

TRASFERIMENTO WIRELESS DI POTENZA SUPERCONDUTTIVO AD ALTA CORRENTE

Mattia Simonazzi, Leonardo Sandrolini, Vincenzo Cirimele, Massimo Fabbri and Antonio Morandi

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione – DEI
Università di Bologna – Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna

Il trasferimento di potenza wireless (WPT) basato su materiali superconduttori rappresenta una tecnologia promettente per applicazioni nel settore automobilistico e industriale, grazie all'elevata efficienza e densità di potenza che si può raggiungere mediante l'impiego di materiali superconduttori ad alta temperatura critica (HTS – High Temperature Superconductors). Questi materiali consentono una drastica riduzione delle perdite resistive, migliorando significativamente l'efficienza della trasmissione rispetto ai conduttori convenzionali. Tuttavia, gli studi condotti finora si sono concentrati prevalentemente su applicazioni a bassa corrente, in genere limitate a poche decine di ampere. Pur dimostrando la fattibilità tecnica del concetto, tali lavori non affrontano adeguatamente le sfide legate alla trasmissione di potenza ad alta corrente e ad alta potenza [1]. Gli studi in corso esplorano la fattibilità di un sistema WPT basato su HTS in grado di operare con correnti nell'ordine di 1 kA e di raggiungere livelli di potenza trasmessa oltre i 500 kW. Il sistema è concepito per l'alimentazione di sistemi di trazione elettrica [2], comprendendo sia la propulsione sia la gestione dell'energia a bordo, mantenendo una tensione operativa di 800 V, in linea con gli standard attuali nel settore della mobilità elettrica. La configurazione proposta si basa su due avvolgimenti circolari planari (detti "pancake"), rispettivamente trasmettitore e ricevitore. Sono analizzati due scenari distinti come casi studio:

- entrambi gli avvolgimenti (trasmettitore e ricevitore) sono realizzati in materiale superconduttore e operano a temperature criogeniche;
- solo l'avvolgimento trasmettitore è superconduttore, mentre il ricevitore è costituito da rame e opera a temperatura ambiente.

Le bobine considerate sono mostrate, rispettivamente, nelle figure 1a e 1b.



Figura 1: sistema WPT con a) due bobine superconduttrici e b) bobina trasmittente superconduttrice e ricevente di rame a temperatura ambiente.

Sono state considerate diverse topologie di reti di compensazione passive, al fine di valutarne l'impatto sul funzionamento del sistema con componenti superconduttivi. A differenza delle bobine HTS, progettate specificamente per il trasporto di correnti elevate, i condensatori presentano una limitata capacità di conduzione di corrente (tipicamente nell'ordine di alcune decine di ampere). Di conseguenza, il banco di condensatori richiesto per la compensazione diventerebbe particolarmente complesso e costoso se dimensionato per correnti elevate. Tra le varie configurazioni analizzate, la compensazione parallelo (ovvero con il condensatore posto in parallelo all'avvolgimento) si è dimostrata la più fattibile dal punto di vista tecnico, in quanto consente di mantenere la corrente attraverso i condensatori su livelli contenuti, pur garantendo la risonanza del circuito. In entrambi i casi studio, l'adozione della compensazione parallelo ha permesso di ottimizzare il trasferimento di potenza e ridurre le perdite reattive, mantenendo un'elevata efficienza anche in condizioni operative gravose.

La progettazione del sistema integra un'analisi elettromagnetica e termica approfondita, elemento essenziale per una valutazione accurata delle prestazioni di un sistema superconduttivo operante in condizioni reali e in regime continuo. In particolare, l'analisi tiene conto delle complesse interazioni tra i diversi domini fisici che influenzano il comportamento del materiale superconduttore. Com'è noto, i meccanismi di perdita nei superconduttori ad alta corrente risultano particolarmente difficili da modellare, a causa della natura fortemente non lineare della risposta del materiale alle variazioni del campo magnetico, della corrente elettrica e della temperatura. Tali dipendenze incrociate comportano la necessità di adottare un approccio multifisico, in grado di rappresentare accuratamente i fenomeni coinvolti. Per affrontare queste sfide, sono stati sviluppati modelli tridimensionali accoppiati elettromagnetico-termici non lineari, appositamente progettati per simulare il comportamento dinamico delle bobine superconduttrici. Questi modelli permettono di analizzare con precisione la distribuzione delle perdite, le condizioni termiche locali e l'efficienza globale del sistema, offrendo così uno strumento avanzato per l'ottimizzazione e la validazione della progettazione in fase preliminare [3].

I risultati della simulazione e dell'analisi mostrano che l'impiego di materiali superconduttori consente di ottenere elevati livelli di efficienza (>98%) e densità di potenza, rendendo questa tecnologia altamente competitiva rispetto ai sistemi convenzionali, soprattutto nei contesti in cui sono richieste alte potenze trasferite e lunghe durate operative. Le applicazioni target includono la ricarica dinamica di veicoli elettrici (Dynamic Wireless Charging), il trasporto ferroviario ad alta efficienza e impianti industriali ad elevato fabbisogno energetico.

- [1] R. Lyu, W. Liu, Q. Li, and K. T. Chau, "Overview of superconducting wireless power transfer," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 4055–4075, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.09.067.
- [2] J. H. Kim, B.-S. Lee, J.-H. Lee, S.-H. Lee, C.-B. Park, S.-M. Jung, S.-G. Lee, K.-P. Yi, and J. Baek, "Development of 1-MW Inductive Power Transfer System for a High-Speed Train," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 10, pp. 6242–6250, 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2417122.
- [3] A. Musso, G. Angeli, M. Ascade, M. Bocchi, E. Guerra, F. Mimmi, P. L. Ribani, V. Rossi, and A. Morandi, "Experimental and Numerical Analysis on the Inductances of Multi-Layer Superconducting Helical Windings," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, no. 3, pp. 1–8, 2024, doi: 10.1109/TASC.2024.3356489.