

Il dimensionamento di un azionamento



1.	Introduzione	5
2.	L'azionamento	6
3.	Descrizione generale di una procedura di dimensionamento	7
4.	Il motore a induzione in c.a.	9
4.1	Nozioni di base	9
4.2	Corrente del motore	11
4.2.1	Campo di flusso costante	12
4.2.2	Range di indebolimento di campo	13
4.3	Potenza del motore	14
5.	Le leggi principali della meccanica	15
5.1	La rotazione	15
5.2	Gli ingranaggi e il momento di inerzia	18
6.	Tipologie di carico	20
7.	Capacità di carico del motore	23
8.	La selezione del convertitore di frequenza e del motore	24
8.1	Esempio di applicazione pump and fan	24
8.2	Esempio di applicazione a coppia costante	27
8.3	Esempio di applicazione a potenza costante	29
9.	Raddrizzatore e trasformatore di ingresso	33
9.1	Raddrizzatore	33
9.2	Trasformatore	34
10.	Indice analitico	36

Capitolo 1 - Introduzione

Generalità

Il dimensionamento di un azionamento è un compito che richiede un'attento esame di tutti i fattori e presuppone una conoscenza completa del sistema, compresi elementi quali l'alimentazione elettrica, la macchina comandata, le condizioni ambientali, il motore e gli azionamenti. Il tempo dedicato alla fase del dimensionamento sarà compensato successivamente dalla possibilità di realizzare notevoli risparmi.

Capitolo 2 - L'azionamento

Un singolo azionamento in c.a. comprende normalmente un trasformatore di ingresso o un alimentatore elettrico, un convertitore di frequenza, un motore in c.a. e un carico. All'interno del singolo convertitore di frequenza si trovano un raddrizzatore, un collegamento in c.c. e un'unità inverter.

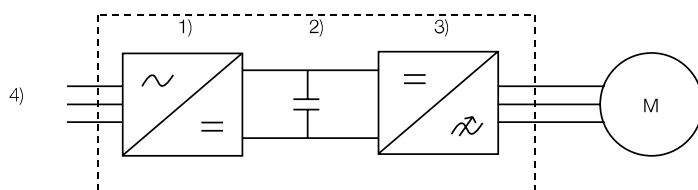


Figura 2.1 Un singolo convertitore di frequenza comprende 1) raddrizzatore, 2) collegamento in c.c., 3) unità inverter e 4) alimentatore elettrico.

Nei sistemi ad azionamento multiplo si utilizza normalmente un'unità raddrizzatore separata. Le unità inverter sono collegate direttamente a un collegamento in c.c. comune.

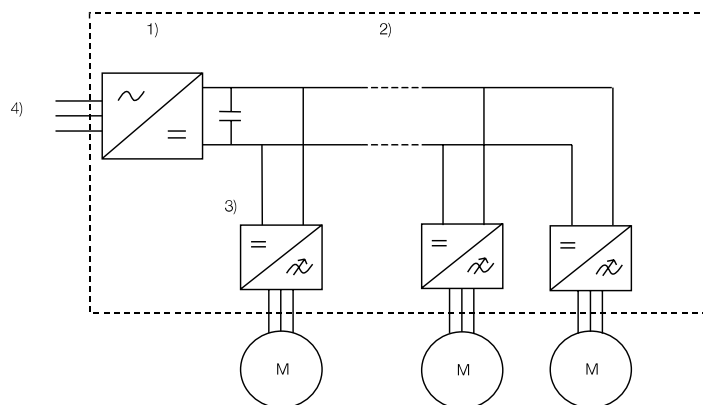


Figura 2.2 Un azionamento che comprende 1) una sezione di alimentazione separata, 2) un collegamento in c.c. comune, 3) sezioni azionamento e 4) alimentatore elettrico.

Capitolo 3 - Descrizione generale di una procedura di dimensionamento

Nel presente capitolo vengono illustrate le fasi principali necessarie per il dimensionamento del motore e del convertitore di frequenza.

1) Verificare le condizioni iniziali.

Per selezionare il convertitore di frequenza e il motore in modo corretto, verificare il livello di tensione (380 V ... 690 V) e di frequenza (50 Hz ... 60 Hz) della rete di alimentazione. La frequenza della rete di alimentazione non limita la gamma di velocità dell'applicazione.

2) Verificare i requisiti di processo. E' necessaria una coppia di avviamento? Quale gamma di velocità è utilizzata? Quale tipo di carico è previsto? Segue una descrizione delle tipologie di carico più diffuse.

3) Selezionare il motore.

Il motore elettrico va considerato come una sorgente di coppia. Il motore deve resistere a sovraccarichi di processo ed essere in grado di produrre una determinata quantità di coppia. La capacità di sovraccarico termico del motore non deve essere superata. Per determinare la coppia massima disponibile nella fase del dimensionamento è necessario prevedere un margine del 30% per la coppia massima del motore

4) Selezionare il convertitore di frequenza

Il convertitore di frequenza viene selezionato in base alle condizioni iniziali e al motore selezionato. E' necessario verificare che convertitore di frequenza sia idoneo a produrre la corrente e la potenza richieste. E' opportuno considerare la capacità di sovraccarico potenziale del convertitore di frequenza in caso di un carico ciclico di breve termine.

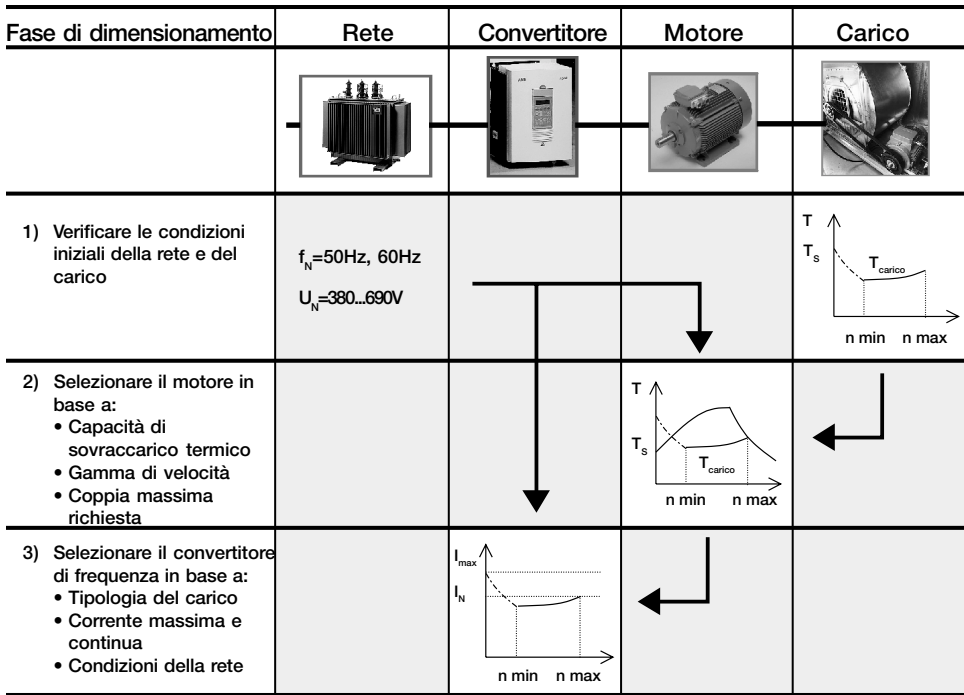


Figura 3.1 Descrizione generale della procedura di dimensionamento.

Capitolo 4 - Il motore a induzione in c.a.

I motori a induzione sono diffusamente utilizzati in ambito industriale. Nel presente capitolo se ne descrivono alcune caratteristiche di base.

4.1 Nozioni di base

I motori a induzione convertono l'energia elettrica in energia meccanica. La conversione dell'energia si basa sull'induzione elettromagnetica. Il fenomeno dell'induzione determina lo scorrimento del motore.

Tale scorrimento viene spesso definito come il punto nominale del motore (frequenza (f_n), velocità (n_n), coppia (T_n), tensione (U_n), corrente (I_n) e potenza (P_n)). Al punto nominale corrisponde uno scorrimento nominale:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} * 100 \% \quad (4.1)$$

quando n_s è la velocità sincrona:

$$n_s = \frac{2 * f_n * 60}{\text{numero poli}} \quad (4.2)$$

Quando il motore è collegato a un'alimentazione con tensione e frequenza costanti, ne risulta una curva della coppia come la seguente:

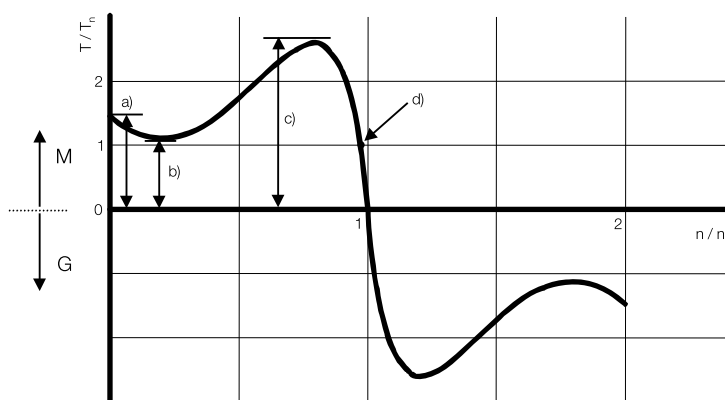


Figura 4.1 Tipica curva coppia/velocità di un motore a induzione collegato alla rete di alimentazione (D.O.L., Direct-On-Line). Nell'immagine a) è la coppia bloccata del rotore, b) è la coppia d'arresto, c) è la coppia massima del motore, T_{max} e d) è il punto nominale del motore.

La coppia massima di un motore a induzione standard (T_{max} , detta anche coppia massima in esercizio continuo o coppia alla tensione di scarica) è normalmente pari a 2-3 volte la coppia nominale. La coppia massima è disponibile con scorrimento s_{max} , che è maggiore dello scorrimento nominale. Per utilizzare in modo efficiente un motore a induzione, lo scorrimento del motore dovrebbe rientrare nel campo - $s_{max} \dots s_{max}$, che si ottiene controllando la tensione e la frequenza. Il controllo può essere effettuato utilizzando un convertitore di frequenza.

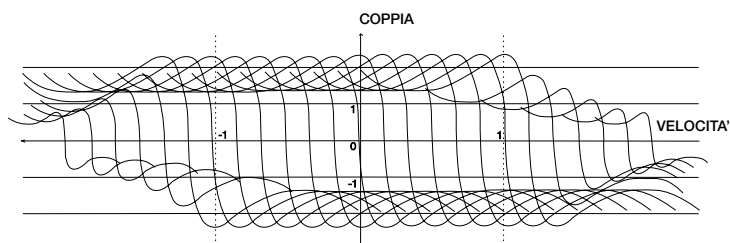


Figura 4.2 Curve della coppia e della velocità di un motore a induzione alimentato da un convertitore di frequenza. T_{max} è disponibile per sovraccarichi di breve termine al di sotto del punto di indebolimento di campo. I convertitori di frequenza, tuttavia, limitano normalmente la coppia massima disponibile al 70% di T_{max} .

Il campo di frequenza al di sotto della frequenza nominale è denominato campo a flusso costante. Al di sopra della frequenza/velocità nominali, il motore funziona nel range di indebolimento di campo. Nel range di indebolimento di campo, il motore può funzionare a potenza costante, e pertanto il range di indebolimento di campo viene talvolta definito campo di potenza costante.

La coppia massima di un motore a induzione è proporzionale al quadrato del flusso magnetico ($T_{max} \sim \psi^2$). Ciò significa che la coppia massima è tendenzialmente costante in corrispondenza del campo di flusso costante. Al di sopra del punto di indebolimento di campo, la riduzione della coppia massima è inversamente proporzionale al quadrato della frequenza.

$$(T_{max} \sim \left(\frac{f_n}{f_{act}} \right)^2).$$

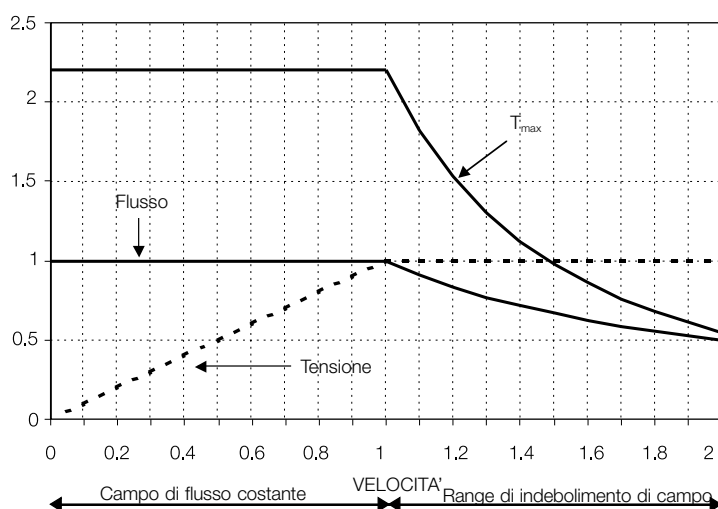


Figura 4.3 Coppia massima, tensione e flusso in funzione della velocità relativa.

4.2 Corrente del motore

La corrente del motore a induzione comprende due componenti: corrente reattiva (i_{sd}) e corrente attiva (i_{sq}). La componente di corrente reattiva comprende la corrente di magnetizzazione (i_{magn}), mentre la corrente attiva è la coppia che produce la componente di corrente. Le componenti della corrente attiva e reattiva sono perpendicolari fra loro.

La corrente di magnetizzazione (i_{magn}) rimane approssimativamente costante nel campo di flusso costante (al di sotto del punto di indebolimento di campo). Nel range di indebolimento di campo, la riduzione della corrente di magnetizzazione è proporzionale alla velocità.

Una stima abbastanza corretta della corrente di magnetizzazione nel campo a flusso costante consiste nella corrente reattiva (i_{sd}) in corrispondenza del punto nominale del motore.

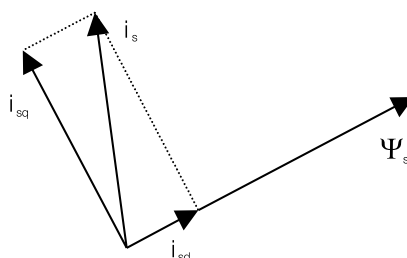


Figura 4.4 La corrente statorica (i_s) comprende le componenti di corrente reattiva (i_{sd}) e di corrente attiva (i_{sq}), perpendicolari fra loro. Il flusso statorico è indicato da ψ_s .

4.2.1 Campo di flusso costante

Al di sopra del punto di indebolimento di campo, le componenti di corrente possono essere approssimate come segue:

$$I_{sd} = I_n \left[\sin(\varphi_n) + \cos(\varphi_n) \left[\sqrt{\left(\frac{T_{max}}{T_n}\right)^2 - 1} - \sqrt{\left(\frac{T_{max}}{T_n}\right)^2 - \left(\frac{T_{load}}{T_n}\right)^2} \right] \right] \quad (4.3)$$

$$I_{sq} = I_n \left(\frac{T_{load}}{T_n} \right) \cos(\varphi_n) \quad (4.4)$$

La corrente totale del motore è pari a:

$$i_m = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2} \quad (4.5)$$

Si può riscontrare che a coppia motore uguale a zero, la componente di corrente attiva è uguale a zero. Con valori di coppia più elevati, la corrente del motore diventa quasi proporzionale alla coppia. Una buona approssimazione della corrente totale del motore è:

$$i_m = \frac{T_{load}}{T_n} * I_n, \text{ quanto } 0,8 * T_n \leq T_{load} \leq 0,7 * T_{max} \quad (4.6)$$

Esempio 4.1:

Il motore da 15 kW è caratterizzato da una corrente nominale di 32 A e da un fattore di potenza di 0,83. Qual è approssimativamente la corrente di magnetizzazione del motore al punto nominale? Qual è la corrente approssimativa totale al 120 % della coppia al di sotto del punto di indebolimento di campo?

Soluzione 4.1:

Al punto nominale la corrente di magnetizzazione può essere stimata come segue:

$$I_{sd} = I_n \sin(\varphi_n) = 32 * \sqrt{1 - 0,83^2} = 17,8 \text{ A}$$

La formula approssimativa per la corrente totale del motore con coppia al 120% da:

$$i_m = \frac{T_{load}}{T_n} * I_n = 1,2 * 32 \text{ A} = 38,4 \text{ A}$$

La formula approssimativa è stata utilizzata in quanto la coppia corrispondeva alla condizione $0,8 * T_n \leq T_{load} \leq 0,7 * T_{max}$

4.2.2 Range di indebolimento di campo

Al di sopra del punto di indebolimento di campi le componenti di corrente dipendono anche dalla velocità.

$$I_{sd} = I_n \left(\frac{n_n}{n} \left(\sin(\varphi_n) + \cos(\varphi_n) \sqrt{\left(\frac{T_{max}}{T_n} \right)^2 - 1} \right) - \cos(\varphi_n) \sqrt{\left(\frac{T_{max}}{T_n} * \frac{n_n}{n} \right)^2 - \left(\frac{T_{load}}{T_n} * \frac{n}{n_n} \right)^2} \right) \quad (4.7)$$

$$I_{sq} = I_n \left(\frac{T_{load}}{T_n} * \frac{n}{n_n} \right) \cos(\varphi_n) = I_n \left(\frac{P_{load}}{P_n} \right) \cos(\varphi_n) \quad (4.8)$$

La corrente totale del motore è pari a:

$$i_m = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2} \quad (4.9)$$

La corrente del motore può essere approssimata in modo abbastanza preciso all'interno di una determinata area operativa. La corrente del motore diventa proporzionale alla potenza relativa. Una formula approssimativa per la corrente è:

$$i_m = \frac{T_{load}}{T_n} * \frac{n}{n_n} I_n = \frac{P_{load}}{P_n} I_n \quad (4.10)$$

L'approssimazione può essere utilizzata quando:

$$0.8 * \frac{n_n}{n} * T_n \leq T_{load} \leq 0.7 * \left(\frac{n_n}{n} \right)^2 * T_{max} \quad (4.11)$$

e

$$0.8 * P_n \leq P_{load} \leq 0.7 * \frac{n_n}{n} * P_{max} \quad (4.12)$$

Nel range di indebolimento di campo la corrente supplementare necessaria per mantenere un determinato livello della coppia è proporzionale alla velocità relativa.

Esempio 4.2:

La corrente nominale del motore è pari a 71 A. Quanta corrente è necessaria per mantenere una coppia al 100% con velocità nominale di 1,2 volte ($T_{max} = 3 * T_n$).

Soluzione 4.2:

La corrente può essere calcolata utilizzando la formula di approssimazione:

$$i_m = \frac{T_{load}}{T_n} * \frac{n}{n_n} I_n = 1 * 1.2 * 71 = 85.2 \text{ A}$$

4.3 Potenza del motore

La potenza (di uscita) meccanica del motore può essere calcolata partendo dalla velocità e dalla coppia utilizzando la seguente formula:

$$P_{out} [W] = T [Nm] * \omega [rad/s] \quad (4.13)$$

Poiché la potenza del motore è spesso espressa in *kilowatt* e (1 kW = 1000 W) e la velocità in giri/min (revolutions per minute, giri al minuto, 1 giro/min = $\frac{2\pi}{60}$ rad/s), può essere utilizzata la seguente formula:

$$P_{out} [kW] = \frac{T [Nm] * n [rpm]}{9550} \quad (4.14)$$

La potenza di ingresso del motore può essere calcolata a partire dalla tensione, dalla corrente e dal fattore di potenza:

$$P_{in} = \sqrt{3} * U * I * \cos(\varphi) \quad (4.15)$$

L'efficienza del motore è il valore della potenza di uscita diviso per la potenza di ingresso:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4.16)$$

Esempio 4.3:

La potenza nominale del motore è pari a 15 kW e la velocità nominale a 1.480 giri/min. Qual è la coppia nominale del motore?

Soluzione 4.3:

La coppia nominale del motore si calcola come segue:

$$T_n = \frac{9550 * 15}{1480} \text{ Nm} = 96.8 \text{ Nm}$$

Esempio 4.4:

Qual è l'efficienza nominale di un motore da 37 kW ($P_n = 37 \text{ kW}$, $U_n = 380 \text{ V}$, $I_n = 71 \text{ A}$ e $\cos(\varphi_n) = 0,85$)?

Soluzione 4.4:

L'efficienza nominale è:

$$\eta_n = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_n}{\sqrt{3} * U_n * I_n * \cos(\varphi_n)} = \frac{37000}{\sqrt{3} * 380 * 71 * 0.85} \approx 0.931$$

Capitolo 5 - Le leggi principali della meccanica

5.1 La rotazione

Una delle principali equazioni del motore a induzione descrive la relazione tra il momento di inerzia (J [kgm²]), la velocità angolare (ω [rad/s]) e la coppia (T [Nm]). L'equazione risulta come segue:

$$\frac{d}{dt} (J \omega) = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt} = T - T_{load} \quad (5.1)$$

Nella precedente equazione si suppone una variazione sia della frequenza che del momento di inerzia. Spesso però la formula è tale che il momento di inerzia è considerato una costante:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T - T_{load} \quad (5.2)$$

La coppia T_{load} rappresenta il carico del motore. Il carico consiste nell'attrito, nell'inerzia e nello stesso carico. Al variare della velocità del motore, la coppia del motore si differenzia da T_{load} . La coppia del motore può essere considerata come l'insieme di una componente dinamica e di una componente di carico:

$$T = T_{dyn} + T_{load} \quad (5.3)$$

Se la velocità e il momento di inerzia sono costanti, la componente dinamica (T_{dyn}) è uguale a zero.

La componente di coppia dinamica determinata dall'accelerazione/decelerazione di un momento di inerzia costante (la velocità del motore cambia da Δn [giri/min] in tempo Δt [s], J è costante) risulta:

$$T_{dyn,n} = J * \frac{2\pi}{60} * \frac{\Delta n}{\Delta t} \quad (5.4)$$

La componente di coppia dinamica determinata da un momento di inerzia variabile a velocità costante n [giri/min] risulta:

$$T_{dyn,J} = n * \frac{2\pi}{60} * \frac{\Delta J}{\Delta t} \quad (5.5)$$

Se il momento di inerzia varia contemporaneamente all'accelerazione del motore, la componente di coppia dinamica può essere calcolata utilizzando un determinato intervallo di campionamento discreto. Per quanto riguarda il dimensionamento termico spesso è invece sufficiente considerare il momento di inerzia medio durante la fase di accelerazione.

Esempio 5.1:

Il momento di inerzia totale, 3 kgm², viene accelerato da una velocità di 500 giri/min a 1.000 giri/min in 10 secondi. Qual è la coppia totale necessaria se la coppia di carico costante è pari a 50 Nm?

Quale sarà la velocità di decelerazione del motore a 0 giri/min se l'alimentazione elettrica del motore viene scollegata?

Soluzione 5.1:

Il momento di inerzia totale è costante. La componente di coppia dinamica necessaria per l'accelerazione è:

$$T_{dyn} = 3 * \frac{2 \pi}{60} * \frac{1000 - 500}{10} \text{ Nm} = 15.7 \text{ Nm}$$

La coppia totale durante la fase di accelerazione è:

$$T = T_{dyn} + T_{load} = (15.7 + 50) \text{ Nm} = 65.7 \text{ Nm}$$

Se l'alimentazione elettrica del motore viene scollegata a 1.000 giri/min, il motore decelera a causa della coppia di carico costante (50 Nm). Ne consegue la seguente equazione:

$$3 * \frac{2 \pi}{60} * \frac{0 - 1000}{\Delta t} = -T_{load}$$

Il tempo di decelerazione da 1.000 giri/min a 0 giri/min risulta:

$$\Delta t = 3 * \frac{2 \pi}{60} * \frac{1000}{50} \text{ s} = 6.28 \text{ s}$$

Esempio 5.2:

L'accelerazione di un ventilatore alla velocità nominale viene effettuata con la coppia nominale. La coppia alla velocità nominale è pari all'87%. Il momento di inerzia del ventilatore è di 1.200 kgm² e il momento di inerzia del motore è pari a 11 kgm². Le caratteristiche di carico del ventilatore T_{load} sono illustrate nella *figura 5.1*.

La potenza nominale del motore è pari a 200 kW, mentre la velocità nominale è di 991 giri/min.

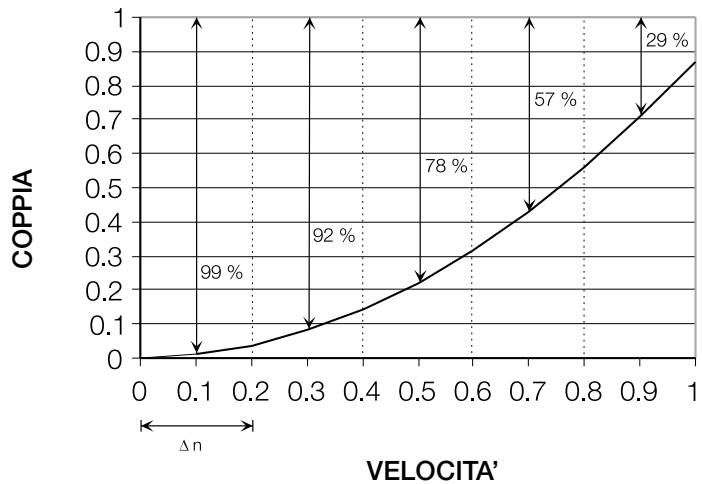


Figura 5.1 Caratteristiche della coppia di un ventilatore. Velocità e coppia sono illustrate utilizzando valori relativi.

Calcolare il tempo di avviamento approssimativo da velocità zero a velocità nominale.

Soluzione 5.2:

La coppia nominale del motore è:

$$T_n = \frac{9550 \cdot 200}{991} \text{ Nm} = 1927 \text{ Nm}$$

Il tempo di avviamento viene calcolato dividendo il campo di velocità in cinque settori. In ciascun settore (198,2 giri/min) la coppia si presume costante. La coppia per ciascun settore viene desunta dal punto medio del settore. Si tratta di una soluzione abbastanza accettabile in quanto il comportamento quadratico nel settore è approssimato con riferimento all'andamento lineare.

Il tempo per accelerare il motore (ventilatore) con coppia nominale può essere calcolato con la seguente formula:

$$\Delta t = \frac{2 \pi}{60} \cdot \frac{J_{\text{tot}} \cdot \Delta n}{T_n - T_{\text{load}}}$$

I tempi di accelerazione per diverse sezioni di velocità sono:

$$0-198,2 \text{ giri/min} \quad \Delta t = \frac{2\pi}{60} * \frac{1211 * 198,2}{0,99 * 1927} \text{ s} = 13,2 \text{ s}$$

$$198,2-396,4 \text{ giri/min} \quad \Delta t = \frac{2\pi}{60} * \frac{1211 * 198,2}{0,92 * 1927} \text{ s} = 14,3 \text{ s}$$

$$396,4-594,6 \text{ giri/min} \quad \Delta t = \frac{2\pi}{60} * \frac{1211 * 198,2}{0,78 * 1927} \text{ s} = 16,7 \text{ s}$$

$$594,6-792,8 \text{ giri/min} \quad \Delta t = \frac{2\pi}{60} * \frac{1211 * 198,2}{0,57 * 1927} \text{ s} = 22,9 \text{ s}$$

$$792,8-991 \text{ giri/min} \quad \Delta t = \frac{2\pi}{60} * \frac{1211 * 198,2}{0,29 * 1927} \text{ s} = 45,0 \text{ s}$$

Il tempo di avviamento totale 0-991 giri/min è di circa 112 secondi.

5.2 Gli ingranaggi e il momento di inerzia

Gli azionamenti sono comunemente dotati di ingranaggi. Nel calcolo della coppia del motore e del campo di velocità è necessario tenere conto degli ingranaggi. Essi sono preposti a una riduzione tra il lato carico e il lato motore in base alle seguenti equazioni (si veda inoltre la figura 5.2):

$$T_1 = \frac{T_2}{\eta} * \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (5.6)$$

$$J_1 = J_2 * \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \quad (5.7)$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} \quad (5.8)$$

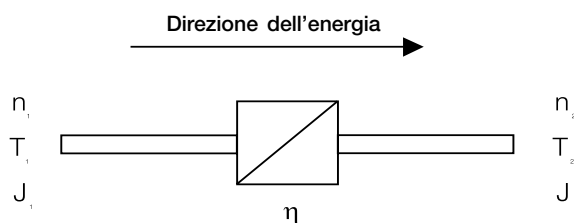


Figura 5.2 Un meccanismo di trasmissione con efficienza η . Il rapporto di trasmissione è $n_1:n_2$.

E' inoltre necessario conoscere i momenti di inerzia (J [kgm^2]) all'interno del sistema. Se non sono noti, è possibile calcolarli, ma è piuttosto difficile farlo con precisione. Normalmente i fornitori di macchine dispongono dei dati necessari.

Esempio 5.3:

Il cilindro costituisce una forma piuttosto comune di carico (rulli, tamburi, giunti, ecc.). Qual è l'inerzia di un cilindro in rotazione (massa = 1.600 kg, raggio = 0,7 m)?

Soluzione 5.3:

L'inerzia di un cilindro in rotazione, (con massa m [kg] e raggio r [m]) si calcola come segue:

$$J = \frac{1}{2} m r^2 = \frac{1}{2} * 1600 * 0.7^2 \text{ kgm}^2 = 392 \text{ kgm}^2$$

Nel caso di un ingranaggio, il momento di inerzia all'albero motore deve essere ridotto. L'esempio successivo mostra come operare la riduzione con gli ingranaggi in un sistema di sollevamento. Altre formule si trovano nei manuali di progettazione di base.

Esempio 5.4:

Riduzione del momento di inerzia all'albero motore del seguente azionamento di sollevamento.

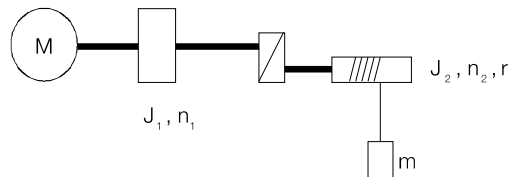


Figura 5.3 Un azionamento di sollevamento utilizzato nell'esempio 5.4.

Soluzione 5.4:

Il momento di inerzia totale consiste di $J_1=10 \text{ kgm}^2$, $J_2=30 \text{ kgm}^2$, $r=0,2 \text{ m}$ e $m=100 \text{ kg}$.

Il momento di inerzia J_2 e la massa m sono dietro una scatola di trasmissione con un rapporto di trasmissione $n_1:n_2=2:1$.

Al momento di inerzia J_2 viene ridotto moltiplicandolo per il quadrato dell'inverso del rapporto di trasmissione. La massa m del sistema di sollevamento viene ridotta moltiplicandola per il quadrato del raggio r e, trovandosi dietro una scatola di trasmissione, deve essere anch'essa moltiplicata per il quadrato dell'inverso del rapporto di trasmissione.

In tal modo il momento di inerzia totale del sistema risulta:

$$J_{\text{red}} = J_1 + \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 [J_2 + m r^2] = 18.5 \text{ kgm}^2$$

Capitolo 6 - Tipologie di carico

Nel settore industriale vi sono alcune tipologie di carico caratteristiche. Per selezionare un motore e un convertitore di frequenza idonei all'applicazione è essenziale conoscere il profilo del carico (campo di velocità, coppia e potenza)

Vengono illustrate di seguito alcune tipologie di carico tra le più comuni. Possono inoltre presentarsi diverse combinazioni di queste tipologie.

1. Coppia costante

Il carico a coppia costante è tipico dei sistemi preposti alla movimentazione di volumi fissi. Alcune applicazioni tipiche di carico a coppia costante sono, ad esempio, i compressori a vite, gli alimentatori e i nastri trasportatori. La coppia è costante e la potenza è lineare in proporzione alla velocità.

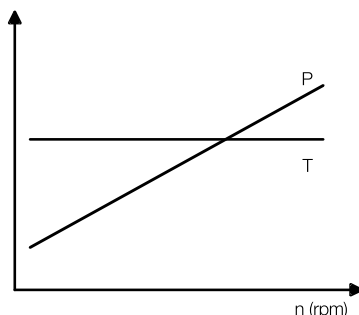


Figura 6.1 Curve tipiche di coppia e potenza in un'applicazione a coppia costante.

2. Coppia quadratica

La coppia quadratica è il tipo di carico più comune, ampiamente utilizzato, ad esempio, nelle pompe centrifughe e nei ventilatori. La coppia è proporzionale al quadrato e la potenza al cubo della velocità.

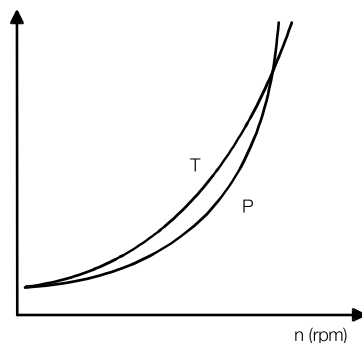


Figura 6.2 Curve tipiche di coppia e potenza in un'applicazione a coppia quadratica.

3. Potenza costante

Il carico a potenza costante è normalmente utilizzato per la laminazione di materiali nei quali il diametro cambia durante la laminazione. La potenza è costante e la coppia inversamente proporzionale alla velocità.

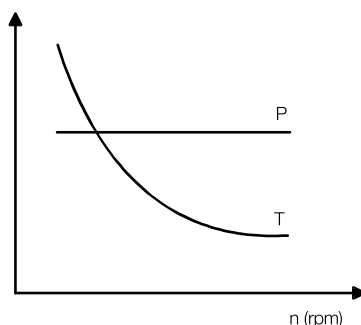


Figura 6.3 Curve tipiche di coppia e potenza in un'applicazione a potenza costante.

4. Potenza/coppia costante

Questo tipo di carico è comune nell'industria cartaria. Si tratta di una combinazione del carico a potenza costante e di quello a coppia costante. Questo tipo di carico dipende spesso dal dimensionamento dell'azionamento per assicurare una determinata potenza ad alta velocità.

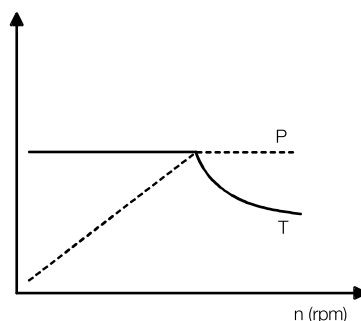


Figura 6.4 Curve tipiche di coppia e potenza in un'applicazione a potenza/coppia costante.

5. Richiesta di coppia di avviamento/spunto

In alcune applicazioni è necessario assicurare una coppia elevata a basse frequenze. Tale requisito va considerato quando si procede al dimensionamento. Applicazioni tipiche di questo tipo di carico sono ad esempio gli estrusori e le pompe a vite.

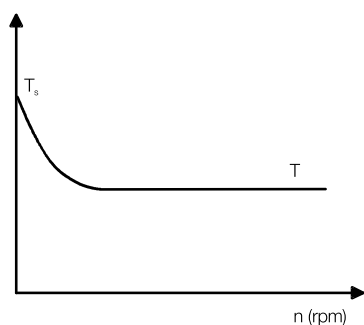


Figura 6.5 Curva di coppia tipica in un'applicazione che richiede una coppia di avviamento.

Esistono inoltre altre tipologie di carico, ma sono piuttosto difficili da descrivere in una presentazione generica. Per citarne alcune, vi sono diversi tipi di carichi simmetrici (laminatoi, gru, ecc.) e asimmetrici. La simmetria/asimmetria della coppia può essere in funzione dell'angolazione o del tempo. Questi tipi di carico devono essere dimensionati con estrema cura tenendo conto dei margini di capacità di sovraccarico del motore e del convertitore di frequenza oltre che della coppia media del motore.

Capitolo 7 - Capacità di carico del motore

Per il dimensionamento di un azionamento occorre tenere conto della capacità di carico termico del motore. Essa definisce la capacità di carico massima del motore a lungo termine.

I motori a induzione standard sono dotati di ventilazione propria. A causa di questa caratteristica, la capacità di carico termico del motore decresce proporzionalmente alla diminuzione della sua velocità. Questo tipo di comportamento limita la coppia continua disponibile alle basse velocità.

I motori con sistema di raffreddamento separato possono essere caricati anche alle basse velocità. Spesso il sistema di raffreddamento è dimensionato in modo tale che l'effetto raffreddante sia lo stesso di quello al punto nominale.

Sia con sistemi di raffreddamento propri che separati, la coppia è termicamente limitata nel range di indebolimento di campo.

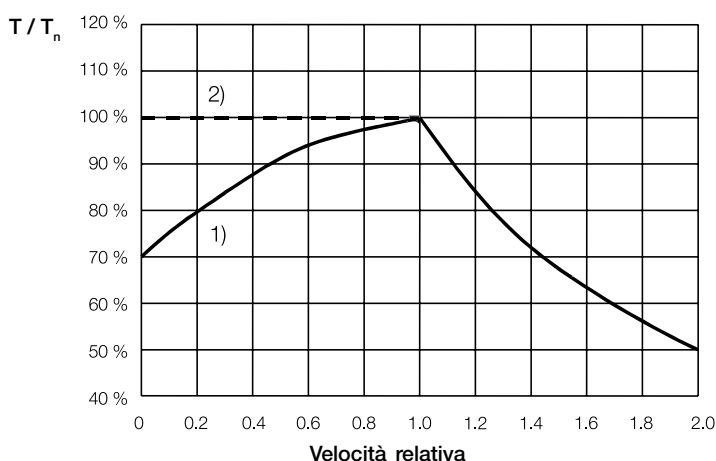


Figura 7.1 La capacità di carico tipica di un motore a induzione a gabbia di tipo standard in un azionamento controllato in frequenza
1) senza sistema di raffreddamento separato e 2) con sistema di raffreddamento separato.

E' possibile sovraccaricare un motore in c.a. per brevi periodi di tempo senza surriscaldarlo. Il sovraccarico di breve termine è prevalentemente limitato da T_{max} (verificare i margini di sicurezza).

In termini generici, la capacità di sovraccarico termico di breve termine del convertitore di frequenza è spesso più critica di quella del motore. Il tempo di rialzo termico del motore normalmente è superiore ai 15 minuti (motori di piccole dimensioni) fino a qualche ora (motori più grandi) in base alle dimensioni del motore. Il tempo di rialzo termico del convertitore di frequenza (normalmente di pochi minuti) è specificato nei manuali dei singoli prodotti.

Capitolo 8 - La selezione del convertitore di frequenza e del motore

Il motore viene selezionato in base ai dati principali di processo. Campo di velocità, curve di coppia, metodo di ventilazione e capacità di carico del motore forniscono indicazioni per la selezione del motore. Spesso vale la pena di considerare diversi tipi di motore in quanto il motore selezionato influisce sulle dimensioni del convertitore di frequenza.

Per selezionare un convertitore di frequenza idoneo vanno considerati vari elementi. I produttori di convertitori di frequenza dispongono in genere di apposite tabelle di selezione, dove vengono specificati i tipici livelli di potenza motore per ciascuna taglia di convertitore.

Conoscendo le caratteristiche della coppia è inoltre possibile calcolare la corrente di dimensionamento. I valori di curva corrispondenti possono essere calcolati dal profilo della coppia e confrontati a limiti di corrente del convertitore. La corrente nominale del motore fornisce qualche indicazione. Tuttavia non si tratta sempre del miglior criterio di dimensionamento a causa della possibilità di declassamento dei motori (temperatura ambiente, area pericolosa, ecc.).

Prima di scegliere un convertitore di frequenza è opportuno controllare la tensione di alimentazione. Le variazioni della tensione di rete influiscono sulla potenza resa del motore disponibile. Se la tensione di alimentazione è inferiore alla potenza nominale, il punto di indebolimento di campo si sfasa a una frequenza inferiore e nel range di indebolimento di campo si riduce la coppia massima disponibile del motore.

Spesso la coppia massima disponibile è limitata dal convertitore di frequenza. Anche di questo fattore occorre tenere conto per la selezione del motore. Il convertitore di frequenza può limitare la coppia del motore prima di quanto affermato nelle schede tecniche fornite dal produttore.

La coppia massima disponibile è inoltre influenzata da trasformatori, reattori, cavi, ecc. presenti nel sistema in quanto determinano un calo di tensione e, di conseguenza, può verificarsi anche un calo della coppia massima disponibile. Le perdite del sistema vanno compensate con i valori del convertitore di frequenza.

8.1 Esempio di applicazione pump and fan

Alcune fasi nel dimensionamento di un'applicazione pump and fan:

- Verificare il campo di velocità e calcolare la potenza alla massima velocità.
- Controllare i requisiti di coppia di avviamento.

- Scegliere il numero di poli del motore. La frequenza di esercizio più economica si trova spesso nel range di indebolimento di campo.
- Determinare la potenza del motore in modo tale da garantire la disponibilità di potenza alla massima velocità. Considerare la capacità di carico termico.
- Selezionare il convertitore di frequenza. Utilizzare i valori nominali delle applicazioni pump and fan. Se non sono disponibili, selezionare il convertitore di frequenza in base al profilo di corrente del motore.

Esempio 8.1:

Una pompa presenta un carico di 150 kW alla velocità di 2.000 giri/min. Non è necessaria una coppia di avviamento.

Soluzione 8.1:

La coppia necessaria a 2.000 giri/min risulta:

$$T = \frac{9550 \cdot 150}{2000} \text{ Nm} = 716 \text{ Nm}$$

Sembra che per questa applicazione siano possibili due alternative: i motori bipolari o quadripolari.

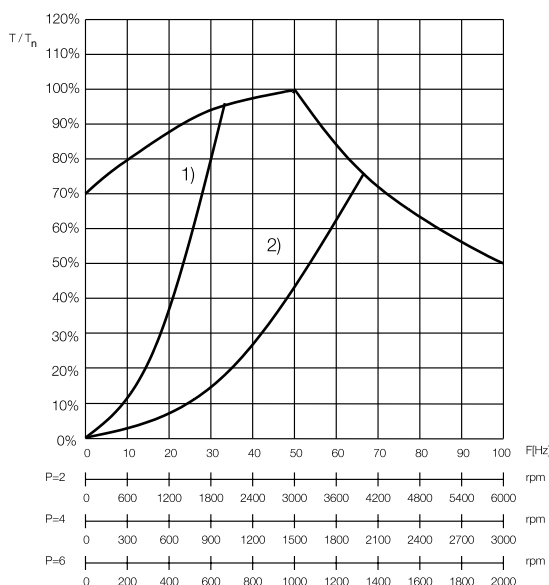


Figura 8.1 Curve di capacità di carico del motore in un'applicazione pump and fan. Confronto tra motori 1) bipolari e 2) quadripolari.

1) motore p=2

Per un motore bipolare, la capacità di carico a 2.000 giri/min in base alla curva di capacità di carico risulta approssimativamente pari al 95%. La coppia nominale del motore deve essere almeno pari a:

$$T_n \geq \frac{716}{0.95} \text{ Nm} = 754 \text{ Nm}$$

La potenza nominale corrispondente deve essere pertanto almeno pari a:

$$P_n \geq \frac{754 * 3000}{9550} \text{ kW} = 237 \text{ kW}$$

Viene scelto un motore da 250 kW (400 V, 431 A, 50 Hz, 2975 giri/min e 0,87). La coppia nominale del motore risulta:

$$T_n = \frac{250 * 9550}{2975} \text{ Nm} = 803 \text{ Nm}$$

La corrente del motore alla velocità di 2.000 giri/min (campo di flusso costante) è approssimativamente:

$$i_m = \frac{T_{load}}{T_n} * I_n = \frac{716}{803} * 431 \text{ A} = 384 \text{ A}$$

La corrente continua minima del convertitore di frequenza risulta pertanto pari a 384 A.

2) motore p=4

Per un motore quadripolare, la capacità di carico a 2.000 giri/min risulta pari a 75%.

La coppia nominale minima del motore è pari a:

$$T_n \geq \frac{716 \text{ Nm}}{0.75} = 955 \text{ Nm}$$

La potenza minima per un motore quadripolare risulta:

$$P_n \geq \frac{955 * 1500}{9550} \text{ kW} = 150 \text{ kW}$$

Un motore da 160 kW (400 V, 305 A, 50 Hz, 1.480 giri/min e 0,81) risponde alle condizioni richieste. La corrente approssimativa alla velocità di 2.000 giri/min (66,7 Hz) risulta:

$$i_m = \frac{T_{load}}{T_n} * \frac{n}{n_n} I_n = \frac{P_{load}}{P_n} * I_n = \frac{150}{160} * 305 \text{ A} = 286 \text{ A}$$

E' opportuno calcolare con precisione la corrente se la corrente nominale del convertitore di frequenza selezionato ha un valore simile a quello della corrente approssimativa del motore.

I motori quadripolari richiedono meno corrente in corrispondenza del punto di intervento della pompa. Si tratta probabilmente di una scelta più economica rispetto al motore bipolare.

8.2 Esempio di applicazione a coppia costante

Seguono alcune fasi del dimensionamento e di un'applicazione a coppia costante:

- Verificare il campo di velocità.
- Verificare la coppia costante richiesta.
- Verificare le possibili accelerazioni. Se sono necessarie accelerazioni, verificare i momenti di inerzia.
- Verificare la possibile coppia di avviamento richiesta.
- Scegliere il motore in modo che la coppia sia inferiore alla curva di capacità di carico termico (ventilazione separata/propria?). Normalmente la velocità nominale del motore ha un valore centrale rispetto al campo di velocità autorizzato.
- Selezionare un convertitore di frequenza idoneo in base alla corrente di dimensionamento.

Esempio 8.2:

Un estrusore ha un campo di velocità di 300-1.200 giri/min. Il carico a 1.200 giri/min è pari a 48 KW. La coppia di avviamento richiesta è di 200 Nm. Il tempo di accelerazione da velocità zero a 1.200 giri/min è di 10 secondi. Il motore è dotato di ventilazione propria e la tensione nominale è pari a 400 V.

Soluzione 8.2:

Il requisito di coppia costante risulta:

$$T = \frac{9550 * 48}{1200} \text{ Nm} = 382 \text{ Nm}$$

Risulta idoneo un motore quadripolare o a 6 polarità.

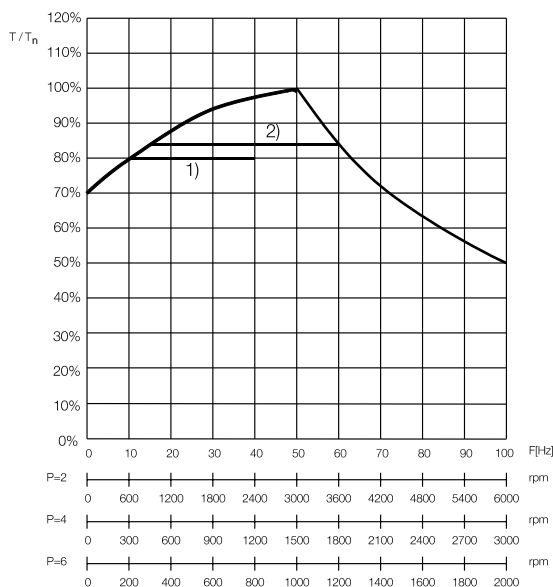


Figura 8.2 Curve di capacità di carico motori in un'applicazione coppia costante. Confronto tra motori 1) quadripolare e 2) esapolare.

1) Motore quadripolare

Alla velocità di 300 giri/min la capacità di carico termico è pari all'80%. La coppia nominale minima stimata risulta:

$$T_n \geq \frac{382}{0.8} \text{ Nm} = 478 \text{ Nm}$$

La potenza nominale minima del motore è pari a:

$$P_n \geq \frac{478 * 1500}{9550} \text{ kW} = 75 \text{ kW}$$

Un motore idoneo potrebbe essere ad esempio un motore da 75 kW (400 V, 146 A, 50 Hz, 1.473 giri/min e 0,82). La coppia nominale del motore è pari a:

$$T_n = \frac{75 * 9550}{1473} \text{ Nm} = 486 \text{ Nm}$$

La corrente del motore è approssimativamente ($T/T_n \approx 0,8$) pari a:

$$i_m = \frac{T_{load}}{T_n} * I_n = \frac{382}{486} * 146 \text{ A} = 115 \text{ A}$$

In base alla corrente del motore calcolata è possibile scegliere un convertitore di frequenza idoneo per funzionamento a coppia costante.

I requisiti di coppia di avviamento (200 Nm) non costituiscono un problema per questo tipo di motore.

Se il momento di inerzia del motore è pari a 0,72 kgm², la coppia dinamica durante l'accelerazione risulta pari a:

$$T_{dyn} = \frac{2 \pi}{60} * \frac{1200}{10} * 0.72 \text{ Nm} = 9 \text{ Nm}$$

Pertanto la coppia totale durante l'accelerazione è pari a 391 Nm, valore inferiore alla coppia nominale del motore.

2) Motore esapolare

Alla velocità di 300 giri/min e 1.200 giri/min, la capacità di carico del motore è pari all'84%. Pertanto la coppia nominale minima di un motore esapolare risulta:

$$T_n \geq \frac{382 \text{ Nm}}{0.84} = 455 \text{ Nm}$$

Il valore minimo della potenza nominale del motore risulta:

$$P_n \geq \frac{455 * 1000}{9550} \text{ kW} = 48 \text{ kW}$$

Un motore idoneo potrebbe essere ad esempio un motore da 55 kW (400 V, 110 A, 50 Hz, 984 giri/min e 0,82). La coppia nominale del motore è pari a:

$$T_n = \frac{55 \cdot 9550}{984} \text{ Nm} = 534 \text{ Nm}$$

La corrente di dimensionamento può essere calcolata approssimativamente alla velocità di 1.200 giri/min:

$$i_m = \frac{T_{\text{load}}}{T_n} \cdot \frac{n}{n_n} \cdot I_n = \frac{P_{\text{load}}}{P_n} \cdot I_n = \frac{48}{55} \cdot 110 \text{ A} = 96 \text{ A}$$

La corrente nominale (continua) del convertitore di frequenza deve essere superiore a 96 A.

I requisiti di coppia di avviamento sono inferiori alla coppia nominale del motore.

Se l'inerzia del motore è pari a 1,2 kgm², la coppia dinamica durante l'accelerazione risulta:

$$T_{\text{dyn}} = \frac{2 \pi}{60} \cdot \frac{1200}{10} \cdot 1.2 \text{ Nm} = 15 \text{ Nm}$$

La coppia totale richiesta durante l'accelerazione è pari a 397 Nm, valore inferiore alla coppia nominale del motore.

La corrente di un motore esapolare risulta inferiore di 19 A rispetto a quella di un motore quadripolare. La scelta finale del motore/convertitore di frequenza dipende dalla taglia e dal costo del convertitore di frequenza del motore.

8.3 Esempio di applicazione a potenza costante

Alcune fasi del dimensionamento di un'applicazione a potenza costante:

- Verificare il campo di velocità.
- Calcolare la potenza richiesta. Gli avvolgitori sono tipiche applicazioni a potenza costante.
- Dimensionare il motore in modo tale che venga utilizzato il range di indebolimento di campo.

Esempio 8.3:

Una filiera è controllata da un convertitore di frequenza. La velocità superficiale del rullo è di 12 m/s e la tensione è pari a 5.700 N. I diametri del rullo sono rispettivamente di 630 mm (rullo vuoto) e di 1.250 (rullo pieno). E' presente una trasmissione con un rapporto di trasmissione $n_2 : n_1 = 1:7.12$ e con un livello di efficienza pari a 0,98.

Selezionare un motore e convertitore idonei all'applicazione.

Soluzione 8.3:

Il concetto fondamentale dell'avvolgitore consiste nel mantenere tensione e velocità superficiali costanti al variare del diametro.

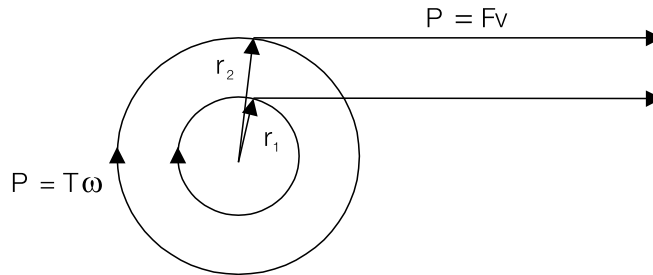


Figura 8.3 Diagramma di base di un avvolgitore.

Nel movimento rettilineo, la potenza è: $P = Fv$

Nel movimento rotatorio la potenza è: $P = T\omega$

La relazione tra la velocità superficiale e la velocità angolare risulta:

$$v \text{ [m/s]} = \omega * r = \frac{2 \pi * n \text{ [rpm]} * r}{60} \Leftrightarrow n \text{ [rpm]} = \frac{60 * v}{2 \pi * r}$$

La coppia è un prodotto della forza e del raggio: $T = Fr$

E' possibile selezionare il motore utilizzando le formule sopra riportate:

$$P = 5700 \text{ N} * 12 \text{ m/s} = 68.4 \text{ kW}$$

$$T_1 = 5700 \text{ N} * \frac{0.63}{2} \text{ m} = 1796 \text{ Nm}$$

$$n_1 = \frac{12 * 60}{\pi * 0.63} \text{ rpm} = 363.8 \text{ rpm}$$

$$T_2 = 5700 \text{ N} * \frac{1.25}{2} \text{ m} = 3563 \text{ Nm}$$

$$n_2 = \frac{12 * 60}{\pi * 1.25} \text{ rpm} = 183.3 \text{ rpm}$$

Per selezionare il motore idoneo è necessario considerare gli ingranaggi. E' opportuno ridurre i valori di velocità, coppia e potenza:

$$P = \frac{P}{\eta_{\text{gear}}} = \frac{68.4}{0.98} \text{ kW} = 69.8 \text{ kW}$$

$$T_1 = \frac{1796}{0.98} * \frac{1}{7.12} \text{ Nm} = 275 \text{ Nm}$$

$$n_1 = 363.8 * 7.12 \text{ rpm} = 2590 \text{ rpm}$$

$$T_2 = \frac{3563}{0.98} * \frac{1}{7.12} \text{ Nm} = 511 \text{ Nm}$$

$$n_2 = 183.3 * 7.12 \text{ rpm} = 1305 \text{ rpm}$$

1) Motore bipolare

Se si seleziona un motore bipolare, la capacità di carico alla velocità di 1.305 giri/min è approssimativamente dell'88%, e del 97% a 2.590 giri/min. La potenza nominale minima del motore risulta:

$$P_n \geq \frac{511 * 3000}{0.88 * 9550} \text{ kW} = 182 \text{ kW}$$

Con un motore da 200 kW (400 V, 353 A, 50 Hz, 2.975 giri/min e 0,86) la coppia nominale del motore risulta:

$$T_n = \frac{200 * 9550}{2975} \text{ Nm} = 642 \text{ Nm}$$

La corrente di dimensionamento viene calcolata in base a una coppia di 511 Nm:

$$i_m = \frac{T_{\text{load}}}{T_n} * I_n = \frac{511}{642} * 353 \text{ A} = 281 \text{ A}$$

2) Motore quadripolare

Se si seleziona un motore quadripolare, risulta dalla curva della capacità di carico che la capacità di carico alla velocità di 1.305 giri/min corrisponde approssimativamente al 98%, mentre a 2.590 giri/min al 60% . La potenza nominale minima del motore risulta:

$$P_n \geq \frac{511 * 1500}{0.98 * 9550} \text{ kW} = 82 \text{ kW}$$

Se si seleziona un motore da 90 kW (400 V, 172 A, 50 Hz, 1.473 giri/min e 0,83), la coppia nominale del motore risulta:

$$T_n = \frac{90 \cdot 9550}{1473} \text{ Nm} = 584 \text{ Nm}$$

In questo caso il dimensionamento viene effettuato in base a una corrente motore di 1.305 giri/min. La corrente del motore risulta pertanto:

$$i_m = \frac{T}{T_n} I_n = \frac{511}{584} \cdot 172 \text{ A} = 151 \text{ A}$$

Con un motore bipolare, il range di indebolimento di campo (a potenza costante) non è stato utilizzato, con la conseguenza di un eccessivo sovradimensionamento. Il motore quadripolare costituisce una scelta ottimale per questa applicazione.

Capitolo 9 - Raddrizzatore e trasformatore di ingresso

Sono in commercio diversi tipi di raddrizzatore di ingresso. La tipologia di raddrizzatore utilizzata può limitare il funzionamento.

I raddrizzatori di tipo convenzionale sono raddrizzatori a diodi a 6 o 12 impulsi. I raddrizzatori a diodi supportano solo carichi motore dove il flusso di potenza avviene solo in una direzione.

In alcuni processi nei quali il carico può essere generatore, è necessario assorbire l'energia prodotta. Per carichi generatori di breve durata, un'altra soluzione comunemente utilizzata consiste in una resistenza di frenatura, dove la potenza generata va trasformata in perdita. Tuttavia, se il carico è sempre generatore è necessario utilizzare un raddrizzatore a quattro quadranti.

Sia il trasformatore di ingresso che il raddrizzatore devono essere dimensionati in base alla potenza resa del motore e alle perdite. Ad esempio, anche in presenza di una coppia elevata a bassa velocità, la potenza meccanica rimane piuttosto bassa. Pertanto, un sovraccarico elevato non significa necessariamente potenza elevata per quanto concerne il raddrizzatore.

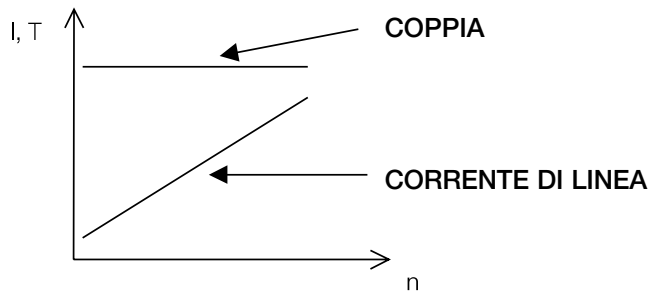


Figura 9.1 Corrente di linea in un'applicazione a coppia costante. La corrente di linea è ridotta a bassa velocità.

9.1 Raddrizzatore

I raddrizzatori vengono dimensionati in base alla potenza resa del motore. E' possibile selezionare un raddrizzatore di ingresso per un singolo azionamento utilizzando la formula di approssimazione:

$$S_{\text{rectifier}} = \frac{P_{\text{motor}}}{0.9} \quad (9.1)$$

Negli azionamenti dotati di collegamento comune in c.c. possono essere presenti contemporaneamente potenza motrice e generatrice. La potenza del raddrizzatore viene pertanto calcolata approssimativamente come segue:

$$S_{\text{rectifier}} = \frac{\sum P_{\text{motoring}}}{0.9} - 0.9 \sum P_{\text{generating}} \quad (9.2)$$

9.2 Trasformatore

La potenza del trasformatore di ingresso può essere calcolata come segue:

$$S_{\text{transformer}} = P_{\text{total}} * \frac{1.05}{k} * \frac{1}{\eta_r} * \frac{1}{\cos(\alpha)} * \frac{1}{\eta_c} * \frac{1}{\eta_i} * \frac{1}{\eta_m} \quad (9.3)$$

Nelle formule sopra riportate:

P_{total} è la potenza resa totale del motore

k è la capacità di carico del trasformatore (fattore k)

1,05 sta per la caduta di tensione del trasformatore (impedenza)

η_r è l'efficienza del raddrizzatore

$\cos(\alpha)$ è l'angolo di controllo del raddrizzatore (= 1,0 per il raddrizzatore a diodi)

η_c è l'efficienza dell'induttanza in c.a. (se presente)

η_i è l'efficienza dell'inverter

η_m è l'efficienza del motore

Normalmente la potenza resa totale viene moltiplicata per un coefficiente 1,2 - 1,35.

Esempio 9.1:

In un'applicazione a coppia costante la potenza resa massima necessaria è pari a 48 kW alla velocità di 1.200 giri/min. E' stato selezionato un motore da 55 kW e un inverter da 70 kVA.

Selezione del raddrizzatore e del trasformatore di ingresso. Si utilizza un alimentatore a diodi a 6 impulsi, è presente un induttanza in c.c. nel collegamento in c.c., l'efficienza dell'inverter è pari a 0,97 e l'efficienza del motore è pari a 0,95.

Soluzione 9.1:

La potenza stimata del raddrizzatore risulta:

$$S_{\text{rectifier}} = \frac{48}{0.9} \text{ kVA} = 53.3 \text{ kVA}$$

L'efficienza dell'induttanza è inclusa nell'efficienza dell'inverter. Con l'unità di alimentazione a diodi, $\cos(\alpha) = 1$. La potenza del trasformatore di ingresso è pari a ($k=0,95$):

$$S_{\text{transformer}} = 48 * \frac{1.05}{0.95} * \frac{1}{0.985} * \frac{1}{0.97} * \frac{1}{0.95} \text{ kVA} = 58.4 \text{ kVA}$$

Capitolo 10 - Indice analitico

4-quadrant 33

A

accelerazione 18
alimentatore elettrico 6
alimentazione 6, 7
attrito 14

C

campo a flusso costante 10
campo di flusso 10
capacità di sovraccarico 7
capacità di sovraccarico termico 23
carico ciclico 7
collegamento in c.c. 6
convertitore di frequenza 6
coppia 9, 10
coppia alla tensione di scarica 10
coppia costante 20
coppia di arresto 9
coppia di avviamento 7
coppia di avviamento/spunto 21
coppia massima 10
coppia massima in esercizio continuo 10
coppia quadratica 20
corrente attiva 11
corrente reattiva 11
coupling 19

D

decelerare 16

E

efficienza 14

F

fan 16, 20
fattore di potenza 12
frequenza 7, 9

G

igamma di velocità 7
generatore 33

I

induzione 9
ingranaggi 18
inverter 34,35

K

kilowatt 14

L

load 6
load profile 20
load type 20
locked rotor torque 9

M

meccanica 14
momento d'inerzia 15
motore 9
motore a induzione 9
motore in c.a. 6

P

pompe centrifughe 20
potenza 9, 14
potenza costante 10, 21
potenza motrice 33
potenza resa 33
proporzionale al cubo 20
proporzionale al quadrato 20
punto nominale 9, 12

R

raddrizzatore 33
raddrizzatore a diodi 33
raffreddamento separato 23
range di indebolimento di campo 10
rullo 19

S

scatola di trasmissione 19
scorrimento 9

T

tamburi 19
tensione 9
tensione di alimentazione 7, 24
trasformatore 6
trasformatore 6

U

unità raddrizzatore 6

V

velocità 9
velocità angolare 14
ventilazione propria 23



ABB Industria S.p.A.

Viale Edison 50

20099 Sesto S. Giovanni (Mi)

Tel: 02 - 26 23 27 32

Fax: 02 - 26 23 29 79

Internet: abb.industria@it.abb.com



Copyright © ABB Automation Group Ltd, 2000 3BFE 64415794 R0104 Specifiche soggette a modifiche senza preavviso.

IT 10.12.2000