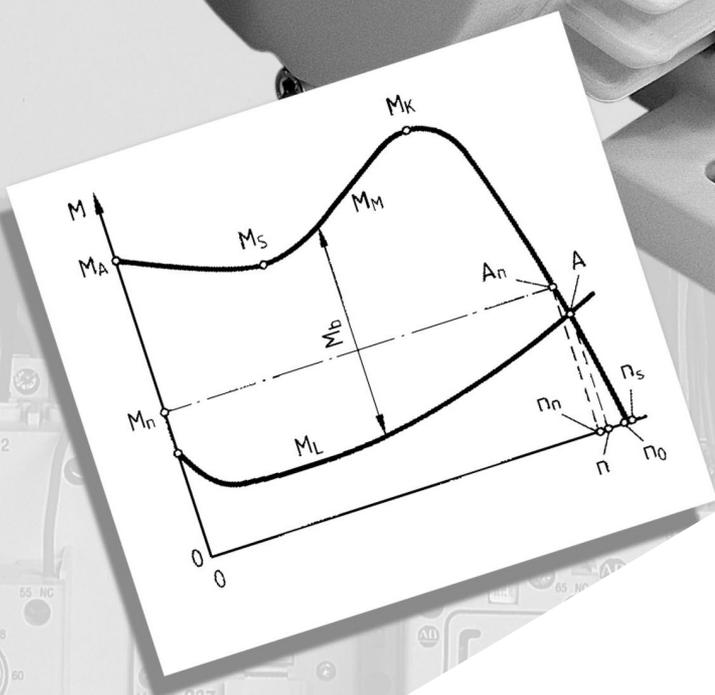


# Principi di base delle applicazioni dei motori trifase a induzione

*Configurazione*  
*Modi operativi*  
*Scelta*  
*Dimensionamento*



**Motor  
Management**

TM

## Prefazione

Il presente manuale tecnico sui motori trifase a induzione rappresenta la prima pubblicazione di un'intera serie dedicata al "Motor Management".

I principi fondamentali esposti in questa documentazione, rappresentano per l'utente un ottimo materiale di riferimento sulle prestazioni e sui dati operativi necessari per la progettazione e l'applicazione. Verranno trattati i seguenti argomenti:

- avviamento e azionamento dei motori
- protezione del motore e dei sistemi di azionamento
- scelta e funzionamento dei comandi
- comunicazioni.

Attualmente, quasi tutti i processi produttivi utilizzano motori elettrici. L'ottenimento delle massime prestazioni dalle applicazioni sta acquistando un'importanza sempre maggiore, al fine di poter garantire l'esecuzione di operazioni con un buon rapporto qualità prezzo. La "Gestione motori" della Rockwell Automation vi aiuterà

- ad ottimizzare l'uso dei sistemi;
- a ridurre i costi di manutenzione;
- ad aumentare l'affidabilità.

Confidiamo che le nostre pubblicazioni consentano di trovare soluzioni economiche ed efficienti ideali per le vostre applicazioni.

Copyright © 1996 di Sprecher+Schuh AG Rockwell Automation, Aarau.

Garantiamo la massima accuratezza di tutte le informazioni fornite in base alle nostre conoscenze, declinando ogni eventuale responsabilità legale.

Indice

<b>1</b>	<b>Motori trifase a induzione</b>	<b>1.1</b>
<b>1.1</b>	<b>Principi di funzionamento</b>	<b>1.1</b>
1.1.1	Statore	1.1
1.1.2	Rotore	1.1
1.1.3	Scorrimento	1.3
1.1.4	Dissipazione	1.4
<b>1.2</b>	<b>Andamento della coppia</b>	<b>1.6</b>
1.2.1	Andamento tipico	1.6
1.2.2	Configurazione del motore	1.8
<b>1.3</b>	<b>Caratteristiche di funzionamento</b>	<b>1.10</b>
<b>2</b>	<b>Modi operativi dei motori elettrici</b>	<b>2.1</b>
<b>2.1</b>	<b>Principali modi operativi S1... S9</b>	<b>2.1</b>
2.1.1	S1: Servizio continuo	2.2
2.1.2	S2: Servizio temporaneo	2.3
2.1.3	S3: Servizio periodico intermittente senza avviamento	2.4
2.1.4	S4: Servizio periodico intermittente con avviamento	2.5
2.1.5	S5: Servizio periodico intermittente con avviamento e frenatura elettrica	2.6
2.1.6	S6: Servizio continuo con carico intermittente	2.7
2.1.7	S7: Servizio ininterrotto con avviamento e frenatura elettrica	2.8
2.1.8	S8: Servizio ininterrotto con variazione periodica di carico/velocità	2.9
2.1.9	S9: Servizio ininterrotto con variazione non periodica di carico e velocità	2.11
<b>2.2</b>	<b>Valori medi di potenza, coppia e corrente</b>	<b>2.12</b>
<b>2.3</b>	<b>Potenza dei motori e modi operativi</b>	<b>2.14</b>
2.3.1	Aumento di potenza rispetto a S1	2.14
2.3.2	Carico limite meccanico	2.15
2.3.3	Riduzione di potenza rispetto a S1	2.15

<b>3</b>	<b>Coppie di carico caratteristiche</b>	<b>3.1</b>
<b>3.1</b>	<b>Coppie di carico come funzione della velocità</b>	<b>3.2</b>
3.1.1	La coppia rimane costante	3.2
3.1.2	La coppia aumenta in proporzione alla velocità	3.3
3.1.3	La coppia aumenta con il quadrato della velocità	3.5
3.1.4	La coppia diminuisce in proporzione inversa alla velocità	3.5
<b>3.2</b>	<b>Coppie di carico come funzione dell'angolo</b>	<b>3.6</b>
<b>3.3</b>	<b>Coppie di carico come funzione del percorso</b>	<b>3.6</b>
<b>3.4</b>	<b>Coppie di carico come funzione del tempo</b>	<b>3.6</b>
<b>3.5</b>	<b>Coppia di spunto iniziale</b>	<b>3.6</b>
<b>4</b>	<b>Scelta e dimensionamento dei motori elettrici</b>	<b>4.1</b>
<b>4.1</b>	<b>Potenza del motore</b>	<b>4.2</b>
4.1.1	Dati da catalogo e parametri di applicazione	4.3
4.1.2	Determinazione della potenza omologata	4.4
4.1.3	Dati da catalogo	4.4
4.1.4	Condizioni operative	4.4
4.1.5	Procedura di selezione dei motori	4.4
<b>4.2</b>	<b>Dimensionamento con l'uso della coppia di carico</b>	<b>4.7</b>
<b>4.3</b>	<b>Calcolo con l'uso della coppia di accelerazione o del tempo di accelerazione</b>	<b>4.8</b>
4.3.1	Coppia di accelerazione	4.8
4.3.2	Tempo di accelerazione	4.8
<b>4.4</b>	<b>Calcolo con l'uso della frequenza di commutazione</b>	<b>4.11</b>
<b>4.5</b>	<b>Scelta del motore con l'uso dei dati riportati sul catalogo</b>	<b>4.13</b>
<b>5</b>	<b>Simboli delle equazioni</b>	<b>4.14</b>

# 1 Motori trifase a induzione

Il motore trifase a induzione, altrimenti definito motore asincrono, è il tipo di motore più comunemente utilizzato nelle applicazioni industriali. In particolare, la configurazione a gabbia di scoiattolo è quella maggiormente impiegata per i motori elettrici in questo tipo di applicazioni.

## 1.1 Principi di funzionamento

La sezione elettrica del *motore trifase a induzione*, descritta nella **Figura 1.2.2**, è costituita dallo statore fisso o carcassa, da un avvolgimento trifase alimentato dall'*alimentazione trifase di rete* e da un *rotore*. Non vi è connessione elettrica tra lo statore ed il rotore. Le correnti nel rotore sono indotte tramite il traferro dal lato statore. Lo statore ed il rotore sono in lamiera altamente magnetizzabile, che consente ridotte perdite di corrente parassita e di isteresi.

### 1.1.1 Statore

L'*avvolgimento statore* consiste di tre avvolgimenti individuali sovrapposti e sfalsati di un angolo elettrico di  $120^\circ$ . Quando esso è collegato all'alimentazione, la corrente in ingresso magnetizzerà dapprima lo statore. Tale *corrente magnetizzante* genera un *campo rotante* che ruota a *velocità sincrona*  $n_s$ .

<b>Velocità sincrona <math>n_s = 60</math></b>	$\frac{f}{p}$	$n_s = \text{velocità sincrona/minuto}$ $f = \text{frequenza } s^{-1} \text{ (al secondo)}$ $p = \text{numero coppie poli (numero poli/2)}$
--	---------------	---

Nel caso del numero di poli più piccolo  $2p = 2$  in un circuito da 50 Hz, la maggiore velocità sincrona è  $n_s = 3000/\text{min}^{-1}$ . Le velocità sincrone per un circuito da 50 Hz sono indicate nella **Tabella 1.2.1**:

### 1.1.2 Rotore

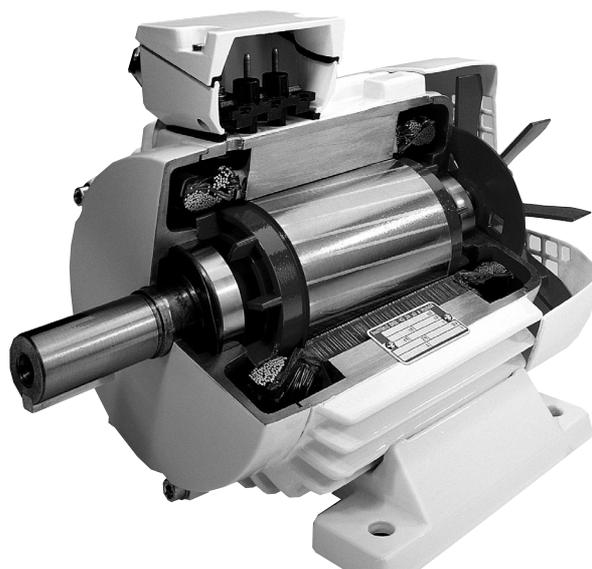
Il *rotore* nelle macchine a induzione con rotor a gabbia di scoiattolo consiste di un pacco di lamierini di forma cilindrica e scanalato, con barre in alluminio unite nella parte anteriore da anelli per formare una gabbia chiusa.

A volte, il *rotore* dei motori trifase a induzione viene definito *ancora*, per la forma tipica che assume nei dispositivi elettrici di prima fabbricazione. Nelle apparecchiature elettriche l'avvolgimento dell'*ancora* è indotto dal campo magnetico, mentre nei motori trifase a induzione questa funzione viene svolta dal rotore.

Numero poli 2p	2	4	6	8	10	12	16	24	32	48
$n_s$ in giri/min	3000	1500	1000	750	600	500	375	250	188	125

*Tabella 1.2.1 Velocità sincrone tipiche di un circuito da 50 Hz*

In un circuito da 60 Hz, le velocità sincrone sono maggiori del 20%.



*Figura 1.2.2 Motore trifase a gabbia di scoiattolo chiusa dell'ultima generazione*

A *rotore bloccato*, il motore a induzione funge da trasformatore cortocircuitato sul lato secondario. L'*avvolgimento statore*, pertanto, corrisponde all'*avvolgimento primario*, mentre l'*avvolgimento rotore* (avvolgimento gabbia) all'*avvolgimento secondario*. Poiché è cortocircuitato, la sua corrente rotore interna dipende dalla tensione indotta e dalla sua resistenza. L'interazione tra il *flusso magnetico* e i *conduttori di corrente nel rotore* genera una *coppia* che corrisponde alla rotazione del campo rotante. Le barre della gabbia sono disposte obliquamente rispetto all'asse di rotazione, al fine di prevenire le fluttuazioni della coppia (vedere la **Figura 1.3.1**)..

A *vuoto*, il rotore raggiunge quasi la velocità sincrona del campo rotante, in quanto è presente solo una piccola anticoppia (perdite funzionamento a vuoto). Se esso dovesse ruotare in maniera esattamente sincrona, la tensione non sarebbe più indotta, il flusso di corrente si interromperebbe e non sarebbe più presente alcuna coppia.

Durante il *funzionamento*, la velocità del rotore scende fino ad eguagliare la *velocità a carico*  $n$ . La differenza tra la velocità sincrona e la velocità a carico è definita *scorrimento*  $s$ . Sulla base dello scorrimento  $s$  dipendente dal carico, la tensione indotta nell'avvolgimento del rotore cambia, e questo a sua volta modifica la corrente del rotore nonché la coppia  $M$ . Con l'aumento dello scorrimento  $s$ , la corrente del rotore e la coppia aumentano. Poiché il motore trifase a induzione funge da trasformatore, la corrente del rotore viene trasformata sul lato statore (lato secondario) e la corrente di alimentazione dello statore cambia della stessa entità. La *potenza elettrica* dello statore generata dall'alimentazione di rete viene convertita tramite il *traferro in potenza meccanica* nel rotore. La corrente dello statore, pertanto, è costituita di due componenti, la *corrente magnetizzante* e la *corrente di carico* effettiva.

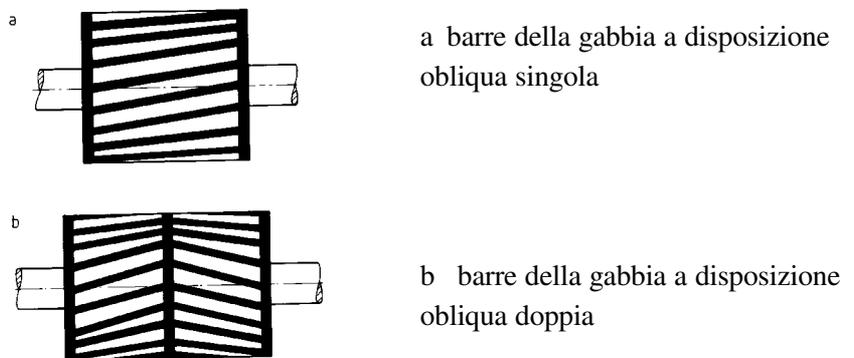


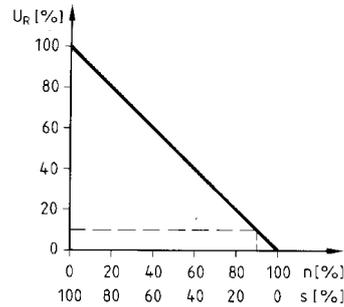
Figura 1.3.1 Forme di avvolgimenti rotore a gabbia di scoiattolo

### 1.1.3 Scorrimento

La differenza tra la velocità sincrona  $n_s$  e la velocità  $n$  in condizioni nominali di esercizio è definita *scorrimento*  $s$  e viene normalmente espressa in percentuale. A seconda delle dimensioni della macchina, tale valore è circa pari al 10-3%. Lo scorrimento rappresenta una delle principali caratteristiche di una macchina a induzione.

$$\text{Scorrimento } s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

$s$  = scorrimento  
 $n_s$  = velocità sincrona  
 $n$  = velocità rotore



*Figura 1.4.1 La tensione rotore  $U_R$  è una funzione proporzionale dello scorrimento  $s$ . Una tensione rotore del 10% corrisponde ad uno scorrimento del 10%*

La tensione rotore indotta  $U_R$  indicata nella **Figura 1.4.1** è proporzionale allo scorrimento  $s$ . A riposo, il valore di picco viene raggiunto con  $n = 1$  ed  $s = 1$ , situazione che determina, inoltre, il maggiore flusso di corrente. Ciò è confermato nelle applicazioni quotidiane dall'elevata corrente di avviamento (picco di corrente di avviamento). Anche la coppia raggiunge il valore di picco durante il periodo di riposo ad una determinata resistenza del rotore. Questo comportamento può essere modificato mediante variazioni della configurazione. Tuttavia, la resistenza del rotore non viene normalmente utilizzata a tal fine. La formula seguente si riferisce alla velocità del rotore:

<b>Velocità rotore <math>n = n_s \cdot (1 - s)</math></b>	$n$ = velocità rotore $n_s$ = velocità sincrona $s$ = scorrimento
---	---

### 1.1.4 Dissipazione

Poiché la velocità del rotore  $n$  è inferiore alla velocità sincrona  $n_s$  del campo rotante dell'entità dello scorrimento  $s$ , anche la potenza meccanica del rotore  $P_2$  è inferiore alla potenza del campo rotante  $P_D$  trasmessa elettricamente. La differenza  $P_{VR}$  viene dissipata nel rotore sotto forma di calore. Tali perdite dell'avvolgimento sono pertanto direttamente proporzionali allo scorrimento  $s$ . Fin dall'inizio del processo di avviamento, tutta la potenza indotta nel rotore viene convertita in calore.

L'equazione indica che il pericolo termico è maggiore per un rotore fisso ad un

<b>Dissipazione nel rotore <math>P_{VR} = P_D \cdot s =</math> perdita ohmica <math>P_{CuR}</math> in W</b>
---

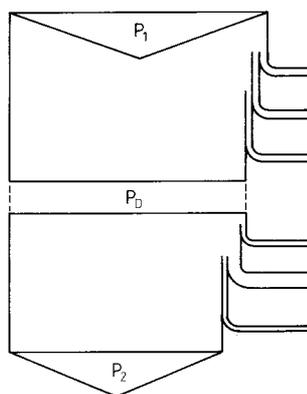
valore di  $s = 1$ , in quanto tutta la potenza elettrica assorbita viene convertita in dissipazione di calore nel motore. A causa della maggiore corrente di avviamento dei motori a induzione, la dissipazione di calore è un multiplo della potenza nominale del motore. Inoltre, i motori tradizionali autoventilati non vengono adeguatamente raffreddati quando sono a riposo.

Esaminando tutte le perdite di potenza  $P_v$  di un motore, come indicato nella **Figura 1.5.1**, si rilevano le seguenti *perdite individuali*:

• $P_{Fe}$	<i>Perdita nel ferro nello statore</i>	⇒ quasi costante in funzione
• $P_{CuS}$	<i>Perdita ohmica nello statore</i>	⇒ funzione quadrata della corrente
• $P_{CuR}$	<i>Perdita ohmica nel rotore</i>	⇒ funzione quadrata della corrente
• $P_{Lu}$	<i>Perdita per resistenza aerodinamica</i>	⇒ quasi costante in funzione
• $P_{La}$	<i>Perdite per attrito cuscinetti</i>	⇒ quasi costanti in funzione
• $P_{zus}$	<i>Perdite per dispersione</i>	⇒ quasi costanti in funzione

La *perdita nel ferro*  $P_{Fe}$  nello statore è causata da perdite di isteresi e di corrente parassita dipendenti dalla tensione e dalla frequenza. Pertanto, durante il funzionamento, questi valori sono quasi costanti. Nel rotore, le perdite sono insignificanti a causa della bassa frequenza della corrente del rotore durante il funzionamento. Le *perdite ohmiche* si verificano nello statore  $P_{CuS}$  e nel rotore  $P_{CuR}$ . Entrambe sono una funzione quadrata del carico. Le *perdite per resistenza aerodinamica*  $P_{Lu}$  e le *perdite per attrito cuscinetti*  $P_{La}$  sono ugualmente costanti a causa della velocità essenzialmente costante durante il funzionamento. Le *perdite per dispersione*  $P_{zus}$  sono causate prevalentemente da correnti parassita nei componenti metallici della macchina.

**Legenda:**



- $P_1$  = potenza elettrica assorbita
- $P_{Fe}$  = perdita nel ferro nello statore
- $P_{CuS}$  = perdita ohmica nello statore
- $P_{zus}$  = perdita per dispersione
- $P_D$  = potenza di campo del rotore (potenza traferro)
- $P_{CuR}$  = perdita ohmica nel rotore
- $P_{Lu}$  = perdita per resistenza aerodinamica e ventilazione
- $P_{La}$  = perdite per attrito cuscinetti
- $P_2$  = potenza di uscita meccanica

*Figura 1.5.1 Potenze e perdite in un motore trifase a induzione*

## 1.2 Andamento della coppia

### 1.2.1 Andamento tipico

La **Figura 1.6** illustra l'andamento tipico delle coppie dei motori a induzione con rotori a gabbia di scoiattolo, caratterizzato dai seguenti parametri. Per *coppia di accelerazione* si intende l'intera gamma delle coppie, dalla velocità nulla a motore fermo alla velocità massima.

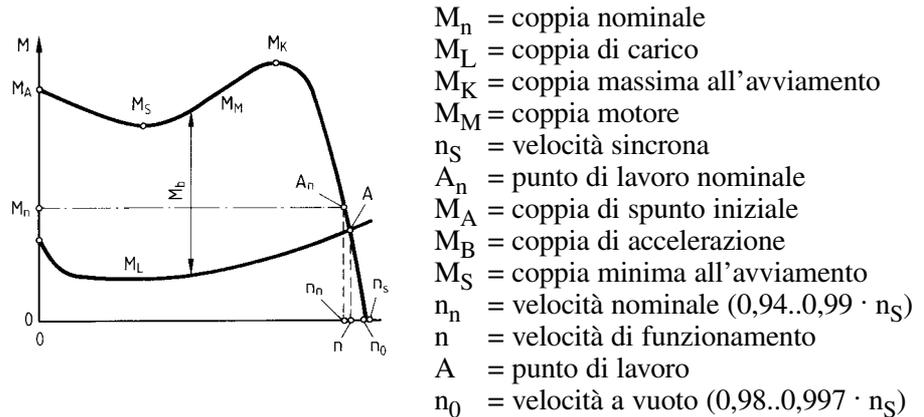


Figura 1.6.1 Andamento delle coppie del motore a induzione in rapporto alla velocità

$M_A$  Coppia a rotore bloccato a riposo, altrimenti definita *coppia di spunto iniziale*. I valori forniti dal produttore del motore dovrebbero presentare tolleranze oscillanti tra -15% e +25%.

$M_n$  Coppia nominale durante il funzionamento nominale ad una potenza nominale  $P_n$  ed una velocità nominale  $n_n$ . A vuoto, la coppia è molto bassa e copre l'attrito interno. Quando il motore è caricato, la sua velocità diminuisce leggermente del valore di scorrimento  $s$  e la coppia aumenta. Un motore standard deve essere in grado di sviluppare la coppia nominale in condizioni di funzionamento continuo senza superare il proprio limite di temperatura.

In alcuni modi operativi (S2, S3 ed S6) la coppia nominale può anche essere superata di un determinato valore, se il limite di temperatura non viene oltrepassato, per l'intera gamma operativa.

$M_K$  Coppia massima all'avviamento. Si tratta della *coppia massima* che il motore è in grado di sviluppare. Se la potenza viene aumentata oltre il carico nominale  $P_n$ , lo scorrimento  $s$  continua ad aumentare, la velocità  $n$  diminuisce ed il motore sviluppa una coppia maggiore. Tale valore può essere aumentato fino ad un valore massimo  $M_K$  (coppia massima all'avviamento), momento in cui il motore diviene *instabile*, vale a dire che la sua velocità scende improvvisamente a questo valore di scorrimento (scorrimento massimo di sovraccarico) e la velocità del motore raggiunge lo 0.

In conformità alle norme, la coppia massima all'avviamento deve essere  $M_K \geq 1,6 M_n$  e deve risultare possibile sovraccaricare il motore per almeno 15 secondi con questo valore alla tensione e alla frequenza nominali. I dati indicati nel catalogo possono presentare una tolleranza fino a -10%. Nella maggior parte dei motori la coppia massima all'avviamento è significativamente maggiore e normalmente raggiunge valori pari a  $M_K = 2...3,5 M_n$ . Pertanto, i motori a induzione sono particolarmente indicati per carichi intermittenti, ammesso che il calore in eccesso possa essere dissipato.

$M_S$  La *coppia minima all'avviamento*, altrimenti definita *coppia pull-through*, è la coppia più piccola durante l'accelerazione. In ogni caso, essa deve essere maggiore della coppia di carico  $M_L$  che agisce nello stesso momento, in quanto, in caso contrario, il motore non può essere accelerato. I valori minimi della coppia minima all'avviamento sono riportati nelle norme relative a funzionamenti a tensione nominale.

$M_L$  *Coppia di carico*, l'*anticoppia* che rappresenta il carico durante l'accelerazione.

$M_M$  *Coppia motore*, altrimenti definita *coppia di accelerazione*.

$M_B$  *Coppia di accelerazione* espressa come differenza tra la coppia motore  $M_M$  e la coppia di carico  $M_L$

In condizioni di servizio continuo nel modo di funzionamento S1 ad un carico nominale  $P_n$ , un motore adeguatamente dimensionato ruota ad una velocità nominale  $n_n$  e sviluppa la coppia nominale  $M_n$ :

<b>Coppia nominale</b>	$M_n = 9555 \cdot \frac{P_n}{n_n}$	$M_n$ = coppia nominale in Nm
		$P_n$ = potenza nominale in kW
		$n_n$ = velocità nominale/minuto

La coppia  $M$  può tuttavia essere calcolata mediante i dati elettrici del motore:

<b>Coppia nominale <math>M_n = \frac{-3 \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \eta \cdot 9,55}{n}</math></b>	$U$ = tensione in V
	$I$ = corrente in A
	$\cos\varphi$ = fattore di potenza
	$\eta$ = efficienza
	$n$ = velocità in

Durante l'avviamento, la coppia di spunto iniziale  $M_A$  deve essere maggiore di quella del carico e durante l'intera fase di accelerazione la coppia del motore  $M_M$  deve mantenersi sopra il valore della coppia di carico  $M_L$ , come indicato nella **Figura 1.6.1**.

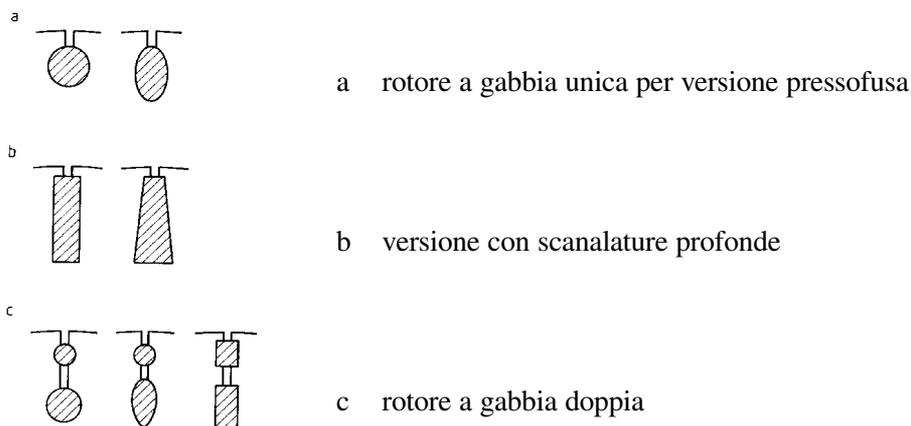
Nel punto di intersezione delle due linee della coppia (punto di funzionamento A), il motore funziona ad una velocità costante  $n$ . In caso di sovraccarico, il punto di lavoro A sale oltre il punto di lavoro nominale  $A_n$ . Questa situazione è accettabile solo per un breve periodo di tempo, al fine di evitare il surriscaldamento del motore.

Tuttavia, il punto di lavoro A non deve nemmeno essere troppo basso, vale a dire che non si deve scegliere un motore sovradimensionato. Al di sotto del 50% del carico nominale, l'efficienza  $\eta$  ed il fattore di potenza  $\cos\phi$  diminuiscono enormemente ed i motori non funzionano più in maniera economica. Un motore più grande presenta anche una maggiore corrente di avviamento  $I_A$ , in quanto questa non dipende dalla coppia di carico. Solo il tempo di accelerazione risulterebbe ridotto con l'uso di un motore più grande.

### 1.2.2 Configurazione del motore

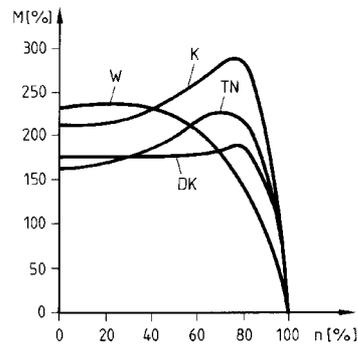
L'andamento delle coppie può essere in gran parte adattato all'applicazione nei motori trifase a induzione. Due importanti proprietà sono una *bassa corrente di avviamento*  $I_A$  ed un'*elevata coppia di avviamento*  $M_A$ . L'andamento della coppia nonché l'entità della corrente di avviamento, sono determinati principalmente dal *tipo di gabbia del rotore* e dalla *forma della scanalatura del rotore*, come indicato nella **Figura 1.8.1**.

Un'elevata coppia di spunto iniziale  $M_A$  ed una ridotta corrente di avviamento  $I_A$  possono essere ottenute mediante una resistenza rotore ohmica relativamente elevata nella coppia di avviamento. In generale, durante l'avviamento si verifica un "effetto di spostamento di corrente" più o meno accentuato (effetto pellicolare); questo fenomeno è evidente per tutti i tipi di configurazioni del rotore. Di seguito riportiamo le varie configurazioni:



*Figura 1.8.1 Forme di scanalature di rotor a gabbia di scoiattolo*

- *Rotori a gabbia di scoiattolo normale con scanalatura unica e rotonda*, conduttori rettangolari o trapezoidali normalmente in alluminio, con coppia di avviamento relativamente elevata pari a  $1,8...2,5 \times M_n$  ed elevata corrente di avviamento pari a  $5...10 \times I_n$ .
- *Rotori in cortocircuito*, altrimenti definiti *rotori a scanalatura profonda*. Se le barre della gabbia sono alte e strette, all'accensione lo *spostamento di corrente* ha effetto, in quanto la frequenza del rotore è elevata. La corrente scorre all'esterno del rotore o "pelle". Questo effetto provoca una riduzione della sezione trasversale efficace dei conduttori e, di conseguenza, un aumento della resistenza ohmica. Il risultato è una buona coppia di avviamento  $M_A$  ed una corrente di avviamento  $I_A$  favorevolmente bassa. Durante il funzionamento, lo spostamento di corrente non ha più effetto, in quanto la frequenza del rotore in quel momento è molto bassa ed il motore presenta correnti e coppie normali.
- *I rotori a gabbia di scoiattolo doppia* presentano la barra divisa in due barre separate, normalmente isolate elettricamente l'una dall'altra. La *gabbia esterna* presenta una *resistenza ohmica elevata*, mentre la *gabbia interna* è caratterizzata da *resistenza ohmica bassa*. Questo avviene grazie all'uso di un materiale appropriato (Cu, Al, Ms) ed un corretto dimensionamento delle sezioni trasversali dei conduttori. L'effetto è addirittura più evidente che in un rotore in cortocircuito. All'avviamento, la corrente scorre praticamente solo nella gabbia esterna, provocando la riduzione della corrente di avviamento  $I_A$  ed un relativo aumento della coppia di avviamento  $M_A$ . Durante il funzionamento, la corrente è quindi distribuita tra due gabbie in base alla loro resistenza ohmica.
- *I rotori a gabbia di scoiattolo ad elevata resistenza*, altrimenti definiti rotori soggetti a scorrimento, presentano le scanalature della forma tipica di un normale rotore a gabbia di scoiattolo, ma utilizzano conduttori in ottone o lega di alluminio ad elevata resistenza anziché conduttori di Al o Cu. Ciò determina un aumento della resistenza ohmica. Diversamente dal rotore in cortocircuito, essa rimane costante per l'intera gamma di velocità e, durante il funzionamento, porta ad un elevato scorrimento con un andamento della velocità *flessibile* e senza una pronunciata coppia massima di avviamento. La coppia di avviamento  $M_A$  è elevata in base alla resistenza del rotore e la corrente di avviamento  $I_A$  è minore. Poiché l'elevata resistenza ohmica è conservata durante il funzionamento, si verificano perdite relativamente consistenti, causa di un funzionamento non economico. Pertanto, attualmente questi rotori non sono largamente utilizzati, in particolare in quanto le caratteristiche desiderate possono essere ottenute anche con dispositivi elettronici ausiliari a perdite ridotte.



- K= gabbia normale (Al)
- TN= rotore a scanalatura profonda (Al o Cu)
- DK= rotore a gabbia doppia (Al o Cu o Al all'esterno e Ms all'interno)
- W= rotore a gabbia di scoiattolo ad elevata resistenza  $M_S$
- M= coppia
- n= velocità

Figura 1.10.1 Andamento caratteristico della coppia di vari tipi di gabbie

### 1.3 Caratteristiche di funzionamento

Le caratteristiche di funzionamento sono una rappresentazione grafica del comportamento di:

- velocità
- fattore di potenza
- efficienza
- corrente
- potenza
- scorrimento

come funzione del carico.

La **Figura 1.10.2** mostra le caratteristiche di funzionamento di un tipico motore a induzione.

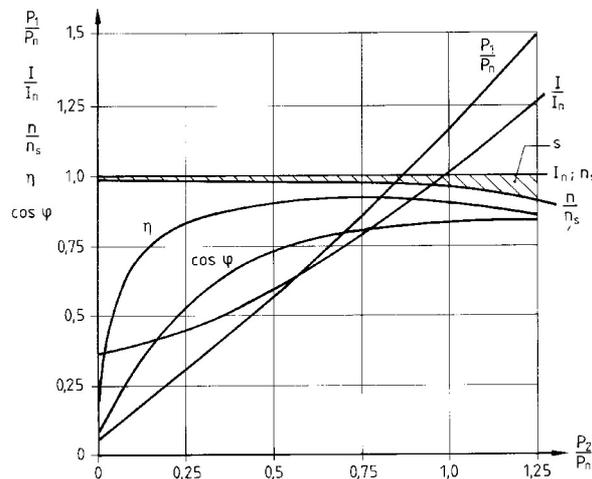


Figura 1.10.2 Caratteristiche di funzionamento di un motore a induzione come funzioni del carico

- n = velocità
- $P_1$  = potenza assorbita
- $\eta$  = efficienza
- I = corrente assorbita
- s = scorrimento
- $n_S$  = velocità sincrona
- $P_2$  = potenza di uscita
- $\cos\phi$  = fattore di potenza
- $I_n$  = corrente nominale
- $P_n$  = potenza nominale

- n La *velocità*  $n$  diminuisce solo leggermente con l'aumento del carico. I motori a gabbia di scoiattolo standard, pertanto, presentano *un andamento della velocità "rigido"*.
- s Lo *scorrimento*  $s$  aumenta quasi proporzionalmente all'aumento del carico.
- $\cos\varphi$  Il *fattore di potenza*  $\cos\varphi$  dipende *in gran parte dal carico* e raggiunge il valore di picco normalmente durante il sovraccarico. Nella gamma di carico parziale, esso è relativamente sfavorevole, in quanto anche con un carico parziale la magnetizzazione è pressoché costante.
- $\eta$  L'*efficienza*  $\eta$  presenta un andamento *relativamente piatto* ed è pressoché costante oltre il semi-carico. Essa raggiunge il valore di picco al di sotto della potenza nominale  $P_n$ .
- I La *corrente*  $I$  aumenta *in misura proporzionale* a partire circa dal semi-carico, al di sotto del quale diminuisce solo lentamente fino ad eguagliare la corrente a vuoto  $I_0$  (magnetizzazione costante).
- P La *potenza*  $P_1$  aumenta più o meno in proporzione al carico a partire dalla potenza a vuoto. Nella gamma di sovraccarico, essa aumenta in modo leggermente più veloce in quanto anche le perdite aumentano più velocemente.

Poiché l'efficienza  $\eta$  ed il fattore di potenza  $\cos\varphi$  possono avere un effetto rilevante sull'efficienza economica del motore, è molto importante conoscere i valori di carico parziale. Entrambi i valori determinano l'efficienza economica durante il funzionamento. Nella gamma del carico parziale entrambi i valori diminuiscono. Inoltre, nei motori a bassa velocità, il fattore di potenza  $\cos\varphi$  è inferiore che nei motori ad elevata velocità. Pertanto, i motori esattamente dimensionati e ad elevata velocità sono più economici non solo da acquistare ma anche da far funzionare.

## **2 Modi operativi dei motori elettrici**

Normalmente, i motori trifase a induzione a servizio continuo sono configurati per la potenza nominale, ad eccezione degli attuatori. La maggior parte dei motori, tuttavia, viene fatta funzionare in modo non continuo. Alcuni motori rimangono accesi solo per breve tempo, mentre altri funzionano tutto il giorno ma sono caricati solo brevemente; numerosi altri motori devono accelerare un volano di grandi dimensioni oppure funzionano a commutazione e con frenatura elettrica.

In tutti questi casi, il motore si riscalda in maniera diversa rispetto al modo operativo continuo. Per evitare danni all'avvolgimento e al rotore del motore dovuti a surriscaldamento, occorre considerare i seguenti processi speciali di riscaldamento.

### **2.1 Principali modi operativi S1... S9**

A fini della configurazione, le informazioni sul *modo operativo* devono essere il più accurate possibile, in quanto il rendimento del motore può variare molto rispetto al rendimento in servizio continuo. Pertanto, il numero di possibili modi operativi è teoricamente illimitato. Ai fini di un accordo tra i produttori e gli operatori, nell'IEC 34 sono stati indicati nove principali modi operativi (da S1 a S9). Quasi ogni situazione che si verifica nella pratica può essere ricondotta ad una delle seguenti categorie:

- S1: Servizio continuo
- S2: Servizio temporaneo
- S3: Servizio periodico intermittente senza avviamento
- S4: Servizio periodico intermittente con avviamento
- S5: Servizio periodico intermittente con avviamento e frenatura elettrica
- S6: Servizio continuo con carico intermittente
- S7: Servizio ininterrotto con avviamento e frenatura elettrica
- S8: Servizio ininterrotto con variazione periodica di carico/velocità
- S9: Servizio ininterrotto con variazione non periodica di carico e velocità

I produttori di motori devono definire la capacità di carico del motore secondo una di queste categorie e, dove necessario, fornire i valori del tempo di funzionamento, del periodo di carico o del relativo rapporto d'inserzione.

Nelle descrizioni e nei diagrammi dei modi operativi da S1 a S9 vengono utilizzati i seguenti simboli:

$P$	= potenza in kW	$t_{Br}$	= tempo di frenatura in s, min
$P_v$	= perdite in kW	$t_L$	= tempo di funzionamento a vuoto s, min, or h
$n$	= velocità/min	$t_r$	= rapporto d'inserzione relativo (%)
$\vartheta$	= temperatura in °C	$t_S$	= durata del ciclo in secondi
$\vartheta_{max}$	= temp. massima in °C	$t_{St}$	= tempo di inattività in s, min, o h
$t$	= tempo in s, min, o h	$T$	= costante di tempo termica in minuti
$t_B$	= periodo di carico	$t_A$	= tempo di avviamento in s, min
$J_M$	= momento d'inerzia del motore in kgm <sup>2</sup>		
$J_{ext}$	= momento d'inerzia del carico riferito all'albero motore in kgm <sup>2</sup>		

La velocità  $n$  è normalmente espressa in giri al minuto. Generalmente, la targhetta dati tecnici fornisce la velocità nominale  $n_n$  a pieno carico, ma nei cataloghi viene specificata anche la velocità sincrona o nominale.

I modi operativi da S1 a S9 coprono molte delle applicazioni pratiche. Se il tipo di carico non può essere assegnato a nessuno dei modi operativi specificati, occorrerà indicare al produttore l'esatta descrizione del ciclo oppure selezionare un modo operativo adeguato ad un carico non inferiore a quello previsto per l'applicazione.

### 2.1.1 S1: Servizio continuo

Servizio con una situazione di carico costante, come indicato nella **Figura 2.2.1**, con una durata sufficiente a raggiungere l'equilibrio termico. Il periodo di carico  $t_B$  è molto maggiore della costante temporale termica  $T$ .

**Contrassegno S1: specifica della potenza in kW, se necessario con abbreviazione S1.**

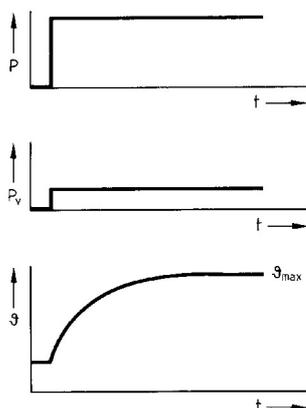


Figura 2.2.1 Modo operativo S1: servizio continuo

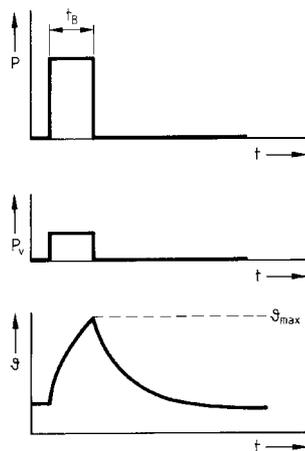
### 2.1.2 S2: Servizio temporaneo

Servizio con situazione di carico costante, come indicato nella **Figura 2.3.1**, che tuttavia non dura a sufficienza per raggiungere l'equilibrio termico, e con un successivo intervallo che dura fino a quando la temperatura della macchina differisce di non più di 2 K da quella del refrigerante.

Si parla di servizio temporaneo quando il periodo di carico  $t_B \leq 3 T$  (costante temporale termica). Rispetto al servizio continuo, il motore è in grado di sviluppare una potenza maggiore durante il periodo di carico. Per ulteriori informazioni, consultare il produttore.

**Definizione categoria S2: attraverso l'indicazione del periodo di carico  $t_B$  e della potenza  $P$  in kW**

- Esempio: S2: 10 min, 11 kW.
- Per il tempo di funzionamento  $t_B$  si consigliano periodi di 10, 30, 60 e 90 min.



*Figura 2.3.1 Modo operativo S2: servizio temporaneo*

**2.1.3 S3: Servizio periodico intermittente senza avviamento**

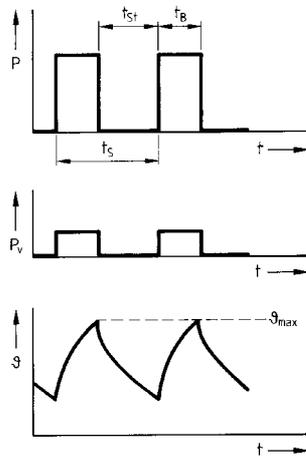
Servizio come indicato nella **Figura 2.4.1**, composto da una sequenza di cicli di servizio simili con durata del ciclo  $t_S$  ad un carico costante ed un intervallo generalmente tanto breve da non consentire il raggiungimento dell'equilibrio termico e tale che la corrente di avviamento non incida in modo evidente sul riscaldamento. In questo caso  $t_B \leq 3 T$ . Durante questo periodo la potenza dovrebbe essere maggiore rispetto alla potenza continua del motore. Per ulteriori informazioni, consultare il produttore.

**Rapporto d'inserzione relativo  $t_r = \frac{t_B}{t_B + t_S} \cdot 100$**

$t_B$  periodo di carico in s, min                       $t_S$  = durata del ciclo in s, min  
 $t_r$  = rapporto d'inserzione relativo in %

**Definizione categoria: attraverso l'indicazione del periodo di carico  $t_B$ , della durata del ciclo  $t_S$  e della potenza  $P$ , ma anche del rapporto d'inserzione relativo  $t_r$  in % e della durata del ciclo.**

- Esempio: S3: 15 min / 60 min. 11 kW
- Esempio: S3: 25%, 60 min. 11 kW



rapporto d'inserzione relativo

$$t_r = \frac{t_B}{t_B + t_S} \cdot 100$$

*Figura 2.4.1 Modo operativo S3: servizio periodico intermittente senza avviamento*

Se non viene specificata la durata del ciclo, è valida l'equazione  $t_S = 10$  min. I valori consigliati per il rapporto d'inserzione relativo  $t_r$  sono 15%, 25%, 40% e 60%.

**2.1.4 S4: Servizio periodico intermittente con avviamento**

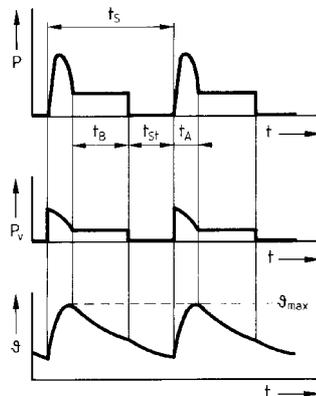
Servizio come indicato nella **Figura 2.5.1**, che consiste di una sequenza di cicli di servizio identici con durata del ciclo  $t_S$ , dove ogni ciclo comprende un distinto tempo di avviamento  $t_A$ , un tempo  $t_B$  con carico costante ed un intervallo  $t_{St}$ .

$$\text{Rapporto d'inserzione relativo } t_r = \frac{(t_A + t_B) \cdot 100}{t_A + t_B + t_{St}} = \frac{t_A + t_B}{t_S} \cdot 100$$

$t_A$  = tempo di avviamento s, min       $t_S$  = durata del ciclo in s, min  
 $t_r$  = rapporto d'inserzione relativo in %     $t_B$  = periodo di carico in s, min  
 $t_{St}$  = tempo di inattività in s, min

**Definizione categoria: attraverso l'indicazione del rapporto d'inserzione relativo  $t_r$  in %, del numero  $Z_L$  di avviamenti per ora e della potenza P**

- Esempio: S4: 25%, 500 avviamenti per ora, 11 kW
- più informazioni sul momento d'inerzia del motore e sul carico  $J_M$  e  $J_{ext}$  durante l'avviamento.



rapporto d'inserzione relativo

$$t_r = \frac{t_A + t_B}{t_A + t_B + t_{St}} \cdot 100$$

*Figura 2.5.1 Modo operativo S4: servizio periodico intermittente con avviamento*

In questo caso occorre fare attenzione se il motore si arresta sotto l'effetto del carico al termine del ciclo, o se viene arrestato mediante frenatura meccanica. Occorre segnalare il caso in cui il motore continui a funzionare dopo che è stato disinserito tanto da provocare un notevole raffreddamento degli avvolgimenti. In caso contrario, si presume che si fermerà entro un periodo di tempo molto breve.

In questo modo operativo il numero massimo consentito di azionamenti a vuoto  $Z_0$  viene utilizzato come base su cui calcolare la frequenza massima dei turni di funzionamento in base alla coppia di carico, l'eventuale massa aggiuntiva e un possibile momento d'inerzia. Rispetto al servizio continuo S1 è possibile notare una riduzione di potenza.

**2.1.5 S5: Servizio periodico intermittente con avviamento e frenatura elettrica**

Servizio come indicato nella **Figura 2.6.1**, composto di una sequenza di cicli di servizio simili con durata del ciclo  $t_S$ , dove ciascun ciclo comprende un tempo di avviamento distinto  $t_A$ , un tempo  $t_B$  con carico costante ed un tempo  $t_{Br}$  di frenatura elettrica ad elevata velocità. Non vi è intervallo.

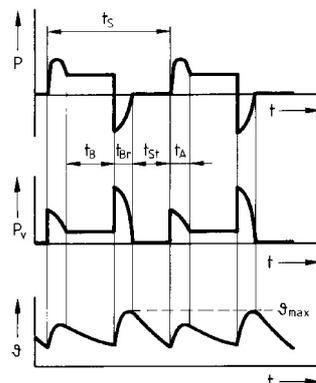
**Rapporto d'inserzione relativo**

$$t_r = \frac{(t_A + t_B + t_{Br}) \cdot 100}{t_A + t_B + t_{Br} + t_{St}} = \frac{t_A + t_B + t_{Br}}{t_S} \cdot 100$$

- |       |                               |          |  |
|-------|-------------------------------|----------|--|
| $t_A$ | = tempo di avviamento s, min  | $t_{St}$ | = tempo di funzionamento a vuoto in s, min |
| $t_B$ | = periodo di carico in s, min | $t_r$    | = rapporto d'inserzione relativo in %      |
| $t_S$ | = durata del ciclo in s, min  | $t_{Br}$ | = tempo di frenatura in s, min             |

**Definizione categoria: simile a S4, ma anche attraverso l'indicazione del tipo di frenatura (frenatura per inversione di fase, frenatura a recupero, ecc.).**

- In caso di dubbio e quando i tempi di avviamento e di frenatura sono lunghi in rapporto al tempo di funzionamento nominale, occorre indicare separatamente tutti e tre gli intervalli di tempo.
- Esempio: S4: 25%, 500 avviamenti per ora, frenatura per inversione di fase, 11 kW
- Informazioni aggiuntive sul momento d'inerzia del motore e sul carico  $J_M$  e  $J_{ext}$  durante l'avviamento e la frenatura.



rapporto d'inserzione relativo

$$t_r = \frac{t_A + t_B + t_{Br}}{t_A + t_B + t_{Br} + t_{St}} \cdot 100$$

*Figura 2.6.1 Modo operativo S5: servizio periodico intermittente con avviamento e frenatura elettrica.*

Rispetto al servizio continuo S1, in questo modo operativo è necessaria una riduzione di potenza. Per ulteriori informazioni, consultare il produttore.

**2.1.6 S6: Servizio continuo con carico intermittente**

Servizio come indicato nella **Figura 2.7.1**, composto da una sequenza di cicli di servizio simili con durata  $t_s$ , dove ogni ciclo comprende un tempo  $t_B$  con carico costante e tempo di funzionamento a vuoto  $t_L$ , senza intervallo. Dopo il tempo di funzionamento  $t_B$  il motore continua a girare a vuoto e, a causa della corrente a vuoto, non raggiunge la temperatura del refrigerante, ma è ventilato durante il tempo di funzionamento a vuoto  $t_L$ . Questa condizione di funzionamento si verifica quando  $t_B \leq T$ .

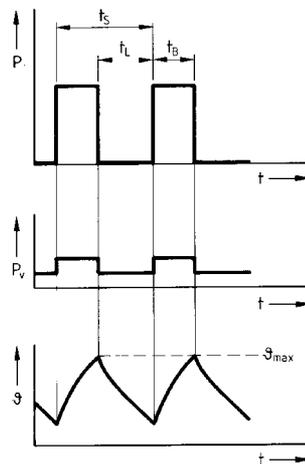
**Rapporto d'inserzione relativo**  $t_r = \frac{t_B}{t_B + t_L} \cdot 100 = \frac{t_B}{t_s} \cdot 100$

$t_B$  = periodo di carico in s, min       $t_L$  = tempo di funzionamento a vuoto in s, min

$t_s$  = durata del ciclo in s, min       $t_r$  = rapporto d'inserzione relativo in %

**Definizione categoria: come S3, attraverso l'indicazione del rapporto d'inserzione  $t_r$ , della durata del ciclo  $t_s$  e della potenza P.**

- Esempio: S6: 25%, 40 min, 11 kW
- Se non viene fornita nessuna indicazione della durata del ciclo, è valida l'equazione  $t_s = 10$  min.



rapporto d'inserzione relativo

$$t_r = \frac{t_B}{t_B + t_L} \cdot 100$$

*Figura 2.7.1 Modo operativo S6: servizio continuo con carico intermittente*

Rispetto al servizio continuo S1, è possibile selezionare una potenza maggiore durante il tempo di funzionamento  $t_B$ . Per ulteriori informazioni, consultare il produttore.

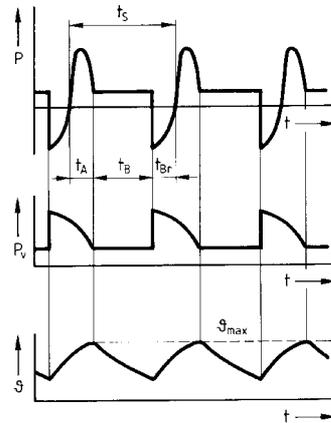
**2.1.7 S7: Servizio ininterrotto con avviamento e frenatura elettrica**

Servizio come indicato nella **Figura 2.8.1**, composto da una sequenza di cicli di servizio simili con durata del ciclo  $t_S$ , dove ciascun ciclo comprende un distinto tempo di avviamento  $t_A$ , un tempo  $t_B$  con carico costante  $P$  ed un tempo  $t_{Br}$  con frenatura elettrica ad elevata velocità. Non è presente intervallo.

**Rapporto d'inserzione relativo  $t_r = 1$**

**Definizione categoria:** come S4, senza indicazione del rapporto d'inserzione relativo  $t_r$ , ma con indicazione del tipo di frenatura (per inversione di fase, frenatura a recupero, ecc.).

- In caso di dubbio e quando i tempi di avviamento e di frenatura sono sufficientemente lunghi in rapporto al tempo di funzionamento nominale, occorre indicare separatamente tutti e tre gli intervalli di tempo.
- Esempio: S7: 500 cicli di servizio per ora, frenatura per inversione di fase, 11 kW.
- Informazioni supplementari sul momento d'inerzia del motore e sul carico  $J_M$  e  $J_{ext}$  durante l'avviamento e la frenatura.



rapporto d'inserzione relativo  $t_r = 1$

*Figura 2.8.1 S7: Servizio ininterrotto con avviamento e frenatura elettrica*

Rispetto al servizio continuo S1, in questo modo operativo è necessaria una riduzione di potenza. Per ulteriori informazioni, consultare il produttore.

**2.1.8 S8: Servizio ininterrotto con variazione periodica di carico/velocità**

Servizio come indicato nella **Figura 2.10.1**, composto di una sequenza di cicli di servizio simili con durata del ciclo  $t_s$ ; ciascuno di questi cicli comprende un tempo con carico costante ed una determinata velocità; infine uno o più tempi con carichi diversi a cui corrispondono diverse velocità, ad esempio, mediante inversione dei poli. Non sono presenti intervallo o tempo inattivo.

Questo modo operativo non può essere espresso da una semplice formula. Occorre utilizzare un carico continuo adatto come dimensione di riferimento per il ciclo di carico:

<b>Rapporto d'inserzione relativo</b>	$t_{r1} = \frac{(t_A + t_{B1}) \cdot 100}{t_A + t_{B1} + t_{Br1} + t_{B2} + t_{Br2} + t_{B3}} = \frac{t_A + t_{B1}}{t_s} \cdot 100$
<b>Rapporto d'inserzione relativo</b>	$t_{r2} = \frac{(t_{Br1} + t_{B2}) \cdot 100}{t_A + t_{B1} + t_{Br1} + t_{B2} + t_{Br2} + t_{B3}} = \frac{t_{Br1} + t_{B2}}{t_s} \cdot 100$
<b>Rapporto d'inserzione relativo</b>	$t_{r3} = \frac{(t_{Br2} + t_{B3}) \cdot 100}{t_A + t_{B1} + t_{Br1} + t_{B2} + t_{Br2} + t_{B3}} = \frac{t_{Br2} + t_{B3}}{t_s} \cdot 100$
$t_A$ = tempo di avviamento s, min $t_s$ = durata del ciclo in s, min $t_B$ = periodo di carico in s, min $t_r$ = rapporto d'inserzione relativo in % $t_{Br}$ = tempo di frenatura in s, min	
<p><b>Definizione categoria: come S5, tranne che per ciascuna velocità occorre specificare il tempo durante il quale tali velocità si verificano entro ciascun periodo del ciclo.</b></p> <p>- Esempio: S8: 30%, 3000/m, 10 min, 1500/m 20 min. 2 cicli per ora. 11 kW            - Informazioni aggiuntive sul momento d'inerzia del motore e sul carico <math>J_M</math> e <math>J_{ext}</math> durante l'avviamento e la frenatura.</p>	

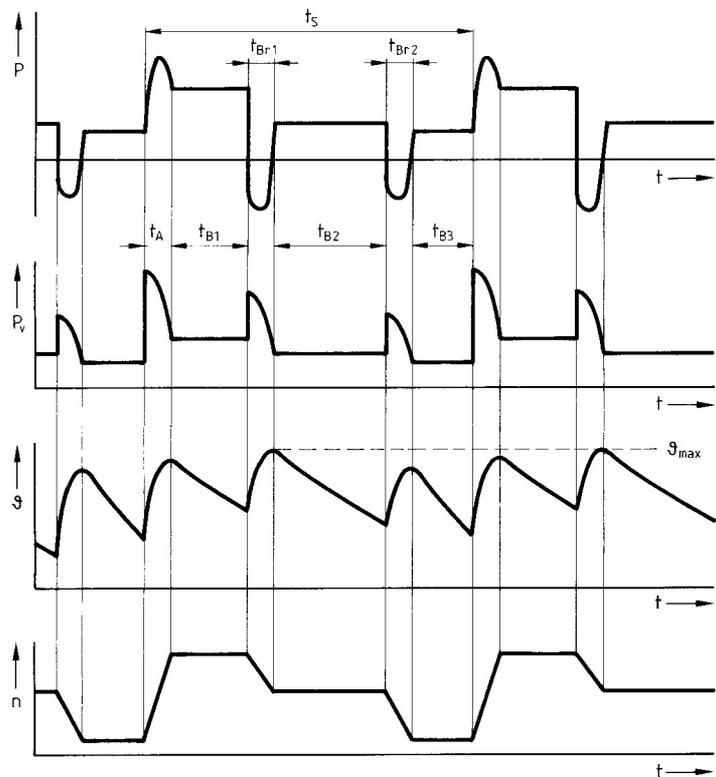


Figura 2.10.1 *Modo operativo S8: servizio ininterrotto con variazione periodica di carico/velocità*

$$\text{Rapporto d'inserzione relativo } t_{r1} = \frac{t_A + t_{B1}}{t_A + t_{B1} + t_{Br1} + t_{B2} + t_{Br2} + t_{B3}} \quad 100$$

$$\text{Rapporto d'inserzione relativo } t_{r2} = \frac{t_{Br1} + t_{B2}}{t_A + t_{B1} + t_{Br1} + t_{B2} + t_{Br2} + t_{B3}} \quad 100$$

$$\text{Rapporto d'inserzione relativo } t_{r3} = \frac{t_{Br2} + t_{B3}}{t_A + t_{B1} + t_{Br1} + t_{B2} + t_{Br2} + t_{B3}} \quad 100$$

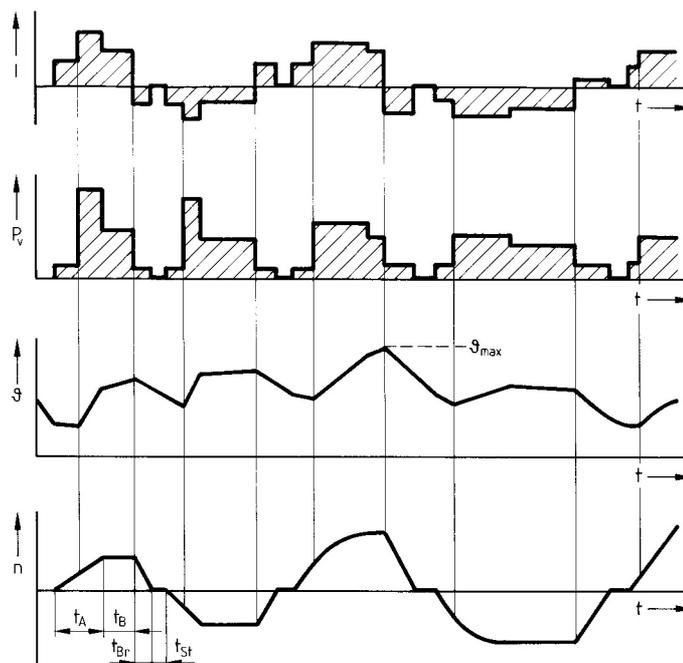
Rispetto al servizio continuo S1, in questo modo operativo è necessaria una riduzione della potenza. Un calcolo esatto risulta molto complicato ed è possibile solo con l'ausilio di informazioni dettagliate del produttore.

### 2.1.9 S9: Servizio ininterrotto con variazione non periodica di carico e velocità

In questo modo operativo indicato nella **Figura 2.11.1**, il carico e la velocità cambiano in maniera non periodica entro la gamma operativa prevista. Picchi di carico notevolmente superiori alla potenza nominale possono verificarsi frequentemente. È possibile tenere in considerazione il sovraccarico mediante un accurato sovradimensionamento.

**Definizione categoria: i produttori e gli utenti concordano di regola una potenza continua equivalente ("equ") anziché il carico variabile per velocità diverse ed un servizio irregolare compreso il sovraccarico.**

Esempio: S9, 11 kW equ 740/min; 22 kW equ 1460/min



Il modo operativo non può essere espresso con una semplice formula. Occorre utilizzare un carico continuo adatto come dimensione di riferimento per il ciclo di carico:

*Figura 2.11.1 Modo operativo S9: servizio ininterrotto con variazione non periodica di carico e velocità*

Rispetto al servizio continuo S1, la potenza continua equivalente del modo operativo S9 può essere inferiore, uguale o addirittura maggiore, a seconda dell'andamento del carico e della lunghezza degli intervalli.

**2.2. Valori medi di potenza, coppia e corrente**

In molti casi l'effettivo impiego di un motore varia rispetto ai modi operativi da S1 a S9, in quanto la potenza richiesta  $P$  o la coppia  $M_L$  e, di conseguenza, la corrente  $I$  non sono costanti. Poiché le perdite  $P_v$  variano con il quadrato del carico, i valori individuali (potenze, coppie, correnti) possono essere sostituiti da un valore di potenza medio  $P_{mi}$ .

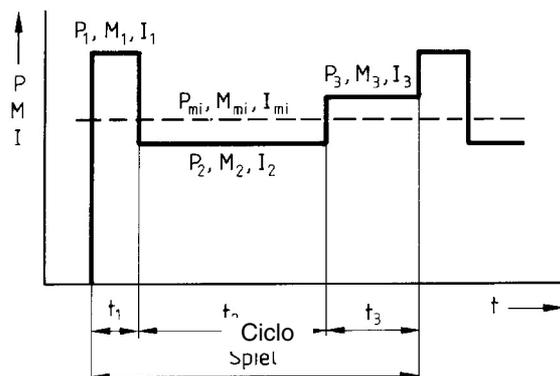


Figura 1.12.1 Calcolo della potenza media  $P_{mi}$ , della coppia media  $M_{mi}$  e della corrente media  $I_{mi}$  ( $I_{eff}$ ).

$$\text{Potenza media } P_{mi} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}}$$

Tali valori sono determinati mediante una conversione di secondo grado, come indicato nella **Figura 2.12.1**, utilizzando le potenze individuali ed i relativi tempi effettivi. La coppia massima che si presenta non dovrebbe superare l'80% della coppia massima all'avviamento per un motore trifase a induzione. Tuttavia, questo tipo di calcolo dei valori medi non è possibile in S2.

<b>Potenza media</b>	$P_{mi} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}}$
<b>Coppia media</b>	$M_{mi} = \sqrt{\frac{M^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}}$
<b>Corrente media</b>	$(I_{eff}) = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + I_3^2 \cdot t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}}$

Quando le potenze differiscono per più del fattore 2, tale calcolo medio risulta troppo impreciso ed occorre pertanto utilizzare la corrente media ricavata dalle caratteristiche del motore.

Esempio: in una macchina automatica per movimentazione industriale, i seguenti cicli di carico sono determinati per una durata del ciclo di 10 minuti:

6 kW per 3 minuti, 3 kW per 2 minuti, 7 kW per 2 minuti, 2 kW per 3 minuti:

Qual è il carico medio?

$$P_{mi} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}} = \sqrt{\frac{6^2 \cdot 3 + 3^2 \cdot 2 + 7^2 \cdot 2 + 2^2 \cdot 3}{3 + 2 + 2 + 3}} = 4,85 \text{ kW}$$

### **2.3 Potenza del motore e modi operativi**

I modi operativi da S1 a S9 possono essere suddivisi in due gruppi, che consentono o rendono necessario un aumento o una diminuzione della potenza nominale rispetto a S1:

<i>Aumento di potenza</i> rispetto a S1:	⇒ per S2, S3 ed S6
<i>Diminuzione di potenza</i> rispetto a S1:	⇒ per S4, S5, S7 ed S8

#### **2.3.1 Aumento di potenza rispetto a S1**

Poiché nei modi operativi S2, S3 ed S6 la macchina non viene fatta funzionare di continuo a pieno carico, ma solo in blocchi, essa può nuovamente raffreddarsi durante il tempo di inattività  $t_{S_i}$ ; pertanto, si può sovraccaricare meccanicamente e termicamente durante il periodo di carico  $t_B$ . Le seguenti variabili rivestono un ruolo importante nella determinazione dell'aumento massimo:

$P_n$	Potenza nominale del motore kW
$P_{mech}$	Carico limite meccanico del motore in kW
$P_{th}$	Carico limite termico del motore in kW
$M_n$	Coppia nominale in Nm
$M_K$	Coppia massima all'avviamento in Nm
T	Costante temporale termica in minuti ( <b>Tabella 2.18.1</b> )
$k_0$	Rapporto tra perdite equivalenti a vuoto/di carico ( <b>Tabella 2.18.2</b> )
$t_r$	Rapporto d'inserzione relativo in %
h	Rapporto tra dissipazione di calore ventilata/non ventilata ( <b>Tabella 2.19.1</b> )
$z_0$	Frequenza di commutazione a vuoto per ora ( <b>Tabella 2.19.2</b> )

Poiché il calcolo dei valori del motore non è semplice, molti produttori di motori trifase a induzione offrono a tal fine software specifici, con i quali è possibile individuare velocemente e in maniera affidabile il motore adeguato.

### 2.3.2 Carico limite meccanico

Quando la potenza viene aumentata nei modi operativi S2, S3 ed S6, occorre considerare il carico limite meccanico  $P_{\text{mech}}$ . Le norme definiscono che: "Deve essere possibile sovraccaricare i motori multifase a induzione, indipendentemente dal modo operativo e dalla configurazione, per 15 secondi alla tensione e alla frequenza di ingresso nominali fino a 1,6 volte la coppia nominale". I dati riportati sui cataloghi, tuttavia, sono soggetti a tolleranze fino a -10%, tanto che la coppia massima all'avviamento  $M_K$  dovrebbe essere maggiore di un fattore  $\leq 1,76$  rispetto alla nuova coppia aumentata  $M_{\text{max}}$ . Il carico limite meccanico, pertanto, può essere definito nel modo seguente facendo riferimento ai dati di catalogo:

$$\text{Carico limite meccanico } P_{\text{mech}} \leq \frac{M_K}{M_n} \cdot \frac{P_n}{1.76}$$

$P_n$  = potenza nominale in W

$M_n$  = coppia nominale in Nm

$M_k$  = coppia massima all'avviamento in Nm

### 2.3.3 Riduzione di potenza rispetto a S1

Nei modi operativi S4, S5, S7, S8 ed S9, la potenza del motore deve essere ridotta, in quanto in tutti questi casi, le perdite di avviamento o di frenatura rivestono un ruolo importante.

Il metodo di computo è basato sulla frequenza massima di commutazione a vuoto  $z_0$ , come indicato nella **Tabella 2.19.2**. Questo è il numero di inversioni massimo orario consentito senza che il motore si surriscaldi. La frequenza massima di commutazione consentita  $z$  per determinate condizioni di carico può quindi essere calcolata mediante fattori di riduzione quali il fattore d'inerzia, il fattore anticoppia ed il fattore carico.

Il fattore d'inerzia  $FI$  tiene in considerazione i momenti d'inerzia esterni come il momento d'inerzia del motore  $J_{\text{Mot}}$  ed il momento d'inerzia supplementare  $J_{\text{zus}}$ :

$$\text{Fattore d'inerzia } FI = \frac{J_{\text{Mot}} + J_{\text{zus}}}{J_{\text{Mot}}}$$

$J_{\text{Mot}}$  = momento d'inerzia del motore in  $\text{kgm}^2$

$J_{\text{zus}}$  = momento d'inerzia supplementare in  $\text{kgm}^2$

Se le velocità della macchina a motore e del motore stesso non equivalgono, tutti i momenti d'inerzia devono essere convertiti alla velocità del motore  $n_{Mot}$ :

**Momento d'inerzia supplementare convertito**

$$J_{zus} = \frac{J_1 \cdot n_1^2 + J_2 \cdot n_2^2 + \dots}{n_{Mot}^2}$$

J = momento d'inerzia in  $\text{kgm}^2$   
n = velocità/min

Il *fattore anticoppia*  $k_g$  tiene in considerazione una coppia di carico media  $M_L$  presente durante l'accelerazione e che deve essere superata dalla coppia media del motore  $M_{Mot}$ :

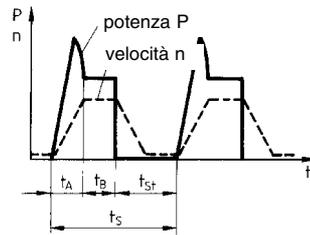
$$\text{Fattore anticoppia } k_g = 1 - \frac{M_L}{M_{Mot}}$$

$M_L$  = coppia di carico       $M_{Mot}$  = coppia del motore

Quando vengono utilizzati meccanismi con rendimento  $\eta_G$  e, di conseguenza, le velocità sono diverse, le coppie di carico della macchina a motore devono essere convertite alla velocità del motore  $n_n$ :

$$\text{Coppie di carico convertite } M_L = \frac{M_{L1} \cdot n_1}{\eta_{G1} \cdot n_n} + \frac{M_{L2} \cdot n_2}{\eta_{G2} \cdot n_n} + \dots$$

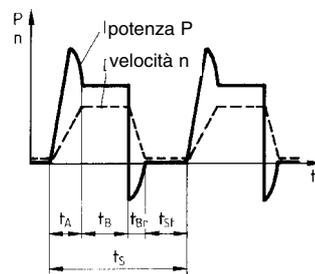
M = coppia in Nm      n = velocità/min  
 $\eta$  = rendimento meccanismo



A causa dell'effetto del processo di avviamento sul riscaldamento del motore, si dovrebbe selezionare una potenza nominale  $P_n$  del motore maggiore della potenza effettivamente necessaria  $P$ .

$t_A$  = tempo di avviamento  $t_B$  = tempo di carico,  
 $t_{St}$  = periodo di inattività  $t_S$  = durata del ciclo

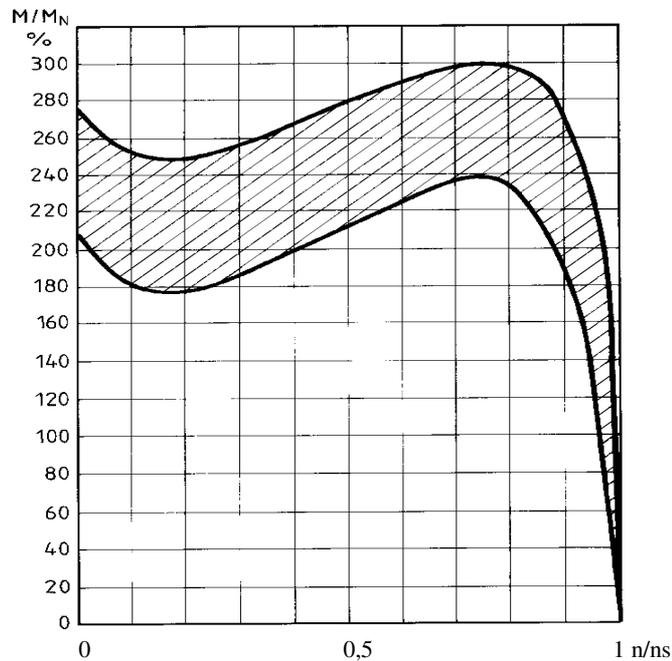
*Figura 2.17.1 Modo operativo S4 per servizio periodico di un centro di lavorazione automatica*



A causa dell'effetto del processo di avviamento e di frenatura sul riscaldamento del motore, si dovrebbe selezionare una potenza nominale  $P_n$  del motore maggiore della potenza effettivamente necessaria  $P$ .

$t_A$  = tempo di avviamento,  $t_B$  = tempo di carico,  
 $t_{Br}$  = tempo di frenatura,  $t_{St}$  = periodo di inattività  
 $t_S$  = durata del ciclo

*Figura 2.17.2 Modo operativo S5 per servizio periodico di una sega circolare*



*Figura 2.17.3 Gamma di variazione tipica della curva caratteristica della coppia per i motori trifase a induzione*

Fattore di carico  $k_L$  che esprime l'influenza del carico durante il funzionamento. La seguente formula è valida nei casi in cui la curva caratteristica del carico non sia esattamente conosciuta:

$$\text{Fattore di carico } k_L = 1 - (P / P_n)^2 \cdot \frac{(1 - k_0)t_r}{(1 - k_0)t_r + (1 - t_r)h}$$

$k_L$  = fattore di carico  
 $P$  = potenza necessaria in kW  
 $P_n$  = potenza nominale del motore  
 $k_0$  = rapporto tra perdite equivalenti a vuoto/di carico (**Tabella 2.18.2**)  
 $h$  = rapporto tra dissipazione di calore ventilata /non ventilata (**Tabella 2.19.1**)  
 $t_r$  = rapporto d'inserzione relativo (vedere modi operativi S1...S9)

<b>P<sub>n</sub> potenza nom. kW</b>	<b>2 poli</b>	<b>a 4 poli</b>	<b>a 6 poli</b>	<b>a 8 poli</b>
min	min	min	min	—
0,09 ... 1,1	7 ... 10	11 ... 10	12	—
1,5 ... 3,0	5 ... 8	9 ... 12	12	12 ... 16
4,0	14	11	13	12
5,5 ... 18,5	11 ... 15	10 ... 19	13 ... 20	10 ... 14
22 ... 45	25 ... 35	30 ... 40	40 ... 50	45 ... 55
55 ... 90	40	45 ... 50	50 ... 55	55 ... 65

*Tabella 2.18.1 Tipica costante temporale riscaldamento T in minuti per motori a induzione*

<b>P<sub>n</sub> potenza nom. kW</b>	<b>a 2 poli</b>	<b>a 4 poli</b>	<b>a 6 poli</b>	<b>a 8 poli</b>
0,09...1,5	0,35	0,45	0,5	0,5
2,2...18,5	0,25	0,25	0,3	0,3
22				
30...55	0,25	0,3	0,3	0,3
75...160	0,35	0,35	0,3	0,3

*Tabella 2.18.2 Tipico rapporto tra perdite equivalenti K<sub>O</sub> a vuoto e perdite in condizione di servizio*

Le perdite equivalenti risultano dalla somma delle percentuali delle perdite individuali che contribuiscono al riscaldamento dell'avvolgimento, come perdite di carico, del nucleo e del rotore.

<b>P<sub>n</sub> potenza nominale kW</b>	<b>a 2 poli</b>	<b>a 4 poli</b>	<b>a 6 poli</b>	<b>a 8 poli</b>
0,09...18,5	0,4	0,45	0,5	0,5
22...500	0,2	0,3	0,3	0,3

*Tabella 2.19.1 Tipico rapporto h tra dissipazione di calore di motori non ventilati e ventilati*

<b>Dimensione</b>	<b>a 2 poli</b>	<b>a 4 poli</b>	<b>a 6 poli</b>	<b>a 8 poli</b>
56	2 300	5 000	8 000	-
63	3 000	8 600	8 000	-
71	4 000	6900	6 000	7 000
80	1 700	5 000	5 500	8 000
90S	2 000	3 000	7 900	11 000
90L	2 000	2 500	6 200	11 000
100L	1 000	4 000	5 100	10 000
112M	720	1700	3 200	2 500
132S	450	850	2 200	2 800
132M	-	1000	1 700	3 000
160M	400	900	1 700	2 300
160L	400	900	1 600	2 300
180M	200	600	-	-
180L	-	550	800	1 200
200L	150	400	620	900
225S	-	280	-	700
225M	90	270	450	670
250M	60	200	320	500
280S	41	130	260	400
280M	39	120	240	370
315S	34	100	180	300
315M	32	90	170	269

*Tabella 2.19.2 Tipica frequenza di commutazione a vuoto z<sub>0</sub> per ora*

### **3 Coppie di carico caratteristiche**

I motori sono correttamente dimensionati quando vengono fatti funzionare in media con la coppia nominale  $M_n$  alla velocità nominale  $n_n$ . Essi svilupperanno quindi la potenza nominale  $P_n$  e assorbiranno la corrente nominale  $I_n$ . L'andamento della coppia della maggior parte delle macchine a motore può essere rappresentato da curve tipiche e, di conseguenza, caratteristiche, facilitando enormemente la configurazione del motore.

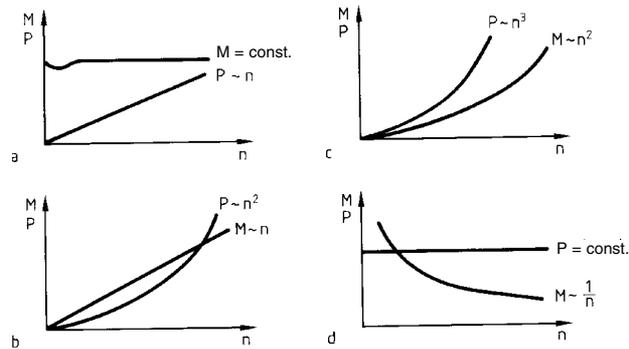
*I carichi o macchine a motore* sono dispositivi meccanici utilizzati per lavorare o forgiare materiali si tratta di *macchine utensili, presse, calandre, centrifughe, ecc.*, ma anche di *sistemi di trasporto quali gru, nastri trasportatori e meccanismi di trazione*. Inoltre, *pompe e ventilatori* possono essere raggruppate in un'unica categoria. In macchinari molto complessi e di dimensioni molto grandi quali *laminatoi o macchine per la fabbricazione della carta*, il sistema è diviso in parti ed i motori individuali vengono esaminati separatamente. Generalmente, la struttura dettagliata delle macchine a motore non viene considerata per la configurazione del motore. Normalmente, è possibile descriverla con sufficiente precisione mediante la *curva caratteristica della coppia*  $M_L = f(n)$  o  $M_L = f(t)$ , la velocità come *funzione del tempo*  $n = f(t)$ , la massima *accelerazione/decelerazione consentita* e l'intero momento d'inerzia, relativamente all'abero motore.

Normalmente, le curve caratteristiche differiscono enormemente tra il funzioanmento a vuoto e a pieno carico. Anche il momento d'inerzia può variare, a seconda che nella macchina sia presente più o meno materiale da lavorare.

**Per il dimensionamento del motore e per la verifica dei cicli di avviamento e di frenatura, è estremamente importante conoscere il comportamento della coppia di carico  $M_L$  come funzione della velocità.**

Qualsiasi macchina a motore applica una determinata coppia in opposizione al motore, che dipende generalmente dalla velocità. Essa è altrimenti detta *coppia di reazione* ed è definita essenzialmente dal processo tecnologico. In generale, essa agisce nella direzione opposta al movimento, tranne nei meccanismi di sollevamento durante il movimento di abbassamento, quando agisce nella stessa direzione del movimento. Inoltre, vi sono *coppie di accelerazione e di decelerazione* quando varia la velocità, che sono determinate dal momento d'inerzia. L'andamento della coppia di carico in un motore presenta spesso caratteristiche tipiche, che vengono utilizzate per creare una *classificazione dei tipi di carico*.

Per avere una panoramica completa delle diverse configurazioni di molte macchine, esse devono essere suddivise per categorie in base alle tipiche curve caratteristiche del carico o curve di potenza, come indicato nella **Figura 3.2.1** e nella **Figura 3.4.1**. Qui è possibile osservare, ad esempio, che ventilatori e compressori presentano caratteristiche differenti, a seconda che siano azionati a pieno carico o a vuoto. È preferibile avviarli a vuoto.



*Figura 3.2.1 Andamento della coppia o della potenza per carichi tipici come funzione della velocità*

- |   |                                   |                                       |
|---|-----------------------------------|---------------------------------------|
| a | $M \approx \text{cost.}$          | $\Rightarrow P$ proporzionale a $n$   |
| b | $M \approx$ proporzionale a $n$ , | $\Rightarrow P$ proporzionale a $n^2$ |
| c | $M \approx$ proporzionale a $n^2$ | $\Rightarrow P$ proporzionale a $n^3$ |
| d | $M \approx$ proporzionale a $1/n$ | $\Rightarrow P \approx \text{cost.}$  |

In molti casi, la coppia di carico media  $M_{Lm}$  è importante. Per un andamento della coppia conosciuto, essa può essere determinata in base alla coppia  $M_n$  dopo l'accelerazione completata.

### 3.1 Coppie di carico come funzione della velocità

I principi fisici dell'ingegneria dei motori insegnano che la potenza meccanica  $P$  di un motore è una funzione della coppia  $M$  e della velocità  $n$  o della velocità angolare  $\omega$ :

#### 3.1.1 La coppia rimane costante

La coppia di una macchina a motore risulta essenzialmente dall'attrito meccanico che rimane costante in una vasta gamma di velocità, come indicato nella **Figura 3.2.1 a**. Durante l'avviamento, si deve spesso far fronte ad un ulteriore attrito statico.

$$P = M \cdot 2 \pi \cdot n = M \cdot \omega$$

**Ad una coppia costante M, la potenza P dipende proporzionalmente dalla velocità n**

$$P \sim n$$

Di seguito riportiamo alcuni esempi di carichi meccanici con coppia costante:

- meccanismi di sollevamento, elevatori, verricelli
- macchine utensili con forza di taglio costante
- nastri trasportatori, coclee
- rettificatrici
- pompe a pistone e compressori a pressione costante
- laminatoi
- in parte anche cesoie e punzoni
- piattatrici
- cuscinetti, ingranaggi.

*La coppia di carico media  $M_{Lm}$  in queste applicazioni corrisponde approssimativamente alla coppia nominale  $M_N$  del carico. Pertanto, in queste applicazioni la potenza P può essere proporzionalmente ridotta mediante riduzione della velocità n. Dimezzando la velocità si dimezza la potenza.*

### 3.1.2 La coppia aumenta in proporzione alla velocità

Come illustrato nella **Figura 3.2.1**, tale rapporto si evidenzia, ad esempio, nell'attrito proporzionale alla velocità (attrito viscoso) durante la laminatura e la lavorazione della carta, dei tessuti o delle piastrelle di gomma.

**Quando la coppia M aumenta in proporzione, la potenza P aumenta con il quadrato della velocità n:**

$$P \sim n^2$$

Esempi:

- calandre, estrusori
- liscivatura di carta e tessuti
- freni elettromagnetici.

*La coppia di carico media  $M_{Lm}$  in queste applicazioni è approssimativamente la metà della coppia nominale  $M_n / 2$ . Diminuendo la velocità n, la potenza P diminuisce del suo quadrato. Dimezzando la velocità n la potenza P sarà solo un quarto.*

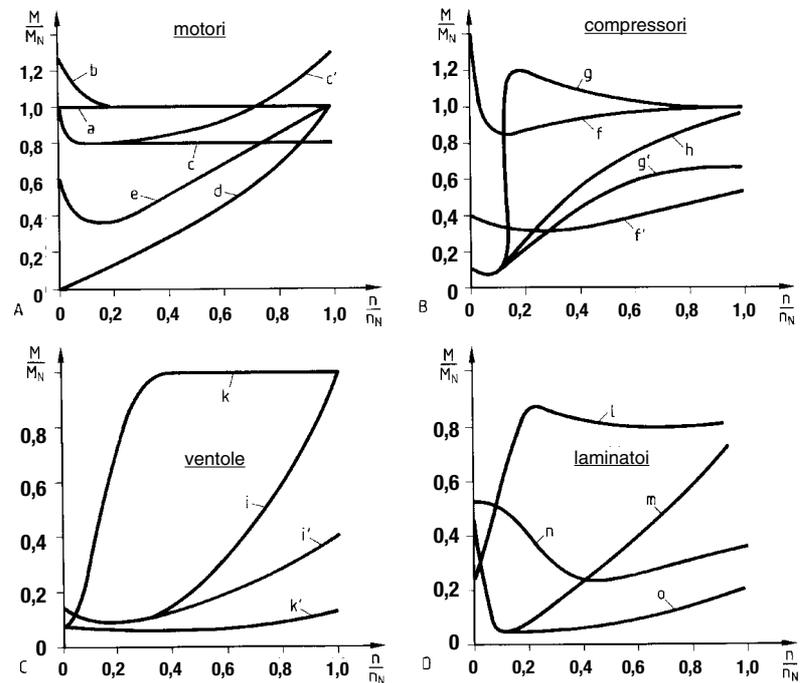


Figura 3.4.1 Tipiche curve caratteristiche della coppia di reazione di macchine

**A Varie applicazioni**

- a elevatori, montacarichi, motori di alimentazione
- b macchine utensili per taglio dei metalli
- c veicoli a bassa velocità, veicoli ad alta velocità c'
- d estrusori
- e calandre

**B Compressori**

- f compressori a pistone a contropressione, a vuoto f'
- g compressori rotanti a contropressione, a vuoto g'
- h turbocompressori

**C Ventole**

- i ventole a contropressione o pompe centrifughe, ventole a vuoto i'
- k ventole a stantuffo rotante, a vuoto k'

**D Laminatoi**

- l mulini a palle
- m mulini centrifughi
- n mulini a martelli
- o mulini a proiezione

### **3.1.3 La coppia aumenta con il quadrato della velocità**

Come indicato nella **Figura 3.2.1**, questo rapporto si evidenzia principalmente quando è presente attrito da gas o da liquido.

**Quando la coppia M aumenta al quadrato, la potenza P aumenta con il cubo della velocità n.**

$$P \sim n^3$$

Esempi:

- ventilatori e ventole di ogni tipo
- eliche
- macchine a pistoni con erogazione in una rete di tubi aperta
- pompe centrifughe
- agitatori, centrifughe
- veicoli.

*La coppia di carico media  $M_{Lm}$  è approssimativamente un terzo della coppia nominale:  $M_n/3$ . Poiché la coppia M aumenta al quadrato con l'aumento della velocità n, la potenza P è una funzione del cubo della velocità. Dimezzando la velocità sarà necessario solo un ottavo della potenza.*

*Questo rapporto è importante, ad esempio, nei motori delle pompe e dei ventilatori di riscaldamento e aerazione. Anziché ridurre la portata con una valvola a cursore o a farfalla, è preferibile regolare la velocità del motore di azionamento.*

### **3.1.4 La coppia diminuisce in proporzione inversa alla velocità**

**Se la coppia M diminuisce in proporzione inversa alla velocità n, la potenza P rimane costante.**

$$P \approx \text{cost.}$$

Come indicato nella **Figura 3.2.1**, con l'aumento della velocità la coppia diminuisce. Esempi:

- torni frontali
- pelatrici rotanti
- bobinatrici
- avvolgitori.

La coppia di carico media  $M_L$  può essere determinata solo su un grafico.

### **3.2 Coppie di carico come funzione dell'angolo**

Queste caratteristiche sono presenti nelle macchine con *movimento alternativo*, ad esempio, nelle macchine a pistoni (compressori nelle pompe di calore) a causa del carico intermittente. La corrente elettrica assorbita del motore segue questo ciclo di movimento e può generare una caduta di tensione ritmicamente fluttuante nella linea. Generalmente, programmando queste applicazioni viene tracciato un *diagramma della coppia*.

### **3.3 Coppie di carico come funzione del percorso**

Sono tipiche, ad esempio, nei veicoli o nelle vie a rulli, nelle teleferiche e nei nastri trasportatori.

### **3.4 Coppie di carico come funzione del tempo**

Questi motori sono caricati a intermittenza e periodicamente. Esempi:

- punzoni
- apparecchi di sollevamento
- sistemi trasportatori
- frantoi per pietre
- mulini a palle

### **3.5 Coppia di spunto iniziale**

Un altro importante concetto è rappresentato dalla cosiddetta *coppia di spunto iniziale o coppia statica*, originata dall'attrito statico. Affinché un motore possa essere avviato in modo affidabile, tale valore deve essere conosciuto nel modo più preciso possibile e la coppia di avviamento  $M_A$  del motore deve superare la coppia di carico. Nelle macchine di grandi dimensioni con cuscinetti radenti, esso può superare notevolmente il valore della coppia nominale  $M_n$ .

La **Figura 3.4.1** illustra alcuni andamenti delle coppie delle più comuni macchine a motore. Il confronto con la **Figura 3.2.1** mostra che la maggior parte di esse presenta un andamento tipico che ne rende possibile la classificazione.

Esempio: la velocità di un motore a induzione azionato con un controllore di carico può essere regolata all'infinito tra il 50% e il 100%. Che effetto ha questa regolazione sulla portata di una pompa a pistoni o di una pompa centrifuga?

- *Pompa a pistoni*: la coppia necessaria è quasi indipendente dalla velocità, come indicato nella **Figura 3.2.1 a**, e il suo valore rimane quasi costante. La portata è pertanto proporzionale alla velocità. Ad una velocità dimezzata, anch'essa diminuisce di conseguenza ad un valore pari a  $P' = P \cdot 0,50 = 50\%$ .

- *Pompa centrifuga:* nelle pompe centrifughe, come indicato nella **Figura 3.2.1 c**, esiste un rapporto quadratico tra la coppia necessaria e la velocità. Pertanto, la potenza varia al cubo. Ad una velocità dimezzata, la potenza sarà  $P' = P \cdot 0,5^3 = 0,125 = 12,5\%$ . La portata può quindi essere ridotta ad un ottavo del valore originale.

L'esempio mostra come il controllo automatico della velocità incida enormemente sulla potenza di una macchina.

## **4 Scelta e dimensionamento dei motori elettrici**

I motori elettrici sono convertitori di energia per i *processi cinematici* che si verificano nella tecnologia della maggior parte delle macchine a motore. Esempi:

- *Macchine a motore:*
  - macchine utensili
  - gru, elevatori, veicoli
  - pompe, ventole, compressori
  - presse, piegatrici, laminatoi, calandre, ecc.
- *Sistemi di attuazione:*
  - cursori e valvole
  - dispositivi di alimentazione, robot
  - processi cinematici in tiranterie.

In tutti i processi cinematici sono presenti le grandezze *forza, coppia, potenza, energia e tempo*. I solidi, i liquidi o i gas cambiano posizione in funzione del tempo. Anche altri concetti, quali *velocità, accelerazione, efficienza, ecc.* rivestono un ruolo importante. I motori elettrici ricavano energia da una rete di alimentazione e la convertono in energia meccanica. I dispositivi ausiliari, quali frizioni, trasmissioni, ingranaggi, freni e macchine a motore possono essere posizionati tra il motore e il carico effettivo, cioè il solido, il liquido o il gas in movimento. Per scegliere e dimensionare un motore, occorre determinare con la dovuta precisione i relativi parametri di ogni elemento nella catena del flusso di energia, iniziando con il carico effettivo. Pertanto, un'accurata selezione è della massima importanza. Ai fini di un'adeguata selezione del motore, è necessario individuare un motore ideale per il processo cinematico in oggetto. Un concetto ancora più importante della scelta del tipo di motore adeguato e dei relativi accessori quali ingranaggi, freni, frizioni, ecc., è il suo corretto dimensionamento.

Un motore sottodimensionato non funzionerà nel modo operativo continuo. Un motore sovradimensionato determina costi non necessari, funziona in maniera non economica (maggiori costi d'acquisto, minore efficienza operativa e maggiori perdite, maggiore necessità di potenza reattiva) e può caricare la macchina con una coppia di accelerazione eccessivamente elevata.

In ogni caso, dovranno essere definite le condizioni di base dell'applicazione, per cui è necessario tenere in considerazione i seguenti fattori:

- *trasmissione di potenza*: come complesso unico, il motore può essere accoppiato al carico direttamente o tramite una trasmissione, oppure può essere utilizzato come motore centrale collegato ad alberi intermedi, a trasmissioni a cinghia o a catena, ecc.;
- le *condizioni operative*, quali capacità di sovraccarico, frequenza di avviamento, modo operativo, coppia di picco, temperatura dell'ambiente, ecc. incidono non solo sulle dimensioni richieste del motore, ma anche sulla scelta dei relativi accessori;
- le *condizioni di spazio* e le possibilità di disposizione dell'intero sistema incidono prevalentemente sulla scelta degli accessori.

#### **4.1 Potenza del motore**

Il *motore trifase a induzione* è utilizzato maggiormente nelle tecnologie di azionamento, grazie alla sua semplice struttura meccanica ed elettrica ed alla sua elevata affidabilità. La sua applicazione risulta limitata solo dalle caratteristiche della coppia e della velocità.

Nell'*avvolgimento dello statore* nonché nel *rotore*, il passaggio della corrente genera calore, che non può superare le temperature specificate per la classe dei materiali isolanti utilizzati. Le temperature che si sviluppano dipendono dal livello del carico del motore, dalla sua variazione nel tempo e dalle condizioni di raffreddamento. I motori dovrebbero essere dimensionati in modo tale che, ad un carico costante con potenza nominale e in condizioni nominali di raffreddamento, non superino le temperature massime.

- La *coppia necessaria per accelerare* la massa centrifuga aumenta il tempo di accelerazione del motore. La *corrente di avviamento* che scorre durante questo periodo surriscalda enormemente l'avvolgimento.
- La *frequenza massima di commutazione*, cioè il numero di avviamenti consecutivi, è limitata. Durante i frequenti processi di avviamento, il motore raggiunge il proprio limite di temperatura consentito anche senza coppia di carico e senza una massa centrifuga supplementare.
- Il *rapporto d'inserzione* è un altro fattore importante per la scelta di un motore. Il tempo di raffreddamento negli intervalli di commutazione deve essere sufficientemente lungo da garantire che il limite di temperatura non venga superato durante l'avviamento successivo. Se il rapporto d'inserzione è breve, il motore è in grado di accettare un carico maggiore, in quanto non può riscaldarsi fino alla temperatura limite durante questo breve periodo e si raffredda di nuovo durante gli intervalli.
- I motori sottodimensionati possono essere termicamente sovraccaricati a causa di un tempo di avviamento eccezionalmente lungo, mentre i motori sovradimensionati provocherebbero il sovraccarico della trasmissione e della macchina a motore durante il processo di avviamento.

#### 4.1.1 Dati da catalogo e parametri di applicazione

Per la maggior parte delle applicazioni, viene utilizzato un cosiddetto “motore standard”, che normalmente è un motore a induzione. Salvo indicazione contraria, le seguenti informazioni si riferiscono a questo tipo di motore. I motori a induzione possono essere impiegati in una vasta gamma di applicazioni. Per poter selezionare un motore adeguato in conformità alle specifiche del produttore, occorre definire i requisiti minimi. L’obiettivo è stabilire requisiti a proposito di:

- *alimentazione*
- *caratteristiche elettriche e meccaniche del motore*
- *condizioni operative*
- *investimenti, costi operativi e di manutenzione*
- *vita media*
- *misure di protezione ambientale e di sicurezza.*

Sulla base di tali requisiti, è possibile selezionare un motore adeguato ed i relativi dispositivi ausiliari.

<b>Fattore di selezione</b>		<b>Caratteristica del motore</b>
<i>Coppia</i>	⇒	<i>Potenza</i>
<i>Momento d’inerzia</i>	⇒	<i>Tempo di avviamento</i>
<i>Coppie di carico tipiche</i>	⇒	<i>Coppia del motore</i>
<i>Analisi della configurazione mediante</i>	⇒	<i>Ottimizzazione</i>
- coppia di carico		- coppia del motore
- coppia di accelerazione		- tempo di avviamento
- tempo di accelerazione		- capacità di accelerazione
- frequenza di commutazione		- riscaldamento del motore
<i>Modi operativi</i>	⇒	<i>Riscaldamento del motore</i>
<i>Condizioni di avviamento</i>	⇒	<i>Andamento della coppia</i>
<i>Frenatura e commutazione</i>	⇒	<i>Calore dei freni</i>
<i>Processi termici</i>	⇒	<i>Capacità di carico</i>

Tabella 4.3.1 Fattori di selezione per tipo di motore e potenza nominale

#### **4.1.2 Determinazione della potenza di targa**

La potenza di targa di un motore può essere determinata sulla base di vari fattori, in quanto ogni applicazione ha requisiti diversi. La **Tabella 4.3.1** indica quali sono i fattori di selezione importanti.

#### **4.1.3 Dati da catalogo**

Il grado di conformità di un singolo motore ai requisiti stabiliti può essere determinato confrontando il motore stesso con i dati del produttore riportati sul catalogo. La **Tabella 4.5.1** elenca i parametri più importanti da osservare, a seconda dell'applicazione. Alcuni di essi sono stati standardizzati, altri sono specifici del produttore o possono essere selezionati dal cliente, normalmente scegliendo tra diverse alternative. Il tecnico progettista, pertanto, ha spesso una certa libertà di scelta nella definizione dei particolari di un motore. Molti produttori offrono progetti di motori modulari. Di solito, al momento dell'ordinazione, è possibile definire le seguenti specifiche:

- *configurazione del rotore* e, di conseguenza, caratteristica della coppia
- *sistema di raffreddamento*
- categoria dell'*isolante* degli avvolgimenti
- *forma costruttiva*
- *tipo di installazione*
- *grado di protezione* e dispositivi di protezione, nonché altri dati.

#### **4.1.4 Condizioni operative**

Ai fini della progettazione, le condizioni operative ed i parametri del carico sono importanti quanto i dati del motore.

La **Tabella 4.6.1** riporta i più importanti dati da considerare per la progettazione. Nei casi più critici, il motore di azionamento adeguato per l'applicazione in oggetto dovrebbe essere selezionato in collaborazione con il fornitore.

#### **4.1.5 Procedura di selezione dei motori**

La maggior parte dei motori funziona nel modo operativo continuo S1. Il primo aspetto da considerare per la selezione è la potenza in condizioni di servizio continuo. Poiché la vita media dei macchinari elettrici dipende in gran parte dalla temperatura in condizioni di funzionamento continuo, la scelta deve essere accurata. In secondo luogo, occorre esaminare l'adeguatezza del motore alle condizioni di avviamento, in riferimento al tempo o alla coppia di avviamento. Per i motori con modi operativi complessi (S2 ... S9) valgono in generale le stesse considerazioni, mentre sono solitamente necessarie consultazioni con i fornitori a causa delle condizioni di carico variabili e delle temperature degli avvolgimenti oscillanti.

<b>Dati da definire</b>		<b>Osservazioni</b>
<b>Requisiti elettrici</b>		
Tipo di corrente		Tensione di esercizio, per i motori multitensione indicare tutti i valori e le possibili tolleranze
Corrente trifase, corrente monofase	V	
Frequenza	Hz	
<b>Dati da catalogo</b>		
Designazione del tipo		Specifiche del produttore
Potenza nominale		Per motori con diverse velocità, potenza nominale per velocità
Velocità		Per motori con diversi poli, velocità per potenza
Corrente nominale	A	Specifiche del produttore
Corrente di spunto iniziale/nominale		Specifiche del produttore
Coppia	Nm	Per applicazioni speciali
Coppia di spunto iniziale/nominale		Specifiche del produttore
Coppia minima all'avviamento/nominale		Specifiche del produttore
Coppia massima all'avviamento/nominale		Specifiche del produttore
Momento d'inerzia	kgm <sup>2</sup>	Specifiche del produttore
Efficienza $\eta$	%	Specifiche del produttore
Tempo max. di blocco	s	Specifiche del produttore
Tempo max. di avviamento	s	Specifiche del produttore
Tolleranze		Stabilite nelle norme
<b>Tipo di configurazione</b>		
Azionamento		Per avviamento stella-triangolo, specificare sempre triangolo
Triangolo, stella		
Tipo rotore		
Rotore a gabbia, rotore avvolto		
Modello	IM..	IEC 34-7, Parte 7
Tipo di protezione	IP..	IEC 34-7, Parte 7
Tipo di raffreddamento		
Raffreddamento naturale, interno		
Autoraffreddamento di superficie		
Raffreddamento a circuito chiuso, separato		
Categoria isolante		
B, F, H		Indicare limite di temp., se richiesto
Ampiezza vibrazioni		Normale o ridotta
Livello sonoro	db	
Regolazioni speciali		Regolazioni elett. e mecc.
Scatola morsetti		Indicare il tipo di protezione e configurazione se necessario
Estremità albero		Indicare il tipo di protezione e configurazione se necessario
Componenti annessi, incorporati		Indicare interruttore o spina, se necessario
Freni, dinamo tachimetrica		
Ventilazione separata, riscaldatore spaziale		
Strumenti di misuraz. della temperatura statore		Per cuscinetti o avvolgimenti
- Protezione termistore		
- Interruttore bimetallico		Contatti di chiusura e di riposo
- Resistori PTC		

*Tabella 4.5.1 Catalogo dati per motori*

<b>Dati da definire</b>		<b>Osservazioni</b>
<b>Coppia del carico</b> - costante - aumenta al quadrato - curva speciale	<b>Nm</b>	Convertire per albero motore se necess.  Discutere con il produttore, se necessario
Momento d'inerzia del carico	kgm <sup>2</sup>	Convertire per velocità motore max.
<b>Tipo di avviamento</b> - stella-triangolo necessario - avviamento a pieno carico - avviamento a vuoto - altri metodi necessario		Avviamento stella-triangolo intensificato, se necessario  Avviatori gradualmente o controllori di carico, se necessario
Frenatura elettrica		Frenatura per inversione di fase o dinamica
<b>Modo operativo</b>		
S1		Servizio continuo
S2	min	Servizio temporaneo
S3	%	Servizio periodico intermittente senza avviamento
S4	%, c/h	Servizio periodico intermittente con avviamento
S5	%, c/h	Servizio periodico intermittente con avviamento e frenatura elettrica
S6	%	Servizio continuo con carico intermittente
S7	c/h	Servizio ininterrotto con avviamento e frenatura elettrica
S8	%, c/h	Servizio ininterrotto con variazione periodica di carico/velocità
S9		Servizio ininterrotto con variazione non periodica di carico e velocità
Temperatura ambiente	°C	
Altitudine	metri sopra il livello del mare	
Direzione di rotazione		in senso orario, antiorario o entrambi
Regolazione della velocità		metodo e da...a...
Influenze climatiche		Considerare anche l'umidità relativa
<b>Carico cuscinetti e albero</b>		
Forza assiale	N	Direzione della forza rispetto alla posizione dell'albero
Forza radiale	N	Indicare la distanza dallo spallamento dell'albero
Forze rotanti	N	

*Tabella 4.6.1 Dati importanti per la configurazione del motore*

#### **4.2 Dimensionamento con l'uso della coppia di carico**

La coppia di carico  $M_L$  risulta dalla somma dell'anticoppia della macchina a motore e dell'efficienza  $\eta$  con cui vengono espresse tutte le perdite meccaniche. In base alle curve caratteristiche del carico, la coppia di carico durante l'accelerazione può

- generarsi gradualmente (ad esempio, ventole);
- raggiungere il valore nominale all'avviamento (ad esempio, apparecchi di sollevamento);
- essere presente solo dopo l'accelerazione (ad esempio, macchine per la lavorazione del legno);
- essere presente costantemente o ad intermittenza.

$$\text{Potenza } P = \frac{M \cdot n}{9,55 \cdot \eta}$$

P = potenza in W

M = coppia in Nm

n = velocità/min

$\eta$  = efficienza

Per una coppia di carico costante  $M_L = \text{cost.}$  e velocità nominale n, il calcolo avviene in base al seguente rapporto:

$$\text{Potenza } P = \frac{F \cdot v}{\eta}$$

P = potenza di sollevamento in W

F = forza di sollevamento in N

v = velocità di sollevamento in m/s

$\eta$  = efficienza

In un apparecchio di sollevamento, per una potenza di sollevamento P ad una determinata velocità v e forza F, e tenendo in considerazione l'efficienza  $\eta$ , otteniamo:

In qualsiasi momento durante l'accelerazione, la coppia di carico  $M_L$  deve essere inferiore alla rispettiva coppia del motore  $M_M$ . In caso contrario, non ha luogo nessuna accelerazione a velocità superiori.

### 4.3 Calcolo con l'uso della coppia di accelerazione o del tempo di accelerazione

#### 4.3.1 Coppia di accelerazione

Un carico può essere accelerato solo quando il motore di azionamento fornisce una coppia maggiore rispetto a quella necessaria in quel particolare momento. La differenza è definita *coppia di accelerazione*  $M_B$ . Tale coppia ed il momento d'inerzia del motore, della trasmissione e del sistema da accelerare producono il tempo di accelerazione  $t_A$ . In molti casi, si parte dal presupposto semplificato che la coppia di carico sia costante durante l'accelerazione. Tale presupposto viene raggiunto con il calcolo di una coppia di carico media e sostituendo la coppia variabile del motore con una coppia media costante di accelerazione ricavata dalla curva caratteristica.

Dato un tempo di avviamento  $t_A$ , la coppia di accelerazione necessaria  $M_B$  viene calcolata nel modo seguente:

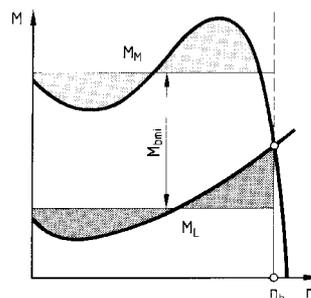
#### Coppia di accelerazione

$$M_B = M_m - M_L = J' \cdot \alpha = J' \cdot \frac{\omega}{t_A} = \frac{J' \cdot 2\pi \cdot n}{60 \cdot t_A} = \frac{J' \cdot n}{9,55 \cdot t_A}$$

$M_M$  = coppia del motore in Nm       $M_L$  = coppia di carico in Nm  
 $t_A$  = tempo di avviamento in s       $\alpha$  = accelerazione angolare/s<sup>2</sup>  
 $n$  = velocità del motore/min       $\omega$  = velocità angolare/s  
 $M_B$  = coppia media di accelerazione in Nm  
 $J'$  = momento d'inerzia in kgm<sup>2</sup> ridotto sull'albero motore

#### 4.3.2 Tempo di accelerazione

Il tempo di accelerazione  $t_A$  può essere determinato sulla base della relazione sopra indicata, se si conosce la coppia media di accelerazione  $M_B$ . La **Figura 4.8.1** mostra un metodo relativamente semplice di determinazione di tale valore. La coppia del motore  $M_M$  e la coppia di carico  $M_L$  vengono rappresentate su carta millimetrata e successivamente vengono definite graficamente le coppie medie, ad esempio, contando i quadrati. Il diagramma finale evidenzierà la coppia media di accelerazione  $M_B$ .



$M_M$     coppia del motore  
 $M_L$     coppia di carico  
 $M_{bmi}$     coppia media di accelerazione  
 $n_b$     velocità di esercizio

Figura 4.8.1 Determinazione della coppia media di accelerazione mediante bilanciamento dell'area sulla carta millimetrata

$$\text{Tempo di accelerazione in s } t_A = \frac{J' \cdot n}{9,55 \cdot M_B}$$

$M_B$  = coppia media di accelerazione in Nm

$J'$  = momento d'inerzia ridotto sull'albero motore in  $\text{kgm}^2$

$n$  = velocità del motore/min

- Esempio:* Presumendo che in un motore bipolare con  $n = 2980$  giri/min,  $P = 110$  kW,  $J = 1,3$   $\text{kgm}^2$  a vuoto la coppia media di accelerazione sia  $M_B = 1,5 \cdot M_n$ , quale sarà la durata
- del tempo di avviamento a vuoto?
  - del tempo di avviamento con un carico di  $J_L = 1000$   $\text{kgm}^2$  ad una velocità di  $n_L = 300$  giri/min, se esso richiede continuamente la coppia nominale durante l'accelerazione?

*Soluzione:* a) Tempo di avviamento a vuoto

$$\text{Coppia nominale del motore } M_n = \frac{P \cdot 60}{2\pi \cdot n} = \frac{110\,000 \text{ W} \cdot 60}{2\pi \cdot 2\,980/\text{min}} = 352,5 \text{ Nm}$$

$$\text{Coppia di accelerazione } M_B = 1,5 \cdot M_n = 1,5 \cdot 352 \text{ Nm} = 528,7 \text{ Nm}$$

$$\text{Tempo di accelerazione } t_A = \frac{J \cdot n}{9,55 \cdot M_B} = \frac{1,3 \text{ kgm}^2 \cdot 2\,980 \text{ VPM}}{9,55 \cdot 528,7 \text{ Nm}} = \mathbf{0,76 \text{ s}}$$

b) Tempo di accelerazione con carico

Il momento d'inerzia del carico convertito alla velocità del motore è pari a:

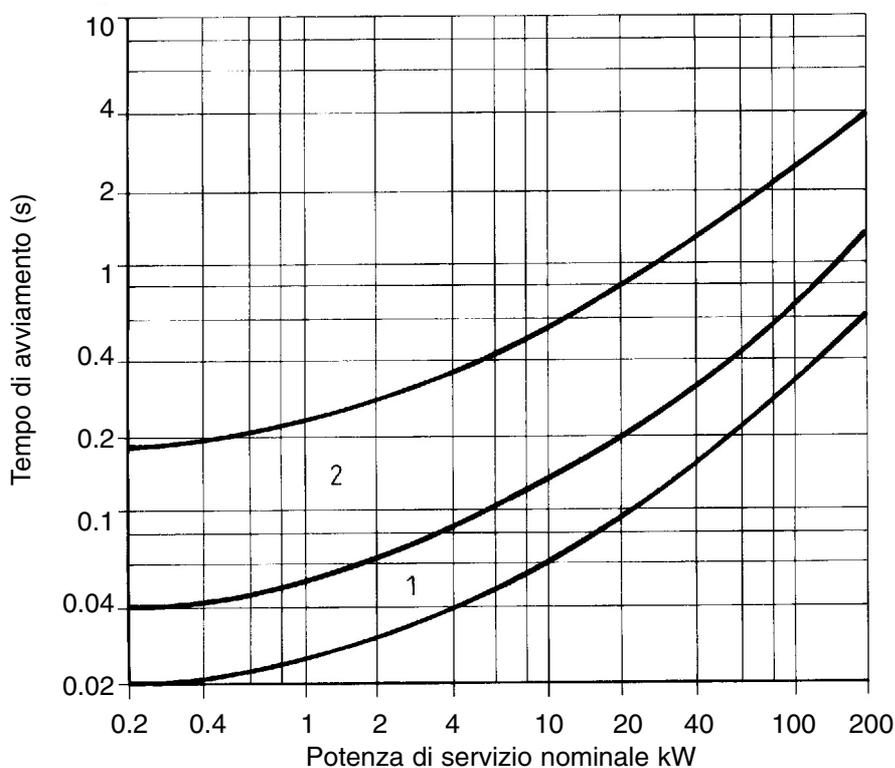
$$J' = J_L \cdot (n_L/n)^2 = 1000 \text{ kgm}^2 \cdot (300 \text{ giri/min}/2980 \text{ giri/min})^2 = 10,1 \text{ kgm}^2$$

L'effettivo momento di accelerazione con il carico possono essere ricavati dalla differenza tra la coppia media di accelerazione del motore e la coppia nominale del carico continuamente richiesta:

$$M_B = 1,5M_n - M_n = 0,5 \cdot M_n$$

$$\text{Tempo di accelerazione } t_A = \frac{(J' + J_{\text{Mot}}) \cdot n}{9,55 \cdot M_B} = \frac{(10,1 + 1,3) \text{ kgm}^2 \cdot 2\,980 \text{ giri/min}}{9,55 \cdot 0,5 \cdot 352,5 \text{ Nm}} = \mathbf{20 \text{ s}}$$

Nella scelta del motore, il tempo di accelerazione  $t_A$ , con considerazione della frequenza di commutazione, deve essere più breve rispetto al tempo massimo specificato dal produttore. I motori senza carico ed i motori che presentano solo masse centrifughe supplementari piccole quali frizioni, ecc., raggiungono molto rapidamente la loro velocità a vuoto. In generale, questa situazione si verifica anche nel caso di un avviamento con un carico. Solo quando si devono accelerare masse centrifughe di grandi dimensioni, i tempi di avviamento sono molto lunghi. Questo fenomeno è definito *avviamento pesante*, ed è il caso, ad esempio, delle centrifughe, dei mulini a palle, delle calandre, dei sistemi trasportatori e di ventilatori di grandi dimensioni. Queste applicazioni richiedono spesso motori speciali e le relative apparecchiature elettriche. La **Figura 4.10.1** riporta i valori di riferimento per il tempo di avviamento dei motori standard come funzione della potenza nominale.



**Figura 4.10.1** Valori di riferimento tipici per il tempo di avviamento dei motori standard come funzione della potenza di servizio nominale  
1 avviamento a vuoto (motore + frizione)  
2 avviamento sotto carico (senza massa centrifuga di grandi dimensioni)

Se la curva della coppia di carico  $M_L$  è complessa e la coppia del motore  $M_M$  non è costante, risulta vantaggioso suddividere il calcolo in singole aree, come illustrato nella **Figura 4.11.1**. Vengono quindi calcolati i tempi di accelerazione relativi alle singole aree più le coppie medie di accelerazione che si sviluppano nel segmento e si procede successivamente alla somma per i singoli segmenti di velocità (ad esempio, un aumento di velocità del 20% per segmento).

**Tempo di accelerazione per coppie non costanti**

$$t_A = \frac{\sum J' \cdot \Delta n}{9,55 \cdot M_B}$$

$t_A$  = tempo di avviamento in s  
 $J'$  = momento d'inerzia ridotto sull'albero motore in  $\text{kgm}^2$   
 $\Delta n$  = differenza di velocità in giri/min  
 $M_B$  = coppia di accelerazione in Nm

**4.4 Calcolo con l'uso della frequenza di inserzione**

L'avviamento frequente dei motori è definito *modo di inserzione*, per il quale occorre controllare la massima *frequenza delle inserzioni per ora*. I dati del produttore normalmente indicano la frequenza oraria delle commutazioni a vuoto consentita, vale a dire il numero di commutazioni a cui il motore raggiunge la propria temperatura massima senza carico e senza un momento d'inerzia supplementare durante il funzionamento a vuoto. La frequenza delle commutazioni ha un'importanza particolare nel modo operativo S4. La frequenza consentita delle commutazioni di un motore è determinata dal suo limite di temperatura ed è ricavata dal valore quadratico medio della corrente ottenuto dall'andamento del ciclo. Tale valore medio non può eccedere quello della corrente nominale della macchina.

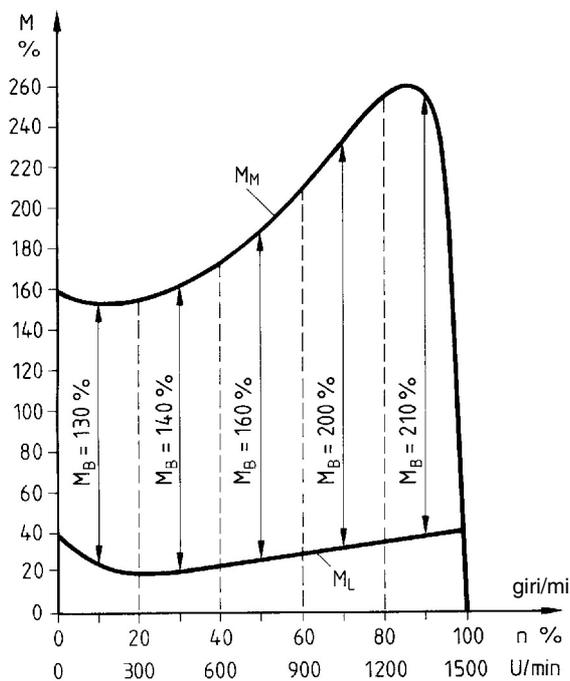


Figura 4.11.1 Coppia di accelerazione per il calcolo del tempo di accelerazione quando la coppia del motore  $M_M$  e la coppia di carico  $M_L$  non sono costanti e mostrano un andamento molto diverso

Commutazioni troppo frequenti che provocano una risposta dei dispositivi di protezione o persino la distruzione del motore si verificano durante la fase di messa in funzione, durante le regolazioni e i comandi ad impulsi.

Spesso, una *massa volante supplementare* provoca una condizione di carico. In tal caso, il numero di commutazioni orarie consentite  $z_z$  può essere calcolato in base al principio della conservazione dell'energia per il modo di commutazione:

**Commutazioni consentite con massa supplementare**

$$z_z = \frac{z_0 \cdot J_M}{J_M + J_z}$$

$z_z$  = commutazioni orarie consentite con massa supplementare  
 $z_0$  = commutazioni orarie a vuoto consentite  
 $J_M$  = momento d'inerzia di massa del motore in  $\text{kgm}^2$   
 $J_z$  = ridotto momento d'inerzia di massa supplementare in  $\text{kgm}^2$

Nel modo di commutazione con una coppia di carico esistente  $M_L$ , il numero di commutazioni orarie consentite  $z_L$  è determinato nel modo seguente:

**Commutazioni consentite con coppia di carico**

$$z_L = \frac{z_0 \cdot (M_M - M_L)}{M_M}$$

$z_L$  = commutazioni orarie consentite con coppia di carico  
 $z_0$  = commutazioni orarie consentite a vuoto  
 $M_M$  = coppia media del motore durante l'accelerazione in Nm  
 $M_L$  = coppia media di carico durante l'accelerazione in Nm

In pratica, sono solitamente presenti una massa volante  $J_z$  ed una coppia di carico  $M_L$  supplementari. Pertanto, la formula seguente si riferisce al numero  $z_{Zul}$  di commutazioni orarie consentite:

$$z_{Zul} = z_z \cdot \frac{z_L}{z_0} = z_0 \cdot \frac{J_M \cdot (M_M - M_L)}{(J_z + J_M) \cdot M_M} \text{ e convertito:}$$

**Commutazioni consentite con carico supplementare e momento d'inerzia**

$$z_L = z_0 \cdot \frac{1 - M_{Lmi} / M_{Mmi}}{1 + J_z / J_M}$$

$z_L$  = commutazioni orarie consentite con massa volante supplementare e

coppia di carico

$z_0$  = commutazioni a vuoto consentite

$M_{Mmi}$  = coppia media del motore durante l'accelerazione in Nm

$M_{Lmi}$  = coppia media di carico durante l'accelerazione in Nm

$J_z$  = ridotto momento di inerzia di massa supplementare in kgm<sup>2</sup>

$J_M$  = momento di inerzia di massa del motore in kgm<sup>2</sup>

<b>P<sub>n</sub> Potenza nom. kW</b>	<b>a 2 poli</b>	<b>a 4 poli</b>	<b>a 6 poli</b>	<b>a 8 poli</b>
0,09...1,5	1500...4000	2500...8500	5500...8000	7000...11000
2,2...18,5	400...1000	800...4000	1500...5000	2000...10000
22	200	600	800	1200
30...55	50...150	200...400	300...600	500...900
75...160	30...40	90...130	170...260	270...400

Tabella 4.13.1 Tipica frequenza oraria di commutazione a vuoto  $z_0$

**4.5 Scelta del motore con l'uso dei dati riportati sul catalogo**

Utilizzando i valori medi di potenza  $P_{mi}$ , coppia  $M_{mi}$  e corrente  $I_{mi}$  calcolati per condizioni operative meno impegnative, è possibile scegliere un motore utilizzando i corrispondenti dati riportati sul catalogo, che non possono essere inferiori rispetto a quelli medi calcolati:

$$P_{mi} \leq P_n, \quad M_{mi} \leq M_n, \quad I_{mi} \leq I_n$$

La maggior parte delle applicazioni dei motori può rientrare nelle 9 categorie di modi operativi da S1 a S9. Nelle situazioni più complesse, in cui non è possibile effettuare una selezione più precisa, si può definire un modo operativo simile e quindi convertirlo a S1. Questo metodo, tuttavia, richiede una conoscenza dettagliata delle costanti temporali termiche e delle condizioni di raffreddamento. Il produttore del motore è in grado di fornire questi dati.

## 5 Simboli delle equazioni

Simbolo	Significato	Unità di misura	Osservazioni
f	frequenza	s <sup>-1</sup>	frequenza di linea
FI	fattore d'inerzia		
h	rapporto tra rilascio di calore ventilato/non ventilato		
I	corrente	A	corrente nella linea di alimentazione
I <sub>mi</sub>	corrente media (I <sub>eff</sub> )	A	valore effettivo
I <sub>n</sub>	corrente nominale	A	corrente continua massima
J'	momento d'inerzia ridotto sull'albero motore	kgm <sup>2</sup>	
J <sub>ext</sub>	momento d'inerzia del carico in riferimento all'albero motore	kgm <sup>2</sup>	
J <sub>M</sub>	momento d'inerzia del motore	kgm <sup>2</sup>	
J <sub>mot</sub>	momento d'inerzia del motore	kgm <sup>2</sup>	
J <sub>Z</sub>	ridotto momento d'inerzia di massa supplementare	kgm <sup>2</sup>	
J <sub>zus</sub>	momento d'inerzia supplementare	kgm <sup>2</sup>	
k <sub>0</sub>	rapporto tra perdite equivalenti di carico/a vuoto		
k <sub>g</sub>	fattore anticoppia	Nm	
k <sub>L</sub>	fattore di carico	Nm	
M	coppia	Nm	
M <sub>A</sub>	coppia di spunto iniziale	Nm	
M <sub>B</sub>	coppia di accelerazione	Nm	
M <sub>K</sub>	coppia massima all'avviamento	Nm	
M <sub>L</sub>	coppia di carico	Nm	
M <sub>Lmi</sub>	coppia media di carico durante l'accelerazione	Nm	
M <sub>M</sub>	coppia del motore	Nm	
M <sub>Mmi</sub>	coppia media del motore durante l'accelerazione	Nm	
M <sub>mi</sub>	coppia media	Nm	
M <sub>n</sub>	coppia nominale	Nm	
M <sub>S</sub>	coppia minima all'avviamento	Nm	

<b>Simbolo</b>	<b>Significato</b>	<b>Unità di misura</b>	<b>Osservazioni</b>
n	velocità	giri/min	
n	velocità di funzionamento	giri/min	
$n_0$	velocità a vuoto	giri/min	
$n_n$	velocità nominale	giri/min	
$n_s$	velocità sincrona	giri/min	
p	numero coppie poli (numero poli/2)		
P	potenza	kW	
$P_2$	potenza sviluppata	kW	
$P_1$	potenza assorbita	kW	
$P_{Cu}$	perdita di carico	kW	
$P_{CuR}$	perdita ohmica nel rotore	kW	funzione quadratica della corrente
$P_{CuS}$	perdita ohmica nello statore	kW	funzione quadratica della corrente
$P_{Fe}$	perdita nel ferro nello statore	kW	circa costante in servizio
$P_{La}$	perdita per attrito cuscinetti	kW	circa costante in servizio
$P_{Lu}$	perdita per resistenza aerodinamica	kW	circa costante in servizio
$P_{mech}$	carico limite mecc. del motore	kW	
$P_{mi}$	potenza media	kW	
$P_n$	potenza nominale	kW	
$P_{th}$	carico limite termico	kW	
$P_v$	perdite	kW	
$P_{VR}$	perdita nel rotore	kW	
$P_{zus}$	perdita supplementare per dispersione	kW	circa costante in servizio
s	scorrimento	kW	
S1	servizio continuo		
S2	servizio temporaneo		
S3	servizio periodico intermittente		...senza avviamento
S4	servizio periodico intermittente		...con avviamento
S5	servizio periodico intermittente		...con avviamento e frenatura elettrica

<b>Simbolo</b>	<b>Significato</b>	<b>Unità di misura</b>	<b>Osservazioni</b>
S6	servizio continuo		... con carico intermittente
S7	servizio ininterrotto		... con avviamento e frenatura elettrica
S8	servizio ininterrotto		... con variazione periodica di carico/velocità
S9	servizio ininterrotto		con variazione non periodica di carico e velocità
t	tempo	s, min, h	
T	costante temporale termica	min	
t <sub>A</sub>	tempo di avviamento	s, min	
t <sub>B</sub>	tempo di carico, tempo di servizio	s, min	
t <sub>B</sub>	tempo di servizio	s, min	
t <sub>Br</sub>	tempo di frenatura	s, min	
t <sub>L</sub>	tempo a vuoto	s, min, h	
t <sub>r</sub>	rapporto d'inserzione relativo	%	
t <sub>S</sub>	durata del ciclo	s, min, h	
t <sub>St</sub>	tempo di inattività	s, min, h	
U	tensione	V	
z <sub>0</sub>	frequenza di commutazione a vuoto	h <sup>-1</sup> (per ora)	
z <sub>A</sub>	frequenza di avviamento a vuoto	h <sup>-1</sup>	
z <sub>L</sub>	commutazioni orarie consentite con coppia di carico e possibile massa supplementare	h <sup>-1</sup>	
z <sub>z</sub>	commutazioni orarie consentite con massa supplementare	h <sup>-1</sup>	
z <sub>zul</sub>	frequenza di commutazione consentita	h <sup>-1</sup>	
η	efficienza	%	
ϑ		temperatura °C	
ϑ <sub>max</sub>	temperatura massima	°C	
Δn	differenza di velocità	giri/min	
cosφ	fattore di potenza		

*Tabella di simboli ed unità di misura*

# Oltre 500.000 possibilità di migliorare il vostro sistema di automazione

<b>Apparecchiature elettriche</b>	Contattori e avviatori Protezione motore Centri di comando motore Monitoraggio delle prestazioni Interruttori di comando e sotto carico Relè	<b>Automazione</b>	Controlli porogrammabili I/O digitali e analogici Moduli periferici intelligenti
<b>Tecnologia sensori</b>	Interruttori fine corsa, fotoelettrici e di prossimità Sensori di pressione e di temperatura Sistemi di identificazione (HF) Sistemi di lettura codici a barre Encoder Sistemi di elaborazione immagini	<b>Comunicazioni</b>	Reti e sistemi bus di campo Reti di comunicazione aperte (MAP)
<b>Dispositivi di comando</b>	Dispositivi di comando e unità di segnalazione Display di testo ed LCD Console di comando Computer industriali Software di visualizzazione	<b>Soluzioni di sistema</b>	Soluzioni personalizzate Controlli dei processi/produzione a lotti Controlli bruciatori Controlli pressofusione e stampaggio a pressa SCADA
<b>Tecniche di azionamento</b>	Avviatori graduali Convertitori di frequenza Unità di azionamento c.a. e c.c. Comandi assiali e dispositivi di servocomando Controlli CNC	<b>Assicurazione qualità</b>	Acquisizione e analisi di dati statistici
		<b>Assistenza</b>	Assistenza a livello mondiale Addestramento clienti Riparazione e assistenza ricambi Consulenza tecnica



Rockwell Automation aiuta i propri clienti ad ottenere i massimi risultati dai loro investimenti tramite l'integrazione di marchi prestigiosi nel settore dell'automazione industriale, creando una vasta gamma di prodotti di facile integrazione. Tali prodotti sono supportati da una rete di assistenza tecnica locale disponibile in ogni parte del mondo, da una rete globale di integratori di sistemi e dalle risorse tecnologicamente avanzate della Rockwell.

## Rappresentanza mondiale.



Arabia Saudita • Argentina • Australia • Austria • Bahrain • Belgio • Bolivia • Brasile • Bulgaria • Canada • Cile • Cipro • Colombia • Corea • Costa Rica • Croazia • Danimarca  
Ecuador • Egitto • El Salvador • Emirati Arabi Uniti • Filippine • Finlandia • Francia • Gana • Giamaica • Giappone • Giordania • Germania • Grecia • Guatemala • Honduras  
Hong Kong • Irlanda • Islanda • Israele • Italia • Kuwait • Libano • Macao • Malaysia • Malta • Marocco • Messico • Nigeria • Norvegia • Nuova Zelanda • Oman • Paesi Bassi • Pakistan • Panama • Perù • Polonia • Portogallo • Portorico • Qatar • Regno Unito • Repubblica Ceca • Repubblica del Sud Africa • Repubblica Dominicana  
Repubblica Popolare Cinese • Romania • Russia • Singapore • Slovacchia • Slovenia • Spagna • Stati Uniti • Svezia • Svizzera • Taiwan • Thailandia • Trinidad • Tunisia  
Turchia • Ungheria • Uruguay • Venezuela

Rockwell Automation, Sede Centrale, 1201 South Second Street, Milwaukee, WI 53204 USA, Tel: (1) 414 382-2000, Fax: (1) 414 382-4444

Rockwell Automation, Sede Europea, Avenue Herrmann Debrouxlaan, 46, 1160 Bruxelles, Belgio, Tel: (32) 2 663 06 00, Fax: (32) 2 663 06 40

Rockwell Automation, Sede Asia-Pacifico, 27/F Citicorp Centre, 18 Whitfield Road, Causeway Bay, Hong Kong, Tel: (852) 2887 4788, Fax: (852) 2508 1846

**SEDI ITALIANE:** Rockwell Automation S.r.l., Viale De Gasperi 126, 20017 Mazzo di Rho MI, Tel: (+39-2) 939 72.1, Fax: (+39-2) 939 72.201

Rockwell Automation S.r.l., Divisione Componenti, Via Cardinale Riboldi 161, 20037, Paderno Dugnano MI, Tel: (+39-2) 990 60.1, Fax: (+39-2) 990 43.939

Reliance Electric S.p.A., Via Volturmo 46, 20124 Milano, Tel: (+39-2) 698 141, Fax: (+39-2) 668 01 714

**FILIALI ITALIANE:** Rockwell Automation S.r.l., Milano, Torino, Padova, Brescia, Bologna, Roma, Napoli