

# Il motore non è tutto

La diffusione dei semiconduttori di potenza e l'offerta di sistemi di elaborazione ad alte prestazioni hanno cambiato radicalmente il volto del motion control

**È** difficile trovare un processo produttivo moderno che non faccia uso, in almeno una delle sue fasi, di motori elettrici. Per la loro versatilità e l'illimitato numero di applicazioni, in ambito tanto industriale quanto domestico, queste macchine sono così diffuse, da essere responsabili del consumo di circa 2/3 dell'energia elettrica prodotta nei Paesi industrializzati. Si stima che nel mondo siano in funzione circa 700 milioni di motori di vario tipo e taglia: migliorie anche minime nel rendimento della conversione dell'energia elettrica in meccanica possono dunque avere enormi ripercussioni sul bilancio energetico glo-

bale. Un aumento dell'1% nel rendimento di tutti i motori, per esempio, permetterebbe di risparmiare energia elettrica per 120 GWh l'anno, con una riduzione di 100 milioni di tonnellate di CO<sub>2</sub> immesse nell'atmosfera. L'evoluzione dei dispositivi di potenza e dei controllori logici ha reso possibile la realizzazione di azionamenti in grado di migliorare considerevolmente il rendimento di molte applicazioni di motion control. Nello specifico, gli azionamenti a velocità variabile (VSD o ASD - Variable o Adjustable Speed Drive) permettono risparmi compresi tra il 15 e il 30% (spingendosi talvolta anche al 50%) rispetto al funzionamento a velocità costante.

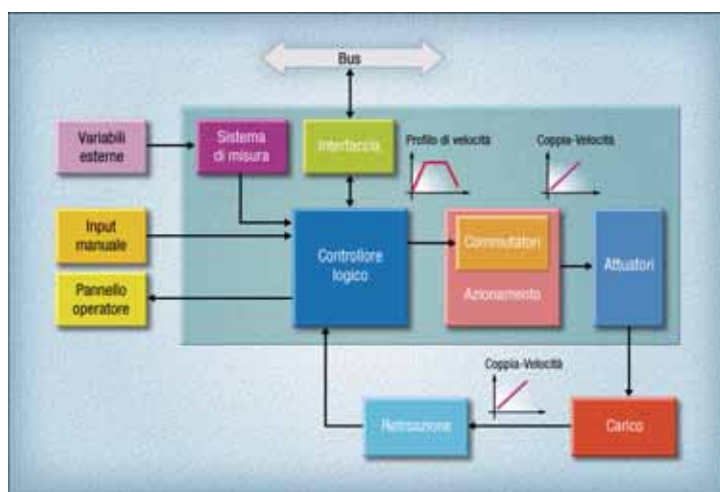


Fig. 1- Un moderno sistema di motion control è molto più della somma di motore e inverter

## Evoluzione... discontinua

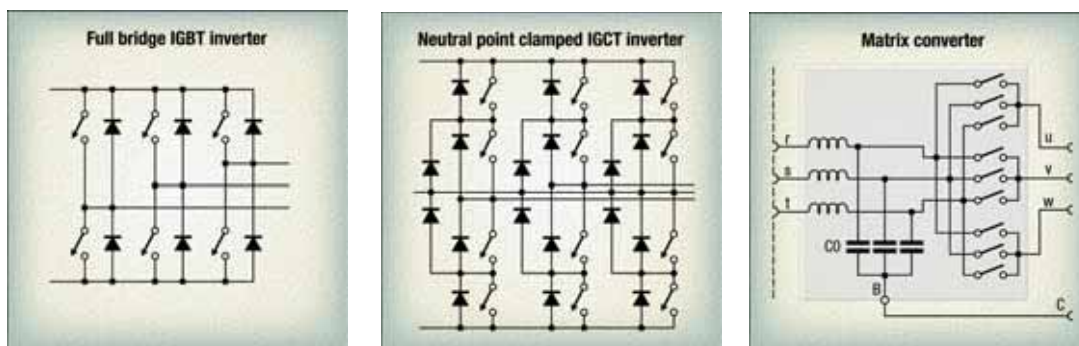
Prima dell'affermazione dei dispositivi allo stato solido nell'elettronica di potenza, l'evoluzione del motion control ha praticamente coinciso con l'evoluzione dei motori stessi: non essendoci infatti una maniera semplice per variare la tensione e/o la frequenza dell'alimentazione, ai progettisti non restava che trovare nuovi modi per alterare, manualmente o tramite dispositivi elettromeccanici, che mal si prestavano all'automazione del controllo, i collegamenti tra gli avvolgimenti nel motore. Nei casi più estremi si arrivava a sviluppare un nuovo tipo di macchina elettrica, il cui destino risultava legato a uno specifico contesto applicativo. La trazione, per esempio, è stata a lungo esclusivo appannaggio dei motori in continua con avvolgimenti in serie, mentre i motori a induzione con rotore a gabbia di scoiattolo potevano vantare diritto di cittadinanza solo nei confini delle applicazioni a velocità costante.

L'avvento dei semiconduttori ha cambiato tutto. Negli anni '60 hanno iniziato a diffondersi i primi azionamenti a velocità variabile basati su tiristori; negli anni '70 è stato il turno degli inverter con Mosfet di potenza, che hanno liberato i motori a induzione dalla schiavitù della frequenza di rete. In anni più vicini a noi, l'abbattimento dei costi e il contestuale incremento delle prestazioni di circuiti integrati dedicati, CPU e DSP ha reso fat-

è poi dotata di bus di comunicazione per l'interazione con i PLC o gli apparati di supervisione.

### Nuove possibilità per i motori c.a.

Cuore del sistema di motion control è e resta il motore, dalle cui caratteristiche si deve partire per identificare l'algoritmo di regolazione migliore. L'evoluzione dell'elettronica di controllo ha permesso di estendere il campo di applicazioni di alcune tipologie di motore, che si contraddistinguono per robustezza, semplicità costruttiva e alto rendimento. L'esempio più eclatante è rappresentato dai motori a induzione. Da sempre la ti-



**Fig. 2 - Diverse soluzioni per la conversione di potenza: a) inverter, b) inverter a tre livelli, c) convertitore a matrice**

tibile ed economicamente conveniente l'adozione di tecniche di controllo sofisticate, basate sul calcolo in tempo reale di parametri chiave per l'ottimizzazione delle prestazioni dei motori. Una delle conseguenze dello spostamento dell'attenzione dei progettisti dall'interno del motore ai circuiti di alimentazione e controllo è stata la scomparsa dal piano di fabbrica di svariati tipi di motore, sostituiti da una rosa più ristretta di tipologie di macchina elettrica.

### Il moderno motion control

Un moderno sistema di controllo motore consiste di quattro componenti fondamentali: l'alimentazione, che trasforma la tensione di rete in una forma più adatta a eccitare gli avvolgimenti; il controllore logico, che implementa l'algoritmo di controllo e si interfaccia con il sistema fisico, l'operatore e gli eventuali altri nodi della rete di controllo; la macchina elettrica stessa, ovviamente; infine il carico, per il cui dimensionamento si deve tenere conto di tutti i componenti meccanici (ingranaggi, alberi, cuscinetti) necessari a convertire il moto assiale o lineare prodotto nella forma adatta all'applicazione. Scopo del sistema di motion control è muovere il carico in base a determinati profili di velocità e accelerazione, facendo in modo che la conversione di energia elettrica in energia meccanica sia la più efficiente possibile. Il ricorso a meccanismi di feed-back e feed-forward fa in modo che nei moderni azionamenti abbiano un ruolo rilevante i sensori e i sottosistemi preposti alla misura delle grandezze controllate, come posizione, velocità o flusso magnetico, o di altre variabili quali temperatura e assorbimento di corrente, utili a stimare la risposta del sistema. La maggior parte degli attuali sistemi di motion control

di motore più utilizzato dall'industria, questi sono stati a lungo impiegati in applicazioni a velocità costante, per le problematiche associate alla generazione di alimentazione trifase a frequenza variabile. La disponibilità di inverter elettronici ha portato alla proliferazione di azionamenti a velocità variabile, che hanno favorito l'ulteriore diffusione di questi motori in campo industriale. Alcuni produttori hanno persino introdotto motori a induzione a cinque fasi, vista la facilità con cui è possibile realizzare i corrispondenti inverter e il guadagno che ciò comporta in termini di maggiore potenza erogabile a parità di dispositivi usati. La crescente potenza di DSP e CPU ha con-



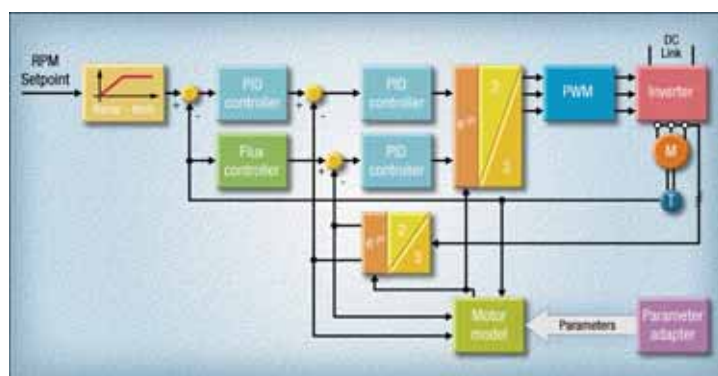
Fonte: "A Survey of Concepts for Electric Propulsion in Conventional and Ice Breaking OVSs" di Alf Kåre Ådnanes

**Fig. 3 - Schema di azionamento a velocità variabile con controllo ad anello chiuso per motori a induzione**

sentito poi l'implementazione di algoritmi di controllo evoluti, in grado di garantire elevata precisione e una risposta dinamica che un tempo era appannaggio dei soli motori in continua. Un'altra categoria di macchine elettriche a corrente alternata (c.a.), che sta ricevendo molte attenzioni, è quella dei motori sincroni a magneti permanenti. I magneti al Neodimio-



Boro e al Samario-Cobalto richiedono una frazione dell'ingombro dei motori a induzione per generare il medesimo flusso magnetico. Permettono così di assemblare motori compatti a inerzia ridotta, che hanno il vantaggio di essere più facilmente controllabili. La superiore efficienza associata al funzionamento con fattore di potenza unitario contribuisce a compensare il maggiore costo dovuto ai magneti. Questi motori brushless, un tempo impiegati solo come servo-motori, si stanno diffondendo in molte applicazioni industriali e residenziali, dove non si richieda un controllo particolarmente preciso di posizione o velocità, per esempio in pompe, carrelli elevatori, condizionatori, fino alle lavatrici domestiche. Il ricorso ai moderni sistemi di controllo sensorless permette poi di raggiungere livelli di prestazione adatti all'impiego in applicazioni di robotica a costi contenuti. Un discorso analogo può essere fatto per i motori a riluttanza variabile, il



Fonte: "A Survey of Concepts for Electric Propulsion in Conventional and Ice Breaking OVSs" di Alf Kåre Ådnanes

**Fig. 4 - Schema di controllo vettoriale a orientamento di campo (FOC) per motori a induzione**

cui controllo veniva tradizionalmente associato alla presenza di un encoder. Grazie ai nuovi sistemi di controllo senza sensori è stato possibile mitigare gli svantaggi di rumorosità e di fluttuazione della coppia, contribuendo alla diffusione di questo genere di motore in ambito consumer, automobilistico e militare.

### La conversione di potenza

Il primo compito di un azionamento è trasformare la tensione di rete in una forma adatta al pilotaggio del motore. Nel caso dei motori in alternata è fondamentale poter modificare, oltre all'ampiezza, anche la frequenza del segnale. Per fare questo può utilizzare una combinazione di raddrizzatori e convertitori, realizzati con dispositivi di potenza allo stato solido. I recenti progressi delle tecnologie in carburo di Silicio e in nitruro di Gallio stanno ampliando il range di temperature operative e di densità di potenza concessi dai dispositivi in Silicio. L'elemento più diffuso nell'attuale offerta di azionamenti a velocità variabile per motori in c.a. è l'inverter PWM, che trasforma la tensione continua proveniente dal raddrizzatore in una sequenza di impulsi di larghezza variabile. Questi impulsi danno origine a un flusso magnetico simil-sinusoidale, di ampiezza e frequenza controllabili, che fa muovere il motore. I

commutatori sono Mosfet, IGBT, IGCT o GTO operanti a frequenze generalmente comprese tra 1 e 100 kHz; sono pilotati dalla logica di controllo sulla base di sofisticati algoritmi, che nel più semplice dei casi sono tesi a minimizzare la distorsione armonica. All'inizio degli anni '80 è stata introdotta una variante di inverter a tre livelli, che raddoppia il numero di commutatori per dimezzare la tensione sui singoli dispositivi di potenza. Questo ne ha permesso l'utilizzo con profitto in applicazioni a media e alta tensione, in particolare nelle acciaierie e nella trazione ferroviaria in Europa e Giappone. Nella conversione diretta di frequenza a partire dalla tensione di rete hanno particolare importanza i convertitori a matrice. La riduzione dei prezzi dei semiconduttori di potenza ha reso questa soluzione economicamente valida, tanto che sta guadagnando attenzione. Una delle applicazioni più interessanti e attuali, vista la sensibilità alle tematiche ambientali in Europa e in America, riguarda le turbine eoliche: i convertitori a matrice sono la soluzione ideale per prelevare la tensione prodotta dal generatore e trasformarla in una forma adatta all'immissione sulla rete di distribuzione.

### La mente del sistema

Il controllore logico, mente del sistema di motion control, può essere realizzato in vari modi: con un PLC, in logica cablata, per mezzo di un microprocessore o di un micro-controllore o tramite un SoC che integri tutte le funzioni necessarie in un unico chip. Il suo compito è analizzare i segnali in ingresso, inclusi le impostazioni manuali dell'utilizzatore e i feed-back di posizione e velocità, e determinare i segnali in uscita con cui pilotare l'inverter o il convertitore che alimenta il motore. Nelle moderne strategie di controllo si ricorre spesso agli osservatori di stato, sottosistemi che stimano determinate variabili utilizzando le misure degli ingressi e delle uscite rilevanti e un modello dinamico del sistema. In un certo senso, l'osservatore simula la risposta del sistema e usa questa informazione per correggere al meglio i segnali con cui pilotare il motore. Tutto questo richiede una considerevole potenza di calcolo, diventata solo recentemente accessibile (specie economicamente) ai progettisti. La maggior parte delle applicazioni, in particolare se ci si riferisce ai diffusissimi motori a induzione, si accontenta di tecniche di controllo più semplici ed economiche. Negli azionamenti c.a. di uso comune la tecnica di regolazione della velocità consiste nel variare la frequenza del segnale fornito al motore, mantenendo costante il rapporto tensione/frequenza (V/f). Così facendo, si produce un flusso magnetico costante all'interno del motore. Se non è richiesta particolare precisione, è sufficiente un controllo ad anello aperto. Per ottenere prestazioni migliori si può chiudere l'anello, introducendo un segnale di retroazione ricavato da un encoder che misura la velocità del rotore. Dal confronto con la velocità del campo rotante, determinata dalla frequenza in uscita all'inverter, si ri-



Fonte: 2wheeltuesday.com

cava la velocità di scorrimento, il cui valore può così essere controllato. Il controllo con V/f costante è ideale negli impieghi di trazione lineare, come nel caso dei nastri trasportatori, ma non è sempre desiderabile. Quando si ha a che fare con carichi centrifughi, come nel caso di pompe e ventilatori, una dipendenza quadratica del flusso dalla velocità permette un maggiore risparmio energetico.

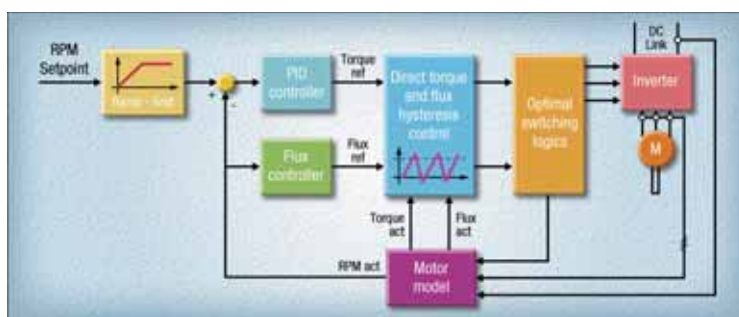
## Controllo vettoriale

In svariate circostanze servono prestazioni superiori a quelle consentite da un generico controllo V/f su un motore a induzione: mandrini, rulli, avvolgitori e altre applicazioni, che richiedono una coppia sostenuta a bassa velocità, sono state a lungo appannaggio dei motori in continua proprio per questo motivo. Grazie alle tecniche di controllo vettoriale è oggi possibile utilizzare anche in questi ambiti i robusti ed economici motori in c.a., con l'ulteriore vantaggio di una più agile risposta dinamica. Nel controllo vettoriale le componenti in un opportuno sistema di riferimento rotante della corrente statorica, responsabili della generazione del flusso magnetico (corrente diretta ID) e della coppia meccanica (corrente in quadratura IQ) risultano tra loro ortogonali, consentendo così un controllo indipendente di queste due grandezze, in maniera analoga a quanto accade nei motori in continua. Il sistema di controllo provvede a convertire i valori imposti di flusso e coppia nei valori di riferimento delle correnti IQ e ID, che sono poi trasformati, in base alla posizione misurata o calcolata del flusso, nei valori delle correnti che l'inverter eroga al motore. Il nome 'controllo a orientamento di campo' (FOC - Field Oriented Control), con cui questa metodologia è altrimenti conosciuta, deriva dal fatto che il sistema controlla, oltre alla frequenza, l'ampiezza e la fase delle correnti in uscita all'inverter, così da produrre un campo rotante di modulo e direzione, tali da soddisfare i requisiti di velocità e coppia dell'utilizzatore. Nello specifico, i sistemi FOC possono essere di tipo diretto o indiretto. Nel controllo vettoriale diretto il flusso magnetico viene misurato tramite speciali bobine o sensori a effetto Hall montati all'interno del motore, oppure viene dedotto matematicamente dalle misure di tensioni e correnti d'ingresso e dall'angolo restituito da un encoder. Il valore delle due componenti lungo gli assi d e q del sistema rotante, calcolati per mezzo di opportune trasformazioni matematiche, vengono così controllati indipendentemente, solitamente impostando la componente in quadratura a zero e quella diretta al valore necessario per ottenere la coppia desiderata. Nel controllo vettoriale indiretto le informazioni sull'orientamento del flusso vengono dedotte dal valore di velocità di scorrimento ricavato dalla misura delle correnti d'ingresso e dal valore di posizione angolare restituito da un encoder. L'angolo così stimato viene impiegato per ricavare tramite trasformazione inversa i valori delle correnti d'ingresso che generano una corrente diretta al-

lineata con il flusso magnetico. Spesso le due tecniche di controllo, diretto e indiretto, coesistono nello stesso controllore, che provvede a scegliere quella più adatta in base alle condizioni operative.

## Controllo senza sensori

sensori di posizione, velocità o effetto Hall richiesti dagli azionamenti vettoriali per i motori in c.a. presentano una serie di svantaggi in termini di costi, affidabilità, manutenzione, immunità ai disturbi e ingombro. La disponibilità di microprocessori ad alte prestazioni, in grado di effettuare calcoli intensivi in tempo reale, ha reso possibile lo sviluppo di tecniche di controllo che non necessitano di sensori e consentono il controllo diretto della coppia (Direct Torque Control) tanto nei motori a induzione, quanto in quelli sincroni a magneti permanenti. In questa tipologia di azionamenti la posizione e la



Fonte: "A Survey of Concepts for Electric Propulsion in Conventional and Ice Breaking OVSs" di Alf Kåre Ådnanes

**Fig. 5 - Schema di controllo senza sensori Direct Torque Control (DCT) per motori a induzione**

velocità del motore vengono calcolate a partire dalle sole grandezze elettriche. Uno di questi metodi considera il motore stesso come sensore: segnali ad alta frequenza iniettati nel motore permettono di rilevare la posizione iniziale dei poli magnetici e di seguirne la rotazione. Questa tecnica è stata applicata a motori a magneti permanenti in ambito robotico. Un'altra tecnica, nota con i nomi di DTC - Direct Torque Control (controllo diretto della coppia) e DSC - Direct Self-Control, utilizza un osservatore di stato per il flusso basato su un modello matematico del motore che tiene conto della temperatura di funzionamento. Per rendere più rapida la risposta del sistema nel controllo DTC, i valori di flusso magnetico e coppia meccanica, ricavati dalla misura dei parametri delle correnti e tensioni d'ingresso, sono controllati ricorrendo a una tabella di consultazione. Senza le complesse trasformazioni di coordinate in tempo reale richieste dal controllo vettoriale, il controllo della coppia e del flusso risulta essere estremamente rapido ed efficiente.

Fonti: Mukhtar Ahmad, "High Performance AC Drives - Modelling Analysis and Control" - 2010 Springer; Austin Hughes, "Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications" - 3rd ed. - 2006 Newnes; R. Krishnan, "Electric Motor Drives - Modeling, Analysis and Control" - 2001 Prentice Hall; Mahesh Swamy, Tsuneo Kume, "Present State and a Futuristic Vision of Motor Drive Technology" - Yaskawa Electric