

Compensazione offset trasduttori di posizione in azionamenti sincroni a magneti permanenti

Elia Brescia

Dicembre 2025

Idealmente, quando l'asse d del rotore di un PMSM è allineato con l'asse della fase A di statore, il trasduttore di posizione dovrebbe fornire un angolo meccanico che, moltiplicato per il numero di coppie polari, sia 0° o un multiplo intero di 360° gradi elettrici. Tuttavia, risulta difficile garantire questa precisa condizione in fase di installazione del trasduttore. Inoltre, durante il funzionamento del motore, a causa di vibrazioni e forti decelerazioni/decelerazioni, potrebbero verificarsi slittamenti reciproci tra il rotore e la parte rotante del trasduttore di posizione. A causa di queste problematiche, vi è un errore di misura statico, definito comunemente offset. La misura dell'angolo elettrico non compensata può pertanto essere espressa come segue:

$$\theta_{rm} = \theta_r + \theta_{offset} \quad (1)$$

dove θ_r rappresenta l'angolo elettrico effettivo del rotore, ossia l'angolo tra l'asse d e l'asse della fase A, mentre θ_{offset} è l'offset elettrico di misura. Si noti che θ_{rm} rappresenta l'angolo elettrico noto all'unità di controllo ottenuto moltiplicando la misura meccanica grezza fornita dal sensore per il numero di coppie polari.

Qualora fosse utilizzata questa misura non compensata della posizione per effettuare le trasformazioni di coordinate, l'azionamento non sarebbe in grado di effettuare precisamente il controllo MTPA, con conseguente riduzione dell'efficienza e del carico massimo supportabile dal motore. Sono state pertanto sviluppate diverse tecniche per compensare questo offset con routine automatiche da implementare periodicamente. Vi sono due aspetti importanti nel design di queste routine: il primo è quello di garantire la loro applicazione senza strumentazione aggiuntiva, sfruttando soltanto i componenti di base dell'azionamento; il secondo è minimizzare i tempi di esecuzione dei test.

Si presenta di seguito una semplice procedura di compensazione dell'offset. Osserviamo innanzitutto che, se fossimo in grado di allineare perfettamente l'asse d con l'asse della fase A, risulterebbe:

$$\theta_{rm} = \theta_{offset} \quad (2)$$

Ossia, in questa condizione leggeremmo una misura dell'angolo elettrico esattamente pari all'offset. Noto quest'offset, potremmo compensarlo digitalmente come segue:

$$\theta_{rm}^c = \theta_{rm} - \theta_{offset} \quad (3)$$

Si noti che, sostituendo la (1) nella (3), si ottiene:

$$\theta_{rm}^c = \theta_r + \theta_{offset} - \theta_{offset} = \theta_r \quad (4)$$

In tal caso riusciremmo quindi ad ottenere una misura della posizione del motore senza errori. Tuttavia, allineare perfettamente il rotore con la fase A non è possibile a causa della presenza di attriti statici e di limiti nella corrente erogabile dall'inverter durante il test. Se infatti utilizzassimo ad esempio il controllo I-F imponendo un angolo costante $\theta_{IF}=0$ ed una corrente di asse d pari ad I^* , si genererebbe un campo magnetico di statore allineato con l'asse della fase A e la seguente coppia di allineamento:

$$C_e = -K_e I^* \sin(\theta_r) \quad (5)$$

Questa condizione di funzionamento è illustrata in Fig. 1. Supponendo di essere a regime, a velocità nulla (la velocità a regime è nulla in quanto l'angolo θ_{IF} è costante), l'equazione di equilibrio delle coppie è la seguente:

$$-K_e I^* \sin(\theta_r) - C_s \text{sign}(C_e) = 0 \quad (6)$$

dove C_s è la coppia di attrito statico. Considerando la condizione di Fig.1 di posizionamento da sinistra, l'angolo θ_r ottenuto sarebbe dunque:

$$\theta_r = -\arcsin \frac{C_s}{K_e I^*} \quad (7)$$

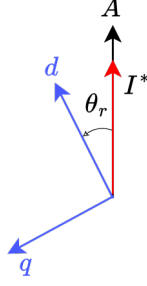


Figura 1: Diagramma vettoriale del motore durante il controllo I-F. Posizionamento da sinistra.

Dunque, come si può notare, sfruttando questa tecnica, il rotore non riuscirebbe ad allinearsi perfettamente con l'asse d ma vi sarebbe uno scostamento θ_r che dipende da parametri caratteristici del motore e dalla corrente erogata. Si potrebbe in teoria aumentare la corrente per minimizzare questo scostamento ma purtroppo la corrente erogabile dal convertitore è limitata.

Per eliminare questo errore di posizionamento allora si può ricorrere alla seguente strategia:

- Step 1: Si impone inizialmente un angolo $\theta_{IF} > 0$ per far partire il rotore "da sinistra" rispetto all'asse della fase A.
- Step 2: Si riduce gradualmente θ_{IF} fino a raggiungere $\theta_{IF} = 0$ e si registra l'angolo $\theta' = \theta_{rm}$ ottenuto in questa condizione. Si tenga conto che in questa situazione l'angolo θ' vale:

$$\theta' = \theta_r + \theta_{offset} = -\arcsin \frac{C_s}{K_c I^*} + \theta_{offset} \quad (8)$$

Questa particolare condizione è la stessa illustrata in Fig. 1.

- Step 3: Si impone adesso un $\theta_{IF} < 0$ per far partire il rotore "da destra" rispetto all'asse della fase A.
- Step 4: Si aumenta gradualmente θ_{IF} fino a raggiungere $\theta_{IF} = 0$ e si registra l'angolo $\theta'' = \theta_{rm}$ ottenuto in questa condizione. Si tenga conto che in questa situazione l'angolo θ'' vale:

$$\theta'' = \theta_r + \theta_{offset} = \arcsin \frac{C_s}{K_c I^*} + \theta_{offset} \quad (9)$$

Quest'altra condizione è illustrata in Fig. 2.

- Step 5: Si ottiene l'offset mediando i due angoli θ' e θ'' :

$$\frac{\theta' + \theta''}{2} = \frac{\arcsin \frac{C_s}{K_c I^*} + \theta_{offset} - \arcsin \frac{C_s}{K_c I^*} + \theta_{offset}}{2} = \theta_{offset} \quad (10)$$

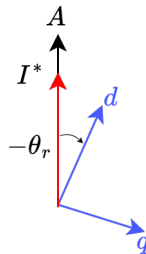


Figura 2: Diagramma vettoriale del motore durante il controllo I-F. Posizionamento da destra.