

Capitolo 8

Problematiche relative alle protezioni nei sistemi BT alimentati da convertitori statici c.c./c.a.

8.1 Introduzione

La crescente richiesta di qualità della fornitura elettrica, assieme ai notevoli sviluppi dell'elettronica di potenza, hanno favorito negli ultimi anni l'impiego sempre più diffuso di convertitori statici c.c./c.a. (inverter) per l'alimentazione, ordinaria e/o di emergenza, di utilizzatori elettrici in bassa tensione. Tale diffusione può essere essenzialmente imputata:

- all'esigenza di garantire più elevati livelli di continuità del servizio, con l'utilizzazione di sistemi di accumulo in c.c.;
- ai vantaggi derivanti dall'interposizione fra la rete e le utenze di convertitori che costituiscono una sorta di filtro per la propagazione di squilibri tra le fasi, buchi di tensione e altre perturbazioni;
- alla possibilità di predisporre altre sorgenti di energia elettrica di piccola potenza proveniente da fonti rinnovabili (generatori fotovoltaici, gruppi ibridi di generazione, ecc.).

In particolare, per effetto dei primi due fattori sopra evidenziati che attengono strettamente alla qualità tecnica del servizio elettrico, è ormai molto frequente la presenza di UPS (Uninterruptible Power Supplies) sia nell'ambito di

installazioni industriali sia in tutti quei casi in cui si hanno particolari esigenze di continuità (ospedali, locali pubblici, grandi edifici, ecc.). La Figura 8.1 mostra lo schema semplificato di un gruppo UPS e dei suoi principali componenti.

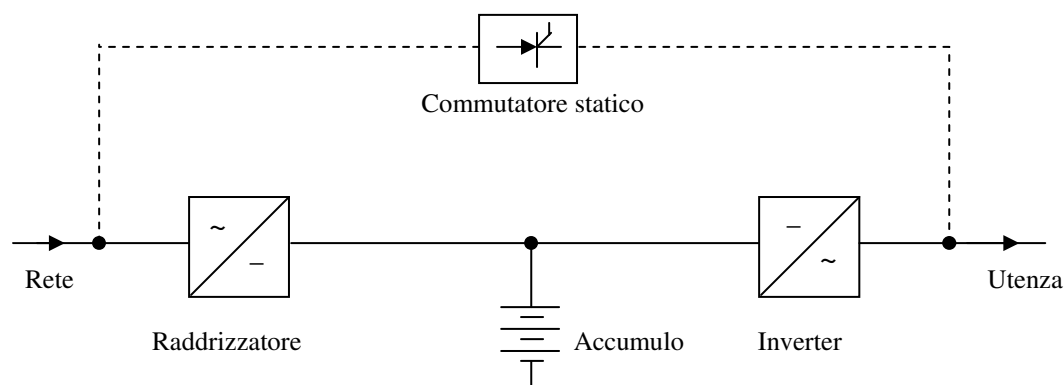


Figura 8.1

Oltre a tali applicazioni, l'interesse per i convertitori statici è anche legato all'esplorazione di ipotesi di distribuzione innovative, basate sull'impiego della corrente continua, per migliorare le caratteristiche di vettoriamento nelle reti bt e contenere efficacemente gli effetti delle interruzioni e di altri disturbi tipici. In tale quadro, un aspetto che costituisce talvolta un problema nelle attuali installazioni, oltre che un potenziale limite per lo sviluppo di nuove ipotesi di applicazione, riguarda la tempestività e selettività dei dispositivi di protezione posti a valle di un inverter (in particolare quelli di taglia maggiore).

Tale aspetto, che già negli impianti tradizionali può caratterizzare in modo significativo la prestazione in termini di qualità del sistema elettrico, assume una rilevanza particolare proprio laddove l'impiego di uno o più convertitori è sostanzialmente mirato a migliorare la qualità del servizio, soprattutto in termini di continuità dell'alimentazione.

8.2 Il comportamento degli inverter in presenza di sovracorrenti:

L'aspetto selettività

L'alimentazione di un impianto elettrico in bassa tensione attraverso convertitori statici c.c./c.a., può determinare problemi di selettività nei dispositivi di interruzione preposti alla protezione dell'impianto. Tale criticità è essenzialmente imputabile alla consistente riduzione che la potenza di cortocircuito subisce in ogni punto dell'impianto per effetto dell'interposizione dell'inverter. Detti dispositivi, infatti, sono generalmente dotati di particolari sistemi di autoprotezione tali che, superati prefissati margini di sovraccaricabilità in corrente, producono una brusca riduzione della tensione in uscita con un conseguente effetto di limitazione sulla corrente. La Figura 8.2 riporta un andamento tipico della caratteristica V-I di un inverter, in cui risulta chiaramente evidente l'azione di limitazione esercitata dal sistema di autoprotezione, una volta superati definiti valori di corrente. Tenuto conto delle caratteristiche costruttive dei componenti

attualmente presenti sul mercato, la capacità di sovraccarico di un inverter con scansione PWM (Pulse Width Modulation) può essere con buona approssimazione schematizzata come in Tabella 1, avendo indicato con $I_{n(inv)}$ la sua corrente nominale.

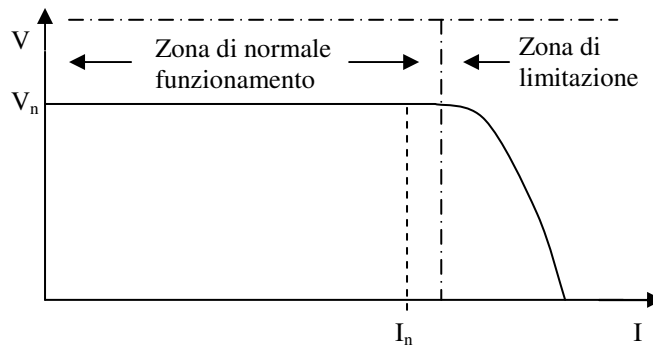


Figura 8.2

Limiti di sovraccaricabilità di un inverter	
Corrente	t_{max} Tollerato
$\leq 1,25 I_{n(inv)}$	$\leq 600s$
$1,25 \div 1,5 I_{n(inv)}$	$\leq 60s$
$> 1,5 I_{n(inv)}$	$\leq 1s$

Tabella 1

Se il convertitore alimenta un impianto bt costituito da un certo numero di linee di distribuzione, un'eventuale condizione di sovraccarico o di cortocircuito su una di tali linee può condurre ad un funzionamento in limitazione di corrente, solo per il tempo indicato in Tabella, con conseguente riduzione della tensione sull'intero impianto. In presenza di rete, l'intervento del commutatore statico, Figura 8.1, rende disponibile la maggiore potenza di

cortocircuito che può consentire alle protezioni di isolare rapidamente la linea sulla quale la sovracorrente si è originata.

Altrimenti, in dipendenza delle caratteristiche di intervento dei dispositivi di protezione posti a valle dell'inverter rispetto ai valori tempo-corrente indicati nella Tabella 1, il limitato valore della corrente che si stabilisce può non essere sufficiente a provocare l'intervento tempestivo e selettivo di detti dispositivi e condurre, invece, all'arresto definitivo, per autoprotezione, dell'inverter.

Per indagare con maggiore chiarezza i contorni del problema, si affronterà separatamente il caso di sovraccarichi da quello relativo al verificarsi di cortocircuiti.

Preliminarmente è opportuno ricordare che, in base alle prescrizioni della Norma CEI EN 60898 (CEI 23-3 IV ed.), i valori delle correnti di riferimento per interruttori ad uso domestico e similare risultano conformi alle specifiche riportate in Tabella 2,

Correnti di riferimento degli interruttori magnetotermici ad uso domestico e similare						
$I_{n(int)}$	$I_{nf} / I_{n(int)}$	$I_f / I_{n(int)}$	t_{conv}	Curva	I_{m1} / I_n	I_{m2} / I_n
Fino a 63 A	1,13	1,45	1h	B	3	5
				C	5	10
				D	10	20
Oltre 63 A	1,13	1,45	2h	B	3	5
				C	5	10
				D	10	20

Tabella 2

essendo (come già detto nel cap.4):

- $I_{n(int)}$ (corrente nominale) la corrente assegnata dal costruttore che l'interruttore è destinato a portare in servizio ininterrotto ad una temperatura ambiente di riferimento specificata (generalmente 30°C);
- I_{nf} (corrente convenzionale di non intervento) il valore specificato di corrente che l'interruttore è in grado di portare durante un tempo specificato (tempo convenzionale) senza operare lo sgancio;
- I_f (corrente convenzionale di intervento) il valore specificato di corrente che determina lo sgancio dell'interruttore entro un limite di tempo specificato (tempo convenzionale);
- I_{m1} il minimo valore di corrente che può provocare l'intervento dello sgancio elettromagnetico;
- I_{m2} il minimo valore di corrente che provoca certamente l'intervento dello sgancio elettromagnetico.

Per interruttori ad uso industriale, le prescrizioni della Norma CEI EN 60947-2 (CEI 17-5 VI ed.) in merito alle correnti di funzionamento sono riassunte invece in Tabella 3.

Correnti di riferimento per sganciatori a tempo inverso di interruttori ad uso industriale			
$I_{n(int)}$	$I_{nf} / I_{n(int)}$	$I_f / I_{n(int)}$	t_{conv}
Fino a 63 A	1,05	1,3	1h
Oltre 63 A	1,05	1,3	2h

Tabella 3

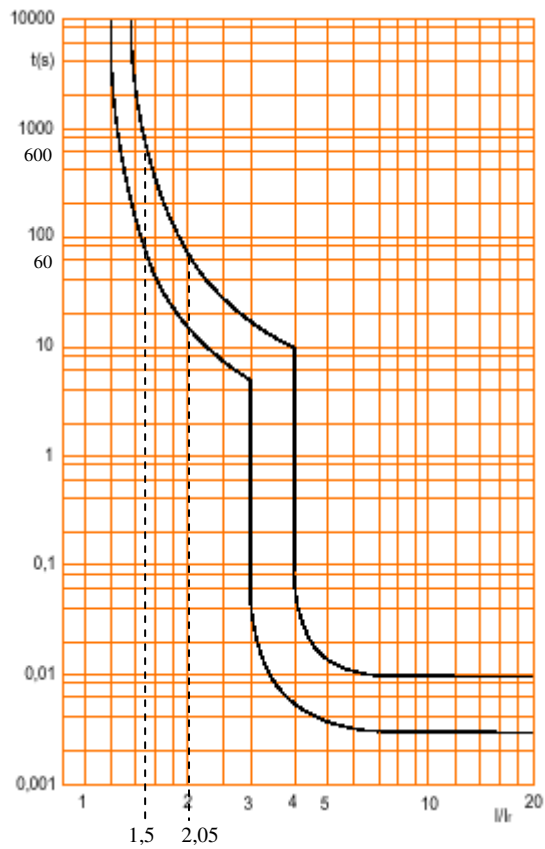
Con riguardo alle correnti di sgancio istantaneo, tali interruttori sono di solito dotati di taratura regolabile con campi di variazione della I_m generalmente compresi fra:

- 3,5 e 10 $I_{n(int)}$ (con una tolleranza di $\pm 20\%$) per interruttori magnetotermici;
- 1,5 e 12 $I_{n(int)}$ per apparecchi dotati di sganciatore elettronico con protezione istantanea contro il cortocircuito;
- 1 e 10 $I_{n(int)}$ per apparecchi dotati di sganciatore elettronico con protezione ritardata contro il cortocircuito.

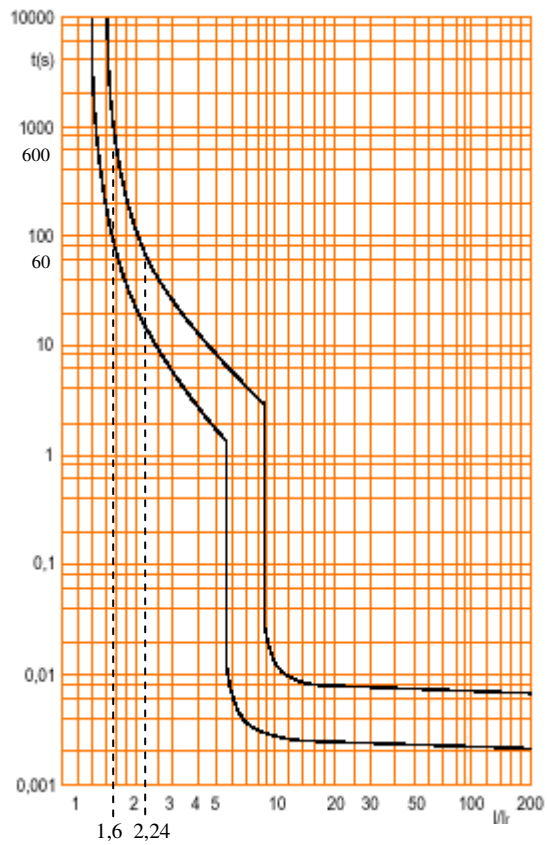
8.2.1. Selettività delle protezioni in presenza di sovraccarichi

In presenza di sovraccarichi, affinché si abbia un comportamento selettivo dell'inverter rispetto ad un interruttore posto a valle, è necessario che quest'ultimo presenti una caratteristica, in zona termica, più bassa (nel piano tempo-corrente) rispetto a quella dell'inverter che, come già detto, è caratterizzata dai limiti di sovraccaricabilità indicati in Tabella 1.

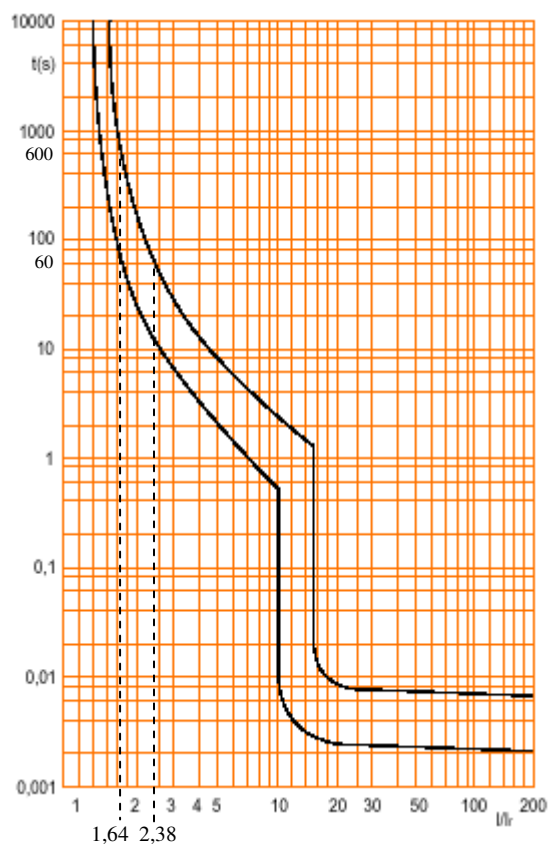
In particolare, riportando un primo limite $t_{max}=600s$ (Tab.1) sulle caratteristiche B-C-D di sicuro intervento di interruttori magnetotermici (ad uso domestico e similare) come in Figura 8.3, verranno fuori dei valori di I/I_n come in Tabella 4.



Tipo B



Tipo C



Tipo D

Caratteristiche rilevate con partenza da freddo alla temperatura di riferimento.
 I = corrente effettiva
 I_r = corrente nominale dell'interruttore
 Temperatura di riferimento: 30°C

Figura 8.3

Caratteristica	I / I _n per t _{max} = 600s
B	1,5
C	1,6
D	1,64

Tabella 4

Considerando che il limite di tempo $t_{\max} = 600\text{s}$ corrisponde per l'inverter (dalla Tab.1) ad una corrente $I_{\max} = 1,25 I_{n(\text{inv})}$, si può rilevare un comportamento selettivo delle protezioni se risultano verificate le seguenti condizioni:

Caratteristica tipo B:

$$I \geq 1,5 I_{n(\text{int})} \quad (1\text{-B}600)$$

$$I \leq 1,25 I_{n(\text{inv})}$$

$$\text{Da cui: } I_{n(\text{int})} \leq 0,83 I_{n(\text{inv})}.$$

Caratteristica tipo C:

$$I \geq 1,6 I_{n(\text{int})} \quad (1\text{-C}600)$$

$$I \leq 1,25 I_{n(\text{inv})}$$

$$\text{Da cui: } I_{n(\text{int})} \leq 0,78 I_{n(\text{inv})}.$$

Caratteristica tipo D:

$$I \geq 1,64 I_{n(\text{int})} \quad (1\text{-D}600)$$

$$I \leq 1,25 I_{n(\text{inv})}$$

Da cui: $I_{n(int)} \leq 0,76 I_{n(inv)}$.

Analogamente, riportando sulle caratteristiche di sicuro intervento di Figura 8.3 il secondo limite di tempo $t_{max} = 60s$, corrisponderanno i rapporti di correnti I/I_n come in Tabella5.

Caratteristica	I / I_n per $t_{max} = 60s$
B	2,05
C	2,24
D	2,38

Tabella 5

Considerando che il limite di tempo $t_{max} = 60s$ corrisponde per l'inverter (dalla Tab.1) ad una corrente $I_{max} = 1,5 I_{n(inv)}$, si può rilevare un comportamento selettivo delle protezioni se risultano verificate le seguenti condizioni:

Caratteristica tipo B:

$$I \geq 2,05 I_{n(int)} \quad (2-B60)$$

$$I \leq 1,5 I_{n(inv)}$$

Da cui: $I_{n(int)} \leq 0,74 I_{n(inv)}$.

Caratteristica tipo C:

$$I \geq 2,24 I_{n(int)} \quad (2-C60)$$

$$I \leq 1,5 I_{n(inv)}$$

Da cui: $I_{n(int)} \leq 0,67 I_{n(inv)}$.

Caratteristica tipo D:

$$I \geq 2,38 I_{n(int)} \quad (2-D60)$$

$$I \leq 1,5 I_{n(inv)}$$

$$\text{Da cui: } I_{n(int)} \leq 0,63 I_{n(inv)}.$$

È immediato constatare che, fra le coppie di condizioni espresse dalle 1 e 2, risulta più restrittiva la (2-D60), per il soddisfacimento della quale dovrà essere:

$$I_{n(int)} \leq 0,63 I_{n(inv)} \quad (3)$$

Se ne conclude pertanto che, con riferimento alle correnti di sovraccarico, per ottenere un comportamento selettivo del sistema di autoprotezione di un inverter rispetto ad interruttori magnetotermici ad uso domestico e similare posti a valle di esso, l'interruttore di taglia maggiore dovrà avere una corrente nominale inferiore alla corrente nominale dell'inverter, secondo la condizione (3).

Per interruttori ad uso industriale, la più ampia variabilità della caratteristica tempo-corrente in base alla tipologia costruttiva ed alla taratura prescelta può portare a condizioni di selettività abbastanza diverse da caso a caso, ma

generalmente più restrittive rispetto a quelle precedentemente esaminate.

Le condizioni per i tempi limite $t_{\max} = 600s$, $t_{\max} = 60s$ diventano le seguenti:

$$I \geq 1,6 \div 2 I_{n(int)} \quad t_{\max} = 600s \quad (4)$$

$$I \leq 1,25 I_{n(inv)}$$

$$I \geq 3 \div 4,5 I_{n(int)} \quad t_{\max} = 60s \quad (5)$$

$$I \leq 1,5 I_{n(inv)}$$

In base alle (5), più restrittive, è possibile ricavare la condizione:

$$I_{n(int)} \leq 0,33 \div 0,5 I_{n(inv)} \quad (6)$$

Per interruttori dotati di sganciatore elettronico, facendo riferimento alla curva minima di intervento per la protezione contro i sovraccarichi, la condizione di selettività più restrittiva si riscontra per $t_{\max} = 600s$ con:

$$I \geq 1,3 I_{n(int)}$$

$$I \leq 1,25 I_{n(inv)}$$

da cui:

$$I_{n(int)} \leq 0,96 I_{n(inv)}$$

Dall'analisi sin qui condotta sul problema della selettività in presenza di correnti di sovraccarico, si può pertanto evidenziare che:

- l'impiego di dispositivi di interruzione ad uso domestico e similare può porre problemi di selettività solo in presenza di interruttori di taglia prossima ai 2/3 di quella dell'inverter;
- maggiore attenzione va posta invece alla scelta della tipologia e della taglia di interruttori magnetotermici ad uso industriale per i quali si dovrà confrontare, di caso in caso, la caratteristica di intervento (in zona termica) con i limiti di sovraccaricabilità dell'inverter;
- l'impiego di interruttori dotati di sganciatore elettronico può consentire di superare i problemi di selettività rilevati al punto precedente per gli interruttori magnetotermici.

8.2.2. Selettività delle protezioni in presenza di cortocircuiti

Come è stato già evidenziato, un inverter con scansione PWM tollera una corrente maggiore di $1,5 I_{n(inv)}$, in limitazione, per il tempo massimo di un secondo. Considerando, ad esempio, le curve di Figura 8.3 nel tratto verticale della caratteristica, si può rilevare che i tempi di sgancio magnetico possono oscillare, in generale, tra le decine di millisecondi ed alcuni secondi, mentre per correnti superiori alle minime che comportano il sicuro sgancio magnetico I_{m2} , il tempo d'intervento sarà minore di un secondo. Pertanto, affinché si

abbia selettività, la corrente limitata che si stabilisce in seguito ad un guasto deve essere sufficientemente elevata da provocare l'intervento (in tempi dell'ordine di circa 10 - 20 ms) dello sganciatore elettromagnetico dell'interruttore posto a valle dell'inverter ed a monte del tratto di linea sede del guasto.

Supposto che la corrente di guasto, in condizione di limitazione dell'inverter, sia almeno $2I_{n(inv)}$ e più elevata della minima corrente che provoca il sicuro intervento dello sganciatore magnetico, è necessario che sia:

$$2 I_{n(inv)} \geq I_{m2} \quad (9)$$

ovvero, in base ai contenuti della Tabella 2 per interruttori ad uso domestico e similare relativamente alle correnti di sicuro sgancio magnetico:

$$I_{m2} = I_{n(int)} K \quad \text{con } K = 5 \text{ per B, } 10 \text{ per C, } 20 \text{ per D} \quad (9')$$

Dalla (9) e (9') discende $I_{n(int)} K \leq 2 I_{n(inv)}$ e sostituendo i diversi K si avranno le condizioni di selettività:

$$I_{n(int)} \leq 0,4 I_{n(inv)} \quad \text{per interruttori con caratteristica B} \quad (10)$$

$$I_{n(int)} \leq 0,21 I_{n(inv)} \quad \text{per interruttori con caratteristica C} \quad (11)$$

$$I_{n(int)} \leq 0,1 I_{n(inv)} \quad \text{per interruttori con caratteristica D} \quad (12)$$

Così pure, per interruttori magnetotermici ad uso industriale, al variare della taratura adottata per lo sgancio elettromagnetico, la condizione di selettività che se ne ricava sarà generalmente compresa fra le condizioni (10) e (12) in precedenza espresse.

Negli interruttori elettronici, la già evidenziata possibilità di adottare soglie di sgancio istantaneo estremamente basse può consentire di risolvere i problemi di selettività rispetto al convertitore, anche in presenza di correnti di cortocircuito.

Va osservato, tuttavia, che i problemi di selettività qui discussi riguardano soprattutto gli interruttori di taglia maggiore installati immediatamente a valle dell'inverter (e non quelli terminali). Per tali interruttori, l'adozione di soglie di sgancio istantaneo molto basse pone generalmente alcune difficoltà derivanti:

- dalla possibilità di scatti inopportuni in presenza di sovraccarichi di breve durata dovuti, ad esempio, all'avviamento di uno o più motori;

- dalla necessità di ricercare il miglior compromesso fra le esigenze di selettività rispetto all'inverter, da un lato, e dall'altro rispetto agli interruttori posti a valle.

È evidente allora che in presenza di guasti a bassa impedenza il problema della selettività delle protezioni presenta elementi di maggiore criticità rispetto al caso dei sovraccarichi prima esaminato, con le conseguenti possibili implicazioni sulla continuità del servizio. L'importanza che soprattutto oggi riveste tale aspetto della fornitura elettrica richiama pertanto una particolare attenzione sul problema posto, soprattutto in considerazione del fatto che nella maggior parte dei casi l'impiego di convertitori statici c.c./c.a. è motivato dalla richiesta di una maggiore qualità del servizio.

8.3 Le soluzioni tradizionali per garantire la selettività

Le considerazioni sin qui sviluppate delineano chiaramente i contorni di uno degli aspetti progettuali più critici per gli impianti di distribuzione alimentati attraverso inverter. Le soluzioni tradizionalmente adottate in tal senso sono ispirate, in generale, ai seguenti criteri:

- "A" utilizzare un commutatore statico, Figura 8.1, con funzioni di by-pass del convertitore per disporre, all'occorrenza, di tutta la potenza di cortocircuito della rete;

- “B” prevedere una adeguata ripartizione delle linee in partenza sino ad ottenere correnti di impiego e quindi correnti nominali degli interruttori di protezione di valore sufficientemente basso da verificare le condizioni di selettività prima esaminate;
- “C” elevare la potenza nominale dell’inverter, come misura in un certo senso reciproca rispetto alla precedente.

La soluzione A è praticabile solo quando la rete è vicina (come negli UPS) ed è disponibile. Quest’ultima condizione può essere difficilmente verificata in tutti quei casi in cui il convertitore è destinato al servizio di emergenza ed è utilizzato, pertanto, durante le interruzioni accidentali e/o programmate dell’alimentazione principale. In ogni caso la commutazione delle correnti di guasto sulla rete, ove attuabile, oltre a procurare sollecitazioni non irrilevanti, è fonte di disturbi (in particolare buchi di tensione) che si propagano nel sistema di alimentazione.

La soluzione B che, almeno a prima vista, sembra essere quella di più semplice ed economica realizzazione, in realtà presuppone la possibilità concreta di frazionare il carico. Ciò è possibile:

- per impianti nuovi, progettando opportunamente l’articolazione della distribuzione, e non per impianti già esistenti che non possiedono i requisiti di frazionamento del carico richiesti;

- in assenza di utilizzatori che già singolarmente richiedono correnti superiori a quelle massime compatibili con le condizioni di selettività (per la presenza, ad esempio, di un motore di elevata potenza potrebbe essere preclusa non solo la selettività delle protezioni ma, talvolta, la possibilità di avviamento del motore stesso);

- in assenza di vincoli funzionali e/o normativi per i quali può essere necessario alimentare con un unico circuito, sezionabile in un sol punto, un aggregato di carichi utilizzatori situati nella stessa area (come ad esempio nel caso di ambienti a rischio di esplosione, ambienti a maggior rischio incendio, ecc.).

In ogni caso i vincoli derivanti dalla soluzione B, laddove applicabile, vanno a creare condizioni ancora più restrittive rispetto a quelle dei vincoli topologici, funzionali e di sicurezza già presenti, con un inevitabile riflesso sui costi dell'impianto. L'entità degli oneri aggiuntivi imputabili a tale aspetto può variare, com'è ovvio, da caso a caso.

La soluzione C, innalzamento della potenza dell'inverter, non presenta nessuna particolare restrizione realizzativa in termini strettamente tecnici, ma può avere un impatto economico molto forte nella determinazione dei costi del sistema di alimentazione dell'impianto, visto che il costo di un inverter può essere approssimativamente espresso come: $\text{costo} = 0,96 P^{0,7}$, con $\text{costo}[10^6\text{€}]$ e $P[\text{kVA}]$. D'altra parte è abbastanza evidente che si tratta di

effettuare un sovradimensionamento dell'inverter (che può essere anche di 2-3 volte la potenza di normale dimensionamento) senza una effettiva utilizzazione in condizioni di normale funzionamento della sua potenza erogabile ma per sfruttare, in presenza di guasti, la maggiore potenza di cortocircuito presente o consentire il corretto avviamento di grossi motori.

Gli aspetti evidenziati, oltre a condizionare le scelte riguardanti le applicazioni tradizionali degli inverter, talvolta si pongono anche come un potenziale limite alla possibilità di adottare nuove ipotesi di distribuzione, basate sull'impiego della corrente continua, per migliorare le caratteristiche di vettoriamento nelle reti bt e contenere efficacemente gli effetti delle interruzioni e di altri disturbi (microinterruzioni, buchi di tensione e distorsioni armoniche) sull'utenza. L'esame delle possibili misure in precedenza viste, evidenzia pertanto la presenza di una casistica per la quale non c'è, in atto, una soluzione vera e propria al problema posto. Ne discende l'opportunità di ricercare ulteriori possibili provvedimenti per allargare il ventaglio delle scelte praticabili e poter predisporre, di caso in caso, le condizioni più adeguate in termini tecnico-economici a garantire una protezione tempestiva e sufficientemente selettiva degli impianti, alimentati da inverter.

8.4 Un possibile provvedimento, come garanzia di selettività, basato sul principio della risonanza

La soluzione proposta consiste nell'interposizione, fra l'inverter e l'utenza, di un esapolo (nel caso generale di sistemi trifase) di tipo LC la cui inserzione, all'instaurarsi del fenomeno di limitazione, crei una condizione prossima a quella di risonanza di tipo parallelo, con l'effetto di esaltare la corrente lato carico (sino ad ottenere una potenza di cortocircuito adeguata) sgravando contemporaneamente l'inverter dalla condizione di sovraccarico che ha generato l'effetto di limitazione.

Nota:

- Per constatare l'effetto della risonanza parallelo si può, per esempio, considerare il circuito di Figura 8.I con una tensione V costante.

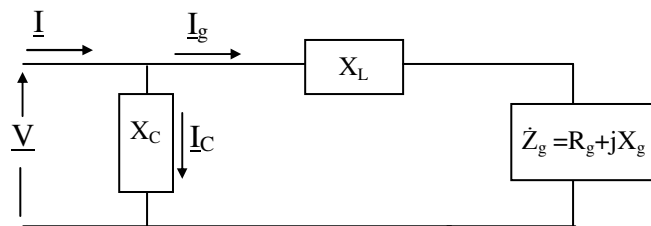


Figura 8.I

In termini di ammettenze:

$$\underline{V} = \underline{I} \dot{Z}_{\text{tot}} \Rightarrow$$

$$\underline{I} = \underline{V} \ 1/\dot{Z}_{\text{tot}} = \underline{V} \ \dot{Y}_{\text{tot}} = \underline{V} (\dot{Y}_C + \dot{Y}_{L+g}) \quad (\text{a})$$

dove:

$$\dot{Y}_C = 1/\dot{Z}_C = 1/(0 - j X_C) = (0 + j X_C) / X_C^2 = j (1 / X_C) = G_C + j B_C \quad \text{con } G_C = 0$$

$$\dot{Y}_{L+g} = 1/\dot{Z}_{L+g} = 1/ [R_g + j (X_L + X_g)] = [R_g - j (X_L + X_g)] / [R_g^2 + (X_L + X_g)^2] =$$

$$R_g / [R_g^2 + (X_L + X_g)^2] - j (X_L + X_g) / [R_g^2 + (X_L + X_g)^2] = G_{L+g} - j B_{L+g}$$

E quindi sostituendo nella (a):

$$\underline{I} = \underline{V} (\dot{Y}_C + \dot{Y}_{L+g}) = \underline{V} [j B_C + (G_{L+g} - j B_{L+g})] = \underline{V} [G_{L+g} + j (B_C - j B_{L+g})] \quad (b)$$

$$\underline{I} = \underline{V} [G_{L+g} + j (B_C - j B_{L+g})] = \underline{I}_{G(L+g)} + \underline{I}_C + \underline{I}_{B(L+g)}$$

$$\underline{I}_{G(L+g)} = \underline{V} G_{L+g}; \quad \underline{I}_C = \underline{V} j B_C; \quad \underline{I}_{B(L+g)} = \underline{V} (- j B_{L+g});$$

Il circuito di Figura 8.I diventa:

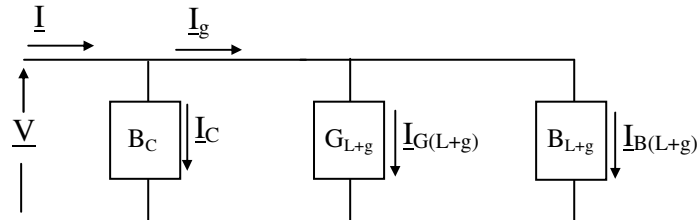


Figura 8.II

Dalla (b), prendendo come riferimento la tensione \underline{V} , si può tracciare il diagramma vettoriale di Figura 8.III, avendo considerato che in condizioni di uguaglianza tra la reattanza induttiva e quella capacitiva $X_L = X_C = X_{L,C}$, la $B_{L+g} = (X_{L,C} + X_g) / [R_g^2 + (X_{L,C} + X_g)^2]$ sarà più piccola della $B_C = 1/X_{L,C}$, e quindi la corrente $\underline{I}_{B(L+g)}$ avrà modulo minore della \underline{I}_C .

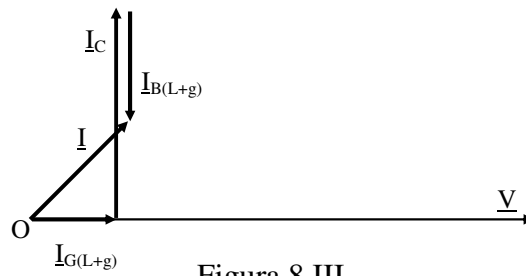


Figura 8.III

Inoltre si può rilevare graficamente la corrente \underline{I}_g che attraversa l'impedenza di carico \dot{Z}_g sommando vettorialmente le $\underline{I}_{G(L+g)}$ e $\underline{I}_{B(L+g)}$ come in Figura 8.IV.

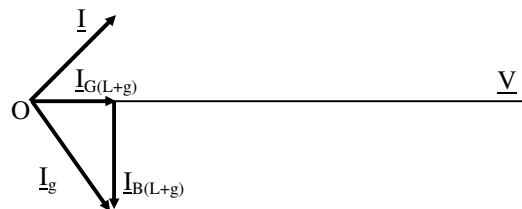


Figura 8.IV

Si capisce che variando il valore della $X_{L,C}$ per una fissata \dot{Z}_g varierà anche la differenza tra la corrente di ingresso \underline{I} e la corrente al carico \underline{I}_g .

Supponendo di essere in una condizione con bassa impedenza di carico \dot{Z}_g , con R_g e X_g molto piccole rispetto ad $X_{L,C}$, le G_{L+g} e B_{L+g} diventano:

$$G_{L+g} \cong R_g / (X_{L,C})^2 \Rightarrow \underline{I}_{G(L+g)} = \underline{V} G_{L+g} \cong \underline{V} R_g / (X_{L,C})^2$$

$$B_{L+g} \cong X_{L,C} / (X_{L,C})^2 = 1 / X_{L,C} \text{ e quindi } B_{L+g} \cong B_C \Rightarrow$$

$$\underline{I}_{B(L+g)} = \underline{V} (-j B_{L+g}) \cong \underline{V} (-j / X_{L,C}) = \underline{I}_C$$

Graficando in questa nuova situazione, come in Figura 8.V, si vede come la corrente in ingresso \underline{I} risulti inferiore in modulo alla corrente al carico \underline{I}_g che è quindi sostenuta dalla capacità e dall'induttanza.

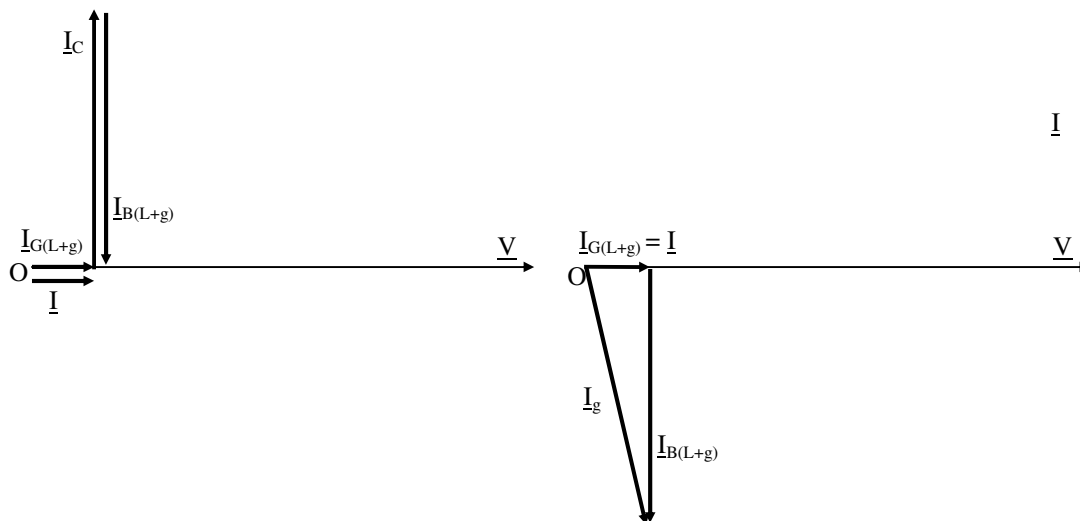


Figura 8.V

Fine Nota.

La Figura 8.4 riporta lo schema di principio di un dispositivo siffatto che, nel seguito, verrà indicato come CPD cioè Current Pumping Device.

In condizioni di normale funzionamento (ovvero sino a quando il controllore non rileva una tensione inferiore ad un prefissato valore di soglia) il dispositivo è assolutamente trasparente alla rete e non ne influenza, pertanto, il funzionamento. In tali condizioni, infatti, le coppie di SCR poste in antiparallelo sugli induttori serie saranno in conduzione sincronizzata e l'interruttore di inserzione/protezione dei condensatori in derivazione sarà aperto. L'instaurarsi di una sovracorrente tale da portare in limitazione

l'inverter provocherà un'attenuazione dell'onda di tensione tanto più consistente quanto minore sarà, in queste condizioni, l'impedenza del carico (secondo la caratteristica di Figura 8.2).

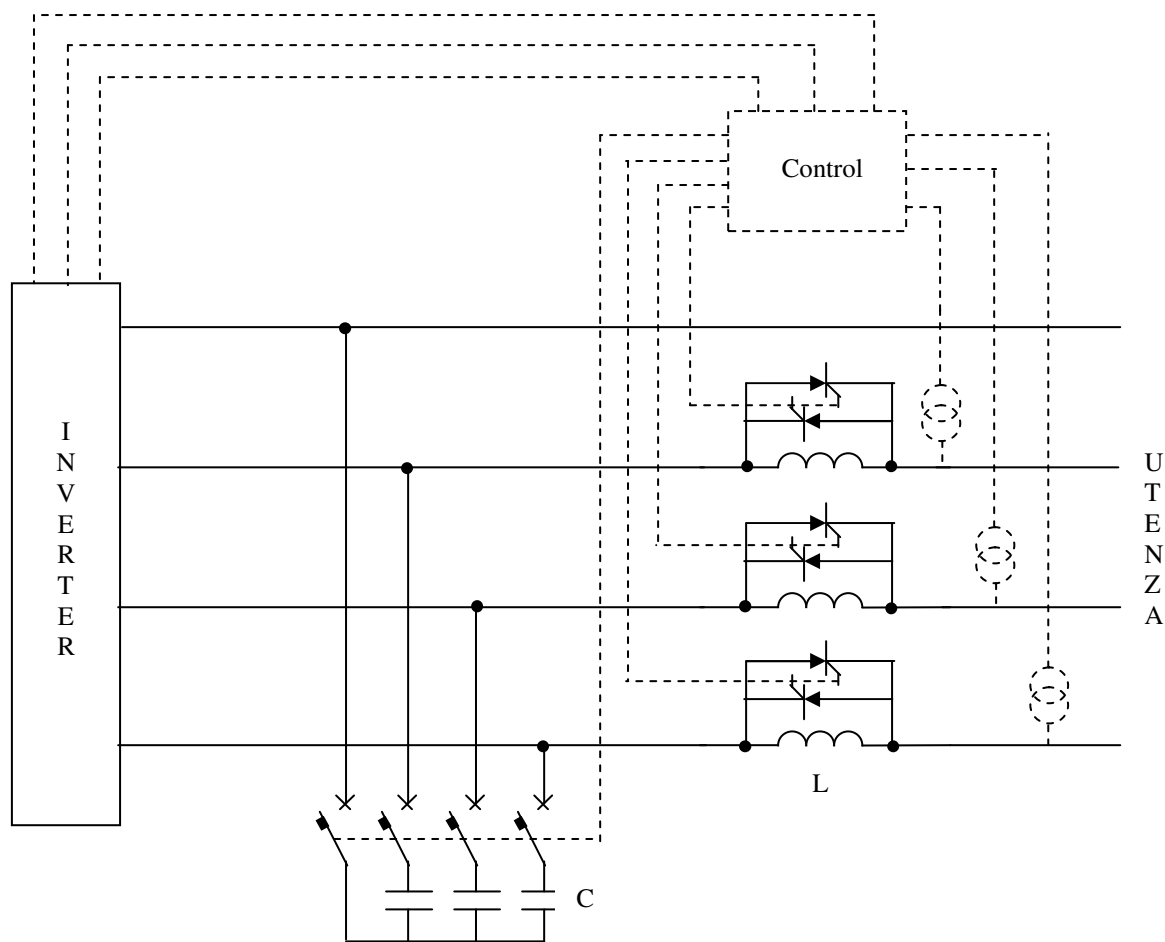


Figura 8.4

Al di sotto della soglia di tensione prefissata, il controllore inibirà gli SCR e comanderà l'inserzione dei condensatori, diversificando il regime delle tensioni e delle correnti a monte e a valle del CPD (che prima erano

coincidenti), in base all'impedenza del carico e alle caratteristiche del circuito.

Per valutare gli effetti di tale inserzione, si può fare riferimento allo schema di Figura 8.5, che si riferisce per semplicità ad una sola fase del sistema a CPD disinserito 5-a ed inserito 5-b.

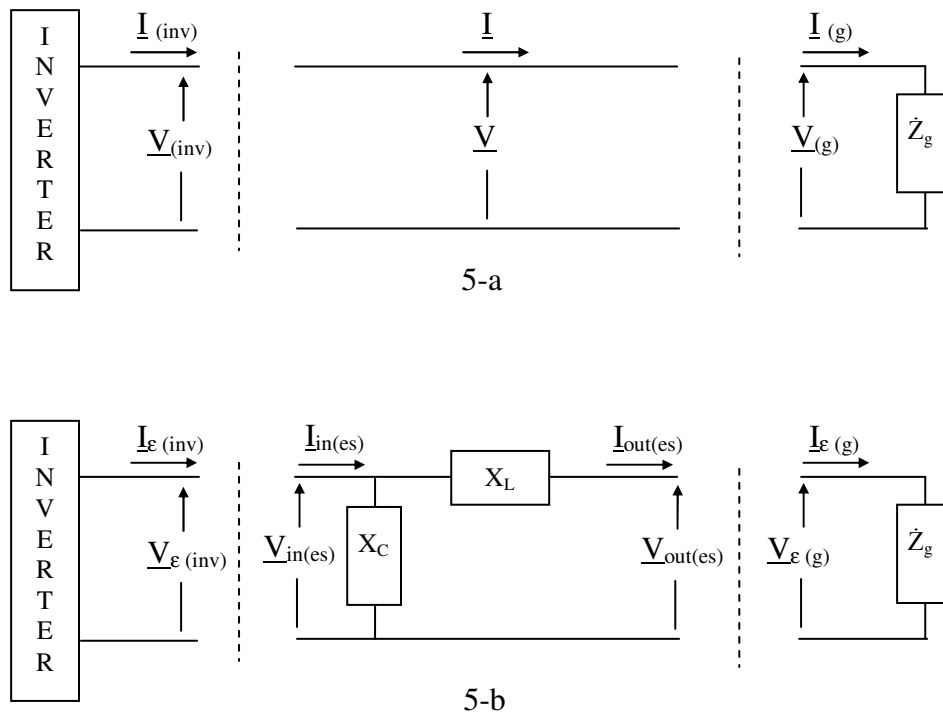


Figura 8.5

Nel primo caso, a CPD assente, essendo verificato il sistema di uguaglianze:

$$\underline{V}_{(inv)} = \underline{V}_{(g)} \quad (13)$$

$$\underline{I}_{(inv)} = \underline{I}_{(g)}$$

la condizione di funzionamento che si stabilisce nell'impianto, a regime, è quella che soddisfa la coppia di equazioni:

$$\underline{V}_{(inv)} = F_{car}(\underline{I}_{(inv)}) \quad (14)$$

$$\underline{V}_{(g)} = \underline{Z}_{(g)} \underline{I}_{(g)}$$

avendo indicato con F_{car} la funzione caratteristica dell'inverter e con $V_{(g)}$ e $I_{(g)}$ rispettivamente la tensione e la corrente sul carico. Con riferimento ai moduli delle grandezze, la Figura 8.6 mostra, a titolo di esempio, le caratteristiche nel piano V-I relative alle equazioni (14) ed il punto di lavoro M associato alla soluzione del precedente sistema dove la retta 1 (caratteristica di carico) è relativa all'equazione $V_{(g)}=Z_{(g)}I_{(g)}$.

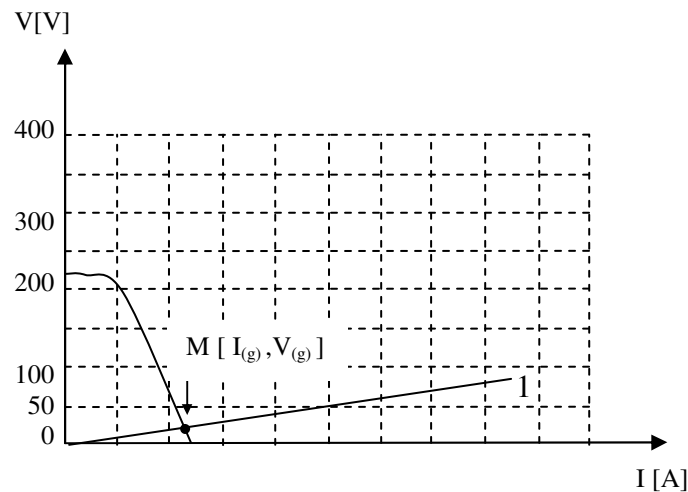


Figura 8.6

A CPD inserito (caso 5-b di Figura 8.5), supposto di realizzare la condizione di accordo alla frequenza fondamentale:

$$X_L \text{ (induttore serie)} = X_C \text{ (condensatore parallelo)} = X_{L,C}$$

e indicando con F_{1car} la funzione caratteristica dell'inverter in queste particolari condizioni di funzionamento.

Nota:

- Si può ottenere una caratteristica F_{1car} generalmente più alta rispetto a F_{car} (anche del 30-50%) controllando l'inverter attraverso le tensioni a valle del CPD. Tenuto conto che tali tensioni assumono, a CPD inserito, valori abbastanza modesti, questo tipo di controllo dà luogo in tali condizioni ad un fenomeno di sovramodulazione che contribuisce a sostenere la corrente $I_{\varepsilon(g)}$.

Tenendo conto delle uguaglianze sotto:

$$\underline{V}_{\varepsilon(inv)} = \underline{V}_{in(es)} \quad (15)$$

$$\underline{I}_{\varepsilon(inv)} = \underline{I}_{in(es)}$$

$$\underline{V}_{\varepsilon(g)} = \underline{V}_{out(es)} \quad (16)$$

$$\underline{I}_{\varepsilon(g)} = \underline{I}_{out(es)}$$

la condizione di funzionamento dell'inverter può essere espressa attraverso il seguente sistema di equazioni che individua il punto $N(\underline{V}_{\varepsilon(inv)}, \underline{I}_{\varepsilon(inv)})$ in Figura

8.7:

$$\underline{V}_{\varepsilon(inv)} = F_{1car}(\underline{I}_{\varepsilon(inv)}) \quad (17)$$

$$\underline{V}_{\varepsilon(inv)} = \underline{V}_{in(es)} = [(\underline{X}_{L,C}^2 / \underline{Z}_g) - j \underline{X}_{L,C}] \underline{I}_{in(es)}$$

dove $(X_{L,C}^2/\dot{Z}_g) - jX_{L,C}$ rappresenta l'impedenza totale vista dall'inverter e la retta 2 (caratteristica di carico a valle dell'inverter) è associata all'equazione

$$\underline{V}_{\mathcal{E}(inv)} = |(X_{L,C}^2/\dot{Z}_g) - jX_{L,C}| \underline{I}_{\mathcal{E}(inv)}$$

Analogamente, in base alle (16) e attraverso le equazioni ingresso-uscita del circuito CPD, la condizione di funzionamento a regime lato carico può essere espressa attraverso il sistema (18) considerando che:

$$\underline{V}_{out(es)} = \underline{V}_{in(es)} - jX_{L,C} \underline{I}_{out(es)} = F_{1car}(\underline{I}_{\mathcal{E}(inv)}) - jX_{L,C} \underline{I}_{out(es)}$$

$$\text{ma} \quad \underline{I}_{\mathcal{E}(inv)} = \underline{I}_{out(es)} + \underline{V}_{in(es)} / (-jX_{L,C})$$

$$\text{e quindi} \quad \underline{V}_{out(es)} = F_{1car}[\underline{I}_{out(es)} + \underline{V}_{in(es)} / (-jX_{L,C})] - jX_{L,C} \underline{I}_{out(es)}$$

$$\text{ma} \quad (-jX_{L,C} \underline{I}_{out(es)} + \underline{V}_{in(es)}) / (-jX_{L,C}) = \underline{V}_{out(es)} / -jX_{L,C}$$

e in definitiva:

$$\underline{V}_{out(es)} = F_{1car}(\underline{V}_{out(es)} / -jX_{L,C}) - jX_{L,C} \underline{I}_{out(es)} \quad (18)$$

$$\underline{V}_{\mathcal{E}(g)} = \dot{Z}_g \underline{I}_{\mathcal{E}(g)}$$

che, sempre con riferimento ai moduli delle grandezze, dà luogo nel piano V-I alla soluzione corrispondente al punto di lavoro O evidenziato in Figura 8.7.

Dall'analisi delle caratteristiche riportate in Figura 8.7 si può osservare che, per opportuni valori di Z_g e $X_{L,C}$, l'inserzione del CPD in condizioni di limitazione:

- attenua la corrente erogata dall'inverter da I_g (punto M) a $I_{\epsilon(inv)}$ (punto N), eliminando gli effetti del fenomeno di limitazione ed in particolare l'intervento del sistema di autoprotezione;

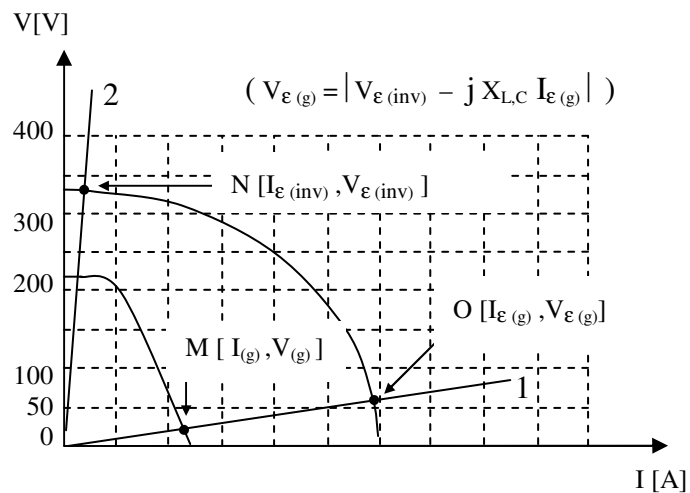


Figura 8.7

- genera una sovratensione (da $V_{(g)}$ a $V_{\epsilon(inv)}$) che può essere comunque limitata entro un prefissato valore massimo (ad esempio $1,5V_N$) e non si manifesta, com'è ovvio, sul carico ma solo in uscita dall'inverter;
- esalta la corrente sul carico da $I_{(g)}$ (punto M) a $I_{\epsilon(g)}$ (punto O) favorendo, in tal modo, la tempestività e la selettività del sistema di protezione posto a valle;
- supporta la tensione sul carico (da $V_{(g)}$ a $V_{\epsilon(g)}$) limitando l'ampiezza del buco di tensione che si manifesta presso tutti i carichi utilizzatori non interessati direttamente dal guasto. Quest'ultimo effetto, d'altra parte, nasce come

immediata conseguenza dell'innalzamento della sovracorrente, che produce sulla stessa impedenza $Z_{(g)}$ una c.d.t. più elevata.

Per caratterizzare sinteticamente la prestazione del tipo di provvedimento sopra descritto, è sembrato significativo definire un “fattore di esaltazione della corrente ϵ ” come il rapporto fra la corrente risonante a regime e la corrente limitata, ovvero, con la stessa simbologia sin qui adottata:

$$\epsilon = I_{\epsilon(g)} / I_{(g)} \quad (19)$$

Tale fattore, può essere assunto come parametro di progetto per il dimensionamento del CPD in base alle caratteristiche dell'impianto utilizzatore, dei dispositivi di interruzione presenti e della sorgente di alimentazione.

8.4.1 Dipendenza del fattore di esaltazione ϵ dalla reattanza di risonanza $X_{L,C}$ e da Z_g

Considerato che il principio fisico su cui si basa il provvedimento proposto è quello della risonanza di tipo parallelo, già qualitativamente è immediato aspettarsi che l'efficacia del provvedimento stesso, in termini di innalzamento di corrente ottenibile, sia tanto maggiore quanto più:

- modesta è l'impedenza Z_g , ovvero quanto più ci si approssima alla condizione di perfetto accordo fra la reattanza induttiva e quella capacitiva (come visto nella Nota del paragrafo precedente) ;
- limitata è la reattanza di accordo $X_{L,C}$, dalla quale dipende in modo inverso la corrente risonante;
- prossimo a quello ideale è il comportamento dei componenti (induttori e condensatori) impiegati.

Per apprezzare con maggiore dettaglio il legame di interdipendenza fra le grandezze suddette è utile riferirsi alla Figura 8.8, che riporta l'andamento del fattore di esaltazione ϵ al variare dell'impedenza Z_g per diversi valori della reattanza $X_{L,C}$. In particolare, le curve raffigurate si riferiscono al caso di un inverter con tecnologia IGBT PWM da 100 kVA, per impedenze Z_g prevalentemente resistive ($\cos \varphi = 0,9$), come è per la maggior parte delle impedenze di guasto in bassa tensione per impianti di tali dimensioni, e per caratteristiche dei componenti reattivi ragionevolmente mediate tra quelle reperibili nei cataloghi commerciali.

Osservando gli andamenti riportati in Figura si evince facilmente che:

- per ottenere valori del fattore di esaltazione superiori all'unità (che è l'obiettivo minimo che ci si propone di conseguire) è necessario adottare reattanze comunque inferiori a $0,5\Omega$.

- al diminuire di $X_{L,C}$, cresce la sensibilità del fattore ϵ dall'impedenza Z_g , con l'effetto che reattanze molto basse (ad esempio pari a $0,1\Omega$) producono un notevole innalzamento della corrente (sino a 5-6 volte) per guasti abbastanza

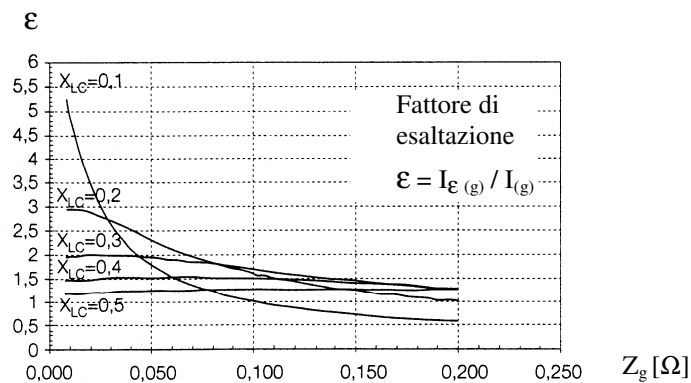


Figura 8.8

vicini al punto di alimentazione (Z_g di valore molto basso), mentre possono addirittura provocare una ulteriore riduzione della corrente oltre certi valori di Z_g (ad esempio $0,1\Omega$) per guasti lontani e/o ad elevata impedenza).

Tali considerazioni sono molto utili sia per il dimensionamento delle reattanze, sia per il controllo del CPD in esercizio. Per dato impianto, infatti, con riferimento agli eventuali interruttori di taglia maggiore che non garantiscono un comportamento selettivo, è possibile calcolare il fattore di esaltazione minimo necessario per raggiungere almeno la corrente di sgancio elettromagnetico.

Dalle curve di Figura 8.8 si potrà allora ricavare il valore di reattanza $X_{L,C}$ necessario allo scopo ed il massimo valore corrispondente di Z_g per il quale l'inserzione del circuito risonante produce un effetto soddisfacente o comunque positivo (anche al di sotto della corrente di sgancio magnetico, tenuto conto del comportamento a tempo inverso del relè termico, quanto più elevata è la corrente tanto più tempestivo sarà l'intervento degli interruttori). In corrispondenza al valore massimo di Z_g così trovato, infine, si può determinare la soglia minima di tensione per controllare l'inserzione del CPD in fase di esercizio.

8.4.2 Problematiche tecnico-economiche connesse con l'impiego di Current Pumping Devices

Effettuare un'analisi rigorosa dei costi associati all'impiego di CPD non risulta in atto possibile, giacché dispositivi di questo tipo non vengono attualmente costruiti e anche i relativi componenti elettrici di potenza presenti in commercio presentano caratteristiche e costi determinati in base ad altre, diverse, finalità applicative. Il problema si pone in modo particolare per gli elementi capacitivi che, tenuto conto dell'ordine di grandezza delle reattanze e quindi dei valori di capacità previsti, presentano le maggiori criticità in termini sia di costo che di ingombro, soprattutto se si fa riferimento ai condensatori attualmente reperibili in commercio per il rifasamento ed il

filtraggio delle armoniche nei sistemi di potenza. È noto peraltro che tali componenti vengono generalmente collegati a triangolo, in modo da ottenere le reattanze desiderate con un impegno di capacità pari ad un terzo di quello complessivamente necessario nel collegamento a stella. Nei CPD, invece, i condensatori devono essere collegati a stella, in modo da consentire l'esaltazione della corrente di cortocircuito anche per guasti di tipo monofase. D'altra parte, i condensatori (e tutti gli altri componenti) non devono garantire un servizio continuativo ma limitato ad intervalli di tempo estremamente brevi, appena necessari a provocare lo sgancio dei dispositivi di protezione. Per essi inoltre, anche la frequenza media delle inserzioni in rete sarebbe abbastanza ridotta, tenuto conto delle normali probabilità di guasto sugli impianti elettrici. Con tali premesse, dalle prime valutazioni di massima sinora effettuate, l'impiego di CPD costruiti con condensatori isolati in polipropilene metallizzato (usualmente impiegate nei sistemi di rifasamento e nei filtri) sembrerebbe al momento proponibile soltanto nel caso di installazioni di potenza medio-alta (a partire da 100-150 KVA), per i quali:

- tenuto conto delle normali dimensioni di un inverter di tale potenza, la presenza dei CPD non inciderebbe in modo rilevante sull'impegno di spazio complessivo;
- i costi d'attuazione presunti di tale provvedimento si manterrebbero entro il 15% del costo dell'inverter e risulterebbero comunque inferiori rispetto a

quelli associabili ad un sovradimensionamento dell'inverter stesso, tale da garantire lo stesso innalzamento di corrente.

Attualmente si sta valutando la possibilità di impiegare altri condensatori (quali ad esempio quelli attualmente reperibili in commercio per l'avviamento dei motori) che, presentando costi notevolmente più bassi rispetto ai condensatori in polipropilene, consentirebbero di ottenere una sostanziale riduzione del limite di potenza al di sopra del quale l'attuazione del provvedimento in esame potrebbe essere di concreto interesse. Anche per gli altri componenti (induttori, interruttori statici, ecc.) previsti in un CPD, meno critici dal punto di vista dei costi, si stanno al momento valutando soluzioni disponibili in commercio che possano consentire di ottenere miglioramenti in termini di prestazioni e costi.

8.5 Un esempio applicativo

Al fine di analizzare uno dei possibili casi in cui il problema trattato si può presentare, si consideri il sistema schematizzato in Figura 8.9.

Si tratta di un impianto alimentato in bassa tensione (400 V), attraverso un inverter con scansione PWM da 100 kVA. La Tabella 6 riporta le caratteristiche principali delle linee (in cavo) e dei dispositivi di interruzione (supposti di tipo magnetotermico) posti a monte di esse.

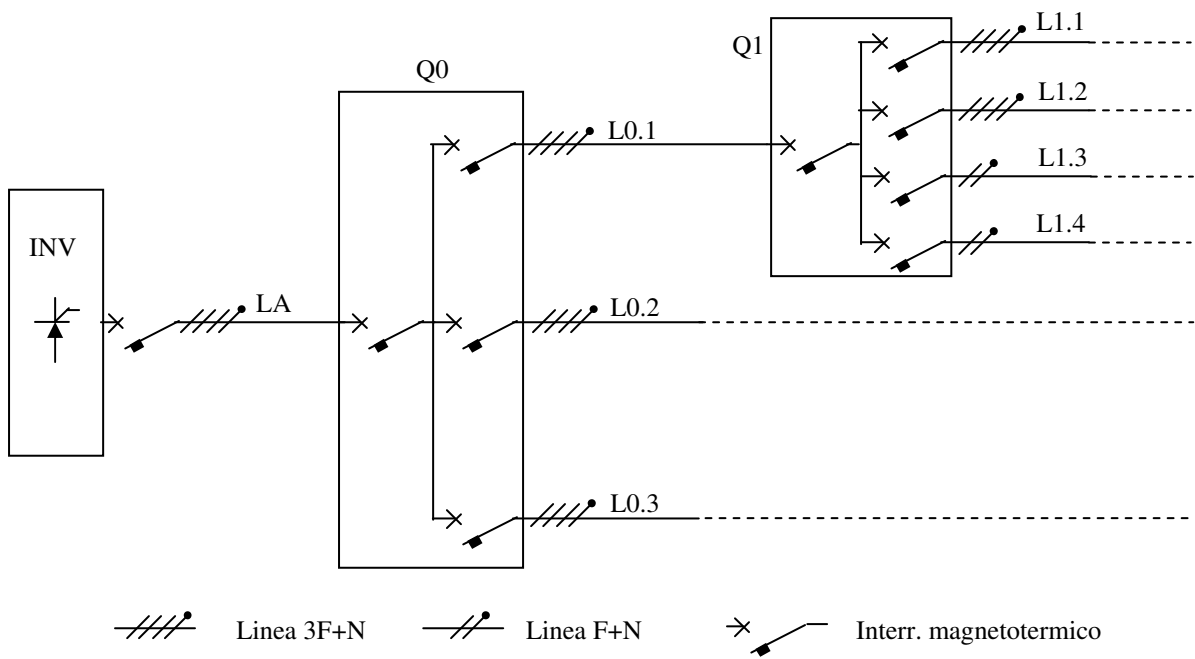


Figura 8.9

Caratteristiche dei cavi e degli interruttori							
Linea	Cavi					Interruttori	
	Sez.[mm ²]	I _b [A]	I _z [A]	r[Ω/km]	l[m]	I _N [A]	Caratteristica
LA	50	145	168	0,38	10	160	Industriale
L0.1	16	64	85	1,14	20	80	C
L0.2	16	56	85	1,14	35	80	C
L0.3	4	24	35	4,3	50	25	C
L1.1	4	24	35	4,3	30	25	C
L1.2	4	22	35	4,3	18	25	C
L1.3	4	20	35	4,30	25	25	C
L1.4	2,5	14	19	7,21	23	16	C

Tabella 6

Alla potenza apparente dell'inverter $A_n = 100\text{kVA}$ corrisponde una corrente nominale dello stesso pari a:

$$I_{n(\text{inv})} = A_n / \sqrt{3} V_n = 144 \text{ A}$$

Selettività in zona termica

- Consideriamo la selettività in zona termica tra i soli interruttori.

La condizione di selettività amperometrica per sovraccarico (cap.6) è data da:

$$I_{n(\text{monte})} / I_{n(\text{valle})} \geq 2$$

Considerando i dati in Tabella 6, si riscontra che esiste selettività amperometrica tra tutti gli interruttori.

- Per quanto riguarda la selettività tra interruttori e l'inverter, tenendo conto della condizione di selettività in zona termica (per la 3):

$$I_{n(\text{int})} \leq 0,63 I_{n(\text{inv})} = 90 \text{ A}$$

Confrontando, il valore sopra con le correnti nominali degli interruttori (Tab.6) si può verificare che esiste selettività per tutti gli interruttori tranne che per il primo. Per quest'ultimo, posto a protezione della linea LA, il problema della selettività com'è ovvio non si pone.

In definitiva, tutti gli interruttori e l'inverter possono ritenersi sufficientemente selettivi in zona termica.

Selettività in zona magnetica

- Consideriamo la selettività in zona magnetica tra i soli interruttori.

La condizione di selettività amperometrica per cortocircuito (cap.6) è data da:

$$I_{m(\text{monte})} / I_{m(\text{valle})} \geq 1,5$$

Per l'interruttore (ad uso industriale) che protegge la linea LA, la corrente di sgancio magnetico (tali interruttori sono di solito dotati di taratura regolabile con campi di variazione della I_m generalmente compresi fra 3,5 e $10 I_{n(int)}$ per interruttori magnetotermici) la si può assumere, considerando il massimo valore della regolazione, come:

$$I_{m(monte)} = 10 I_n$$

Per interruttori con caratteristica tipo C, a protezione delle linee L0.1, L0.2, L0.3, la I_m d'interesse (dalla Tab.2) per la selettività, cioè il minimo valore di corrente che provoca certamente l'intervento dello sganciatore elettromagnetico, sarà:

$$I_{m2(valle)} = 10 I_n$$

Quindi si può dire che esiste selettività, basta vedere i rapporti tra le correnti nominali in Tab.6, (anche regolando l' I_m dell'interruttore a protezione di LA ad un valore minore di $10 I_n$) tra l'interruttore immediatamente a valle dell'inverter, e tra gli interruttori a protezione di L0.1, L0.2 e L0.3. Per gli altri interruttori, di taglia minore, la selettività rispetto al principale sarà ovviamente assicurata.

Per quanto riguarda la selettività tra l'interruttore di L0.1 e quelli del sottoquadro Q1, assumendo per questi ultimi una corrente di sgancio magnetico pari a $10 I_n$ (Tab.2) perché a valle dello studio selettivo, e considerando per l'interruttore di L0.1 una corrente di sgancio magnetico pari

invece a 5 volte la I_n (considerando la minima corrente che può provocare lo sgancio magnetico dalla Tab.2), si verifica che esiste selettività tra i suddetti interruttori; infatti considerando l'interruttore di L0.1 e l'interruttore di L1.1 (di taglia uguale o maggiore rispetto agli altri dello stesso sottoquadro), si ha:

$$I_{m(\text{monteL0.1})} = 5 I_n$$

$$I_{m(\text{valleL1.1})} = 10 I_n$$

$$I_{m(\text{monteL0.1})} / I_{m(\text{valleL1.1})} = 5 I_n / 10 I_n = 400 / 250 = 1,6$$

e quindi è rispettata la condizione di selettività per tutti gli interruttori del sottoquadro Q1.

- Per quanto riguarda la selettività tra interruttori e l'inverter, per l'interruttore a protezione della linea LA, questa non è ovviamente necessaria, mentre per gli altri bisogna considerare la condizione di selettività in zona magnetica:

$$I_{n(\text{int})} \leq 0,21 I_{n(\text{inv})}$$

per interruttori con caratteristica C, relazione (11), si avrà:

$$I_{n(\text{int})} \leq 30,3 A$$

Che è verificata (Tab.6) per tutti gli interruttori interessati tranne che per quelli posti a protezione di L0.1 e L0.2 (installati sul quadro Q0).

In tali condizioni, se non si dispone di una rete c.a. vicina e disponibile su cui effettuare la commutazione, il manifestarsi di un cortocircuito in qualunque

punto delle linee L0.1 e L0.2 provocherebbe il fuori servizio dell'intero impianto.

Utilizzo del CPD per migliorare la selettività

Al fine di ristabilire caratteristiche accettabili di selettività verticale per tutti gli interruttori, si può dotare l'inverter di un CPD che garantisca un fattore di esaltazione ϵ tale da riportare le correnti di guasto ad un valore almeno pari alle minime correnti di sicuro sgancio magnetico.

Tali correnti, per gli interruttori (caratteristica tipo C) posti a protezione delle linee L0.1 e L0.2, sono pari rispettivamente a:

$$I_{m2} = 10 I_n$$

e cioè 800 A.

Supposto allora di assumere a riferimento le correnti limitate a regime che si stabiliscono per cortocircuito trifase in fondo a ciascuna linea L0.1, L0.2 (in modo da considerare le condizioni peggiori, cioè correnti limitate minori e fattore di esaltazione ϵ maggiore) ricavate dall'intersezione tra la caratteristica di limitazione dell'inverter e le caratteristiche delle impedenze di guasto.

Si avranno, dalla Figura 8.10, le correnti limitate:

$$I_{gL(0.1)} = 520A$$

$$I_{gL(0.2)} = 500A$$

Queste correnti, in regime di limitazione dell'inverter, se riportate ad esempio sulle caratteristiche d'intervento degli interruttori, Figura 8.3, rapportate alla I_n degli stessi e quindi con valori

$$I_{gL(0.1)} / I_n = 520/80 = 6,5$$

$$I_{gL(0.2)} / I_n = 500/80 = 6,25$$

questi verificano che l'intervento dell'interruttore non può avvenire sicuramente in 1s; ciò comporterà, in assenza di opportuni provvedimenti, al conseguente spegnimento dell'inverter e quindi all'assenza di selettività.

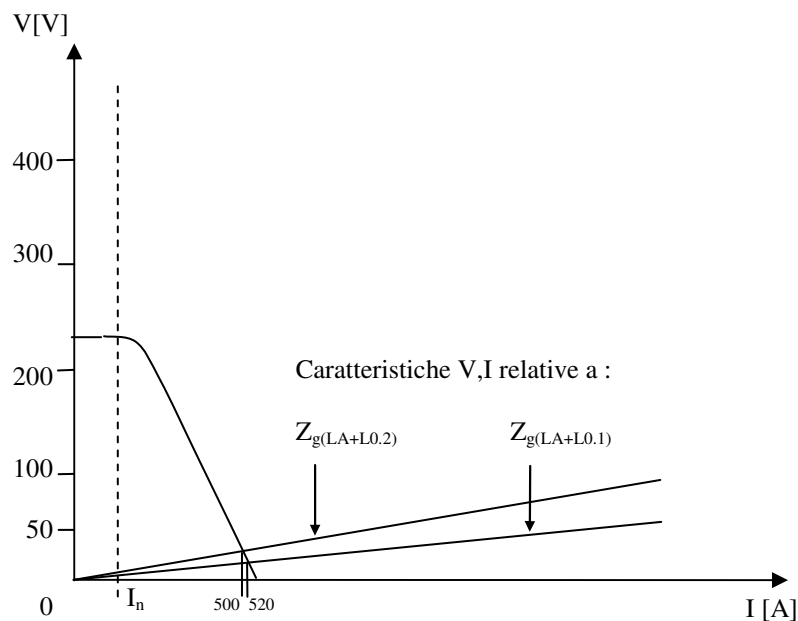


Figura 8.10

Considerando le correnti di guasto, in limitazione, e le I_{m2} dei due interruttori, il fattore di esaltazione fornito dal CPD dovrà essere pari a:

$$\varepsilon \geq I_{m2(L0.1)} / I_{gL(0.1)} = 800/520 = 1,54 \quad \text{per guasto su L0.1}$$

$$\varepsilon \geq I_{m2(L0.2)} / I_{gL(0.2)} = 800/500 = 1,6 \quad \text{per guasto su L0.2}$$

Considerando le curve $\varepsilon(Z_g)$ parametrizzate rispetto a $X_{L,C}$, di Figura 8.11, che si riferiscono ad un inverter da 100kVA, con le impedenze di guasto in fondo alle due linee $Z_{g(LA+L0.1)} = 0,03\Omega$ e $Z_{g(LA+L0.2)} = 0,05\Omega$, si può constatare che i fattori di esaltazione sopra indicati saranno assicurati, considerando la più grande $X_{L,C}$ che serve allo scopo, in modo da avere un risparmio economico sulla taglia dei condensatori, e quindi per un valore della reattanza di risonanza pari a:

$$X_{L,C} = 0,3 \Omega$$

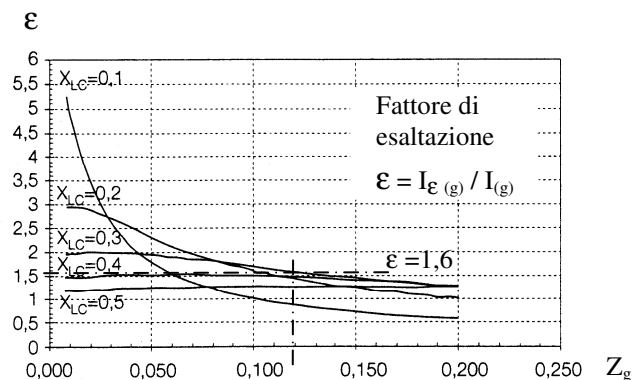


Figura 8.11

Si può anche constatare, dalla Figura 8.11, che il fattore di esaltazione sarà mantenuto ad un valore $\geq 1,6$ con impedenze di guasto:

$$\varepsilon \geq 1,6 \quad \text{per } Z_g \leq 0,12 \Omega$$

L'inserzione del CPD sarà comandata da una soglia di tensione V_S (solo al disotto della quale conviene inserire il CPD) fornita dall'inverter in

condizione di limitazione, data dall'intersezione della caratteristica di limitazione dell'inverter con la caratteristica dell'impedenza vista dallo stesso inverter.

A questo scopo ci si può ancora riferire alla Figura 8.11 e rilevare per quale valore di Z_g , per una data $X_{L,C}$, il fattore di esaltazione della corrente assume un valore maggiore di 1.

Nel caso appena visto, con una $X_{L,C}=0,3 \Omega$, il fattore di esaltazione è sempre maggiore di 1 per qualsiasi valore della Z_g , e quindi la Z_g di riferimento per l'inserzione del CPD, potrà essere quella che rende minimo il fattore di esaltazione ϵ e cioè $Z_g = 0,2 \Omega$.

A questo valore della Z_g , dalla Figura 8.12, si può rilevare un corrispondente valore di soglia della tensione, che comanda l'inserzione del CPD, pari a:

$$V_{S(\text{fase})} = 85V.$$

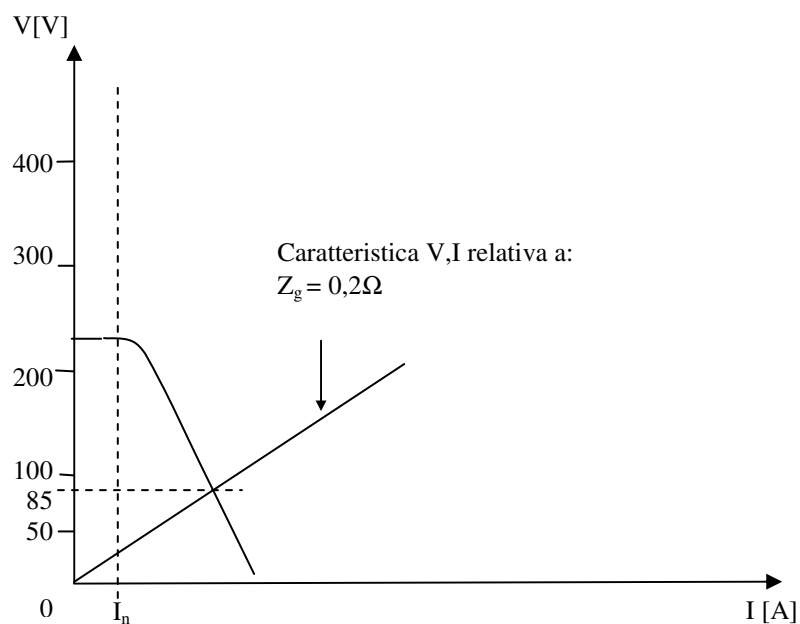


Figura 8.12

Scegliendo invece, ad esempio, un valore di $X_{L,C} = 0,1$, si può rilevare, dalla Figura 8.11, che il valore di Z_g per il quale il coefficiente di esaltazione della corrente ϵ risulta essere maggiore di 1 si ha per $Z_g \leq 0,1\Omega$, e quindi per valori di $Z_g > 0,1$ l'inserzione del CPD andrà a peggiorare le condizioni di selettività, fornendo una corrente che sarà minore di quella ottenibile dall'inverter in condizioni di limitazione e ritardando ulteriormente l'intervento degli interruttori ed inibendo, inoltre, l'intervento dell'autoprotezione dell'inverter; in questo caso è quindi di fondamentale importanza il calcolo della soglia di tensione che comanda l'inserzione del CPD che in questo caso la si può assumere, Figura 8.13, pari a $V_{S(fase)}=50V$.

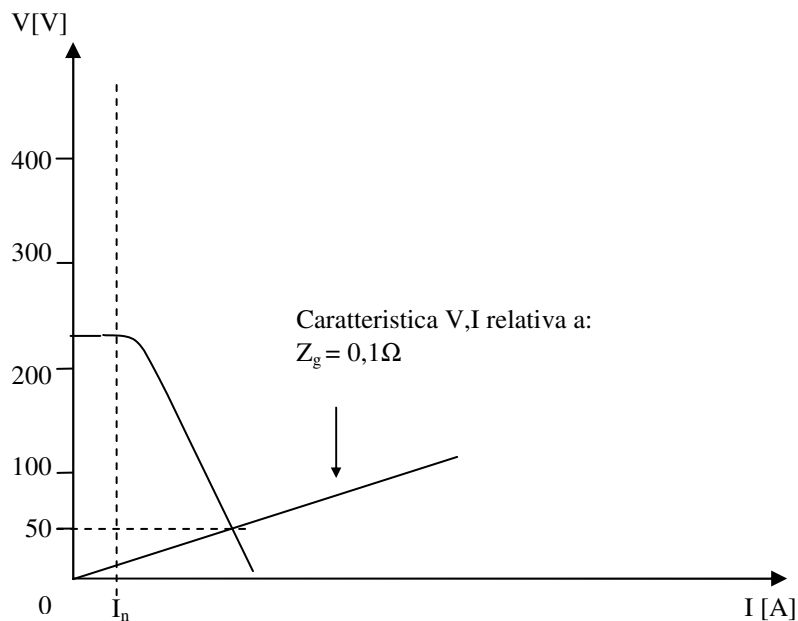


Figura 8.13

In conclusione per impedenze $Z_g \leq 0,1\Omega$ (a cui corrispondono tensioni in limitazione $\leq 50V$) si ha un fattore di esaltazione ≥ 1 e quindi è giustificato

l'intervento del CPD, mentre per impedenze $Z_g > 0,1\Omega$ (a cui corrisponde invece tensioni in limitazione $> 50V$) con fattore di esaltazione < 1 , non dovrà aversi l'intervento del CPD; quindi il valore di soglia della tensione (in regime di limitazione), per comandare l'inserzione del CPD, è di 50 V.

8.6 Simulazione con programma Matlab-Simulink

Il provvedimento, preso in esame fino a questo punto, prevede l'inserzione del CPD negli istanti immediatamente successivi all'instaurarsi di una condizione di limitazione dell'inverter, dovuta ad esempio al verificarsi di un guasto nell'impianto, ma si può estendere l'indagine anche alle fasi transitorie tramite simulazione, con l'ausilio di un programma applicativo, al fine di verificare l'andamento transitorio e a regime di tutte le grandezze elettriche dell'impianto per un ragionevole ventaglio di situazioni che possono essere di interesse applicativo, sia in termini dei parametri elettrici e geometrici del sistema, sia con riferimento ai diversi possibili istanti di guasto e di inserzione.

Il lavoro di simulazione è stato svolto con il programma Matlab-Simulink, ed i parametri di tale simulazione sono stati scelti come:

Inverter con potenza nominale di 100 KVA;

Carico unico con potenza attiva assorbita di 84,3 kW a $\cos\phi = 0,85$;

Impedenza linea di 0,03 Ω ;

L'istante di guasto trifase netto è stato comandato a 0,3s;

L'intervento del CPD è stato comandato a 0,4s;

Inizialmente si sono considerati gli andamenti di tensione e corrente a monte e a valle del CPD senza considerare l'intervento della protezione.

Caso I

Simulazione effettuata senza variazione della caratteristica di limitazione (V,I) dell'inverter.

- Corrente in uscita dall'inverter $I_{(inv)}$

Dalla Figura 8.14, che riporta l'andamento della corrente in uscita su una fase dall'inverter, si possono rilevare i seguenti dati, in Tabella 7, nelle varie fasi della simulazione:

Tempi significativi della simulazione	Corrente in uscita dall'inverter $I_{(inv)}$
$t < 0,3s$ (prima del c.c.)	140 A
$0,3 < t < 0,4$ (inverter in limitazione dopo il c.c.)	560 A
$t > 0,4$ (dopo l'intervento del CPD)	86 A

Tabella 7

Da questi valori si può notare come la corrente in uscita dall'inverter, da un valore in limitazione di 560A, in condizioni di corto circuito, si sia portata ad un valore di 86A, minore della corrente nominale e quindi fuori limitazione, per il quale ovviamente non si avrà l'arresto dell'inverter per autoprotezione.

- Corrente a valle del CPD $I_{(g)}$

Dalla Figura 8.15, che riporta l'andamento della corrente, per singola fase, a valle del CPD, si possono rilevare i seguenti dati, Tabella 8, nelle varie fasi della simulazione:

Tempi significativi della simulazione	Corrente a valle del CPD $I_{(g)}$
$t < 0,3s$ (prima del c.c.)	140 A
$0,3 < t < 0,4$ (inverter in limitazione dopo il c.c.)	560 A
$t > 0,4$ (dopo l'intervento del CPD)	840 A

Tabella 8

Da questi valori si può notare come la corrente di guasto sia aumentata grazie all'intervento del CPD, passando da 560A ad un valore di 840A, forzando quindi la corrente che attraversa il dispositivo di protezione.

- Tensione fornita dall'inverter $V_{(inv)}$

Dalla Figura 8.16, che riporta l'andamento della tensione di fase a valle dell'inverter, si possono rilevare i seguenti dati, Tabella 9, nelle varie fasi della simulazione:

Tempi significativi della simulazione	Tensione fornita dall'inverter $V_{(inv)}$
$t < 0,3s$ (prima del c.c.)	224 V
$0,3 < t < 0,4$ (inverter in limitazione dopo il c.c.)	25 V
$t > 0,4$ (dopo l'intervento del CPD)	224 V

Tabella 9

Si può notare come la tensione fornita dall'inverter, diminuita a 25V in condizione di limitazione, si sia riportata al valore iniziale dopo l'intervento del CPD.

- Tensione a valle del CPD $V_{(g)}$

Dalla Figura 8.17, che riporta l'andamento della tensione di fase a valle del CPD, si possono rilevare i dati in Tabella 10, nelle varie fasi della simulazione.

Si può notare che la tensione a valle del CPD, che è la stessa sul carico alimentato dall'inverter, assume valori molto bassi e di poco superiori alla tensione esistente prima dell'intervento del CPD.

Tempi significativi della simulazione	Tensione a valle del CPD $V_{(g)}$
$t < 0,3s$ (prima del c.c.)	224 V
$0,3 < t < 0,4$ (inverter in limitazione dopo il c.c.)	18 V
$t > 0,4$ (dopo l'intervento del CPD)	26 V

Tabella 10

Caso II

Simulazione effettuata spostando verso l'alto la caratteristica di limitazione (V,I) dell'inverter.

Nelle Figure 8.18 e 8.19, vengono riportate rispettivamente le correnti $I_{(inv)}$ e $I_{(g)}$, in uscita dall'inverter e a valle del CPD, in questa nuova situazione.

Si può notare una differenza dei valori di queste correnti, a CPD inserito, rispetto al caso precedentemente trattato; infatti si ha:

$$I_{(inv)} = 120A$$

$$I_{(g)} = 1080A$$

In pratica l'aver variato la caratteristica di limitazione dell'inverter, ha portato ad un aumento della corrente a valle del CPD che dal valore del caso

precedente $I_{(g)} = 840A$ si è portata a $1080A$; nello stesso tempo la corrente in uscita dall'inverter è passata da $86A$ a $120A$.

Inoltre, considerando gli andamenti delle tensioni $V_{(inv)}$ e $V_{(g)}$ in Figura 8.20 e 8.21, relativi a questo caso, si può notare a CPD inserito una maggiore tensione in uscita rispetto al caso I. Infatti in questo caso i valori delle tensioni saranno: $V_{(inv)} = 325V$

$$V_{(g)} = 48V$$

In pratica, alzando la caratteristica dell'inverter è risultata aumentata sia la corrente a valle del CPD (corrente di guasto), sia la tensione sul carico.

Per completezza si riportano in Figura 8.22 e 8.23 gli andamenti delle correnti a monte e a valle del CPD considerando l'intervento dell'interruttore a $0,52s$; a $0,5s$ la corrente di guasto misurava $1000A$, valore di corrente che provoca certamente lo sgancio magnetico di un interruttore ad uso domestico e similare, con curva d'intervento tipo C, di corrente nominale pari a $100A$.