

Applicazioni di controllo di velocità con sensori e motori a basso costo

Luca Bascetta, Gianantonio Magnani, Paolo Rocco

Nel controllo dei motori elettrici le prestazioni del sistema sono fortemente dipendenti dalla risoluzione del sensore di posizione e dal filtro digitale utilizzato per stimare la velocità. Se si considerano poi applicazioni industriali, legate alla produzione di beni su vasta scala come quella degli elettrodomestici, la necessità di ridurre i costi di produzione spinge verso l'utilizzo di strategie di controllo/pilotaggio semplici e computazionalmente poco onerose, nonché verso l'utilizzo di sensori e motori a basso costo. In tali casi è quindi di fondamentale importanza sia la valutazione del degrado di prestazione correlato ad una particolare scelta della strategia di controllo/pilotaggio, sia la valutazione dell'influenza che l'impiego di un sensore di posizione a bassa risoluzione ha su tale strategia. Esso, infatti, non solo causa l'insorgere di disturbi periodici nella velocità del motore, ma si rende anche responsabile, allorché si utilizzi una tecnica di controllo vettoriale, di un progressivo deterioramento della qualità del pilotaggio con conseguente diminuzione dell'efficienza del motore. In sintesi, nella valutazione delle prestazioni di un sistema di controllo del moto, è necessario considerare con attenzione l'effetto generato dall'interazione tra la strategia di controllo/pilotaggio adottata e l'utilizzo di sensori di posizione a bassa risoluzione, in termini di regolarità della coppia generata, efficienza energetica, rumore acustico, emissioni elettromagnetiche.

Keyword

Stima di velocità e posizione; controllo di corrente; controllo di velocità; pilotaggio CA; pilotaggio CC; valutazione delle prestazioni

I motori elettrici vengono oggi utilizzati in una vasta gamma di differenti applicazioni, dai sistemi servo assistiti degli autoveicoli agli elettrodomestici, dai robot industriali alle macchine utensili. Sebbene le specifiche dei relativi sistemi di controllo del moto siano assai eterogenee, poiché ciascuno è caratterizzato da aspetti che sono peculiari della specifica applicazione, tali sistemi condividono, almeno in linea di principio, la medesima architettura, costituita da un anello per il controllo della corrente e uno per il controllo della velocità [4]. Le prestazioni di detti anelli di controllo, e quindi dell'intero sistema, sono fortemente dipendenti dalla qualità delle misure di posizione e velocità. Inoltre, in molte applicazioni industriali, per esempio quelle legate alla produzione di beni su vasta scala come gli elettrodomestici, la necessità di ridurre i costi di produzione spinge verso l'utilizzo di architetture di controllo/pilotaggio più semplici. Per esempio, quando la regolarità del moto non è un parametro critico ed il motore è soggetto ad una coppia di carico costante e nota, ovvero il controllo di velocità non deve fronteggiare disturbi significativi dovuti a variazioni di coppia

resistente e/o dei parametri meccanici del sistema - si pensi, per esempio, al caso di un ventilatore -, si può optare per un'architettura di controllo costituita dal solo regolatore di velocità e basata sul pilotaggio CC. In tal modo è possibile utilizzare un microcontrollore di basso costo ed evitare i costi connessi ai sensori di corrente e alla relativa elettronica di condizionamento. In altri casi, invece, è importante garantire una regolazione della velocità sufficientemente pronta, ovvero in grado di reagire a rapide variazioni di coppia resistente e/o del momento di inerzia del carico - si pensi, per esempio, al caso di una lavabiancheria -, evitando che la velocità effettiva differisca troppo da quella desiderata. In tali casi è opportuno utilizzare un'architettura di controllo costituita sia dall'anello di corrente che da quello di velocità, optando per un dispositivo di controllo più potente - un DSP o un microcontrollore con funzionalità specifiche per il controllo di motori elettrici -, dotato sia delle misure delle correnti di fase del motore che della posizione del rotore.

In conclusione, la molteplicità di soluzioni di controllo/pilotaggio adottabili nelle applicazioni di controllo di velocità dei motori elettrici e la tendenza alla riduzione dei costi fa nascere la necessità di studiare l'impatto che la scelta di differenti architetture di controllo/pilotaggio ha sulla regolarità della coppia generata, sull'efficienza energetica, sul rumore acustico, sulle emissioni elettromagnetiche. È inoltre di particolare interesse lo studio dell'interazione fra la strategia di controllo/pilotaggio adottata e la risoluzione del sensore utilizzato per misurare la posizione del rotore.

L. Bascetta, G. Magnani, P. Rocco - Politecnico di Milano, Dipartimento di Elettronica ed Informazione

Architetture di controllo e pilotaggio

Nel controllo dei motori brushless viene tradizionalmente utilizzata un'architettura in cascata [4], in cui l'anello più interno è utilizzato per la regolazione della corrente, mentre quello esterno controlla la velocità del motore. Ove l'applicazione lo richieda, vi sarà poi un ulteriore anello di controllo, esterno a quello di velocità, per la regolazione della posizione (esso non verrà considerato in questo contesto).

Relativamente al problema del pilotaggio delle fasi del motore possiamo, invece, distinguere due strategie differenti: il pilotaggio CC, in cui in ogni istante solo due delle tre fasi del motore vengono alimentate, applicando di norma una tensione costante; ed il pilotaggio CA, in cui le fasi del motore sono alimentate contemporaneamente, mediante un sistema trifase di tensioni sinusoidali sfasate di 120° l'una rispetto all'altra.

Se si considera il caso di un motore brushless sinusoidale, con fasi collegate a stella - la tipologia di motore più utilizzata nelle applicazioni industriali [4] -, la strategia di controllo ottimale, sia dal punto di vista dell'efficienza che da quello della regolarità della coppia generata, è il controllo in cascata di corrente/velocità basato sul pilotaggio CA. Il crescente interesse per lo sviluppo di sistemi di movimentazione a basso costo ha però spinto sempre più verso soluzioni semplici, in cui si opta per il solo anello di velocità e, talvolta, addirittura si preferisce un pilotaggio CC. Per questo motivo analizzeremo, brevemente, quali siano i principali fattori di costo che influiscono sulla scelta dell'architettura di controllo/pilotaggio.

Se si sceglie una soluzione di controllo in cascata di corrente/velocità sarà necessaria, oltre alla misura della velocità o della posizione del rotore, anche quella di due delle tre correnti di fase o, equivalentemente, di due delle tre correnti che scorrono nei rami del ponte trifase che alimenta il motore. Da un punto di vista tecnologico vi è una sostanziale differenza fra queste due scelte. La prima, infatti, pone problemi dal punto di vista della realizzazione elettronica del condizionamento della misura - argomento di cui non ci occuperemo in questa sede - nel caso si utilizzino shunt resistivi, oppure richiede sensori ad effetto Hall, risultando quindi più costosa. La seconda, apparentemente più economica poiché alla misura delle correnti sui rami del ponte trifase ben si adatta l'impiego degli shunt resistivi, cela complesse problematiche elettroniche. Tali correnti, infatti, a differenza delle correnti di fase del motore filtrate dalle induttanze degli avvolgimenti, contengono il pattern PWM di pilotaggio e, per essere misurate correttamente, necessitano di una sincronizzazione tra il convertitore Analogico/Digitale e il generatore del segnale di pilotaggio - caratteristica usualmente fornita solo nei microcontrollori e DSP specifici per applicazioni di controllo motore. È, infine, opportuno osservare che la dinamica elettrica di un motore è assai più veloce di quella meccanica, permettendo quindi il progetto di anelli di corrente a larga banda. Ciò rappresenta ovviamente un vantaggio, poiché consente di migliorare la regolazione della coppia generata dal motore e facilita il controllo della velocità eseguito dall'anello esterno, ma richiede anche l'utilizzo di hardware di controllo più veloce e, in un'ultima analisi, più costoso.

Per quanto riguarda il pilotaggio è sufficiente ricordare che, nel caso di pilotaggio CA, l'unità di controllo deve essere in grado di generare una tensione sinusoidale trifase. Anche in questo caso la potenza di calcolo necessaria alla costruzione del segnale sinusoidale, con le frequenze richieste dall'anello di corrente, impone l'utilizzo di DSP o di microcontrollori di fascia alta e con dispositivi appositamente progettati per applicazioni di controllo motore.

In conclusione, dallo scenario appena delineato consegue che, nel caso di applicazioni a basso costo in cui la regolarità della coppia generata dal motore non è un parametro critico, si opterà per un'architettura di controllo basata su microcontrollore, costituita dal solo anello di velocità e da un pilotaggio di tipo CC. Per applicazioni in cui, invece, il controllo del moto assume un'importanza rilevante, ci si orienterà verso dispositivi hardware di controllo più performanti, per esempio DSP, in grado di eseguire sia l'anello di velocità che quello di corrente, e di generare le tensioni sinusoidali necessarie per il pilotaggio CA.

Resistenza di fase	3.8	Ω
Induttanza di fase	15	mH
Costante di BEMF	1.79	Vs/rad
Coppie polari	24	
Momento d'inerzia rotore	2.1·10 ⁻⁴	Kgm ²
Attrito viscoso rotore	0.0034	Nms/rad
DC bus	230	V
Momento d'inerzia carico	0.22	Kgm ²

Tabella - Caratteristiche del sistema di test

Architetture a confronto

Le architetture introdotte nella sezione precedente verranno ora comparate, al fine di metterne in luce pregi e difetti dal punto di vista delle prestazioni del sistema di controllo del moto. In particolare, si assumeranno come indicatori sintetici per la valutazione di tali prestazioni la distorsione delle correnti di fase generate dal sistema di controllo e l'energia elettrica totale assorbita dal sistema per eseguire un profilo di velocità trapezoidale (figura 1).

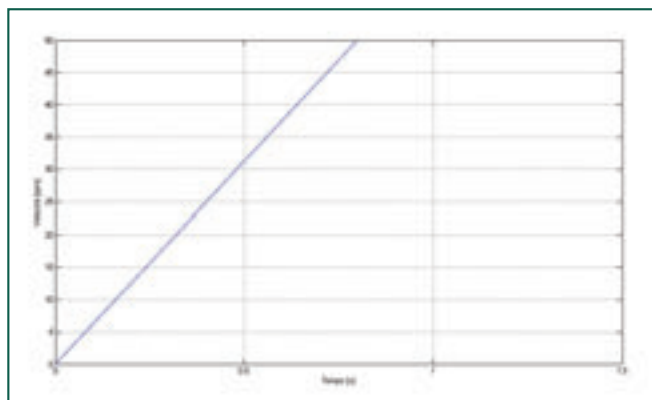
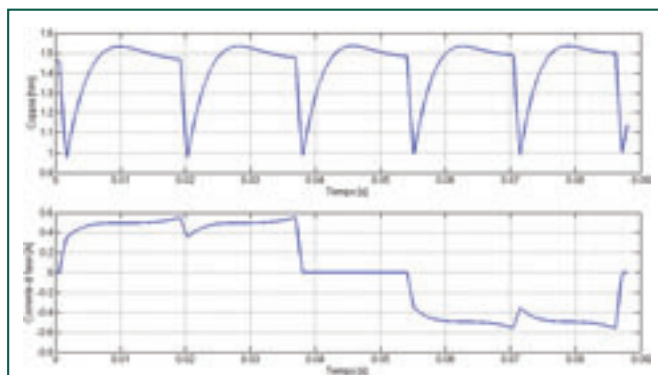
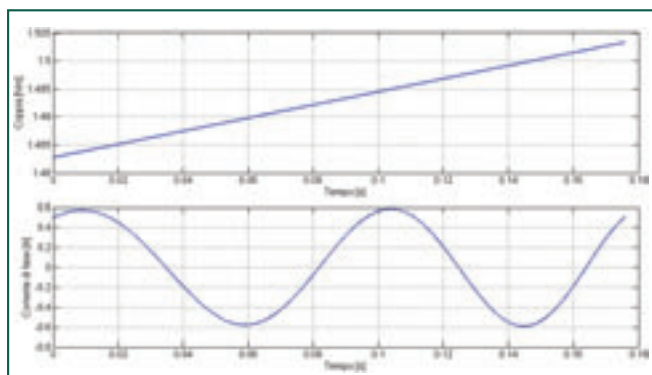


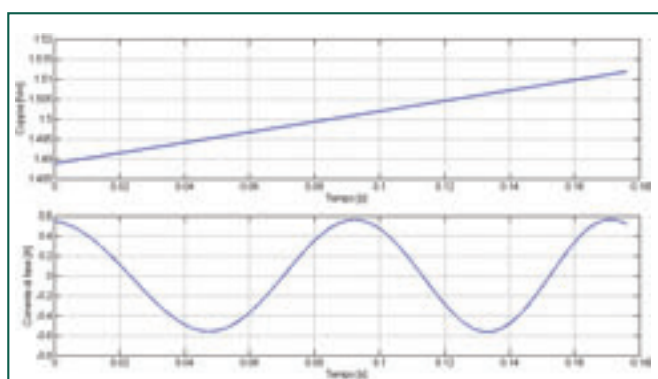
Figura 1 - Il profilo di velocità utilizzato nei test



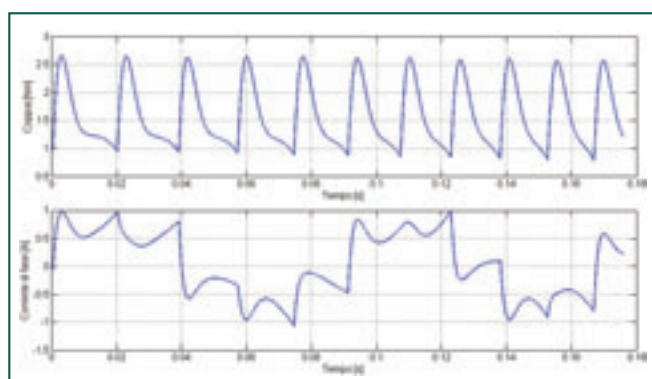
Controllo di velocità, pilotaggio CC



Controllo di velocità, pilotaggio CA (encoder ideale)



Controllo di corrente/velocità, pilotaggio CA (encoder 12 bit)



Controllo di corrente/velocità, pilotaggio CA (encoder 7 bit)

Figura 2 - Una comparazione tra differenti architetture di controllo/pilotaggio

Le architetture di controllo verranno comparate a partire da dati ottenuti in simulazione su un caso di test realistico, costituito da un motore brushless direct-drive, un inverter trifase ed un carico meccanico (i dettagli tecnici del sistema sono riportati nella tabella). Il sistema descritto, che ben rappresenta il caso reale di una lavabiancheria movimentata da motore direct-drive, è stato sviluppato in DymolaTM ponendo particolare attenzione alla descrizione di tutti gli aspetti rilevanti per la valutazione delle prestazioni del sistema di controllo del moto.

Nel seguito verranno analizzate in dettaglio sia le differenze dovute al pilotaggio (CA o CC), che gli effetti della scelta di un'architettura di controllo in cascata corrente/velocità oppure della sola regolazione di velocità.

Pilotaggio CC

Il pilotaggio CC, ovvero quello in cui si alimentano ad ogni istante solo due delle tre fasi del motore [4], è il più semplice da realizzare e, quindi, anche il meno costoso. Il motore viene alimentato, tipicamente, con tensioni di fase costanti a tratti e, per la loro commutazione, è sufficiente un sensore di posizione a bassissima risoluzione (spesso si utilizzano tre sensori ad effetto Hall disposti a 120°, oppure si sfrutta una misura della forza controelettrica per stimare la posizione del rotore).

Sebbene questo pilotaggio sia stato sviluppato con riferimento a motori con profilo di forza controelettrica (BEMF) trapezoidale, esso viene utilizzato anche nei motori con BEMF sinusoidale, causando però un degrado dell'efficienza del motore e della regolarità della coppia generata. In realtà, è bene ricordare

che anche nel caso di motori con BEMF trapezoidale la coppia generata è solo idealmente costante. Nella pratica, infatti, non è possibile generare correnti trapezoidali o costanti a tratti, sia a causa del tempo - piccolo ma non nullo - necessario a caricare/scaricare le induttanze degli avvolgimenti, sia in conseguenza della caduta di tensione sui diodi di ricircolo. Il profilo di corrente sarà allora caratterizzato (si veda la figura 2) dai transitori di carica e scarica, corrispondenti all'accensione e allo spegnimento della fase considerata, e da una brusca e rapida diminuzione della corrente a metà dell'intervallo di conduzione, in corrispondenza della commutazione - ovvero scarica di una fase attraverso i diodi di ricircolo e carica di un'altra - tra le due fasi rimanenti. Conseguentemente, la cop-

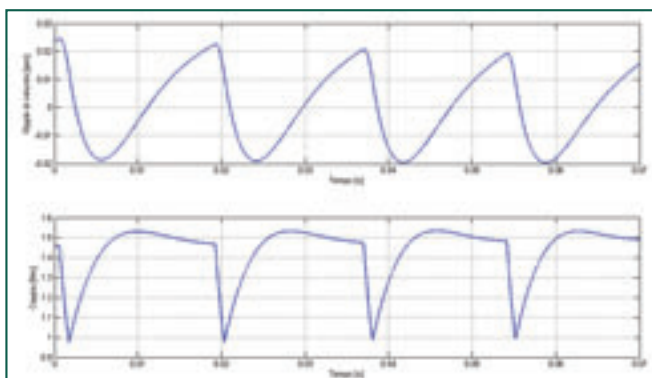


Figura 3 - Pilotaggio DC: andamento della coppia e delle oscillazioni di velocità intorno al valore nominale

pia erogata dal motore non sarà costante (figura 2 e 3) ma bensì caratterizzata da “buche”, che si susseguono con periodicità dipendente dalla velocità di rotazione del motore, in corrispondenza a ciascuna commutazione di fase. A tali discontinuità della coppia corrisponderanno oscillazioni nella velocità del carico, come mostrato nella figura 3.

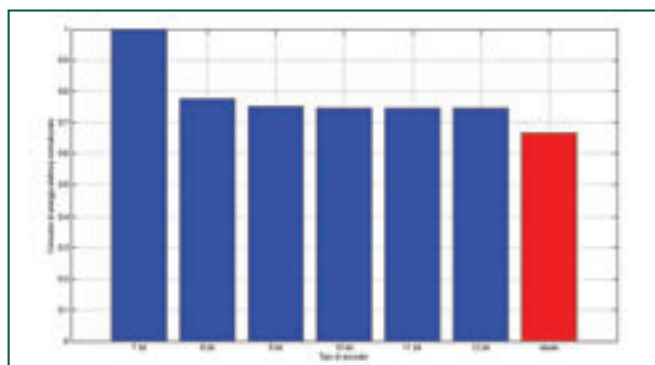


Figura 4 - Pilotaggio AC: potenza elettrica assorbita al variare della risoluzione encoder

Pilotaggio CA

Nel pilotaggio CA il motore viene alimentato mediante un sistema trifase di tensioni sfasate di 120°. Contrariamente a quanto accade con il pilotaggio CC, in questo caso è possibile, almeno idealmente, generare una coppia costante, qualunque sia il profilo di BEMF che caratterizza il motore - almeno nel caso in cui sia possibile controllare le correnti di fase del motore, imponendo ad esse un profilo uguale a quello della BEMF.

La regolarità della coppia diventa allora funzione della precisione del sensore utilizzato per misurare la posizione di rotore - necessaria per la sagomatura delle correnti di fase -, ovvero di quelli utilizzati per la misura delle correnti. Come detto nella sezione precedente, questo aumento delle prestazioni

comporta ovviamente un incremento del costo del sistema, sia per la necessità di introdurre nuovi sensori che per la maggiore richiesta di potenza di calcolo nell’unità di controllo.

In questa sede è di particolare interesse l’analisi del degrado delle prestazioni del sistema a fronte della riduzione della risoluzione nella misura di posizione. L’analisi di una situazione realistica in cui si considerano varie risoluzioni encoder, da 4096 impulsi giro - 12 bit - a 128 impulsi giro - 7 bit -, mostra chiaramente la progressiva distorsione delle correnti di fase (si veda la figura 5), ovvero il progressivo degrado della coppia generata, ed il corrispondente aumento dell’energia elettrica assorbita (si veda la figura 4) a parità di coppia di carico e di profilo di velocità eseguito.

Controllo di corrente/velocità e controllo di velocità

A partire da una delle due tecniche di pilotaggio precedentemente descritte è poi possibile implementare sia una strategia di controllo in cascata di corrente/velocità, che un semplice controllo diretto di velocità [12].

È ben noto che il sistema elettromeccanico costituito dal motore, con il rispettivo sistema di controllo, e dal carico è caratterizzato da due dinamiche - quella elettrica e quella meccanica - che evolvono su scale di tempo fortemente differenti. Per questa ragione l’utilizzo della strategia di controllo in cascata, che permette di adottare una regolazione interna di corrente a larga banda ed una esterna di velocità più lenta, contribuisce ad aumentare in modo significativo le prestazioni del sistema. In particolare, la presenza di un anello di corrente a larga banda garantisce un’efficiente compensazione del disturbo dovuto alla BEMF e delle non linearità dovute ai dispositivi elettronici di potenza utilizzati nel ponte trifase. Tutto ciò permette di presentare al regolatore di velocità un sottosistema ideale - costituito dal motore e dal regolatore di corrente - comandabile direttamente in coppia.

Per ottenere risultati comparabili, utilizzando il solo anello di velocità, sarebbe necessaria una regolazione di velocità con banda assai elevata (almeno sufficiente a compensare il disturbo di BEMF che si presenta come una sinusoide di pulsazione uguale alla velocità elettrica del rotore). È bene però ricordare che, nei sistemi reali, la banda del controllo di velocità è usualmente limitata dalle caratteristiche del sensore utilizzato per la misura della velocità stessa.

Nelle applicazioni, non è quindi possibile raggiungere bande del controllo di velocità comparabili a quelle che si raggiungono nella regolazione di corrente.

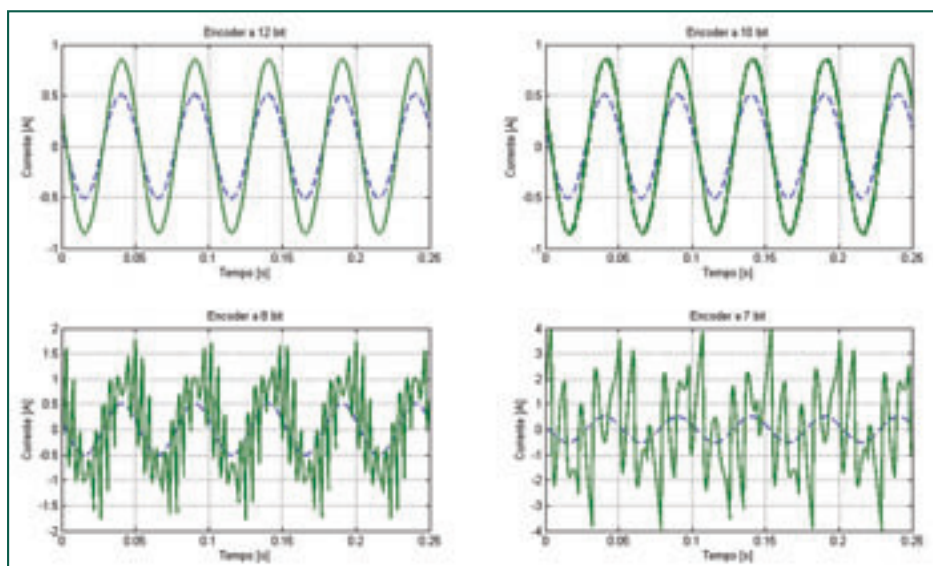


Figura 5 - Pilotaggio CA: andamento della corrente di fase al variare della risoluzione encoder (in linea tratteggiata la corrente corrispondente ad encoder ideale)

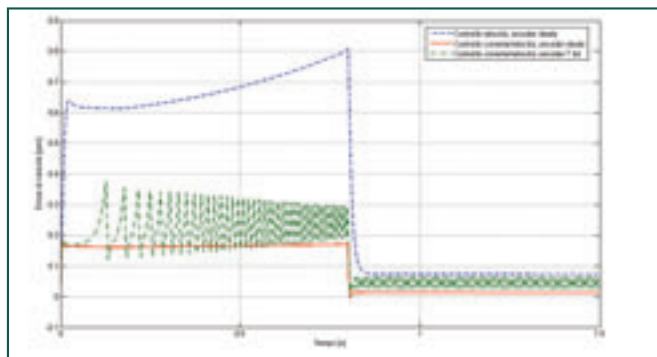


Figura 6 - Andamento dell'errore di velocità in funzione delle architetture di controllo/pilotaggio

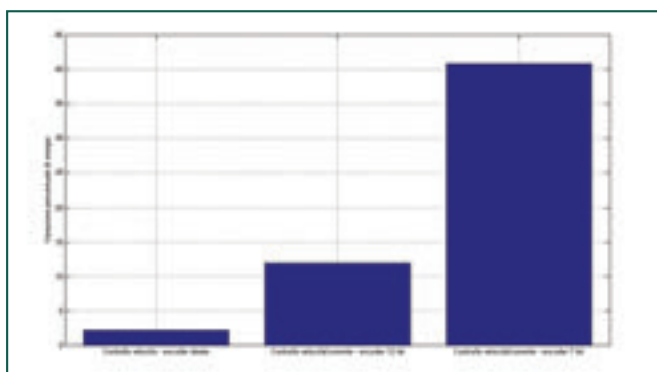


Figura 7 - Variazione dell'energia percentuale assorbita dal motore in funzione delle architetture di controllo/pilotaggio

L'errore di velocità mostrato nella figura 6 riassume quanto affermato precedentemente. Nel caso in cui sia stata utilizzata soltanto la regolazione di velocità - linea blu tratteggiata - è evidente come in fase di rampa l'errore sia nettamente maggiore rispetto al controllo in cascata - linea rossa continua -, poiché in tale situazione il sistema risente del disturbo di BEMF, che appare come una sinusoide di pulsazione crescente.

La terza curva - linea verde a tratto punto - riguarda il caso di controllo in cascata di corrente/velocità in presenza di un encoder a 7 bit . L'errore appare di poco superiore a quello che si ha con encoder ideale, ma compaiono evidenti oscillazioni causa della progressiva distorsione introdotta nella generazione delle correnti di fase dalla diminuzione della risoluzione del sensore. Infine, la figura 7 mostra quale sia la differenza esistente fra le due architetture di controllo discusse a livello del consumo energetico del sistema.

Il problema della stima di velocità

Per completare l'analisi fino a qui condotta, è necessario fare qualche cenno al problema della stima di velocità. È infatti evidente come le prestazioni del sistema dipendano in maniera determinante anche dalla misura di velocità, o dalla stima che di essa si ricava a partire dalla misura di posizione.

Nel seguito verranno illustrate le principali problematiche inerenti la stima di velocità da sensori di posizione a bassa risoluzio-

zione, delineando una breve classificazione dei principali approcci al problema apparsi in letteratura.

Nei moderni sistemi di controllo del moto, basati su microcontrollore o su unità DSP, la velocità è ricavata dalle misure di posizione utilizzando un filtro digitale. Conseguentemente, la qualità della stima di velocità dipende sia dalle caratteristiche del sensore di posizione che dall'algoritmo di stima utilizzato. Qualunque sia la tecnologia adottata per la misura di posizione, agli effetti della stima di velocità il sensore può essere caratterizzato facendo riferimento unicamente alla sua risoluzione spaziale. Per quanto riguarda l'algoritmo di stima, invece, è necessario osservare che esso deve perseguire due obiettivi contrastanti. Per un verso deve essere in grado di fornire una stima di velocità a larga banda, ovvero capace di inseguire anche variazioni repentine di tale grandezza, in modo da non introdurre limitazioni alle prestazioni del sistema di regolazione della velocità. D'altra parte, non bisogna dimenticare che la stima di velocità sarà basata, in qualche modo, sulla derivata di una misura di posizione quantizzata. Lo stimatore dovrà quindi garantire che la stima generata sia sufficientemente continua, in modo da non introdurre oscillazioni indesiderate nell'anello di controllo.

Il problema appena descritto è del tutto generale e accomuna tanto i robot industriali e le macchine utensili, ove l'aspetto più importante è di norma la precisione del posizionamento, quanto gli elettrodomestici, in cui di norma si utilizza soltanto il controllo di velocità, ponendo l'accento sulla minimizzazione dei costi - mediante l'utilizzo, come si è detto in precedenza, di sensori a bassa risoluzione o, addirittura, di algoritmi di controllo che operano in totale assenza di sensori di posizione. In conclusione, esso rappresenta uno dei problemi fondamentali di qualunque sistema di controllo del moto.

Tale problema può essere affrontato mediante due tecniche distinte: model-based, ovvero sfruttando un modello del sistema motore-trasmissione-carico, e non model-based, mediante tecniche di filtraggio dei segnali.

Gli approcci di tipo model-based - basati su sistemi adattativi [11,14], osservatori sliding mode [15], reti neurali [2,9], filtri di Kalman estesi [1,19] - hanno il vantaggio di poter sfruttare sia le informazioni provenienti dalla conoscenza del modello del sistema che quelle contenute nelle misure tipicamente disponibili in un sistema di controllo del moto (e.g., le correnti di fase del motore utilizzate per il controllo di corrente). D'altra parte, è bene osservare che un procedimento di stima model-based presuppone la conoscenza di un modello meccanico del carico i cui parametri - si pensi per esempio ai momenti di inerzia - nelle applicazioni sono spesso non noti, o variabili nel tempo o, in generale, non facilmente stimabili. In tutti questi casi è ovviamente preferibile adottare tecniche non model-based.

Gli approcci di tipo non model-based, come precedentemente introdotto, sono basati su tecniche di filtraggio digitale dei segnali. La letteratura tecnica è ricca di differenti approcci al problema - basati su un'approssimazione del primo ordine [7,8,13,16,17,18] o di ordine superiore [3,5] della funzione che descrive l'evoluzione della velocità nel tempo, o su un'interpolazione polinomiale esatta [6] od ai minimi quadrati [5,6,10] dell'evoluzione della posizione nel tempo - e presenta

quindi uno scenario eterogeneo. In realtà, se da un punto di vista matematico si può dimostrare che molti dei detti approcci sono tra loro equivalenti, per quanto riguarda l'aspetto applicativo il problema principale, attualmente irrisolto, riguarda la scelta del migliore stimatore per l'applicazione considerata. Un importante contributo al problema è stato presentato in [10], dove gli autori mostrano l'impossibilità di determinare lo "stimatore ottimo" allorché si consideri un ampio intervallo di velocità. Da ciò si può quindi concludere che il progetto dello stimatore di velocità non model-based, relativo ad una specifica applicazione, si componga di due fasi distinte: la scelta dello "stimatore ottimo" per ciascuno dei regimi di velocità a cui la macchina dovrà operare, e la definizione di un opportuno algoritmo di scheduling.

Conclusioni

I motori brushless vengono oggi utilizzati in applicazioni ove sono importanti non solo le prestazioni del sistema di controllo del moto ma, soprattutto, la riduzione dei costi e l'efficienza dal punto di vista energetico. Per questa ragione è necessario indagare le correlazioni tra l'architettura di controllo adottata, la risoluzione del sensore utilizzato per misurare la posizione del rotore ed il comportamento del sistema.

Questo articolo ripercorre le varie architetture di controllo usualmente utilizzate per la regolazione di corrente/velocità dei motori elettrici, confrontandole sia dal punto di vista dei costi di realizzazione che per quanto riguarda l'impatto che esse hanno sulle prestazioni dell'intero sistema, sia in termini di regolarità del moto che di efficienza. Esso, inoltre, considera l'interazione fra la risoluzione del sensore di posizione utilizzato e l'architettura di controllo adottata, sia a livello del controllo di corrente che di quello di velocità.

Infine, sfruttando come caso di test la simulazione realistica di un sistema di controllo di velocità, che rappresenta il caso di una lavabiancheria movimentata da un motore brushless direct-drive, si sono messi in evidenza gli aspetti fondamentali di tale comparazione evidenziando, quali possibili indicatori sintetici di confronto, la distorsione delle correnti di fase del motore e l'energia totale assorbita dal sistema per eseguire un profilo di velocità trapezoidale.

Bibliografia

- [1] D. Atkinson, P. Acarnley, J.W. Finch, "Observer for induction motor state and parameter estimation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 27 pp. 1119-1127, December 1991.
- [2] L. Ben-Brahim, S. Tadakuma, A. Akdag, "Speed control of induction motor without rotational transducers", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 35(4) pp. 844-850, July/August 1999.
- [3] M.F. Benkhoris, M. Ait-Ahmed, "Discrete speed estimation from a position encoder for motor drives", *Proceedings of the 1996 IEEE Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives*, (429) pp. 283-287, September 1996.
- [4] L. Bonometti, *Convertitori di potenza e servomotori brushless*, UTET, 2001.
- [5] R.H. Brown, S.C. Schneider, "Velocity observations from discrete position encoders", *Proceedings of the 1987 IEEE Conference on Decision and Control*, 6:1111-1118, November 1987.
- [6] F. Janabi-Sharifi, V. Hayward, C.S.J. Chen, "Discrete-time adaptive windowing for velocity estimation", *IEEE Transactions on Control System Technology*, 8(6):1003-1009, November 2000.
- [7] R.C. Kavanagh, J.M.D. Murphy, M.G. Egan, "A high-performance positioning system using improved digital speed sensing", *Proceedings of the 1989 IEEE Conference on Power Electronics*, pp. 997-1002, October 1989.
- [8] R.H. Kavanagh, "Performance on analysis and compensation of m/t-type digital tachometers". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, 50(4) pp. 965-970, August 2001.
- [9] S. H. Kim, T. S. Park, J. Y. Yoo, G. T. Park, "Speed-sensorless vector control of an induction motor using neural network speed estimation", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48(3) pp. 609-614, June 2001.
- [10] M. Lemkin, P.H. Yang, A.C. Huang, J. Jones, D.M. Auslander, "Velocity estimation from widely spaced encoder pulses", *Proceedings of the 1995 American Control Conference*, 1 pp. 998-1002, June 1995.
- [11] E. Levi, M. Wang, "A speed estimator for high performance sensorless control of induction motor in the field weakening region", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17 pp. 365-378, May 2002.
- [12] G. Magnani, G. Ferretti, P. Rocco, *Tecnologie dei sistemi di controllo*, McGraw-Hill, 2nd edition.
- [13] T. Ohmae, T. Matsuda, K. Kamiyama, M. Tachikawa, "A microprocessor controlled high accuracy wide range speed regulator for motor drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IE-29 pp. 207-211, August 1982.
- [14] F. Z. Peng T. Fukao, "Robust speed identification for speed sensorless vector control of induction motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30(5) pp. 1234-1240, 1994.
- [15] A.B. Proca, A. Keyhani, J.M. Miller, "Sensorless sliding-mode control of induction motors using operating condition dependent models", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 18(2) pp. 205-212, June 2003.
- [16] M. Prokin, "Double buffered wide-range frequency measurement method for digital tachometers", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, 40 pp. 606-610, 1991.
- [17] M. Prokin, "Extremely wide range measurement using a double-buffered method", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, 41 pp. 550-559, 1994.
- [18] K. Saio, K. Kimiyama, T. Ohmae, T. Matsuda, "A microprocessor-controlled speed regulator with instantaneous speed estimation for motor drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 35(1) pp. 95-99, February 1988.
- [19] K.L. Shi, T.F. Chan, Y.K. Wong, S.L. Ho, "Speed estimation of an induction motor drive using an optimized extended kalman filter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(1) pp. 124-133, February 2002.