

Variazioni parametriche nel motore sincrono a magneti permanenti

Elia Brescia

September 2025

Resistenza statorica

La resistenza statorica dipende dalla temperatura dello statore e dalla frequenza delle correnti che circolano negli avvolgimenti di rotore. Infatti, la resistenza elettrica R di un conduttore si può esprimere in funzione della resistività del materiale, della lunghezza e dell'area della sezione trasversale:

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad (1)$$

dove:

- ρ è la resistività del materiale [$\Omega \cdot m$],
- ℓ è la lunghezza del conduttore [m],
- A è l'area della sezione trasversale [m^2].

La resistività ρ non è costante, ma varia con la temperatura secondo la legge:

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha (T_s - T_0)] \quad (2)$$

dove:

- ρ_0 è la resistività a temperatura di riferimento T_0 ,
- α è il coefficiente di temperatura del materiale [$1/^\circ C$],
- T_s è la temperatura operativa degli avvolgimenti di statore [$^\circ C$].

Combinando le due relazioni si ottiene la formula della resistenza in funzione della temperatura:

$$R(T) = R_0 [1 + \alpha (T_s - T_0)] \quad (3)$$

dove $R_0 = \rho_0 \ell A$ è la resistenza a temperatura T_0 .

Bisogna inoltre tener conto che, con l'aumento della frequenza della corrente che circola nel conduttore, quest'ultima si distribuisce sulla superficie più esterna della sezione del conduttore (effetto pelle). Lo stesso avviene quando il conduttore attraversato da corrente si trova in prossimità di altri conduttori attraversati da corrente alternata (effetto di prossimità). A causa di questo, la superficie A effettivamente attraversata da corrente del conduttore si riduce, causando un ulteriore aumento della resistenza. La formula (3) deve pertanto essere corretta per portare in conto questo ulteriore fenomeno:

$$R(T_s, \omega) = R_0 (1 + \alpha \Delta T_s) [1 + f_{AC}(\omega, T_s)], \quad (4)$$

con

$$f_{AC}(T_s, \omega) = \frac{\beta_1 \omega + \beta_2 \omega^2 + \beta_3 \omega^3}{(1 + \alpha \Delta T_s)^\gamma}, \quad (5)$$

dove ω esprime la pulsazione della corrente, β_1 , β_2 , e β_3 sono coefficienti di frequenza e γ è il coefficiente di temperatura della resistenza a corrente alternata.

Flusso dei magneti permanenti

Il flusso dei magneti permanenti non è costante, ma varia con la temperatura. Questo è dovuto al disallineamento degli spin elettronici (responsabili della magnetizzazione del materiale) con l'aumento della temperatura). Si assume una dipendenza lineare analoga a quella della resistenza:

$$\psi_f(T) = \psi_{f0} [1 + \alpha_\psi (T_r - T_0)] \quad (6)$$

dove:

- ψ_{f0} è il flusso alla temperatura di riferimento T_0 ,
- α_ψ è il coefficiente di temperatura dei magneti (tipicamente negativo),
- T_r è la temperatura operativa dei magneti (o di rotore).

Si noti che il coefficiente α_ψ è tipicamente negativo (per i magneti NdFeB $\approx -0.1\%/^\circ\text{C}$), quindi il flusso diminuisce all'aumentare della temperatura. E' inoltre importante considerare che la temperatura dei magneti T_r non coincide con la temperatura degli avvolgimenti di statore T_s pur essendo i magneti vicini a questi ultimi.

Induttanze statoriche

Le induttanze statoriche non sono costanti ma variano in funzione delle correnti di statore. Questo è dovuto alla saturazione magnetica dei lamierini ferromagnetici di rotore e di statore. La Fig. 1 illustra il tipico andamento non-lineare della caratteristica di magnetizzazione di un materiale ferromagnetico (flusso magnetico Φ che attraversa il materiale VS forza magnetomotrice \mathcal{F}).

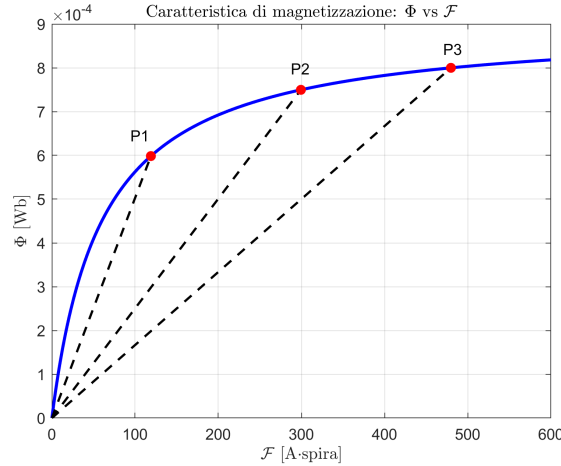


Figura 1: Caratteristica di magnetizzazione di un materiale ferromagnetico.

I punti P_1 , P_2 e P_3 rappresentano dei punti di lavoro differenti del materiale ferromagnetico. Supponendo che il flusso che attraversa il materiale ferromagnetico si autoconcateni interamente con la bobina che genera la forza magnetomotrice, l'induttanza della bobina si può esprimere come:

$$L = N\Phi/i \quad (7)$$

dove i è la corrente che attraversa la bobina ed N è il numero di spire della bobina. Sapendo che $\mathcal{F} = Ni$, la relazione precedente può essere riscritta come segue:

$$L = N^2\Phi/\mathcal{F} \quad (8)$$

Si noti che Φ/\mathcal{F} rappresenta la pendenza della retta che passa per l'origine ed il punto di lavoro (retta di lavoro) sulla caratteristica di magnetizzazione. Pertanto, come si può osservare dalla figura, all'aumentare di \mathcal{F} (ossia di i), la pendenza della retta di lavoro diminuisce e quindi si riduce anche l'induttanza della bobina. Quindi $L = L(i)$. Si può anche notare come, per bassi valori di \mathcal{F} , la pendenza della caratteristica di magnetizzazione (e di conseguenza di quella della retta di lavoro) è elevata e resta all'incirca costante. In quel particolare range di lavoro, l'induttanza resta costante e la macchina si dice non satura.

Per quanto riguarda adesso le induttanze statoriche, bisogna considerare che i lamierini ferromagnetici attraversati dal flusso prodotto dall'avvolgimento di asse d sono anche attraversati dal flusso prodotto dall'avvolgimento di asse q e viceversa. Questo produce un fenomeno noto come cross-saturazione magnetica, per cui le induttanze di asse d e q sono funzioni non-lineari di entrambe le correnti d e q:

$$\begin{aligned} L_d &= L_d(i_d, i_q) \\ L_q &= L_q(i_d, i_q) \end{aligned} \tag{9}$$