

ENEA

Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA
TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Studio e modellazione avanzata di sistemi di protezione statici in ottica di miglioramento dell'affidabilità.

M. Brenna, F. Foadelli, M. Longo, D. Zaninelli



RdS/PTR(2021)/061

STUDIO E MODELLAZIONE AVANZATA DI SISTEMI DI PROTEZIONE STATICI IN OTTICA DI MIGLIORAMENTO DELL'AFFIDABILITÀ

M.Brenna, F. Foiadelli, M.Longo, D.Zaninelli

Giugno 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: *Sistema Elettrico*

Progetto: *2.7 Modelli e strumenti per incrementare l'efficienza energetica nel ciclo di produzione, trasporto, distribuzione dell'elettricità.*

Work package: *Analisi delle problematiche di gestione per l'integrazione nelle attuali reti in AC di nuove reti in DC in MT/BT (Media Tensione/Bassa Tensione).*

Linea di attività: *LA1.12 Studio e modellazione avanzata di sistemi di protezione statici in ottica di miglioramento dell'affidabilità.*

Responsabile del Progetto: Maria Valenti ENEA

Responsabile del Work package: Maria Valenti ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Analisi e sviluppo di azioni di intervento e logiche di funzionamento di dispositivi di protezione utilizzati nelle reti ibride AC/DC per la sicurezza di sistemi e persone*".

Responsabile scientifico ENEA: Maria Valenti

Responsabile scientifico: Morris Brenna

Indice

SOMMARIO	3
1 INTRODUZIONE	4
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	5
2.1 MODELLI E SIMULAZIONI DI INTERRUTTORI A STATO SOLIDO PER RETI DC	5
2.1.1 <i>Considerazioni generali sulla simulazione</i>	5
2.1.2 <i>Modelli di interruttori automatici</i>	6
2.1.2.1 <i>Interruttore statico con circuito di snubber a chopper</i>	6
2.1.2.2 <i>Interruttore statico con circuito di snubber RCD</i>	11
2.1.2.3 <i>Interruttore statico con circuito di snubber MOV</i>	16
3 CONCLUSIONI	18
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	19

Sommario

Questo secondo rapporto completa il lavoro iniziato nella prima parte riguardante la descrizione di diverse tipologie di interruttori a stato solido per applicazioni DC e AC.

In questa fase sono state modellizzate differenti configurazioni di interruttori statici basati su diverse tecnologie di interruzione e dissipazione dell'energia immagazzinata nell'induttanza a monte delle linee di alimentazione.

Sono state proposte configurazioni bidirezionali, ossia in grado di condurre e interrompere la corrente nelle due diverse direzioni.

Il vantaggio dell'applicazione di queste protezioni nelle reti AC e/o DC è quello di iniziare la fase di interruzione della corrente appena ricevuto il comando di apertura dai vari relè.

Ciò fa sì che nelle reti DC la corrente di guasto non evolva verso i valori di regime, in genere molto elevati e difficili da trattare in termini di calore prodotto e sforzi elettrodinamici applicati alle parti attive del sistema.

Ma anche le reti AC possono giovare di queste protezioni non dovendo aspettare il naturale passaggio per lo zero della corrente per la sua interruzione, quindi ad esempio possono essere utilizzate laddove si abbia la necessità di una rapida interruzione o dove non sia indicata la formazione di archi elettrici tipici delle protezioni elettromeccaniche, come ad esempio negli ambienti a maggior rischio di esplosione o incendio.

Queste protezioni possono quindi essere impiegate nelle reti ibride AC e DC per migliorarne l'affidabilità laddove gli interruttori tradizionali non abbiano le prestazioni sufficienti richieste.

1 Introduzione

Il lavoro svolto in questa linea di attività della ricerca riguarda la modellizzazione teorica di interruttori statici basati su semiconduttori di potenza.

In particolare, vengono analizzate tre diverse configurazioni ritenute configurazioni di base per diversi tipi di applicazioni e futuri miglioramenti in termini di prestazioni e dimensionamento.

Tali configurazioni sono le seguenti:

- Interruttore statico con circuito di snubber a chopper
- Interruttore statico con circuito di snubber RCD
- Interruttore statico con circuito di snubber MOV

Esse presentano degli elementi comuni, come il semiconduttore di potenza, ed elementi specifici, come il sistema di dissipazione dell'energia di interruzione immagazzinata nelle induttanze di linea.

Per ogni configurazione vengono descritte le peculiarità e il principio di funzionamento dal punto di vista teorico.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Modelli e simulazioni di interruttori a stato solido per reti DC

2.1.1 Considerazioni generali sulla simulazione

Le simulazioni condotte sono volte alla verifica del comportamento di interruttori a stato solido nelle reti DC. In particolare, sono stati scelti tre diversi tipi di SSCB, le simulazioni e il confronto tra queste diverse soluzioni sono quindi qui di seguito spiegate. Durante il confronto è importante tenere presente che ogni topologia è progettata per la stessa condizione di funzionamento. Per queste simulazioni vengono utilizzate le schede tecniche di componenti elettronici reali per fare in modo che tutte le configurazioni possano essere effettivamente realizzabili nella realtà e confrontabili in test di laboratorio.

Ovviamente, gli stessi componenti vengono utilizzati per gli interruttori in modo da rendere più interessante il confronto e quindi anche il ritardo temporale di blocco t_b e tutti gli altri limiti fisici del componente sono gli stessi per le due diverse configurazioni.

In tutti i casi il componente elettronico utilizzato per l'interruzione senza arco è un IGBT come mostrato Figura 2.1.

La scelta degli IGBT è stata fatta in relazione a vantaggi e svantaggi di questo componente elettronico.

Infatti, i principali vantaggi di IGBT sono:

1. La bassa caduta di tensione nello stato ON e l'alta densità di corrente diretta di conduzione. Pertanto, grazie alla bassissima caduta di tensione nello stato ON dovuta alla sua conducibilità e all'elevata densità di corrente diretta rispetto al MOSFET e al transistor bipolare, è possibile utilizzare un chip più piccolo e quindi ridurre i costi
2. Bassa potenza di innesco e un semplice circuito di azionamento grazie alla struttura del gate MOS in ingresso. Pertanto, l'IGBT può essere controllato in modo più semplice rispetto ai dispositivi controllati in corrente (tiristore, BJT) in applicazioni ad alta tensione e ad alta corrente.
3. Ampia SOA (Safe Operating Area): per quanto riguarda le caratteristiche di uscita, l'IGBT ha una capacità di conduzione della corrente superiore rispetto al transistor bipolare. Ha anche un'eccellente capacità di blocco diretto e inverso.

A fronte di questi vantaggi, gli IGBT presentano il seguente principali svantaggio:

1. La velocità di commutazione è più lenta rispetto a quella dei MOSFET di potenza, ma è superiore a quella del BJT. La corrente del collettore dovuta ai portatori di carica minoritari fa sì che la velocità di spegnimento sia relativamente lenta, ma comunque più veloce di quella dell'interruttore automatico

Ad ogni modo, questo svantaggio non influisce sulla caratteristica richiesta dell'SSCB in questa configurazione. Pertanto, con questi vantaggi è stato selezionato l'IGBT come tipo di semiconduttore da utilizzare nelle simulazioni.

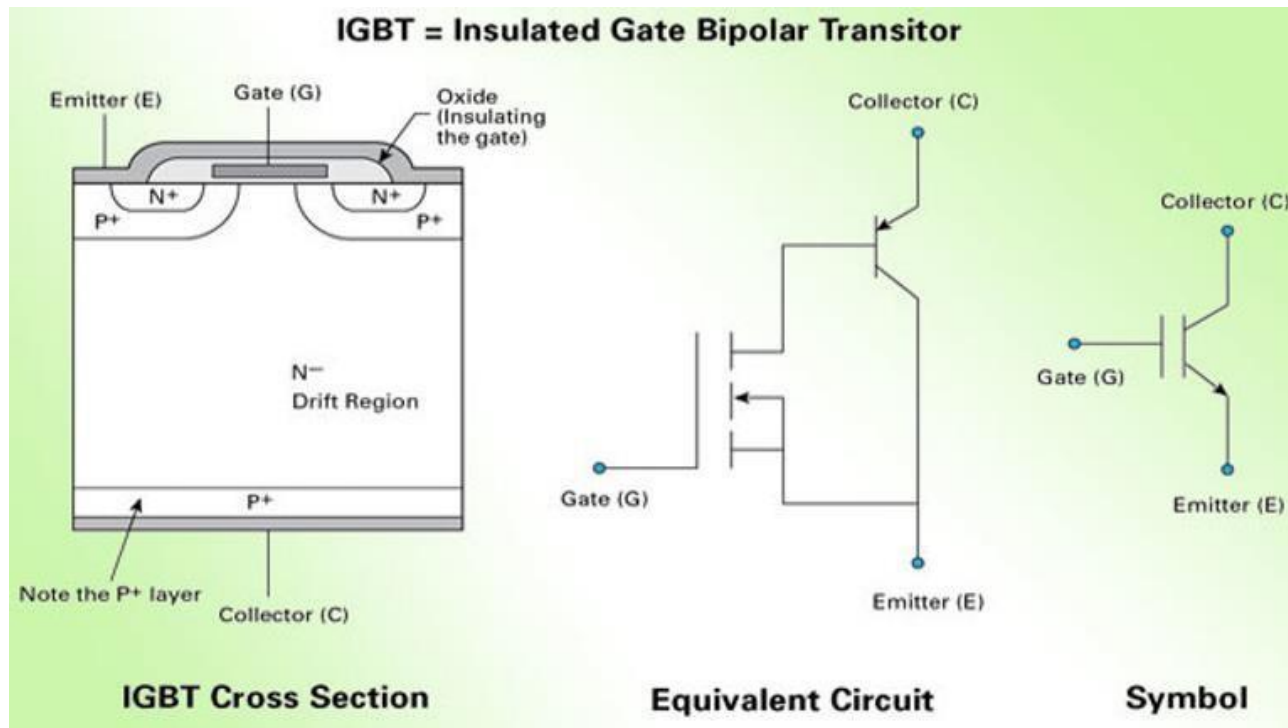


Figura 2.1: Sezione trasversale, circuito equivalente e simbolo di un IGBT

2.1.2 Modelli di interruttori automatici

2.1.2.1 Interruttore statico con circuito di snubber a chopper

Viene ora presentato un interruttore a stato solido bidirezionale dotato di un circuito attivo di dissipazione della potenza basato sull'uso di un chopper (convertitore DC/DC). Lo schema di principio è riportato in Figura 2.2.

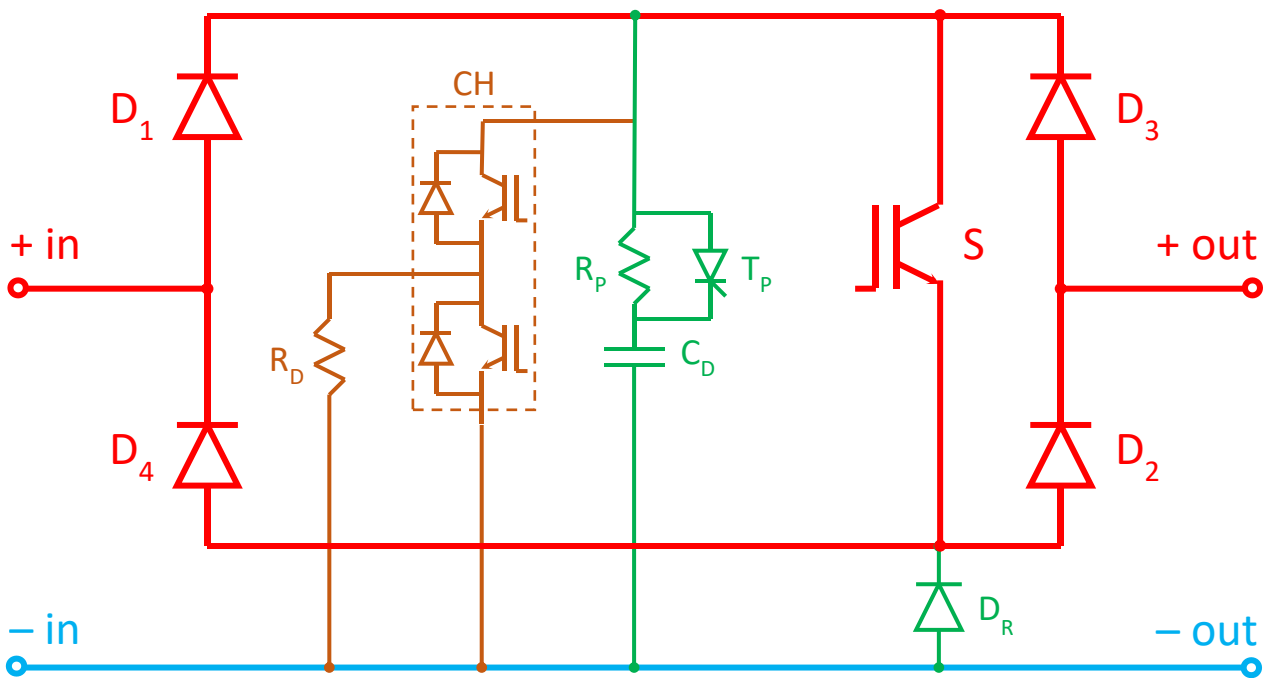


Figura 2.2: Configurazione di un interruttore statico con circuito di snubber a chopper

In rosso è evidenziata la parte di potenza, ossia l'insieme dei dispositivi che devono essere in grado di condurre per un tempo indefinito la corrente nominale.

In verde è invece rappresentata la parte che permette il ricircolo della corrente in fase di interruzione, al fine di evitare pericolose sovratensioni dovute alle induttanze di linea a monte e a valle dell'interruttore stesso.

In arancione scuro viene indicato il chopper che permette di dissipare l'energia immagazzinata nelle induttanze di linea controllando al contempo la sovratensione generata al fine di permettere l'interruzione della corrente.

Infatti, dalla relazione:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_L}{L} \quad (1)$$

si ha che la derivata della corrente in un induttore è negativa se la tensione ai suoi capi è a sua volta negativa; in questo modo la corrente diminuisce fino ad annullarsi completamente. Una volta raggiunto lo zero l'interruttore si bloccherà impedendo la conduzione in qualunque direzione.

Perciò, un interruttore in corrente continua, di qualunque tipologia elettronica o elettromeccanica, dovrà generare una sovratensione rispetto alla tensione di linea in modo da invertire la polarità della tensione applicata alle induttanze di linea e permetterne quindi il passaggio per lo zero.

Il vantaggio degli interruttori elettronici rispetto a quelli elettromeccanici risiede nella possibilità di controllare l'entità della sovratensione a valori accettabili e di non generare archi elettrici.

Nello schema di Figura 2.2 dell'interruttore statico con snubber a chopper, sono indicati i vari elementi con i seguenti simboli:

- S: IGBT di potenza dell'interruttore principale
- D1-4: ponte a diodi per rendere l'interruttore bidirezionale
- C_D : condensatore principale
- R_D : resistenza di dissipazione dell'energia di interruzione
- CH: chopper di controllo della sovratensione

- R_P : resistenza di precarica del condensatore principale
- T_P : tiristore di esclusione della resistenza di precarica
- D_R : diodo di ricircolo della corrente durante la fase di interruzione

Viene ora descritto il principio di funzionamento:

Inizialmente S è aperto e il condensatore C_D si precarica attraverso R_P . Una volta precaricato, la resistenza viene esclusa dal tiristore T_P in parallelo.

Per alimentare il carico basta accendere l'IGBT S ; in questa fase i componenti C_D , R_D , CH , D_R , sono inattivi.

Per spegnere il carico basta aprire S . Durante la fase di interruzione, per effetto dell'induttanza a monte la corrente tende a circolare nel condensatore C_D aumentandone la tensione; si crea così una tensione inversa sull'induttanza a monte che ne permette la scarica. Una volta che la corrente si è annullata, tutto il sistema si spegne. Il chopper CH con la resistenza R_D serve per evitare che la sovratensione sul condensatore C_D superi un determinato valore quando le correnti sono elevate, dissipando l'energia dell'induttanza a monte.

Poiché non serve un controllo molto raffinato della tensione sul condensatore durante la fase di interruzione, il controllore che regola la modulante in ingresso al PWM di accensione del chopper CH è un semplice proporzionale, con valore di $K_P = 0,006$. L'uscita da tale controllore è limitata nell'intervallo $-0,95 \div 0,95$.

Il diodo D_R serve per fare ricircolare la corrente dovuta all'induttanza a valle. La frequenza di switching della portante del PWM è stata impostata a 10 kHz. Lo schema di controllo è riportato nella figura sottostante. I componenti C_D , R_D , CH , D_R si attivano solo durante la fase di interruzione, per cui devono essere dimensionati per correnti di breve durata.

La struttura dell'interruttore è simmetrica, per cui può condurre e interrompere una corrente in entrambe le direzioni.

Il circuito di controllo del chopper CH è rappresentato in Figura 2.3.

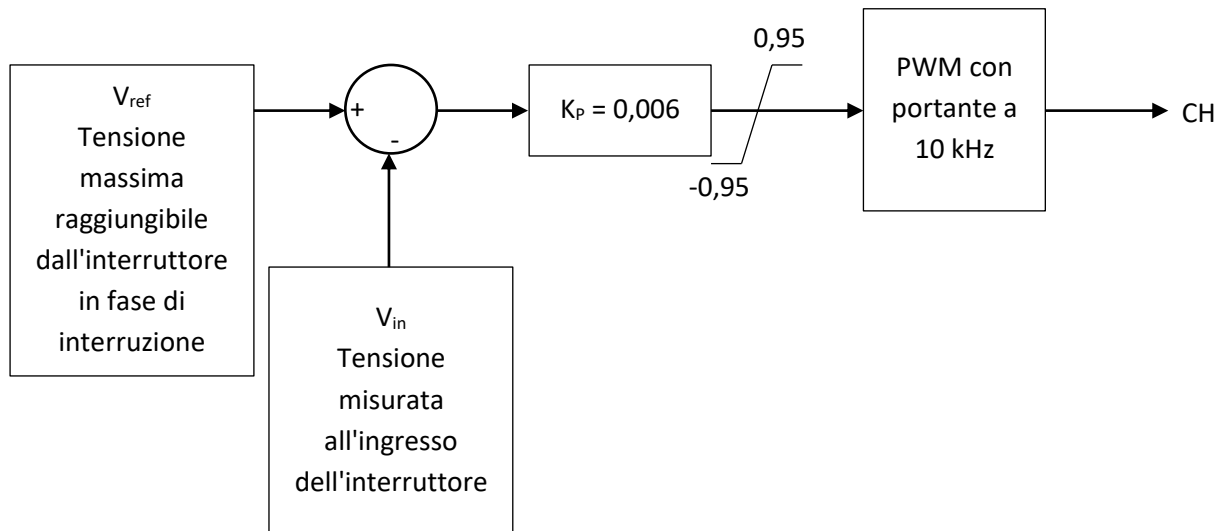


Figura 2.3: Circuito di controllo della sovratensione nell'interruttore statico con circuito di snubber a chopper

Vengono ora svolte alcune simulazioni su un sistema a 1000 V che interrompe 1000 A con una soglia di 1200 V sul condensatore, anche se durante la fase di interruzione si può in condizioni massimo carico arrivare a circa 1500 V. In ogni caso la sovratensione è minore di quella che si verifica in un interruttore elettromeccanico extrarapido, nel quale può raggiungere il doppio della tensione di rete.

Vengono simulate ripetute chiusure e aperture dell'interruttore statico applicato ad una semplice rete DC costituita da un generatore a tensione costante, un'induttanza a monte da 10 mH, l'interruttore statico bidirezionale di Figura 2.2, un'induttanza a valle da 10 mH e un carico costante.

Vengono simulate due diverse condizioni di carico.

1° caso: $V_{DC} = 1000 \text{ V}$, $I_{LOAD} = 1000 \text{ A}$

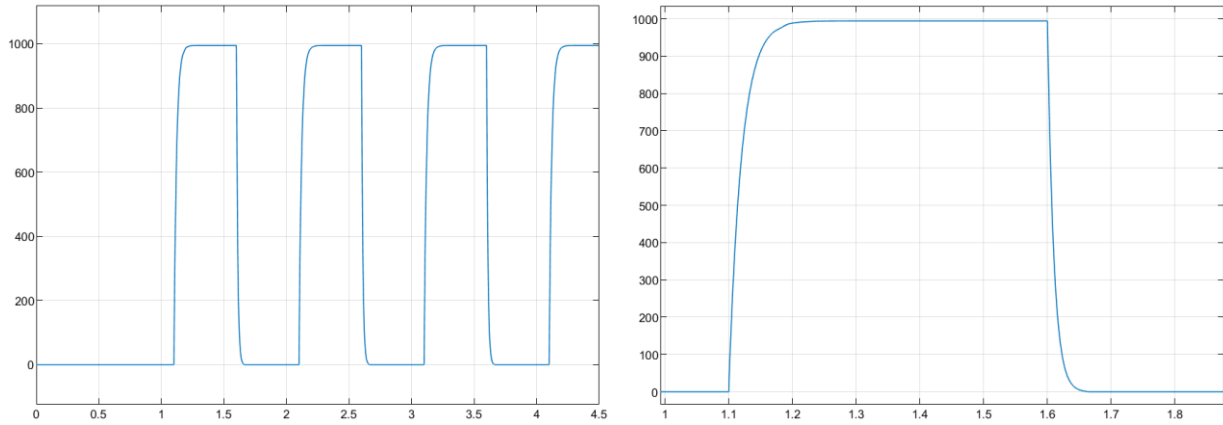


Figura 2.4: Corrente nel carico e ingrandimento di un ciclo di chiusura e apertura
($V_{DC} = 1000 \text{ V}$, $I_{LOAD} = 1000 \text{ A}$)

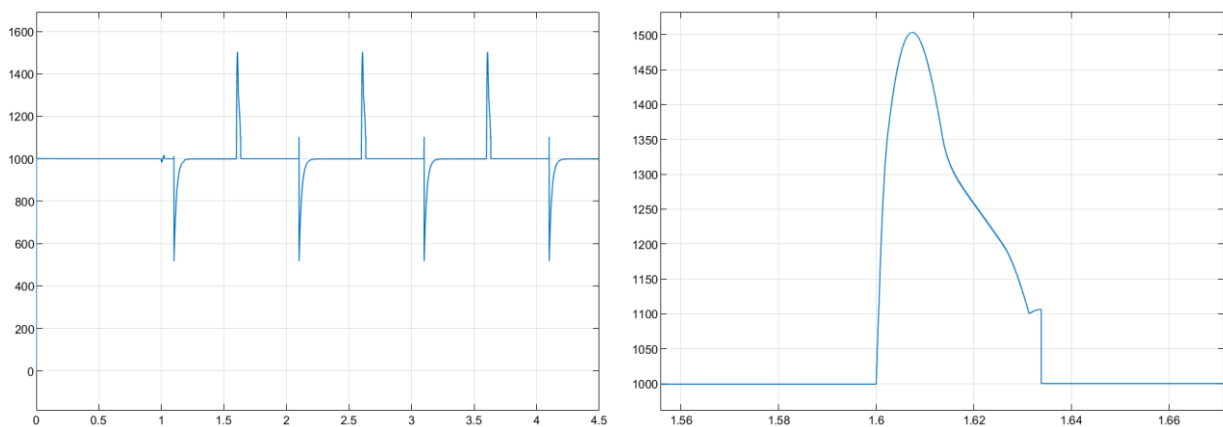


Figura 2.5: Tensione di ingresso e ingrandimento di un ciclo di chiusura e apertura
($V_{DC} = 1000 \text{ V}$, $I_{LOAD} = 1000 \text{ A}$)

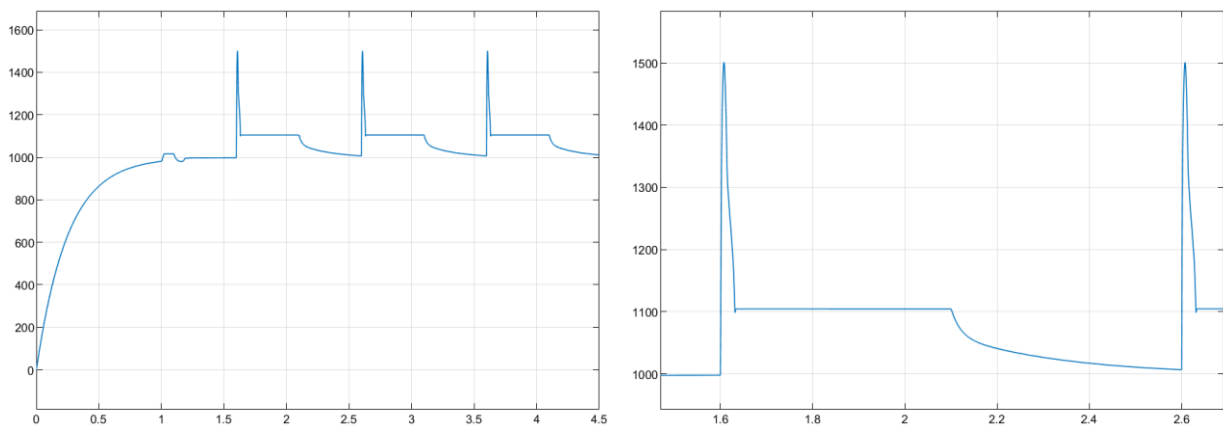


Figura 2.6: Tensione sul condensatore C_D e ingrandimento di un ciclo di chiusura e apertura
($V_{DC} = 1000 \text{ V}$, $I_{LOAD} = 1000 \text{ A}$)

2° caso: $V_{DC} = 1000 \text{ V}$, $I_{LOAD} = 100 \text{ A}$

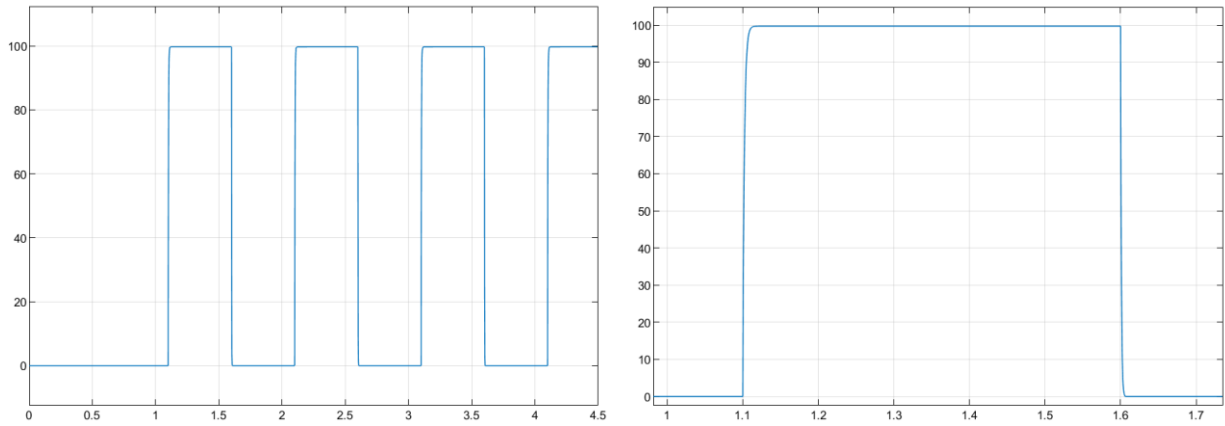


Figura 2.7: Corrente nel carico e ingrandimento di un ciclo di chiusura e apertura ($V_{DC} = 1000 \text{ V}$, $I_{LOAD} = 100 \text{ A}$)

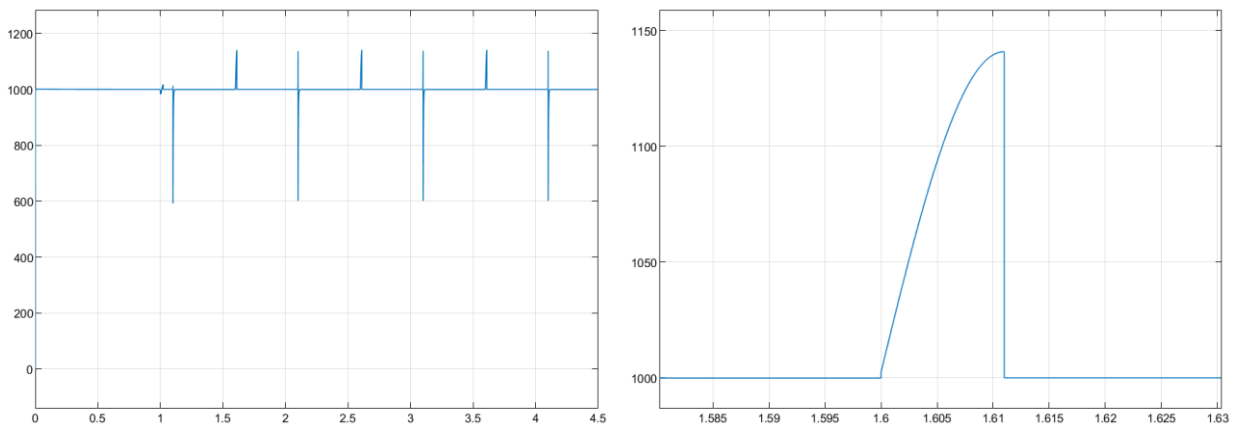


Figura 2.8: Tensione di ingresso e ingrandimento di un ciclo di chiusura e apertura ($V_{DC} = 1000 \text{ V}$, $I_{LOAD} = 100 \text{ A}$)

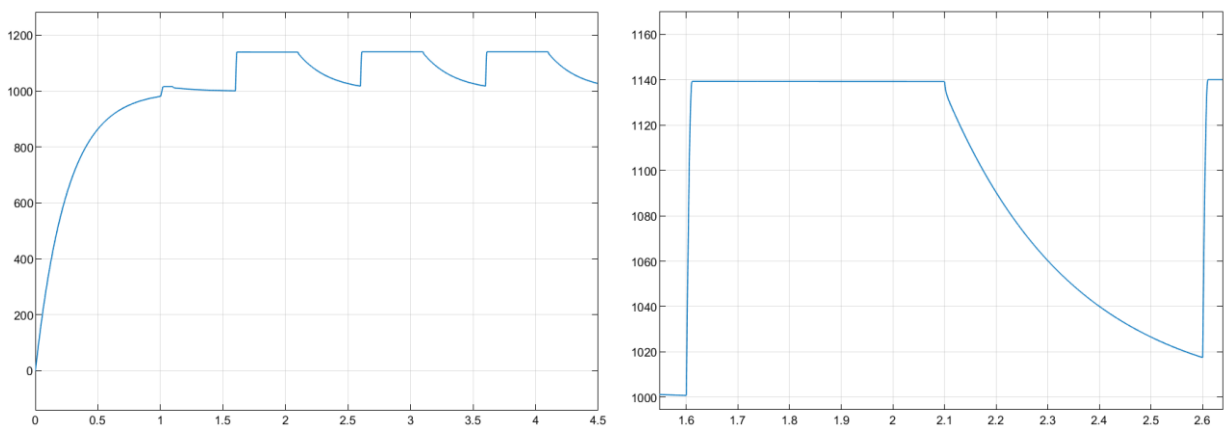


Figura 2.9: Tensione sul condensatore C_D e ingrandimento di un ciclo di chiusura e apertura ($V_{DC} = 1000 \text{ V}$, $I_{LOAD} = 100 \text{ A}$)

Come si può osservare, l'interruttore è in grado di compiere numerosi cicli di apertura e chiusura evitando la formazione di sovratensioni pericolose anche nelle condizioni di maggior carico o con correnti elevate in caso di guasto.

2.1.2.2 Interruttore statico con circuito di snubber RCD

L'interruttore modellizzato in questo paragrafo è un interruttore a stato solido con un circuito snubber RCD come mostrato in Figura 2.10, vale a dire un circuito in parallelo all'interruttore costituito da un resistore, un condensatore e un diodo. Il condensatore è essenziale per la riduzione della tensione attraverso il dispositivo elettronico di potenza e quindi delle perdite di potenza durante il processo di spegnimento dell'interruttore. Il resistore viene utilizzato per scaricare il condensatore dopo l'intervento dell'interruttore ed è anche fondamentale per la riduzione del valore di picco della corrente durante le operazioni di spegnimento e accensione.

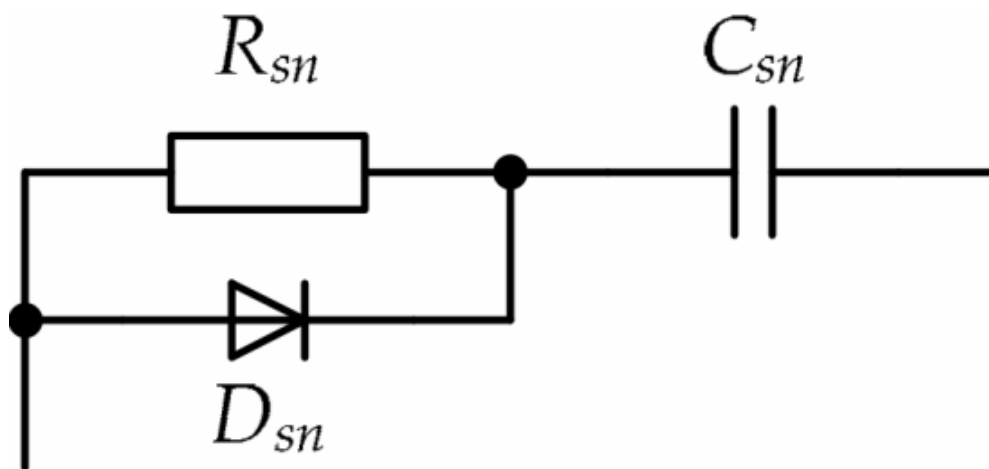


Figura 2.10: Configurazione dello snubber RCD

La presenza di questo snubber evita un elevato valore di di/dt che potrebbe produrre un'alta sovratensione durante il transitorio risultante dall'interruzione di un guasto da parte dell'SSCB. Pertanto, questo componente viene utilizzato per rimanere entro il limite di funzionamento di sicurezza del componente elettronico IGBT e quindi garantire il corretto funzionamento dell'interruttore.

Quindi, una delle considerazioni più importanti per lo snubber è la corretta selezione del componente, e questa scelta si basa sul comportamento del circuito snubber stesso.

Questo metodo di interruzione ha tre diverse fasi, come mostrato nella Figura 2.11.

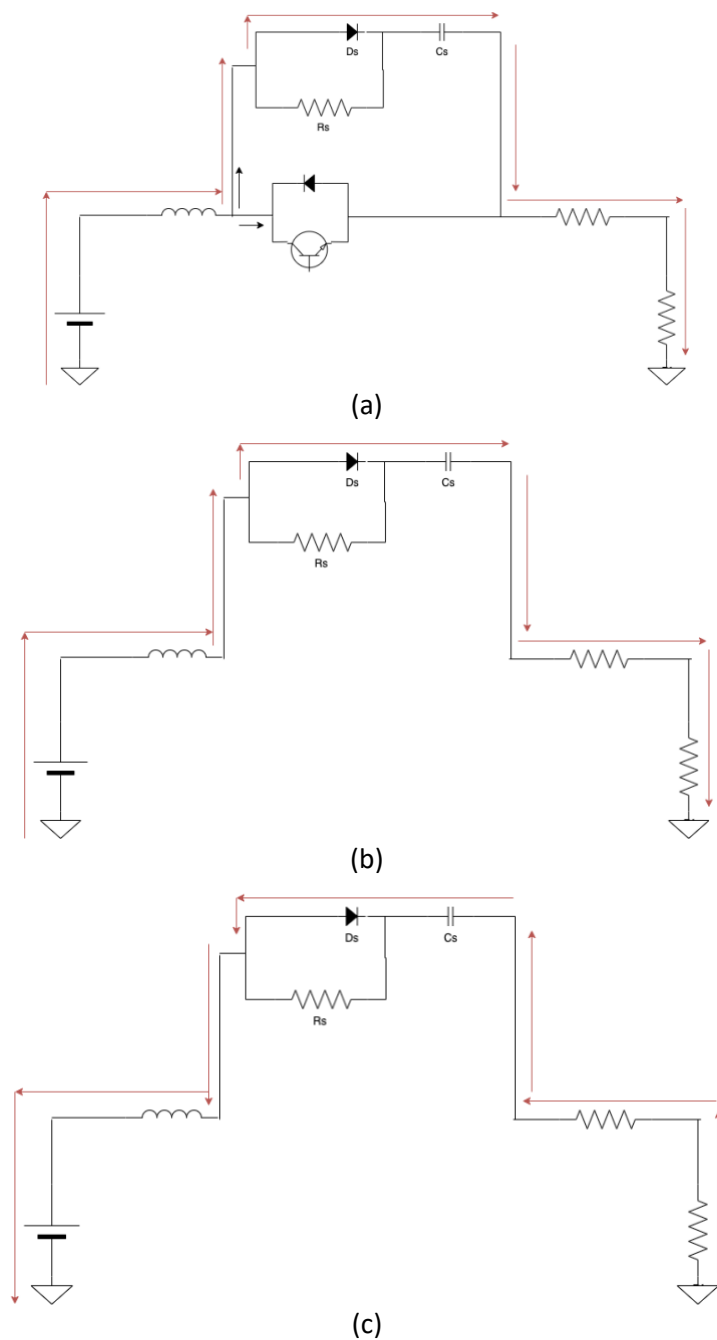


Figura 2.11: Fasi di funzionamento dello snubber: (a) Fase 1, (b) Fase 2, (c) Fase 3

Nella prima fase la corrente commuta dall'interruttore a stato solido al circuito di snubber attraverso il diodo e il condensatore. Nella seconda fase il condensatore CS viene caricato fino a raggiungere il valore di tensione massima. Il terzo rappresenta il momento in cui il condensatore si scarica attraverso il resistore RS. Dopo che il circuito di snubber si accende la corrente continua ad aumentare il suo valore e durante questo aumento della corrente la soppressione della corrente nel circuito principale è rallentata da CS, quindi la presenza dello snubber aumenta il valore di picco della corrente rispetto al circuito semplice senza la presenza dell'RCD snubber. Le fasi 2 e 3 si ripetono continuamente fino a quando l'energia immagazzinata nell'induttanza di linea e poi condivisa con il condensatore è totalmente esaurita come si vede in Figura 2.12.

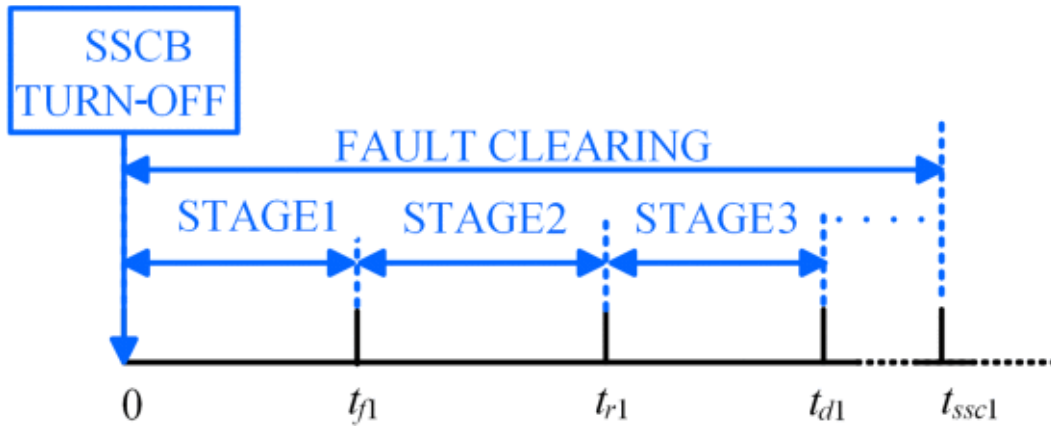


Figura 2.12: Fasi dell'interruzione di un guasto

Durante la prima fase (da 0 a t_{f1}) il diodo D_s viene acceso e la corrente del circuito i_{bus} inizia a spostarsi dal percorso SSCB al circuito di snubber come mostrato nella Figura 2.11 (a). Prima di questo c'è un ritardo quando la corrente nell'interruttore a stato solido aumenta grazie al gate driver che rivela una corrente elevata e decide di spegnere l'interruttore. A t_{f1} la corrente di snubber è uguale alla corrente del circuito i_{bus} per cui la corrente nell'SSCB diventa nulla, quindi l'IGBT si porta nello stato di blocco inverso, e questo coincide con la fine dello stadio 1. Alla fine di questa fase la corrente e la tensione sono considerate come:

$$\begin{cases} i_{Cs}(tf) = I_{bus} \\ u_{Cs}(tf) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Durante la seconda fase i condensatori C iniziano a caricarsi attraverso D_s come mostrato nella Figura 2.11 (b). Questo passaggio termina quando l'energia di guasto immagazzinata nell'induttanza di dispersione viene totalmente fornita al condensatore. Quindi, a $t = t_{r1}$ la tensione u_C raggiunge il suo picco e i_{bus} diventa nulla.

$$\begin{cases} i_{bus}(tr1) = 0 \\ u_{Cs}(tr1) = U_{PK} \\ tr_1 = \frac{1}{w_1} \operatorname{atan}\left(\frac{w_1}{\alpha_1}\right) - \frac{\beta_1}{w_1} + t_f \end{cases} \quad (3)$$

in cui $\alpha_1 = \frac{R}{2L}$, $\beta_1 = \operatorname{atan}\left(\frac{0.5u_{DC} \cdot Cs \cdot w_1}{0.5u_{DC} \cdot Cs \cdot \alpha_1 - i_{bus}}\right)$, $w_1 = \sqrt{\frac{2}{LCS} - \alpha_1^2}$

La fase 3 inizia quando il condensatore CS scarica la sua energia in RS e si alterna con la fase 2 fino a quando l'intera energia di interruzione non è esaurita.

Durante il processo le quantità principali sono le seguenti:

$$u_{CS}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_f \\ A_1 e^{\alpha_1(t-t_f)} \sin(\omega_1(t-t_f) + \beta_1) + B_1 & t_f \leq t \leq t_{r1} \\ A'_1 e^{\alpha'_1(t-t_{r1})} \sin(\omega'_1(t-t_{r1}) + \beta'_1) + B'_1 & t_{r1} \leq t \leq t_{d1} \end{cases} \quad (4)$$

$$u_{SSCB}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_f \\ A_1 e^{\alpha_1(t-t_f)} \sin(\omega_1(t-t_f) + \beta_1) + B_1 & t_f \leq t \leq t_{r1} \\ \varepsilon_1 A'_1 e^{\alpha'_1(t-t_{r1})} \sin(\omega'_1(t-t_{r1}) + \beta'_1 + \gamma_1) + B'_1 & t_{r1} \leq t \leq t_{d1} \end{cases} \quad (5)$$

$$i_{DS}(t) = \begin{cases} \frac{I_{bus1}}{t_f} t & 0 \leq t \leq t_f \\ \tau_1 A_1 e^{\alpha_1(t-t_f)} \sin(\omega_1(t-t_f) + \beta_1 + \xi_1) & t_f \leq t \leq t_{r1} \\ 0 & t_{r1} \leq t \leq t_{d1} \end{cases} \quad (6)$$

$$i_{RS}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_{r1} \\ \tau_1 A'_1 e^{\alpha'_1(t-t_{r1})} \sin(\omega'_1(t-t_{r1})) & t_{r1} \leq t \leq t_{d1} \end{cases} \quad (7)$$

In cui:

$$A_1 = \frac{1}{w_1 C_S} \sqrt{\frac{1}{4} u_{DC}^2 C_S^2 (\alpha_1^2 + w_1^2) - \alpha_1 u_{DC} C_S I_{bus} + I_{bus}^2}$$

$$\alpha'_1 = \frac{R+2R_S}{2L}, w'_1 = \sqrt{\frac{2}{LC_S} - \alpha_1'^2}, \beta_1 = \text{atan}\left(\frac{w_1}{\alpha_1}\right), B_1 = \frac{u_{DC}}{2} = B'_1$$

$$A'_1 = \sqrt{\alpha_1'^2 + w_1'^2} \frac{(U_{PK} - B'_1)}{w_1'}$$

$$\varepsilon_1 = \sqrt{(1 - \alpha_1' R_S C_S)^2 + (w_1' R_S C_S)^2}$$

La progettazione dei parametri degli snubber RCD, si basa sui seguenti parametri del circuito: induttanza del bus equivalente L; resistore bus equivalente R; tensione dc-link u_{DC} ; corrente nominale del bus I_e ; il tempo di

ritardo t_b ; il tempo di spegnimento per IGBT t_f ; il tempo più breve per la richiusura degli SSCB $T_{reclose}$; la corrente di picco attraverso IGBT consentita alla richiusura dell'SSCB I_{max} ; la capacità di giunzione CJ; la tensione massima consentita per SSCB è U_{max} . Poiché gli SSCB su bus positivi e negativi suddividono la tensione u_{DC} allo stesso modo quando raggiungono lo stato stazionario, la tensione di riferimento per l'SSCB è impostata su u_{DC} (1.0 p.u.).

Esistono alcune tecniche diverse per progettare uno snubber, una di queste è la seguente.

Il primo passo da fare è determinare la corrente del bus prima dell'accensione dello snubber e può essere derivato come:

$$I_{bus} = -\left(\frac{u_{DC}}{R} - I_e\right) e^{-\frac{R}{L}t_b} + \frac{u_{DC}}{R} \quad (8)$$

Il secondo passo consiste nel calcolo della capacità dello snubber in base alla legge di conservazione dell'energia con esaurimento energetico trascurando R:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} C_{s0} (U_{max}^2 - u_{CS}^2(0)) = \frac{1}{2} L (I_{bus}^2 - i_{bus}^2(t_r)) \\ C_S = \alpha_C C_{S0} \end{cases} \quad (9)$$

in cui $u_{CS}^2(0) = 0$ e $i_{bus}^2(t_r) = 0$, e α_C è un parametro che deve essere impostato il più vicino possibile a 1 in base ai valori di capacità reali.

Il terzo passo è legato alla scelta di R_s . Il limite inferiore per la resistenza di snubber R_{Smin} può essere determinata calcolando la corrente di picco alla richiusura dell'SSCB.

$$\begin{cases} I_m = \frac{u_{DC}}{2R_{Smin}} \\ R_S = \alpha_R \frac{u_{DC}}{2I_m} \end{cases}$$

Allo stesso modo in cui α_C è stato scelto il più vicino possibile a 1, anche α_R deve essere prima impostato vicino a 1 considerando i valori di resistenza reali.

Nella quarta fase il coefficiente α_C deve essere aumentato per ottenere un valore di picco inferiore al 10%, in modo che:

$$\frac{U_{PK} - U_{max}}{U_{max}} \leq 10\%$$

$$\frac{I_{PK} - I_{max}}{I_{max}} \leq 10\%$$

Nella quinta fase è possibile calcolare il tempo di raggiungimento dello stato stazionario

$$t_{SSC} = \frac{\pi}{w_1} + \frac{\pi}{w_1'}$$

Se $T_{reclose} > t_{SSC}$ la selezione è completata, altrimenti il valore di α_R deve aumentare e si deve tornare nella fase 3.

2.1.2.3 Interruttore statico con circuito di snubber MOV

Il secondo tipo di interruttore è basato su un varistore di ossido di metallo (MOV), come spiegato nella parte precedente, cioè un componente con la caratteristica di modificare il suo valore di resistenza durante il processo di interruzione, in base al suo comportamento come mostrato in Figura 2.13.

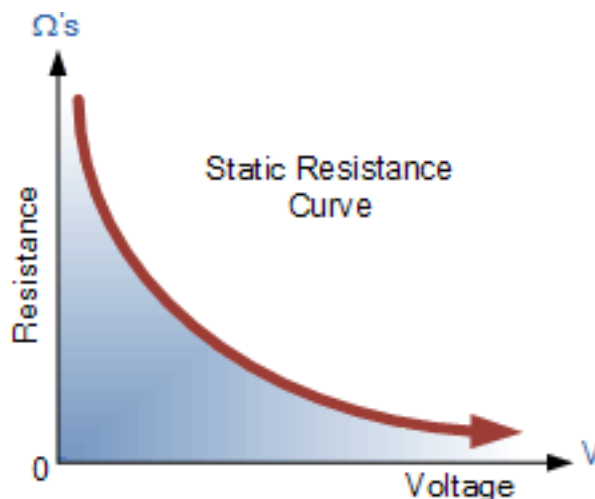


Figura 2.13: Curva di resistenza di un MOV

Il MOV è posto in parallelo al componente elettronico per controllare la sovratensione grazie alla sua modalità operativa. Pertanto, quando la tensione di blocco viene raggiunta dal componente, cambia il suo valore di resistenza al fine di mantenere costante la sovratensione generata, evitando così sovratensioni troppo elevate.

La resistenza interna viene utilizzata per dissipare l'energia immagazzinata nell'induttore di linea dovuta alla corrente di guasto, poiché la corrente viene commutata al ramo MOV.

Il MOV può essere posizionato in parallelo ad entrambi gli IGBT poiché questo componente è bidirezionale e quindi può dissipare l'energia di guasto nelle due direzioni. I MOV commerciali offrono correnti nominali di picco da 20 a 70 kA e energie dissipate di picco da 0,01 a 10 kJ, quindi la scelta del MOV corretto è importante. Per fare la scelta corretta viene presentato in letteratura un metodo di selezione in quattro fasi:

1. Primo passo: selezionare la tensione nominale e la potenza nominale corrette del MOV consentendo un margine del 20%
2. Secondo passo: verificare che il MOV soddisfi la corrente di guasto prevista
3. Terzo passo: determinare le capacità di tenuta all'impulso relative alla corrente di guasto utilizzando le curve di valutazione degli impulsi nella scheda tecnica del MOV.
4. Quarto passo: verificare che la tensione residua sia inferiore alla tensione massima di picco utilizzando la curva V-I nella scheda tecnica del MOV.

Seguendo questi passaggi è possibile scegliere il MOV corretto per qualsiasi configurazione di interruttore.

3 Conclusioni

In questo rapporto vengono presentate e modellizzate tre diverse tipologie di interruttori statici basati su semiconduttori di potenza, così definiti:

- Interruttore statico con circuito di snubber a chopper
- Interruttore statico con circuito di snubber RCD
- Interruttore statico con circuito di snubber MOV

Per tutte le tipologie, i vantaggi che gli interruttori a stato solido offrono sono relativi alla loro azione istantanea nell'inizio del processo di interruzione della corrente che permette di limitare le correnti di guasto a valori molto minori, intorno ad un terzo, della corrente di regime.

Un altro vantaggio risiede nella possibilità di controllare e contenere le sovratensioni generate in fase di interruzione a valori inferiori a quelle generate dagli interruttori elettromeccanici, permettendo così di evitare stress elettrici al sistema e di incrementarne l'affidabilità.

Inoltre, l'assenza di parti meccaniche mobili permette di operare numerosi cicli di apertura e chiusura con ridotta manutenzione.

Tra le tipologie presentate, i più diffusi e studiati sono gli interruttori statici con snubber RCD e MOV in quanto non richiedono sofisticati circuiti di controllo, ma un'attenta valutazione dei componenti.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] W. A. Martin, C. Deng, D. Fiddiansyah and J. C. Balda, "Investigation of low-voltage solid-state DC breaker configurations for DC microgrid applications," 2016 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Austin, TX, USA, 2016, pp. 1-6
- [2] D. Jovicic;M. H. Hedayati, "DC chopper based test circuit for high voltage DC circuit breakers", 13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017)
- [3] Liangyi Tang;Bin Wu;Venkata Yaramasu;Weirong Chen;Hussain S. Athab, "Fast acting DC circuit breaker for HVDC transmission line based on DC/DC chopper", 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA)
- [4] F. Liu, W. Liu, X. Zha, H. Yang and K. Feng, "Solid-State Circuit Breaker Snubber Design for Transient Overvoltage Suppression at Bus Fault Interruption in Low-Voltage DC Microgrid," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 4, pp. 3007-3021, April 2017
- [5] M.A. Yaqobi, H. Matayoshi, Mir S.S. Danish, M.E. Lotfy, A.M. Howlader, S. Tomonobu, "Low-Voltage Solid-State DC Breaker for Fault Protection Applications in Isolated DC Microgrid Cluster" Appl. Sci. 9, no. 4: 723