



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'ENERGIA ELETTRICA
E DELL'INFORMAZIONE
"GUGLIELMO MARCONI"

Analisi del funzionamento e della fattibilità tecnica ed economica di cavi superconduttori in reti elettriche AC e DC

Introduzione

I cavi superconduttori possono essere installati realizzando nuove infrastrutture, oppure inseriti in infrastrutture preesistenti, contribuendo a ridurre il costo e l'impatto sull'ambiente di futuri incrementi di potenza installata nelle reti. Considerevoli incrementi di potenza nella rete elettrica sono previsti nei prossimi anni data la necessità di ricaricare i veicoli elettrici che verranno gradualmente a sostituire i veicoli a combustione interna.

La significativa riduzione delle perdite nei cavi superconduttori rispetto ai cavi resistivi tradizionali può consentire un considerevole aumento di efficienza della distribuzione di potenza elettrica. La convenienza tecnico-economica della sostituzione di un cavo convenzionale con un cavo superconduttore dipende significativamente dalla tipologia della linea (con particolare riferimento a potenza e lunghezza della linea) e dalle condizioni operative.

Stanti le caratteristiche fondamentali dei materiali superconduttori, caratterizzati da perdite pressoché nulle in corrente continua, ma da perdite ridotte, ma non nulle, in corrente alternata, il presente progetto si focalizzerà sull'analisi di un cavo realizzato tramite fili superconduttori in diboruro di magnesio (MgB_2) oppure tramite nastri in ossido di rame-bario-terre rare (REBCO). In entrambi i casi, saranno analizzate linee di distribuzione e/o trasmissione in corrente continua DC oppure in corrente alternata (AC).

Il diboruro di magnesio ha un costo inferiore rispetto ai nastri in ossido di rame-bario-terre rare (REBCO), e trova già diverse applicazioni in campo industriale. Tuttavia, tale materiale presenta temperatura critica di circa 39 K, e non può essere quindi raffreddato mediante azoto liquido, come invece avviene per i nastri a base di REBCO. Il sistema di refrigerazione necessario per una linea di distribuzione e/o trasmissione con cavi a base di MgB_2 risulta quindi più complesso rispetto ad una linea con nastri a base di REBCO.

Progetto di Ricerca

Nelle attività del presente progetto saranno analizzati cavi realizzati tramite fili superconduttori in diboruro di magnesio (MgB_2) e tramite nastri a base di REBCO. Date le caratteristiche di raffreddamento del diboruro di magnesio, sarà necessario affrontare lo studio di tecniche di raffreddamento basate sull'utilizzo di elio gassoso, o eventualmente, di idrogeno liquido. Mentre per cavo realizzati tramite nastri a base di REBCO saranno analizzate tecniche di raffreddamento mediante azoto liquido.

DIREZIONE E AMMINISTRAZIONE

Viale del Risorgimento, 2 | 40136 Bologna | Italia | Tel. + 39 051 2093001 | dei.amministrazione@unibo.it

UNITA' OPERATIVA DI SEDE:

Via dell'Università, 50 | 47522 Cesena | Italia | Tel. + 39 0547339200



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'ENERGIA ELETTRICA
E DELL'INFORMAZIONE
"GUGLIELMO MARCONI"

Una parte preliminare dell'attività consisterà nell'analisi critica della letteratura finalizzata a reperire dati riguardo le diverse configurazioni dei cavi e la corrispondente modellistica, al fine di identificare la tipologia di cavo sulla quale focalizzare l'attività di studio.

Una volta selezionata una configurazione, si procederà ad utilizzare un algoritmo di ottimizzazione denominato Oscar, sviluppato presso l'Università di Bologna, per individuare la configurazione di cavo caratterizzata dal costo minore, compatibilmente con le specifiche tecniche richieste. Tale modello di ottimizzazione, basato su un algoritmo genetico, sarà applicato alle configurazioni di cavo precedentemente individuate.

Il modello di ottimizzazione sarà in grado di quantificare le dissipazioni generate dalle varie componenti del cavo, quali le perdite AC dovute alle fluttuazioni della corrente di trasporto comunque presenti in linee elettriche DC (denominati *ripple*), le perdite alle terminazioni, e le perdite di altra origine. Per questo lavoro, verrà valutato l'impiego di formule analitiche, ampiamente sviluppate in letterature per studiare le perdite in cavi basati sull'avvolgimento di numerosi fili o nastri in diversi passi di cablatura. Tali modelli analitici potranno essere direttamente inseriti nel codice di ottimizzazione.

Infine, sarà sviluppata una funzione per il calcolo del costo dell'intero impianto, che terrà conto di diverse voci di costo. Il computo includerà i costi capitali e di esercizio del sistema di raffreddamento, la cui trattazione fluidodinamica verrà affrontata mediante metodi di calcolo semplificati (formule empiriche o analitiche).

Parallelamente, verranno identificati possibili casi studio, rappresentativi di situazioni reali della rete elettrica nazionale, sui quali eseguire il confronto con i cavi tradizionali. Saranno prese in considerazione linee elettriche da realizzare ex-novo, così come linee elettriche obsolete, dove l'impianto basato su tecnologia superconduttiva può essere inserito in sostituzione del corrispondente cavo convenzionale.

In seguito, verrà svolta un'analisi tecnico-economica tra le diverse tecnologie prese in considerazione. In base al caso di studio analizzato, il confronto verrà operato tra la tecnologia tradizionale e cavi in MgB_2 per applicazioni DC o cavi a base di BSCCO e REBCO per applicazioni AC. Sarà inoltre possibile operare un confronto diretto tra le due tipologie di cavi superconduttori, valutandone l'impiego in eventuali nuove linee elettriche, i cui parametri possano adattarsi sia all'applicazione DC che AC, allo scopo di identificare possibili punti di forza di una tecnologia rispetto all'altra.

Inoltre, saranno sviluppati modelli semplificati di un cavo superconduttore basati su circuiti equivalenti a parametri concentrati. Tali modelli dovranno consentire l'inserimento del cavo superconduttore in modelli semplificati di rete elettrica, per applicazioni DC e AC. Il modello sviluppato potrà essere applicato per determinare l'impatto sulla rete della presenza del cavo e il suo comportamento in condizioni di funzionamento nominali o in presenza di guasti.

DIREZIONE E AMMINISTRAZIONE

Viale del Risorgimento, 2 | 40136 Bologna | Italia | Tel. + 39 051 2093001 | dei.amministrazione@unibo.it

UNITA' OPERATIVA DI SEDE:

Via dell'Università, 50 | 47522 Cesena | Italia | Tel. + 39 0547339200



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'ENERGIA ELETTRICA
E DELL'INFORMAZIONE
"GUGLIELMO MARCONI"

Piano delle Attività

Il progetto di ricerca si articolerà in diverse attività di analisi descritte nel seguito.

1. Analisi preliminare critica di letteratura finalizzata al reperimento di dati ed informazioni concernenti le configurazioni di cavi superconduttori per applicazioni in corrente continua e alternata in reti elettriche.
2. Identificazione di casi di studio, rappresentativi di situazioni reali esistenti nella rete elettrica di distribuzione nazionale, sui quali eseguire le simulazioni ed il confronto parametrico con i cavi tradizionali.
3. Sviluppo di un modello fisico-matematico utile a ricavare i dati necessari al dimensionamento di un cavo superconduttore per applicazioni in corrente continua o alternata e del relativo sistema di refrigerazione. Lo studio è finalizzato ad identificare la configurazione più conveniente sotto il profilo economico in date condizioni operative. Saranno sviluppati modelli o funzioni matematiche per lo svolgimento dei seguenti calcoli:
 - Quantificazione delle dissipazioni di diversa origine generate durante il funzionamento
 - Dimensionamento del sistema di refrigerazione mediante metodi di calcolo fluidodinamici semplificati (formule empiriche o analitiche).
 - Quantificazione del costo complessivo per la produzione e il funzionamento dell'impianto (incluso il costo del materiale superconduttore, del sistema di refrigerazione, ecc.), considerando i costi capitali, di esercizio e i tempi di ritorno dell'investimento.
4. Confronto tecnico-economico tra cavi superconduttori e cavi convenzionali per i casi studio selezionati. Il confronto includerà considerazioni tecniche relative alla convenienza dell'utilizzo di una linea in corrente alternata o continua (superconduttiva o convenzionale).
5. Studio di soluzioni progettuali finalizzate ad includere nel cavo superconduttore la funzione di limitazione della corrente di guasto tipica dei limitatori della corrente di guasto.

Bibliografia

- [1] A. Ballarino *et al.*, "The BEST PATHS Project on MgB₂ Superconducting Cables for Very High Power Transmission," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 26, no. 3, Apr. 2016.
- [2] A. Musso *et al.*, "OSCaR: A Cost Analysis of HTS Coaxial Cables With a Novel Optimization Method," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 33, no. 5, Aug. 2023, Art. no. 4803516.
- [3] G. Angeli *et al.*, "Development of Superconducting Devices for Power Grids in Italy: Update About the SFCL Project and Launching of the Research Activity on HTS Cables," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, no. 4, Jun. 2017, Art. no. 5600406.

DIREZIONE E AMMINISTRAZIONE

Viale del Risorgimento, 2 | 40136 Bologna | Italia | Tel. + 39 051 2093001 | dei.amministrazione@unibo.it

UNITA' OPERATIVA DI SEDE:

Via dell'Università, 50 | 47522 Cesena | Italia | Tel. + 39 0547339200