

Analisi numerica dell'effetto del ferro nella flux pump di tipo dinamo

Tommaso Marzocchi, Giacomo Russo e Antonio Morandi

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione – DEI

Università di Bologna – Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna

Le flux pump (FP) sono un sistema superconduttivo di alimentazione DC contactless utilizzato per energizzare magneti superconduttivi. Le loro potenziali applicazioni spaziano dalla risonanza magnetica alla propulsione aerospaziale, fino alla fusione nucleare e oltre.

Tra le varie tipologie di FP, la dinamo flux pump appartiene alla categoria a onda traslante. In questo tipo di sistema, la tensione DC viene generata grazie alla rotazione di magneti permanenti posti in prossimità di un nastro superconduttore ad alta temperatura critica (high-temperature superconductor HTS), come mostrato in Fig.1.a.

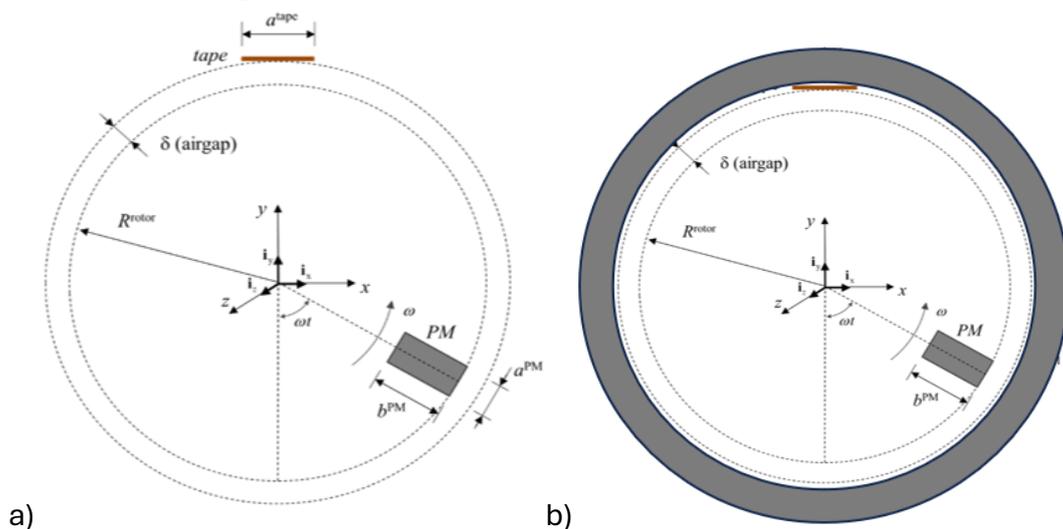


Figura 1 - a) Geometria di una dinamo flux pump e parametri di interesse. b) Dinamo flux pump con una corona circolare esterna in ferro

Una dei principali limiti di questo è sistema è la sua bassa tensione prodotta, che comporta tempi di carica del magnete molto lunghi. Un approccio promettente per ottimizzare e migliorare le performance della dinamo consiste nell'aggiunta di una struttura di ferro all'interno del sistema, con l'obiettivo di intensificare il campo percepito dal nastro superconduttivo.

Sebbene l'effetto del ferro nella dinamo è soggetto di studio nella letteratura [1-2], il suo impatto sulle performance della FP non è pienamente compreso. In particolare si è intende analizzare il comportamento delle grandezze elettriche (tensione e corrente della dinamo) e di quelle energetiche (perdite a vuoto ed efficienza complessiva del sistema).

L'analisi numerica della FP è stata condotta estendendo il metodo dell'equazione integrale di volume [3], basata sull' Eq.1.

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}^J}{\partial t} - \mathbf{v} \times \mathbf{B}^{PM} - \nabla \varphi \quad (1)$$

L'effetto del ferro nella dinamo è stato considerato in due contributi, il primo nei coefficienti di mutua del nastro superconduttore (\mathbf{A}^J dell' Eq.1) e il secondo nel campo prodotto dal magnete permanente sul nastro (\mathbf{B}^{PM} dell' Eq.1). Per il calcolo delle mutue induttanze nel nastro HTS è stata implementata la formulazione A (Eq.2), suddividendo il nastro in 80 sub-elementi. Mentre, il campo d'induzione magnetica prodotto dal magnete permanente è stata calcolato tramite la formulazione Ψ (Eq.3). In entrambe le formulazioni, la presenza del ferro è modellizzata attraverso la permeabilità relativa μ_r .

$$\nabla \cdot \frac{1}{\mu_r} \nabla A_z = -\mu_0 J_z \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mu_r \nabla \Psi = \nabla \cdot \mathbf{B}_R \quad (3)$$

Per comprendere l'effetto del ferro sulla dinamo è stata aggiunta una corona circolare ferromagnetica statorica, posta dietro al nastro HTS (Fig.1.b).

L'analisi numerica della dinamo ha evidenziato che l'aggiunta del ferro comporta un miglioramento significativo sia della tensione che dell'efficienza della flux pump, suggerendo che questa soluzione possa rappresentare un'importante innovazione per rendere questa tecnologia maggiormente competitiva.

In particolare, per una FP con i parametri elencati nella Tabella, l'introduzione del ferro ha comportato un aumento della tensione pari al 120% e un incremento dell'efficienza del 35%. Nello specifico, la tensione è passata da 5.7 mV (senza ferro) a 12.8 mV (con ferro), mentre l'efficienza è aumentata da 11.7% al 16%. Questi risultati evidenziano l'elevato potenziale dell'integrazione del ferro nella dinamo, suggerendo un ampio margine di miglioramento delle sue prestazioni e, di conseguenza, della competitività e maturità della tecnologia nel suo complesso.

| | |
|--|---|
| Temperatura operativa (T) = 65 K | Frequenza di rotazione (f_{rotor}) = 6.4 Hz |
| Airgap (δ) = 0.5 mm | Larghezza magnete (a_{PM}) = 3.18 mm |
| Larghezza nastro (a_{tape}) = 12 mm | Altezza magnete (b_{PM}) = 12.7 mm |
| Spessore nastro (b_{tape}) = 1 μ m | Numero di magneti (N_{PM}) = 1 |
| Lunghezza macchina (l_{active}) = 1 m | Campo residuo ($B_{r,PM}$) = 1.25 T |
| Raggio rotorico (R_{rotor}) = 50 mm | |

Tabella 1 - Parametri della dinamo analizzata per studiare l'effetto del ferro.

- [1] Hao, L., et al.: 3Delectromagnetic modelling for high-temperaturesuperconducting dynamo flux pumps using T-Aformulation. High Voltage. 9(2), 367–379 (2024).
- [2] Jing Li et al “Influence of ferromagnetic slice on the charging performance of a through-wall HTS flux pump employing a magnetic coupler” 2022 Supercond. Sci. Technol. 35 075008.
- [3] A. Morandi et al., “Energy balance, efficiency and operational limits of the dynamo type flux pump,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 6, p. 065011, May 2022.