Controllo di coppia in anello aperto del PMSM

Elia Brescia

November 2025

Si vuole effettuare il design di un regolatore di coppia in anello aperto del PMSM.

Supponendo che il PMSM sia isotropo e si voglia effettuare un controllo di tipo MTPA (Maximum Torque per Ampere), le specifiche per il design del regolatore sono le seguenti:

$$\begin{aligned} i_d(\infty) &= 0 \\ C_e(\infty) &= C_e^* \end{aligned} \tag{1}$$

dove C_e^* rappresenta la coppia desiderata. Si noti che sono state soltanto assegnate delle specifiche a regime ($t \to \infty$), mentre nulla viene specificato sulle prestazioni dinamiche.

Il problema del design del regolatore consiste nel progettare le due tensioni di riferimento v_{sd}^* e v_{sq}^* che devono essere attuate dal convertitore e applicate al motore per conseguire le specifiche assegnate. Questo problema verrà affrontato sotto le seguenti ipotesi:

1. Convertitore ideale: il convertitore di potenza è istantaneo e non introduce distorsioni delle tensioni di riferimento:

$$\begin{aligned} v_{sd}(t) &= v_{sd}^*(t) \\ v_{sq}(t) &= v_{sq}^*(t) \end{aligned} \tag{2}$$

2. Assenza di ritardi: Il controllore è tempo-continuo e non introduce ritardi nell'implemementazione dell'azione di controllo

3. Misure e stime ideali: I parametri del motore e la coppia di carico sono noti senza errore, non vi sono errori nelle misure di velocità e corrente. Si suppone inoltre che i parametri del motore cono costanti.

$$\begin{aligned} \hat{L}_d &= L_d \\ \hat{L}_q &= L_q \\ \hat{R}_s &= R_s \\ \hat{\psi}_{pm} &= \psi_{pm} \\ \hat{C}_r &= C_r \\ i_d^m &= i_d \\ i_q^m &= i_q \\ \omega_r^m &= \omega_r \end{aligned} \tag{3}$$

dove i_d^m, i_q^m, ω_r^m rappresentano le grandezze misurate.

Partiamo dunque con il problema di determinare la tensione v_{sd}^* al fine di soddisfare la specifica $i_d(\infty) = 0$. Consideriamo l'equazione di asse d a regime:

$$v_{sd} = R_s i_d - \omega_r L_q i_q \tag{4}$$

Dovendo essere $i_d = 0$, sostituendo questa condizione nell'equazione precedente, si ottiene:

$$v_{sd} = -\omega_r L_q i_q \tag{5}$$

Sfruttando ora le ipotesi di idealità del convertitore e assenza dei ritardi, si ottiene $v_{sd}^* = v_{sd} = -\omega_r L_q i_q$. Applicando ora l'ipotesi di misure e stime ideali si ottiene infine:

$$v_{sd}^* = -\omega_r^m \hat{L}_q i_q^m \tag{6}$$

Ora determiniamo la tensione v_{sq}^* al fine di soddisfare la specifica $C_e(\infty) = C_e^*$. Consideriamo l'equazione di asse q a regime:

$$v_{sq} = R_s i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_{pm} \tag{7}$$

Sapendo che la corrente di asse q che compare in questa equazione è legata staticamente alla coppia elettromagnetica dalla relazione $i_q = C_e/K_c$, sostituendo ottengo:

$$v_{sq} = R_s C_e/K_c + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_{pm} \tag{8}$$

Sostituendo adesso la specifica $C_e = C_e^*$:

$$v_{sq} = R_s C_e^*/K_c + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_{pm} \tag{9}$$

Sfruttando le ipotesi di idealità del convertitore, assenza dei ritardi e di idealità delle stime e misure, si giunge alla seguente espressione per la tensione cercata:

$$v_{sq}^* = \hat{R}_s C_e^*/\hat{K}_c + \omega_r^m \hat{L}_d i_d^m + \omega_r^m \hat{\psi}_{pm} \tag{10}$$