

MODELLO DINAMICO DI UN CENTRO DI LAVORO (II)

Metodi sperimentali d'identificazione dei principali parametri meccanici, elettrici e controllistici di un centro di lavoro a CN per la lavorazione del legno definiscono i valori dei parametri che permettono di validare il prototipo virtuale

CARATTERIZZAZIONE DEI SERVOMOTORI BRUSHLES

La misura della resistenza elettrica degli avvolgimenti è stata eseguita tra fase e fase con un ohmetro in grado di apprezzare il millesimo di Ohm, detraendo il contributo dovuto ai cavetti di collegamento.

Per la misura delle induttanze L_d è stato orientato, dapprima, il rotore del servomotore anisotropo secondo l'asse diretto 'd', alimentando in c.c. le fasi statoriche della connessione di figura 11-a; la stessa connessione è stata poi alimentata, come di seguito indicato, ai fini della misura.

La misura di L_q ha comportato, dapprima, il bloccaggio meccanico del rotore sull'asse 'd' e la successiva alimentazione delle fasi statoriche di figura 11-b, ai fini della misura, secondo le modalità di seguito indicate.

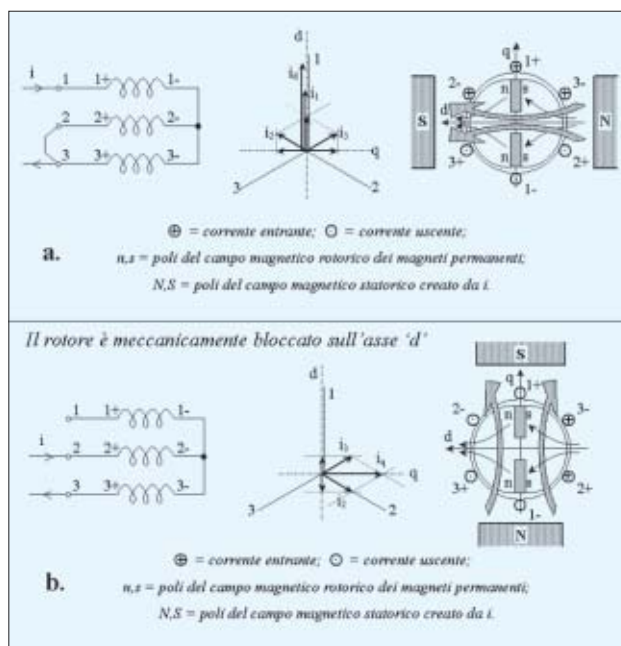
Una volta attuati l'orientamento e il bloccaggio citati, le misure vere e proprie sono state eseguite con due metodi, di seguito descritti, che hanno portato a risultati pressoché uguali.

La misura di L_d e L_q con un ponte RLC (1 kHz) [6] è il metodo più rapido. Consiste nell'alimentare le fasi statoriche di figura 11-a, ad orientamento rotorico sull'asse 'd' avvenuto, con una corrente (pochi milliAmpere) a 1000 Hz:

$$L_d = L_{1-(2,3)}/1,5.$$

Alimentando invece le fasi di figura 11-b si ricava

$$L_q = L_{2,3}/2.$$



11. Collegamenti per la misura delle induttanze L_d (a) e L_q (b).

Si osserva che il bloccaggio meccanico del rotore sull'asse 'd' non è imperativo, dato che i pochi mA che circolano nelle fasi di figura 11-b non sono sufficienti a creare la rotazione del rotore.

La misura di L_d e L_q tramite il transitorio di scarica della corrente [6] consiste nella valutazione, con oscilloscopio a memoria, della costante di tempo del transitorio di scarica della corrente c.c. che circola nei circuiti di figura 11

a seguito della relativa connessione in corto circuito.

Una volta dedotta la costante di tempo t , avendo a priori misurato la resistenza di ciascuna configurazione, si ricava:

$$L_d = L_{1,(2-3)} / 1,5 = \tau_{1,(2-3)} \cdot R_{1,(2-3)} / 1,5$$

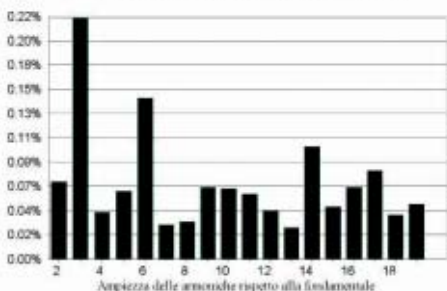
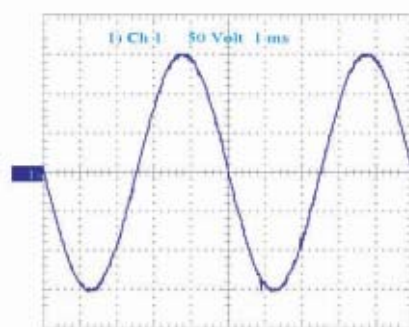
$$L_q = L_{2,3} / 2 = \tau_{2,3} \cdot R_{2,3} / 2$$

Rispetto al transitorio di carica, quello di scarica ha il pregio di prescindere sia dall'ondulazione dell'alimentatore a c.c. sia dalla sovraelongazione in corrente derivante dalla capacità parassita dell'avvolgimento.

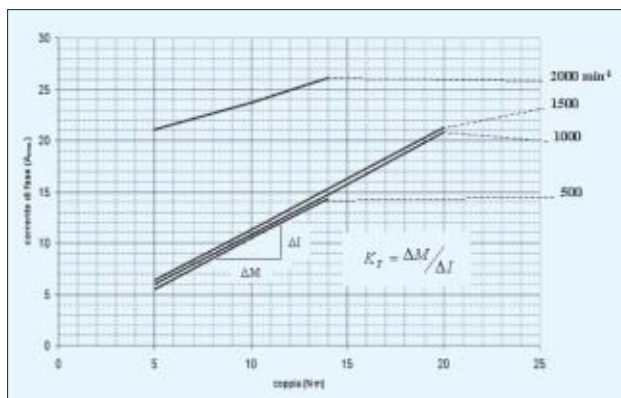
Per misurare il valore della costante elettrica $KE [V_{rms}/1000min^{-1}]$ si è trascinato meccanicamente ogni servomotore, caricato con tre resistenze da 50 k Ω -0,5W-1% connesse a stella, a diverse velocità, rilevando con oscilloscopio la tensione ai capi di ogni resistenza e mediandone il valore.

L'analisi armonica (figura 12) delle forme d'onda di f.c.e.m. così rilevate ha definito anche la qualità del servomotore.

Il valore della costante di coppia $KT [N \cdot m / A_{rms}]$ è stato dedotto calcolando la pendenza delle rette di figura 13 rilevate al banco freno con servomotore caldo.



12. Forza contro elettromotrice e sua scomposizione armonica.



13. Corrente assorbita in funzione della coppia resistente e della velocità del servomotore.

che quella di decelerazione, si sono annullati gli effetti degli attriti.

Per il calcolo dell'accelerazione si è considerato il tratto dove questa risulta costante. I valori numerici così ottenuti si scostano del 4 ÷ 5% da quelli effettivamente misurati con una bilancia.

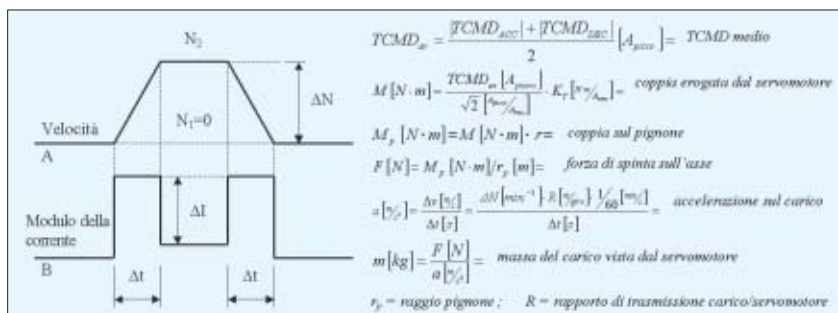
La deduzione sperimentale del momento di inerzia ridotto all'albero motore si è avvalsa del calcolo indicato in figura 15 basato sulla registrazione oscilloscopica della velocità e del comando di coppia durante l'accelerazione del motore.

Il risultato non risente dell'attrito di primo distacco, essendo la velocità iniziale diversa da zero. I reali andamenti di

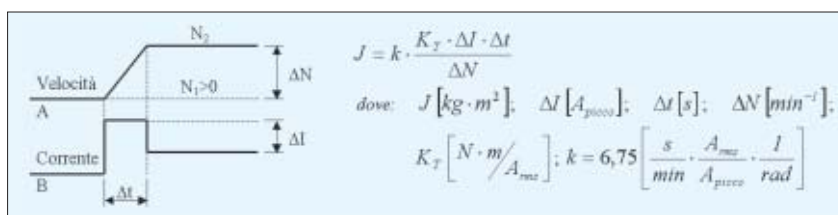
IDENTIFICAZIONE DI MASSE, INERZIE ED ATTRITI

La valutazione sperimentale delle masse si è basata sulla legge di Newton $m = F/a$.

Utilizzando il pacchetto software ServoGuide sono stati monitorati i segnali di comando di coppia, dal



14. Deduzione della massa di un asse macchina nell'ipotesi di trasmissione a pignone-cremagliera.



15. Deduzione del momento di inerzia in fase d'accelerazione.

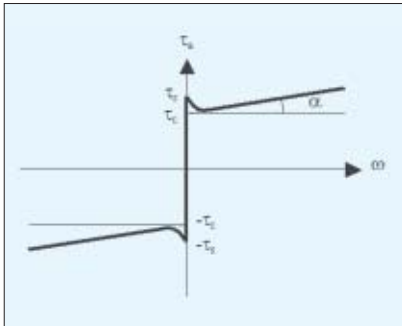
quale è stato possibile ricavare la forza F di spinta lungo l'asse, e di velocità, dal quale si è calcolata l'accelerazione a (figura 14). I grafici così ottenuti sono stati elaborati con il metodo dell'equivalenza delle aree per poter calcolare un valore numerico medio delle coppie di accelerazione e di decelerazione. Considerando tanto la fase d'accelerazione

velocità e corrente sono stati ricondotti a quelli di figura con il metodo dell'equivalenza delle aree.

L'attrito è stato modellizzato con la classica curva coppia/velocità di figura 16, evidenziante:

- la coppia di attrito di primo distacco τ_s ;

La relativa misura consiste nel rilevare, dopo il comando di avanzamen-



16. Curva caratteristica dell'attrito.

to, la coppia sviluppata dal servomotore nell'istante in cui il carico dell'asse inizia lo spostamento, trascurando il primo movimento dovuto al recupero dei giochi meccanici e dell'elasticità della trasmissione.

- il coefficiente di attrito viscoso $D = \tan(\alpha)$ che definisce la quota parte d'attrito proporzionale alla velocità; La relativa deduzione consiste nel: far muovere ciascun asse della macchina a diverse velocità, per tempi sufficienti ad esaurire i transitori iniziali, rilevando il corrispondente valore del comando di coppia; valutare la pendenza del grafico coppia (o corrente)/velocità conseguentemente deducibile.

- la coppia di attrito coulombiano τ_c : è identificabile con il valore di coppia attiva in corrispondenza dell'arresto del carico durante una fase di decelerazione. Questa stima implica un'incertezza se è assente il trasduttore di posizione posto direttamente sul carico; l'elasticità della meccanica non può essere considerata.

| TEST | PARAMETRO IN ESAME | PREIMPOSTAZIONI ⁽¹⁾ | SEGNALI CONSIDERATI |
|------|--------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| n° 1 | K_{pp} | $\alpha = 0$ | ERR; VCMD |
| n° 2 | α | | ERR; POSF ⁽²⁾ ; VCMD |
| n° 3 | K_{pv} | $K_{iv} = 0$; VLG = 1 | |
| n° 4 | K_{iv} | VLG = 1 | VCMD; TCMD |
| n° 5 | VLG | | |

Tabella 1: Sequenza d'identificazione della scalatura dei parametri di regolazione evidenziati in Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.

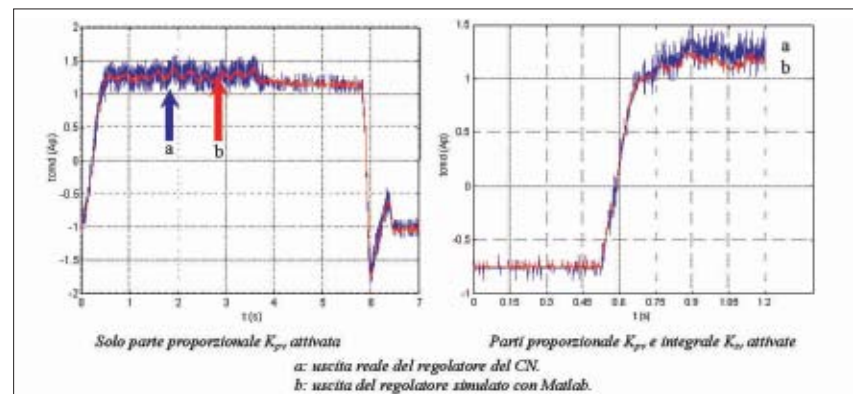
Identificazione dei parametri di regolazione di un asse

La sperimentazione ha mirato alla determinazione dei fattori di scalatura, dalle unità ingegneristiche del modello di figura 4 ai valori adimen-

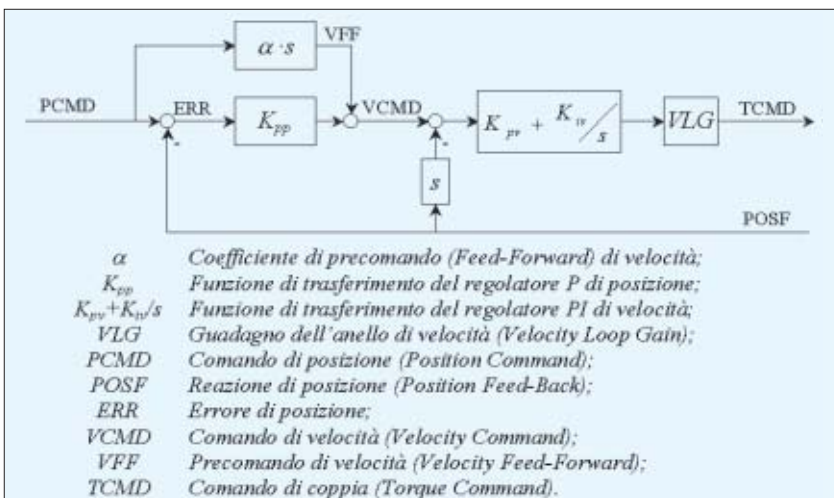
sionali del CN, dei parametri dei regolatori di posizione e di velocità di figura 17.

Sono stati utilizzati due pacchetti software.

Con ServoGuide, ad albero motore



18. Confronto tra il segnale di uscita del regolatore PI di velocità e la sua simulazione con Matlab.



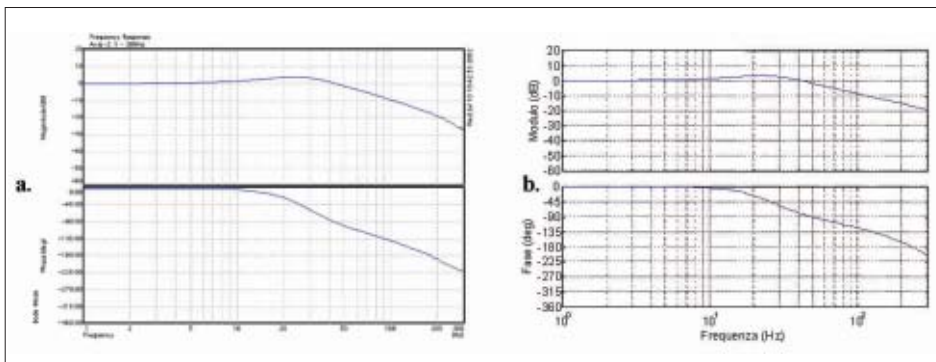
- α Coefficiente di precomando (Feed-Forward) di velocità;
- K_{pp} Funzione di trasferimento del regolatore P di posizione;
- $K_{pv} + K_{iv}/s$ Funzione di trasferimento del regolatore PI di velocità;
- VLG Guadagno dell'anello di velocità (Velocity Loop Gain);
- PCMD Comando di posizione (Position Command);
- POSF Reazione di posizione (Position Feed-Back);
- ERR Errore di posizione;
- VCMD Comando di velocità (Velocity Command);
- VFF Precomando di velocità (Velocity Feed-Forward);
- TCMD Comando di coppia (Torque Command).

17. Schema a blocchi dei regolatori di posizione e velocità integrati nel CN.

sconnesso dal carico, si sono monitorati e registrati in un file i segnali temporali di ingresso e di uscita dei regolatori di posizione e velocità durante un posizionamento con profilo trapezoidale di velocità (tabella 1). Con Matlab si sono importati tali segnali per confrontarli con quelli specifici del modello di figura 17 simulato in Matlab.

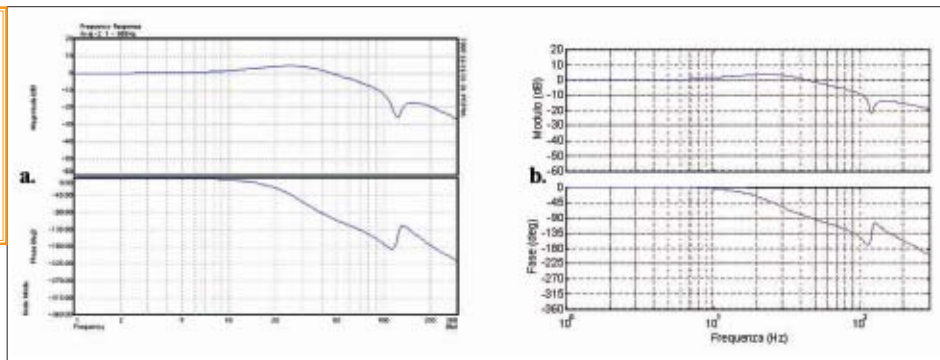
La figura 18 mostra un esempio di comparazione: i fattori di scalatura che ha permesso di dedurre sono stati confermati anche dal confronto delle risposte frequenziali riportate in figura 19.

A valle del segnale TCMD di figura 17 può essere inserita una catena configurabile di filtri antirisonanza (un



19. Confronto tra i diagrammi di Bode di ServoGuide (a) e di Matlab (b) relativi alla funzione di trasferimento del servomotore sconnesso dal carico.

20. Confronto grafico tra ServoGuide (a) e Matlab (b) della risposta in frequenza con il filtro arresta banda (notch) inserito a 120 Hz, con larghezza di banda pari a 20 Hz.



passa basso e quattro arresta banda). La relativa identificazione sperimentale si è sviluppata in due fasi. Nella prima è stato eseguito, con servomotore ad albero libero, il rilievo della risposta frequenziale, con ServoGuide, dell'anello di velocità comprendente in un caso un filtro arresta banda ed in un altro il filtro passa basso. Nella seconda fase si è implementato, in ambiente Matlab, il calcolo delle stesse risposte frequenziali,

procedendo poi al confronto dei risultati (figura 20). Rispetto a quanto documentato da GE Fanuc, è stato così additionally appurato che: a) il cosiddetto smorzamento del filtro arresta banda determina l'attenuazione ad $\omega = \omega_n$ ed è definito dal rapporto ξ_n / ξ_d della funzione di trasferimento (1); b) il filtro passa basso presenta la canonica funzione di trasferimento (2).

$$F_N(s) = \frac{s^2 / \omega_n^2 + 2\xi_n \cdot s / \omega_n + 1}{s^2 / \omega_d^2 + 2\xi_d \cdot s / \omega_d + 1} \quad (1)$$

$$F_{PB}(s) = \frac{1}{s / \omega_{cut} + 1} \quad (2)$$

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE

Sul piano tecnico l'attività descritta ha suggerito di affinare la modellizzazione dell'attrito: in tal senso si opererà in una fase successiva, considerando la proposta di Swevers [4]. In termini operativi la stessa attività ha inevitabilmente comportato una inusuale interazione con il fornitore del pacchetto d'automazione. Sebbene la disponibilità dimostrata nelle risposte sia stata sufficiente, ci si augura una ancor più netta apertura per lo sviluppo e la messa a punto dei nuovi metodi di progettazione mecatronica dei moderni centri di lavoro a CN, specie nell'ottica del relativo equipaggiamento con servomotori ad accoppiamento diretto.

L. Bonometti, M. Maraglino, F. Tisi, C.M.S. Spa, Zogno (BG).

BIBLIOGRAFIA

- [1] "Dymola 5.0 – Dynamic Modeling Laboratory", Dynasim AB, 2002.
- [2] L. Bonometti, *Convertitori di potenza e servomotori brushless*, Utet periodici, Editoriale Delfino, 2001.
- [3] A. Samarani, *Modellistica, controllo e simulazione di macchine utensili speciali*, Tesi di laurea, Politecnico di Milano, a.a. 2001/2002.
- [4] J. Swevers e altri, *An Integrated Friction Model Structure with Improved Presliding Behavior for Accurate Friction Compensation*, IEEE Transactions on automatic control, Vol. 45, No. 4, April 2000.
- [5] F. Tisi, *Metodi, misure e prove per la validazione del modello matematico di una macchina utensile*, Tesi di laurea, Politecnico di Milano, a.a. 2001/2002.
- [6] P. Vas, *Parameter estimation, condition monitoring and diagnosis of electrical machines*, Oxford University Press, 1993.