Progetto degli anelli di corrente

I. Esercizio 1

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 PWM con frequenza di modulazione di 20 [kHz].

A. *Ricavare i parametri p, R, L, Λ_{mg} del motore sincrono a magneti permanenti*

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

1) Misura volt-amperometrica in corrente continua: applicando 2 [V] tra due morsetti del motore fermo si misura una corrente di 25 [A]: La resistenza viene misurata secondo lo schema di Figura 1 e puó essere calcolata come in (1).

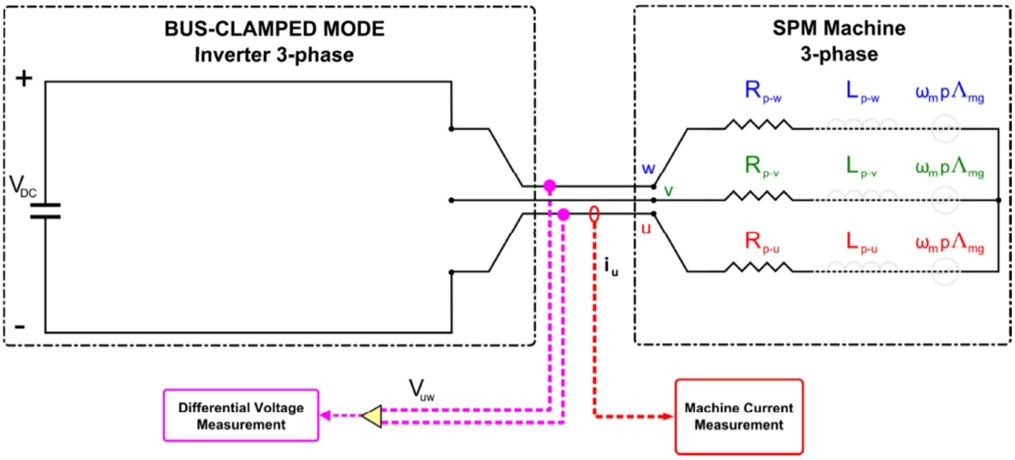


Fig. 1: Schema di collegamento per la misura della resistenza

$$\begin{aligned} R_{mis} &= 2R_p = \frac{2}{25} = 0.08\Omega \\ R_p &= \frac{R_{mis}}{2} = 0.04\Omega \end{aligned} \tag{1}$$

2) Misura a vuoto: il motore viene trascinato a 3000 [rpm] mentre i suoi morsetti sono aperti. Fra ciascuna coppia di morsetti si rileva con un oscilloscopio una tensione sinusoidale di ampiezza (valore di picco) pari a 307 [V] e di periodo pari a 10 [ms]: La frequenza delle tensioni rilevate é l'inverso del periodo 2

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10 \cdot 10^{-3}} = 100Hz \tag{2}$$

É possibile ricavare il numero di coppie polari come in (4).

$$p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 100}{3000} = 2 \tag{3}$$

La velocitá si puó tradurre da [rpm] a [rad/s] come

$$\Omega_{me} = \frac{60n}{2\pi} = \frac{603000}{2\pi} = 628.3rad/s \tag{4}$$

Il flusso dei magneti viene calcolato come in (5)

$$\Lambda_{mg} = \frac{V_p}{\Omega_{me}} = \frac{V_{pp}/\sqrt{3}}{\Omega_{me}} = \frac{307/\sqrt{3}}{628.3} = 0.282Vs \tag{5}$$

3) Misura a carico: il motore viene trascinato a 3000 [rpm] mentre i suoi morsetti sono connessi ad una stella di resistori identici di 0.8 $[\Omega]$. In ciascuna delle fasi si misura con una pinza amperometrica connessa ad un oscilloscopio una corrente sinusoidale di ampiezza (valore di picco) pari a 192.6 $[A]$ e di periodo pari a 10 $[ms]$: Lo schema di misura é riportato in Figura 2

Il valore dell'induttanza sincrona L puó essere ricavato dal modulo dell'impedenza totale come in (6)

$$\begin{aligned} Z &= \frac{E_{rms}}{I_{rms}} = \frac{E_{pk}}{I_{pk}} = \frac{\Omega_{me} \cdot \Lambda_{mg}}{I_{pk}} = \frac{628.3 \cdot 0.282}{192.6} = 0.92\Omega \\ L &= \frac{X}{\Omega_{me}} = \frac{\sqrt{Z^2 - (R + R_{load})^2}}{\Omega_{me}} = \frac{\sqrt{0.92^2 - (0.8 + 0.04)^2}}{628.3} = 0.6mH \end{aligned} \tag{6}$$

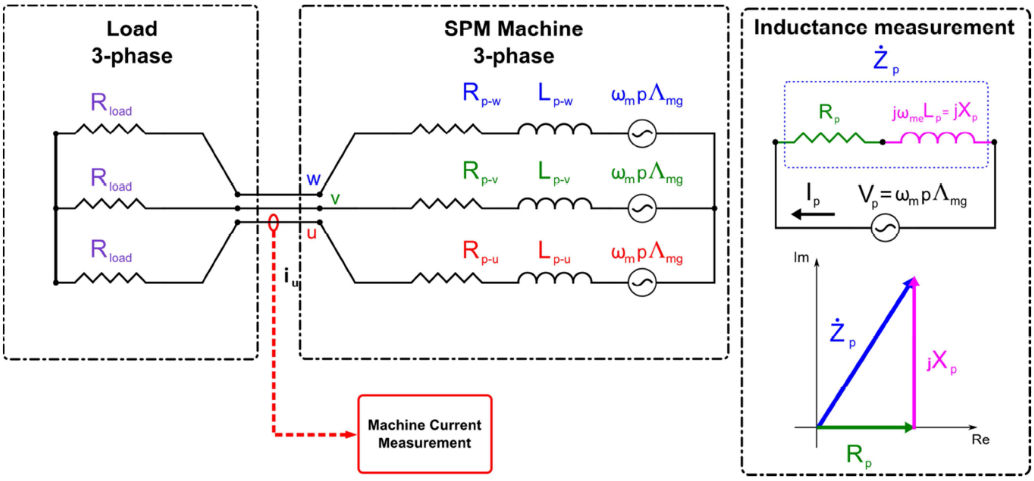


Fig. 2: Schema di collegamento per la misura di induttanza

B. L'invertitore di tensione é capace di erogare continuativamente 50 [A] efficaci con una tensione concatenata sinusoidale in uscita (componente fondamentale) fino a 350 [V] efficaci. Calcolare la velocitá base dell'azionamento e le potenze elettrica assorbita e meccanica all'albero a tale velocitá base sapendo che a questa velocitá la coppia disponibile é 60 [Nm].

La velocitá base del motore é calcolata in (7)

$$\Omega_{me}^{B} = \frac{U_N}{\sqrt{\Lambda_{mg}^2 + (L \cdot I_N)^2}} = \frac{350\sqrt{2}/\sqrt{3}}{\sqrt{0.282^2 + (0.6 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{2} \cdot 50)^2}} \simeq 1000 \frac{rad}{s} \tag{7}$$

La potenza meccanica all'albero puó essere calcolata come

$$P_{mecc} = \Omega_m^B M_N = \frac{\Omega_{me}^B M_N}{p} = \frac{1000 \cdot 60}{2} = 30kW \tag{8}$$

mentre quella elettrica assorbita é

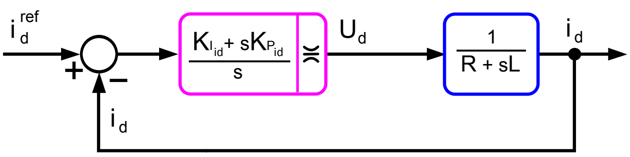
$$P_{el} = \frac{3}{2}(U_d I_d + U_q I_q) = \frac{3}{2} U_N I_N = \frac{3}{2} \frac{\sqrt{2} \cdot 350}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \cdot 50 = 30.29kW \tag{9}$$

dove si é tenuto conto che alla velocitá base $I_d = 0$ e che nel punto base si intersecano i limiti di corrente e tensione.

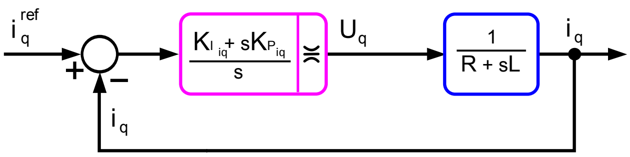
C. Trascurando i guadagni e i ritardi dell'inverter e dei trasduttori di corrente, tracciare lo schema di controllo delle correnti d e q con regolatori sincroni della famiglia dei PID (configurazione a scelta) e calcolare i guadagni dei regolatori di corrente prescelti per ottenere le specifiche seguenti, che devono essere soddisfatte per un carico meccanico con momento d'inerzia $J = 3\ kgm^2$ e coefficiente di attrito viscoso $B = 0.1\ Nms$:

- *unitari il guadagno dell'invertitore e dei trasduttori di corrente e trascurabili i relativi ritardi*
- *banda passante dell'anello di circa $200\ Hz$ e margine di fase non inferiore a $60°$*
- *errore a regime nullo ad ingresso costante.*

Si puó impiegare il disaccoppiamento degli assi e la compensazione della f.e.m. cosí da rendere indipendente il comportamento dell'anello di corrente q (ovvero il progetto del suo regolatore) dai parametri meccanici. In questo modo inoltre i due anelli di assi d e q sono identici e indipendenti l'uno dall'altro, come si evince dagli schemi a blocchi in Fig. 4.



(a) Asse d



(b) Asse q

Fig. 3: Schemi a blocchi degli anelli di corrente.

Possiamo procedere con il calcolo della costante di tempo elettrica

$$\tau_e = \frac{L}{R} = 15\ ms \quad (\frac{1}{\tau_e} = 67\ rad/s) \tag{10}$$

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

$$\tau_{REG} = \frac{k_P}{k_I} = \tau_e \tag{11}$$

e la banda passante dell'anello di corrente $\nu_A = 2\pi * 200\ Hz = 1257\ rad/s$. Eguagliando $|G(j1257)|$ a $0\ dB = 1$ si ottiene

$$k_P = 0.75$$
$$k_I = 50$$

Il margine di fase é maggiore di $60°$ (circa $90°$) come si puó vedere dal diagramma di Bode riportato in Fig. 3, che é uguale per i due anelli di corrente. In alternativa si puó calcolare τ_{REG} imponendo il margine di fase (per esempio esattamente $60°$) e poi si procede come prima (con risultati leggermente diversi ma ugualmente validi).

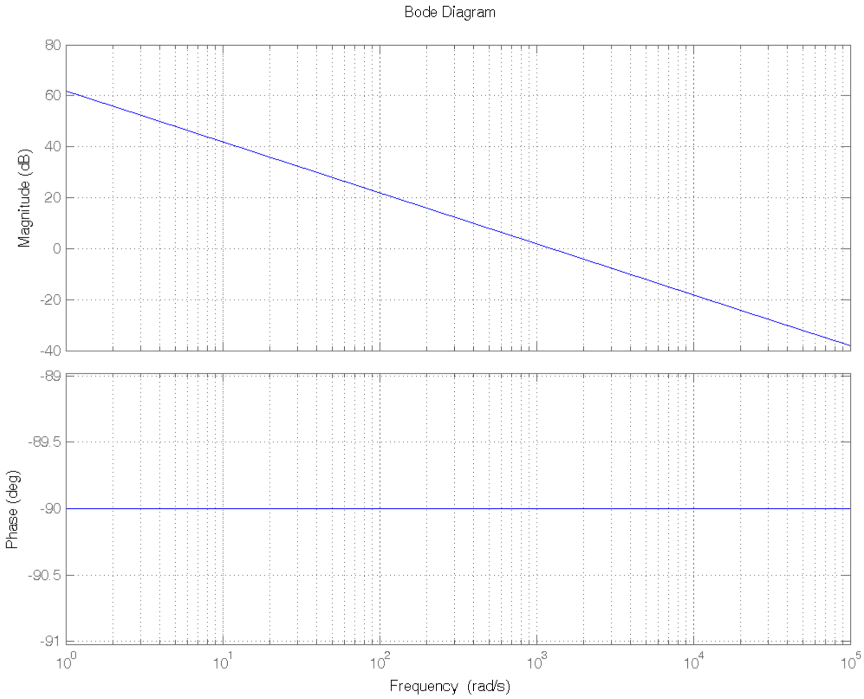


Fig. 4: Diagramma di Bode della fdt in catena aperta.

D. Calcolare i valori delle correnti d e q e le perdite joule del motore nel funzionamento a regime, con i parametri meccanici sopra definiti quando la velocitá é $1000\ rpm$*.*

Per prima cosa si puó notare che la velocitá é inferiore alla velocitá base dell'azionamento e quindi il motore lavora in MTPA. In questa condizione la corrente d é nulla, $I_d = 0$. Inoltre a regime l'equazione meccanica é

$$M = B\Omega_m \tag{12}$$

e la coppia si puó esprimere come

$$M = \frac{3}{2} p \Lambda_{mg} I_q \tag{13}$$

Combinando le due espressioni precedenti si trova

$$I_q = \frac{2\ B\ \Omega_m}{3\ p\ \Lambda_{mg}} = 12.37\ A \tag{14}$$

A partire dai valori di corrente appena trovati si calcolano le perdite joule come

$$P_{joule} = \frac{3}{2} R[I_d^2 + I_q^2] = \frac{3}{2} R I_q^2 = 9.18\ W \tag{15}$$