



Zeno Martini (admin)

SCELTA DELLA TAGLIA DI UN MOTORE

27 November 2005

Regime permanente e regime variabile

Le condizioni operative di un sistema di azionamento, sono distinte in regime stazionario e regime variabile. Il primo si ha quando la velocità mantiene un valore costante nel tempo, cioè le accelerazioni delle parti in movimento sono nulle; il secondo quando le accelerazioni sono significative. Il regime variabile può essere anche considerato un rapido passaggio da uno stato stazionario ad un altro. Il sistema è allora caratterizzato da almeno una costante di tempo che determina la durata naturale del passaggio da una velocità ad un'altra. E' una costante legata alle energie in gioco, principalmente l'energia cinetica, che non possono variare istantaneamente. E' dunque una proprietà intrinseca del sistema che impedisce variazioni arbitrarie di velocità in tempi arbitrari. Il regime è variabile quando le variazioni di velocità avvengono in tempi confrontabili con la costante di tempo. Se la velocità non è costante ma i tempi di variazione sono molto maggiori della costante di tempo, si ha il regime quasi-stazionario.

Il progetto di un azionamento si può scindere in un dimensionamento relativo al regime quasi-stazionario seguito, se necessario, da un dimensionamento dinamico, cioè relativo al regime variabile.

Questo articolo illustra a grandi linee i criteri per il dimensionamento di un azionamento in regime stazionario o quasi-stazionario.

In regime stazionario la coppia motrice è uguale alla coppia resistente.

In regime variabile invece la coppia motrice non deve solo far fronte alla coppia resistente, ma anche alle coppie di inerzia.

Quindi:

- **Regime stazionario:** $C_m = C_r$
- **Regime variabile:** $C_m = C_r + C_J$

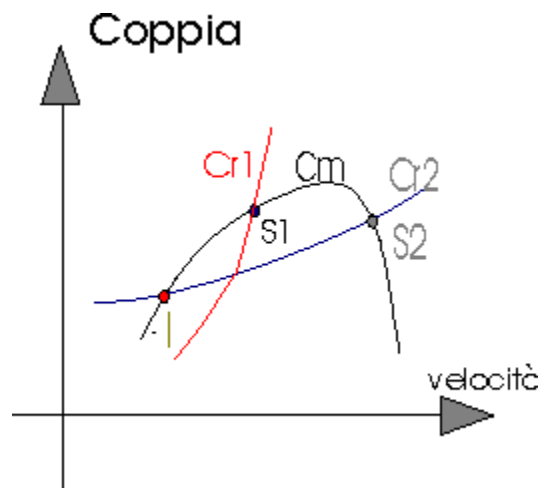
Caratteristiche meccaniche, stabilità e campi operativi

Al regime stazionario si possono applicare approcci progettuali abbastanza semplici, basati sulle caratteristiche meccaniche statiche di motori e carichi.

La caratteristica meccanica per i corpi rotanti è il legame esistente tra coppia e velocità. Nel piano cartesiano coppia-velocità angolare, C (Nm) - ω (rad/s), o coppia-giri al minuto, C - n (rpm) [1], corrisponde ad una curva la cui forma è tipica del motore o del carico e la cui posizione dipende dalle condizioni di funzionamento. Nella rappresentazione grafica si considerano positive le coppie motrici del motore e le coppie resistenti del carico.

In regime stazionario il punto di funzionamento di un sistema è dato dall'intersezione della caratteristica meccanica del motore con quella del carico, dove, appunto, la coppia motrice è uguale alla coppia resistente.

In fig. sm.1 sono tracciate porzioni di una ipotetica caratteristica meccanica di un motore e quelle di due possibili carichi. Vi sono tre intersezioni che corrispondono a tre distinti punti di funzionamento. I punti S1 ed S2 sono punti di funzionamento stabile, poiché ad un'eventuale variazione della velocità corrisponde una coppia risultante $C_m - C_r$ che dà luogo ad un'accelerazione contraria. Il punto I invece è un instabile, in quanto l'accelerazione conseguente ad una variazione di velocità è concorde con la variazione stessa, per cui la velocità si allontana ulteriormente dal valore di partenza. La regola per avere un funzionamento stabile è che la *pendenza della curva C_m deve essere inferiore a quella della curva C_r* .



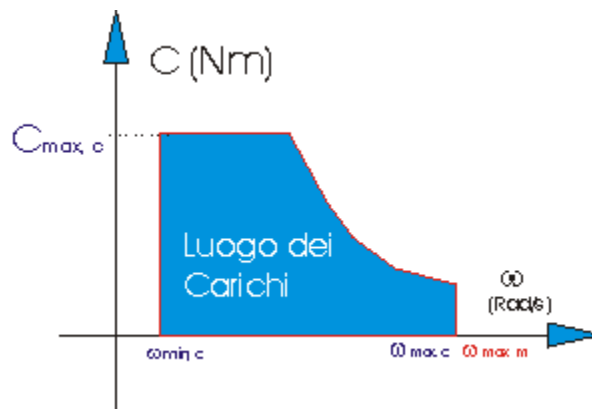
sm. 1

In genere esistono, o vengono stabiliti, dei limiti di velocità e di coppia, i quali definiscono l'area entro cui stanno le porzioni consentite delle caratteristiche meccaniche.

L'insieme di tutte le possibili condizioni in cui il carico deve operare è detto luogo dei carichi.

Le caratteristiche dei carichi possono essere dipendenti o meno dalla velocità. Un peso sollevato da un argano offre una coppia resistente costante, mentre una pompa od un ventilatore incontrano una coppia resistente che dipende da una potenza della velocità. Il generico luogo dei carichi è un'area delimitata da due rette verticali in corrispondenza delle velocità minima e massima ammesse, e da una retta orizzontale che corrisponde alla coppia massima prevista. La coppia massima può aversi fino ad una certa velocità, detta velocità base. Oltre quella velocità, fino al valore massimo, la coppia può decrescere proporzionalmente alla velocità; in tal caso il carico richiede una potenza costante. La retta orizzontale della coppia massima è allora raccordata alla retta verticale relativa alla velocità massima, da un'iperbole equilatera. E' quanto capita ad esempio in presenza di un aspo avvolgitore o di un mandrino che aziona una fresa.

La fig. sm.2 rappresenta il generico luogo dei carichi.



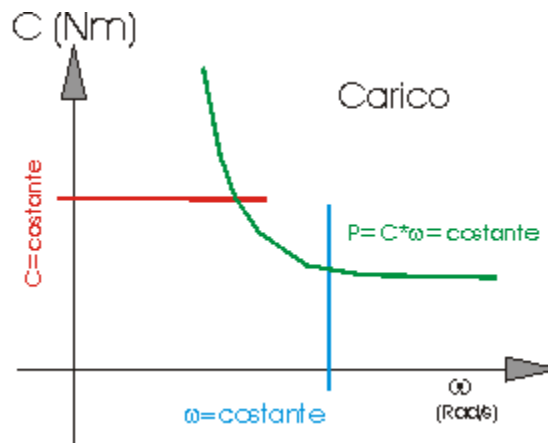
sm. 2

Le caratteristiche meccaniche dei motori possono essere raggruppate in tre categorie.

1. Caratteristica (o tratto di essa) approssimabile con una retta verticale ($w =$ costante): i motori possono essere considerati generatori di velocità, in quanto la velocità è indipendente dalla coppia erogata. Esempio ne sono i motori sincroni, quando la frequenza di alimentazione è costante; anche gli asincroni hanno un comportamento simile, come i motori a corrente continua ad eccitazione derivata od indipendente, con eventuale controllo di velocità.

2. Caratteristica (o tratto di essa) approssimabile una retta orizzontale ($C=\text{costante}$): i motori possono essere considerati generatori di coppia. Per avere caratteristiche di questo tipo è indispensabile un sistema di alimentazione che controlli la corrente. Per entrambe le tipologie precedenti la potenza erogata dipende dalla velocità e la potenza massima si ha solo ad una data velocità. A velocità inferiori il motore non può sfruttare la sua piena potenza.
3. Caratteristica (o tratto di essa) approssimabile con un'iperbole: i motori sono a potenza costante ($P=C*\omega=\text{costante}$). Possono allora erogare la piena potenza a qualsiasi velocità, quindi si adattano naturalmente al carico. Esempi ne sono i motori a corrente continua eccitati in serie od i motori cosiddetti universali che da essi derivano.

Nella fig. sm.3 sono mostrate le caratteristiche dette.



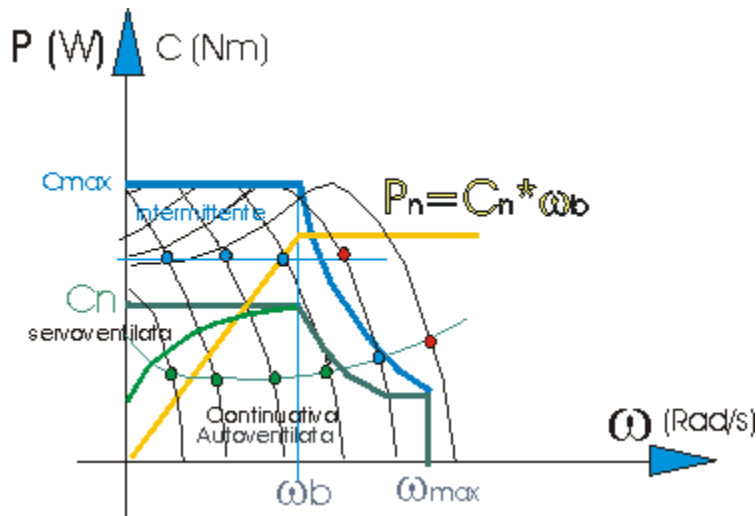
sm. 3

L'insieme di tutte le possibili condizioni di in cui il motore può funzionare è il campo operativo.

Sono fondamentalmente problemi termici, sia del motore che del sistema di alimentazione, nonché problemi meccanici, ad imporre limitazioni di coppia e di velocità. Nel campo operativo si distinguono in genere, una zona a coppia costante, che va dalla velocità nulla ad una velocità di base, ω_b , ed una zona a potenza costante fino alla velocità massima, ω_{max} , dove la coppia è inversamente proporzionale alla velocità. Il campo operativo è poi ulteriormente suddiviso in aree a seconda del tipo di funzionamento ammesso (continuo od intermittente).

Nella figura sm.4 sono tracciate le caratteristiche meccaniche di un motore asincrono alimentato da un inverter. In verde è tracciato il campo operativo continuativo,

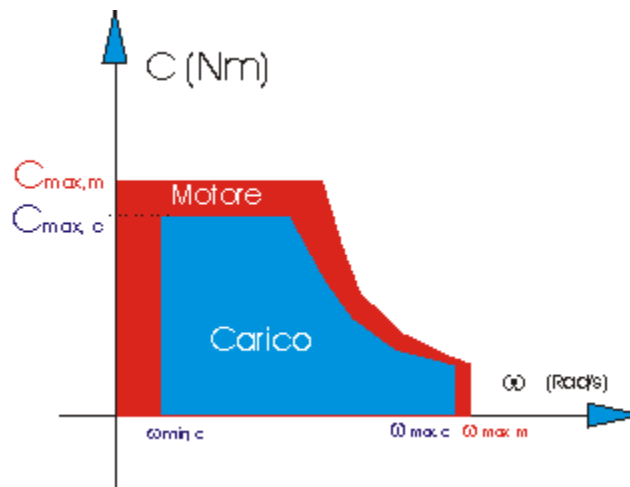
autoventilato e con ventilazione forzata, ed intermittente. Sono rappresentate un paio di caratteristiche di carico. I punti di funzionamento ammessi sono quelli interni ai campi operativi; quelli esterni non possono essere mantenuti in quanto porterebbero alla rottura del motore o del suo sistema di alimentazione. E' anche tracciata la curva della potenza che si ottiene con la coppia nominale; dopo la velocità base la potenza è costante e pari alla nominale



sm. 4

Il criterio di scelta

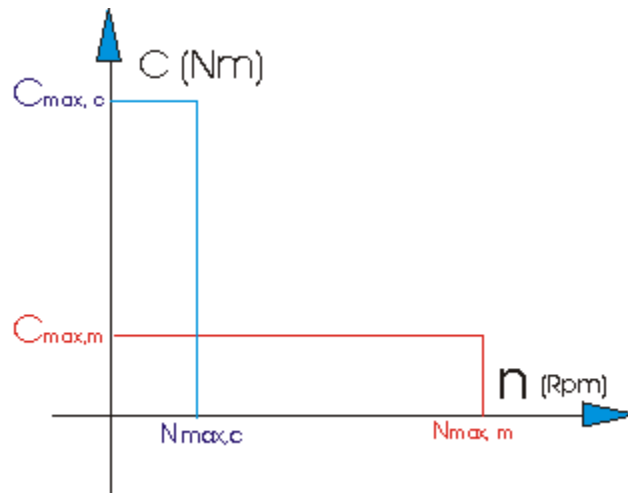
Il criterio generale di scelta di un motore per un azionamento quasi-stazionario consiste nel confrontare i campi operativi del motore ed il luogo dei carichi in modo che, graficamente, **il luogo dei carichi sia interno al campo operativo**. (fig. sm.5):



sm. 5

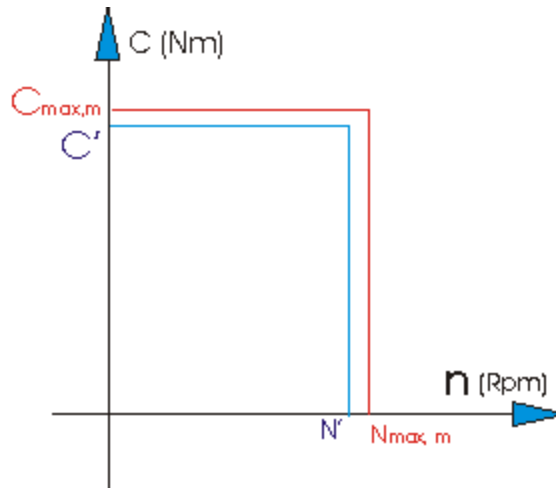
Nella stragrande maggioranza dei casi se si considera un motore che abbia una potenza nominale maggiore od uguale a quella massima richiesta dal carico, che è la prima condizione di scelta, il luogo dei carichi non è interno al campo operativo del motore. I motori infatti sono costruiti per velocità elevate e coppie limitate in quanto la potenza specifica, cioè i watt per unità di peso, è direttamente proporzionale alla velocità.

Le macchine operatrici per contro, necessitano di coppie elevate a basse velocità. Ci si trova dunque quasi sempre nelle condizioni di figura sm.6



sm. 6

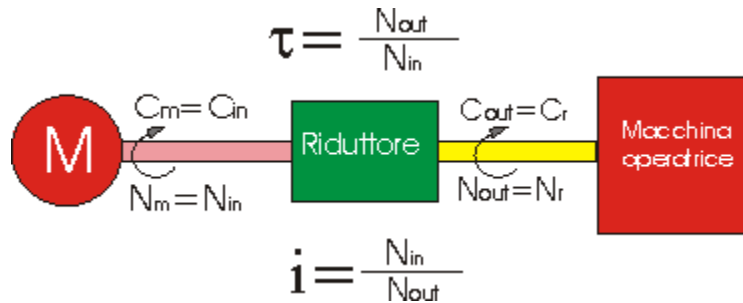
Occorre allora fare in modo che il motore "veda" un carico diverso, che richiede una coppia massima minore od al massimo uguale a quella che esso può erogare. Bisogna che i limiti $C_{max,c}$, $w_{max,c}$ diventino, dal punto di vista del motore, C' ed N' come mostrato in figura sm.7



sm. 7

Il riduttore

La "lente" attraverso cui il motore vede il carico, cioè il dispositivo che adatta le caratteristiche del carico a quelle del motore è il riduttore, illustrato nella fig. sm.8.



sm. 8

Si tratta di un dispositivo che trasmette la potenza meccanica dal motore alla macchina operatrice modificandone le caratteristiche di coppia e velocità. La potenza meccanica è infatti il prodotto delle due grandezze. Indicate con C_{in} , C_{out} , rispettivamente la coppia motrice all'ingresso ed all'uscita del riduttore, con w_{in} , w_{out} , le velocità angolari, se consideriamo un riduttore ideale, cioè a rendimento unitario, la potenza è integralmente trasmessa e si ha:

$$C_{in} \cdot w_{in} = C_{out} \cdot w_{out}$$

Si definisce il rapporto di riduzione :

$$t = N_{out} / N_{in}$$

Si ha in, in caso di rendimento unitario, anche $t = C_{in}/C_{out}$.

NB: Spesso nei cataloghi tecnici si usa l'inverso detto anche rapporto di trasmissione indicato con i

$$i = 1/t = N_{in}/N_{out}$$

Può essere utile proporre, specie per chi ha più dimestichezza con i concetti elettrici che con quelli meccanici, l'analogia del riduttore con il trasformatore. Anche il trasformatore trasferisce potenza e, se il rendimento è unitario, la potenza di uscita è uguale alla potenza in ingresso. In termini di grandezze elettriche $U_{in} \cdot I_{in} = U_{out} \cdot I_{out}$. Il rapporto di trasformazione è $k = U_{in}/U_{out} = I_{out}/I_{in}$. Si può allora stabilire una corrispondenza tra rapporto di trasmissione e rapporto di trasformazione; tra velocità angolare e tensione; tra coppia e corrente. Anche il trasformatore serve ad adattare le esigenze del carico con le esigenze congiunte di generatore e linea di trasmissione. Gli utilizzatori richiedono tensioni basse, le linee di trasmissione alte.

Per un riduttore non ideale occorre tenere conto del rendimento. Se il flusso di potenza si trasmette effettivamente dall'ingresso, dove sarà applicato il motore, all'uscita dove sarà collegata la macchina operatrice, si ha il rendimento diretto:

$$h_D = C_{out} \cdot w_{out} / C_{in} \cdot w_{in}$$

quindi, in tal caso

$$C_{out} / C_{in} = h_D \cdot i$$

Se la potenza fluisce in senso inverso (quando è il carico che funziona come generatore) si ha il rendimento retrogrado: $h_R = C_{in} \cdot w_{in} / C_{out} \cdot w_{out}$

quindi,

$$C_{in} / C_{out} = h_R / i$$

L'operazione descritta in figura sm. 7 consente di stabilire il rapporto di riduzione necessario se un dato motore di potenza adeguata deve azionare un determinato carico. Nel caso di figura sarà

$i = N'/N_{max,c}$. Il massimo rapporto di trasmissione possibile è $i_{max} = N_{max,m}/N_{max,c}$ essendo $N_{max,m}$ la velocità massima per il motore.

Il procedimento per scegliere il motore ed il riduttore noto che sia il carico può essere così riassunto.

1. Si calcola la potenza massima che il carico richiede : $P_{\max,c} = C_{\max,c} \cdot w_{\max,c}$
2. Si sceglie un motore che abbia una potenza almeno uguale a quella massima richiesta dal carico, ipotizzando valori attendibili di rendimento dell'eventuale riduttore: $P_n \geq P_{\max,c} / \eta_p$
3. Si tracciano sullo stesso diagramma C-n il campo operativo ed il luogo dei carichi, in modo che il luogo dei carichi sia interno al campo operativo. Generalmente, si opera in forma normalizzata, cioè in ordinate è riportato il rapporto tra la coppia motrice effettiva e quella nominale ($C/C_n - n$)
4. I limiti di velocità e di coppia del luogo dei carichi, saranno dati da $i \cdot n_{\max,c}$ e $C_{\max,c} / (i \cdot h) / C_n$ il che permette di stabilire il rapporto di trasmissione i . Nel caso di un asincrono alimentato da inverter il cui campo operativo ha una zona a potenza costante dalla velocità base $n_0 = 60 \cdot f / p$ fino ad una velocità massima $n_{\max,m}$ generalmente uguale a $2 \cdot n_0$ si fa in modo che sia $n_0 \leq i \cdot n_{\max,c} \leq 2 \cdot n_0$. Nei limiti del possibile $i = 120 \cdot f / (p \cdot n_{\max,c})$

A questo punto può essere necessario il dimensionamento del sistema di alimentazione. Ci limitiamo al caso di un asincrono azionato da un inverter.

Ciò che occorre stabilire è la corrente nominale dell'inverter che deve essere superiore a quella assorbita dal motore almeno di un 20%.

1. Se il motore lavora in zona a potenza costante, detta I_n la corrente nominale del motore, P_n la sua potenza nominale, P la potenza effettivamente richiesta dal carico, la corrente nominale dell'inverter si può calcolare con: $I = I_n \cdot P / P_n$
2. Se il motore lavora solo nella zona a coppia costante (il che comunque è sempre indice di un non completo sfruttamento della potenza del motore) la corrente nominale dell'inverter, detta C_n la coppia nominale del motore e C quella richiesta effettivamente dal carico sarà: $I = I_n \cdot C / C_n$.

Esempio 1

Un motore asincrono deve sollevare un peso di 200 Kg alla velocità di 0,7 m/s. Il diametro del tamburo su cui si avvolge la fune è di 0,5 m. Scegliere il motore e l'eventuale riduttore.

La coppia che il motore deve fornire è $C_m = P \cdot D / 2 = 200 \cdot 9,8 \cdot 0,5 / 2 = 490 \text{ Nm}$

La velocità di rotazione dell'albero è $w = 2v / D = 1,4 / 0,5 = 2,8 \text{ rad/s}$ che corrispondono a $n = 60 \cdot w / 2\pi = 9,55 \cdot 2,8 = 26,74 \text{ rpm}$

La potenza che il motore deve sviluppare all'albero è $P=C \cdot \omega = 490 \cdot 2,8 = 1372 \text{ W}$. Se teniamo conto del rendimento di un eventuale riduttore che possiamo ipotizzare sul 70%, il motore dovrà sviluppare all'albero una $P = 1372 / 0,70 = 1960 \text{ W}$

Sfogliando i cataloghi di un costruttore (un estratto dei quali riportato in fondo all'articolo) troviamo

N. Poli	Pn (kW)	N (rpm)	Cn(Nm)	M (kg)
2	2,2	2840	7,4	14
4	2,2	1420	14,8	23
6	2,2	940	22,3	25
8	2,2	710	29,5	45

Il luogo dei carichi ed i campi operativi dei due motori sono tutti rettangoli. Il rapporto di trasmissione massimo e scelto sono , nei quattro casi è

- $i_2 = 2840 / 26,74 = 106 \rightarrow 100$
- $i_4 = 1420 / 26,74 = 53 \rightarrow 50$
- $i_6 = 940 / 26,74 = 35 \rightarrow 1/30$
- $i_8 = 710 / 26,74 = 27 \rightarrow 25$

Osserviamo che un rapporto di riduzione maggiore darebbe un margine di velocità inutile, con un minore margine di coppia che è meglio avere. Se il rendimento diretto di ogni riduttore è quello ipotizzato del 70% si avrà,

Con il 2 poli un margine è $100 \cdot 7,4 \cdot 0,7 = 518 - 490 = 28 \text{ Nm}$; con il 4 poli $50 \cdot 14,8 = 518 - 490 = 28 \text{ Nm}$; con il 6 poli $30 \cdot 22,3 \cdot 0,7 - 490 = 468 < 490$: occorre un riduttore di almeno $i = 1/35 \text{ Nm}$; con l'8 poli $25 \cdot 29,5 \cdot 0,7 = 516 - 490 = 26 \text{ Nm}$.

La scelta, dettata da considerazioni economiche e di ingombro, sarà tra il due ed il quattro poli

Esempio 2

Un motore asincrono deve azionare ad una velocità variabile da 0,05 a 0,3 m/s un nastro trasportatore, inclinato rispetto al piano orizzontale di $\alpha = 30^\circ$, che trasporta

un carico di 400 kg. Il rullo motore ha un diametro $d=20$ cm. La totale coppia di attrito è data da un valore costante $C_a=20$ Nm aumentata di una quantità proporzionale alla componente del peso perpendicolare al nastro secondo un coefficiente di attrito $f=0,1$. Si considerano trascurabili le accelerazioni. Sono disponibili i motori mostrati nelle tabelle e riduttori con rapporto di trasmissione di $i=50$ e $i=60$ che hanno rendimenti diretti del 50%, adeguati alla potenza di ogni motore. E' noto il campo operativo normalizzato dei motori azionati dall'inverter (figura sm.9).

La velocità massima del carico è $n_{\max}=9,55*v/(d/2)=9,55*0,3/0,1=28,65$ rpm; quella minima $n_{\min}=9,55*v/(d/2)=9,55*0,05/0,1=4,77$ rpm

La scelta del rapporto di trasmissione i dipende dalla velocità di base del motore a 50 Hz, quindi dal numero di poli. Se è un 4 poli che a 50 Hz ha una velocità prossima a quella di sincronismo di 1500 rpm sarà grosso modo $i=2*1450/28,65=101$, con un 8 poli che a 50 Hz ha una velocità di sincronismo di 750 rpm sarà grossomodo $i=2*720/28,65=50$. E' questo il rapporto di trasmissione massimo, che è preferibile scegliere, ma si può anche sceglierne uno minore, facendo sempre in modo che il motore lavori nella zona a potenza costante.

Il riduttore con $i=50$ è l'ideale per il motore ad 8 poli; quello con $i=60$ può andar bene per il motore a quattro poli.

La coppia che i motori devono fornire è $C_m=C_r*i/h$. La coppia resistente complessiva comprende la componente tangenziale del peso, la coppia d'attrito costante data e la coppia d'attrito proporzionale alla componente normale del peso. Quindi

$$C_r=d/2*(P*sina + f*P*cosa)+C_a=0,1*(400*9,8*0,5+0,1*400*9,8*0,866)+20=$$

$$=0,1*(1960+339)+20=250 \text{ Nm.}$$

Con i riduttori a disposizione il motore quadripolare, deve fornire la coppia

$$C_m=(250/(60*0,5))=8,3 \text{ Nm; quello ad otto poli } C_m=250/(50*0,5)=10 \text{ Nm}$$

La potenza di entrambi i motori deve essere almeno pari alla potenza che il carico richiede diviso il rendimento del riduttore. Avendo i riduttori lo stesso rendimento:

$$P_n=C_r*n_{\max}*0,105=250*28,65*0,105/0,5=1504 \text{ W}$$

Si decide di scegliere un motore di $P_n=2,2$ kW. Il motore ad otto poli di questa potenza, ha una velocità nominale di 670 rpm, ed una coppia nominale $C_n=20,8$ Nm, mentre il 4 poli ha una velocità nominale di 1420 rpm ha una $C_n=9,84$ Nm. Il margine di coppia è a favore dell'otto poli $C_m/C_n=10/20,8=0,48$ contro $C_m/C_n=8,3/9,84=0,84$

; c'è anche un'ulteriore ragione a favore di esso. La velocità minima di rotazione è per esso $n_{\min}=50*4,77 = 238$ rpm mentre per il quattro poli $n_{\min}=60*4,77=286$ rpm. Alla prima velocità corrisponde la frequenza $f=(238/670)*50=18$ Hz; alla seconda $f=(286/1420)*50=10$ Hz. Il quattro poli necessita di perciò servoventilazione (a 15 Hz $Climte=0,65*9,84=6,4$ Nm < 8,3 Nm) mentre l'otto poli non ne ha bisogno: $0,65*20,8=13,5$ Nm > 10. A sfavore dell'otto poli, oltre le dimensioni (23 kg contro 14) c'è che per raggiungere la velocità massima di 1432 rpm occorre alimentarlo con una frequenza maggiore del doppio della nominale ($f=50*1432/670=106$ Hz).

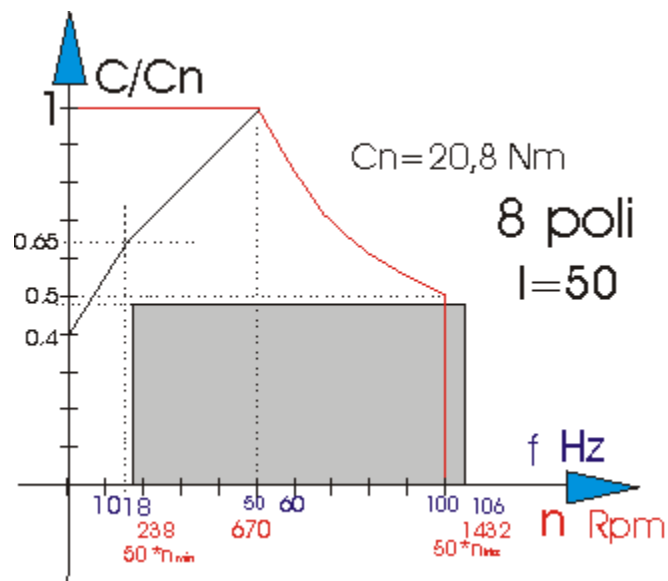
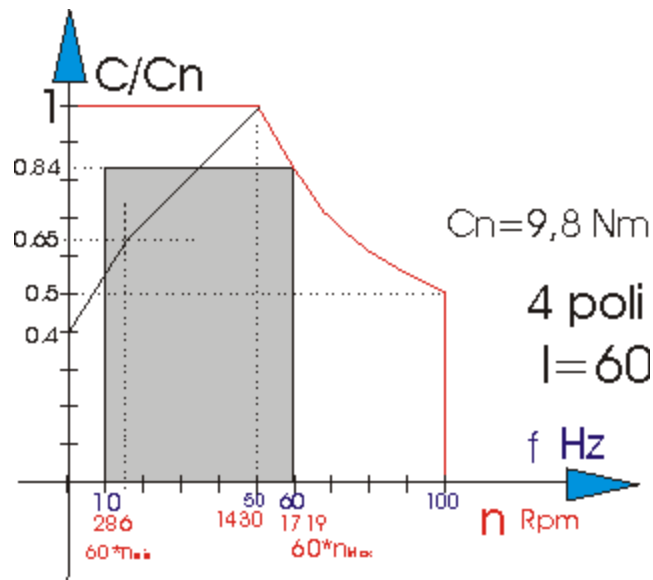
La fig. sm.9 riassume graficamente i risultati.

L'inverter, che deve avere una potenza nominale pari o superiore a quella del motore, tenendo presente che entrambi lavorano in zona a potenza costante, è necessario che abbia una corrente nominale $I=4,9*1504/2200=3,4$ per il quattro poli; $I=5,7*1504/2200=3,9$ A per l'otto poli. Tenendo conto di un margine minimo del 20%, $I=4,1$ A e 4,7 A

Entrambe le combinazioni sono accettabili ma, come già osservato il quattro poli necessita di servoventilazione ed ha un minore margine di coppia.

Per contro l'otto poli è più ingombrante ed ha un rendimento inferiore e necessita di un inverter con corrente nominale leggermente maggiore. La scelta tra le due soluzioni verrà da considerazioni economiche.

Se si disponesse di un riduttore con $i=100$ e con le stesse caratteristiche di rendimento la preferenza sarebbe senz'altro per il quattro poli.



sm. 9

4 POLI

Potenza	Velocità	In	cosfi	Rendimento	Mn	Massa
kW	rpm	A	cosφ	η%	Nm	kg
1.1	1400	2.75	0.78	76.5	7.5	13
1.5	1400	3.52	0.79	78.6	10.2	14
2.2	1420	4.9	0.82	82	14.8	23

3	1420	6.44	0.83	83	20.2	25
4	1440	8.36	0.83	85.1	26.5	28
5.5	1440	11.2	0.84	86.6	36.5	45

8 POLI

Potenza	Velocità	In	cosfi	Rendimento	Mn	Massa
kW	rpm	A	cosφ	η%	Nm	kg
1.1	700	3.21	0.69	74	15	25
1.5	700	4.28	0.69	76	20,4	28
2.2	710	5.7	0.72	79	29,5	45
3	710	7.53	0.74	79.9	40.3	55
4	720	9.8	0.73	81	53	105
5.5	720	12.9	0.74	83	72.5	115

[1] La velocità angolare ω è legata alla velocità di rotazione espressa in giri al minuto n , (rpm) da: $\omega = 2\pi n / 60$. Quindi $\omega = 0,105 \cdot n$