

# STUDIO DI DIMENSIONAMENTO OTTIMIZZATO DI UNA FLUX PUMP L'ALIMENTAZIONE DI MAGNETI SUPERCONDUTTIVI PER APPLICAZIONI SPAZIALI

*Giacomo Russo, Tommaso Marzocchi, Emiliano Guerra, Luca Murari, Massimo Fabbri, e*

*Antonio Morandi*

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

L'impiego di magneti superconduttori ad alta temperatura (HTS – High Temperature Superconductors) in propulsori spaziali magnetoplasmodinamici a campo applicato (AF-MPD) consente di ottenere elevata densità di potenza e ridotto rapporto massa/campo magnetico, risultando promettente per missioni spaziali a lungo raggio [1]. In Figura 1 è riportato lo schema del sistema HTS AF-MPD con le componenti elettromagnetiche principali, mentre.

Tuttavia, le tradizionali tecnologie di alimentazione dei magneti superconduttivi introducono significativi carichi termici dovuti alla dissipazione negli adduttori di corrente metallici, penalizzando le prestazioni criogeniche complessive [2]. Una soluzione alternativa è rappresentata dalle flux pump HTS, ossia alimentatori in grado di far funzionare i magneti superconduttori in una modalità di corrente quasi persistente senza la necessità di una connessione elettrica diretta, sfruttando una combinazione di induzione elettromagnetica e proprietà non lineari intrinseche dei superconduttori [3]. Esistono essenzialmente tre topologie di flux pump per magneti superconduttori: La dinamo, la lineare e il raddrizzatore trasformatore [4].

Il presente studio propone una procedura di dimensionamento ottimale per flux pump di tipo dynamo, dedicata all'energizzazione del magnete HTS del thruster SUPREME (5 kW), sviluppato da Neutron Star Systems [5]. L'approccio combina modellazione a elementi finiti (FEM) [6] con algoritmi di ottimizzazione, in particolare il Particle Swarm Optimizer (PSO), per identificare le combinazioni ottimali dei parametri di progetto che soddisfino una combinazione di vincoli e obiettivi. Il modello FEM impiegato considera una configurazione a singolo nastro HTS SuperOx YBCO 2G operante a 77 K, con l'obiettivo di raggiungere la corrente nominale del magnete (94 A) in meno di 24 ore e massimizzare l'efficienza complessiva, definita come la potenza media erogata dalla flux pump al magnete fratto la potenza media in grasso alla flux pump.

Due formulazioni del problema di ottimizzazione sono state confrontate: la prima in cui l'obiettivo è la massimizzazione dell'efficienza massima assoluta (*Formulazione 1*), e la seconda in cui l'obiettivo è la massimizzazione dell'efficienza a corrente nominale (*Formulazione 2*). In entrambi i casi, sono stati applicati gli opportuni vincoli sulla capacità di corrente, coerente con la corrente nominale del magnete, e di tensione, per rispettare il tempo massimo di carica. La seconda formulazione si è rivelata superiore, raggiungendo un'efficienza del 15,43% a corrente nominale del magnete, e rispettando i vincoli progettuali. Figura 12 mostra l'andamento dell'efficienza al variare della corrente di trasporto delle due soluzioni di flux pump ottenute mediante formulazioni 1 e 2, mostrando come, sebbene la prima manifesti una efficienza massimo complessiva superiore, questo avviene per corrente di trasporto diversa da quella nominale del magnete. I risultati dimostrano la versatilità del metodo di progettazione ottimizzata di flux pump in base a diversi scenari applicativi, dimostrandolo in questa occasione per quello spaziale.

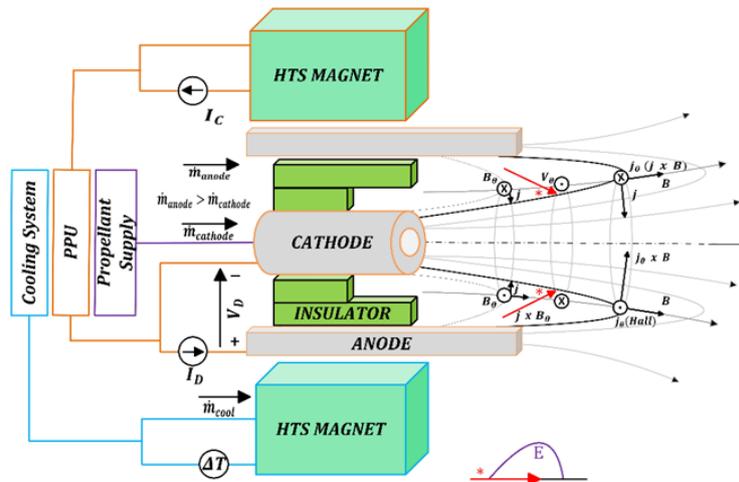


Figura 1 rappresentazione schematica di un propulsore magnetoplasmadynamico a campo applicato (AF-MPD) superconduttivo

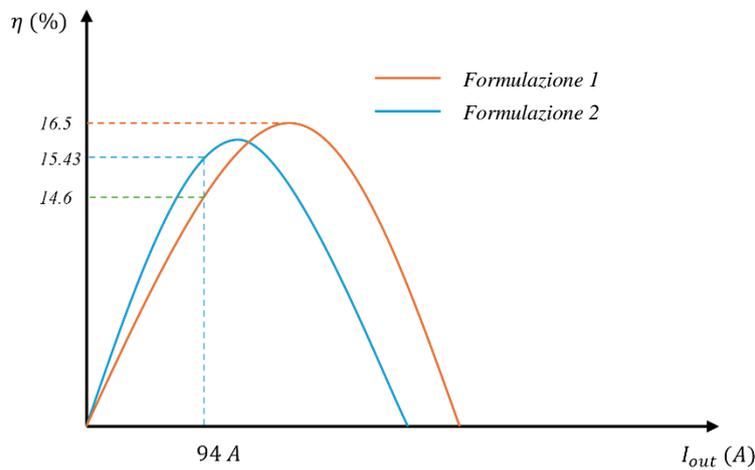


Figura 2 Andamento dell'efficienza al variare della corrente di trasporto delle due soluzioni di flux pump ottenute mediante formulazioni 1 e 2

- [1] J. R. Olatunji, M. Goddard-Winchester, B. Mallett, N. Strickland, e R. Pollock, «Design of a superconducting magnet for space propulsion on the international space station», *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, fasc. 3, pp. 1–6, 2024.
- [2] E. Bogel, M. Wright, K. Aggarwal, e M. Betancourt, «State of the art review in superconductor-based applied-field magnetoplasmadynamic thruster technology», presentato al 37th International Electric Propulsion Conference, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, 2022.
- [3] R. Mataira, M. Ainslie, R. Badcock, e C. Bumby, «Origin of the DC output voltage from a high-Tc superconducting dynamo», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 114, fasc. 16, 2019.
- [4] T. Coombs, «Superconducting flux pumps», *J. Appl. Phys.*, vol. 125, fasc. 23, 2019.
- [5] M. Winter *et al.*, «Downscaling the 100 kW SX-3 AF-MPD to the 5 kW SUPREME Thruster», 2025.
- [6] G. Russo e A. Morandi, «A numerical study on the energization of the field coils of a full-size wind turbine with different types of flux pumps», *Energies*, vol. 15, fasc. 15, p. 5392, 2022.