

# Tipologie di motori e scelta dell'azionamento

Alberto Tonielli

Questo articolo si propone una breve analisi comparativa delle caratteristiche dei motori elettrici e dei criteri per la loro scelta e dimensionamento. Di seguito si propone una classificazione dei motori elettrici sulla base del meccanismo di generazione della coppia. Per tutti i motori si evidenzia come la coppia generata è funzione della corrente impressa nel motore, mentre la velocità di rotazione dipende essenzialmente dalla tensione applicata. Viene quindi analizzato il problema del dimensionamento del motore in applicazioni caratterizzate da movimenti ciclici. Poi sono considerati gli aspetti termici di un moto ciclico, introducendo il concetto di valore efficace di una grandezza periodica. Nell'articolo è discusso il ruolo del rapporto di riduzione ed è affrontato il tema del dimensionamento del motore. In ultimo sono discussi i ruoli dell'inerzia e della velocità massima del motore per fornire elementi per la scelta dei più costosi motori a bassa inerzia.

## Keyword

Motori elettrici, azionamenti, riduttori, dimensionamento

Si vuole qui presentare una sintetica visione delle tipologie di motori elettrici basata sulle proprietà strutturali del meccanismo base di generazione della coppia. La trattazione è di tipo ingegneristico, non rigorosa, ma basata su semplici relazioni fondamentali dell'elettrotecnica.

Un motore elettrico è una particolare struttura elettromeccanica che contiene più circuiti elettrici (avvolgimenti), in grado di muoversi relativamente tra loro e che interagiscono magneticamente.

Considerato uno qualunque di questi circuiti, l'equazione che ne descrive la dinamica è

$$v_j = R_j i_j + \frac{d\varphi_{cj}}{dt} \quad (1)$$

dove  $v$  e  $i$  sono, rispettivamente, la tensione e la corrente nel circuito,  $R$  è la resistenza e  $\varphi_c$  è il flusso concatenato con l'avvolgimento.

Nell'ipotesi che siano presenti due avvolgimenti in grado di muoversi relativamente tra loro, il flusso concatenato con ciascun avvolgimento è funzione della corrente che vi circola (flusso di autoinduzione), della corrente che circola nell'altro avvolgimento (flusso di mutua induzione) e della posizione relativa dei due avvolgimenti. Ad esempio per il primo dei due:

$$\varphi_{c1} = f(i_1, i_2, \vartheta) \quad (2)$$

da cui, nell'ipotesi di linearità magnetica dei circuiti

A. Tonielli, Dipartimento di Elettronica informatica Sistemistica (Deis), Università di Bologna

$$v_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + \frac{\partial \varphi_{c1}}{\partial \vartheta} \omega \quad (3)$$

Nella (3) i termini a secondo membro (tutte tensioni) rappresentano rispettivamente: la caduta sulla resistenza; il contributo di auto induzione; il contributo dovuto all'interazione magnetica con l'altro circuito (mutua induzione); un contributo dovuto al movimento relativo dei circuiti, detto forza elettromotrice.

In generale, con  $n$  avvolgenti interagenti, l'equazione del generico avvolgimento è

$$v_j = R_j i_j + \sum_{i=1}^n L_{ji} \frac{di_i}{dt} + \frac{\partial \varphi_{cj}}{\partial \vartheta} \omega \quad (4)$$

Ricordando che la l'espressione della potenza elettrica complessiva negli  $n$  avvolgimenti è

$$P_e = \sum_{j=1}^n v_j i_j \quad (5)$$

Sostituendo la (4) nella (5) si ha

$$P_e = \sum_{j=1}^n R_j i_j^2 + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n L_{ji} i_j \frac{di_i}{dt} + \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\partial \varphi_{cj}}{\partial \vartheta} i_j \right] \omega \quad (6)$$

La (6) esprime matematicamente un concetto fisico molto semplice. La potenza entrante in un sistema può venire in esso trasformata in uno dei seguenti modi:

- dissipata all'interno (qui si considera il solo effetto Joule (primo termine a secondo membro)

- andare a variare l'energia immagazzinata all'interno del sistema (secondo membro)
- uscire dal sistema sotto forma di potenza talora anche, come in questo caso, in un diverso dominio fisico (il terzo termine rappresenta la potenza meccanica uscente).

Ricordando l'espressione della potenza meccanica in un sistema rotante:

$$P_{mecc} = c * \omega \quad (7)$$

dove  $c$  rappresenta la coppia erogata ed  $\omega$  la velocità angolare, eguagliando al terzo termine della (6) si ha

$$c = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\partial \varphi_{cj}}{\partial \vartheta} * i_j \right]_{i_j = corr} \quad (8)$$

In definitiva, una struttura elettromeccanica può generare coppia se in almeno uno dei suoi circuiti elettromagnetici il flusso concatenato, a corrente costante, varia con la posizione relativa di quel circuito rispetto agli altri, ovvero, se

$$\frac{\partial \varphi_{cj}}{\partial \vartheta} \neq 0$$

in almeno un circuito e quel circuito è percorso da corrente. Si noti inoltre che lo stesso termine compare anche nella (4), ad indicare un'altra proprietà fondamentale dei motori elettrici. Se una struttura elettromeccanica è in grado di generare potenza meccanica quando alimentata elettricamente, essa è anche in grado di generare potenza elettrica quando alimentata con potenza meccanica. In definitiva, ogni motore elettrico è anche un generatore elettrico.

Ritornando alla (8), si vede che la possibilità di generare coppia è una proprietà strutturale di un insieme elettromeccanico complesso, legata al fatto che il flusso concatenato vari con la posizione in almeno un circuito. Ricordando che il flusso concatenato è composto essenzialmente da due termini:

- il flusso di auto induzione, legato alle proprietà di riluttanza di quel circuito;
- il flusso di mutua induzione, legato alle caratteristiche di accoppiamento magnetico con gli altri circuiti vicini.

si può facilmente pervenire ad una classificazione dei motori sulla base del meccanismo di variazione del flusso concatenato con la posizione.

Si individuano così tre grandi famiglie di motori elettrici:

- motori a Riluttanza Costante, in cui la variazione del flusso concatenato dipende solo dalla componente di mutua induzione
- motori a Riluttanza Variabile, in cui la variazione del flusso concatenato dipende solo dalla componente di auto induzione
- motori Ibridi, in cui la variazione del flusso concatenato dipende sia dalla componente di auto induzione che da quella di mutua induzione.

È interessante notare che i motori elettrici a Collettore (DC motors), Sincroni a magneti permanenti (Brushless motors), Asincroni ad induzione, appartengono tutti alla stessa famiglia dei motori a Riluttanza Costante. Nonostante l'apparente diverso modo di funzionare, questi motori sono molto simili tra loro, in quanto condividono lo stesso meccanismo base di generazione della coppia. Con opportune trasformazioni di coordinate, alla base delle tecniche di controllo ad orientamenti di campo (controllo vettoriale) sempre più utilizzate con questi motori, si potrebbe mettere in evidenza questa proprietà.

Alla famiglia dei motori a Riluttanza Variabile appartengono invece i motori passo-passo ed alcune tipologie di motore coppia.

Alla famiglia dei motori Ibridi appartengono alcune tipologie di motori passo-passo.

La classificazione per tipologia di meccanismo di generazione della coppia, oltre ad indicare similarità nei motori, è utile per evidenziare il fatto che la differenza nel meccanismo di generazione della coppia ha notevoli riflessi sulla complessità del controllo di coppia.

Nei motori a Riluttanza Costante, la coppia si genera per interazione magnetica dei circuiti di statore con quelli di rotore, da cui discende, per la coppia generata dal circuito  $j$ -esimo, una equazione di coppia del tipo:

$$c_j(t) = i_j(t) \varphi_k(t) f(\vartheta(t)) \quad (9)$$

La (9) afferma che, a parte la dipendenza dalla posizione (costante nei DC motors, spesso sinusoidale negli altri motori), la coppia generata dal circuito  $j$ -esimo (di rotore o di statore dipende dal motore) è il prodotto della corrente che circola in quel circuito ( $i_j$ ), per il flusso del circuito  $k$ -esimo ( $\varphi_k$ ) (di statore se  $i_j$  è di rotore e viceversa), per una funzione statica, talora non lineare, della posizione ( $f(\vartheta(t))$ ).

Nei motori a magneti permanenti il flusso ( $\varphi_k$ ) è costante, per cui la coppia risulta funzione della corrente ( $i_j$ ), mentre nei motori non a magneti permanenti il flusso ( $\varphi_k$ ), generato elettricamente, è tenuto costante con il controllo. È quindi facile imprimere la coppia iniettando nel motore una corrente di intensità e segno opportuni ricavata invertendo la relazione (9).

Nei motori a Riluttanza Variabile, la coppia si genera per variazione delle caratteristiche magnetiche di uno (o più) circuiti (variazione della Riluttanza) di statore, da cui discende, per la coppia generata dal circuito  $j$ -esimo, una equazione di coppia del tipo:

$$c_j(t) = \varphi_j^2(t) f(R_j(\vartheta(t))) \quad (10)$$

La (10) afferma che, a parte la dipendenza dalla Riluttanza ( $R_j$ ) (che a sua volta dipende dalla posizione relativa tra statore e rotore ( $\vartheta$ )), la coppia generata dal circuito  $j$  (di statore) è

funzione quadratica del flusso in quel circuito ( $\varphi_p$ ). Rispetto ai motori a Riluttanza Costante non è semplice ricavare la corrente necessaria ad imprimere una determinata coppia perché la relazione (10) è più complicata da invertire della (9). Inoltre, comparando il flusso, eventuali saturazioni del circuito introducono ulteriori non linearità e la presenza del quadrato del flusso rende il segno della corrente necessaria per generarlo ininfluente nel determinare il segno della coppia.

Per poter essere facilmente utilizzati in applicazioni a velocità variabile i motori elettrici vanno corredati di un opportuno azionamento. Si tratta di un dispositivo elettronico contenente un convertitore di potenza in grado di modulare la potenza elettrica erogata al motore, ed un sofisticato sistema di controllo digitale che controlla in retroazione la coppia, la velocità e la posizione.

In sintesi, gli azionamenti con motori a Riluttanza Costante sono generalmente utilizzati nelle applicazioni sofisticate di controllo del moto, mentre quelli con motori a Riluttanza Variabile sono utilizzati per la realizzazione di semplici posizionatori con prestazioni dinamiche limitate, a basso costo.

### Problematiche di dimensionamento del motore nei moti ciclici

Gli azionamenti elettrici (soprattutto quelli con motore Brushless) hanno consentito, negli ultimi dieci anni, il continuo miglioramento delle prestazioni delle moderne macchine automatiche per il confezionamento e, più in generale, dei sistemi robotici. Si tratta di applicazioni in cui l'azionamento è chiamato ad imprimere direttamente sofisticati movimenti ciclici in sostituzione di camme meccaniche.

Un problema di un certo interesse nelle applicazioni degli azionamenti elettrici in movimenti ciclici è quello del dimensionamento del motore. Anche se molte delle considerazioni svolte sono applicabili a qualunque tipo di azionamento, nel seguito si farà riferimento al dimensionamento del motore in azionamenti con motori Brushless sinusoidali, nei quali il controllo garantisce che la coppia erogata è proporzionale alla corrente che circola negli avvolgimenti.

Il problema risulta di qualche complessità per la concomitanza di due fattori. Il primo è l'andamento discontinuo della coppia/potenza erogata al carico, il secondo la necessità di interporre un riduttore tra il motore ed il carico, con lo scopo di adattare i due sistemi.

L'andamento discontinuo della coppia/potenza erogata al carico costringe ad investigare i meccanismi di dissipazione di energia nel motore, mentre la necessità di introdurre un riduttore fa sorgere spontanea la domanda sul ruolo che il riduttore gioca nel processo di dimensionamento del motore.

Nel seguito si farà riferimento allo schema a blocchi riportato nella figura 1, nel quale sono evidenziati i tre elementi componenti (motore, riduttore e carico) e le grandezze caratteristiche necessarie per il dimensionamento (momenti di inerzia ( $J$ ), posizioni ( $\vartheta$ ) velocità angolari ( $\omega$ ) accelerazioni ( $\dot{\omega}$ ), rapporto di riduzione ( $k_r$ )). Per semplicità di notazione si è trascurato il momento di inerzia del riduttore, di solito trascura-

bile rispetto a quello del motore. Per garantire generalità alla presentazione si ipotizza che il carico sia rappresentato da un volano con momento di inerzia  $J_{eqc}$  a rappresentare un carico qualunque. Qualora il carico sia costituito da un sistema roto/traslante più complesso ma lineare, con semplici bilanci di potenza/energia esso può facilmente essere riportato allo schema qui utilizzato. Nei casi più complessi di cinematismi non lineari si può ricorrere al Cad per ricavare il momento di inerzia equivalente del cinematismo, riportato all'asse di uscita del riduttore. Per semplicità di notazione, le grandezze all'uscita del riduttore sono rappresentate con lo stesso simbolo di quelle corrispondenti in ingresso ma con il pedice 1.

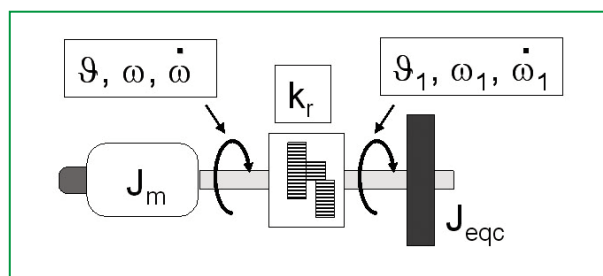


Figura 1 - Schema a blocchi di riferimento per il dimensionamento

### Equivalenza termica tra moti uniformi e moti ciclici

Prima di procedere con l'analisi del dimensionamento nei moti ciclici, occorre sottolineare che i motori sono caratterizzati dal costruttore per l'uso in moti uniformi, nelle quali la condizione peggiore è quella a massima potenza e cioè massima coppia alla massima velocità. Il dato di targa è quindi spesso la potenza erogabile con continuità, anche se per i motori Brushless, più tipicamente la caratterizzazione è fatta sulla coppia erogabile con continuità. Questo risponde ad un criterio termico di dimensionamento, stante la relazione di proporzionalità tra coppia e corrente ed il fatto che la dissipazione avviene prevalentemente per effetto Joule ed è quindi quadratica con la corrente. Il costruttore fissa poi anche i limiti meccanici del dimensionamento (spesso più elevati) indicando a catalogo la massima coppia erogabile per brevi intervalli di tempo.

I profili di moto di un tipico movimento ciclico sono riportati nella figura 2.

Trattando il caso di moti ciclici, il dimensionamento va fatto nel caso peggiore che, ovviamente, corrisponde alla condizione di minimo periodo di ripetizione ( $T$ ) del ciclo di lavoro. Infatti, al diminuire del periodo di ripetizione le accelerazioni crescono e di conseguenza anche le coppie necessarie per imprimerle, stante la relazione di proporzionalità tra la coppia applicata al carico e la relativa accelerazione.

Poiché il motore è qualificato dal costruttore sulla base della potenza dissipata (che ne determina il riscaldamento e quindi l'affidabilità) la domanda da porsi è dunque: quanto scalda il motore quando eroga coppia in modo discontinuo?

Per rispondere a questa domanda occorre mettere in relazione

la coppia variabile del moto ciclico con la coppia nominale (costante) indicata dal costruttore.

Allo scopo si ricorre al concetto di valore efficace o root mean square (r.m.s.) per la grandezze periodiche. Il valore efficace (r.m.s.) di una grandezza  $x(t)$  periodica con periodo  $T$  si calcola come

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^T x^2(t) dt}{T}} \quad (11)$$

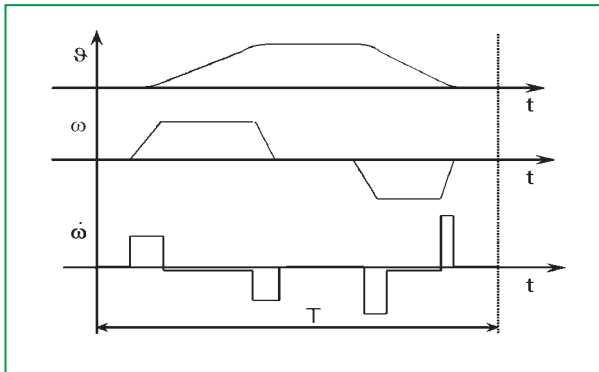


Figura 2 - Tipici profili di moto di una camma elettrica

Il valore efficace di una corrente periodica è il valore termicamente equivalente ad una corrente continua di valore pari al valore efficace della corrente periodica. Questo significa che una corrente periodica che scorre su una resistenza  $R$  dissipa la stessa potenza di una corrente continua, di valore pari al suo valore efficace, che scorre sulla stessa resistenza  $R$ .

Poiché la coppia è proporzionale alla corrente, per dimensionare termicamente il motore idoneo ad imprimere un determinato movimento ciclico occorre calcolare la coppia efficace corrispondente al ciclo più stressato ( $T$  minimo) e scegliere un motore con una coppia nominale superiore al valore efficace trovato. Va poi effettuata una verifica di dimensionamento meccanico, confrontando il valore massimo della coppia necessaria nel ciclo con la coppia massima erogabile dal motore scelto.

Può essere utile riscrivere la (11) normalizzando la grandezza  $x(t)$  rispetto al suo valore massimo nel periodo ( $x_{max}$ )

$$x_{rms} = x_{max} \sqrt{\frac{\int_0^T x_{norm}^2(t) dt}{T}} = x_{max} \sqrt{\delta} \quad (12)$$

Nella (12) il termine adimensionale  $\delta$ , denominato fattore di servizio, mette in relazione il valore massimo della grandezza  $x(t)$  nel ciclo con il suo valore efficace.

Vale la pena di osservare che il fattore di servizio è indipendente da cambiamenti di scala della variabile e quindi risulta lo stesso per tutte le grandezze tra loro proporzionali. Ne consegue che, per motori e cinematismi lineari, esso può essere calcolato indifferentemente sulle coppie al motore o al carico

(la costante di proporzionalità è il rapporto di riduzione) o sulle accelerazioni (al motore o al carico). In questo caso la costante di proporzionalità tra coppia ed accelerazione è il momento di inerzia.

### Ruolo del rapporto di riduzione nel dimensionamento

Ricordando che in un sistema rotante  $c=J\dot{\omega}$ , con riferimento allo schema della figura 1, si può scrivere l'equazione della coppia al motore

$$c_m = J_m \dot{\omega} + \frac{J_{eq} \dot{\omega}_l}{k_r} \quad (13)$$

in cui il primo termine a secondo membro rappresenta la coppia necessaria per accelerare il motore ed il secondo quella necessaria per accelerare il carico riportata, a monte del riduttore, all'asse motore.

Ricordando che  $\dot{\omega} = k_r \dot{\omega}_l$ , sostituendo nella (13) si ottiene

$$\frac{c_m}{\dot{\omega}_l} = J_m k_r + \frac{J_{eq}}{k_r} \quad (14)$$

che rappresenta l'espressione del rapporto tra la coppia al motore e l'accelerazione richiesta al carico, in funzione delle inerzie e del rapporto di riduzione. A questo punto, fissate le inerzie, l'unica incognita resta il rapporto di riduzione. La domanda è: come varia la coppia al motore (fissata l'accelerazione al carico) al variare del rapporto di riduzione? Per rispondere occorre studiare la funzione.

$$J_m k_r + \frac{J_{eq}}{k_r} \quad (15)$$

Eguagliando a zero la derivata si ottiene

$$J_m - \frac{J_{eq}}{k_r^2} = 0 \quad (16)$$

La funzione presenta un minimo per

$$k_{ropt} = \sqrt{\frac{J_{eq}}{J_m}} \quad (17)$$

che ci indica come calcolare il rapporto di riduzione ottimo. Riscrivendo la (16) come,

$$J_m = \frac{J_{eq}}{k_{ropt}^2} \quad (18)$$

si ottiene la cosiddetta equazione di bilanciamento delle inerzie, che indica come la condizione di ottimalità del rapporto di riduzione implica che l'inerzia del carico, riportata all'albero motore, sia uguale a quella del motore.

Resta però aperto un problema: come varia la coppia al motore se si sceglie un rapporto di riduzione non ottimale?

Si ipotizzi di utilizzare un rapporto di riduzione non ottimale

$$k_r^* = nk_{r,opt}; n \neq 1 \quad (19)$$

Nella (19)  $n > 1$  indica un rapporto di riduzione superiore a quello ottimo,  $n < 1$  indica un rapporto di riduzione inferiore a quello ottimo.

Facendo il rapporto tra le coppie al motore nei due casi ( $n=1$  e  $n \neq 1$ ) si ha

$$\frac{c_m^*}{c_{m,opt}} = \frac{\left( J_m k_r^* + \frac{J_{eqc}}{k_r^*} \right) \dot{\omega}_1}{\left( J_m k_{r,opt} + \frac{J_{eqc}}{k_{r,opt}} \right) \dot{\omega}_1} \quad (20)$$

Sostituendo la (19) nella (20), dopo alcuni passaggi algebrici si ottiene

$$\frac{c_m^*}{c_{m,opt}} = \frac{n^2 + 1}{2n} \quad (21)$$

Gli stessi passaggi si possono svolgere sulla potenza, ricavando alla fine

$$\frac{P_m^*}{P_{m,opt}} = \frac{c_m^* n \dot{\omega}}{c_{m,opt} \dot{\omega}_{m,opt}} = n \frac{c_m^*}{c_{m,opt}} \quad (22)$$

Da cui, sostituendo la (21) nella (22) si ha

$$\frac{P_m^*}{P_{m,opt}} = \frac{n^2 + 1}{2} \quad (23)$$

È opportuno sottolineare che le (21) e (23) sono funzioni esclusivamente di  $n$ , che rappresenta il quoziente tra rapporti di riduzione; esse sono valide sia per i valori istantanei che per quelli efficaci delle coppie e delle potenze.

La (21) e la (22) sono rappresentate graficamente nella figura 3. Si è scelta una scala logaritmica poiché, essendo l'incognita  $n$  un rapporto di grandezze, questa mantiene la simmetria rispetto al rapporto di riduzione ottimo ( $n = 1$ ).

Dalla figura 3 si vede come la coppia al motore abbia un minimo in corrispondenza del rapporto di riduzione ottimo, mentre la potenza è una funzione monotona di  $n$  che, per  $n$  tendente a valori piccoli, tende ad un valore metà di quello in

corrispondenza del rapporto di riduzione ottimo. In questa condizione, che si verifica ad es. quando si collega il motore in presa diretta sul carico, nel calcolo della potenza (si badi bene non in quello della coppia) il momento di inerzia del motore diventa trascurabile rispetto a quello del carico, per cui la potenza è sostanzialmente quella necessaria per muovere il carico. Questa osservazione tornerà molto utile quando si presenterà l'algoritmo iterativo per il dimensionamento del motore.

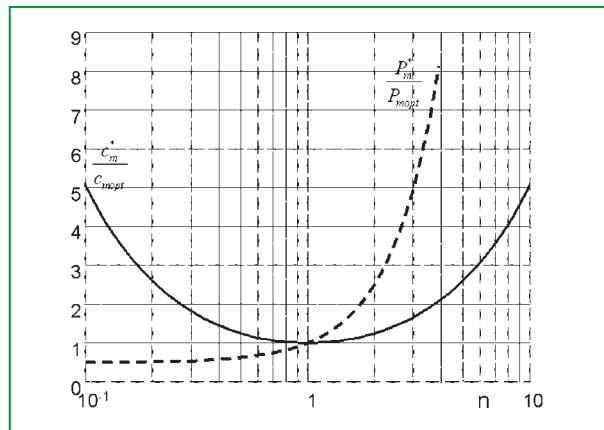


Figura 3 - Effetti della non ottimalità del rapporto di riduzione sulla coppia e sulla potenza: rapporto tra coppia non ottima e coppia ottima (tratto pieno); rapporto tra potenza non ottima e ottima (tratteggiato)

### Algoritmo per il dimensionamento del motore

Partendo dalle informazioni raccolte nei paragrafi precedenti è evidente che il dimensionamento del motore non può essere ottenuto per via analitica in quanto: prima di scegliere il motore occorre aver scelto il rapporto di riduzione; per il calcolo del rapporto di riduzione ottimo occorre conoscere il momento di inerzia del motore.

Per ovviare a questo inconveniente nel seguito verrà illustrata una semplice procedura iterativa per la quale: è chiaramente e facilmente identificabile il punto di partenza; è garantita la convergenza in un numero molto limitato di passi.

Per procedere al dimensionamento occorrono:

- profili di moto al carico (velocità ed accelerazioni);
- fattore di servizio dei profili di accelerazione/coppia. Qualora non fornito assieme ai profili di moto, può essere calcolato manualmente per profili di moto trapezoidali (accelerazioni/coppie costanti a tratti) oppure mediante l'uso di strumenti di Cad.
- momento di inerzia equivalente del carico riportato all'uscita del riduttore
- cataloghi di motori e riduttori di taglia adeguata al problema.

La procedura verrà descritta per passi. Per semplicità di presentazione, senza minimamente ledere la generalità del proce-

dimento, si farà riferimento ad un sistema in cui non sono presenti coppie/forze resistenti esterne e trascurando l'attrito. Questi elementi possono essere facilmente integrati nell'algoritmo quando presenti.

*Passo 1 - Stima della potenza efficace al carico*

$$P_{eff} = c_{eff} \omega_{max} = (\sqrt{\delta} J_{eq} \dot{\omega}_{1max}) \omega_{1max}$$

Per quanto detto al termine del paragrafo precedente la potenza del motore dovrebbe collocarsi tra  $P_{eff}$  e  $2P_{eff}$ .  $P_{eff}$  rappresenta una stima della potenza del motore qualora questo fosse collegato, senza riduttore, in presa diretta al carico.

*Passo 2 - Scelta di un motore di tentativo per l'algoritmo di dimensionamento iterativo*

Dal catalogo dei motori si sceglie il motore di potenza immediatamente superiore a  $P_{eff}$  e se ne rilevano i dati caratteristici utili nel seguito (si utilizza un apice asterisco per ricordare che si tratta di valori di tentativo): coppia nominale ( $c_{nnom}^*$ ) e coppia massima ( $c_{mmax}^*$ ); velocità nominale ( $\omega_{nom}^*$ ); momento di inerzia ( $J_m^*$ ).

*Passo 3 - calcolo del rapporto di riduzione ottimo per questo motore*

Dalla (17) si ha

$$k_{ropt}^* = \sqrt{\frac{J_{eq}}{J_m^*}}$$

*Passo 4 - Scelta del rapporto di riduzione*

Si calcola la velocità massima del motore con il rapporto di riduzione ottimo

$$\omega_{max}^* = k_{ropt}^* \omega_{1max}$$

Se  $\omega_{max}^* < \omega_{nom}^*$  (la velocità risultante è inferiore alla velocità nominale del motore) allora si sceglie:

$$k_r^* = k_{ropt}^*$$

Se  $\omega_{max}^* > \omega_{nom}^*$  (la velocità risultante è superiore alla velocità nominale del motore) il rapporto di riduzione ottimo non è compatibile con quel motore per cui si sceglie

$$k_r^* = \frac{\omega_{nom}^*}{\omega_{1max}}$$

*Passo 5 - verifica del dimensionamento*

Sulla base del rapporto di riduzione scelto, si riportano all'asse motore le grandezze definite sul carico, cioè:

$$\begin{aligned} \omega_{max}^* &= k_r^* \omega_{1max} \\ \dot{\omega}_{max}^* &= k_r^* \dot{\omega}_{1max} \end{aligned}$$

$$J_{eq}^* = \frac{J_{eqc}}{k_r^{*2}}$$

Si calcolano poi:

il momento di inerzia totale all'asse motore

$$J_{tot}^* = J_m^* + J_r^* + J_{eq}^*$$

la coppia massima al motore

$$c_{max}^* = J_{tot}^* \dot{\omega}_{max}^*$$

la coppia efficace al motore

$$c_{rms}^* = \sqrt{\delta} c_{max}^*$$

Si verifica infine il dimensionamento.

- Il motore in esame è dimensionato correttamente dal punto di vista termico se la coppia efficace risultante dal calcolo precedente risulta inferiore alla coppia nominale del motore, cioè  $c_{rms}^* < c_{nnom}^*$ .
- Il motore in esame è dimensionato correttamente dal punto di vista meccanico se la coppia massima risultante dal calcolo precedente risulta inferiore alla coppia massima del motore, cioè  $c_{max}^* < c_{mmax}^*$ .

Se entrambi i dimensionamenti sono corretti, il motore in esame è scelto ed il processo di dimensionamento è terminato. Diversamente, se anche uno solo dei due dimensionamenti risultasse non soddisfatto, occorre tornare al passo 2 dell'algoritmo scegliendo un motore di taglia immediatamente superiore.

### Considerazioni sull'uso di motori a bassa inerzia e/o ad alta velocità

La disponibilità di nuovi materiali magnetici a terre rare, caratterizzati da una elevatissima forza coercitiva, ha consentito di ridurre le dimensioni dei magneti e quindi l'inerzia rotorica a parità di coppia erogata.

Ne consegue che, a parità di coppia erogata, dallo stesso costruttore sono spesso disponibili due tipologie di motori

con magneti ceramici a basso costo, caratterizzati da inerzia standard

con magneti a terre rare a costo più elevato, caratterizzati da bassa inerzia

Inoltre, per ciascuna tipologia sono poi spesso disponibili motori a diversa velocità massima di rotazione (varia la tensione di alimentazione).

L'analisi sul riduttore ottimo svolta in precedenza aiuta a capire se e quando può essere utile ricorrere ai più costosi motori a bassa inerzia o piuttosto ai motori a diversa velocità.

L'equazione di riferimento è la (14), che viene qui riportata per comodità di lettura

$$\frac{c_m}{\dot{\omega}_1} = J_m k_r + \frac{J_{eq}}{k_r}$$

Essa mostra come nella determinazione della coppia al motore necessaria per imprimere al carico una determinata accelerazione  $\dot{\omega}_1$ , il momento di inerzia del motore contribuisce moltiplicato per  $k_r$  e quello del carico contribuisce diviso per  $k_r$ . Questo significa che l'aumento del rapporto di riduzione aumenta il contributo del momento di inerzia del motore e contemporaneamente diminuisce il contributo del momento di inerzia del carico. Si ricorda che in condizioni di minima coppia (rapporto di riduzione ottimo) i due contributi sono uguali.

Al termine del dimensionamento, effettuato utilizzando motori ad inerzia e velocità standard, ci si può trovare in una delle seguenti tre situazioni:

- Il rapporto di riduzione massimo (con quel motore) corrisponde a quello ottimale. Si sceglie il rapporto di riduzione ottimale.
- Il rapporto di riduzione massimo (con quel motore) è inferiore a quello ottimale. Il motore va troppo piano e si sceglie il rapporto di riduzione massimo.
- Il rapporto di riduzione massimo (con quel motore) è superiore a quello ottimale. Il motore va troppo forte e si sceglie il rapporto di riduzione ottimale.

Per ridurre la coppia al motore si può pensare di agire sulla sua velocità massima, sul suo momento di inerzia o su entrambi.

#### Caso a) - la velocità massima del motore è adeguata

La coppia al motore risulterà quella minima. Entrambi i termini forniscono lo stesso contributo. In questa situazione:

- l'uso di un motore a bassa inerzia, agendo su un termine che fornisce la metà del contributo di coppia, dà un contributo significativo alla riduzione della coppia;
- l'uso di un motore a velocità massima più elevata non serve perché comporterebbe un rapporto di riduzione superiore a quello ottimo;
- poiché l'uso di un motore a bassa inerzia comporta un aumento del rapporto di riduzione ottimo, un motore a bassa inerzia a velocità massima superiore contribuisce ad una ulteriore diminuzione della coppia se il nuovo rap-

porto di riduzione si avvicina molto a quello ottimo.

Ne consegue che il provvedimento da prendere, per ridurre la coppia al motore è quello di cercare un motore a bassa inerzia, possibilmente anche più veloce.

#### Caso b) - la velocità massima del motore è troppo bassa

La coppia al motore risulterà superiore a quella minima. Il contributo massimo alla coppia lo fornisce il carico. In questa situazione:

- l'uso di un motore a bassa inerzia, agendo sul termine che fornisce il contributo minore, non dà un contributo significativo alla riduzione della coppia;
- un aumento della velocità massima del motore contribuisce ad aumentare il rapporto di riduzione (che si avvicinerà a quello ottimo) e quindi certamente ridurrà la coppia;
- un motore a velocità massima superiore e bassa inerzia garantisce una ulteriore diminuzione della coppia solo se il nuovo rapporto di riduzione si avvicina molto a quello ottimo.

Ne consegue che il provvedimento da prendere, per ridurre la coppia al motore è quello di cercare un motore normale più veloce. Il ricorso ad un motore a bassa inerzia aiuta solo se il rapporto di riduzione massimo non era troppo inferiore a quello ottimo.

#### Caso c) - la velocità massima del motore è eccessiva

Usando un rapporto di riduzione ottimale (inferiore a quello massimo per il motore) la coppia al motore risulterà minima. Entrambi i termini forniscono lo stesso contributo. In questa situazione:

- scelto il riduttore ottimo, l'uso di un motore a bassa inerzia, agendo su un termine che fornisce la metà del contributo di coppia, dà un contributo significativo alla riduzione della coppia;
- un aumento della velocità massima del motore non serve perché comporterebbe un rapporto di riduzione superiore a quello ottimo. Si dovrebbe, piuttosto, fare riferimento ad un motore più lento;
- con un motore a bassa inerzia, la velocità massima del motore va scelta in modo da avvicinarsi il più possibile al rapporto di riduzione ottimo.

Ne consegue che il provvedimento da prendere, per ridurre la coppia al motore è quello di cercare un motore a bassa inerzia. Per il motore a bassa inerzia va poi cercata la velocità che più avvicina il rapporto di riduzione al valore ottimo.

## Conclusioni

Attraverso semplici equazioni e passaggi matematici si è mostrato come, sulla base del meccanismo di generazione della coppia, esistano sostanzialmente due grandi famiglie di motori: a Riluttanza Costante e Riluttanza Variabile.

Sono motori a Riluttanza Costante i Motori a Collettore, i Motori Sincroni a Magneti Permanenti (Brushless), i motori

Asincroni ad Induzione. A dispetto della loro differente modalità di funzionamento, questi motori condividono gli stessi meccanismi di generazione della coppia e pertanto hanno modalità di funzionamento interne molto simili. Con opportuni (s sofisticati) algoritmi di controllo è possibile controllare tutti questi motori in modo da garantire una relazione lineare tra la corrente impressa e la coppia generata. Questo è il presupposto per l'utilizzo di questi motori nelle sofisticate applicazioni di motion control.

Sono motori a Riluttanza Variabile i motori Passo-Passo e taluni Motori Coppia (Torque Motors). A differenza dei precedenti, in questi motori il meccanismo di generazione della coppia è intrinsecamente non lineare sia magneticamente che rispetto alla posizione, per cui è molto difficile, anche con algoritmi di controllo molto sofisticati, ottenere una relazione lineare tra corrente e coppia. Questi motori sono solitamente utilizzati per la realizzazione di semplici posizionatori con movimenti a passo, dove la possibilità di controllare, seppure grossolanamente, la posizione senza l'uso di un sensore li rende particolarmente interessanti nelle applicazioni in cui il costo sia un fattore dominante rispetto alle prestazioni dinamiche, alla precisione del posizionamento o alla dolcezza del movimento.

Si è poi analizzato il problema del dimensionamento del motore in applicazioni caratterizzate da movimenti ciclici. Si sono dapprima considerati gli aspetti termici di un moto ciclico, introducendo il concetto di valore efficace di una grandezza periodica.

Si è poi discusso il ruolo del rapporto di riduzione, evidenziando che per ogni carico e motore esiste un valore ottimale che minimizza la coppia che il motore deve erogare.

Si è quindi proposto un semplice algoritmo iterativo per il dimensionamento, che converge in un numero limitato di passi.

Infine, alla luce di quanto evidenziato nell'analisi del ruolo del riduttore, si è affrontato il problema della scelta dell'inerzia e della velocità di rotazione massima del motore, evidenziando come non sempre il ricorso ai più costosi motori a bassa inerzia sia opportuno.

## Bibliografia

[1] L. Bonometti, *Convertitori di potenza e servomotori brushless*, Utet, 2001

[2] A. Tonielli: "Introduzione agli azionamenti", *Sistemi e Tecnologie per l'Automazione lucidi lezioni*, 2007, [http://www-lar.deis.unibo.it/people/atonielli/SETA\\_LS.html#materiale](http://www-lar.deis.unibo.it/people/atonielli/SETA_LS.html#materiale)

[3] A. Tonielli: "Dimensionamento degli azionamenti", *Sistemi e Tecnologie per l'Automazione, lucidi lezioni*, 2007, [http://www-lar.deis.unibo.it/people/atonielli/SETA\\_LS.html#materiale](http://www-lar.deis.unibo.it/people/atonielli/SETA_LS.html#materiale)

## SPPC 12, il bello dell'automazione



### Affidabile, compatto... ed elegante

Il nuovo SPPC 12 è studiato per applicazioni embedded di livello, dove affidabilità, bassi consumi, continuità di prodotto e prezzo competitivo sono delle priorità.

L'SPPC 12 integra in un solo prodotto tutte le funzionalità di un normale PC e diventa la soluzione per tutti gli operatori coinvolti in progetti innovativi.

Dal design tutto italiano un prodotto accattivante e waterproof, adatto quindi ad ambienti esterni.

- Intel® Celeron® M 800MHz
- Fino a 1 GB DDR DRAM su moduli SO-DIMM
- HDD o SSD fino a 512MB saldati a bordo scheda
- Display LCD TFT con opzione touch screen o antivandalismo
- 1 MiniPCI socket
- 4 USB 2.0 e porta Ethernet
- 4 seriali, 1 parallela, connettore VGA e porta Audio In/Out
- Espansioni ISA bus (PC/104) e PCI bus (PC/104 Plus)
- S.O.: Opzione Win. precaricato, compatibilità Linux, QNX e VxWorks
- Grado di protezione IP65



Industrial Computers & Systems  
Via Calamandrei, 91  
52100 AREZZO - ITALY  
Phone: +39 0575 26979  
Fax: +39 0575 350210  
info@seco.it  
www.seco.it



Norimberga, 26-28 Febbraio '08 - Padiglione 9 Stand 529

readerservice.it n.19062