

# CALCOLO DEI FLUSSI DI POTENZA IN RETI MULTITERMINALI DC SUPERCONDUTTIVE

*Emiliano Guerra<sup>1</sup>, Mattia Simonazzi<sup>1</sup>, Antonio Morandi<sup>1</sup>  
Massimo Fabbri<sup>1</sup>, Marco Bocchi<sup>2</sup>, Andrea Musso<sup>2</sup>, Giuliano Angeli<sup>2</sup>  
Hiroyuki Ohsaki<sup>3</sup>, Wesley de Sousa<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione – DEI - Università di Bologna – Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna

<sup>2</sup>RSE S.p.A., Via Rubattino 54, 20134 Milan, Italia

<sup>3</sup>University of Tokyo, Giappone

<sup>4</sup>Karlsruhe Institute of Technology, Germania

L'integrazione dei cavi superconduttori nelle reti multiterminali ad alta tensione in corrente continua (HVDC) offre un significativo potenziale di miglioramento della trasmissione di energia su lunghe distanze.

Questi cavi combinano i vantaggi della superconduttività, come la resistenza elettrica quasi nulla, con l'efficienza e la scalabilità dei sistemi HVDC, consentendo una maggiore capacità di potenza e ridotte perdite energetiche. Tuttavia, le caratteristiche uniche delle linee di interconnessione superconduttive presentano nuove sfide nel calcolo e nella gestione dei flussi di potenza. In particolare, la resistenza estremamente bassa di queste linee, che è ordini di grandezza inferiore rispetto alle controparti convenzionali, può influenzare drasticamente la distribuzione dei flussi di potenza, richiedendo nuove metodologie per modellare e controllare con precisione le reti multiterminali HVDC.

In questo studio è stata inizialmente considerata una rete multiterminale DC quanto più vicina ad un sistema HVDC reale. Nello specifico, si è fatto riferimento alla porzione di circuito a  $\pm 400$  kV (circuito in configurazione DC bipolare) presente nel benchmark Cigrè B4 [1]. La rappresentazione del benchmark Cigrè è riportata in Figura 1. Essendo questo un sistema HVDC convenzionale, è stato richiesto un adattamento del livello di tensione di questa rete, in modo da renderlo compatibile con quello di un sistema superconduttivo. Le potenze iniettate nei nodi sono state mantenute uguali. In questo caso si è fatto riferimento al livello di tensione adottato nel progetto Scarlet [2], ovvero  $\pm 50$  kV. Essendo lo scopo dello studio quello di calcolare i flussi di potenza in tale rete, non sono state eseguite particolari assunzioni riguardo l'adattamento dei parametri dei convertitori AC/DC ai nodi della rete.

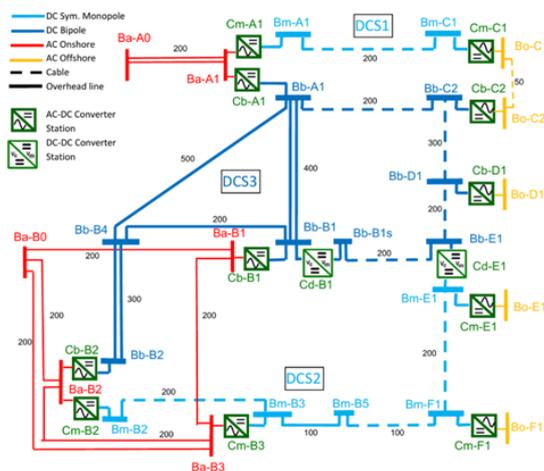


Figura 1: Benchmark Cigrè B4 [1].

Successivamente alla scelta del caso di studio, è stata eseguita un'analisi dei contributi resistivi presenti su una generica linea superconduttiva. Tale attività è determinante nel calcolo dei flussi di potenza in quanto le equazioni coinvolte prevedono la conoscenza non solo delle iniezioni di potenza ai nodi di carico o generazione, ma anche delle resistenze delle linee di interconnessione tra i nodi stessi (il controllo del livello di tensione della rete è eseguito in uno o più nodi detti di "saldo"). Da questa analisi risulta che, a differenza delle reti convenzionali, dove il contributo resistivo più rilevante risulta essere quello dovuto alla resistenza complessiva del cavo, nel caso di interconnessioni superconduttive il contributo resistivo preponderante è quello dovuto agli interruttori DC (DCCB). Nello specifico, in questo lavoro si è fatto riferimento ad interruttori cosiddetti "ibridi", stato dell'arte per le reti in corrente continua [3]. In Figura 2 è rappresentata la tipica configurazione circuitale di un DCCB "ibrido".

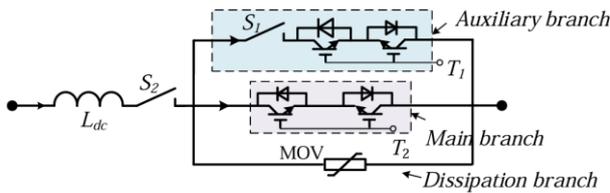


Figura 2: Schema circuitale di un DCCB in architettura "ibrida" [4].

In seguito, è stata presentata la formulazione completa del problema, elencando i vincoli di uguaglianza (bilanci di potenza ai nodi) e di disuguaglianza (valori massimi e minimi ammissibili di tensioni dei nodi, massima corrente trasportabile dalla linea e valore minimo di efficienza di rete accettato) e metodologia di calcolo (basata su ottimizzazione tramite algoritmo genetico).

Dai risultati, rispetto al flusso di potenza ottenuto nel circuito originale [1], emerge una differenza evidente nella distribuzione nei flussi di potenza nelle porzioni di circuito magliate: infatti, in queste porzioni di circuito la corrente tende a redistribuirsi sulla base della resistenza delle linee. La differenza assoluta e relativa di questi contributi resistivi rispetto alla controparte convenzionale comporta una diversa ripartizione dei flussi di potenza in tali linee. Al contrario, invece, in quelle porzioni di circuito a configurazione radiale (ovvero dove la corrente è vincolata a fluire su in un unico percorso) il flusso di potenza complessivo rimane sostanzialmente invariato, differendo solamente nella quota di perdite associate alla linea stessa.

[1] Vrana, T. K., Yang, Y., Jovicic, D., Dennetière, S., Jardini, J., & Saad, H. "The CIGRE B4 DC grid test system", 2013, *Electra*, 270(9), 10-19.

[2] N. Magnusson et al., "SCARLET – A European Effort to Develop HTS and MgB2 Based MVDC Cables," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, no. 3, pp. 1-5, May 2024, Art no. 5400205, doi: 10.1109/TASC.2023.3340646.

[3] M. Barnes, D. S. Vilchis-Rodriguez, X. Pei, R. Shuttleworth, O. Cwikowski and A. C. Smith, "HVDC Circuit Breakers—A Review," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 211829-211848, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3039921.

[4] W. Xiang, W. Yuan, L. Xu, E. Hodge, J. Fitzgerald and P. McKeever, "Fault Transient Study of a Meshed DC Grid With High-Temperature Superconducting DC Cables," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 6, pp. 5414-5424, Dec. 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3177406.