

TRACCIA SOLUZIONE

Compito di Azionamenti Elettrici 03 Febbraio 2015

TEMPO A DISPOSIZIONE 90 min.

Esercizi voto = somma del punteggio acquisito in ciascuna risposte (errori concettuali annullano il punteggio della risposta)

Per la realizzazione di un azionamento elettrico si fa uso di un motore sincrono trifase a magneti permanenti con rotore isotropo alimentato da un invertitore di tensione a PWM con frequenza di modulazione di 16 kHz.

1) (7 punti) Ricavare i parametri p , R , L , Λ_{mg} del motore sincrono a magneti permanenti.

Preliminarmente si fanno le seguenti misure sul motore (che si assume con le fasi collegate a stella) che portano ai risultati riportati:

a) misura volt-amperometrica in corrente continua: applicando 6 V fra due morsetti del motore fermo si misura una corrente di 5 A.

La resistenza è misurata secondo lo schema in Figura 1:

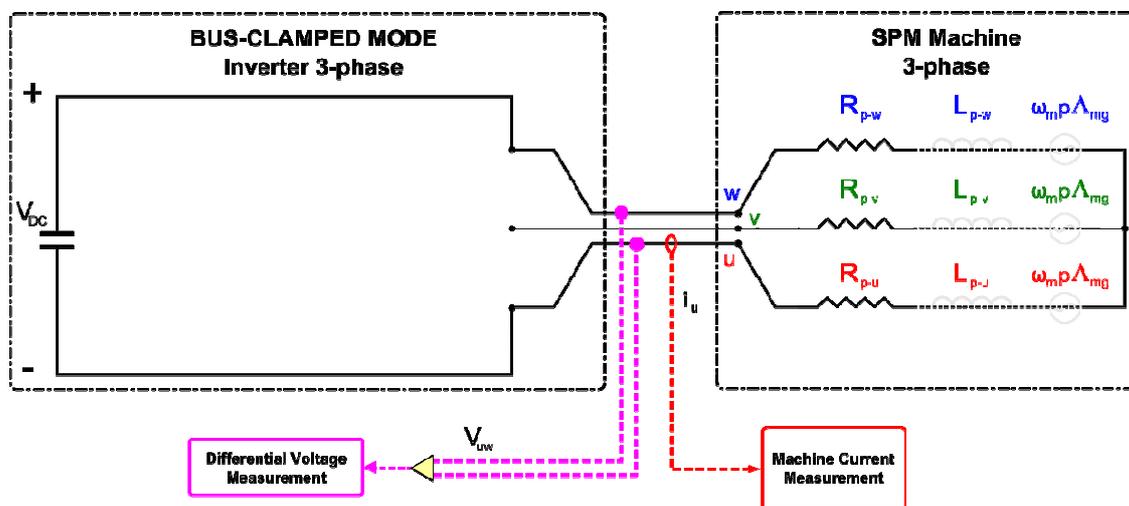


Figura 1 Schema collegamento per la misura della resistenza.

$$R_{mis} = 2R_p = \frac{6V}{5A} = 1.2\Omega$$

$$R_p = \frac{R_{mis}}{2} = 0.6\Omega$$

b) misura a vuoto: il motore viene trascinato con un motore asincrono a 4 poli connesso alla rete di distribuzione a 50 Hz, mentre i suoi morsetti sono aperti. Fra ciascuna coppia dei morsetti si rileva con un oscilloscopio una tensione sinusoidale di ampiezza (valore di picco) pari a 156 V e di periodo pari a 13.4 ms.

La frequenza delle tensioni rilevate è l'inverso del periodo

Autore: Ph.D. Ing. Mattia Morandin

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.0134s} = 74.63 \text{ Hz}$$

Per tanto la pulsazione elettrica corrisponde a:

$$\Omega_{me} = \Omega = 2\pi f = p\Omega_m = 468.9 \text{ rad/s}$$

Non è dato con precisione Ω_m , ma essendo il motore che trascina quello in prova un asincrono a 4 poli ($p=2$) alimentato a 50 Hz, la sua velocità sarà leggermente inferiore di quella a vuoto che risulta:

$$n_0 = \frac{60f}{p} = \frac{60f_{rete}}{p} = 1500 \text{ rpm}$$

ovvero

$$\Omega_{m_0} = 2\pi \frac{n_0}{60} = 2\pi \frac{f_{rete}}{p} = 157.1 \text{ rad/s}$$

Allora per il sincro in prova

$$p \cong \frac{\Omega_{me}}{\Omega_{m_0}} = \frac{468.9 \text{ rad/s}}{157.1 \text{ rad/s}} = 2.98$$

Non può che essere $p=3$, ossia numero di poli=6.

(ed allora a ritroso, ma non serviva per il compito, $\Omega_m = \Omega_{me}/p = 156.3 \text{ rad/s}$, $n = 1493 \text{ rpm}$, invece di 1500 rpm supposti imponendo scorrimento nullo, che è in realtà $s=0.47\%$).

Il flusso dei magneti risulta quindi:

$$\Lambda_{mg} = \frac{V_p}{\Omega_{me}} = \frac{\frac{V_{pp}}{\sqrt{3}}}{2\pi f_{me}} = \frac{\frac{156V}{\sqrt{3}}}{2\pi * 74.63\text{Hz}} = 0.192 \text{ Vs}$$

- c) misura a carico: il motore viene trascinato con lo stesso motore asincrono connesso a rete mentre i suoi morsetti sono connessi ad una stella di resistori identici di 10Ω ciascuno. In ciascuna delle fasi si misura con una pinza amperometrica connessa ad un oscilloscopio una corrente sinusoidale di ampiezza (**valore di picco**) pari a 6.8 A e di **periodo** pari a 13.9 ms.

La frequenza delle correnti rilevate è:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.0139s} = 71.94 \text{ Hz}$$

Per tanto la pulsazione elettrica corrisponde a:

$$\Omega_{me} = 2\pi f = p\Omega_m = 452.0 \text{ rad/s}$$

(ed anche, ma non serve per il compito, $\Omega_m = \Omega_{me}/p = 150.7 \text{ rad/s}$, $n = 1439 \text{ rpm}$).

Lo schema di misura è riportato in Figura 2.

Autore: Ph.D. Ing. Mattia Morandin

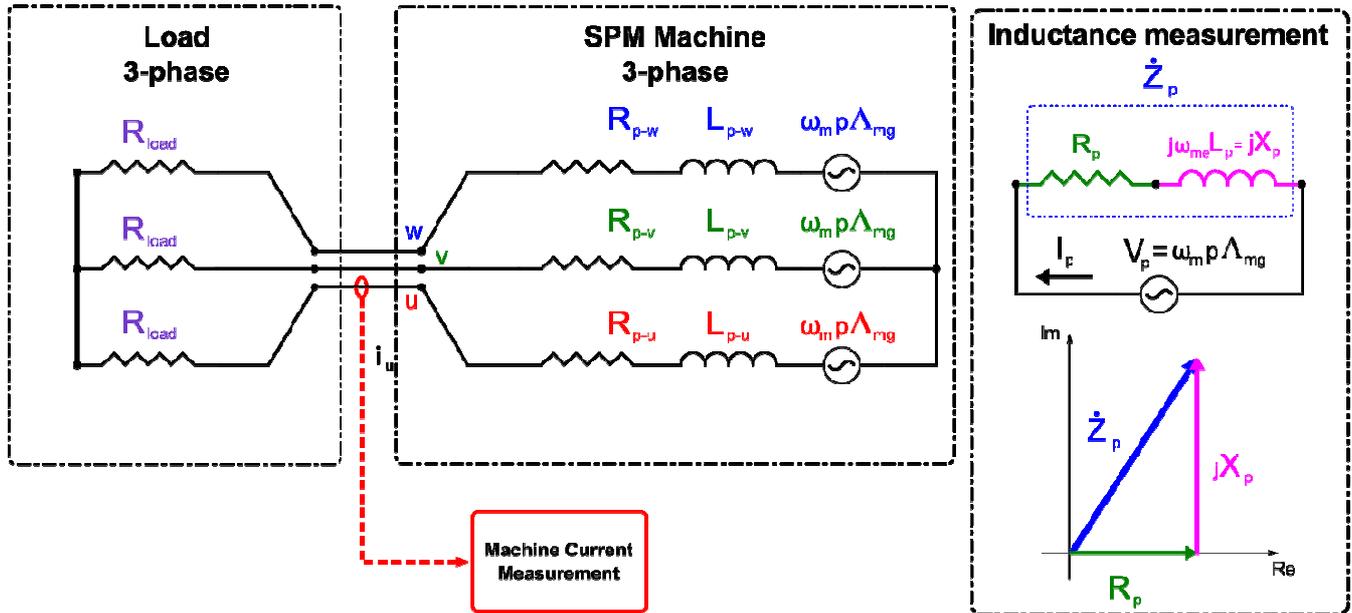


Figura 2 Schema collegamento per la misura dell'induttanza.

Per ricavare l'induttanza viene ricavata prima l'impedenza misurata:

$$Z = \frac{E_{rms}}{I_{rms}} = \frac{E_{pk}}{I_{pk}} = \frac{\Omega_{me} \Lambda_{mg}}{I_{pk}} = \frac{452 \text{ rad/s} * 0.192 \text{ Vs}}{6.8 \text{ A}} = \frac{86.79 \text{ V}}{6.8 \text{ A}} = 12.76 \Omega$$

Quindi l'induttanza è pari a:

$$L = \frac{X}{\Omega_{me}} = \frac{\sqrt{Z^2 - (R + R_{load})^2}}{\Omega_{me}} = \frac{\sqrt{(12.76 \Omega)^2 - (0.6 \Omega + 10 \Omega)^2}}{452 \text{ rad/s}} = \frac{7.11 \Omega}{452 \text{ rad/s}} = 15.7 \text{ mH}$$

L'invertitore di tensione è capace di erogare continuamente 4.2 A efficaci con una tensione concatenata sinusoidale in uscita (componente fondamentale) fino a 360 V efficaci.

2) (6 punti) Ricavare la velocità base e la coppia base dell'azionamento.

La velocità base del motore è data dalla seguente espressione:

$$\Omega_B = \frac{U_N}{\sqrt{\Lambda_{mg}^2 + (L I_N)^2}} = \frac{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} 360 \text{ V}}{\sqrt{(0.192 \text{ Vs})^2 + (15.7 \text{ mH} * \sqrt{2} * 4.2 \text{ A})^2}} = 1380 \text{ rad/s}$$

che corrisponde a:

$$n_B = \frac{\Omega_B}{p} \frac{60}{2\pi} = 4392 \text{ rpm}$$

Essendo un motore Isotropo a magneti permanenti (SPM) si suppone di controllarlo in MTPA in modo da poter estrarre la maggior coppia a parità di corrente erogata dall'inverter.

La coppia base risulta quindi:

Autore: Ph.D. Ing. Mattia Morandin

$$T_B = \frac{3}{2} p \Lambda_{mg} I_{qB} = \frac{3}{2} * 3 * (0.192Vs) * (\sqrt{2} * 4.2A) = 5.13Nm$$

Assumendo ideali i trasduttori di corrente e scegliendo un appropriato schema di controllo sincrono delle correnti:

3) (6 punti) Progettare i blocchi componenti lo schema di controllo di corrente di asse d e q per ottenere le seguenti specifiche, che devono essere soddisfatte per qualsiasi carico meccanico avente momento di inerzia fra $1 \cdot 10^{-3}$ e $2 \cdot 10^{-3}$ Kgm², coefficiente di attrito viscoso fra 0 e $5 \cdot 10^{-3}$ Nms, coppia di disturbo fra -3 e +3 Nm:

- a) banda passante circa 300 Hz
- b) margine di fase non inferiore a 60°
- c) errore a regime ad ingresso costante pari a zero.

Il testo della domanda suggerisce di impiegare la compensazione della f.e.m. così da rendere indipendente il comportamento dell'anello di corrente q (ovvero il progetto del suo regolatore) dai parametri meccanici. Per semplicità di progetto si utilizzerà anche il disaccoppiamento degli assi.

Allora i due anelli di corrente asse d e di asse q sono identici e rappresentati dagli schema a blocchi in Figura 3 e Figura 4 rispettivamente.

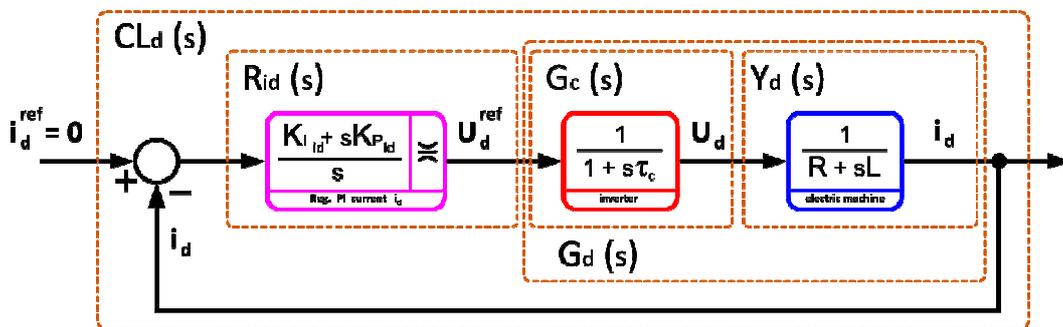


Figura 3 Schema a blocchi anello di corrente asse d.

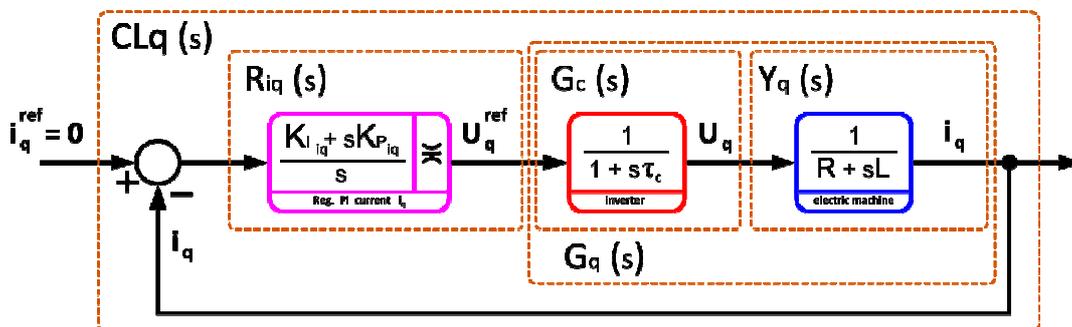


Figura 4 Schema a blocchi anello di corrente asse q.

ove U_d^{ref} e U_q^{ref} sono i riferimenti di tensione al netto dei contributi di compensazione e disaccoppiamento. Possiamo procedere con il calcolo delle costanti di tempo presenti negli schemi a blocchi:

- costante di tempo elettrica (color nero nella Figura 5 sotto)

$$\tau_e = \frac{L}{R} = 26.1ms \quad \left(\frac{1}{\tau_e} = 38 \text{ rad/s} \rightarrow 6.05\text{Hz} \right)$$

Autore: Ph.D. Ing. Mattia Morandin

- costante di tempo dell'inverter (color ciano nella Figura 5 sotto)

$$\tau_c = \frac{T_{sw}}{2} = 31.25\mu s \quad \left(\frac{1}{\tau_c} = 32.000 \text{ rad/s} \rightarrow 5093\text{Hz} \right)$$

Come si vede non incidono i parametri del carico meccanico.

Si decide di adottare un regolatore PI per soddisfare le specifiche di errore nullo regime.

Impongo $\tau_{REG_I} = \tau_e$ e la banda passante dell'anello di corrente $V_I = 2\pi * 300\text{Hz} = 1885 \text{ rad/s}$.

Imponendo il passaggio a 0 dB (modulo=1) alla GH(s=j1885) di Figura 4 ne risulta (arrotondando):

$$K_{P-id,q} = 32$$

$$K_{I-id,q} = 1222$$

Il margine di fase è maggiore di 60° (circa 90°) come si può vedere dal diagramma di Bode riportato in Figura 5 che è uguale ovviamente per i due anelli di corrente.

In alternativa si può calcolare τ_{REG_I} imponendo il margine di fase (per esempio esattamente 60°) e poi si procede come prima (con risultati leggermente diversi ma ugualmente validi).

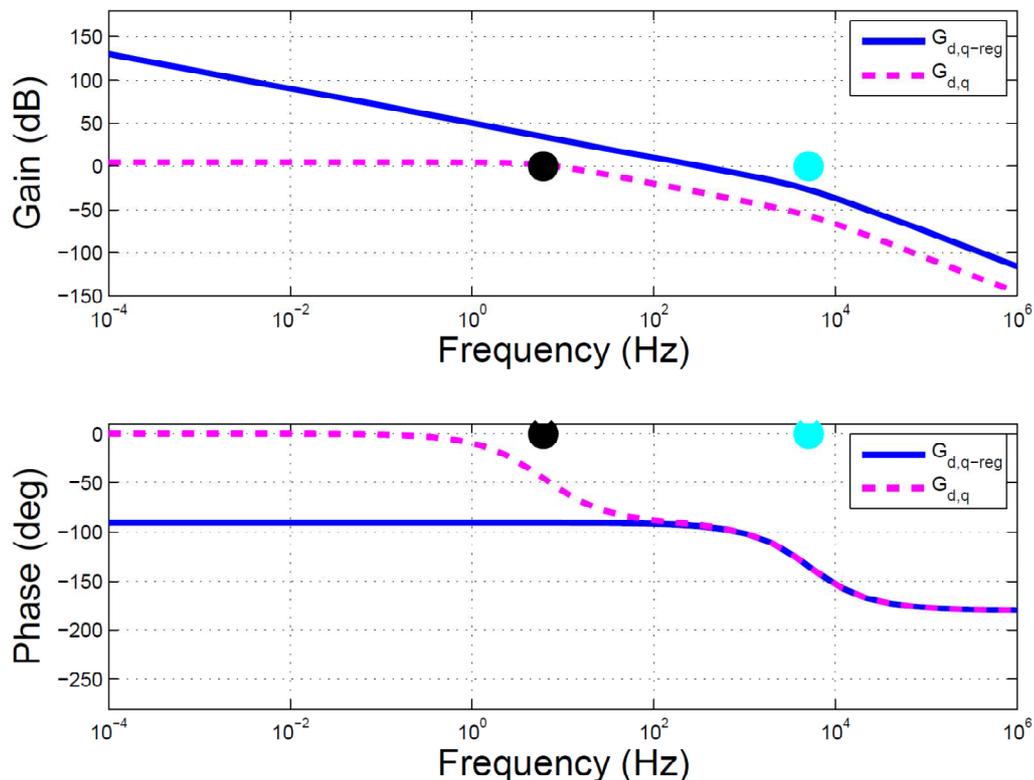


Figura 5 Diagramma di Bode anello di corrente asse d e q, con compensazione della f.e.m. e disaccoppiamento degli assi.

Infine

- 4) (7 punti) Si disegni l'anello di velocità e si progetti un regolatore della famiglia PID in modo da avere, con le variabilità del carico meccanico sopra esposto:

- a) banda passante **non inferiore** a 30 Hz

Autore: Ph.D. Ing. Mattia Morandin

- b) margine di fase **non inferiore a 45°**
- c) errore a regime ad ingresso costante pari a zero.

Lo schema a blocchi dell'anello di velocità è riportato in Figura 6

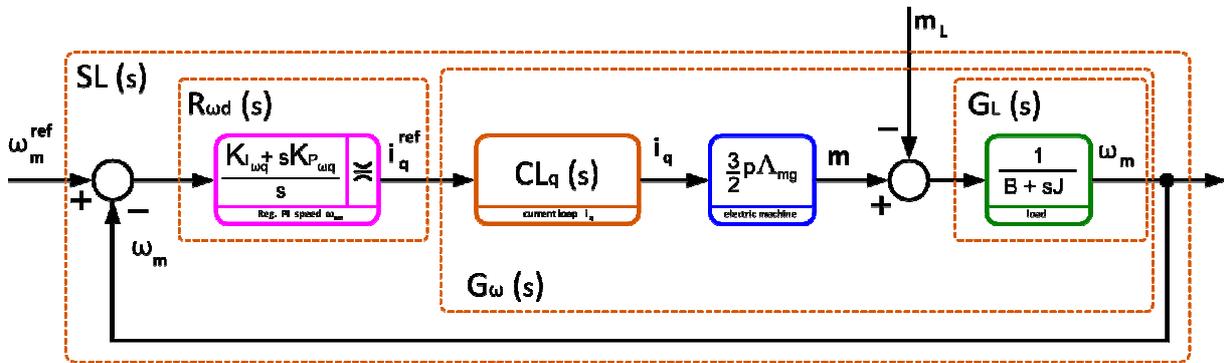


Figura 6 Schema a blocchi anello di velocità.

Si suppone di adottare un regolatore PI per soddisfare le specifiche di errore nullo a regime quando B è non nullo e per la possibile presenza della coppia di disturbo (*altrimenti basterebbe un regolatore di tipo P*).

La coppia di disturbo non influenza il progetto del regolatore che è basato sulle caratteristiche dinamiche (guadagni, poli e zeri) di GH.

$$\text{La fdt } CL_q(s) = 1/[(1+s/1885)(1+s/3200)]$$

(NB si potrebbe ignorare il polo a frequenza più alta senza apprezzabili errori)

La fdt $G_L(s)$ varia con i parametri del carico meccanico. Il suo polo vale $p = 1/\tau_m = B/J = 0\div 5$ comunque sempre molto minore della frequenza di attraversamento richiesta (banda passante) che è:

banda passante dell'anello di velocità $V_{\omega} = 2\pi * 30\text{Hz} = 188 \text{ rad/s}$ (cioè circa un decimo di V_I)

Ciò vuol dire che il polo della $G_L(s)$ incide poco sul progetto del regolatori e lo si può mettere dove si vuole, per esempio a zero (carico solo inerziale: $G_L(s) = 1/(sJ)$).

Assumendo allora di scegliere il caso di $B = 0 \text{ Nms}$ e $J = 2 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$ e imponendo $\tau_{REG\omega} = 10/V_{\omega}$ cioè lo zero del regolatore ad un decimo della frequenza di attraversamento, come quest'ultima è rispetto a V_I , ne risulta:

$$K_{P-\omega} = 0.49$$

$$K_{I-\omega} = 9.2$$

Il margine di fase è maggiore di 45° (circa 80°) alla frequenza di attraversamento di 30Hz come si può vedere dal diagramma di Bode riportato in Figura 7.

Quando il valore di J si riduce a $1 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$ il guadagno della $G_L(s)$ si raddoppia (è pari ad $1/J$) e con esso anche la banda passante (frequenza di attraversamento) soddisfacendo comunque sempre le specifiche.

Il margine di fase praticamente non cambia nei due casi.

Autore: Ph.D. Ing. Mattia Morandin

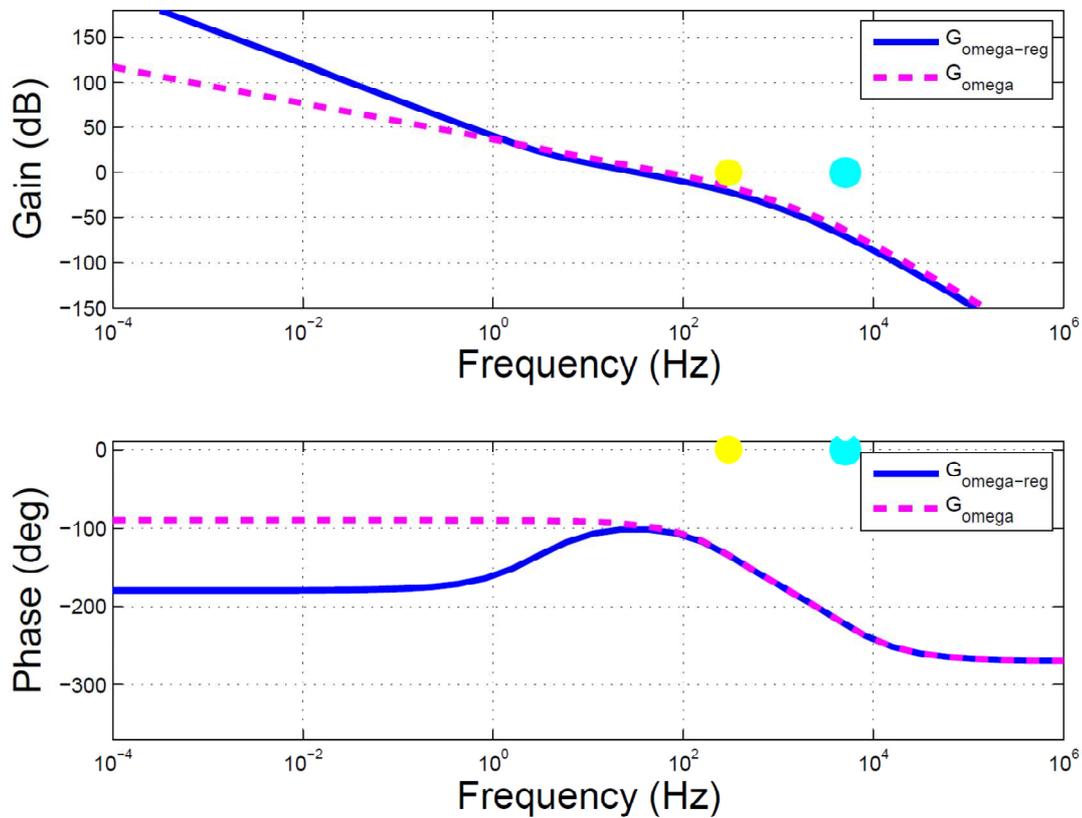


Figura 7 Diagramma di Bode anello di corrente asse d e q, con compensazione della f.e.m. e disaccoppiamento degli'assi.

Si assumano, durante l'elaborazione, i necessari eventuali dati integrativi compatibili con quelli assegnati e con le ipotesi progettuali che si intendono seguire.

Per lo svolgimento si può far uso del calcolatore e solo delle dispense del corso e dei propri appunti manoscritti.

NB provare a riprogettare l'anello di velocità con $B=B_{\max}$ e tracciare i diagrammi di Bode per diversi valori di B e J.