dei grani o della struttura cristallina dei materiali elettrodici.

La batteria ideale per applicazioni su veicoli ibridi deve avere una elevata densità di energia, una lunga vita elettrica, un ampio range di temperatura di utilizzo, un tasso di aut scarica minimo, una bassa resistenza interna, essere priva dell’effetto memoria, poter essere caricata velocemente, avere un basso costo, essere sicura e facilmente smaltibile o riciclabile una volta terminata la sua vita utile.

Da come si può vedere dalla tabella(14), nessuna batteria presente sul mercato soddisfa in pieno tutte queste caratteristiche ma alcune in particolare hanno caratteristiche tali da poter essere usate in questo ambito.

## Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

Tipo	Densità di energia[Wh/kg]	Tensione di cella [V]	Durata (cicli di carica)	Tempo di scarica [h]	Auto scarica mensile [%]
Piombo	30-50	2	500-800	8-16	5-20
Ni-Cd	40-60	1.2	1500	1	15
Ni-MH	30-80	1.2	1000	2-4	30
Li-ion	100-160	3.7	500-1000	2-4	5
Li-po	120-200	3.7	300-500	2-4	5

Tab. 14 : caratteristiche salienti delle batterie più diffuse sul mercato.

Nel seguito analizzeremo i diversi tipi di accumulatori più diffusi sul mercato.

### 4.2.1 ACCUMULATORI AL PIOMBO ACIDO[10]

Le batterie piombo-acido(fig. 20) sono prodotte a livello commerciale da oltre un secolo.

Il loro successo è essenzialmente dovuto al basso costo e alla larga disponibilità del piombo, oltre ad una tecnologia relativamente semplice e ormai affermata di manifattura. Si aggiungono infine i vantaggi di relativa sicurezza e di infrastrutture di servizio e di riciclaggio diffuse e ben consolidate.

La ricarica di questi accumulatori è accompagnata dallo sviluppo agli elettrodi di idrogeno ed ossigeno che sfuggono all'esterno sotto forma di gas. La conseguente perdita di acqua deve essere reintegrata mediante rabbocchi periodici.

Questi accumulatori particolarmente robusti trovano ancora largo impiego per le applicazioni stazionarie e per l'impiego nei veicoli di trasporto e trazione standard, ove vengono impiegati nell'alimentazione dei sistemi elettrici di bordo, questa ancora larga diffusione (circa i 2/3 degli accumulatori oggi presenti in circolazione) è giustificata anche dalla loro lunga durata di vita valutabile intorno ai 20 anni qualora sia assicurata una regolare manutenzione (batteria stazionaria gestita in tampone e cioè a tensione costante di valore basso ma sufficiente a reintegrare l'autoscarica).

In genere questi accumulatori, che utilizzano un largo eccesso di elettrolita (densità da 1,21 a 1,25 g/cm<sup>3</sup>), presentano valori di energia specifica fra 15 e 25 Wh/kg (30-50 Wh/l) e picchi di potenza specifica di 20-40 W/kg (40-80 W/l).



Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

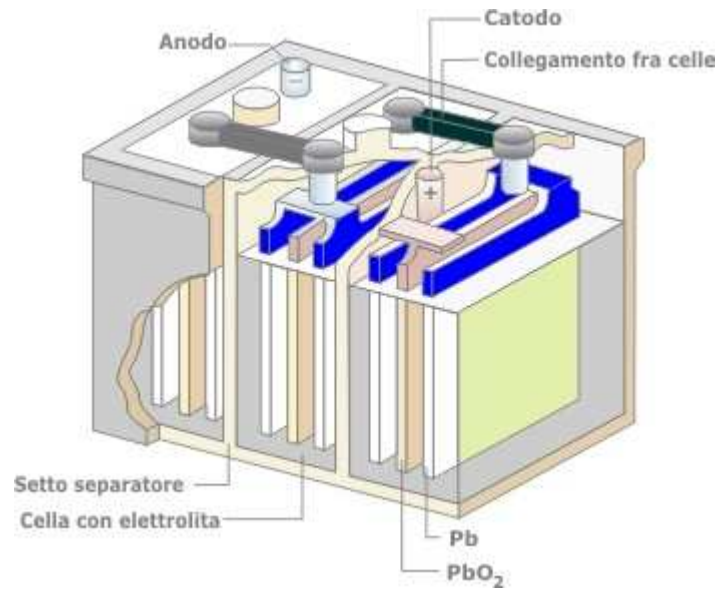


Fig. 20 : Rappresentazione schematica della struttura interna di una batterie al piombo-acido.

#### 4.2.1.2 STRUTTURA, FUNZIONAMENTO E CARATTERISTICHE.

Gli accumulatori al piombo-acido utilizzano un anodo fatto di polvere di piombo spugnosa e un catodo di diossido di piombo (PbO<sub>2</sub>) mentre l'elettrolita nel quale sono immersi gli elettrodi è una soluzione acquosa al 20% di acido solforico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) Figura(20),(21).

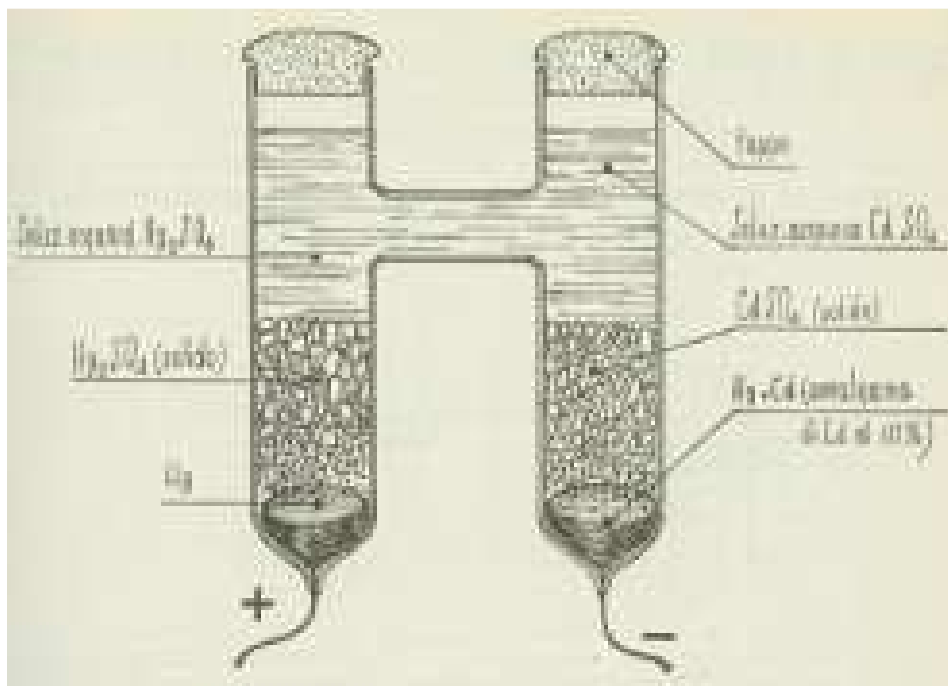


Fig. 21 : Rappresentazione storica del principio di funzionamento delle batterie al piombo.

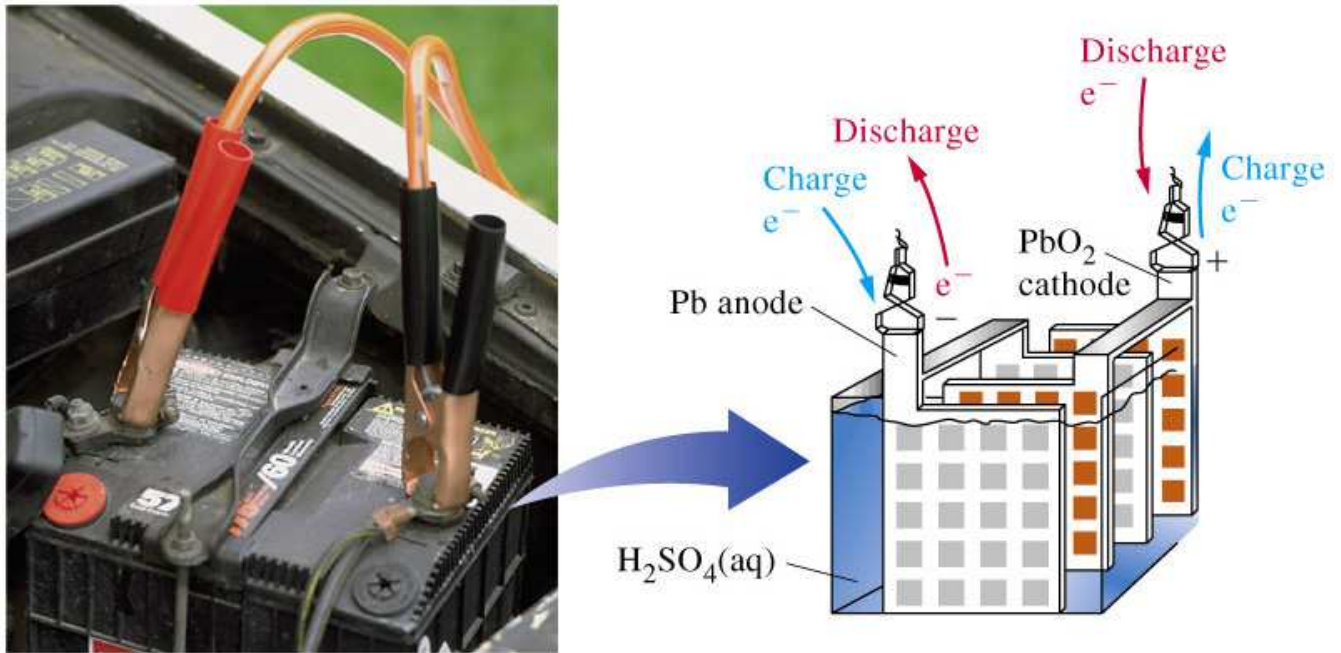
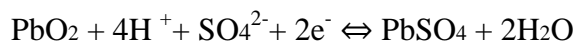


Fig. 22 Principio di funzionamento della carica e scarica di una batteria al piombo acido.

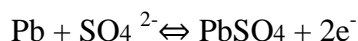
Negli accumulatori al piombo più moderni si utilizza una lega di piombo che inibisce l'elettrolisi dell'acqua, allungando la durata utile di vita della batteria e inibendo il pericolo di esplosioni causato dall'idrogeno gassoso disperso durante la reazione.

La soluzione elettrolitica trasporta cariche elettriche attraverso lo spostamento di ioni che sono presenti nella soluzione stessa, nel caso specifico sono presenti ioni  $H^+$  e ioni  $SO_4^{2-}$ . Immergendo gli elettrodi nella soluzione di elettrolita si ha una reazione che determina all'equilibrio una d.d.p. tra gli elettrodi.

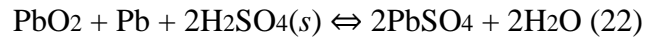
Al polo positivo (piastra ricoperta di diossido di piombo,  $PbO_2$ ) si ha la seguente semireazione di riduzione[7]:



mentre al polo negativo (piastra di piombo,  $Pb$ ) si verifica la reazione di ossidazione:



La reazione totale della cella all'equilibrio risulta perciò:



La differenza di potenziale che si instaura tra i due elettrodi è la somma dei potenziali delle singole semireazioni e il cui valore dipende essenzialmente dai potenziali di riduzione delle due reazioni e dalla concentrazione dell'elettrolita nella soluzione, risulta invece indipendente dalla forma e dalle dimensioni degli elettrodi stessi (piastre) sempre se si garantisce una quantità di elementi sufficienti alle reazioni. La massima corrente erogabile invece dipende dalle dimensioni dell'elettrodo.

Le reazioni descritte sono reversibili e possono avvenire spontaneamente in caso di scarica (da sinistra verso destra) o assorbendo energia dall'esterno in fase di carica (da destra verso sinistra). In un accumulatore al piombo acido quindi il processo di scarica avviene attraverso una reazione reversibile in cui il piombo, di cui sono costituiti gli elettrodi, reagisce con l'acido solforico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) presente nella soluzione elettrolita formando acqua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e solfato di piombo ( $\text{PbSO}_4$ ).

Durante il processo di scarica la formazione di acqua e di solfato di piombo causano la diminuzione della concentrazione  $D$  [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ] di acido solforico nella soluzione elettrolitica e quindi della sua densità, che determina, l'abbassamento della differenza di potenziale (d.d.p.) tra gli elettrodi in accordo con l'equazione di Nernst, qui di seguito riportata in una versione semplificata per le batterie al piombo(23):

$$d.d.p.cella = 0,84 + D$$

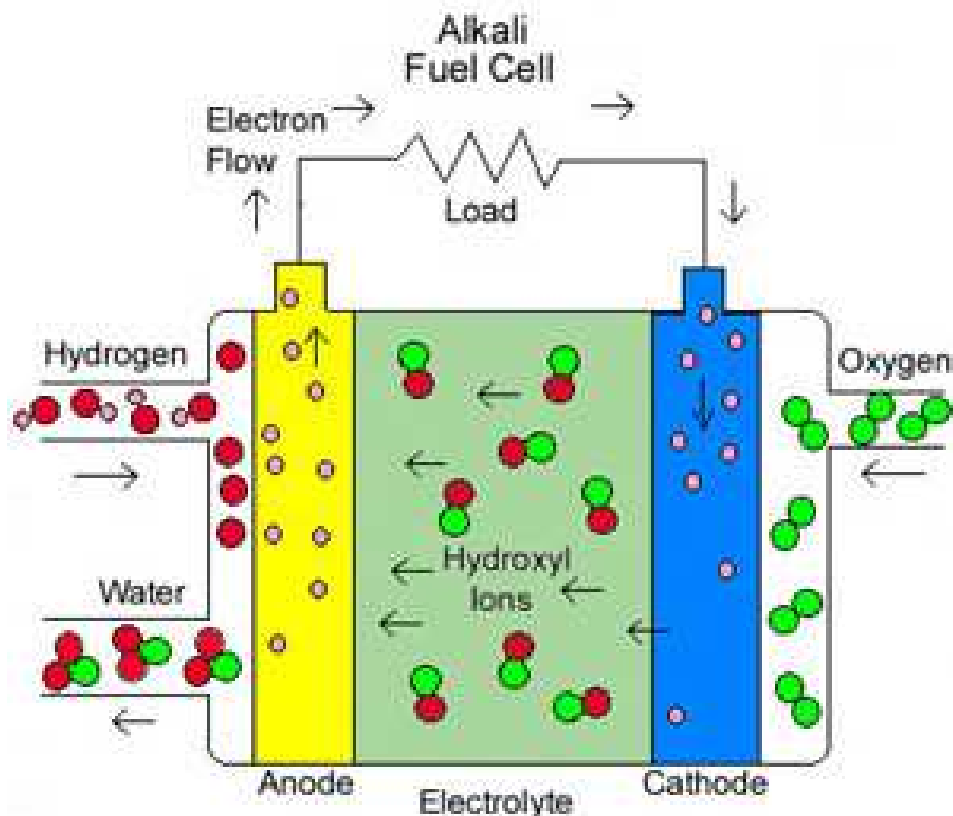


Fig 23 : Schematizzazione della reazione che si verifica all'interno dell'elettrolita durante il processo di scarica della batteria.

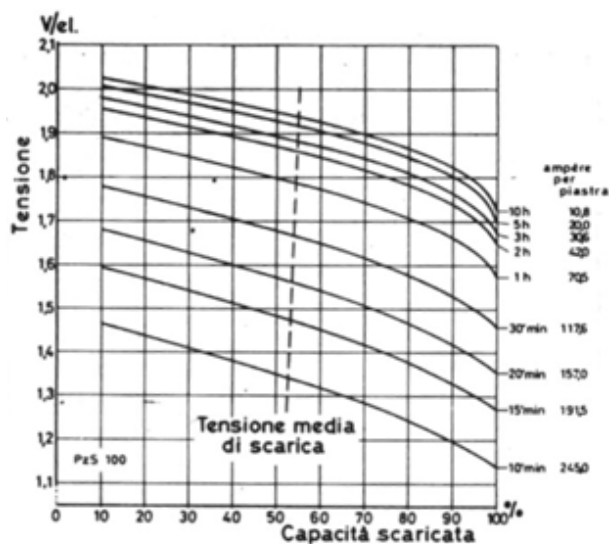
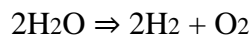


Fig.24 : Percentuale di scarica in funzione della tensione e del tempo durante il quale questa viene richiesta dal carico.

Durante la fase di ricarica di una batteria al piombo avviene un processo inverso a quello appena descritto. Collegando ai due elettrodi un generatore di corrente si ha il passaggio di elettroni dall'elettrodo positivo al generatore e da questo all'elettrodo negativo.

Il processo di ricarica si può considerare ultimato quando tutte le molecole del solfato di piombo ( $\text{PbSO}_4$ ) formatesi durante la scarica sono state nuovamente scomposte ripristinando l'iniziale concentrazione di acido solforico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) nell'elettrolita.

Se, raggiunta la condizione di carica completa, si continua a fornire energia alla batteria non si ha ulteriore incremento della carica accumulata, ma l'energia fornita produce solamente ulteriore elettrolisi delle molecole d'acqua presenti nella soluzione, secondo la reazione:



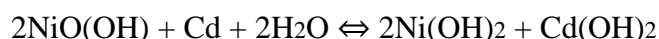
determinando la formazione di idrogeno e ossigeno allo stato gassoso, condizione questa estremamente pericolosa in quanto la miscela dei due gas ad elevate concentrazioni può risultare esplosiva.

Poiché non vi è un confine preciso tra i due processi chimici bisogna considerare che durante la fase di carica di una batteria al piombo (specialmente nella fase finale) si forma sempre del gas. È quindi importante che il processo di carica non si protragga oltre il necessario in quanto oltre alla formazione di gas pericolosi vi è anche l'effetto, non secondario, della perdita di acqua dalla soluzione con la conseguente variazione della densità dell'elettrolita rispetto ai valori ottimali nel caso di batterie con elettrolita liquido o di formazione di bolle di gas che rimangono imprigionate in modo irreversibile nell'elettrolita nel caso di batterie al gel.

#### **4.2.2. BATTERIE AL NICHEL-CADMIO[12]**

E' basata sul prototipo di batteria alcalina di Thomas Edison, con l'unica differenza che il catodo è realizzato in cadmio (Cd), anziché in ferro (Fe).

La reazione completa della cella risulta:



e produce una differenza di potenziale nominale fra gli elettrodi di 1,2V.

I relativi punti di forza e i difetti sono elencati nello specchietto seguente:

### **Vantaggi**

- Richiedono meno cura e sono più difficili da danneggiare.
- Di solito durano molto tempo (molti cicli carica-scarica)
- Possono solitamente essere scaricate o caricate più velocemente rispetto alle gel-cell oppure alle batterie piombo-acido.
- Non vengono danneggiate se vengono lasciate scariche per molto tempo.

### **Svantaggi**

- Gli accumulatori NiCd sono relativamente costosi. A confronto con gli accumulatori al piombo i materiali e le lavorazioni sono più costose.
- Possono sviluppare un falso effetto "fondo del barile", non accettando di essere ulteriormente scaricate, se molto spesso, di routine vengono portate allo stesso livello di scarica e poi ricaricate (vedi "effetto memoria" più avanti).

Attualmente tutte le batterie NiCd vengono realizzate con la tecnica "jelly-roll", cioè avvolgendo attorno ad un nucleo cilindrico diversi strati di piastre anodiche e catodiche.

#### **4.2.3. BATTERIE AL NICHEL-METALLO IDRURO (NiMH).**

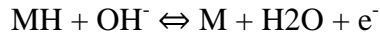
Le batterie nichel-metallo idruro (NiMH)[8] sono un'evoluzione di quelle nichel-cadmio (NiCd) e rispetto a queste ultime presentano il vantaggio di avere una densità energetica del 30-40% in più, e di aver eliminato l'uso del cadmio, un metallo pesante pericoloso.

Il polo negativo è costituito da una lega metallica generalmente di nichel e terre rare (per esempio il LaNi<sub>5</sub>); in particolare queste leghe sono in grado di immagazzinare e successivamente rilasciare una quantità d'idrogeno un migliaio di volte superiore al proprio volume.

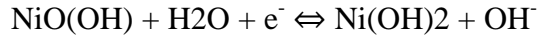
L'elettrolita impiegato è una soluzione diluita di idrossido di potassio (KOH) cui sono aggiunti, in minor quantità, altri composti chimici per migliorare le prestazioni della batteria. Il separatore tra anodo e catodo, che impedisce il contatto elettrico tra gli elettrodi, ma ne permette un efficiente scambio ionico, è costituito da un sottile film a base di nylon.

La reazione di ossidazione che avviene all'anodo è la seguente (con M si intende un metallo o un composto intermetallico):

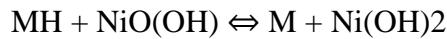
Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione



mentre al catodo, la riduzione è:



per cui nel complesso, la reazione completa è:



e produce una differenza di potenziale (d.d.p.) nominale fra gli elettrodi di 1,2V.

Le batterie al nichel-metallo idruro (NiMH) stanno ormai sostituendo le vecchie batterie al nichel-cadmio (NiCd), più tossiche e meno efficienti. La massima energia che può essere immagazzinata nelle comuni batterie AA è attualmente di circa 13 kJ (3000 mAh; 1,2 V), mentre in condizioni ordinarie, il rendimento energetico di carica-scarica dei moduli è prossimo al 85%, purtroppo però la loro autoscarica risulta relativamente elevata.

A livello commerciale, lo sviluppo e la diffusione di batterie Ni/MeH sono mirati principalmente alle applicazioni per le apparecchiature portatili.

Vengono realizzate celle Ni/MeH cilindriche con energia specifica intorno ai 40-50 Wh/kg (150-170 Wh/l), cioè il 30-40% in più delle Ni-Cd.

A temperatura ambiente attorno ai 20 °C, la loro capacità risente poco della velocità di scarica e il loro rendimento energetico risulta superiore al 85%.

A basse temperature si osserva un deterioramento delle prestazioni comunque inferiore a quello sofferto dagli accumulatori al piombo.

La loro autoscarica a temperatura ambiente ammonta al 10% a settimana (20%/mese), ma sono possibili valori di 2-3% al giorno. Essa cresce inoltre rapidamente con la temperatura.

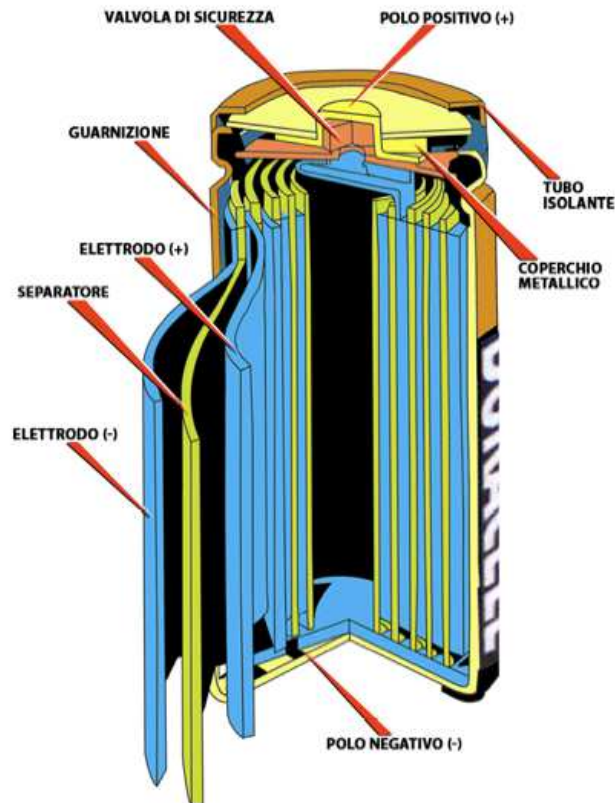
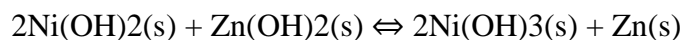


Fig. 25 : Spaccato della struttura interna di una batteria Ni-MH

#### 4.2.4 BATTERIE NICHEL-ZINCO (NI-ZN)

La loro capacità di poter erogare una elevata potenza abbinata al peso ridotto le rende particolarmente adatta all'utilizzo in veicoli elettrici. Non utilizzano materiali tossici in quanto il cadmio è stato sostituito dallo zinco e sono caratterizzate da un numero di cicli di vita nella media.



#### 4.2.5. ACCUMULATORI AL SODIO

##### 4.2.5.1 BATTERIE SODIO-NICHEL CLORURO (Ni-NaCl):

Sono costituite da celle contenenti sodio-nichel cloruro e funzionanti a caldo (260 °C), racchiuse in un contenitore termico. Deve essere dotata di un sistema di controllo, il quale ne gestisce il corretto funzionamento. Le caratteristiche tecniche sono molto promettenti (oltre 1.000 cicli di



carica/scarica e ottima potenza specifica) anche se al momento non sono ancora disponibili di serie; sono installate su prototipi di auto e mezzi pubblici in fase pre-commerciale. Un grave inconveniente è l'autoscarica: si scaricano completamente in sei/otto giorni.

#### **4.2.5.2 BATTERIE SODIO-ZOLFO (Na-S)[14]:**

Contengono zolfo liquido (fuso) all'elettrodo positivo e sodio liquido a quello negativo come materiali attivi separati da un elettrolita di ceramica (allumina solida). L'elettrolita permette soltanto agli ioni positivi del sodio di passarvi attraverso. Gli ioni di sodio si uniscono con lo zolfo per formare i polisolfuri di sodio:  $2\text{Na} + 4\text{S} = \text{Na}_2\text{S}_4$  (fase di scarica). Il processo è reversibile e nella fase di carica l'energia elettrica induce i polisolfuri di sodio a liberare gli ioni positivi che attraversano l'elettrolita per ricombinarsi come sodio elementare; la cella ha circa 2V di tensione nominale, funziona a 300°C ed è accreditata di una elevata efficienza (circa 89%).

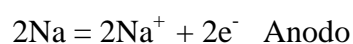
#### **4.2.5.3 ACCUMULATORI ZEBRA**

Sono una delle migliori tecnologie oggi disponibili per l'accumulo di energie elettrica, sono dette anche batterie al Nichel-Cloruro di Sodio.

La loro struttura è composta da un elettrolita metallico di beta allumina che divide la cella in due settori preposti ad ospitare uno l'elettrodo positivo e l'altro quello negativo. Il catodo è composto di  $\text{NiCl}_2$ , un sale impregnato di beta allumina, mentre l'anodo è fatto di sodio (Na) ed è collegato fra l'elettrolita e il case contenitivo.

La temperatura di funzionamento della cella è di circa 250°C, temperatura alla quale è già avvenuta la fusione del  $\text{NaAlCl}_4$  (154°C), in queste condizioni si trova nella posizione in cui sull'elettrodo negativo giace il sodio, mentre su quello positivo si trova il cloruro di nichel. Durante la chiusura del circuito e la conseguente scarica avviene la reazione che porta alla formazione di cloruro di sodio e nichel, l'elettrolita che consente la conduzione degli ioni all'interno delle celle è la beta allumina.

La reazione che esprime questo funzionamento è la seguente:





La tensione a vuoto di una singola cella è pari a circa 2.58V, costante su circa tutta la caratteristica fino a scarica avvenuta, le ZEBRA non subiscono l'effetto memoria e riescono a ricaricarsi del 50% in 30 minuti, la loro densità di energia è di circa 120 Wh/kg con una potenza specifica di 150 W/kg, sopportano più di 1000 cicli con un'efficienza energetica del 87%, l'unico grosso inconveniente per questo tipo di accumulatori è rappresentato dalla loro temperatura di funzionamento.



Fig. 26 Accumulatore ZEBRA

#### 4.2.6 ACCUMULATORI AL LITIO.[10],[8]

Il litio (Li) è il più leggero fra i metalli ed ha uno dei più alti potenziali di elettrodo: la combinazione di queste due caratteristiche gli conferisce un contenuto energetico consistente, con una capacità specifica teorica che arriva a 3860 Ah/kg contro 820 Ah/kg per lo zinco e 260 Ah/kg per il piombo.

Ogni atomo di litio è in grado di cedere un elettrone e, avendo un peso molecolare di molto inferiore agli altri elementi costituenti le pile sopra descritte, poco meno di 7g di litio permettono il trasferimento di una mole di elettroni. Il principale svantaggio del litio è rappresentato invece dalla sua fortissima reattività che può creare diversi problemi.

Caratteristica comune a tutte le batterie che utilizzano il litio è il fatto che queste debbono essere utilizzate con estrema cura: esistono infatti dei forti vincoli sulle massime correnti di scarica e di carica e sulla temperatura di lavoro della batteria. Per tali motivi, talvolta, i pacchi di batterie sono solitamente interfacciati con l'esterno attraverso opportuni circuiti di protezione.

In questa serie di paragrafi verranno descritte la maggior parte delle tecnologie utilizzate per la costituzione di tali accumulatori, e principalmente verranno analizzate:

- Batterie agli ioni di litio
- Batterie ai polimeri del litio

#### 4.2.6.1 ACCUMULATORI LITIO/IONI (LION)[9]

I problemi di sicurezza hanno ritardato l'accettazione di questa tecnologia. Infatti, a causa della presenza di liquidi organici infiammabili, gli accumulatori LION necessitano per tutte le applicazioni di precisi controlli per proteggere il pacco-batteria e le singole celle dalle sovraccariche e sovrascariche. Entrambe possono infatti comportare, in seguito ai rilasci di gas e di vapori organici in pressione, incendi o addirittura esplosioni.

Proprio per ragioni di sicurezza, i costruttori hanno adottato, oltre a robusti contenitori metallici sigillati, sofisticati e costosi, equipaggiamenti elettronici di controllo della temperatura e del livello di carica, facilitato, come si è detto, dalle significative variazioni della tensione a vuoto ai morsetti in funzione dello stato di carica.

Le celle LiON presentano una tensione nominale di 3,6 V. In relazione alla loro forma (cilindrica o prismatica) e alle dimensioni, le unità da una o più celle per le varie applicazioni presentano energia specifica di 70-110 Wh/kg (150-270 Wh/l).

Per le loro caratteristiche di ingombro (30-50% in meno) e di peso (50% in meno), queste celle hanno in parte sostituito le nichel-cadmio ed anche le Ni/MeH. Esse sono adatte ad operare in un intervallo più ampio di temperatura fra -20 e 60°C.

Le LION sono avvantaggiate inoltre da una autoscarica del 5-10% al mese (0,3% al giorno a 20°C e 4% a 45 °C) inferiore rispetto alle batterie alcaline. La loro ricarica viene completata in circa 2,5 ore, mentre quella parziale al 80 % richiede circa 1 ora. La vita dichiarata è di 600-800 cicli.

Costruttivamente l'anodo di una batteria Li-ion è costituito di strati di grafite che "trattengono" atomi di litio, mentre il catodo è a base di un suo sale (solitamente  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ).

L'elettrolita utilizza soluzioni non acquose di solventi organici a elevata costante dielettrica come il carbonato di propilene ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{CO}_3$ ) nei quali vengono disciolti sali di litio ( $\text{LiPF}_6$ ,  $\text{LiBF}_4$ ,  $\text{LiClO}_4$  e  $\text{LiAsF}_4$ ) e successivamente aggiunti altri composti organici per incrementare la conducibilità ionica delle soluzioni. Una batteria carica ha la maggior parte del litio all'interno della struttura atomica del piatto negativo.

La reazione chimica che avviene è la seguente:



e produce una differenza di potenziale nominale fra gli elettrodi di 3,6V.

Durante il processo di carica(27) il litio presente nell'elettrodo positivo si ionizza e si sposta sull'elettrodo negativo, mentre durante la scarica si ha il processo opposto (processo di intercalazione) e il composto iniziale si ricrea. Una volta terminata la carica la maggior parte degli ioni di litio si trova sull'elettrodo negativo.

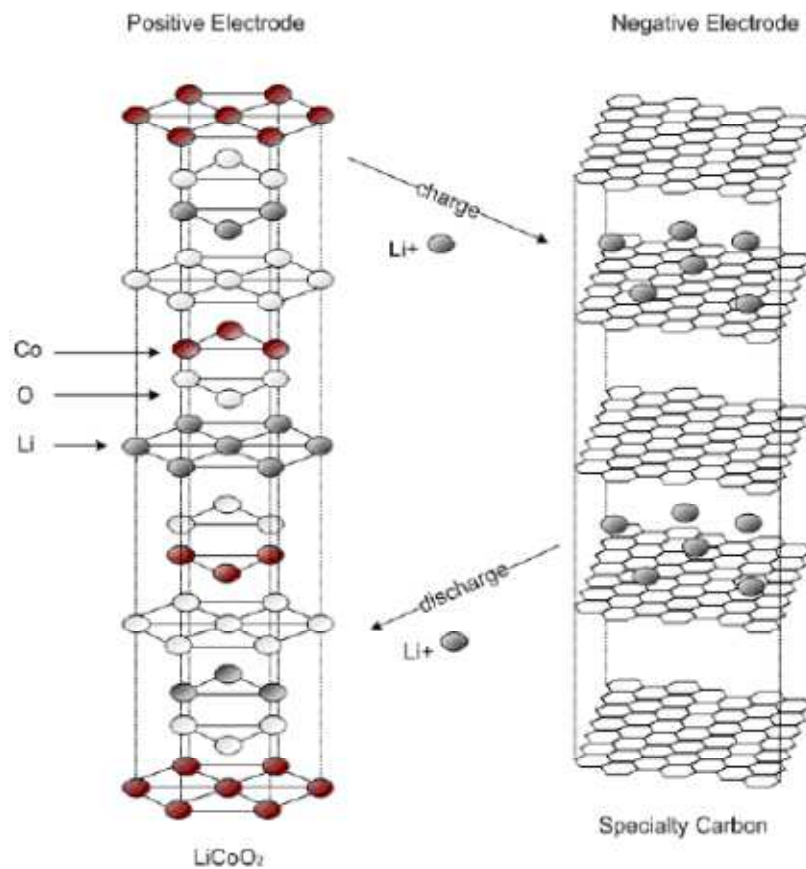


Fig.27: Flusso degli ioni di Li<sup>+</sup> all'interno dell'elettrolita, a seconda che ci si trovi nella fase di scarica o di carica della batteria.

Le celle agli ioni di litio, non formano normalmente litio metallico durante la carica o la scarica, infatti in condizioni operative normali, il litio sotto forma di ione si muove dentro e fuori della struttura dei materiali attivi che rappresentano l'anodo ed il catodo. Gli ioni di litio, sono ridotti elettrochimicamente nell'anodo di grafite.

Nel catodo, formato da ossido di litio e metallo, il litio rimane nella forma di ione. Il materiale che forma il catodo, è sottoposto ad un cambio di stato di ossidazione reversibile. Poiché il materiale del catodo è sottoposto ad un cambiamento elettrochimico e non ad una reazione chimica, la degradazione del materiale è poco probabile.

In aggiunta, i materiali attivi nelle batterie agli ioni di litio, sono insolubili nell'elettrolita organico. Questo elimina il possibile problema della ricristallizzazione in strutture cristalline più grandi, le quali hanno bassa diffusività ionica. Per questo motivo, le celle in esame possiedono potenzialmente una vita estremamente lunga e non hanno l'effetto memoria, tipico di altri tipi di batterie.

Oltre ai principali componenti delle celle appena trattati, è necessario prendere in considerazione anche il collettore. Il collettore è rappresentato da un elettrodo di rame o alluminio che si trova a contatto con i materiali attivi e si estende in verticale su tutta la cella. Lo scopo del collettore è quello di prelevare gli elettroni prodotti dalla reazione su tutta l'altezza della cella e trasportarli sul circuito elettrico esterno. I collettori sono fatti di materiale conduttore: rame o alluminio, per fare in modo che la caduta di tensione tra due punti dello stesso sia la più piccola possibile.

Le celle agli ioni di litio possono essere suddivise principalmente in due gruppi, secondo il tipo di materiale utilizzato per il catodo.

#### **4.2.6.2 ACCUMULATORI LITIO-POLIMERI[10]**

Le celle litio polimeriche del tipo a elettrolita gelificato sono decisamente recenti e note soprattutto per essere in grado di operare a temperatura ambiente. Esse, proprio perchè costituite da film plastici flessibili, si adattano a tutte le forme richieste per i vari dispositivi elettronici e consentono un processo di manifattura più semplice e, in prospettiva, meno costoso.

Inoltre le celle polimeriche sono avvantaggiate da uno spessore minore rispetto alle LION. La riduzione da 5-6 mm a solo 3-4 mm delle nuove batterie consente l'impiego di un contenitore sigillato più leggero.

Le celle polimeriche sono generalmente considerate più sicure delle LION, perchè il loro elettrolita gelificato, meno reattivo di quello liquido, non viene rilasciato anche nelle eventualità di sovraccariche e sovrascariche. Dunque, anche la minore necessità di sistemi di controllo le rende più competitive dal punto di vista economico.

Le batterie litio polimeriche presentano in genere 200-250 Wh/l e 120-130 Wh/kg, con 500-1000 cicli di vita.

Un'analisi costruttiva determina che l'elettrodo positivo è a base di ossidi di vanadio (VO<sub>x</sub>), mentre l'elettrolita è costituito da una soluzione di un sale di litio (Li(CF<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>N) in un solvente polimerico. Le celle, ottenute per laminazione dei componenti presentano uno spessore di 100 µm con avvolgimento a spirale.

Le batterie litio-polimeriche si stanno sviluppando anche per applicazioni stazionarie (circa 110 Wh/l).

#### 4.2.7 ACCUMULATORI REDOX

##### 4.2.7.1 BATTERIE REDOX A FLUSSO

Le batterie redox(26) convertono l'energia chimica contenuta in un elettrolita liquido in energia elettrica. Esse utilizzano, per principio, reazioni accoppiate di ossido-riduzione in cui sia i reagenti, sia i prodotti di reazione, in forma ionica, sono completamente disciolti in soluzione acquosa. Le soluzioni del catodo e dell'anodo sono separate in cella da una membrana in modo da evitarne il mescolamento e quindi l'autoscarica.

Le prime celle utilizzavano soluzioni di ferro e cromo: in questo caso, le reazioni di ossidoriduzione

interessano le coppie  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  al polo positivo e  $\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}^{2+}$  al negativo, in forma di cloruri, con aggiunta di HCl come elettrolita di supporto. Il potenziale a circuito aperto è di 1,2 V al 50% di carica. Nelle batterie di seconda generazione al vanadio (VRB: Vanadium Redox Battery), hanno luogo le seguenti reazioni di semicella:

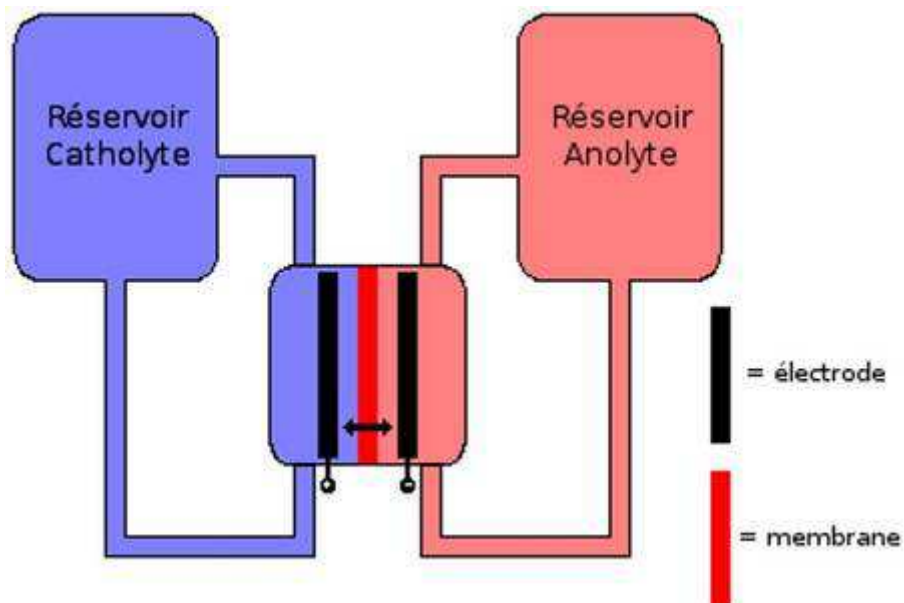
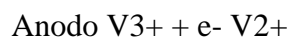
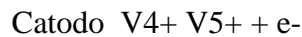


Fig. 28 : Schema di funzionamento di un accumulatore REDOX

#### 4.2.7.2 ACCUMULATORE REDOX AL VANADIO

Il principale vantaggio del sistema VRB rispetto a quello precedente è che l'eventuale diffusione delle soluzioni attraverso la membrana non compromette la ricarica dell'elettrolita.

Quest'ultimo presenta dunque concettualmente una durata indefinita di vita.

Lo schema di un sistema redox a flusso è mostrato nella figura su riportata. La sezione di accumulo è formata da due serbatoi indipendenti dell'anolita ( $V^{3+}/V^{2+}$ ) e del catolita ( $V^{5+}/V^{4+}$ ).

Il loro volume e la concentrazione delle specie redox nelle soluzioni condizionano la quantità di energia immagazzinata. La potenza del sistema è determinata dalla superficie della membrana che condiziona "l'intensità" dello scambio ionico. I sistemi di accumulo redox non presentano particolari problemi di sicurezza. Tuttavia, lo sviluppo di idrogeno in carica al polo negativo, anche se contenuto con materiali elettrodici ad alta sovratensione, non può essere escluso.

In generale, per le loro caratteristiche intrinseche, i sistemi di accumulo redox a flusso presentano, rispetto agli accumulatori convenzionali, i seguenti vantaggi:

- la loro durata di vita è, in linea di principio, illimitata.
- l'energia accumulata è completamente indipendente dalla potenza erogata.
- le celle rimangono sempre equalizzate, perchè percorse dalle stesse soluzioni.
- le batterie redox, non richiedono particolari sistemi di raffreddamento.
- le batterie VRB sono adatte alla ricarica meccanica, cioè al ricambio per via idraulica delle soluzioni esaurite con quelle fresche.

Sempre in termini concettuali, i sistemi redox presentano anche delle limitazioni:

- la necessità di flussare le soluzioni, e quindi di pompe, comporta consumi di energia;
- la circolazione idraulica in parallelo attraverso le celle, tra loro collegate elettricamente in serie porta ad una sorta di auto scarica.
- la presenza di parti meccaniche in movimento introduce un elemento di inaffidabilità da valutare;

#### 4.2.8. BATTERIA ALLUMINIO-ARIA

È in via di sviluppo; potenzialmente ha venti volte la densità d'energia delle migliori batterie ricaricabili ma necessita di ulteriori sviluppi, in quanto non si è ancora riusciti a superare il rendimento del 50%, ben al di sotto del massimo teorico.

#### 4.3 ACCUMULATORI DI TIPO ELETTROSTATICO (SUPERCONDENSATORI) [9](29).

Questi dispositivi di accumulo si fondano sulla separazione di carica fra due piastre elettrodiche immerse in un elettrolita, basata in genere, su processi superficiali capacitivi di doppio strato.

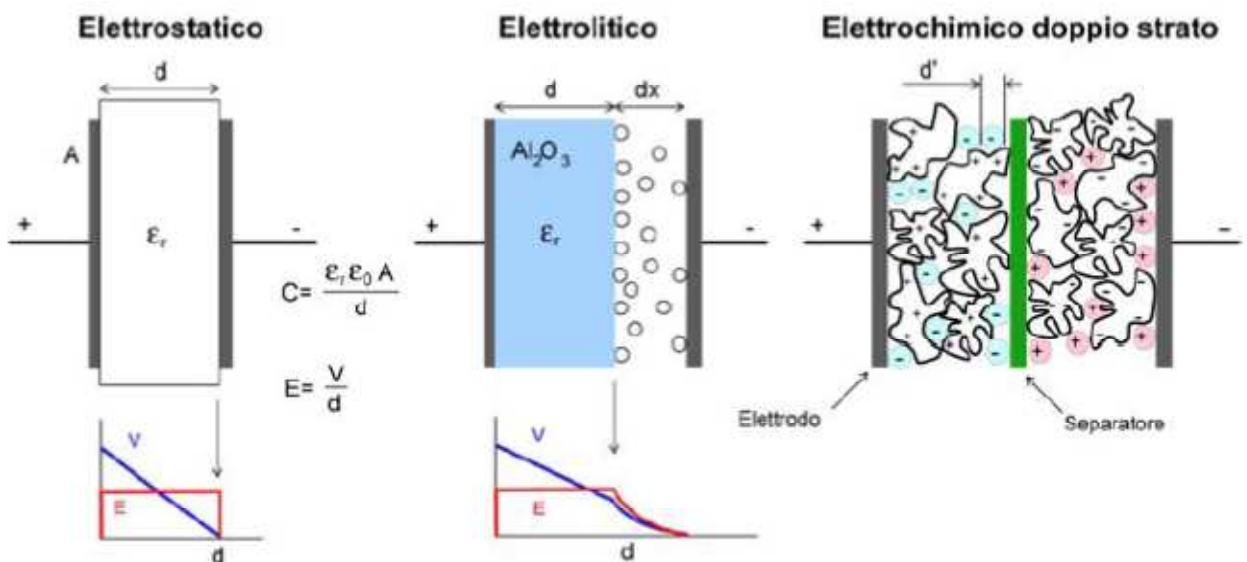


Fig. 29 : differenze di principio di funzionamento tra condensatori tradizionali, ad ossido di alluminio o supercondensatori.

Da un punto di vista concettuale i supercapacitori non differiscono dai condensatori convenzionali, se non per le loro superiori prestazioni (fig. 29).

Poichè i condensatori elettrochimici sono caratterizzati da processi unicamente di trasferimento di carica molto rapidi, che interessano solo la superficie dei materiali elettrodici, l'energia specifica accumulabile è inferiore a quella delle batterie, ma è disponibile in una scala di tempi molto più brevi, quindi con potenze specifiche elevate. Nei SC, dove non si verificano modifiche dei materiali elettrodici, sono dunque possibili centinaia di migliaia di cicli di carica-scarica, con efficienze energetiche molto elevate.

L'unità fondamentale, la cella, comprende due elettrodi separati da un elettrolita, che funziona da dielettrico. Essi sono normalmente costituiti dallo stesso materiale, caratterizzato da una grande



## Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

area superficiale per garantire un'elevata capacità specifica in termini di peso e di volume. I materiali elettrolici più comunemente usati sono a base di carboni attivi e di ossidi.

Un'elevata conducibilità elettronica è indispensabile per limitare la resistenza interna e garantire quindi un'elevata potenza.

I capacitori possono apportare benefici per tutte le applicazioni a potenza variabile compresi i DVR analizzati nel capitolo 3. Va notato poi che mentre un sistema di accumulo tradizionale fornisce la potenza di base, il SC è disponibile a soddisfare i picchi di potenza richiesti. In questo modo, esso permette alle altre sorgenti di potenza, ad es. accumulatori elettrochimici, di operare in maniera più efficiente con effetti positivi anche sulla loro vita.

Una prospettiva attraente riguarda la trazione elettrica stradale, dove il supercapacitore, di peso e volume contenuto, è previsto come elemento di interfaccia fra il motore elettrico e la batteria per livellare i picchi di potenza ad essa richiesti.

Il target per un SC destinato ad un veicolo elettrico di medie dimensioni, è:

- massa inferiore ai 100 Kg
- volume < 45 l
- energia immagazzinata di 500 Wh
- 60 kW di potenza durante un ciclo medio di scarica di 20-50 s
- efficienza energetica globale maggiore del 95%.

Va comunque notato che un supercondensatore presenta nei confronti dei tradizionali capacitori dei limiti relativi alla totale potenza accumulabile per ogni ciclo(tab 15).

Tipo	Densità di energia [Wh/kg]	Densità di potenza [W/kg]	Durata (cicli di carica)
Accumulatore elettrochimico	50-160	100-400	300-2000
Accumulatore elettrostatico	5-10	10000-30000	<1000000

Tab. 15 : confronto fra sorgenti di energia elettrochimica e sorgenti elettrostatiche

La chiave per spiegare le eccezionali capacità dei supercondensatori sta nel principio di funzionamento descritto prima: l'energia immagazzinata è superiore rispetto ad un condensatore

classico poiché la separazione di carica si ha nel doppio strato elettrochimico che avviene a distanze di scala molecolare.



Fig. 30 : supercondensatore reperibile in commercio.

Per la maggior parte delle applicazioni i supercondensatori vengono forniti già assemblati in “moduli” formati di singole celle connesse in serie e parallelo, per aumentare sia la tensione di lavoro, sia la capacità complessiva.

La struttura viene incapsulata per ottenere robustezza meccanica e grado di isolamento da umidità e polvere, e completata con sistemi di bilanciamento della tensione sulle singole celle di tipo dissipativo, che nel caso più semplice, sono costituiti da semplici resistori.

#### **4.4 IL CONTROLLO DELLE BATTERIE[10][13]**

Il controllo elettronico delle batterie è una pratica necessaria e fondamentale sia allo scopo di preservare quest’ultime dagli stress e dai guasti, consentendo di conseguenza una più lunga durata di esercizio, e un miglior sfruttamento della potenza ottenibile sia in condizioni di normale esercizio che nei momenti in cui la potenza richiesta è più elevata.

I principali fattori di rischio per le batterie, di qualunque tipo esse siano, sono la sovraccarica o la scarica troppo profonda. Il primo fenomeno può portare alla distruzione della batteria (se al litio)

o alla creazione di gas pericolosi (se al piombo), mentre il secondo può condurre ad una riduzione permanente della capacità massima immagazzinabile. In entrambi i casi comunque si ha un deterioramento delle prestazioni degli accumulatori.

Il controllo dello stato di carica delle batterie (SoC, *state of charge*) è indispensabile quindi, per assicurare un corretto utilizzo degli accumulatori.

In un veicolo ibrido le batterie sono sempre connesse in serie per poter disporre di una tensione sufficientemente elevata. Il controllo dello stato di carica deve essere effettuato per ogni singola cella del pacco.

#### 4.4.1 STATO DI CARICA DELLE BATTERIE.

Esistono diverse tecniche per determinare lo stato di carica di una batteria, di seguito verrà riportata una breve panoramica sulle tecniche più diffuse.

##### 4.4.1.1 MODELLI CIRCUITALI[7].

Il comportamento di una batteria può essere descritto sulla base di diversi modelli circuitali che comprendono, oltre alla resistenza interna serie, anche altri elementi parassiti di tipo capacitivo e induttivo di minor rilevanza(29). Attraverso questi modelli, è possibile, misurando alcuni parametri, ricavare una stima dello stato di carica. Il modello che descrive una batteria al litio, ad esempio, è costituito oltre che da un generatore di tensione, da una resistenza serie e da altre resistenze accompagnate da capacità che dipendono dalla superficie dell'elettrodo (CPE, *constant phase element*), e da un'induttanza serie.

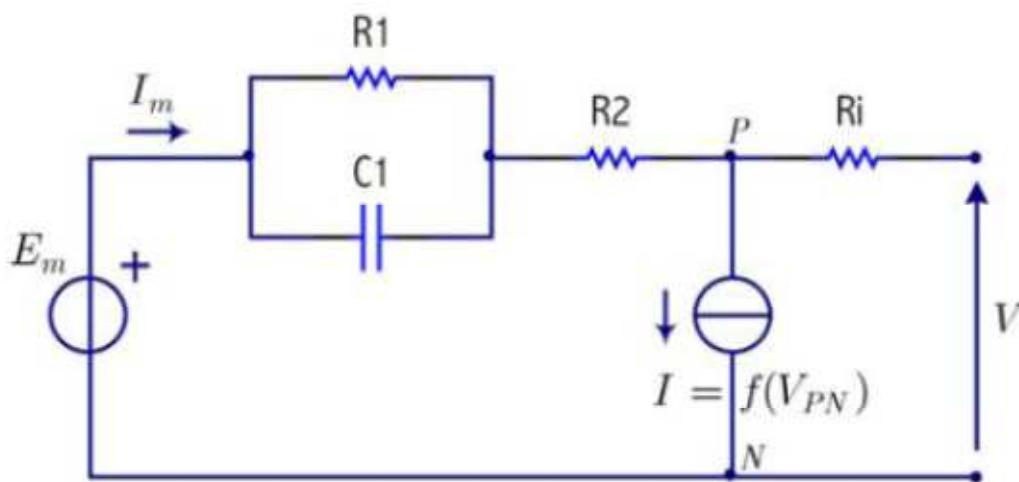


Fig. 31 : Modello circuitale di una batteria al litio.

#### 4.4.1.2 METODI COULOMETRICI.

Con questo nome si identificano tutte quelle metodologie per la determinazione dello stato di carica che si basano sulla valutazione della carica estratta dalla batteria durante il processo di scarica; il più semplice fra essi prevede l'integrazione della corrente.

La carica estratta dall'istante iniziale all'istante  $T$ , è dato dalle relazione:

$$Q = \int i t dt$$

Integrato fra 0 e  $T$

dove  $i(t)$  è la corrente estratta dalla batteria (positiva se uscente).

Gli ampère-ora estratti risultano allora

$$Ah = Q / 3600 .$$

La corrente di scarica media  $I_{med}$  si può ricavare come rapporto tra la carica estratta  $Q$  ed il tempo  $T$ . Sulla base di questi parametri si può quindi stimare lo stato di carica con diversi approcci.

#### 4.4.1.3 METODO DELLA MISURA DELLA RESISTENZA INTERNA.

La misura di questa grandezza deve essere effettuata in condizioni stazionarie, cioè a fenomeni transitori esauriti e più misure devono essere separate da un breve intervallo di tempo: infatti, le condizioni della batteria sono in continuo ma lento mutamento, per cui solo nel caso di misure ravvicinate si può ritenere trascurabile la variazione dello stato di carica durante l'intervallo di misurazione.

L'importanza della determinazione della resistenza interna non risiede solo nella necessità di tenerne conto per ricavare il potenziale a vuoto della cella ma anche e soprattutto per la determinazione dello stato di carica.

Per gli accumulatori agli ioni di litio la resistenza avrà un andamento pressoché costante per il 90% del tempo di scarica e un rapido incremento nella fase finale.

#### **4.4.1.4 METODO DELLA MISURA DELLA TENSIONE A VUOTO.**

Esiste un legame tra la tensione a vuoto fornita da una batteria e il suo stato di carica: essa infatti diminuisce al diminuire dello stato di carica e si potrebbe pensare di utilizzare questa grandezza per stimare lo stato di carica.

Anche in questo caso però è necessario ricavare una serie di coefficienti che indichino la relazione fra le due grandezze per via sperimentale. In ogni caso il problema principale di questa soluzione è sua la scarsa precisione.

#### **4.4.1.5 METODO DELLA MISURA DELLA TENSIONE DI CELLA.**

Esistono relazioni empiriche che permettono di calcolare per batterie agli ioni di litio, ma anche per altri tipi di accumulatori, lo stato di carica di una cella a partire dalla tensione cui si trova in un determinato istante.

Di seguito è riportata una delle possibili formule applicabile:

$$\text{SoC} = 100 \cdot \{0.1966 + [ 0.0387 - 1.4523 \cdot (3.7835 - V_{\text{cella}}) ]\}$$

Si tratta di relazioni non lineari particolarmente onerose dal punto di vista computazionale.

#### **4.4.2 EQUALIZZAZIONE DELLE BATTERIE**

L'equalizzazione dello stato di carica delle batterie è particolarmente importante in tutte quelle applicazioni che producono elevati gradienti di corrente di carica/scarica.

Va sottolineato che, sia per le batterie al piombo acido, sia per quelle al litio, sia per quelle al nichel metallo idruro, è importante che la carica avvenga a tensione inferiore ad un valore di sicurezza che danneggerebbe irreparabilmente l'accumulatore.

Tenere sotto controllo la tensione(15) complessiva della stringa di batterie non è sufficiente, perché causa dispersione dei parametri, celle nominalmente uguali, possono possedere caratteristiche leggermente diverse. Ad esempio una cella con una capacità ridotta o una resistenza interna maggiore tende ad avere una variazione di tensione maggiore e quindi è più facilmente soggetta guasti per sovratensione rispetto le altre che compongono il blocco.

## Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

Tipo di batteria	Limite massimo di tensione [V]
Piombo-acido	2.3-2.4
Ni-Cd	1.50
Ni-MH	1.45
Litio	4.2-4.3

Tab. 15 :limiti di tensione di cella nelle batterie più diffuse sul mercato.

Per le motivazioni espresse, durante i cicli di carica alcune batterie potrebbero raggiungere prima delle altre la tensione finale di carica, in questo caso è indispensabile impedire a queste celle di continuare il processo. La tecnica più semplice consiste nell'arrestare la carica appena la prima delle celle raggiunge la completa carica, tuttavia così facendo il processo si interromperebbe con alcune batterie non ancora completamente cariche, inoltre nei successivi cicli la differenza tenderebbe a peggiorare.

Un tecnica di equalizzazione efficace deve invece permettere a tutti gli elementi di raggiungere la tensione di carica finale inibendo la carica alle celle già completamente cariche.

I metodi di equalizzazione di questo tipo si possono dividere in due categorie:

- **Equalizzazione passiva.** L'energia immagazzinata in eccesso nelle batterie viene dissipata attraverso dei dispositivi passivi connessi in parallelo ad ogni singola cella.
- **Equalizzazione attiva.** L'energia immagazzinata in eccesso nelle batterie viene ridistribuita alle altre celle a minor tensione.

### 4.4.2.1 EQUALIZZAZIONE PASSIVA[8](32).

Con questa tecnica ogni cella ha in parallelo la serie composta da un resistore e da un elemento di commutazione. Gli interruttori vengono comandati da una logica di controllo che chiude selettivamente le batterie già cariche sulle rispettive resistenze permettendo la dissipazione dell'energia in eccesso.

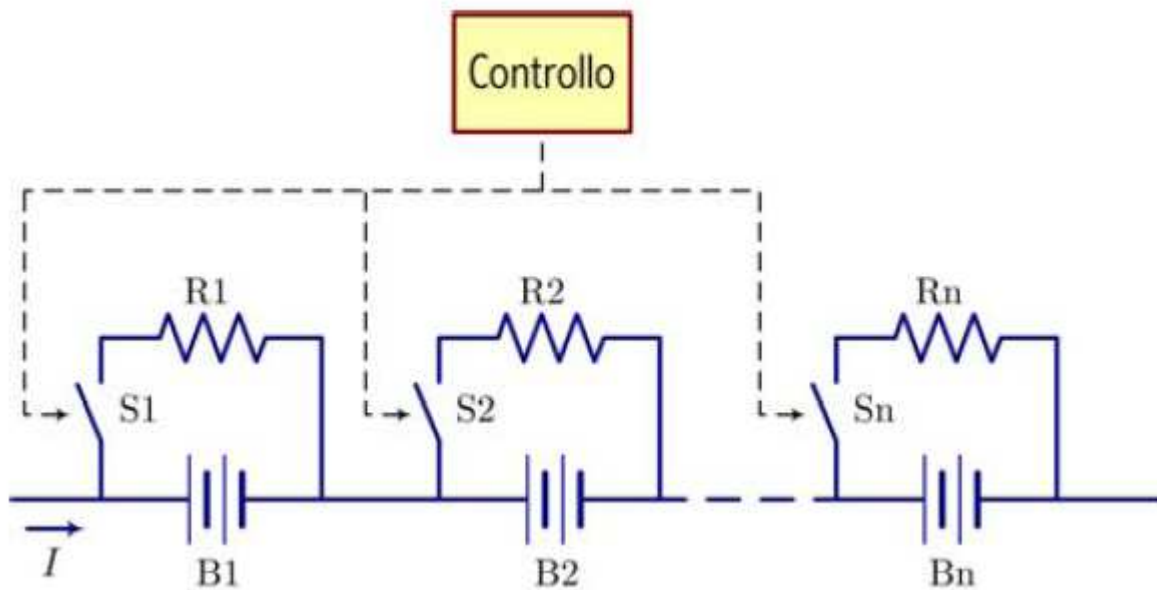


Fig. 32 : Equalizzazione passiva della batteria. Ogni cella viene baipassata una volta raggiunta la tensione richiesta.

I principali vantaggi di questa tecnica sono il basso costo, la semplicità circuitale e realizzativa, la velocità nella equalizzazione. Gli svantaggi sono la richiesta di resistenze in grado di dissipare potenze che possono essere anche notevoli e la necessità di avere interruttori capaci di interrompere correnti elevate; queste esigenze limitano il campo di utilizzo ad applicazioni di potenza medio-bassa.

#### 4.4.2.2 EQUALIZZAZIONE ATTIVA[8].

L'equalizzazione attiva delle celle permette di avere una efficienza energetica maggiore in quanto l'energia immagazzinata dalla cella più carica non viene dissipata ma ridistribuita alle altre celle; per questa ragione vengono utilizzati elementi non dissipativi quali condensatori, induttori o trasformatori.

Esistono due tipi di tecniche di equalizzazione attiva: a spostamento di carica e a convertitori di energia.

##### - Spostamento di carica(33)

Questa tecnica consiste in un meccanismo di rimozione di parte della carica presente in una cella con carica in eccesso, l'immagazzinamento in un condensatore, e la ricarica di un secondo elemento.

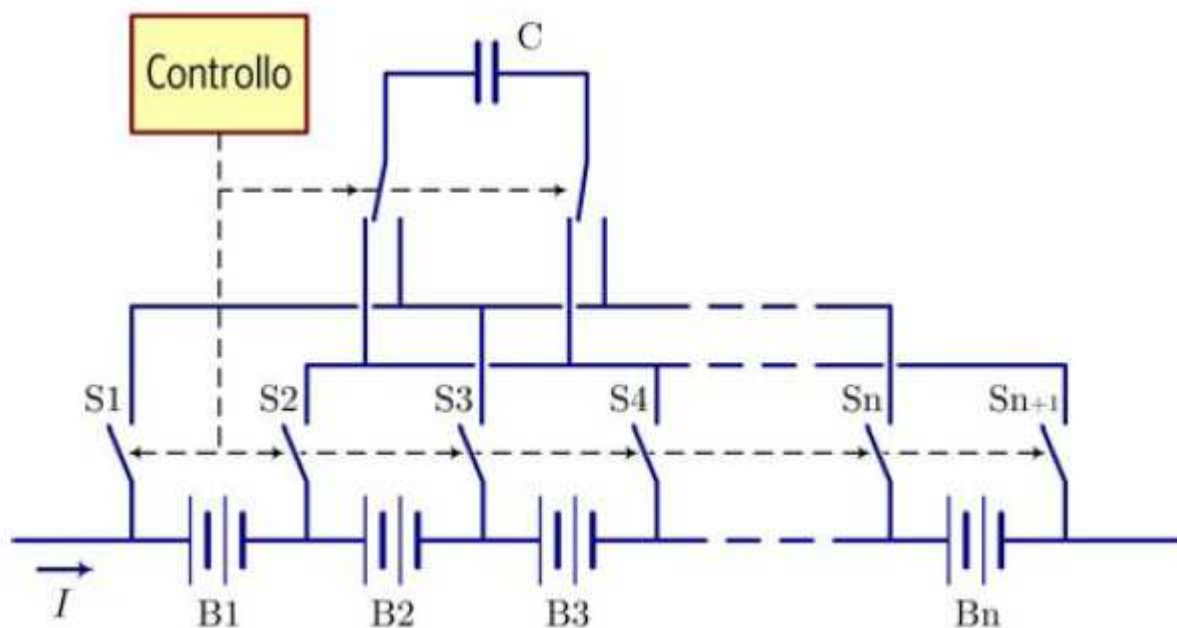


Fig. 33 : Schema di funzionamento di un sistema di equalizzazione che sfrutta il principio dello spostamento di carica fra le celle a più alto potenziale e un condensatore posto in derivazione a queste.

- **Convertitori di energia(34),(35).**

Questa seconda tipologia di equalizzazione si basa sulla conversione di energia svolta da elementi quali induttori e trasformatori per spostare energia da una cella ad un'altra, si hanno due tipi principali di energy converters: switched transformer e shared transformer.

Il metodo switched transformer adotta una struttura simile a quella del flying capacitor dove al posto del condensatore vi è inserito un trasformatore.



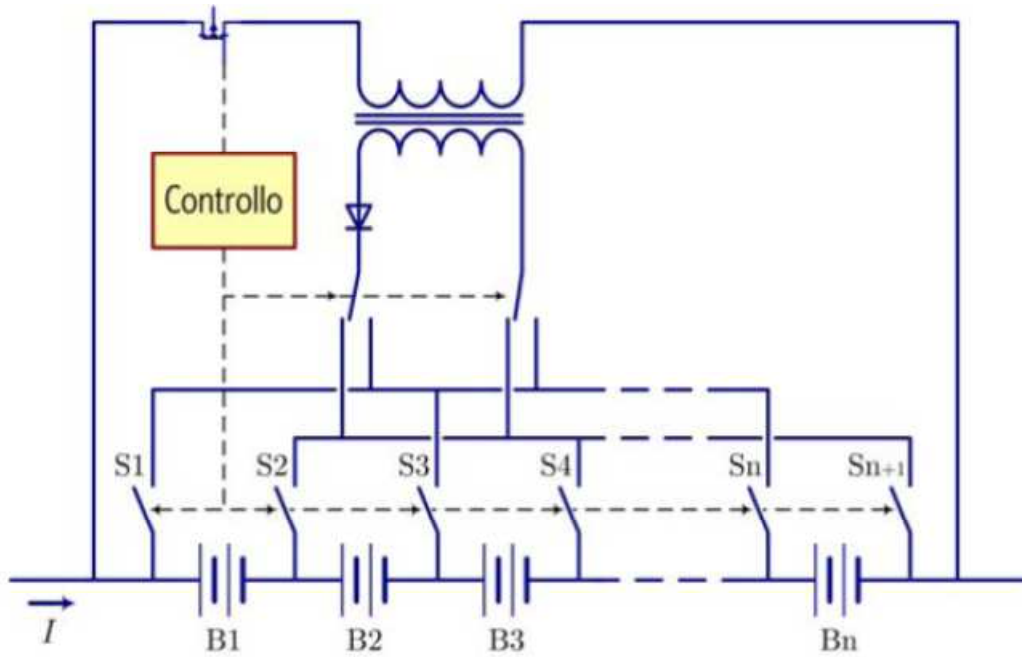


Fig 34 : Equalizzazione delle celle mediante un convertitore a energia del tipo switched transformer

Questo tipo di equalizzazione permette un rapido bilanciamento di un pacco multiplo di celle con una minima perdita. I principali svantaggi sono la complessità del circuito magnetico e l'assoluta mancanza di modularità. Una variante di questo circuito consiste nell'utilizzo di un trasformatore per ogni cella, in questo modo la struttura si presenta più modulare ma si ha un aumento di costo e ingombro.

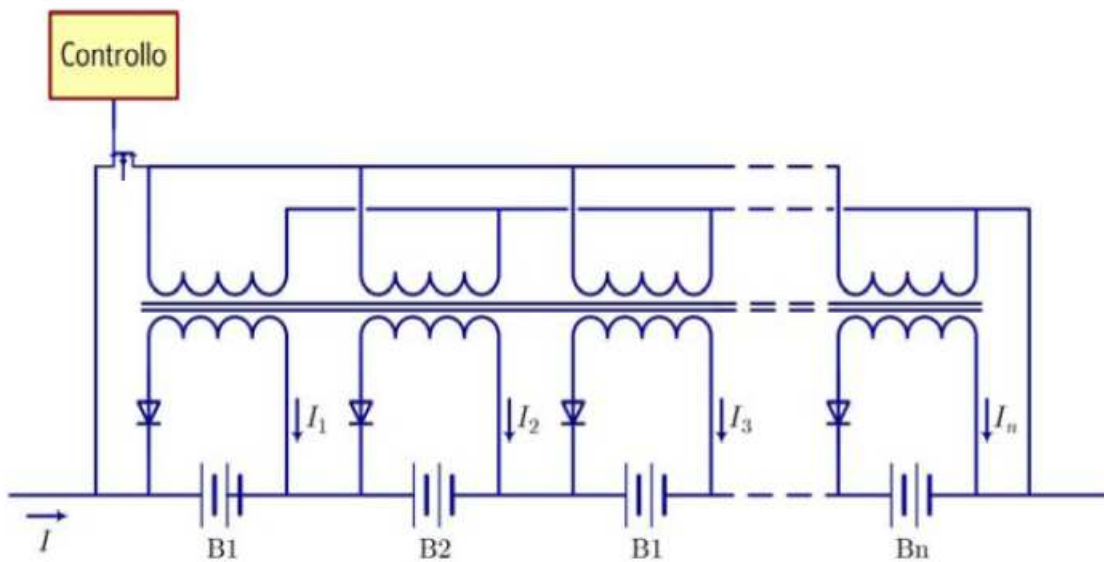


Fig. 3

Fig. 35 : Equalizzazione della carica delle celle di un accumulatore elettrochimico tramite il metodo dello shared transformer.

# CAPITOLO 5

## ANALISI STATISTICA DELLE INTERRUZIONI DI TENSIONE RELATIVE L'ANNO 2009

### 5.1 PRESENTAZIONE DELLO STUDIO.[3][4]

Nel presente capitolo ci si propone di effettuare uno studio relativo alle interruzioni di potenza avvenute nell'anno 2009 in tre zone di interesse rilevante nel nostro paese.

La trattazione ha il fondamentale scopo di fornire un'analisi di fattibilità per quanto riguarda l'applicazione pratica dei sistemi di compensazione di potenza accennati nel capitolo 3. In modo particolare, si vorrà calcolare in che modo, per quale casistica, e con quale incidenza i sistemi di compensazione potranno attenuare o addirittura eliminare i disturbi associati ai distacchi imprevisti della rete.

La compensazione dei disturbi di rete dovrà tenere conto sia della velocità di risposta che delle potenzialità di un sistema che preleva la sua energia da accumulatori statici aventi diverso livello di carica.

La trattazione, come già accennato, tiene conto della divisione che il gestore della rete elettrica TERNA ha preso in considerazione per la classificazione zonale dei diversi distacchi. L'Italia quindi, è stata divisa in otto macrozone, e per ogni macrozona sono state registrate tutte le interruzioni dell'alimentazione, sia pubbliche che private, classificate in base alla località di avvenuto guasto e al gestore della cabina e dove il distacco ha avuto luogo, i dati raccolti sono invece stati l'ora di inizio del distacco, la tensione, la potenza non fornita, l'energia e la durata del disservizio.

## 5.2 ANALISI

Avendo a disposizione un gran numero di dati, si fornisce un'analisi statistica di tali avvenimenti, prendendo come esempio tre zone tipicamente rappresentative delle diversità che ancora oggi attraversano il nostro paese. Si sono perciò analizzate tutte le interruzioni pubbliche avvenute dal primo gennaio e al trentuno dicembre 2009 nelle aree lombarda, laziale e campana.

### 5.2.1 ELENCO DEI DATI RACCOLTI[10]

In questo paragrafo verranno immesse le tabelle relative alla raccolta dei dati delle tre macroaree enunciate prima.

#### -Tabelle della potenza non fornita

Tab 16 Potenza degli impianti pubblici soggetti a interruzione di alimentazione.

Potenza in MW delle interruzioni nell'area Nord

4	5	5	4	30
1	8	54	6	3
2	17	7	13	6
2	11	5	18	
24	6	6	1	
11	49	10	1	
12	65	15	1	
21	61	14	58	
6	43	5	9	
18	1,7	26	2	
6	83	16	1	

Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

Tab.17 Potenza in MW per le interruzioni avvenuta nella macrozona Sud

20	2,3	46,5	5,8	11	9,2	18,5	1,6	9,4	13
19,66	14,4	12,5	3,7	18	10	8,5	4,2	4,4	17
4,3	7,5	15,5	2,9	2	10	18,5	9,01	17,7	5,5
17,1	24,2	0,1	0,2	3	6	8,5	9,6	7,1	9,1
17,1	28,2	0,1	11,5	1,3	6,2	20	4,5	6,6	40,5
0,4	40	0,6	11,7	2,5	23	8	20,5	6,9	16
7,2	16	1,8	0,5	5	12	18	14	8	1,7
8	39	3,7	7	44	10,85	4,8	7,5	16,5	1
8,8	20	1,8	6	360	3	10,5	12,5	13,5	5,6
11,5	20	3	4,2	1,6	8	4,8	12,5	3	7,3
1	6,5	3,8	2	50	24	5,07	4	5	380
4,7	28,5	1	15,5	8	5	3,05	9	16	6
10	9,6	190	5	5	5	20	4	3,5	4
1	11,5	12	6,5	9,2	5	20	2,2	13	1
10	7,7	8,4	28,5	6	31	20	2	6	12
21	9	5	42	15	10	10	24	20,5	9
3	13	1,8	121	20	20	12,5	26	1,8	5
16	3,4	0,6	78	15	4,5	12	1,25	5	4
2	2,7	2,4	43,5	10	3,5	12	1,5	5	1
2	0,5	7	14	0,8	1	45	10,8	11,5	6
2	5	34	8,8	4	10,5	49	7,2	2,7	4
2	7,5	22	7	23	3	50	0,15	17	1
30	36	3	11	18,5	1,6	362	2,25	29	5
50	0,65	11	18	8,6	15,5	53	2,2	29	22
50	6,1	9	13,5	17	1,8	48	2,1	19	6,5
2,4	15,4	4	26,4	1	40	11,6	16	13	2,5
28	13,2	12	15	2,6	21	3,8	2,4	14,3	2,2
									10

Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

Tab. 18 Potenza in MW delle interruzioni relativa la macrozona Centro

40	33	13	14,5	5	18	20	4
20	9	2,5	30	10	1	5	4
40	9	6	20	3,6	18	2	12
80	17	23	30	1	10	1	10
8	8	2	20	2	11	6	7
4	4,5	14	8	2	3,4	6	3,5
14	14	3	1,3	2,5	4	16	4,2
14	14	15	1	4	0,5	15	9
14	45	13	4	30	4,3	5	3
14	7	13	16,5	9	1,6	5	17,8
16	8	2	5	18	10	7	2,5
5	15	15	2	4	4,3		

**-Tabelle dell'energia non fornita.**

Tab.19 energia non fornita (MWh) durante le interruzioni di alimentazione nella macrozona Nord.

0,18	0,33	0,2
0,2	1,25	0,1
0,35	1,17	0,43
0,07	1,83	0,3
0,07	0,43	0,03
0,43	0,53	0,03
0,5	0,5	0,19
1,2	1	16,8
0,3	0,03	0,15
1,1	0,15	1,42
0,33	0,08	0,2
2,7	1,47	30,22
0,93	1,42	40,08
0,1	1,38	37,62
0,1	0,4	26,52
0,03	0,07	0,07

Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

Tab.20 energia non fornita (MWh) durante le interruzioni di alimentazione nella macrozona Sud.

0,18	0,1	1,38	0,03	0,04	0,06	0,25	0,21	0,3
0,2	0,33	0,4	0,15	0,17	0,11	1,2	0,13	0,26
0,35	1,25	0,2	0,14	2,65	0,14	0,02	1,29	0,14
0,07	1,17	0,1	0,07	1,55	0,13	0,16	0,33	0,07
0,07	1,83	0,43	0,08	0,33	0,54	0,2	0,33	0,14
0,43	0,43	0,3	3,6	0,98	0,27	0,19	0,48	0,67
0,5	0,53	0,03	2,65	0,08	0,1	0,19	0,7	0,07
1,2	0,5	0,03	0,43	0,06	0,15	0,15	2,02	0,13
0,3	1	0,19	0,1	0,02	0,43	0,01	1,3	
1,1	0,03	0,01	0,13	0,22	0,05	0,58	1,45	
0,33	0,15	0,15	0,9	0,18	0,11	0,59	0,04	
2,7	0,08	1,42	0,6	0,05	0,09	0,02	0,08	
0,93	1,47	0,2	0,02	0,03	0,02	0,35	0,11	
0,1	1,42	0,07	0,15	0,48	0,17	0,3	0,17	

Tab.21 energia non fornita (MWh) durante le interruzioni di alimentazione nella macrozona centro

0,12	0,23	1	0,08	0,25	0,42	0,03	0,89
16,4	0,23	1	0,77	0,067	0,55	6,97	0,13
1,2	0,27	1,5	0,03	0,67	0,03	0,18	0,07
0,48	0,25	3,5	0,23	0,33	0,15	0,28	0,07
0,67	0,25	0,07	0,08	0,03	0,34	0,08	
0,67	0,33	0,07	0,01	0,07	0,39	0,57	
1,33	0,24	0,02	0,05	0,03	4,2	0,05	
4	1,08	0,13	1	0,2	0,47	0,07	
0,4	0,2	1,38	0,43	0,02	0,53	0,07	
1,33	0,03	0,08	0,43	0,27	0,025	0,5	
0,23	0,07	0,07	0,07	0,75	0,3	0,23	
0,23	1	0,65	0,45	0,09	0,02	0,23	

### 5.2.2 ELABORAZIONE STATISTICA DEI DATI RACCOLTI.

Ci si propone ora di esporre i grafici e i risultati ricavati dall'elaborazione statistica dei dati raccolti, si è ipotizzata una distribuzione casuale della variabili aleatorie, ossia la potenza e la durata dei guasti venuti a verificarsi durante l'arco dell'anno.

Tramite la media e la deviazione standard calcolate in base alla zona di accadimento del guasto, si è poi potuto (grazie alla discreta quantità dei rilievi) costruire il modello di una gaussiana, sulla base di questo grafico poi, si è potuto dividere in intervalli di confidenza l'insieme delle misurazioni effettuate.

Quest'operazione ci ha permesso di verificare, a fronte di un evento negativo su una cabina o una rete di distribuzione, la probabilità di avere un certo valore di potenza/energia interessata piuttosto che un altro, potendo quindi stabilire un intervallo di valori in cui è plausibile che si attesti un eventuale guasto su linee di distribuzione.



**ELABORAZIONE DEI DATI INERENTI ALLA POTENZA NON FORNITA**

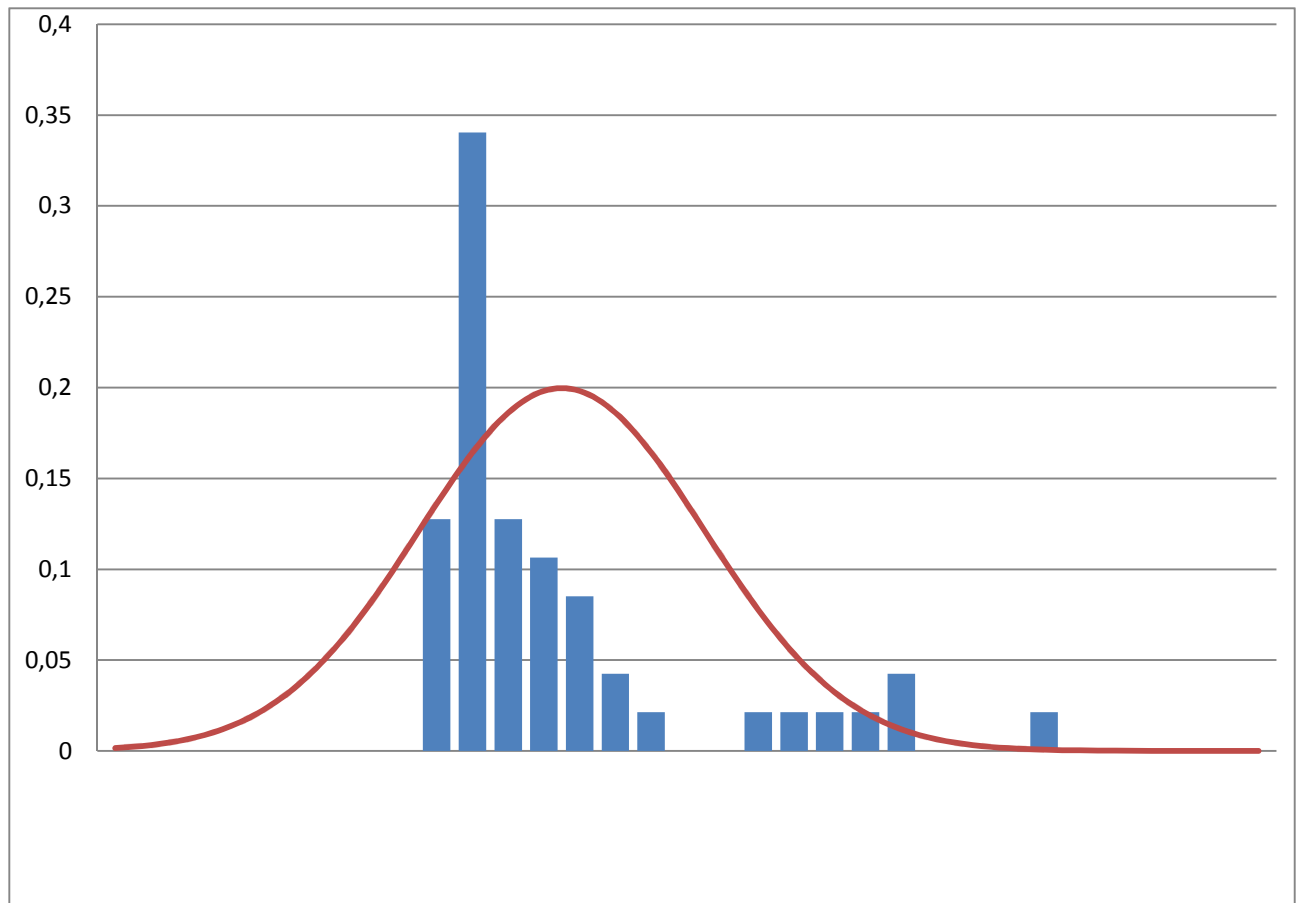


Fig. 36 Macrozona Lombardia

Media = 16.44 MW

Deviazione standard = 19.62 MW

N° di campioni = 47

Massimo = 83 MW

Minimo = 1 MW

Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

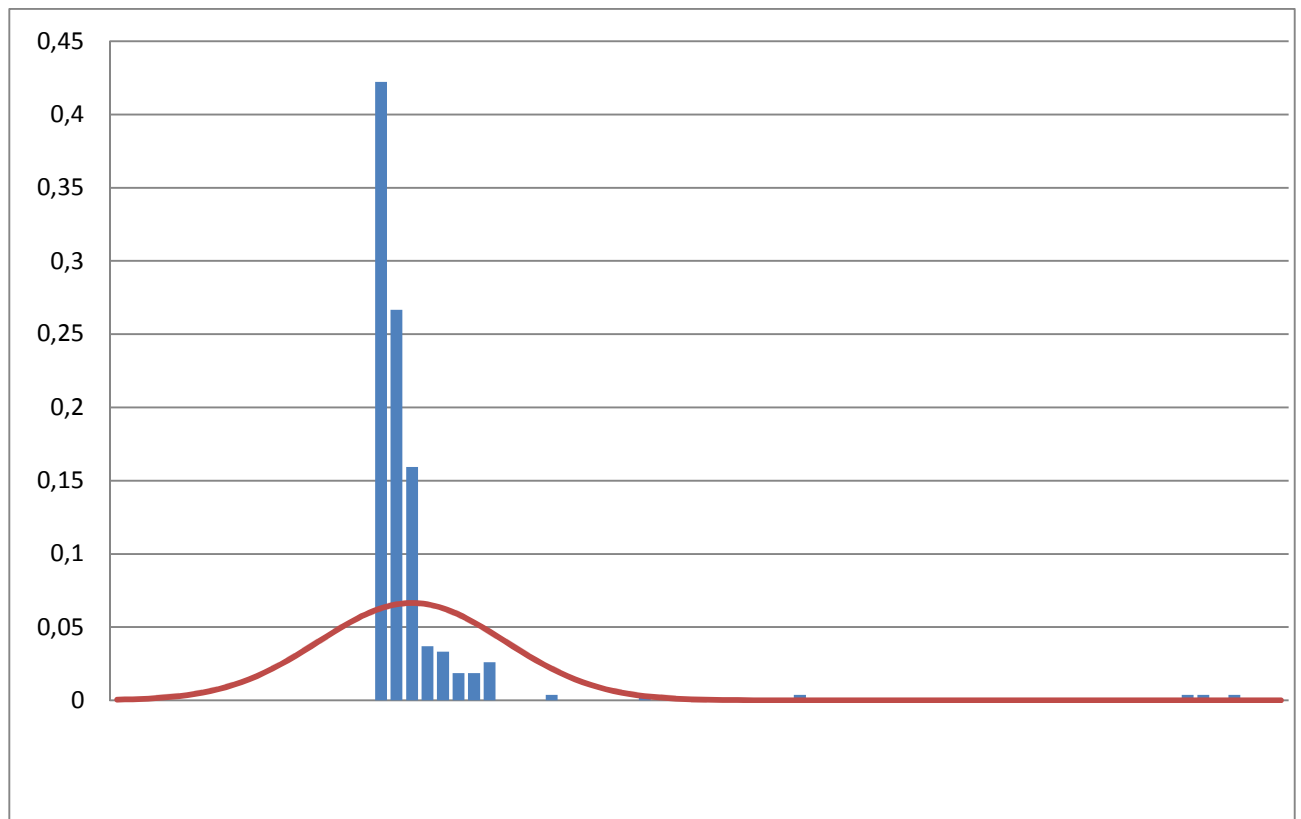


Fig. 37 Macrozona Sud

Media = 16.45 MW

Deviazione standard = 40.45 MW

N° campioni = 261

Massimo = 380 MW

Minimo = 0.2 MW

Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

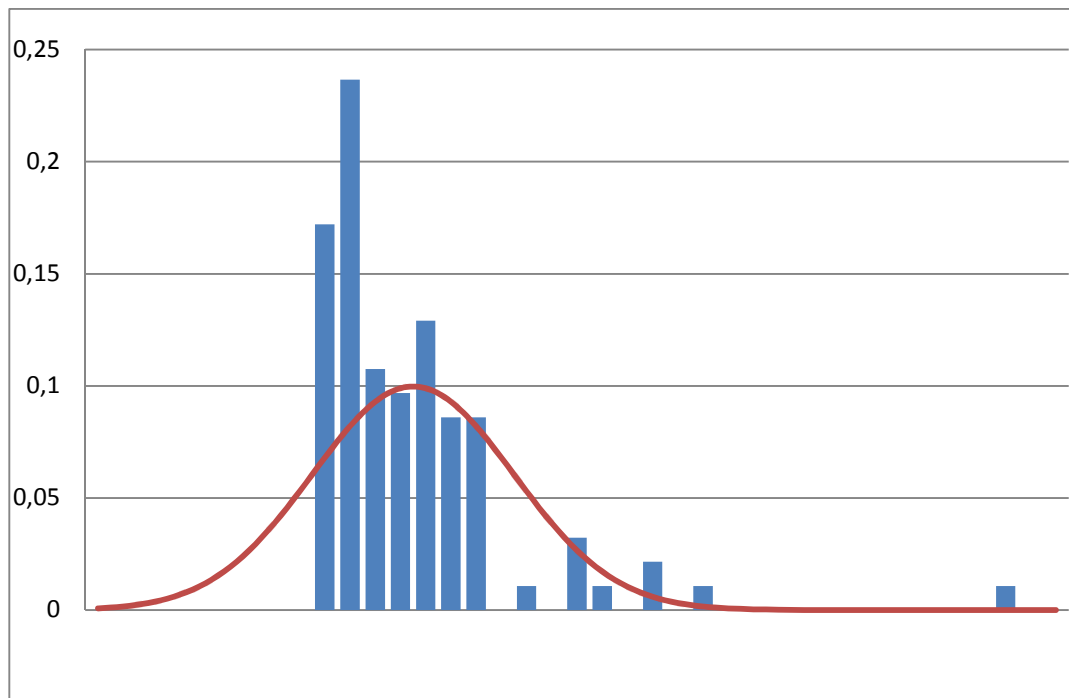


Fig.38 Macrozona Centro

Media = 11.36 MW

Deviazione standard = 11.61 MW

N° campioni = 94

Massimo = 40 MW

Minimo = 1 MW

**Elaborazione dei dati inerenti all'energia non fornita**

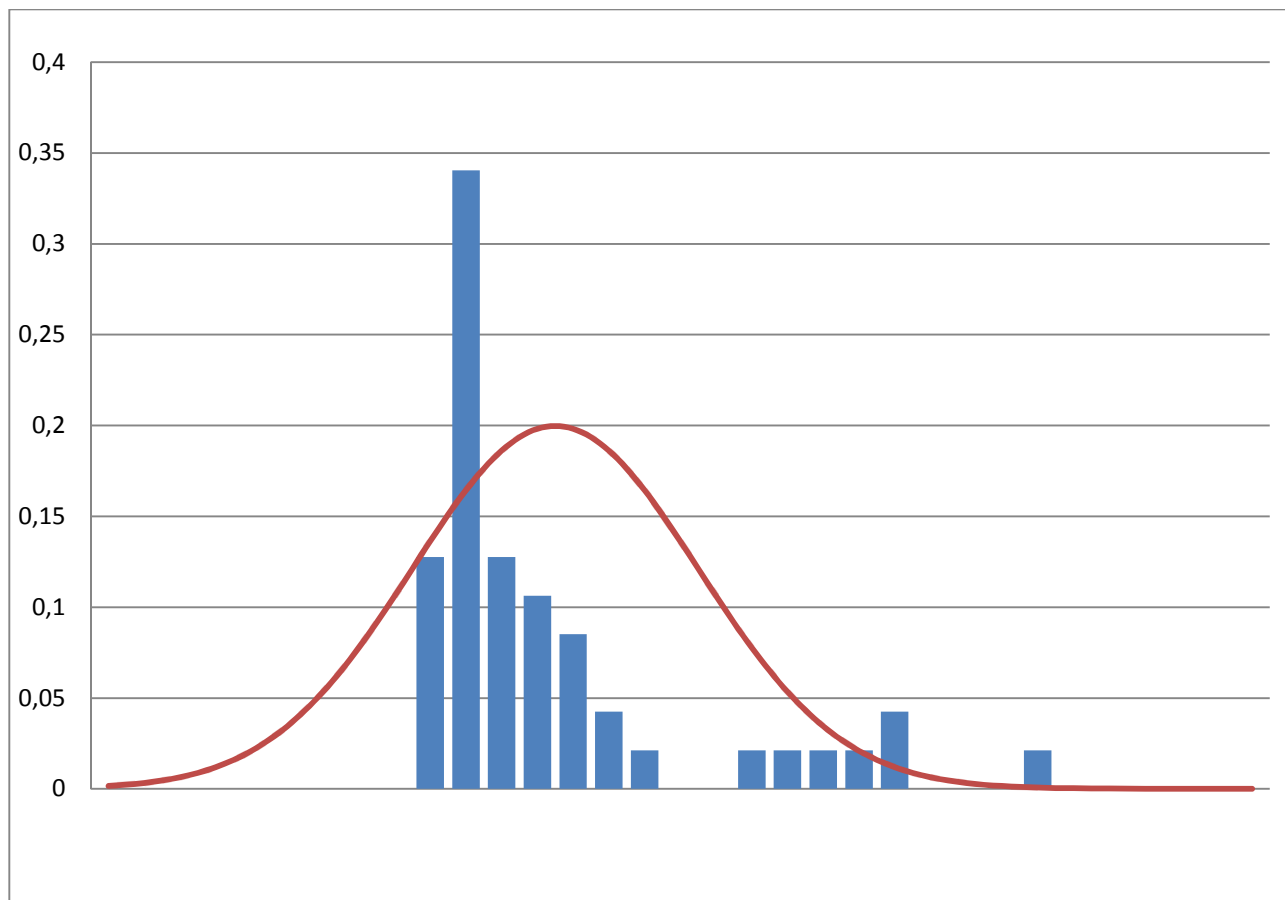


Fig.39 Macrozona Nord

Media = 3.72 MWh

Deviazione Standard = 9.56 MWh

N° di campioni = 45

Massimo = 40.8 MWh

Minimo = 0.07 MWh

Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

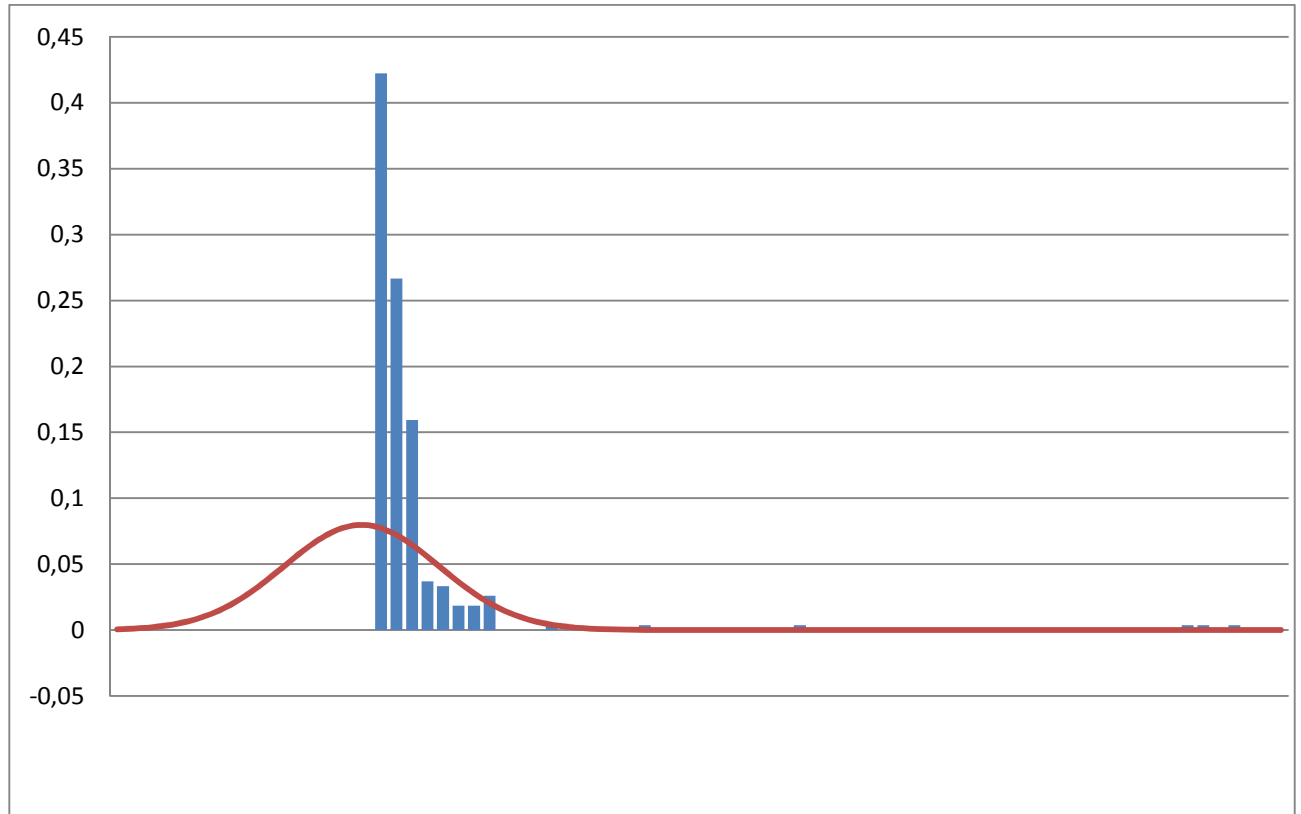


Fig. 40 Macrozona Sud

Media = 0.65 MWh

Deviazione standard = 1.33 MW

N° di campioni = 120

Massimo = 0.01MWh

Minimo = 3.6 MWh

Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

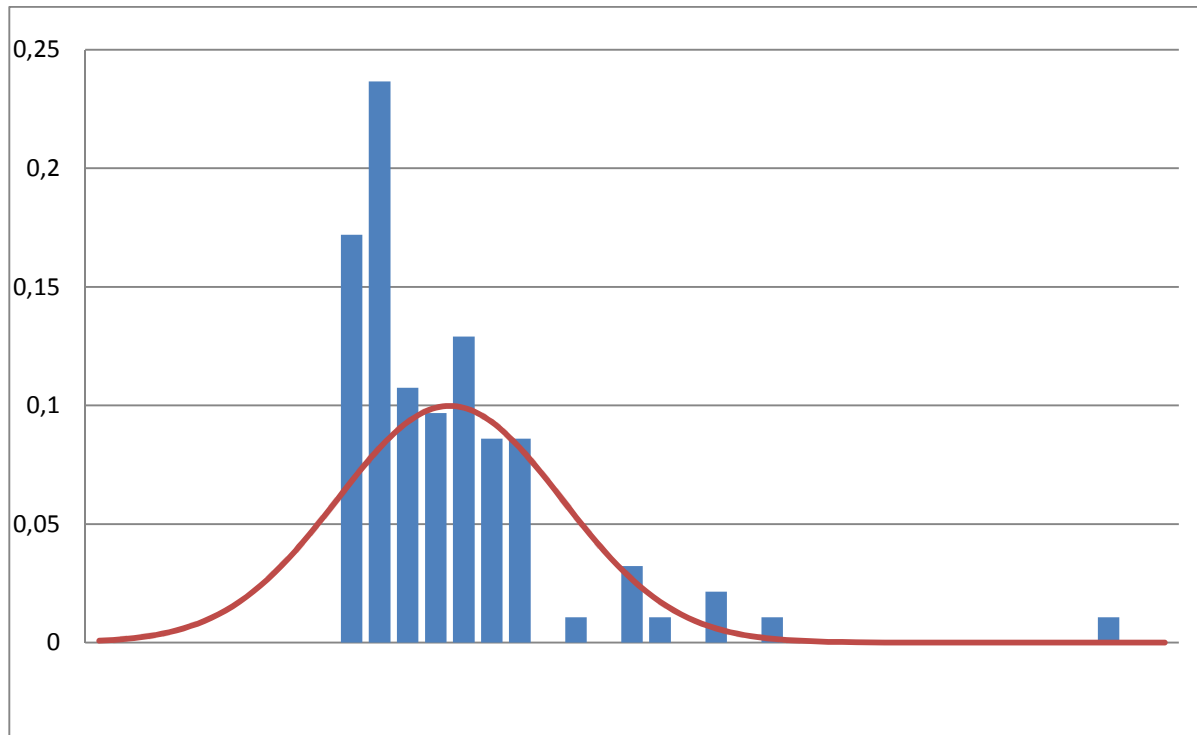


Fig 41 Macrozona centro

Media = 0.73 MWh

Deviazione standard = 1.95 MWh

N° campioni = 88

Massimo = 16.4

Minimo = 0.02

## Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

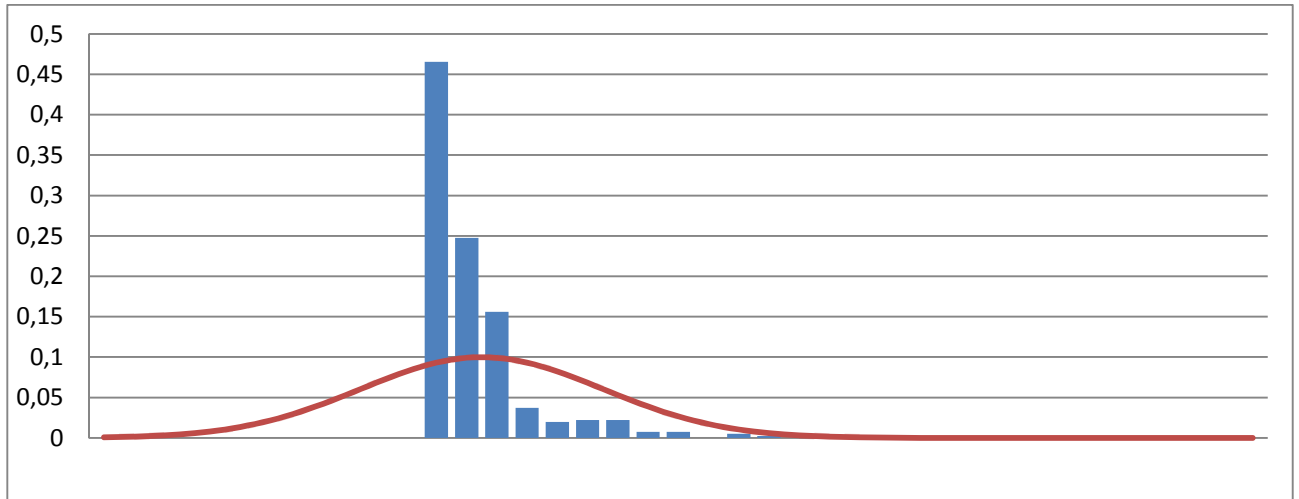


Fig. 42 Totale italiano delle interruzioni di potenza

Media = 14.7 MW

Deviazione standard = 29.3 MW

N° di campioni = 402

Massimo = 380 MW

Minimo = 0.2 MW

### 5.3 CONCLUSIONI

Analizzando i dati raccolti nel corso degli anni, si possono condurre alcune considerazioni prima dello sviluppo dello studio di fattibilità che verrà a seguire.

Come prima osservazione si può notare che, data l'omogeneità del campione analizzato, nonostante il numero di campioni sia molto diverso a seconda della macrozona analizzata, le medie e le deviazioni standard di ciascuna area risultano simili sia per quanto riguarda le energie che per quanto riguarda le potenze.

In secondo luogo si può constatare anche che la macrozona sud presenta un'instabilità di rete decisamente più marcata rispetto alle aree lombarda e centrale, questo è testimoniato dal numero di rilevazioni effettuate, che risulta decisamente superiore rispetto a quello delle altre aree ( 132 campioni analizzati contro gli 88 del centro e i 48 della Lombardia ). Questa disparità nel numero di

campioni ci ha costretto a dover impostare i calcoli in modo diverso, potendo usare dei sottoinsiemi con un intervallo di confidenza più stretto nella zona lombarda piuttosto che in

quella meridionale, ciò è andato a favore dell'accuratezza della stima per la seconda rispetto la prima.

Ai fini del calcolo, e per una miglior impostazione statistica, si sono dovuti per forza escludere dal grafico tutte gli eventi i con una durata superiore ai 10 secondi. L'esclusione dall'analisi di questi valori ha sia una natura analitica, (i valori non erano omogenei e rischiavano, alzando la media complessiva, di far figurare l'apice della gaussiana troppo decentrato rispetto la media effettiva delle interruzioni.) che fisica, in quanto era totalmente inutile considerare fattibile lo studio di un sistema di sostegno per microinterruzioni della rete che richieda ad accumulatori statici energie capaci di toccare anche valori prossimi ai 300 MWh.

Analizzando i grafici a disposizione infine, possiamo concludere anche che, per poter dimensionare in modo corretto un impianto di continuità plausibile come dimensioni e costi, la percentuale delle interruzioni che si potrà valutare sarà circa compresa fra il 15 e il 20% dei casi presi in esame, ossia valuteremo guasti di potenza compresa 1 e 3 MW ed energie non superiori a 0.3 MWh.



# CAPITOLO 6

## SIMULAZIONE DI INTERVENTO DI UN DVR IN SEGUITO AL VERIFICARSI DI UN BUCO DI TENSIONE

### 6.1 PREMESSA.

Il presente capitolo si propone di applicare le nozioni citate fino a questo punto con il fine di determinare uno schema circuitale ed una relativa analisi, in merito alla possibilità di compensare un buco di tensione tramite l'utilizzo di un sistema DVR che usi come sorgente di accumulo un sistema di batterie reperibile tramite la presenza di vetture ibride in collegamento alla rete.

Lo studio dei sistemi DVR presentato nel capitolo 4 ci ha già reso possibile valutare le caratteristiche salienti di questi sistemi di compensazione, che stupiscono in particolar modo per la loro velocità di intervento e per la possibilità di garantire un controllo di fase esatto nei confronti dell'alimentazione.

Con le nozioni emerse nella digressione inoltre, si ipotizzerà di avere a disposizione una certa quantità di accumulatori chimici. Questi saranno considerati come interconnessi alla rete elettrica tramite un sistema di raddrizzatori aventi lo scopo di caricare le batterie installate sulle vetture.

Queste batterie, rappresenteranno per la rete sia un carico da alimentare, che una possibile risorsa da far intervenire nel momento della necessità.

Date queste premesse, ci proponremo quindi di ipotizzare un evento negativo, ( buco di tensione) e di valutare la capacità di compensazione di un parco macchine connesso a una cabina di alimentazione secondaria.

### 6.2 PROGETTAZIONE DEL CIRCUITO[23]

Come già menzionato nel capitolo 3, gli apparecchi DVR costituiscono un ottimo sistema per sostenere il carico per brevi periodi di tempo a fronte di eventi negativi rappresentati dalle brevi interruzioni o dai buchi di tensione.

La simulazione che andremo ad intraprendere prenderà in esame proprio una di queste evenienze. Costruirà infatti una rete elettrica costituita da un generatore, una linea di

trasmissione AT, dalla quale si dirameranno due linee MT radiali, una di semplice carico, mentre l'altra sensibile ad eventuali fluttuazioni di tensione.

Dato quest'assunto preliminare, e prendendo in considerazione le ipotesi sostenute nei capitoli 2, 3, 4, e 5, si cercherà di costruire un modello in grado, data una fonte di energia statica di potenza ed energia sufficienti, di appianare i disturbi causati da un buco di tensione che insiste su una linea in cavo da 12.5 kV.

### 6.2.1 DISEGNO DEL CIRCUITO DI PROVA.

Qui a seguito, in fig 41, è disegnato in maniera schematica il circuito che andremo a simulare:

Il circuito disegnato simula una rete MT alla quale è connesso un carico sensibile, simulando un guasto a monte della linea, si ipotizzerà un abbassamento della tensione di rete del 60%, lo scopo della simulazione sarà determinare, dati i parametri inseriti, l'energia e la potenza richieste ad un accumulatore statico agli ioni di litio, al fine di compensare l'abbassamento della tensione.

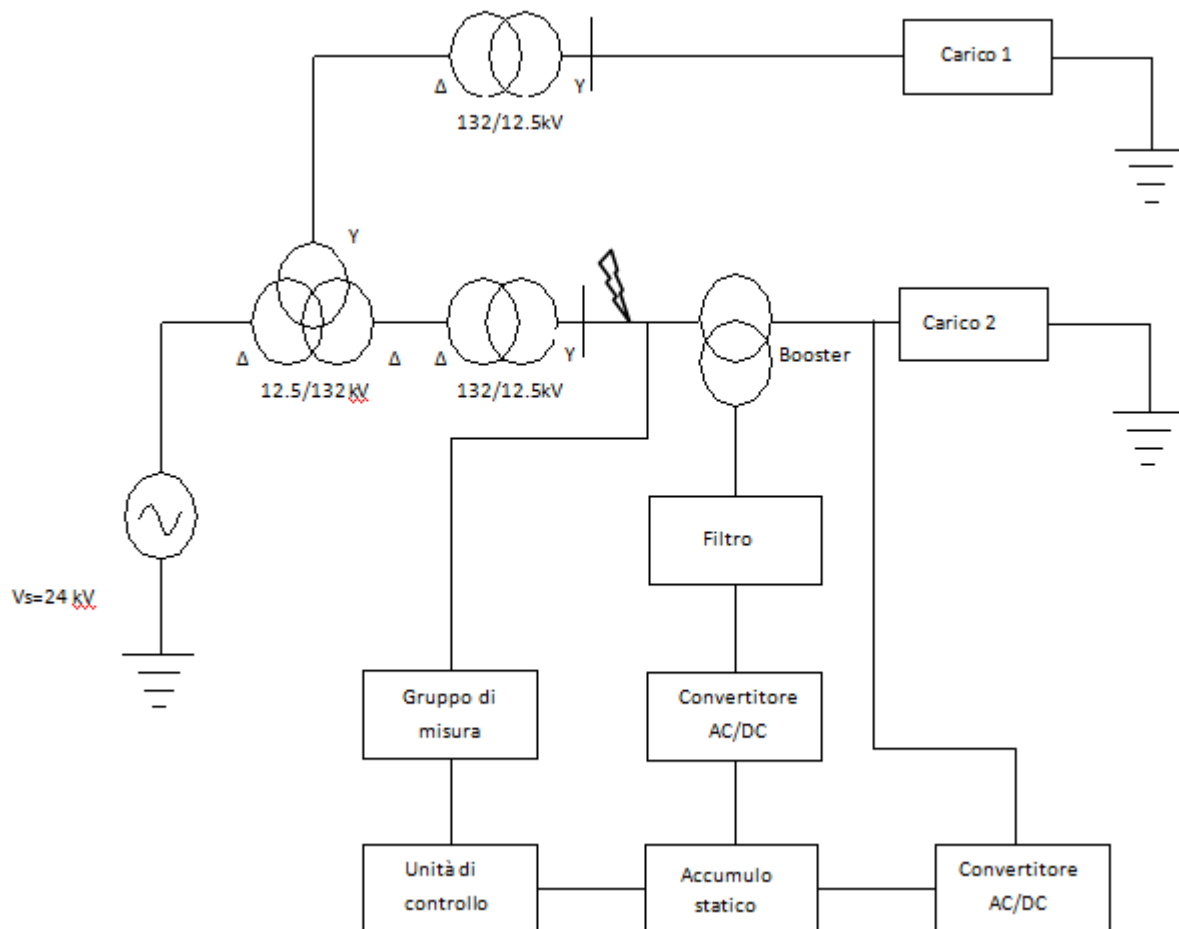


fig. 43 Circuito equivalente della simulazione.

### **6.3 PARAMETRI.**

Parametri della rete:

#### **Generatore:**

Tensione: 24 [kV]

Frequenza: 50 [Hz]

Potenza di corto circuito(Pcc): 100 [MVA]

Rapporto (X/R): 7

#### **Trasformatore MT/AT**

Tensione primaria: 24 [kV]

Tensione secondaria: 132 [kV]

Frequenza: 50 [Hz]

Potenza nominale: 100 [MVA]

Resistenza (primario): 0.02 [ $\Omega$ ]

Induttanza (primario): 0.05 [H]

Resistenza (secondario S1): 0.0348 [ $\Omega$ ]

Induttanza (secondario S1): 0.055 [H]

Resistenza (secondario S2): 1.04 [ $\Omega$ ]

Induttanza (secondario S2): 1.18 [H]

#### **Linea 1:**

Resistenza : 2 [ $\Omega$ ]

Induttanza: 2.22 [mH]

Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

Capacità: 1.3 [ $\mu\text{F}$ ]

**Linea 2:**

Resistenza : 1.18 [ $\Omega$ ]

Induttanza: 1.25 [mH]

Capacità: 0.1 [ $\mu\text{F}$ ]

**Trasformatore L1:**

Tensione primaria: 132 [kV]

Tensione secondaria: 12.5 [kV]

Frequenza: 50 [Hz]

Potenza nominale: 35 [MVA]

Resistenza (primario): 0.1 [ $\Omega$ ]

Induttanza (primario): 0.035 [H]

Resistenza (secondario ): 0.022 [ $\Omega$ ]

Induttanza (secondario ): 0.054 [H]

**Trasformatore L2:**

Tensione primaria: 132 [kV]

Tensione secondaria: 12.5 [kV]

Frequenza: 50 [Hz]

Potenza nominale: 35 [MVA]

Resistenza (primario): 0.15 [ $\Omega$ ]

Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

Induttanza (primario): 0.033 [H]

Resistenza (secondario ): 0.056 [ $\Omega$ ]

Induttanza (secondario ): 0.023 [H]

**Carico 1:**

Resistenza: 100 [ $\Omega$ ]

Induttanza: 12 [mH]

Capacità: 1.3 [ $\mu$ F]

**Carico 2:**

Resistenza: 200[ $\Omega$ ]

Induttanza: 20 [mH]

**Trasformatore BOOSTER:**

Tensione primaria: 200 [V]

Tensione secondaria: 12.5 [kV]

Frequenza: 50 [Hz]

Potenza nominale: 100 [kVA]

Resistenza (primario): 0.30 [ $\Omega$ ]

Induttanza (primario): 0.045 [H]

#### **6.4 CARATTERIZZAZIONE DEL BUCO DI TENSIONE.**

Considerando la rete avente le caratteristiche sopra menzionate, si suppone che all'istante  $T=500$  ms avvenga nel punto indicato sullo schema (40) un guasto trifase a terra avente un'impedenza tale da (come descritto nei capitoli 2 e 5) causare un abbassamento della tensione al carico 2 pari a 0.7 p.u., il guasto avrà una durata di 200 ms.

La durata dell'abbassamento e il suo modulo costituiscono un evento probabile, sia per quanto riguarda la variabile temporale che per l'ampiezza del disturbo. Considerando l'ipotesi di un eventuale intervento delle protezioni di rete posizionate a monte del sistema sensibile poi, si può affermare che, date le assunzioni enunciate nel capitolo 5, l'interruzione scaturita dal guasto rientrerebbe entro il 70% dei casi di microinterruzioni analizzate nel corso dell'elaborato.

#### **6.5 COSTRUZIONE DLE SISTEMA DI CONTROLLO[22]**

Al fine di compensare tutti i cali di tensione simulati nel circuito di prova, si ha la necessità di implementare un sistema di controllo a tempo discreto che, prendendo come ingresso il modulo della tensione di sequenza diretta, riesca a determinare sia l'angolo che la fase necessari a compensare il disturbo origine del segnale di errore. Ai fini del calcolo è necessario conoscere solamente la tensione nel suo valore efficace, tutto ciò che riguarda gli assorbimenti di potenza attiva piuttosto che reattiva, verrà tralasciato nel corso della simulazione in quanto di secondario interesse.

La figura 41 mostra lo schema di controllo del DVR, questo sistema esercita un controllo di tensione angolare esattamente come descritto nel capitolo 3.

Il funzionamento del dispositivo è presto descritto:

il segnale in ingresso rappresenta la tensione ai capi del carico, questo valore, opportunamente trasformato tramite la trasformata di Fortesque in tensione diretta, inversa e omopolare, viene confrontato nella sua componente diretta, da un nodo sommatore nel quale vengono confrontati i valori in ingresso e le tensioni di riferimento (nel nostro caso 0.98 p.u.).

A valle del nodo sommatore si trova l'integratore, che, unitamente al blocco Firing angle, trasforma il dato in ingresso con il fine di generare un angolo  $\delta$  capace di portare l'errore a 0 p.u..

Il valore in uscita dai blocchi presi in considerazione, è usato come riferimento dal PWM, il quale agisce modulando la frequenza degli impulsi di comando del ponte controllato posto a valle della batteria.

Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

In fig. 42 e 43 vengono riportati gli scemi utilizzati nella simulazione del sistema di controllo del DVR.

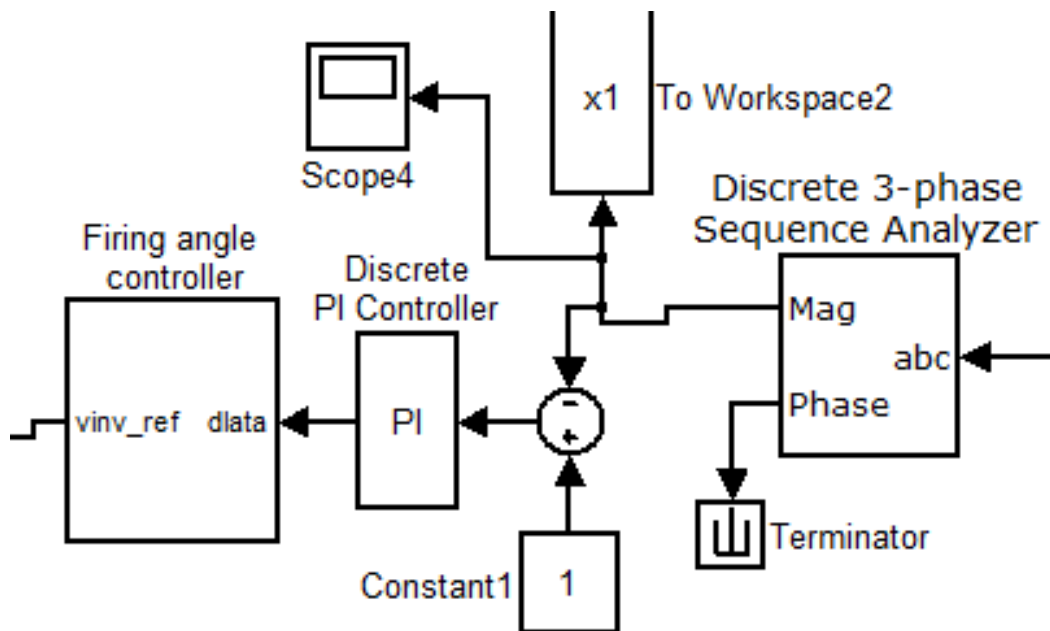


Fig. 44: Schema del sistema di controllo del dispositivo DVR, da sinistra a destra si possono evidenziare, il sistema di aggancio di fase, l'integratore, il nodo di confronto con in ingresso il valore di 1 p.u. e il valore della tensione ai capi del carico espressa in p.u. nella variabile di sequenza diretta,

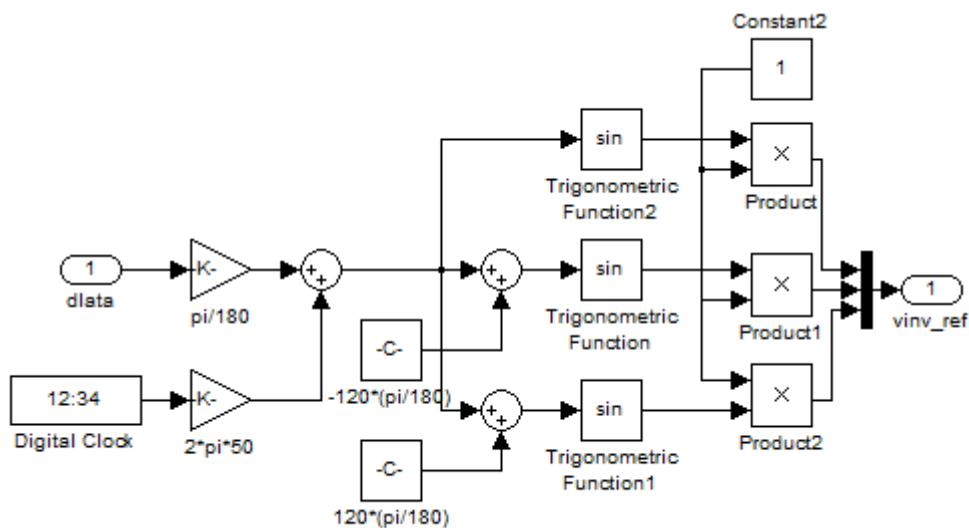


Fig. 45: Ciclo ad aggancio di fase, permette la sincronizzazione del segnale PWM e quindi del ponte controllato con la variabile di rete.

## 6.6 REALIZZAZIONE DEL MODELLO

Considerando la nozioni teoriche del capitolo3, lo schema di figura 40 e gli appunti sul sistema di controllo di un dispositivo DVR si espone qui a seguito il grafico realizzato in Simulink tramite il quale si è riusciti a raggiungere le ipotesi condotte prima.

Sono state effettuate in totale due prove, la prima è stata condotta analizzando il sistema con l'interruttore collegato al sistema DVR aperto, mentre quelli posizionati in derivazione alle tre fasi risultano cortocircuitati sui rispettivi trasformatori Booster.

In questo modo si sono potuti ottenere dei risultati relativi al comportamento del sistema nel caso in cui il dispositivo di sostegno della tensione non fosse inserito.

Nella seconda configurazione invece, l'interruttore principale è stato richiuso, e i Booster alimentati, in questo modo si sono potute constatare gli importanti miglioramenti che un sistema DVR è in grado di apportare a una rete elettrica sul fronte del miglioramento della Power Quality.

Come ultime considerazioni, data la letteratura del capitolo 4, si sono potute effettuare delle considerazioni riguardanti la fattibilità dell'ipotesi relativa all'alimentazione di un tale sistema, usando come sorgente statica il sistema di batterie e supercondensatori installati in auto plug-in allacciate allo stessa rete da salvaguardare.

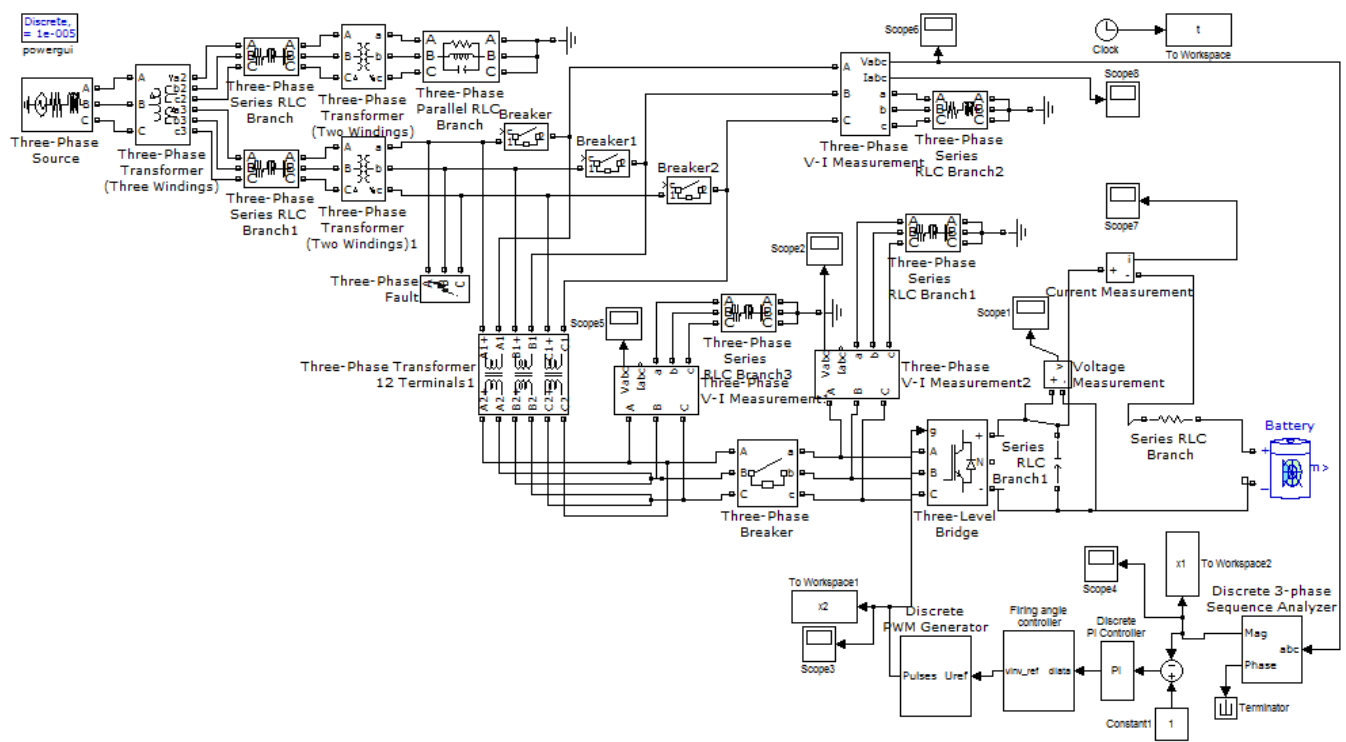


Fig. 46 : Schema del circuito equivalente non che del controllo del sistema DVR, di tutte le variabili controllate, quelle di maggiore interesse sono rappresentate dalle tensioni e dalla sequenza diretta ai morsetti del carico, che rendono possibile il confronto fra l'utilizzo o meno del dispositivo di compensazione



## 6.7 ANALISI DEI RISULTATI.

In questo paragrafo vengono esposti i grafici principali riguardanti il comportamento del sistema nelle due configurazioni esposte prima.

### Caso 1

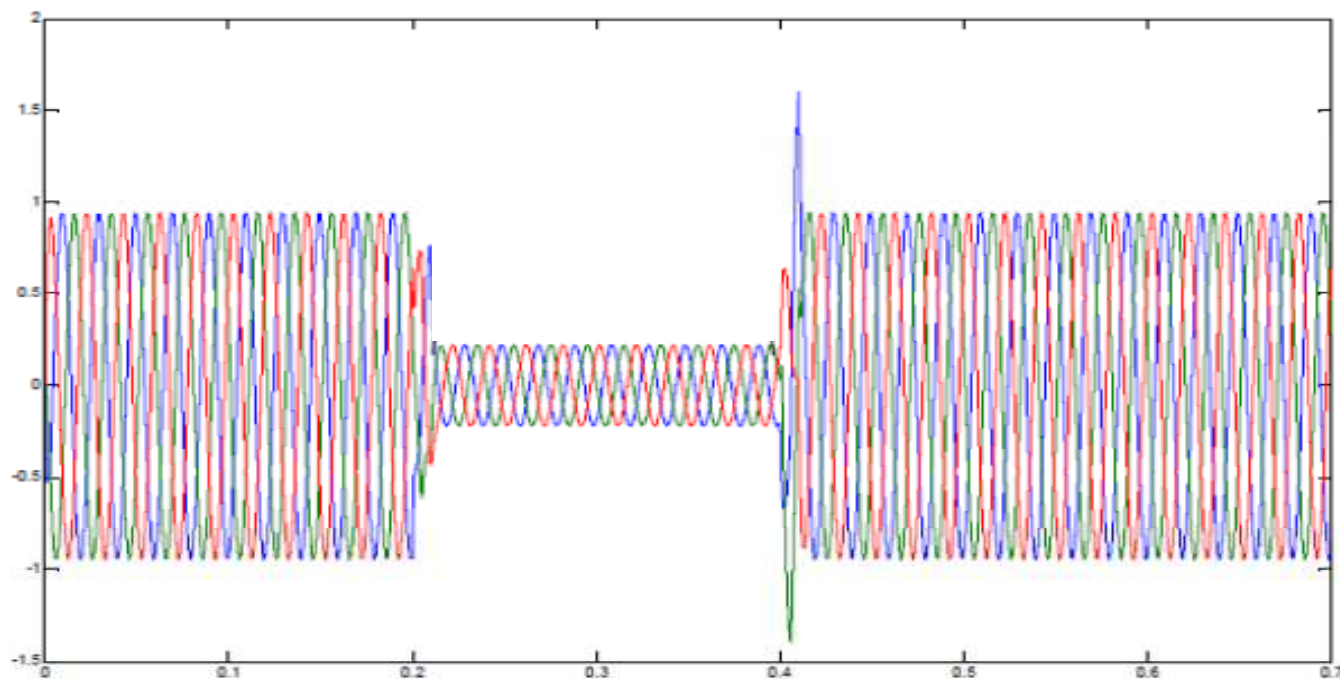


Fig. 47: Andamento della tensione ai morsetti del carico in presenza di guasto sulla linea, senza l'intervento del sistema di compensazione

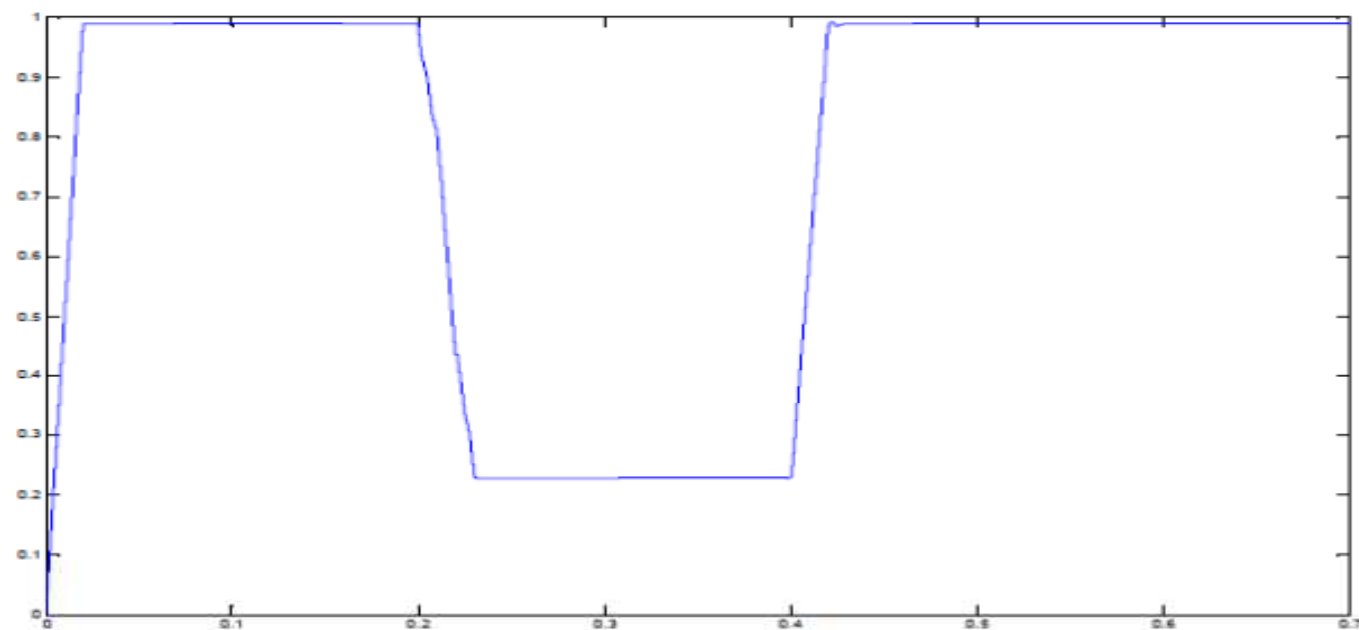


Fig. 48: Andamento della tensione ai morsetti del carico, nella variabile di sequenza diretta, in presenza di guasto sulla linea, senza l'intervento del sistema di compensazione

## Caso 2

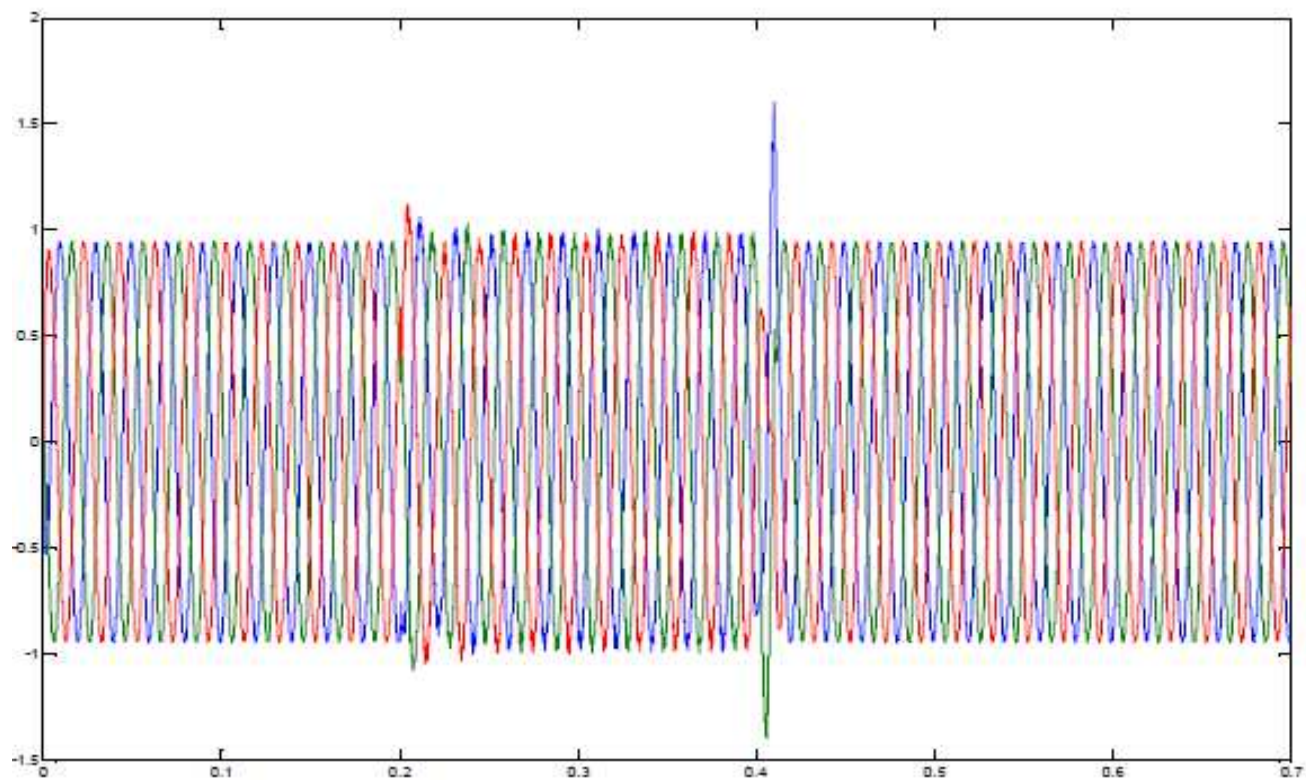


Fig. 49: Andamento della tensione ai morsetti del carico in presenza di guasto sulla linea, senza l'intervento del sistema di compensazione

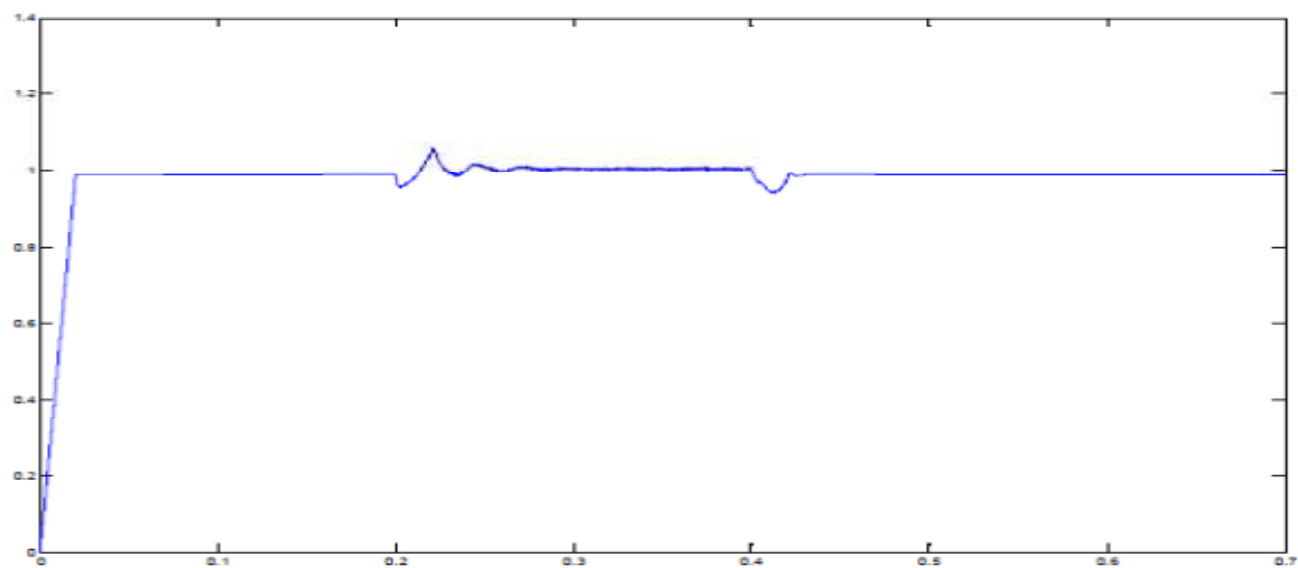


Fig. 50: Andamento della tensione ai morsetti del carico, nella variabile di sequenza diretta, in presenza di guasto sulla linea, con l'intervento del sistema di compensazione

Dall'analisi delle due casistiche si può notare come, in presenza di un DVR, l'abbassamento di tensione venga totalmente ristabilito ancor prima della fine del primo ciclo. Trascurando una leggera fluttuazione del modulo del vettore di tensione diretta si può affermare che, anche considerando l'effetto degli elementi reattivi presenti nel circuito, ai morsetti del carico non viene percepita nessuna fluttuazione importante. Tuttavia si prevede che il DVR compensi buchi "poco profondi"

Relativamente alla struttura del controllo, si è adottata una soluzione "a catena chiusa" con regolazione della tensione concatenata al carico. Tale soluzione garantisce, rispetto a quella "a catena aperta" una maggior precisione e la possibilità di compensare le cadute di tensione sull'impedenza equivalente del dispositivo a seguito degli assorbimenti del carico alimentato a valle del DVR.

## 6.8 PROBLEMATICHE ENERGETICHE

Altro discorso è quello che affronta le problematiche di energetico relative a questo tipo di compensazione.

Le principali batterie presenti in commercio presentano una caratteristica di cella equiparabile a quella esposta in fig(51), tale caratteristica è da inserire in un complesso che vede le celle collegate a pacco fra di loro, tale configurazione porta le batterie in commercio ad avere, come già esposto nel capitolo 4, caratteristiche di funzionamento pari a :

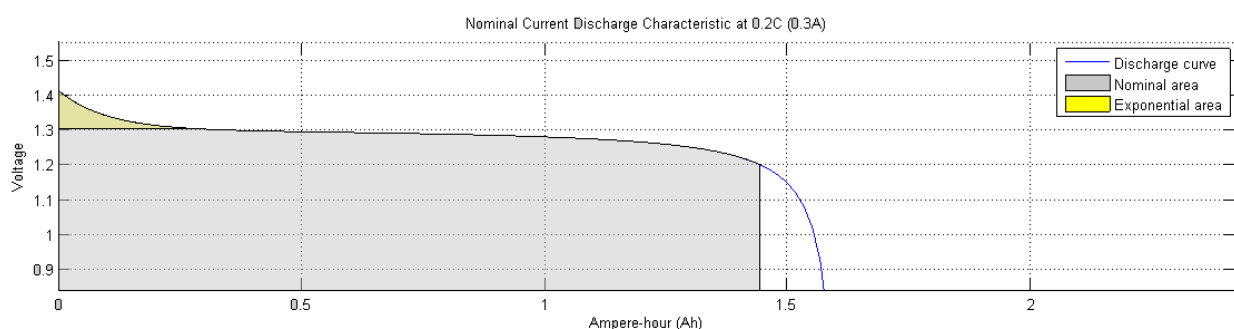


Fig. 51: Caratteristica V-Ah di una cella agli ioni di litio standard. La caratteristica rimane costante tra 0.2 e 1.45 A, mentre decade appena si supera la corrente massima di scarica.

Considerando quindi che, data la simulazione, la potenza richiesta ai morsetti del DVR è pari a 542.5 kW, stimiamo che le batterie, nel momento di necessità siano accorpate in stringhe capaci di fornire una tensione di uscita di 250 Vcc.

## Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

Data la potenza richiesta e le perdite inevitabili che hanno sede nel commutatore, la corrente richiesta in ingresso del Booster sarà di 2200 [A].

Gli alimentatori statici per auto motive momentaneamente in commercio sono in grado di fornire una tensione in uscita variabile da 12.5 a 72 Vcc, con:

Capacità nominale: 60/170 [Ah]

Energia specifica massima: 94/120 [Wh/kg]

Massima corrente continuativa: 180/200 [A]

Massima corrente di picco (60s): 300 [A]

Date queste premesse, si può dedurre che, per un adeguata compensazione del disturbo preso in esame, stimando un livello variabile di carica delle singole celle, e senza che l'intervento di quest'ultime causi un'eccessiva scarica dei moduli ai quali è richiesto di far fronte al disturbo, dovranno essere disponibili ai morsetti del ponte raddrizzatore un numero di celle oscillante fra le

140 e le 350 unità.

Un numero così elevato di moduli non consente di poter considerare questo genere di tecnologia applicabile nell'immediato.

Tuttavia, la diffusione sempre maggiore dei veicoli elettrici, sta portando a considerare questi sistemi anche come potenziali risorse da utilizzare nelle evenienze esaminate in questa trattazione.

## CONCLUSIONI

Negli anni a venire, le reti elettriche di distribuzione continueranno ad essere interessate da un processo di profonda trasformazione, cui sono attualmente sottoposte. Tra i mutamenti ai quali stiamo assistendo, si nota l'esigenza di consentire l'accesso alla rete elettrica ad un numero sempre più crescente di nuovi utenti di tipologia attiva e passiva. La rete elettrica dovrà perciò essere coniugata con l'ineludibile necessità ad una gestione che riesca a garantire gli adeguati standard di sicurezza e di qualità del servizio.

Durante lo svolgimento, si è potuto riflettere su questa tipologia di problemi e dare spunto ad alcune interessanti considerazioni; lo studio dei principali disturbi di rete condotto nei capitoli uno e due ha infatti permesso di evidenziare come le reti elettriche di distribuzione siano ancora oggi soggette a forti disturbi che ne pregiudicano la stabilità.

Questi disturbi, specie con l'avvento di apparecchiatura elettroniche altamente sensibili ai problemi dell'alimentazione (causa loro stesse di disturbi condotti, come enunciato nel cap. 1), hanno richiamato sempre più spesso l'interesse della ricerca ai fini di mitigarne le conseguenze o, in alcuni casi, addirittura di prevenirne le cause.

In particolar modo, durante lo svolgimento si è cercato di trovare un rimedio efficace ai fini della compensazione dei buchi di tensione e delle micro interruzioni. Come si è potuto evidenziare nel capitolo 5, infatti, questi disturbi condotti, caratterizzati nella maggior parte dei casi da brevi durate ed energie generalmente ridotte, sono comunemente subiti dagli utenti della rete elettrica, che ne soffrono gli effetti in termini di continuità di servizio.

Per risolvere questo problema, si è pensato di inserire a monte dei carichi maggiormente sensibili un sistema di compensazione dinamica abbastanza veloce e potente da sostenere l'alimentazione degli utilizzatori senza eccessive distorsioni dovute al passaggio dell'alimentazione.

Con l'inserzione del DVR è però sorto il problema della sorgente di accumulo statico: queste batterie, come descritto dettagliatamente nel capitolo 4, sono spesso costose e ingombranti, specie se le potenze richieste superano certi valori.

La necessità di reperire una fonte di energia statica a basso costo ha condotto a stimare che, in futuro, con la sempre maggiore diffusione dei veicoli a trazione elettrica, sarà possibile richiamare l'energia necessaria alla compensazione dai veicoli stessi, che durante la loro fase di ricarica delle batterie, potranno decidere di connettersi in punti della rete ove sarà prevista l'installazione dei dispositivi di compensazione.

## BIBLIOGRAFIA

- [1]”[http://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/risparmio-di-energia-elettrica-nei-trasporti/](http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/risparmio-di-energia-elettrica-nei-trasporti/)“.
- [2] “*Sistema di accumulo con batterie al litio nel terziario*” M. Conte, M. Pasquali, F. Vellucci.
- [3] “*Piano di Sviluppo 2010*” Terna.
- [4] “*Dati storici consumi energetici*” Terna.
- [5] “*Banca dati di eventi eccezionali e loro impatto sulla struttura del sistema di trasmissione e distribuzione dell’energia elettrica: linee guida e versione preliminare*” Ezio Cereda Roberto Nicolini.
- [6] “*Indagine sugli eventi che danno origine ad interruzioni e buchi di tensione*” Ing. F. Tarsia.
- [7]”*Razionalizzazione e risparmio nell’uso dell’ energia elettrica*”.  
<http://www.ricercadisistema.it>.
- [8] “*LCA dei veicoli ibridi plug-in ed elettrici: analisi della letteratura esistente*” Pierpaolo Girardi.
- [9]<http://www.fondazionetelios.it/glossario/documents/Litio.pdf>”.
- [10] “*Sistemi e componenti per l’accumulo di energia di tipo elettrico o meccanico*”,  
<http://www.ricercadisistema.it>.
- [11]*Sviluppo di modelli di sistemi di accumulo di tipo tradizionale ed avanzato per impieghi nella GD al fine della loro rappresentazione nell’interfacciamento con la rete elettrica e della stima dello stato di carica on-line* <http://www.ricercadisistema.it>.
- [12] “*Stato dell’arte delle geometrie costruttive e dei materiali in sistemi di accumulo energetico*” M. Broglia, R. Lazzari, E. Micolano.
- [13]”*Soluzioni innovative di alimentazione per clienti con esigenze di forniture ad alta qualità*”  
<http://www.ricercadisistema.it> .
- [14] “*Soluzioni innovative di PPP: dimensionamento e strategie di controllo coordinato dei dispositivi CUSPO per la compensazione di disturbi di rete*” Alessandro Agustoni.
- [15]*Understanding of Dynamic Voltage Restorers Through MATLAB Simulation*” Paisan Boonchiam and Nadarajah Mithulananthan.
- [16] “*Control of Dynamic Voltage Restorers Using a Fully-Configurable Digital Estimation Technique*” Víctor M. Moreno, Alberto Pigazo, Marco Liserre, Antonio Dell’Aquila.

- [17] “*Modeling and Simulation of a Dynamic Voltage Restorer (DVR)*” Bachelor of Technology in Electrical Engineering.
- [18] “*Implementation of Dynamic Voltage Restorer for Voltage Sag Mitigation*” S.Deepa, Dr. S. RajapandianS.
- [19] “*Voltage Sag Mitigation Using Dynamic Voltage Restorer System*” .
- [20] “*Simulation and Modelling of a dynamic voltage*” Mehmet Tümay Ahmet Teke K. Çağatay Bayındır M. Uğraş Cuma.
- [21] “*Dynamic Voltage Restorer (DVR) for Voltage Sag Mitigation*” Mahmoud A. El-Gammal, Amr Y. Abou-Ghazala, Tarek I. El-Shennawy.

Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione

**INDICE DELLE FIGURE:**

1- Circuito del sistema radiale	24
2- Classi di raggruppamento dei buchi di tensione	25
3- Probabili cause di buco di tensione a seconda della loro ampiezza e della durata	26
4- Schema di principio di un dispositivo UPS	40
5- Schema di inserzione di una bobina di Petersen	41
6- Schema di principio di un sistema DVR	43
7- Inserzione in rete di un sistema DVR	44
8- Quadro contenente un sistema DVR	45
9- Circuito di protezione di un sistema DVR	46
10- Modalità standby del circuito di protezione del sistema DVR	47
11- Schema vettoriale della compensazione DVR	49
12- Schema di controllo ad anello aperto del sistema di controllo del DVR	50
13- Struttura di un PLL	51
14- Evoluzione dei segnali per la sincronizzazione PLL	51
15- Schema di un rilevatore di fase	52
16- Schema di realizzazione di un PLL	53
17- Schema a blocchi di un dispositivo DVR	55
18- Schema di principio e filtro di un dispositivo DVR	55
19- Energia/Potenza disponibili a seconda delle diverse fonti di energia statica	57
20- Raffigurazione schematica di una batteria al piombo acido	61
21- Raffigurazione del principio di funzionamento delle batterie al piombo acido	61
22- Carica/Scarica delle batterie al piombo acido	62
23- Schematizzazione delle reazioni di cella	64
24- Scarica in funzione della tensione	64
25- Spaccato di una batteria al Nichel Cadmio	68
26- Accumulatore ZEBRA	70
27- Reazioni di cella di un accumulatore Li-Ion	72
28- Schema di funzionamento di un accumulatore REDOX	74
29- Funzionamento di condensatori tradizionali rispetto i supercondensatori	76
30- Immagine di un supercondensatore	77
31- Modello circuitale di una batteria al litio	79
32- Equalizzazione passiva delle celle di una batteria	83
33- Equalizzazione attiva con condensatori	84
34- Equalizzazione con metodo swiched transformer	85
35- Equalizzazione con metodo shared transformer	85
36- Macrozona Nord	93
37- Macrozona Sud	94
38- Macrozona centro	95
39- Macrozona Nord	96
40- Macrozona Sud	97
41- Macrozona centro	98
42- Totale italiano delle interruzioni di potenza	99
43- Circuito equivalente della simulazione	102
44- Schema del sistema di controllo nella simulazione	107
45- Ciclo ad aggancio di fase	107
46- Schema della simulazione	108
47- Andamento della tensione in assenza di compensazione	109
48- Andamento della variabile di tensione diretta in assenza di compensazione	109
49- Andamento della tensione con compensazione	110
50- Andamento della variabile di tensione diretta con compensazione	110
51- Caratteristica V-Ah di una cella agli ioni di litio	111



Analisi di Power Quality delle reti elettriche di distribuzione e proposta per un dispositivo statico di compensazione