

## Il motore sincrono a magneti permanenti Struttura e principio di funzionamento

I motori sincroni a magneti permanenti, o *brushless sinusoidali*, sono impiegati sempre più diffusamente in ambito industriale, specialmente nei servoazionamenti di piccola e media potenza. Essi sono essenzialmente destinati ad azionamenti ad elevate prestazioni, in cui le particolari specifiche giustifichino il loro costo che è solitamente elevato per la presenza di magneti permanenti di pregio nell'elemento mobile (rotore). La *conversione elettromeccanica* che essi attuano segue il principio di funzionamento dei *sistemi elettrodinamici* in cui però i conduttori su cui agiscono le forze sono collocati nella parte fissa (statore) ed il rotore viene posto in movimento per il principio fisico di reazione. Una rappresentazione schematica della struttura di un motore sincrono a magneti permanenti a due poli è mostrata in Fig.9.1.1.

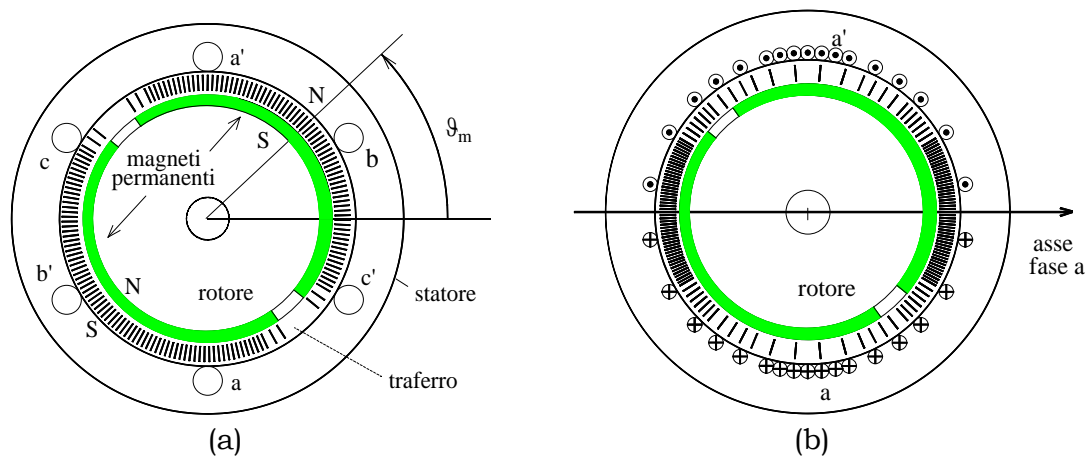


Fig. 9.1.1 - Rappresentazione schematica di un motore sincrono a magneti permanenti a due poli

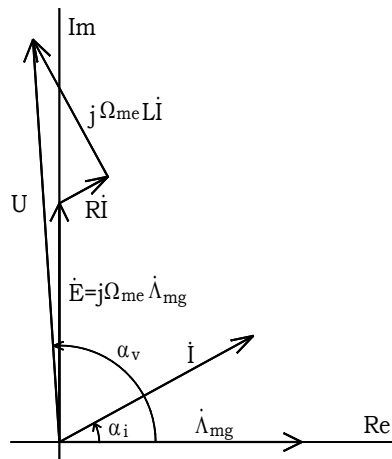
- (a) - Induzione al traferro prodotta dal magnete permanente di rotore (quasi quadra)
- (b) - Induzione al traferro prodotta dall'avvolgimento statorico della fase a (sinusoidale)

Lo statore ed il rotore sono entrambi a forma di corona cilindrica di materiale ferromagnetico laminato e separati da un *traferro* in aria. Sul rotore trovano posto i magneti permanenti; dato che essi presentano generalmente una permeabilità magnetica differenziale molto simile a quella dell'aria, a seconda della loro disposizione e della forma del rotore si possono ottenere strutture di rotore isotrope o anisotrope dal punto di vista magnetico, che caratterizzano rispettivamente i motori brushless SPM (*surface permanent magnet*) e IPM (*interior permanent magnet*). L'avvolgimento di statore è di tipo trifase; le tre fasi sono reciprocamente sfasate nello spazio di  $2\pi/3$ , e ciascuna fa capo ad una coppia di morsetti indicati con aa', bb', cc' in Fig.9.1.1(a), attraverso i quali è possibile fornire loro alimentazione da una sorgente trifase esterna. I conduttori che compongono ciascuna fase (Fig.9.1.1(b)) sono distribuiti lungo le cave statoriche ricavate secondo la direzione delle generatrici del cilindro di statore, omesse per chiarezza nel disegno. La stessa figura riporta, in (a), una rappresentazione schematica in cui ciascuna fase è simbolicamente rappresentata con una sola coppia di conduttori; si intende che l'asse di ogni fase sia la retta normale al piano che passa per ciascuna coppia di conduttori (Fig.9.1.1 (b)).

In regime sinusoidale, l'equazione fasoriale di tensione (ad esempio per la fase a) è la seguente:

$$Ue^{j\alpha_v} = RIe^{j\alpha_i} + j\Omega_{me}LIe^{j\alpha_i} + j\Omega_{me}\Lambda_{mg}e^{j0} \quad (1)$$

nella quale si è supposto per praticità di porre il fasore del flusso concatenato del magnete permanente sull'asse reale. L'ultimo addendo a secondo membro si chiama forza controelettromotrice E. La (1) dà luogo alla seguente rappresentazione fasoriale:



La coppia vale

$$T = K_\tau \Lambda_{mg} I \sin(\alpha_i) \quad (2)$$

dove  $K_\tau$  è una costante che dipende dal numero di poli del motore,  $\Lambda_{mg}$  è il massimo flusso concatenato dalla fase a e prodotto dal magnete permanente e  $I$  è l'ampiezza della corrente di fase di statore. La coppia è massima a parità di modulo della corrente quando  $\alpha_i = \pi/2$ , ovvero quando il fasore della corrente si sovrappone a quello della forza controelettromotrice E. Risulta evidente che il corretto funzionamento del motore brushless è legato alla conoscenza esatta della posizione del flusso del magnete permanente, ovvero del rotore.

Questo perché viene generata coppia solo se i fasori della corrente di statore mantengono una costante relazione di fase con il flusso di rotore, secondo il principio di funzionamento dei sistemi elettrodinamici. Il motore sincrono a magneti permanenti necessita dunque di un sensore di posizione assoluto (resolver o encoder assoluto). In alternativa, sono allo studio molte tecniche di stima della posizione (tecniche sensorless). Esse si basano su algoritmi matematici molto complessi, e solo di recente le grosse capacità di calcolo dei processori le ha rese implementabili in modo efficace ed abbastanza economico negli azionamenti elettrici.

**Principio di funzionamento in orientamento di campo.** Se indichiamo con  $\vartheta_{me}$  la posizione assoluta del flusso del magnete permanente rispetto allo statore, il riferimento di corrente per la fase a che realizza il massimo rapporto coppia/corrente è dato dall'espressione seguente:

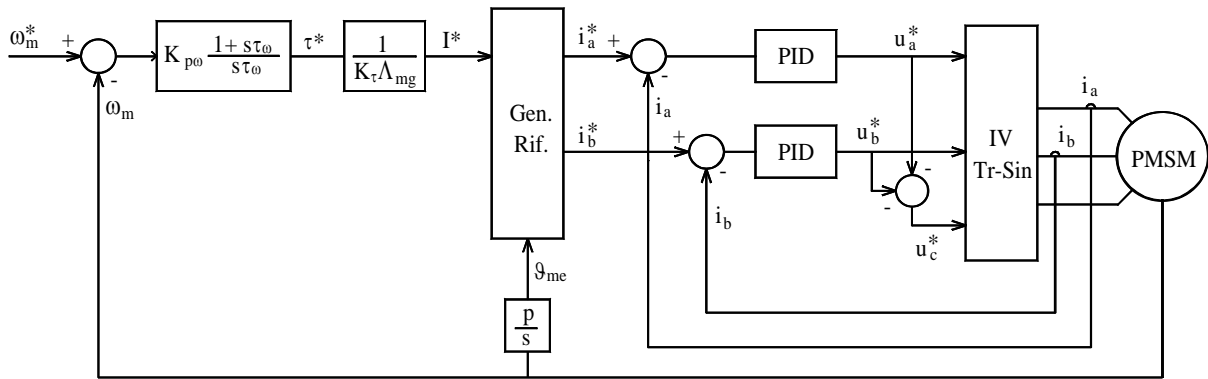
$$I_a^* = I^* \cos(\vartheta_{me} + \pi/2) = -I^* \sin(\vartheta_{me}) \quad (3)$$

e naturalmente per le fasi b e c si possono scrivere espressioni analoghe, sfasate di  $2\pi/3$  e  $4\pi/3$  rispettivamente.

$$I_b^* = -I^* \sin(\vartheta_{me} - 2\pi/3) \quad (4)$$

$$I_c^* = -I^* \sin(\vartheta_{me} - 4\pi/3) \quad (5)$$

Questa particolare modalità di funzionamento prende il nome di tecnica di controllo in orientamento di campo. Lo schema a blocchi a cui si può far riferimento è il seguente:



Schema a blocchi di un controllo di velocità per PMSM in orientamento di campo

Il blocco generatore di riferimento (Gen. Rif.) utilizza le equazioni (3), (4) e (5). In esso compaiono elementi non lineari, quali i moltiplicatori per le funzioni trascendenti sinusoidali. I blocchi che rappresentano funzioni lineari sono stati invece espressi tramite la loro funzione di trasferimento ingresso-uscita, secondo la trasformata di Laplace.

Gli azionamenti con PMSM hanno caratteristiche dinamiche di solito eccellenti, e vengono impiegati estesamente in robotica, nelle macchine utensili, nella movimentazione assi.

### Trasduttori di posizione angolare

I trasduttori di posizione angolare di tipo digitale sono dispositivi nei quali la posizione angolare è quantizzata, cioè l'angolo di rotazione dell'albero mobile ( $0 + 360^\circ$ ) è suddiviso in un numero discreto di parti a ciascuna delle quali viene fatto corrispondere un segnale digitale. Esistono principalmente due tipi di trasduttori angolari con uscita digitale: l'encoder assoluto e l'encoder incrementale.

**Encoder assoluto.** In questo tipo di trasduttore l'uscita è rappresentata da una combinazione di livelli logici (0 e 1) quanti sono i bit che formano il segnale d'uscita. In Fig.1 è illustrata la schematizzazione di un encoder assoluto.

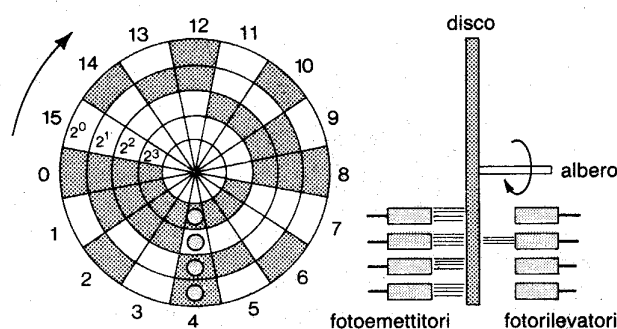


Fig.1

La parte mobile del dispositivo è costituita da un disco che può ruotare attorno ad un asse calettato sulla macchina di cui si vuole rilevare la rotazione angolare. Il disco è suddiviso in un numero di settori pari a  $2n$  essendo  $n$  il numero di bit del segnale d'uscita (nell'esempio della figura i bit d'uscita sono  $n = 4$ , per cui i settori

sono  $2^4 = 16$ ). Evidentemente quanto maggiore è il numero dei settori, tanto maggiore è la risoluzione nella misura dell'angolo. Il disco è ulteriormente suddiviso in  $n$  corone circolari. Nel reticolo determinato dalle intersezioni delle linee radiali e dei cerchi concentrici si diversificano opportunamente delle zone (scure e chiare in Fig.1), che permettono la codifica binaria dell'angolo. La lettura può essere effettuata con mezzi ottici, in tal caso le zone scure sono rese opache e quelle chiare trasparenti. La parte fissa del dispositivo di lettura consiste in  $n$  sorgenti luminose, ognuna delle quali proietta sul disco un fascio di luce, e di un sistema di  $n$  rivelatori allineati con le sorgenti di luce e in posizione opposta al disco. A ciascuna corona circolare viene fatta corrispondere una potenza di 2, *crescente dal bordo esterno verso il centro*. Nel caso schematizzato nella Fig.1 si hanno pertanto quattro diversi valori corrispondenti alle corone indicate:  $2^0, 2^1, 2^2, 2^3$ .

Fra i terminali di ogni fotorivelatore si preleva il livello logico 0 se il dispositivo non riceve luce e il livello 1 se la riceve: così, ad esempio, se tra i fotoemettitori e i foto rivelatori è interposto il settore 0, i livelli in uscita dai quattro fotodiodi risultano 0000; facendo ora ruotare il disco in senso orario, quando fra i fasci luminosi e il sistema fotosensibile è interposto il settore 1 la configurazione dei livelli d'uscita risulta 0001. Esiste pertanto una corrispondenza univoca fra il settore del disco, che si trova interposto fra le sorgenti di luce e il sistema rivelatore, e la configurazione dei livelli logici d'uscita. La lettura ottica permette dunque di codificare la posizione

Tab.1

Binario	Gray
0000	0000
0001	0001
0010	0011
0011	0010
0100	0110
0101	0111
0110	0101
0111	0100
1000	1100
1001	1101
1010	1111
1011	1110
1100	1010
1101	1011
1110	1001
1111	1000

angolare in codice binario puro. In pratica però il codice binario puro non è usato nei codificatori di precisione poiché può portare a degli errori di lettura, in quanto nel passaggio da un numero a quello immediatamente successivo si possono presentare variazioni simultanee di più bit. Ad esempio, i due numeri decimali contigui 7 e 8 hanno la rappresentazione binaria: 0111 e 1000. Un errore di allineamento del fascio potrebbe portare, nell'esempio indicato, alla lettura del numero 1111 rappresentativo del numero decimale 15. Il codice che viene usato per evitare questo tipo di errore, e sulla base del quale viene eseguita quindi la configurazione delle zone opache e trasparenti del disco, è tipicamente il codice Gray. Quest'ultimo è caratterizzato dal fatto che nel passaggio fra due numeri decimali consecutivi si ha sempre la variazione di un solo bit. La tabella Tab.1 riporta il codice Gray per un sistema a 4 bit. È possibile realizzare anche un sistema a lettura elettrica anziché ottica. Questo tipo di lettura può essere ottenuto realizzando le parti grigie del disco con

materiale isolante, quelle bianche con materiale conduttore. Mettendo in tensione le parti conduttrici del disco, un sistema costituito da tante spazzole quante sono le corone circolari può prelevare la tensione lungo le corone stesse.

**Encoder incrementale.** L'encoder incrementale è un trasduttore rotante che genera uno o due treni d'impulsi (versione mono o bidirezionale), sinusoidali o quadri, caratterizzati da un certo numero di impulsi per ogni angolo giro dell'albero (risoluzione dell'encoder). In aggiunta può generare per ogni giro un impulso supplementare, detto di zero o di riferimento. I segnali generati sono riportati in Fig.2.

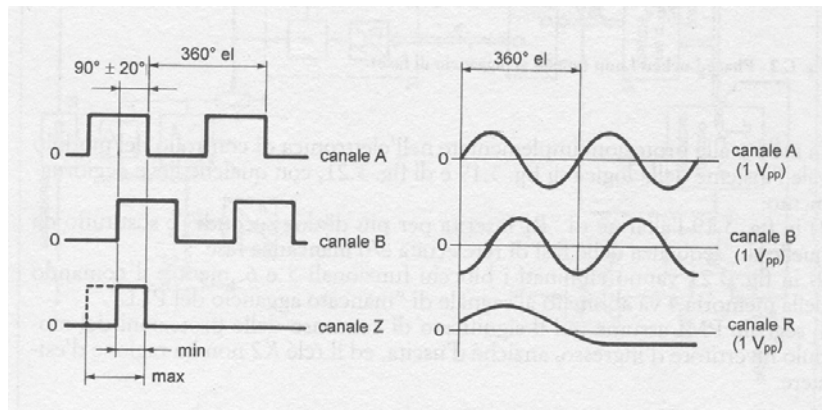


Fig.2 - Uscita per encoder ad onda quadra ed encoder sinusoidale

In particolare, per abbinamento a convertitori per servomotori sincroni, gli encoder sinusoidali forniscono ulteriori due segnali seno-coseno (detti di commutazione e caratterizzati da un periodo al giro) per il rilevamento assoluto della posizione rotorica del motore all'atto dell'inserzione dell'alimentazione; dopo l'inserzione, l'elaborazione interessa i segnali incrementali, trattandoli con tecniche d'interpolazione per ottenere risoluzioni fino ad alcune decine di milioni di passi al giro. All'albero, cavo o sporgente, dell'encoder è solidamente fissato un disco di materiale trasparente sul quale sono fotoincise delle zone opache. Il principio di funzionamento è analogo a quello dell'encoder assoluto, solo che ora le zone opache si alternano a quelle trasparenti senza alcuna codifica. La superficie del disco è illuminata da fotodiodi, in modo che le zone opache in movimento intercettino a tratti il fascio luminoso della sorgente. Dalla parte opposta ai fotodiodi sono collocati i fototransistori di rilevazione; questi trasformano il segnale luminoso modulato in segnale elettrico con forma d'onda quadra o sinusoidale. L'accoppiamento dell'albero encoder all'albero che lo conduce avviene per mezzo di un giunto elastico in senso assiale e radiale, rigido in senso torsionale. Per non guastare il disco ottico interno, sono rigorosamente da evitarsi urti dell'encoder e lavorazioni-pressioni-flessioni del relativo albero.

I dati caratteristici degli encoder con uscita ad onda quadra sono riassunti di seguito. In particolare gli encoder sinusoidali con segnali incrementali sono contraddistinti da:

- frequenza operativa: ~ 500 kHz
- grado di protezione: IP20
- temperatura operativa: -10 °C ÷ 120 °C
- massima velocità di rotazione: 12000 giri/min
- stadio elettronico d'uscita: line driver
- albero: cavo.

E' da notare che l'estensione del range operativo di temperatura a 120 °C è particolarmente importante per i servomotori privi di ventilazione forzata. Per quanto riguarda il cavo di connessione all'encoder valgono le seguenti considerazioni:

- è di tipo schermato, con schermo normalmente connesso a terra dal lato opposto all'encoder;
- va posato in modo separato da cavi di potenza o d'alimentazione di carichi quali elettrovalvole, teleruttori, ecc;

- ha una sezione di  $0,25 \text{ mm}^2$  per i conduttori di segnale e di almeno  $0,5 \text{ mm}^2$  per quelli d'alimentazione (+  $V_{CC}$  e  $0V$ ). Questo è specialmente importante per gli encoder a  $5 \text{ V}$ , dato che una sezione di  $0,5 \text{ mm}^2$  crea una c.d.t. di circa  $0,1 \text{ V}$  ogni  $10$  metri con  $100 \text{ mA}$  di corrente ( $\rho_{Cu}=17.21 \cdot 10^{-9} \Omega m$ ): con un cavo di circa  $30$  metri la circuiteria dell'encoder (TTL) opera quasi alla minima tensione consentita ( $4,75 \text{ V}$ ).

**Il resolver.** Il resolver è un trasduttore rotante con due avvolgimenti statorici, sfasati tra loro di  $90^\circ$  elettrici, ed uno rotorico (Fig.3). Eccitando l'avvolgimento rotorico con una tensione alternata, in un avvolgimento statorico si induce una tensione d'ampiezza proporzionale al seno e nell'altro proporzionale al coseno dell'angolo di rotazione del rotore rispetto allo statore (Fig.4).

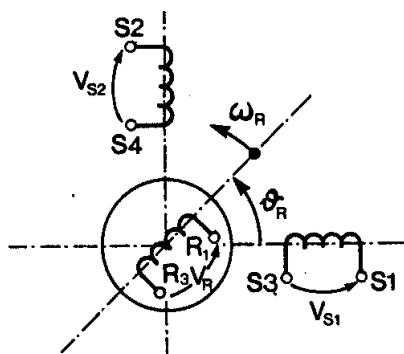


Fig.3

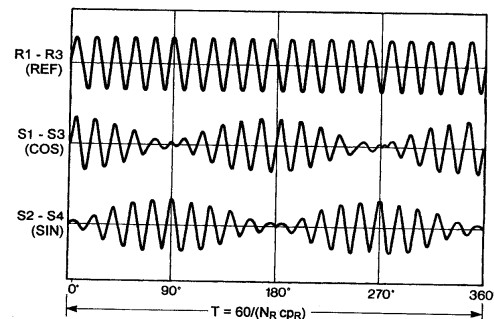


Fig.4

L'elaborazione elettronica di seno e coseno permette di ricavare l'angolo rotorico istante per istante, e conseguentemente anche la velocità angolare del motore. Un errore nella determinazione di queste due grandezze, derivante dalla sconnessione di uno o più cavetti del resolver, si tradurrebbe in uno di commutazione delle fasi del motore: il convertitore di potenza incorpora pertanto un circuito di protezione che ne blocca immediatamente il funzionamento nel caso si verifichi la sconnessione. Costruttivamente il resolver è disponibile sia con albero sporgente che cavo; in

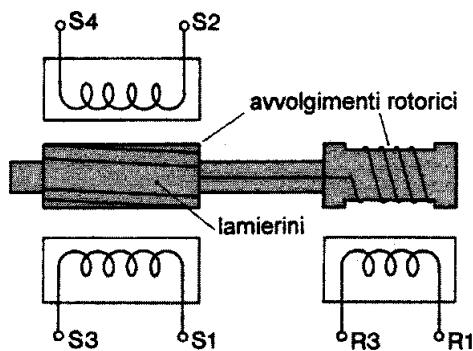


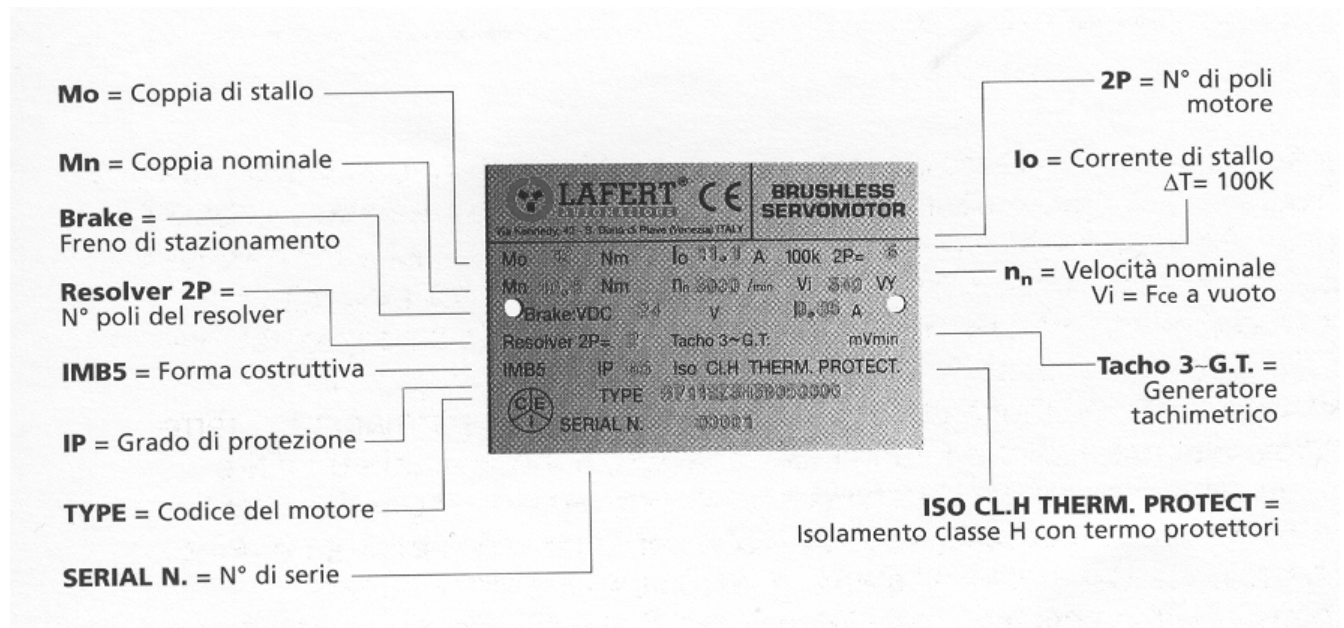
Fig. 5

entrambi i casi le spazzole d'adduzione della corrente rotorica sono sostituite da un'addizionale coppia d'avvolgimenti di rapporto 1:1 (l'induttore è sullo statore e l'indotto sul rotore) denominata "trasformatore" (Fig.5); la versione universalmente usata sui motori brushless è quella ad albero cavo (pancake).

I segnali del resolver sono comunque alla frequenza di alimentazione degli avvolgimenti, ovvero attorno ai  $10 \text{ kHz}$ . E' necessario dunque operare una demodulazione, per estrarre il segnale utile

(modulante). Sono universalmente adottati speciali convertitori (RDC, Resolver-to-Digital converter) che operano la demodulazione e trasformano la posizione in un segnale digitale a  $12$ ,  $14$  o  $16$  bit già adatto per essere interfacciato con gli ingressi digitali di un microprocessore.

**Dati di targa di un servomotore brushless.** La figura seguente riporta un tipico esempio di targa applicata ad un servomotore brushless.



Si riconoscono i dati relativi alla coppia nominale e a quella di stallo. Il grado di protezione è relativo ad uno standard che specifica la protezione del motore nei confronti di influenze esterne che possono interessarlo durante il funzionamento. I tipi di protezione, secondo la norma DIN 40050, vengono indicati dalle lettere IP e da due cifre.

#### Grado di protezione contro le scariche e i corpi estranei

1^ cifra	Denominazione	Spiegazione
0	Nessuna protezione	Nessuna particolare protezione per le persone contro una scarica diretta di parti attive o in movimento. Nessuna protezione della macchina contro l'introduzione di corpi estranei.
1	Protezione contro corpi estranei grandi	Protezione contro il contatto occasionale di grandi superfici e di parti in movimento interne, ad es. con la mano, ma nessuna protezione per l'accesso intenzionale a queste parti. Protezione contro la penetrazione di corpi estranei fissi con un diametro maggiore di 50 mm.
2	Protezione contro corpi estranei di grandezza media	Protezione contro il contatto con le dita di parti interne attive o in movimento. Protezione contro la penetrazione di corpi estranei fissi con un diametro maggiore di 12 mm.
3	Protezione contro corpi estranei piccoli	Protezione contro il contatto di parti attive in movimento interne con attrezzi, fili o simili di spessore maggiore di 2,5 mm. Protezione contro la penetrazione di corpi estranei fissi con un diametro superiore a 2,5 mm.
4	Protezione contro corpi estranei granulari	Protezione contro il contatto di parti attive con attrezzi, fili o simili con uno spessore maggiore di un millimetro. Protezione contro la penetrazione di corpi fissi con un diametro maggiore di un millimetro.
5	Protezione contro depositi di polvere	Protezione completa contro il contatto di parti attive o in movimento. Protezione contro i depositi di polvere dannosi. La penetrazione di polvere non si può evitare completamente ma essa non può penetrare in quantità tale da danneggiare la macchina.
6	Protezione contro la polvere	Protezione completa contro il contatto di parti attive o in movimento interne. Protezione contro la penetrazione di polvere.

#### Grado di protezione contro l'acqua

2^ cifra	Denominazione	Spiegazione
0	Nessuna protezione	Nessuna protezione particolare.
1	Protezione contro le gocce d'acqua cadenti verticalmente	Gocce d'acqua, che cadono verticalmente, non possono avere alcun effetto dannoso.
2	Protezione contro le gocce d'acqua che cadono obliquamente.	Gocce d'acqua, che cadono dall'alto con un angolo fino a 15° non possono avere alcun effetto dannoso.
3	Protezione contro l'acqua a spruzzo.	L'acqua, che cade con un angolo fino a 60° rispetto alla caduta in verticale, non può avere alcun effetto dannoso.
4	Protezione contro gli spruzzi.	L'acqua che spruzza da tutte le direzioni contro la macchina non può avere alcun effetto dannoso.
5	Protezione contro il getto di manichetta.	Un getto d'acqua da uno spruzzatore, che viene indirizzato da tutte le direzioni contro la macchina non può avere alcun effetto dannoso.
6	Protezione contro le inondazioni.	L'acqua, in una inondazione temporanea, ad es. con il mare grosso, non può penetrare in quantità dannosa nella macchina.
7	Protezione contro l'immersione parziale.	L'acqua non può penetrare in quantità dannosa, se la macchina viene immersa nell'acqua, se si osservano le condizioni di pressione e di tempo stabilite.
8	Protezione in immersione.	L'acqua non può penetrare in quantità dannosa se la macchina viene immersa nell'acqua.

La prima cifra indica il grado di protezione contro il contatto e l'intrusione di corpi estranei. Con la seconda cifra si indica il grado di protezione contro la penetrazione di acqua. In luoghi e locali, dove possono avvenire scoppi ed esplosioni, devono essere inserite macchine particolarmente protette. Le macchine protette contro gli scoppi sono indicati con (Sch) e contro le esplosioni con (Ex). Con lettere alfabetiche minuscole, aggiunte a (Sch) e a (Ex), si indica ancora una protezione particolare. Inoltre può essere indicato ancora il gruppo di infiammabilità e la classe di esplosione. Lo standard è riportato nelle due tabelle seguenti, relative rispettivamente alla prima ed alla seconda cifra dell'IP.

Simbolo	Significato
Sch	Protezione contro gli scoppi
Ex	Protezione contro le esplosioni
d	Custodia resistente alla compressione
p	Custodia di protezione a piastre
o	Custodia con olio
f	Ventilazione separata
e	Sicurezza aumentata
s	Tipo di protezione speciale
i	Sicurezza intrinseca

**Modalità operative.** Se una macchina viene caricata, aumentano le sue perdite. Perciò si riscalda. La temperatura di funzionamento della macchina dipende inoltre anche dal ciclo di lavoro e dalla frequenza di inserimento e di

disinserimento. Si distinguono otto modalità operative. Esse vengono indicate con S1 ÷ S8. Con esse, in generale, possono essere descritte tutte le condizioni di carico.

**S1** - Funzionamento continuo. E' il funzionamento con carico costante. Il carico viene applicato per un tempo così lungo che la temperatura della macchina raggiunge un valore massimo e non cambia poi quasi più (Fig.6a).

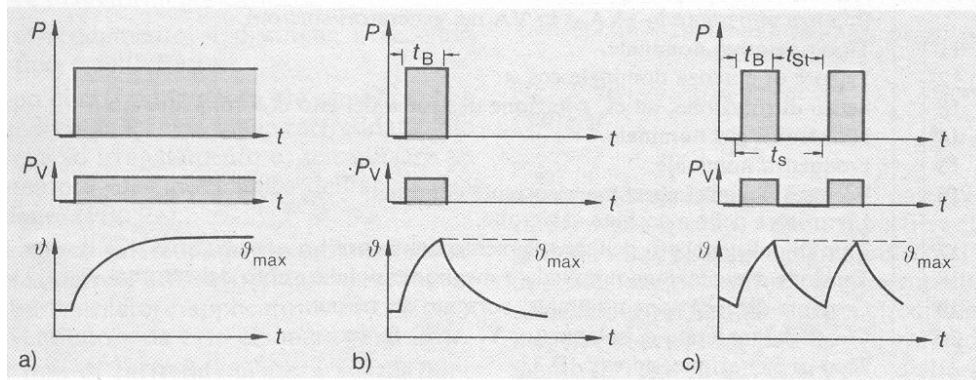


Fig.6

**S2** - Funzionamento di breve durata. Si ha quando le condizioni di carico non durano così a lungo da permettere il raggiungimento delle temperature massime. La pausa seguente è così lunga che la macchina si può nuovamente raffreddare (Fig.6b).

**S3 ÷ S5** - Funzionamento intermittente. La macchina viene pure caricata per breve tempo. La pausa non è sufficiente però a far raffreddare la macchina. Questa viene azionata con una serie di cicli dello stesso tipo. Con ciclo si intende la successione temporale di diversi stadi di funzionamento (Fig.6c). Se il processo d'avviamento ha influenza, si ha il tipo di funzionamento S5.

**S6 ÷ S8** - Funzionamento ininterrotto con carico variabile. Si distingue ancora tra carico intermittente (S6), funzionamento con avviamento difficile e frenatura elettrica (S7) e funzionamento con variazione periodica del numero di giri (S8).

Sulla targa della macchina viene indicato uno di questi tipi di funzionamento. Se manca questa indicazione la macchina è progettata per il servizio continuo (S1). Sulla targa standardizzata secondo la norma DIN 42961, sono indicati valore e durata delle grandezze elettriche e meccaniche in funzionamento nominale e il tipo di protezione.

### Esempio di dimensionamento di un servomotore brushless sinusoidale.

Si analizza il caso di un motore brushless accoppiato ad una slitta con una trasmissione a vite con ricircolo di sfere e cuscinetti assiali a rulli. La Fig.1 illustra il setup sperimentale.

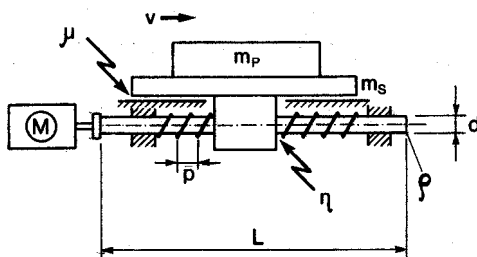


Fig.1

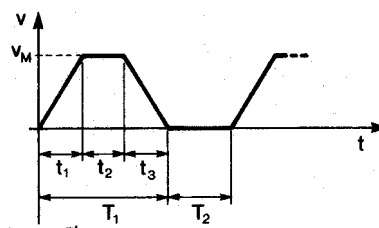


Fig.2

I dati del sistema sono i seguenti:

Massa della slitta $m_s$	10 Kg
Massa del pezzo $m_p$	40 Kg
Passo della vite $p$	5 mm
Lunghezza della vite $L$	0.5 m
Diametro della vite $d$	25 mm
Densità dell'acciaio $\rho$	$7.75 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$
Rendimento della trasmissione $\eta$	60 %
Coefficiente di attrito acciaio-acciaio $\mu$	$\mu=0.15$

Il pezzo deve compiere un ciclo di lavoro ripetitivo caratterizzato dal profilo cinematico di Fig.2. Con riferimento ai simboli utilizzati, i dati sono i seguenti:

Tempo di accelerazione $t_1$	0.167 s
Tempo di velocità costante $t_2$	0.167 s
Tempo di decelerazione $t_3$	0.167 s
Durata della lavorazione $T_1$	0.5 s
Durata della pausa $T_2$	0.25 s
Avanzamento del pezzo $S$	0.15 m

**Calcolo dei momenti di inerzia.** Per il dimensionamento del servomotore è essenziale il calcolo delle coppie di carico; il primo passo è dunque la determinazione dei momenti di inerzia delle parti coinvolte, riportati all'albero motore.

Massa della vite:  $m_v = \rho \cdot \pi r^2 L = 7.75 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot (12.5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0.5 = 1,9 \text{ Kg}$

Momento d'inerzia della vite:  $J_v = \frac{1}{2} m_v r^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,9 \cdot (12,5 \cdot 10^{-3})^2 = 148,5 \cdot 10^{-6} \text{ Kgm}^2$

Data la rigidità della trasmissione (anelastica), si può riportare all'albero motore l'intera massa del carico  $m_p$  e della slitta  $m_s$ , con le formule già viste in precedenza:

$$J_p = m_p \left( \frac{p}{2\pi} \right)^2 = 40 \left( \frac{0,005}{2\pi} \right)^2 = 25,33 \cdot 10^{-6} \text{ Kgm}^2$$

$$J_s = m_s \left( \frac{p}{2\pi} \right)^2 = 10 \left( \frac{0,005}{2\pi} \right)^2 = 6,33 \cdot 10^{-6} \text{ Kgm}^2$$

e dunque

$$J_{eq} = J_p + J_s + J_v = (148,5 + 25,33 + 6,33) \cdot 10^{-6} = 180 \cdot 10^{-6} \text{ Kgm}^2$$

**Calcolo della velocità massima.** Si analizza adesso in dettaglio il profilo di velocità richiesto dalla particolare applicazione, riportato in Fig.2. La velocità massima del carico ( $v_M$ ) si ricava considerando che i tempi di esecuzione del profilo di velocità sono imposti, come pure l'avanzamento totale del pezzo nel ciclo. Si può scrivere:

$$S_1 = \frac{1}{2} a t_1^2 = \frac{1}{2} \frac{v_M}{t_1} t_1^2 = \frac{1}{2} v_M t_1$$

$$S_2 = v_M t_2$$

$$S_3 = \frac{1}{2} d t_3^2 = \frac{1}{2} \frac{v_M}{t_3} t_3^2 = \frac{1}{2} v_M t_3$$

dove  $a$  e  $d$  sono rispettivamente l'accelerazione e decelerazione del pezzo. Dall'uguaglianza

$$S_t = S_1 + S_2 + S_3 = v_M \left( \frac{t_1}{2} + t_2 + \frac{t_3}{2} \right)$$

si trova  $v_M = 0.45$  m/s. Si può ora calcolare la massima velocità (angolare) del motore. Se  $v_M$  è la massima velocità lineare,  $v_M/p$  sarà il numero di giri/s e quindi

$$\Omega_M = \frac{v_M}{p} 2\pi = \frac{0.45}{0.005} 2\pi = 565.5 \text{ rad/s}$$

**Calcolo della coppia di accelerazione.** L'accelerazione del motore si calcola come

$$\alpha_M = \frac{\Omega_M}{t_1} = \frac{565.5}{0.167} = 3386 \text{ rad/s}^2$$

alla quale corrisponde una coppia di accelerazione del carico esterno pari a

$$T_J = J_{eq} \left( \frac{d\omega}{dt} \right)_{\max} = J_{eq} \alpha_M = 180 \cdot 10^{-6} \cdot 3386 = 0.61 \text{ Nm}$$

Oltre alla coppia inerziale, va tenuta in conto la coppia di attrito rapportata al motore. Il coefficiente di attrito acciaio su acciaio lubrificato è riportato tra i dati iniziali. La forza d'attrito del carrello e del carico sul piano di supporto vale:

$$F = (F = (m_p + m_s)g\mu = (40 + 10) \cdot 9.81 \cdot 0.15 = 73.6 \text{ Nm}$$

Questa forza rappresenta una ulteriore coppia da vincere, che secondo le indicazioni già fornite a suo tempo vale

$$\tau_a = F \frac{p}{2\pi} = 73.6 \cdot \frac{0.005}{2\pi} = 58.6 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}$$

Considerando poi una efficienza nell'accoppiamento pari al 60%, occorre che il motore produca una coppia

$$\tau_{am} = \frac{\tau_a}{\eta} = \frac{58.6 \cdot 10^{-3}}{0.6} = 97.6 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}$$

Quindi il motore è chiamato a vincere una coppia di carico data da

$$\tau_L = \tau_J + \tau_{am} = 0.61 + 97.6 \cdot 10^{-3} = 0.7 \text{ Nm}$$

**Dimensionamento del servomotore.** Si sceglie un motore che abbia una coppia nominale superiore ad almeno due volte quella richiesta:

$$\tau_N \geq 2\tau_L = 1.4 \text{ Nm}$$

ed una velocità nominale almeno pari a quella massima calcolata:

$$\Omega_N \geq \Omega_M = 565.5 \frac{60}{2\pi} = 5400 \text{ rpm}$$

Dal catalogo, di cui si riporta la parte saliente, si sceglie il motore D56-03/6, che ha una coppia nominale di 1.9 Nm alla velocità nominale di 6000 rpm. Il suo momento di inerzia è di  $2.28 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$  e la sua coppia massima vale 6.6 Nm.

**Verifica della scelta del motore.** Viene calcolato innanzitutto il momento di inerzia totale:

$$J_{tot} = J_{mot} + J_{eq} = (228 + 180) \cdot 10^{-6} = 408 \cdot 10^{-6} \text{ Kgm}^2$$

Dunque la coppia che deve erogare il motore durante l'accelerazione vale

$$\tau_{acc} = 1.2 \cdot J_{tot} \cdot \alpha_M + \tau_{am} = 1.2 \cdot 408 \cdot 10^{-6} \cdot 3386 + 97.6 \cdot 10^{-3} = 1.75 \text{ Nm}$$

in cui si è tenuto un margine del 20% per considerare eventuali imprecisioni nella determinazione dei momenti di inerzia. Si può notare che essendo tale coppia inferiore non solo alla coppia massima (requisito indispensabile) ma anche alla coppia nominale, non vi saranno imposizioni nel funzionamento circa la massima durata delle accelerazioni. La coppia durante la decelerazione risulta inferiore a quella durante l'accelerazione, perchè gli attriti in questo caso operano una favorevole azione frenante:

$$\tau_{dec} = -1.2 \cdot J_{tot} \cdot \alpha_M + \tau_{am} = -1.2 \cdot 408 \cdot 10^{-6} \cdot 3386 + 97.6 \cdot 10^{-3} = -1.56 \text{ Nm}$$

Agli effetti termici, che sono quelli che determinano il dato di targa della coppia nominale, è importante valutare la coppia efficace:

$$\tau_{eff} = \sqrt{\frac{\tau_{acc}^2 t_1 + \tau_{am}^2 t_2 + \tau_{dec}^2 t_3}{T_1 + T_2}} = \sqrt{\frac{(1.75)^2 0.167 + (97.6 \cdot 10^{-3})^2 0.167 + (-1.56)^2 0.167}{0.5 + 0.25}} = 1.11 \text{ Nm}$$

Essa appare come una media quadratica perchè, intuitivamente, gli effetti del riscaldamento variano con il quadrato della corrente, che in un servomotore brushless è direttamente proporzionale alla coppia richiesta.

Servo motori S56-H 4 Poli (Alimentazione 3x400 V c.a.)

		3000 1/min				6000 1/min				
		S56 D6/3	S56 01/3	S56 02/3	S56 03/3	S56 D6/6	S56 01/6	S56 02/6	S56 03/6	
<b>PRESTAZIONI</b>										
Coppia di stallo ( $\Delta\vartheta=100 \text{ K}$ )	$M_0$	0,6	1,3	1,9	2,8	0,6	1,3	1,9	2,8	Nm
Velocità nominale	$n$	3000	3000	3000	3000	6000	6000	6000	6000	1/min
Potenza nominale	$P_n$	0,16	0,31	0,50	0,69	0,25	0,57	0,82	1,19	kW
Coppia nominale	$M_n$	0,5	1,0	1,6	2,2	0,4	0,9	1,3	1,9	Nm
Coppia di picco	$M_{pk}$	1,7	3,3	4,8	6,6	1,7	3,3	4,8	6,6	Nm
<b>DATI FISICI</b>										
Velocità massima	$n_{max}$	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	1/min
Inerzia rotore	$J$	0,73	1,40	1,84	2,28	0,73	1,40	1,84	2,28	$10^{-4} \text{ kgm}^2$
Accelerazione alla coppia di picco	$a_{pk}$	23300	23600	26100	28900	23300	23600	26100	28900	rad/s <sup>2</sup>
<b>DATI TERMICI</b>										
Costante di tempo termica	$T_t$	50	45	76	95	50	45	76	95	min
Soglia d'intervento protezione	$\vartheta_{max}$	140	140	140	140	140	140	140	140	°C
<b>DATI ELETTRICI</b>										
Numero poli	$2p$	4	4	4	4	4	4	4	4	
Connessione		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
Costante di tensione	$K_e$	0,84	0,84	0,84	0,84	0,42	0,42	0,42	0,42	Vs
Costante di coppia	$K_t$	1,45	1,45	1,45	1,45	0,73	0,73	0,73	0,73	Nm/A
Resistenza concatenata (20°C)*	$R_w$	160	53	29	19	39	13	8	5	Ω
Induttanza concatenata*	$L_w$	395	177	118	80	98	45	30	20	mH
F.c.e.m. alla velocità nominale	$E_n$	263	263	263	263	263	263	263	263	V
Corrente di stallo	$I_0$	0,4	0,9	1,3	1,9	0,8	1,8	2,6	3,6	Arms
Corrente nominale	$I_n$	0,3	0,7	1,1	1,5	0,6	1,2	1,8	2,6	Arms
Corrente di picco	$I_{pk}$	1,2	2,3	3,3	4,6	2,3	4,6	6,6	9,1	Arms

\* misurata fra i morsetti di alimentazione

Il motore selezionato risulta confermato, dato che vengono soddisfatte le disequazioni seguenti:

$$\tau_{eff} \leq \tau_N \quad \tau_{acc} \leq \tau_{pk}$$