

Protezione delle microreti in continua

Analisi della protezione dai guasti nelle microreti in corrente continua in bassa tensione con fonti rinnovabili e convertitore d'interfaccia

Contrariamente a un'opinione assai diffusa, quando si verifica un corto circuito o un guasto a terra sul lato in corrente continua, la maggior parte dei convertitori esistenti non è in grado di limitare la corrente di guasto.



La connessione di microreti con fonti di energia rinnovabile alla rete nazionale presenta diversi vantaggi. Tuttavia, quando questi due sistemi vengono interconnessi, le condizioni di guasto devono essere correttamente considerate, in particolare qualora la microrete includa un impianto fotovoltaico e/o accumulatori di energia e sia connessa alla rete di distribuzione tramite un convertitore d'interfaccia dal momento che questa configurazione consente il passaggio di correnti di guasto dalla rete in corrente alternata attraverso il convertitore stesso. Difatti, la maggior parte dei convertitori d'interfaccia per uso generale si basano sull'impiego di IBGT (Insulated Gate Bipolar Transistor) in

combinazione con diodi di ricircolo e non sono quindi in grado di interrompere le correnti di guasto in tutte le situazioni. Pertanto, un sistema di protezione specifico è richiesto per assicurare l'interruzione dei guasti.

La connessione alla rete in c.a. (corrente alternata) delle microreti in c.c. (corrente continua) in bassa tensione includenti impianti fotovoltaici è un argomento che sta diventando sempre più rilevante data la crescente connessione di fonti rinnovabili alle rete nazionale. Oltre alle usuali considerazioni sulla connessione di questi due mondi, altre aggiuntive devono essere fatte su come gestire le condizioni di guasto poiché, in funzione dei possibili collegamenti a terra, gli impianti fotovoltaici e i sistemi di accumulo d'energia e i relativi convertitori elettronici possono comportarsi in modi diversi durante i guasti e quindi avere diverse conseguenze sul funzionamento della rete e sul suo comportamento in caso di guasto.

In una microrete, la sezione in c.c. è tipicamente separata dalla rete in alternata mediante un convertitore d'interfaccia, il quale inietta nella rete ogni surplus di potenza della microrete o assorbe dalla rete l'eventuale potenza aggiuntiva richiesta dai carichi e non fornibile dalle fonti

rinnovabili. Il problema più critico è che, in caso di corto circuito e guasto a terra lato c.c., la maggior parte dei convertitori per uso generale non è in grado di limitare le correnti di guasto.

Ciò accade in particolare nei convertitori basati sugli IGBT con diodo di ricircolo in antiparallelo /Fig.1. Di conseguenza, è necessaria una specifica progettazione dei sistemi di protezione. Va notato che i raddrizzatori a tiristori non possono essere utilizzati come convertitori d'interfaccia poiché qualora si avesse l'inversione del flusso di potenza, i raddrizzatori richiederebbero un'inversione della tensione con ovvie serie implicazioni per i dispositivi elettrici connessi lato c.c.

Se vengono installati interruttori automatici correttamente dimensionati, anche se l'energia specifica passante può causare il sovra riscaldamento dei semiconduttori, la corrente è limitata, la sicurezza è preservata e si prevengono ulteriori danni all'installazione.

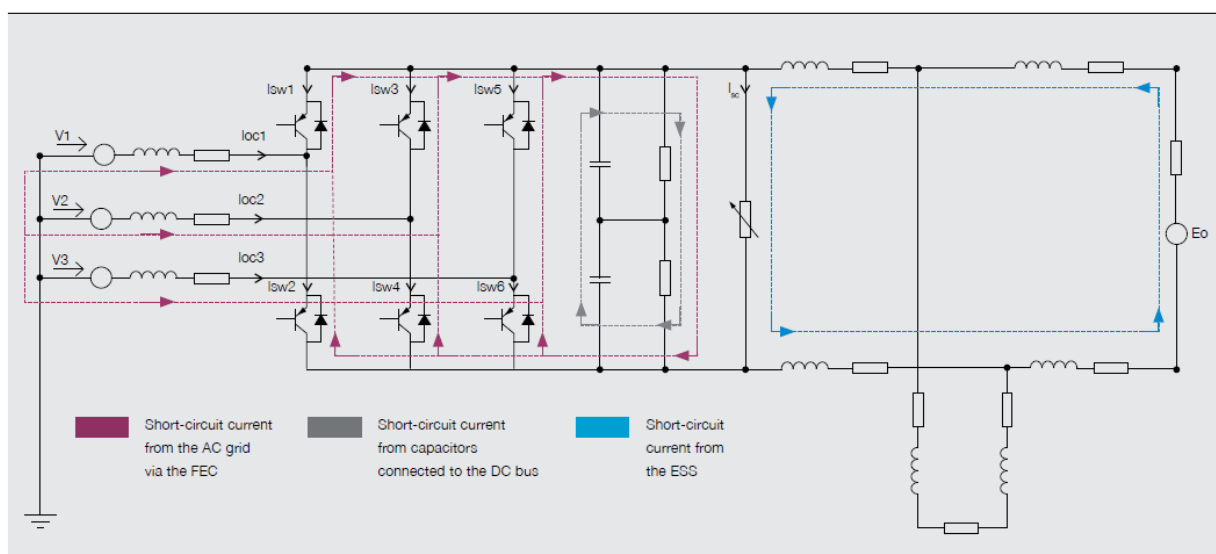
I due principali tipi di guasto da considerare sono i corto circuiti e i guasti a terra nella sezione in c.c.

Lato c.c. – Corto circuito

Quando avviene un corto circuito tra le polarità della microrete in c.c. in assenza di sorgenti d'energia, in funzione del valore della resistenza di guasto possono verificarsi diversi scenari: in particolare, per elevati valori di resistenza di guasto, il convertitore d'interfaccia può essere in grado di mantenere la tensione lato c.c. al valore nominale, ma al di sotto di un determinato valore il convertitore inizia a lavorare in sovramodulazione.

La condizione limite si ha quando la resistenza di guasto è piccola, tendente a zero. A questo punto, poiché la corrente di guasto fluisce nei diodi di ricircolo, il convertitore d'interfaccia lavora come un raddrizzatore a diodi in corto circuito. In tal caso, la corrente non è più limitata dal convertitore stesso. La corrente di corto circuito è la somma dei contributi della rete in c.a. attraverso il convertitore e dei condensatori posti in uscita lato c.c.

Se sono installati un impianto fotovoltaico e/o un sistema di accumulo dell'energia, un contributo addizionale alla corrente di guasto viene fornito da tali generatori, il cui contributo dipende dalla struttura della microrete /Fig.1.



1- Componenti della corrente di corto circuito (I_{sc}) in presenza di sistema di accumulo energetico

D'altro canto, i componenti attivi, che includono un controllore con il proprio anello di retroazione della tensione, contribuiscono a mantenere la tensione lato c.c. a un valore più elevato che in una microrete puramente passiva. Pertanto, i valori della resistenza di guasto per cui il convertitore inizia a limitare la corrente assorbita dalla rete in c.a. ed a lavorare in sovramodulazione sono inferiori rispetto al caso di una microrete puramente passiva.

Ciò significa che, in sistemi con impianti fotovoltaici e/o sistemi di accumulo, non è possibile calcolare la corrente di guasto sovrapponendo i valori che si otterrebbero considerando ogni singola sorgente, perché ognuna influenza le altre con modalità che non sono immediatamente evidenti.

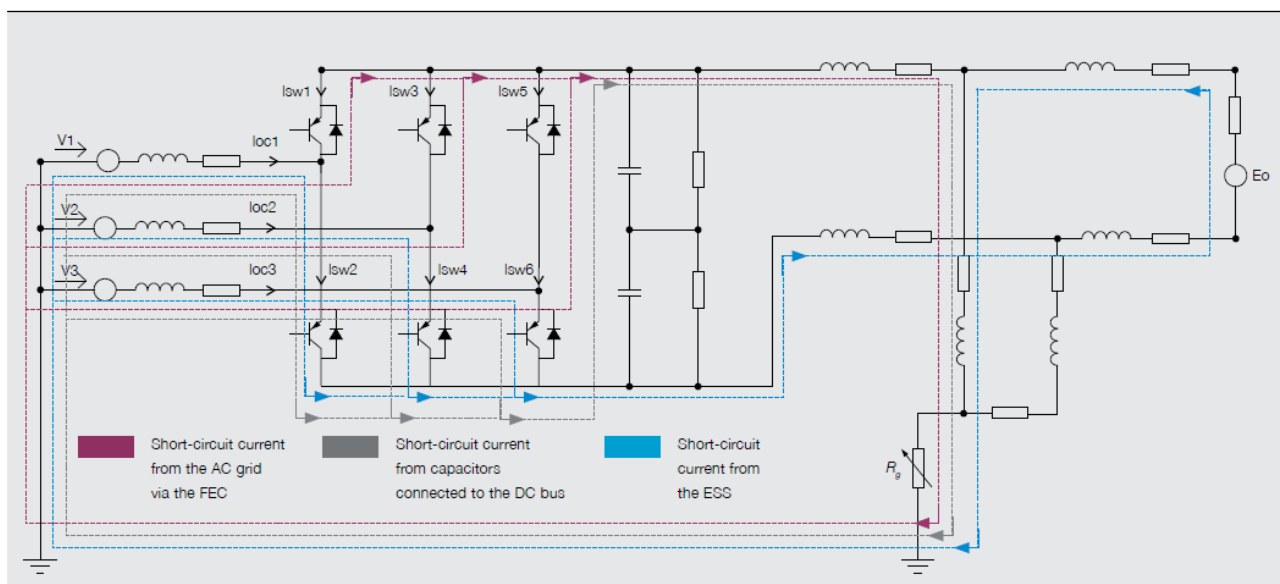
Le correnti di guasto dovranno quindi essere calcolate caso per caso, tenendo in considerazione l'intero sistema.

Lato c.c. – Guasto a terra

Le sezioni in c.c. delle installazioni elettriche sono generalmente isolate da terra. D'altra parte, per ragioni di sicurezza, il trasformatore MT/BT sul lato c.a. del convertitore ha tipicamente il punto di neutro dell'avvolgimento secondario connesso a terra. Quando si verifica un guasto a terra sul lato c.c., la corrente di guasto può fluire attraverso il convertitore con effetti inaspettati.

Nel caso di microrete in corrente continua passiva, in funzione della resistenza di guasto, si presentano scenari simili a quelli descritti sopra con il convertitore che passa dapprima al funzionamento in sovramodulazione e successivamente al comportamento come raddrizzatore. Un impianto fotovoltaico o un sistema d'accumulo, pur contribuendo a mantenere la tensione lato c.c. a un valore superiore in confronto a una microrete puramente passiva, forniscono una via di ritorno a bassi valori della resistenza di guasto per la componente unidirezionale della corrente di guasto a terra.

Infatti, un guasto a terra di uno dei due poli della microrete genera un percorso di ritorno per la corrente verso il punto di neutro lato c.a. Per bassi valori della resistenza di guasto, e se il guasto avviene sul polo positivo, il contributo al guasto della rete in c.a. passa attraverso i diodi di ricircolo della stella catodica del convertitore, mentre il contributo delle fonti rinnovabili attraverso gli IGBT della stella anodica /Fig.2. La situazione si inverte qualora il guasto avvenga sul polo negativo.



2 – Percorso della corrente di guasto a terra sulla polarità positiva lato c.c. con bassa resistenza di guasto (R_g) e in presenza di sistema di accumulo energetico

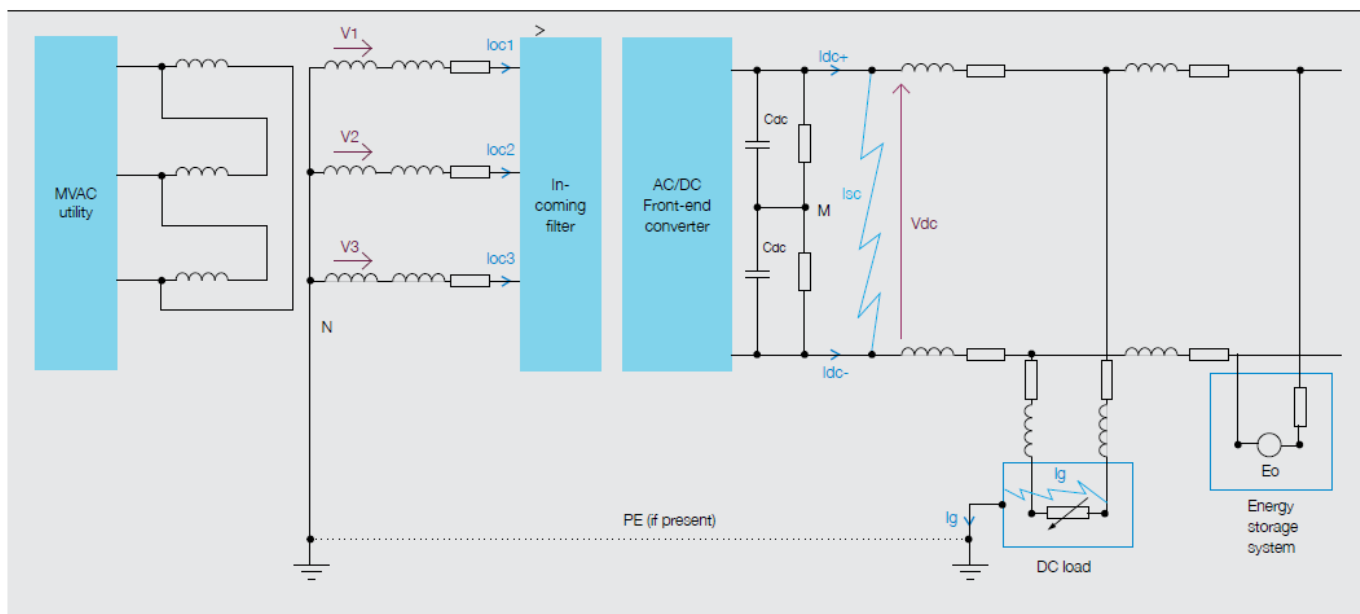
Linee rosa tratteggiate – contributo alla corrente di corto circuito della rete in alternata attraverso il convertitore

Linee verdi tratteggiate – contributo alla corrente di corto circuito dei condensatori connessi al bus DC

Linee blu tratteggiate – contributo alla corrente di corto circuito del sistema di accumulo.

Ciò può causare correnti uscenti da entrambi i terminali del convertitore d'interfaccia, invece che uscente da un terminale ed antrante in un altro come nel normale funzionamento. Tali correnti posso essere sufficientemente elevate da danneggiare il convertitore, quindi è un errore comune trascurarle quando viene calcolata la corrente di guasto in fase di progettazione.

Nella applicazioni reali, le protezioni elettroniche inglobate nel convertitore misurano la tensione ai capi degli IGBT quando il gate riceve l'impulso. Se tale tensione fosse maggiore di una soglia predeterminata, il circuito di controllo spegne gli IGBT. Tale protezione, denominata protezione di DESAT (desaturazione), blocca gli IGBT entro pochi microsecondi inibendo il passaggio di corrente che ha superato un determinato limite. Di conseguenza, il contributo alla corrente di guasto dell'impianto fotovoltaico e degli accumuli viene eliminato interrompendo il segnale di pilotaggio degli IGBT. Tuttavia, il contributo al guasto della rete in c.a. continua ad passare attraverso il convertitore tramite i suoi diodi di ricircolo non controllati. Pertanto, devono essere installati idonei dispositivi di protezione esterni al fine di interrompere la corrente di guasto e proteggere il convertitore.

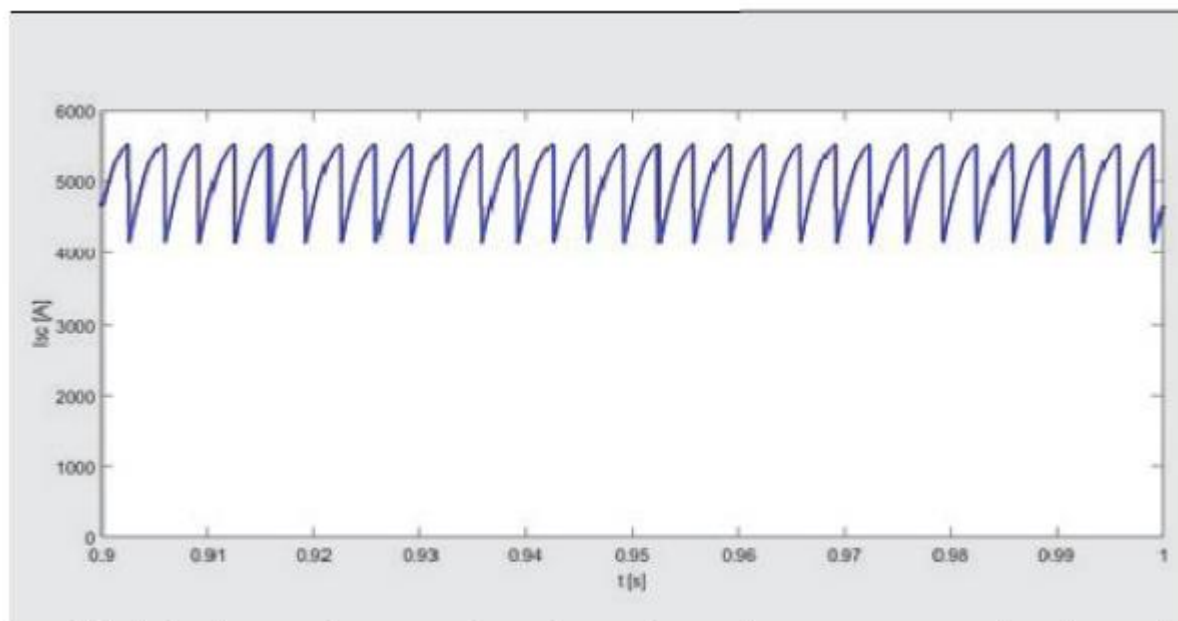


3 – Schema di microrete in c.c. con neutro del trasformatore connesso a terra per analisi dei guasti a terra lato c.c.

Esempio applicativo

Il comportamento della microrete descritta in /Fig.3 è stato studiato mediante varie simulazioni di corto circuito e guasto a terra. Solitamente, il neutro è direttamente connesso a terra per evitare che in caso di guasto tra avvolgimento primario e secondario [del trasformatore] si stabiliscano tensioni pericolose sul lato di bassa tensione.

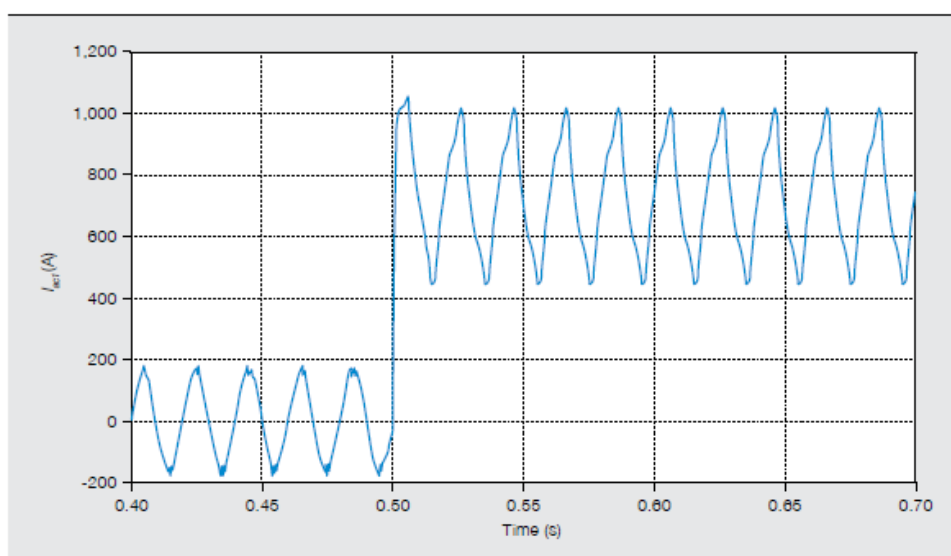
In caso di corto circuito a bassa resistenza sul lato in c.c., le correnti di guasto percorrono i diodi di ricircolo senza che gli IGBT possano limitarne il valore, anche se ricevono segnali di blocco dal sistema di controllo. La disattivazione della modulazione è inefficace in questi casi perché il diodo connesso in antiparallelo fa funzionare il convertitore come un raddrizzatore trifase a diodi. Le correnti possono raggiungere valori molte volte superiori a quelli nominali sul lato in c.c. ($I_n = 125$ A, with $R_{sc}=1$ m Ω) / Fig.4.



4 – Corrente di guasto (I_{sc}) durante un corto circuito sul lato in c.c. con $R_{sc} = 1 \text{ m}\Omega$

In caso di guasto a terra con bassa resistenza di guasto, la corrente fluisce nei diodi di ricircolo della stella catodica, senza che gli IGBT possano limitarla, e negli IGBT della stella anodica. Anche in tal caso, le correnti sono varie volte superiori al valore nominale sul lato in c.c. ($I_n = 125 \text{ A}$, $R_g = 100 \text{ m}\Omega$) [1]. La disattivazione della modulazione degli IGBT interrompe solo il contributo del sistema di accumulo.

A seconda del valore di R_g , la corrente sul lato in alternata può arrivare a essere completamente positiva: in tal caso tutta la componente assorbita dal convertitore alimenta il guasto [1] /Fig.5. Al diminuire di R_g , il contributo al corto circuito può raggiungere 27 volte il valore della corrente nominale sul lato in continua.



5 – Corrente I_{w1} durante un guasto a terra sul lato in continua con $R_g = 100 \text{ m}\Omega$ in presenza di accumulo

Tale contributo non può essere limitato dagli IGBT, perché percorre i diodi di ricircolo.

Analisi della protezione dai guasti

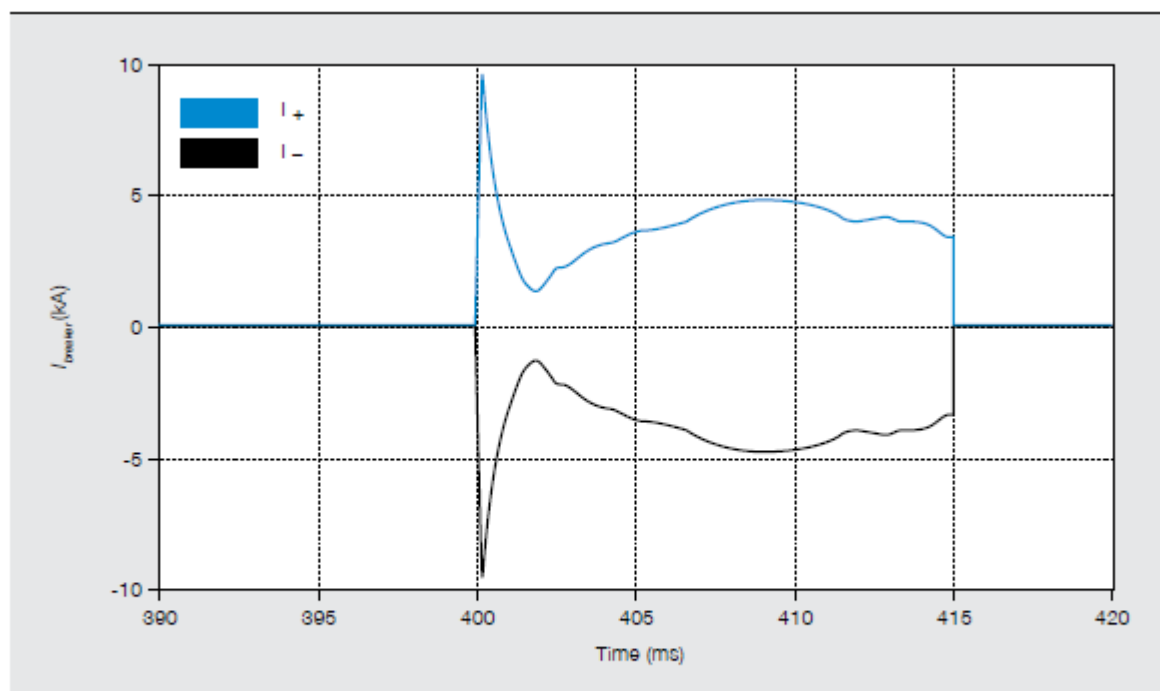
Va notato che mentre per la protezione dal corto circuito in c.c si può utilizzare un interruttore unipolare, per la protezione contro i guasti a terra è necessario impiegare un interruttore bipolare, perché il generatore fotovoltaico e il sistema di accumulo possono far passare corrente attraverso la polarità su cui il guasto non si è verificato (i guasti possono verificarsi con uguale probabilità sulla polarità positiva o su quella negativa).

Analisi del corto circuito lato c.c.

In caso di corto circuito lato c.c., la modulazione viene disattivata con il tempo di intervento tipico di una protezione

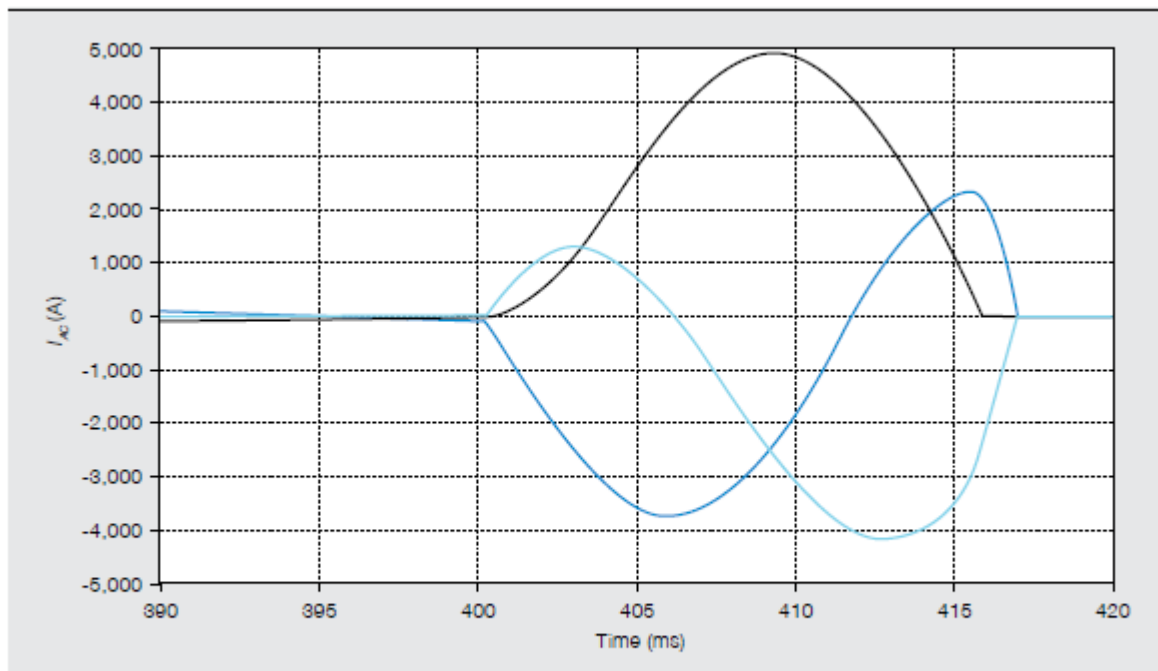
DESAT (2 μ s), mentre l'apertura è ritardata di 15 ms per simulare la presenza di un interruttore per corrente continua /

Fig.6 [2].



6 Correnti nei due poli dell'interruttore

Per ridurre le sovratensioni, l'interruttore è installato a valle rispetto ai condensatori lato c.c. Per effetto della protezione DESAT, nei diodi del convertitore circolano le correnti rappresentate in Fig.7.

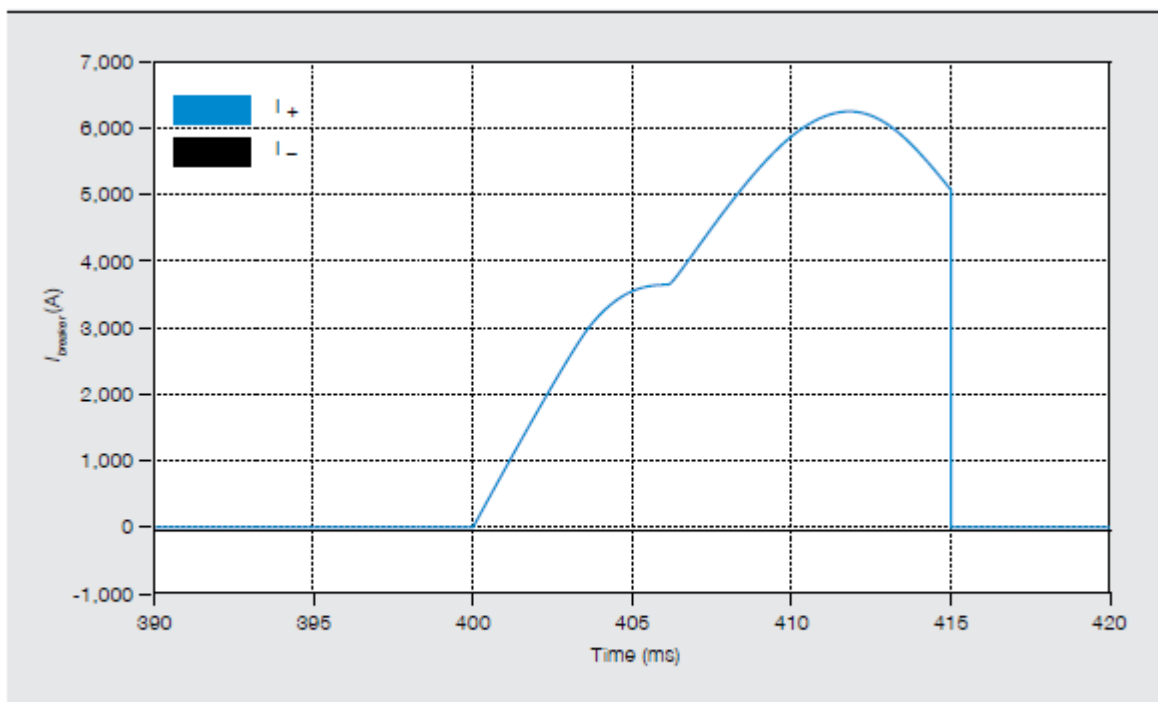


7. Correnti sul lato in c.a. durante l'intervento dell'interruttore

L'energia specifica dissipata durante il transitorio di interruzione ("I_{2t}") è circa 170 kA²s: questo valore è troppo elevato visto il convertitore utilizzato. Per i semiconduttori considerati nella simulazione, il massimo valore ammissibile di I_{2t} è 42 kA²s. È quindi necessario un certo sovradimensionamento dei diodi per rendere il convertitore capace di sopportare il transitorio.

Analisi del guasto a terra lato c.c.

Nelle simulazioni è stato poi considerato il caso in cui un guasto simile a quello descritto sopra si verifichi tra la polarità positiva e terra, con interruzione eseguita da un interruttore per corrente continua [2]. Le correnti alternate risultanti sono simili a quelle ottenute per il corto circuito tra le due polarità, mentre le correnti riscontrate sulle due polarità del convertitore sono molto differenti /Fig.8. In effetti, la corrente sulla polarità in cui si verifica il guasto cresce, mentre l'altra rimane prossima a zero, grazie alla protezione DESAT. Il valore di I_{2t} è circa 157 kA²s ed è confrontabile con quello ottenuto per il corto circuito. Anche in questo caso è necessario un sovradimensionamento dei diodi.



8. Correnti nei due poli dell'interruttore

Per riassumere, nella progettazione di microreti in c.c. alimentate da convertitore d'interfaccia e con presenza di generazione fotovoltaica e/o sistemi di accumulo energetico, si devono considerare anche le possibilità di corto circuito tra le due polarità e di guasto a terra. Per garantire la protezione del convertitore da questi guasti, la comune protezione DESAT non è sufficiente, perché la disattivazione degli IGBT non limita la corrente che fluisce attraverso i diodi di ricircolo. Di conseguenza, è necessario prevedere e dimensionare opportuni dispositivi di protezione, capaci di interrompere le correnti in modo sicuro e limitare i danni collaterali. Con il diffondersi delle microreti in c.c. connesse alla rete in c.a., la protezione dai guasti diventerà sempre più un aspetto essenziale della progettazione d'impianto.

Marco Carminati

Enrico Ragaini

ABB SpA – Divisione Electrification Products

BU Protection and Connection

marco.carminati@it.abb.com

enrico.ragaini@it.abb.com

Riferimenti

- [1] M. Carminati et al., "DC and AC ground fault analysis in LVDC microgrids with energy storage systems," in Proceedings of the IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Roma, 2015, pp. 1047-1054.
- [2] M. Carminati et al., "Fault protection analysis in low-voltage DC microgrids with PV generators," in Proceedings of the 5th International Conference on Clean Electrical Power Renewable Energy Resources Impact, Taormina, 2015, pp. 190-197.