



## AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

Prof. Giuseppe Tomasso – Università di Cassino




**Corso di Laurea in  
Ingegneria  
meccanica**

<b>TITOLO DEL CORSO:</b>	<b>AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE</b>
<b>DOCENTE DEL CORSO</b>	Prof. G. Tomasso e-mail: <a href="mailto:tomasso@unicas.it">tomasso@unicas.it</a> tel: 0776-2993730
Orario di ricevimento	lunedì-martedì-giovedì-venerdì (9:00-14:00)
Corso di Laurea	Ingegneria Meccanica (3° anno)
Numero di crediti	4
Corsi a scelta correlati	-Laboratorio di Azionamenti Elettrici
Testi consigliati	Appunti distribuiti dal docente Slides del corso (consultare il sito <a href="http://webuser.unicas.it/tomasso">http://webuser.unicas.it/tomasso</a> )
Modalità d'esame	presentazione relazioni scritte; esame orale.



4 settimane	<p><b>Introduzione agli Azionamenti Elettrici</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• struttura di un azionamento elettrico;</li> <li>• classificazione;</li> <li>• settori di impiego.</li> </ul> <p><b>Meccanica degli Azionamenti Elettrici</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• richiami sulle equazioni del moto;</li> <li>• organi di trasmissione;</li> <li>• punto di lavoro e stabilità.</li> </ul> <p><b>Richiami sulla conversione elettromeccanica dell'energia</b></p> <p><b>Motore in cc ad eccitazione indipendente</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• principio di funzionamento;</li> <li>• modello matematico;</li> <li>• caratteristiche stazionarie</li> <li>• regolazione della velocità in regime stazionario</li> <li>• dominio di regolazione</li> <li>• avviamento</li> <li>• frenatura</li> </ul>	4 settimane	<p><b>Azionamenti cc controllati in catena chiusa</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• controlli in retroazione;</li> <li>• regolatori industriali;</li> <li>• controllo in cascata motore cc ad eccitazione indipendente: anello di corrente e velocità</li> </ul> <p><b>Introduzione ai PLC</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• struttura di un PLC</li> <li>• programmazione di un PLC</li> </ul> <p><b>Motore asincrono trifase</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• modello matematico in regime stazionario;</li> <li>• circuito equivalente</li> <li>• caratteristiche stazionarie;</li> <li>• avviamento;</li> <li>• frenatura;</li> <li>• regolazione della velocità.</li> </ul> <p><b>Azionamenti in alternata</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• controllo <math>V/f</math> motore asincrono;</li> <li>• controllo di scorrimento motore asincrono con isteresi;</li> </ul> <p><b>Dimensionamento degli azionamenti elettrici</b></p>
-------------	--	-------------	---






GLI AZIONAMENTI ELETTRICI: APPLICAZIONI

## Gli azionamenti elettrici



**Definizione di azionamento elettrico a velocità controllata  
(V. norma CEI C.642)**

Sistema che converte energia elettrica in meccanica, con l'uso di apparecchiature elettroniche di potenza, in accordo con una funzione di comando (e secondo un programma definito)

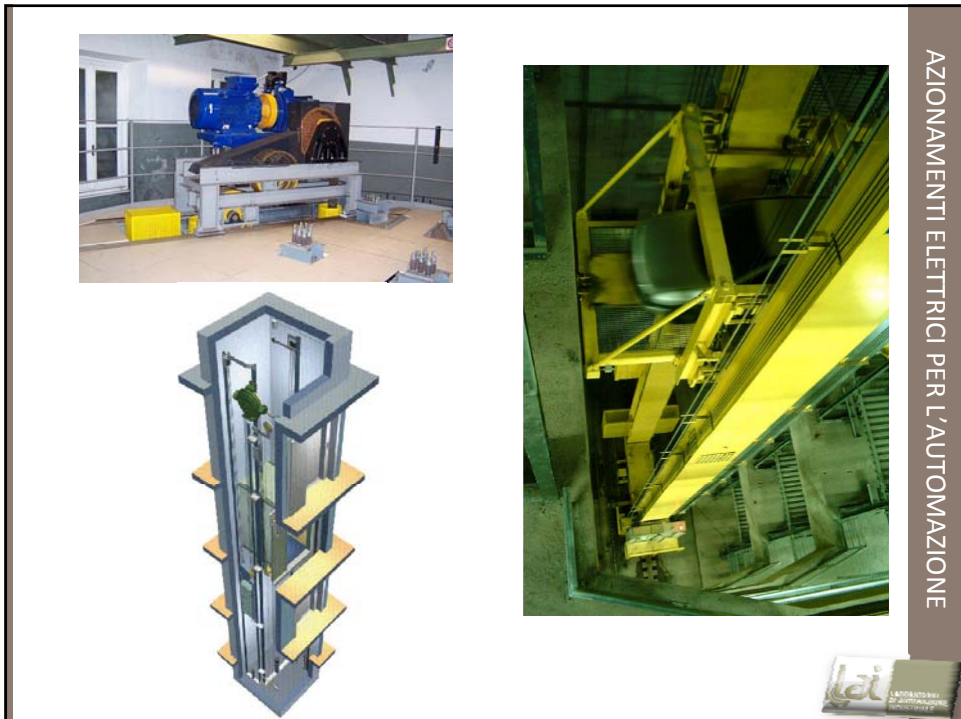


## Gli azionamenti elettrici

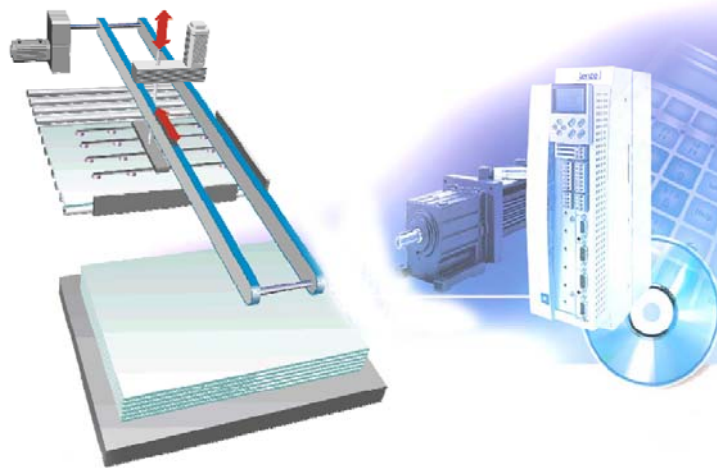


Applicazione	potenza (kW) (valori tipici)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veicoli a trazione elettrica (ferroviari, metropolitani, tramviari, funicolari, auto elettrica); funivie, seggiovie ecc..</li> </ul>	20 - 4000
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manipolazione materiali: Sollevamento (gru, montacarichi, ascensori); Convogliatori, nastri trasportatori, ecc.</li> </ul>	5 - 100
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Movimentazione fluidi: pompe, ventilatori.</li> </ul>	2 - 20 - 1000 e oltre
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Macchine utensili: azionamento mandrini, azionamento avanzamenti.</li> </ul>	3 - 200 0.5 - 5
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Siderurgia: laminatoi reversibili, laminatoi continui, linee di trattamento, ecc.</li> </ul>	300 - 10.000
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Macchine operatrici in genere: macchine per la lavorazione del legno, del vetro, del cemento, ecc. ecc.</li> </ul>	5 - 200
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Servomeccanismi (robotica, brandeggio di armi, puntamento radar ecc.</li> </ul>	0.5 - 100





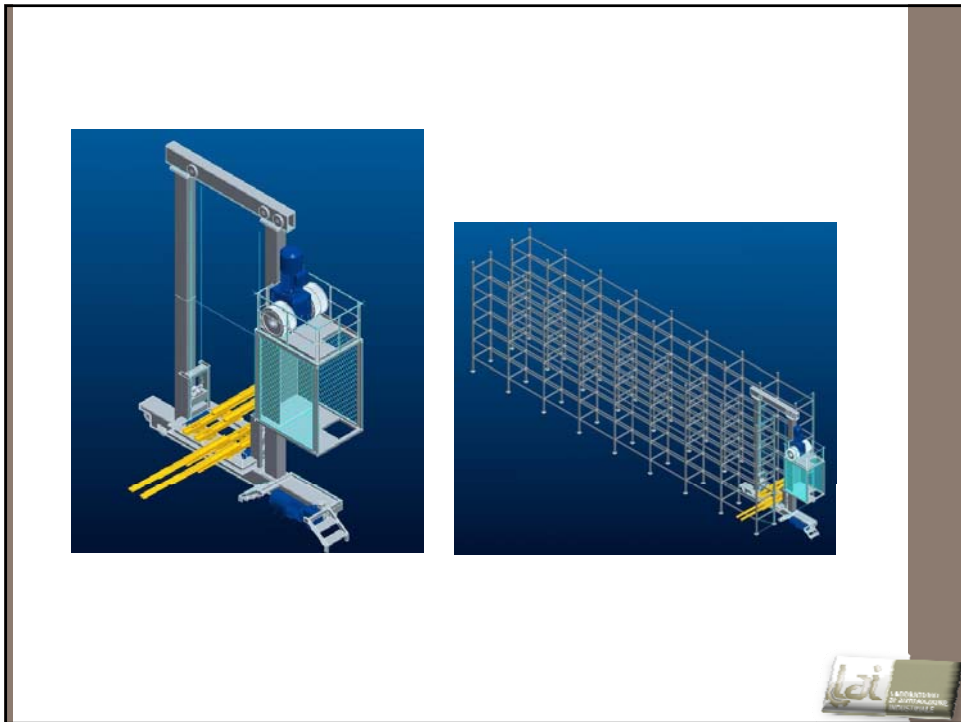
Applicazioni tipiche positioning: Pallettizzatori

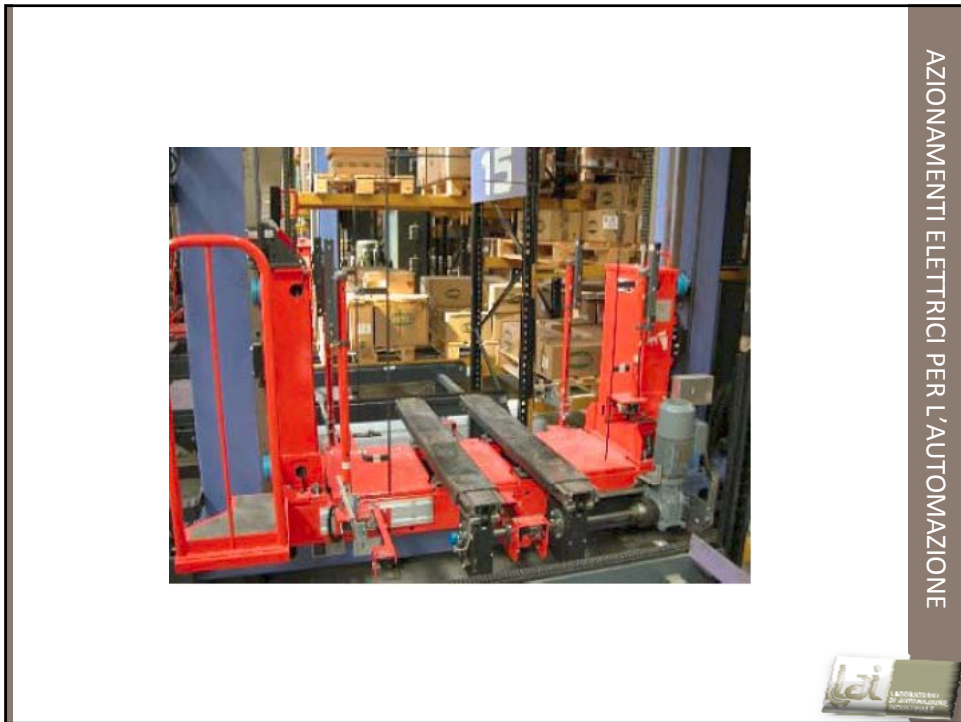
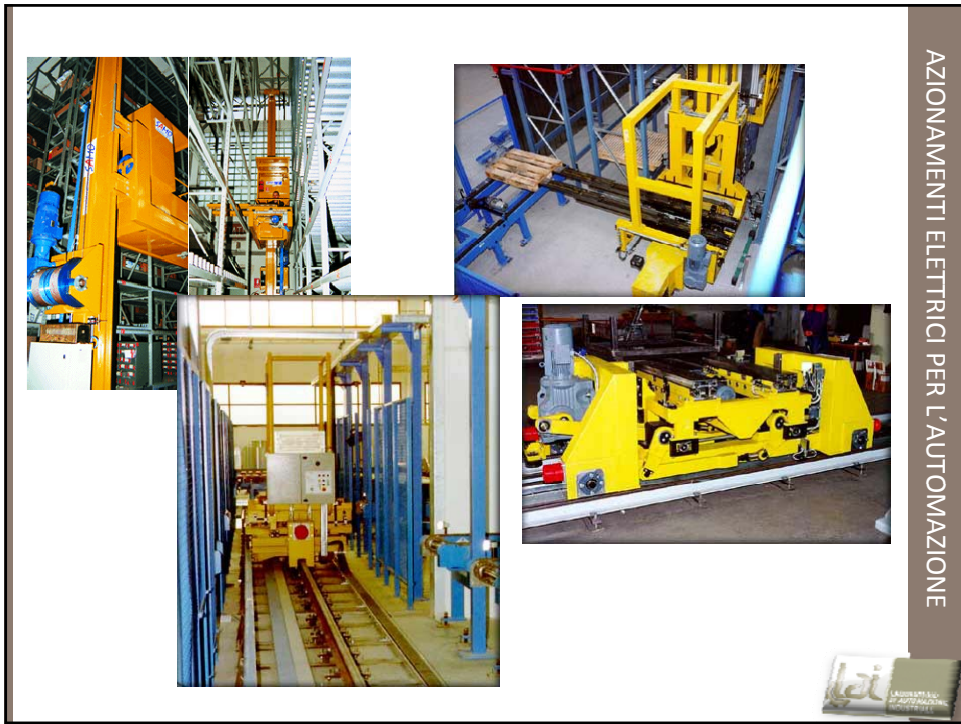


AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE











AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



The collage features four images: a close-up of a white conveyor belt with a motor, a long green conveyor belt in a factory, a control panel with a screen and buttons, and a wide view of a factory floor with yellow safety railings.



AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



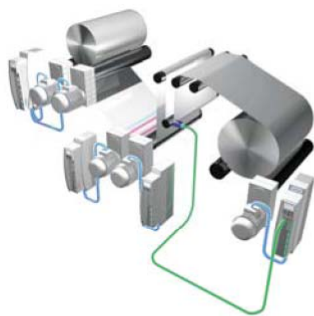
The collage features three images: a large port crane with a red and white striped arm, a factory floor with yellow safety railings, and a worker in a green shirt operating a control panel.



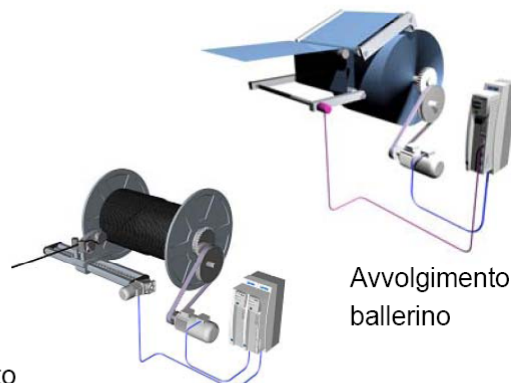


## Applicazioni

Esistono differenti tipi di avvolgimento in funzione delle caratteristiche dei materiali



Avvolgimento a contatto

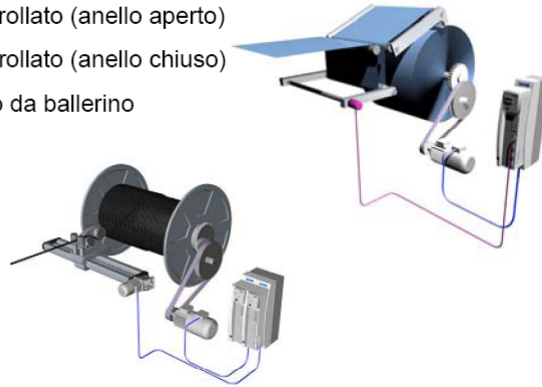


Avvolgimento a ballerino

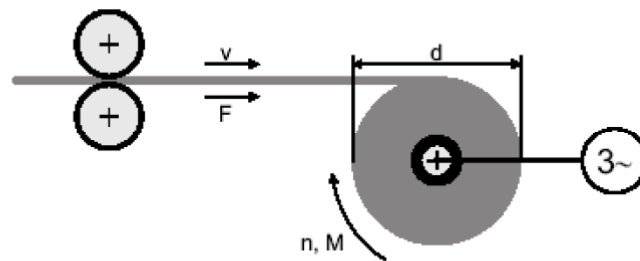
Avvolgimento stratificato

- Le applicazioni tipiche sono:

- avvolgitore a tiro controllato (anello aperto)
- avvolgitore a tiro controllato (anello chiuso)
- avvolgitore controllato da ballerino
- avvolgitore in velocità

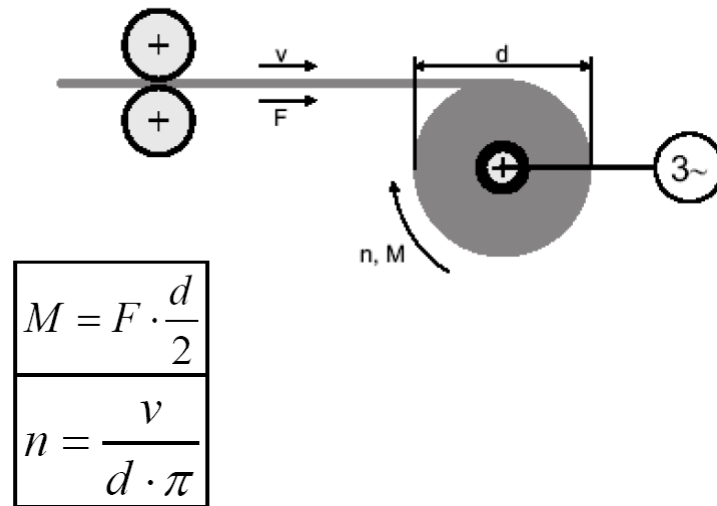


### Avvolgimento centralizzato

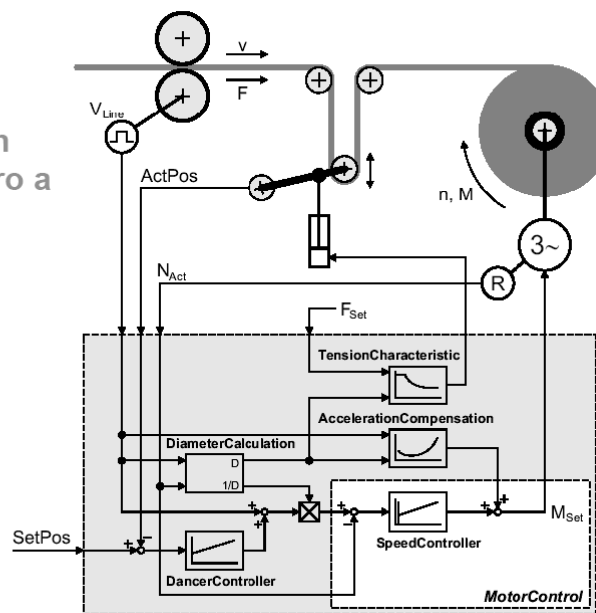


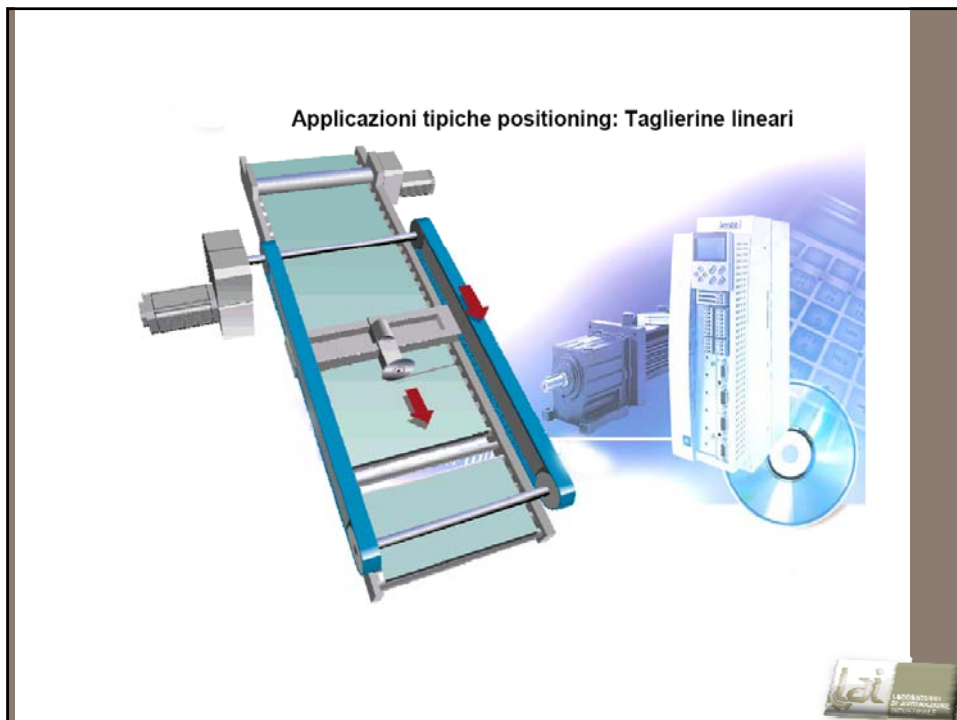
- La coppia fornita dal motore è proporzionale
  - alla forza del tiro ( $F$ )
  - al diametro di avvolgimento ( $d$ )
- La velocità necessaria del motore è proporzionale
  - alla velocità del materiale ( $v$ )
  - al valore reciproco del diametro di avvolgimento ( $1/d$ )

Avvolgimento centralizzato



Struttura di un controllo di tiro a ballerino



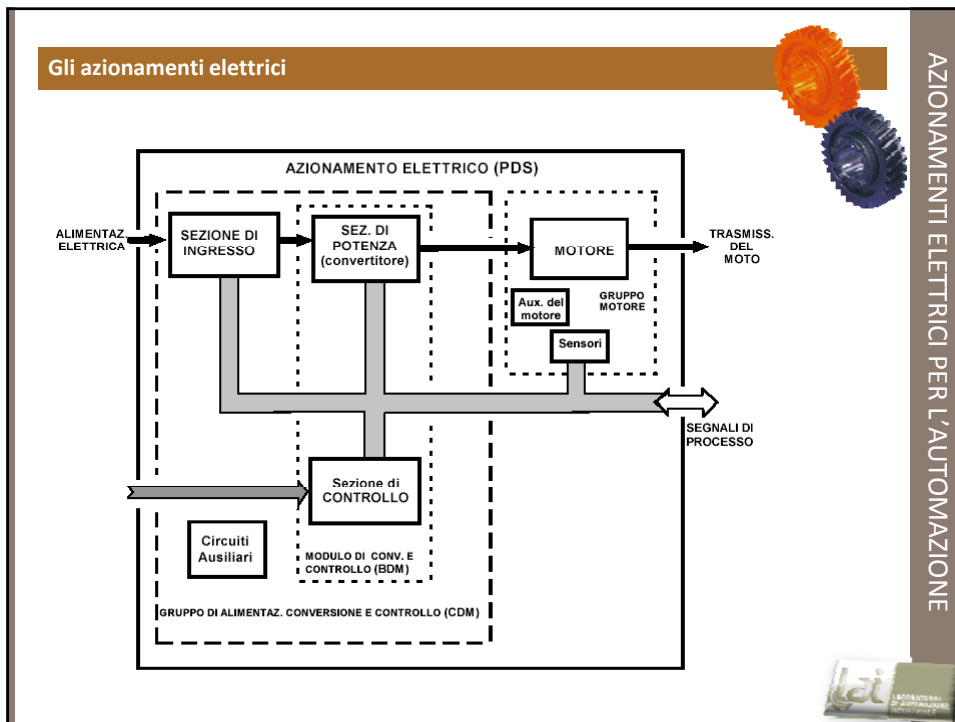








GLI AZIONAMENTI ELETTRICI: GENERALITA' (PARTE 1)



### Gli azionamenti elettrici

The diagram illustrates the components of an electric drive system (PDS):

- ALIMENTAZIONE ELETTRICA**: The electrical supply source, circled in red.
- SEZIONE DI INGRESSO**: The input section.
- SEZ. DI POTENZA (convertitore)**: The power section (converter).
- MOTORE**: The motor.
- TRASMISS. DEL MOTO**: The motion transmission.
- Gruppo Motore**: Includes the motor, its auxiliary supply, and sensors.
- SEZIONE DI CONTROLLO**: The control section.
- MODULO DI CONV. E CONTROLLO (DCM)**: The converter and control module.
- Gruppo di Alimentaz. Conversione e Controllo (GAC)**: The supply, conversion, and control group.
- SEGNALI DI PROCESSO**: Process signals.

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

### Gli azionamenti elettrici

The diagram is identical to the one above, but with the **ALIMENTAZIONE ELETTRICA** section circled in red.

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

### Gli azionamenti elettrici

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

### Gli azionamenti elettrici

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



### Gli azionamenti elettrici

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

### Gli azionamenti elettrici

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

### Gli azionamenti elettrici

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

### Gli azionamenti elettrici: richiami sulla dinamica del moto

Moto traslatorio

$$\sum_i F_i = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(mv)}{dt}$$

$$\downarrow$$

$$F_m - F_r = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(mv)}{dt}$$

$$\downarrow$$

$$F_m - F_r = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} = m \frac{d(v)}{dt} + v \frac{d(m)}{dt}$$

$$\downarrow \text{ se } m = \text{cost}$$

$$F_m - F_r = m \frac{d(v)}{dt}$$

**Gli azionamenti elettrici: richiami sulla dinamica del moto**

**Moto rotatorio**

Componente traslazionale

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_G + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$$

Componente rotazionale

$$\mathbf{M} - \mathbf{M}_L = \frac{d(\mathbf{P})}{dt}$$

↓ Proiettando sull'asse di rotazione  $a$

$$M_m - M_r = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(J\omega)}{dt} = J \frac{d(\omega)}{dt} + \omega \frac{d(J)}{dt}$$

↓

$$M_m - M_r = J \frac{d(\omega)}{dt}$$

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

**Gli azionamenti elettrici**

**POTENZA E ENERGIA**

$$M_m - M_L = (J) \frac{d(\omega)}{dt}$$

$$\omega M_m - \omega M_L = J \omega \frac{d\omega}{dt}$$

$P_m = P_L + J \omega \frac{d\omega}{dt}$

Potenza meccanica in ingresso      ← variazione di energia cinetica immagazzinata nelle masse rotanti  
 Potenza meccanica in uscita (sul carico)

$$W_m(t) = \int_0^t P_m d\tau = \int_0^t P_L d\tau + \int_0^t J \omega \frac{d\omega}{d\tau} d\tau$$

$$W_m(t) = \int_0^t P_L d\tau + \int_0^\omega J \Omega d\Omega = W_L(t) + \frac{1}{2} J \omega^2$$

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

**Gli azionamenti elettrici**

**Albero rigido**

motore                      carico

$$M_m - M_L = (J_m + J_L) \frac{d(\omega)}{dt}$$

$$\frac{M_m}{M_n} = m_m$$

$$\frac{M_L}{M_n} = m_L$$

$$\frac{\Omega}{\Omega_n} = \omega$$

$$m_m - m_L = T_m \frac{d\omega}{dt}$$

$$T_m = \frac{(J_m + J_L)\Omega_n}{M_n}$$

$$\omega(s) = \frac{1}{sT_m} [m_m - m_L]$$

**AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE**

**Gli azionamenti elettrici**

giunto ATMK..

disallineamento angolare

giunto ATMN..

disallineamento parallelo

giunto ATMB..

scostamento assiale

**AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE**



**Gli azionamenti elettrici**

motoriduttore

$$M_m - f_{21}R_m = J_m \frac{d\omega_m}{dt}$$

$$-f_{12}R_L + M_L = J_L \frac{d(-\omega_L)}{dt}$$

$$f_{12} = f_{21}$$

$$\omega_m R_m = \omega_L R_L$$

$$M_m - \frac{R_m}{R_L} M_L = \left[ J_m + J_L \left( \frac{R_m}{R_L} \right)^2 \right] \frac{d\omega_m}{dt}$$

$$M_{L,eq} = \frac{R_m}{R_L} M_L \quad J_{eq} = J_m + J_L \left( \frac{R_m}{R_L} \right)^2$$

$$M_m - M_{L,eq} = J_{eq} \frac{d\omega_m}{dt}$$

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

**Gli azionamenti elettrici**

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

**Gli azionamenti elettrici**

Impianto di sollevamento

$v = \omega r$   
 $M_L = Fr$   
 $J_{eq} = m \left( \frac{v}{\omega} \right)^2$   
 $J_{tot} = J_p + J_{eq}$

LAI LABORATORIO DI AUTOMAZIONE INDUSTRIALE

**Gli azionamenti elettrici: richiami sulla dinamica del moto**

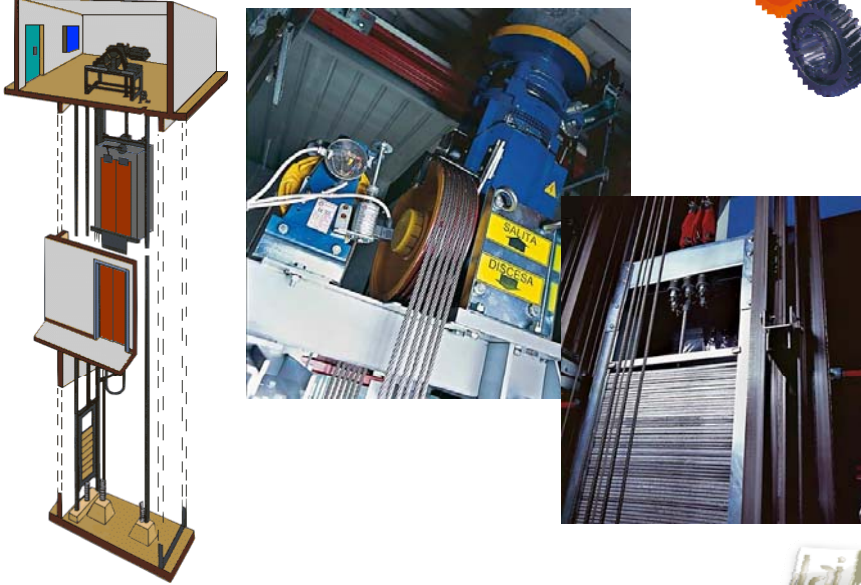
Impianto di sollevamento

$v = \omega r$   
 $M_L = Fr$   
 $J_{eq} = m \left( \frac{v}{\omega} \right)^2$   
 $J_{tot} = J_p + J_{eq}$

$M_m - (M_a - M_c) = J_{tot} \frac{d\omega}{dt}$

LAI LABORATORIO DI AUTOMAZIONE INDUSTRIALE




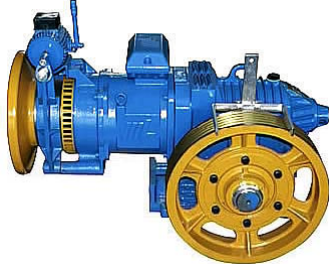
**Gli azionamenti elettrici: richiami sulla dinamica del moto**



The diagram on the left shows a vertical elevator shaft with a car and counterweight. The close-up on the right shows a blue motor with a yellow cable drum, labeled 'SANTA DISCESA', connected to a cable. A vertical banner on the right reads 'AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE'. The LAI logo is at the bottom right.

**Gli azionamenti elettrici: richiami sulla dinamica del moto**

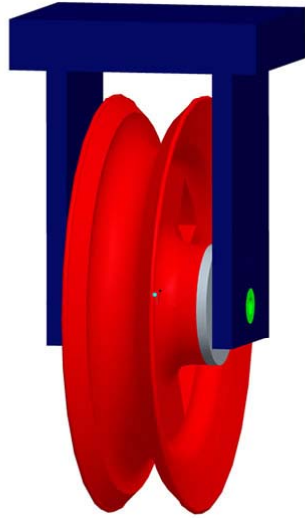
Argano



The central image shows a blue motor with a large yellow pulley. Below it are three smaller images: a cable drum with a red handle, a blue motor with a cable drum, and a cable drum with a handle. A vertical banner on the right reads 'AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE'. The LAI logo is at the bottom right.

Gli azionamenti elettrici: richiami sulla dinamica del moto

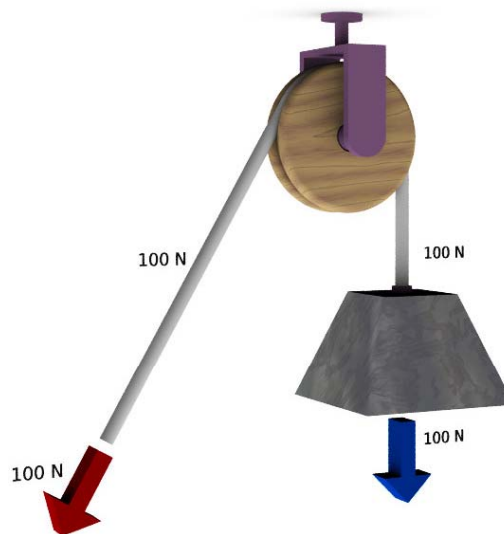
Carrucola e paranco

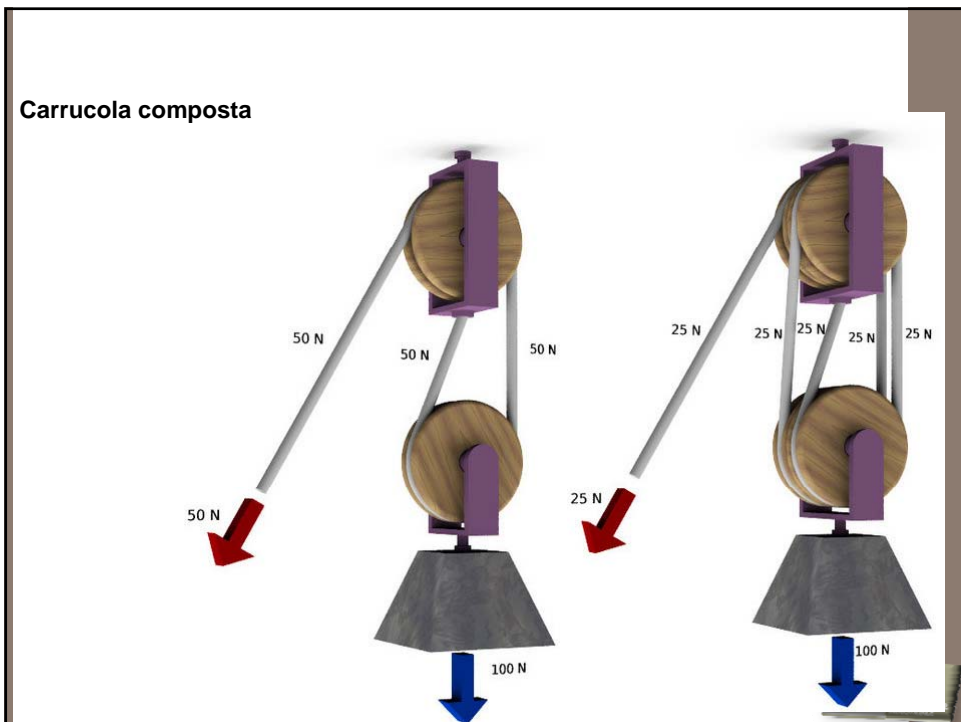
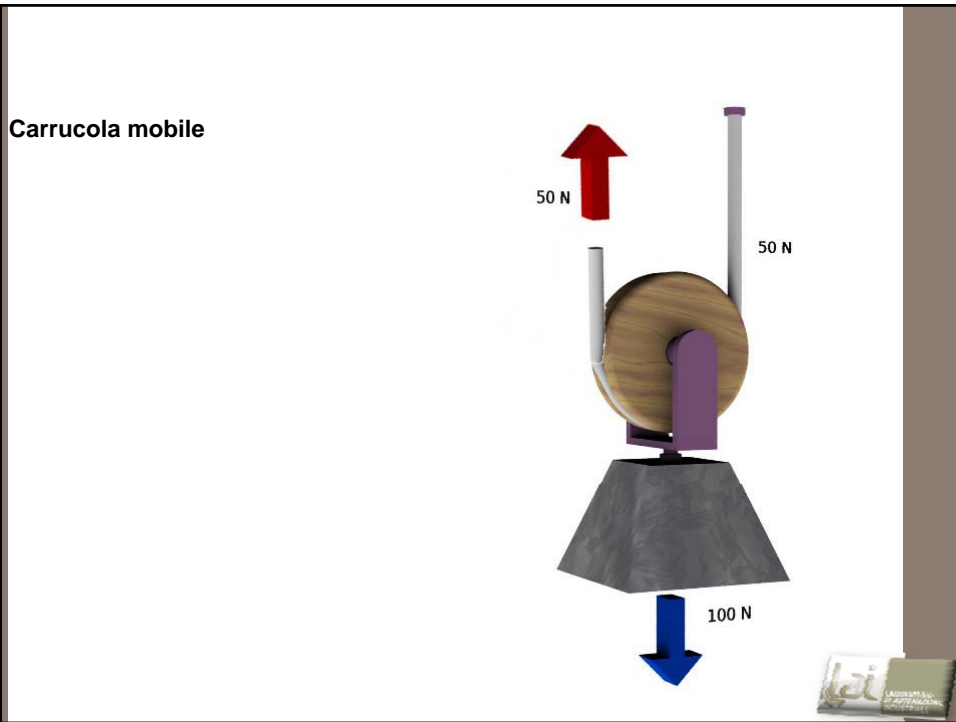


AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



Carrucola fissa





I sistemi di carrucole multiple sono anche detti paranchi.

1  $F_2 = 100 \text{ N}$ ,  $s = 10 \text{ cm}$ ,  $F_1 = 100 \text{ N}$ ,  $h = 10 \text{ cm}$

2  $F_2 = 50 \text{ N}$ ,  $s = 20 \text{ cm}$ ,  $F_1 = 100 \text{ N}$ ,  $h = 10 \text{ cm}$

3  $F_2 = 33 \frac{1}{3} \text{ N}$ ,  $s = 30 \text{ cm}$ ,  $F_1 = 100 \text{ N}$ ,  $h = 10 \text{ cm}$

4  $F_2 = 25 \text{ N}$ ,  $s = 40 \text{ cm}$ ,  $F_1 = 100 \text{ N}$ ,  $h = 10 \text{ cm}$

*lai* LABORATORIO S.p.A. di Automazione e Controllo

**Gli azionamenti elettrici: richiami sulla dinamica del moto**

Pulegge

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

*lai* LABORATORIO S.p.A. di Automazione e Controllo



**Gli azionamenti elettrici: richiami sulla dinamica del moto**

Vite senza fine

$E = \frac{1}{2}mv^2$        $P = Fv$   
 $J_{eq} = m\left(\frac{v}{\omega}\right)^2$        $M = F\frac{v}{\omega}$   
 $E = \frac{1}{2}J_{eq}\omega^2$        $P = M\omega$

$M = F\frac{\Delta}{2\pi}$   
 $J_{eq} = m\left(\frac{\Delta}{2\pi}\right)^2$

$v = \frac{\omega\Delta}{2\pi}$

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

**Gli azionamenti elettrici: richiami sulla dinamica del moto**

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

**Gli azionamenti elettrici**

**Collegamento motore-macchina operatrice**

Carico

Motore

R

LAI LABORATORIO PER L'AUTOMAZIONE

**Gli azionamenti elettrici - collegamento motore-macchina operatrice**

**Punto di lavoro e stabilità**

Punto di lavoro

Coppia resistente

Coppia motrice

$M$

$\omega$

Coppia resistente

Coppia motrice

$\omega_0$

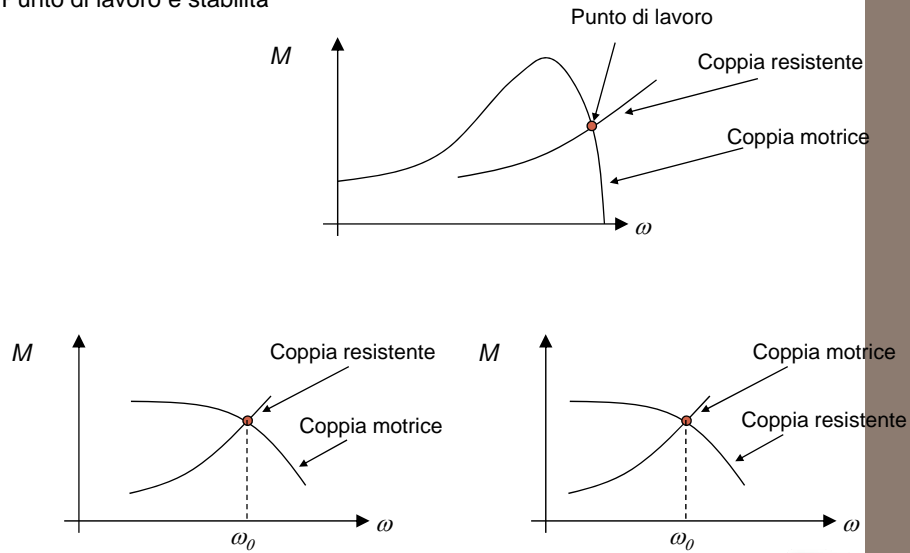
$M$

$\omega$

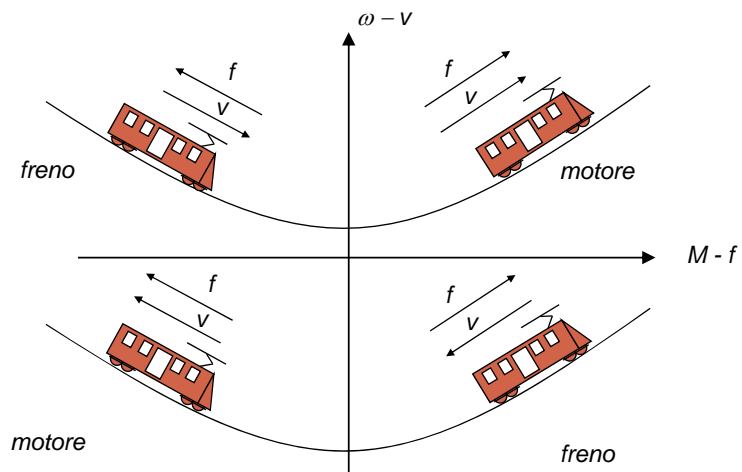
$\omega_0$

LAI LABORATORIO PER L'AUTOMAZIONE

Punto di lavoro e stabilità



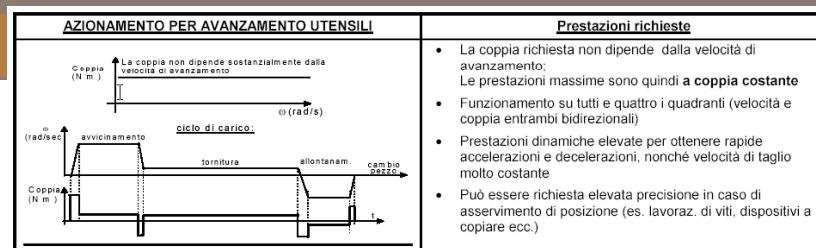
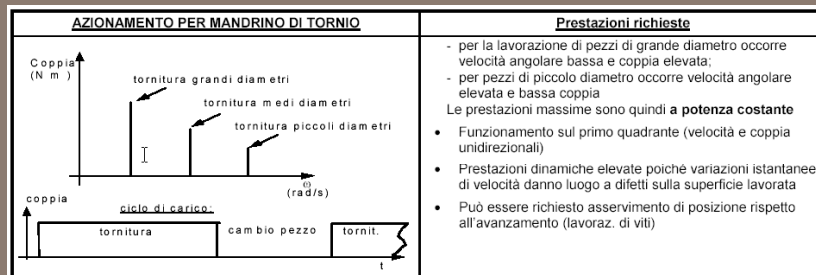
Modalità operative di un azionamento



### Le caratteristiche del carico

L'azionamento deve essere dimensionato in rapporto alle caratteristiche del carico. Oltre alla potenza e alla velocità massima, è necessario conoscere:

- La caratteristica meccanica del carico (relazione tra velocità e coppia assorbita)
- La esigenza di reversibilità (velocità unidirezionale o bidirezionale; coppia motrice o frenante)
- Il ciclo di carico (carico costante, elevata coppia di spunto, carico soggetto a punte intervallate da periodi di basso carico ecc.)
- Le prestazioni statiche (precisione) e dinamiche (rapidità di risposta)



Lezione 2: Introduzione agli Azionamenti Elettrici - Meccanica degli Azionamenti Elettrici

<p><b>AZIONAMENTO PER GRU</b></p>	<p><b>Prestazioni richieste</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>La coppia richiesta dipende poco dalla velocità di sollevamento, ma dal peso sollevato; Le prestazioni massime sono quindi a <b>potenza costante</b></li> <li>Funzionamento sul primo e quarto quadrante (velocità bidirezionale, coppia unidirezionale)</li> <li>Prestazioni dinamiche elevate per ottenere posizionamento preciso in fase di accostamento</li> </ul>
<p><b>AZIONAMENTO PER POMPA</b></p>	<p><b>Prestazioni richieste</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>la coppia richiesta è approssimativamente proporzionale al quadrato della velocità; Le prestazioni massime sono quindi a <b>coppia crescente</b></li> <li>Funzionamento unidirezionale</li> <li>Prestazioni dinamiche limitate (non occorre né precisione spinta, né rapida risposta)</li> <li>E' richiesto alto rendimento (funzionam. per 24 h/24)</li> </ul>
<p><b>VEICOLO ELETTRICO (diagramma di marcia)</b></p>	<p><b>Prestazioni richieste</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Elevata inerzia del carico. E' opportuno disporre della massima coppia possibile ad ogni velocità.</li> <li>La coppia deve invertirsi in frenatura (funzionamento sul primo e quarto quadrante)</li> <li>Prestazioni dinamiche limitate in velocità (non occorre alta precisione spinta, né rapida risposta), prestazioni spinte in coppia per controllo accelerazione</li> <li>E' richiesto alto rendimento (nei veicoli a batteria)</li> </ul>

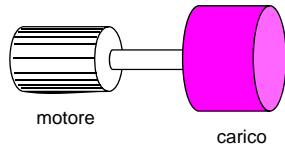
Prof. Giuseppe Tomasso

Laurea in Ingegneria Elettrica: Corso di Azionamenti Elettrici I

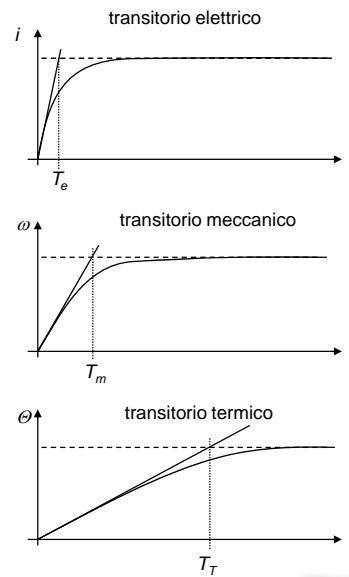


IL RISCALDAMENTO DELLE MACCHINE ELETTRICHE

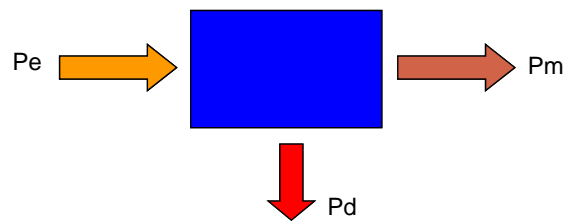
Lezione 3: Riscaldamento delle macchine elettriche – Fenomeni transitori



	secondi
$T_e$	$10^{-4} - 10^{-1}$
$T_m$	$10^{-3} - 10$
$T_T$	$10 - 10^4$



IL RISCALDAMENTO DELLE MACCHINE ELETTRICHE



Perdite a vuoto ( $B, \omega$ )

- isteresi;
- correnti parassite;
- attrito (cuscinetti, spazzole);
- ventilazione.

Perdite a carico ( $i$ )

- effetto Joule;
- effetto pellicolare;
- addizionali.

IL RISCALDAMENTO DELLE MACCHINE ELETTRICHE



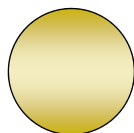


CLASSE	Y	A	E	B	F	H	C
Temperatura max [°C]	90	105	120	130	155	180	>180
Sovratemperatura max [°C]		65	80	90	115	140	

temperatura ambiente di riferimento: 40°C

Y	cotone e carta non impregnati
A	cotone e presspan impregnati
E	resine epossidiche, materiali polivinilici
B,F,H	mica, fibre di vetro

**Regola di Montsinger:** la vita dell'isolante si dimezza in corrispondenza di un superamento continuativo della temperatura ammissibile di circa 8-9°C



macchina elettrica

**Ipotesi:**

- corpo omogeneo;
- sorgenti di calore uniformemente distribuite
- capacità di smaltimento uniforme sulla superficie esterna

Energia prodotta      Energia immagazzinata      Energia scambiata per convezione

$$\text{Equazione di equilibrio energetico } P dt = C d\vartheta + \alpha S \vartheta dt$$

$P$  è la potenza dissipata nel tempo  $dt$  attraverso la superficie di scambio  $S$ ,  $C$  è la capacità termica del motore,  $\vartheta$  la sovratemperatura rispetto a quella ambiente,  $d\vartheta$  la variazione di temperatura che si produce nel motore nel tempo  $dt$ ,  $\alpha$  il coefficiente di scambio termico per convezione.

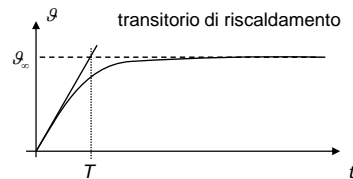


$$Pdt = Cd\vartheta + \alpha S\vartheta dt \quad \Rightarrow \quad P = C \frac{d\vartheta}{dt} + A\vartheta \quad A = \alpha S$$

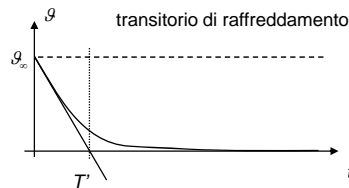
$$\vartheta(t) = (\vartheta_0 - \vartheta_\infty)e^{-\frac{t}{T}} + \vartheta_\infty \quad T = \frac{C}{A} \quad \vartheta_\infty = \frac{P}{A}$$

se  $\vartheta_0 = 0$

$$\vartheta(t) = \vartheta_\infty(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad \Rightarrow$$



$$\vartheta(t) = \vartheta_\infty e^{-\frac{t}{T'}}$$



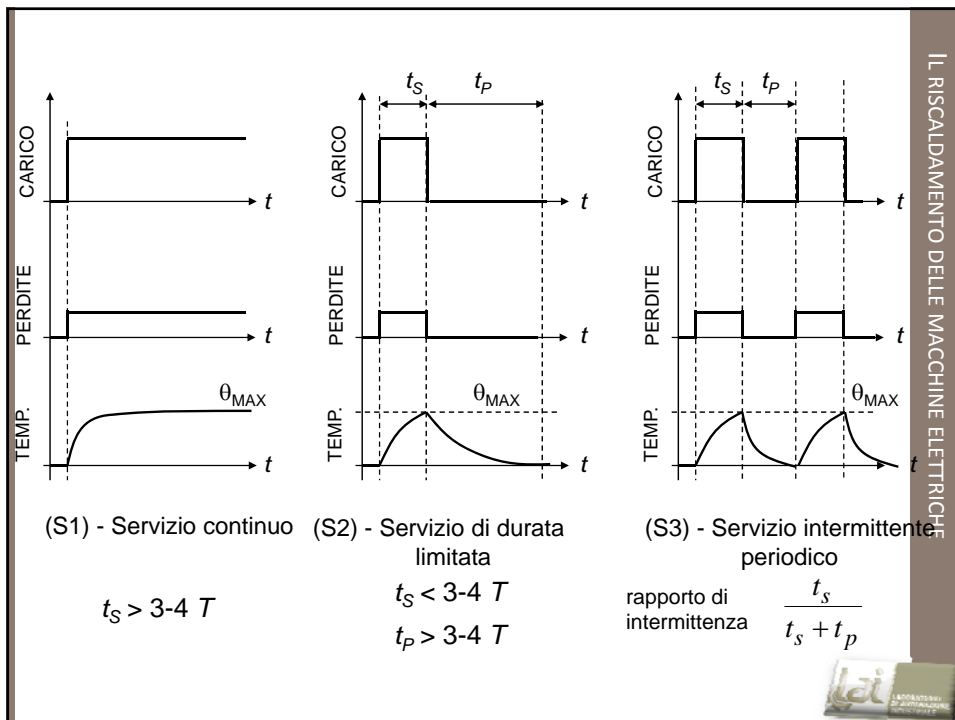
Generalmente  $T' > T$

valori di alcune costanti di tempo termiche	
motori di piccola potenza	5-30 minuti
motori aperti a ventilazione forzata	50-70 minuti
motori chiusi a ventilazione forzata	90-120 minuti
motori ermetici	120-240 minuti



Norme CEI 2-3, IEC 34-1 → 9 tipi di servizio

- S1 Servizio continuativo
- S2 Servizio di durata limitata
- S3 Servizio intermittente periodico
- S4 Servizio intermittente periodico con avviamento
- S5 Servizio intermittente periodico con frenatura elettrica
- S6 Servizio ininterrotto periodico con carico intermittente
- S7 Servizio ininterrotto periodico con frenatura elettrica
- S8 Servizio ininterrotto periodico con variazioni correlate di carico e velocità
- S9 Servizio con variazioni non periodiche di carico e velocità



**Riduzione di un servizio non continuativo al servizio continuativo equivalente**



L'equivalenza viene determinata imponendo parità di sollecitazioni termiche fra la macchina destinata ad un servizio non continuativo e quella equivalente.

Perdite a vuoto      Perdite a carico

$$P_p = k_1 P_n + k_2 P_n \left( \frac{I}{I_n} \right)^2$$

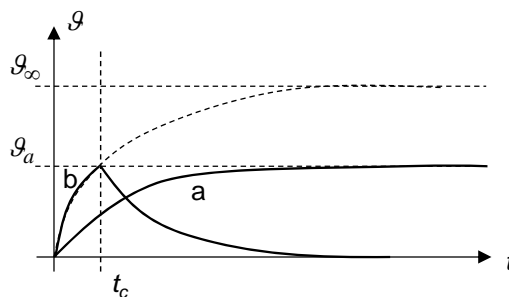
**IPOTESI:**



Costanti  $k_1$  e  $k_2$ , la capacità di smaltimento del calore verso l'ambiente e la costante di tempo termica vengono considerate uguali per la macchina in servizio non continuativo e per quella equivalente.



**Riduzione di un servizio di durata limitata**



$P_n \rightarrow g = g_a \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$  (curva a)      Funzionamento con carico normale

$P_{d.l.} \rightarrow g = g_\infty \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$  (curva b)      Funzionamento con sovraccarico



$$g = g_a \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad \text{con} \quad g_a = \frac{P_{p,n}}{A} \qquad g = g_\infty \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad \text{con} \quad g_\infty = \frac{P_{p,d.l.}}{A}$$

$$\text{per } t = t_c \quad g = g_\infty \left( 1 - e^{-\frac{t_c}{T}} \right) \quad g|_{t=t_c} = g_a \quad \Rightarrow \quad g_a = g_\infty \left( 1 - e^{-\frac{t_c}{T}} \right)$$

$$\text{definendo } q = \frac{P_{p,d.l.}}{P_{p,n}} \quad \Rightarrow \quad \frac{P_{p,n}}{A} = \frac{P_{p,d.l.}}{A} \left( 1 - e^{-\frac{t_c}{T}} \right) \quad \Rightarrow \quad q = \frac{g_\infty}{g_a} = \frac{1}{\left( 1 - e^{-\frac{t_c}{T}} \right)}$$



$$q = \frac{P_{p,d.l.}}{P_{p,n}} = \frac{k_1 P_n + k_2 P_n \left( \frac{I_{d.l.}}{I_n} \right)^2}{(k_1 + k_2) P_n}$$

*Ipotesi:* considerando i valori di tensione, rendimento e (eventualmente) fattore di potenza uguali per il funzionamento in regime di d.l. e per quello in regime continuo

$$\Rightarrow \quad \frac{I_{d.l.}}{I_n} = \frac{P_{d.l.}}{P_n}$$



$$q = \frac{k_1 + k_2 \left( \frac{P_{d.l.}}{P_n} \right)^2}{(k_1 + k_2)}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{P_{d.l.}}{P_n} = \sqrt{\left( 1 + \frac{k_1}{k_2} \right) q - \frac{k_1}{k_2}}$$

Potenza massima sviluppabile dalla macchina in servizio di d.l. per un tempo  $t_c$








Generalità sui sistemi elettromeccanici

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

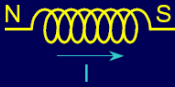

**Richiami di Elettrotecnica**

**Componenti magnetici**

- **Magneti permanenti**



- **Elettromagneti**

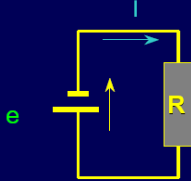



Generalità sui sistemi elettromeccanici

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

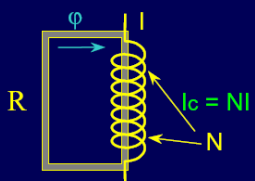
**Richiami di Elettrotecnica**

**Circuiti elettrici**



f.e.m.  $e$   
corrente  $I$   
resistenza  $R$


**Circuiti magnetici**



f.m.m.  $Ic = NI$   
flusso  $\phi$   
riluttanza  $R$

↔ ↔

nei circuiti elettrici è più facile individuare i percorsi chiusi della corrente. Non ci sono materiali a riluttanza infinita.  
La riluttanza dipende dal materiale e dal percorso geometrico



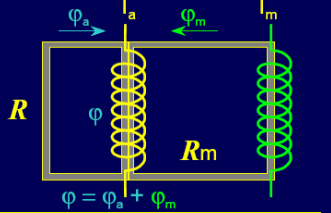
Generalità sui sistemi elettromeccanici

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

### Richiami di Elettrotecnica

#### Definizioni

- legge di Hopkinson
 
$$NI = I_c = R \varphi_c$$
- flusso di autoinduzione
  - flusso in una bobina generato dalla corrente che la percorre
- flusso di mutua induzione
  - flusso in una bobina concatenato da un altro circuito magnetico rispetto al quale la riluttanza  $R_m$  non sia infinita



$\varphi = \varphi_a + \varphi_m$

*lai* LABORATORIO PER L'AUTOMAZIONE

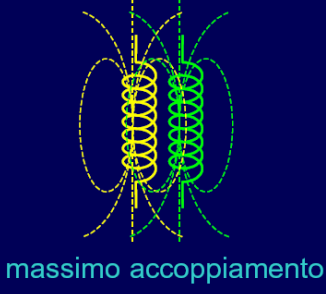
Generalità sui sistemi elettromeccanici

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

### Richiami di Elettrotecnica

#### Circuiti magnetici in aria

- i flussi concatenati dipendono dalla posizione reciproca e dalla distanza dei due avvolgimenti



massimo accoppiamento

*lai* LABORATORIO PER L'AUTOMAZIONE

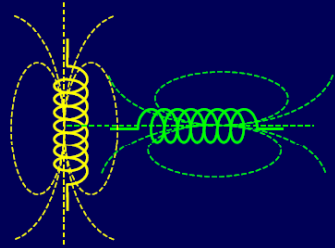
Generalità sui sistemi elettromeccanici

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE


**Richiami di Elettrotecnica**

**Circuiti magnetici in aria**

- i flussi concatenati dipendono dalla posizione reciproca e dalla distanza dei due avvolgimenti



minimo accoppiamento



Generalità sui sistemi elettromeccanici

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

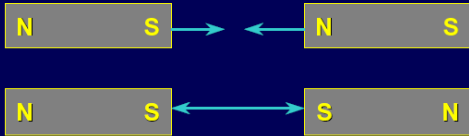
**Richiami di Elettrotecnica**

**Legge di Lenz**


- se in un circuito elettrico il flusso concatenato varia nel tempo si genera una tensione

$$v = dj_c/dt$$

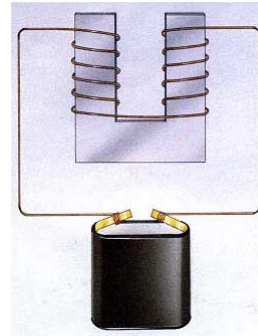
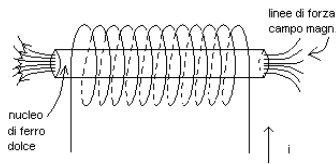
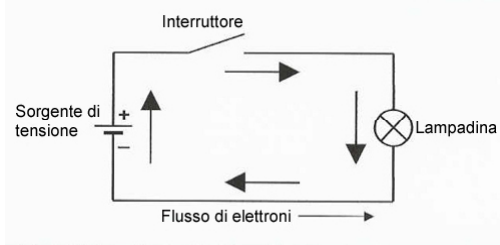
- forza generata da magneti permanenti
  - dall'esperienza



vale anche per gli elettromagneti



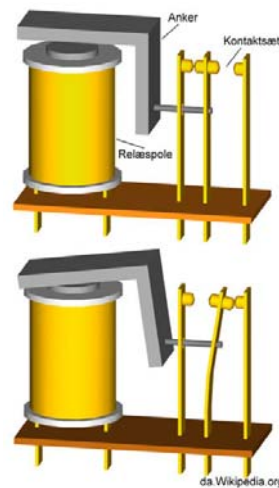
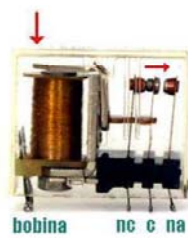
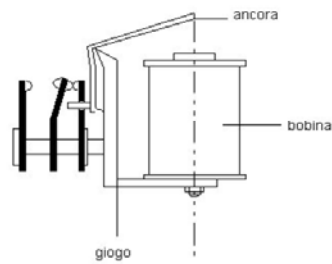
IL RELE'



AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



IL RELE'



AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



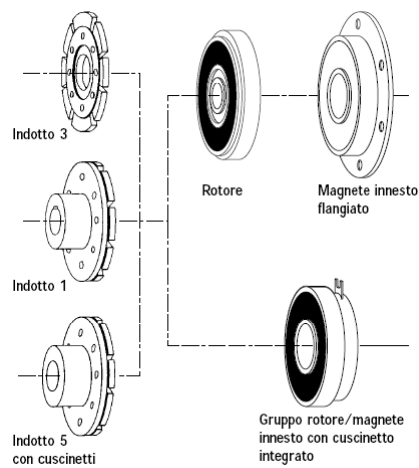
Attuatori elettromagnetici



AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



Innesti elettromeccanici



AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



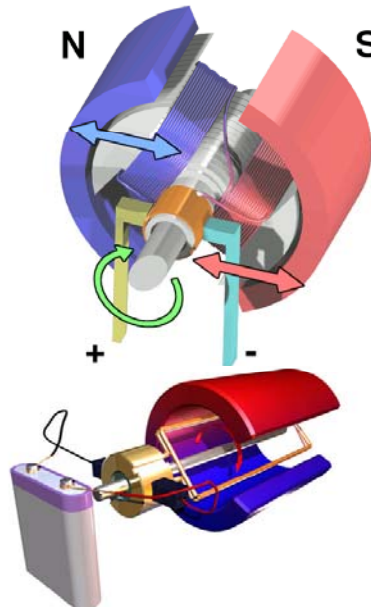
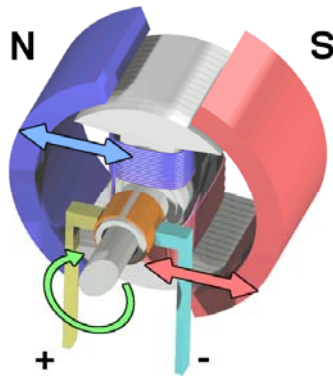
I Motori elettrici



AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



I Motori elettrici – il motore in corrente continua

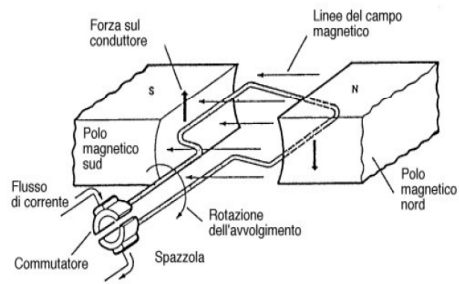
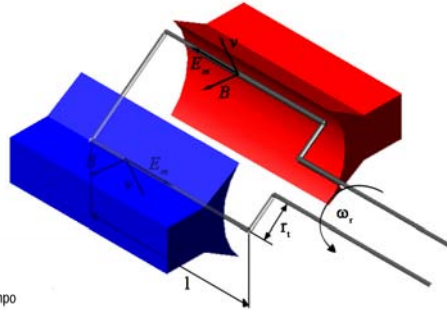
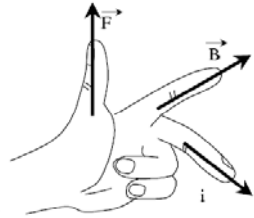


AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE





I Motori elettrici – il motore in corrente continua

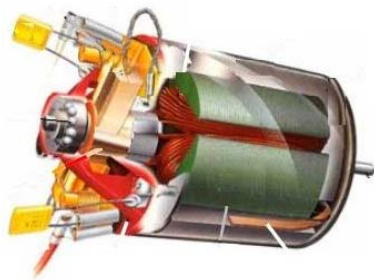
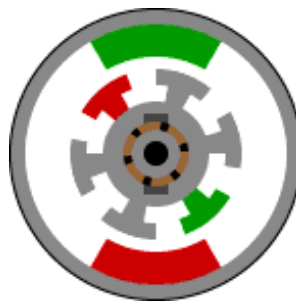


Struttura di base di un motore D.C.



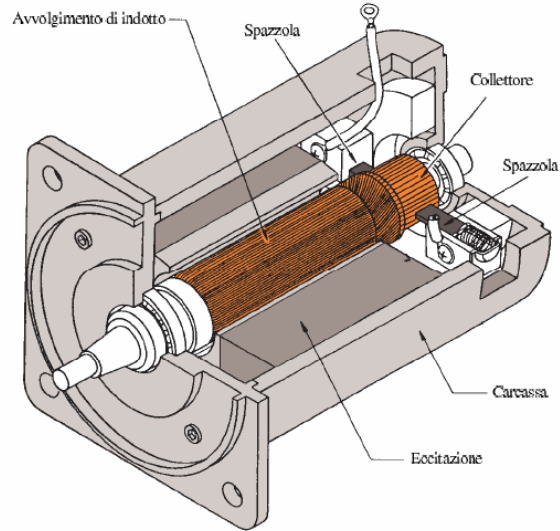
AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

I Motori elettrici – il motore in corrente continua



AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

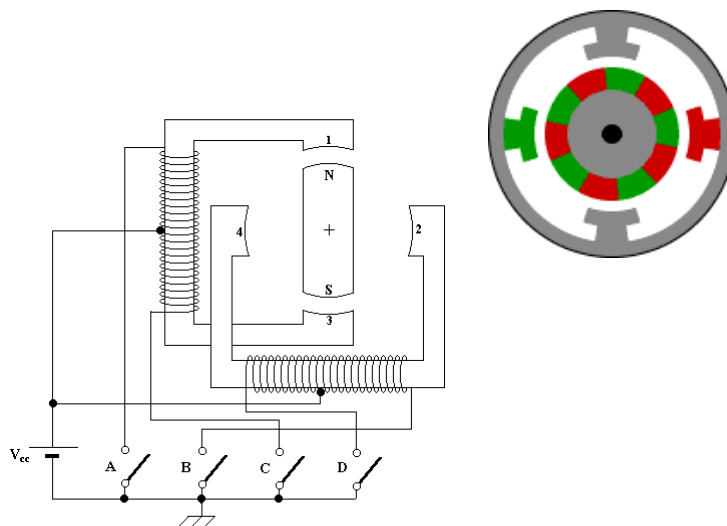
I Motori elettrici – il motore in corrente continua



AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



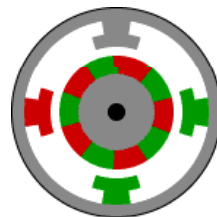
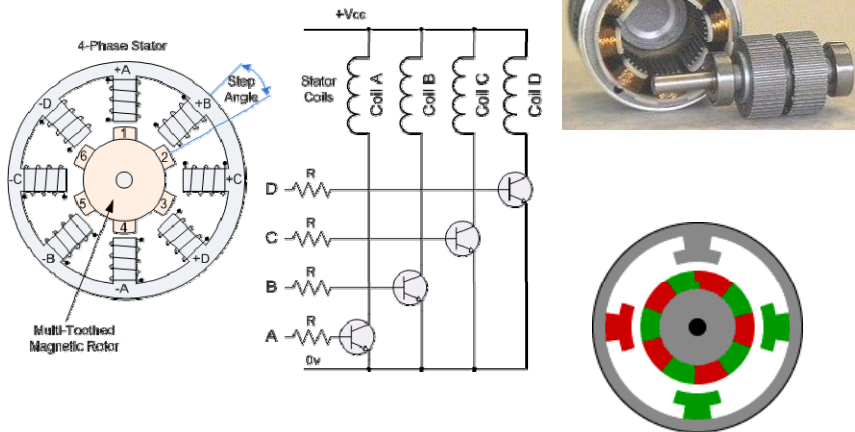
I Motori elettrici – il motore passo-passo



AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



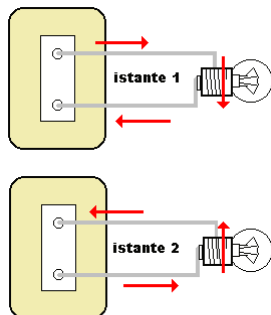
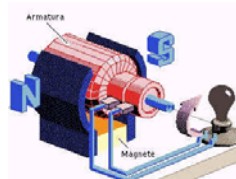
I Motori elettrici – il motore passo-passo



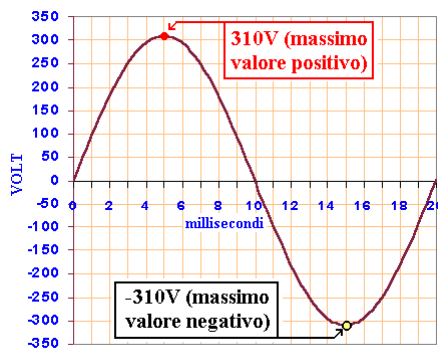
AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



I motori elettrici: i motori in alternata



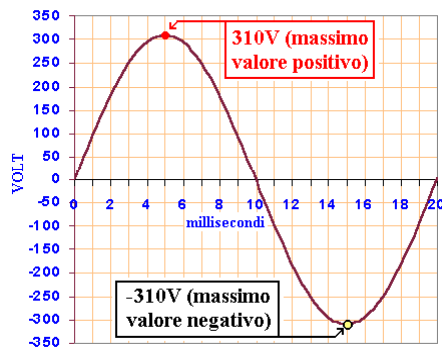
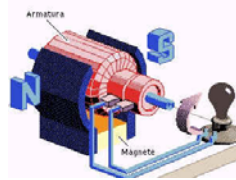
LA CORRENTE ALTERNATA



AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



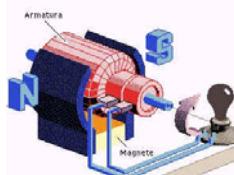
I motori elettrici: i motori in alternata



AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

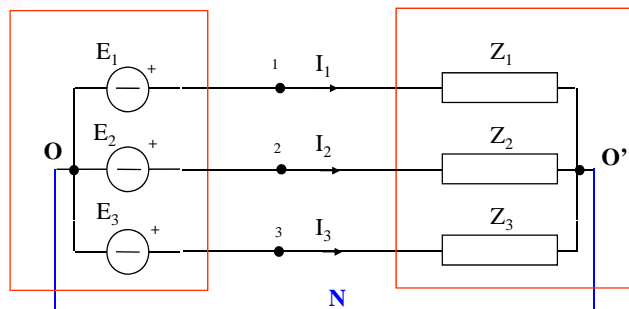


I motori elettrici: i motori in alternata



*Vantaggi rispetto al monofase:*

- semplicità costruttiva ed efficienza di generatori e motori
- risparmio di rame



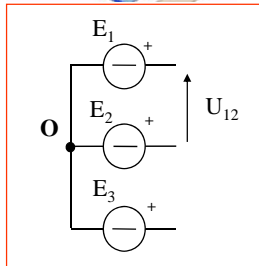
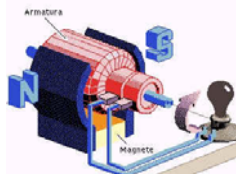
**Generatore trifase (a stella)**

**Carico trifase (a stella)**

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

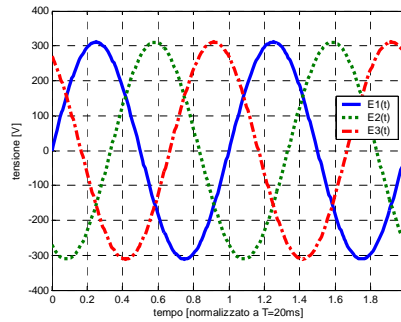


I motori elettrici: i motori in alternata



$$E_1(t) + E_2(t) + E_3(t) = 0$$

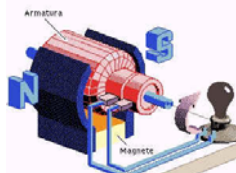
Tensione concatenata  $U = \sqrt{3}E$



Andamento temporale dei generatori



I motori elettrici: i motori in alternata



Carico equilibrato:

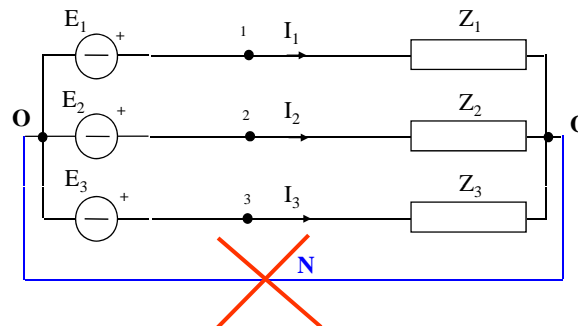
$$Z_1 = Z_2 = Z_3$$

Potenza assorbita:

$$P = 3EI \cos \varphi = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

Potenziali di O e O':

$$V_{OO'} = 0$$



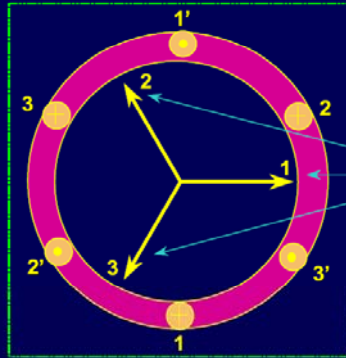
La rimozione del filo di neutro non altera il funzionamento della rete.



**Richiami di Elettrotecnica**

**Campo rotante**

Avvolgimenti multipli  
interagenti:  
tipica realizzazione trifase



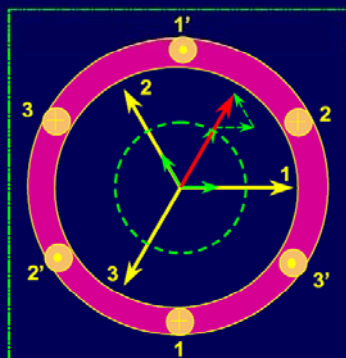
assi magnetici dei tre  
avvolgimenti

si assume per le correnti un  
vettore rappresentativo  
allineato con l'asse  
magnetico della relativa fase



**Richiami di Elettrotecnica**

correnti sinusoidali sfasate  
di 120° sui tre avvolgimenti  
(fasi)



$$i_1 = I_m \sin 30^\circ = +0.5 I_m$$

$$i_2 = I_m \sin 150^\circ = +0.5 I_m$$

$$i_3 = I_m \sin 270^\circ = -1.0 I_m$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

la risultante è un vettore  
di ampiezza costante



I motori elettrici: i motori in alternata

**Richiami di Elettrotecnica**

correnti sinusoidali sfasate di 120° sui tre avvolgimenti (fasi)

$i_1 = I_m \sin 60^\circ = +0.86 I_m$   
 $i_2 = I_m \sin 180^\circ = +0.0 I_m$   
 $i_3 = I_m \sin 300^\circ = -0.86 I_m$   
 $i_1 + i_2 + i_3 = 0$

la risultante è un vettore di ampiezza costante che ruota su un piano

↓  
campo rotante

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

I motori elettrici: i motori in alternata

**Richiami di Elettrotecnica**

correnti sinusoidali sfasate di 120° sui tre avvolgimenti (fasi)

$i_1 = I_m \sin 90^\circ = +1.0 I_m$   
 $i_2 = I_m \sin 210^\circ = -0.5 I_m$   
 $i_3 = I_m \sin 330^\circ = -0.5 I_m$   
 $i_1 + i_2 + i_3 = 0$

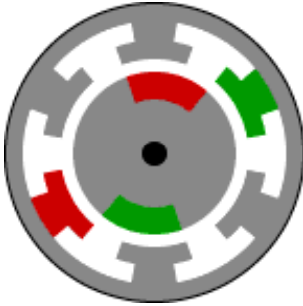
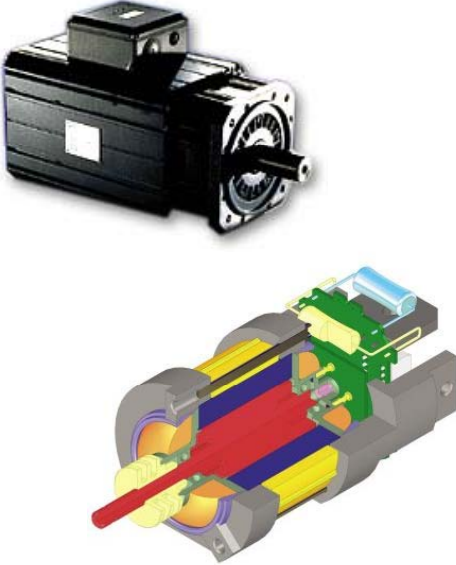
la risultante è un vettore di ampiezza costante che ruota su un piano

↓  
campo rotante

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



I motori elettrici: brushless



LAI LABORATORI S.p.A. - LAVORATORI PER L'AUTOMAZIONE

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

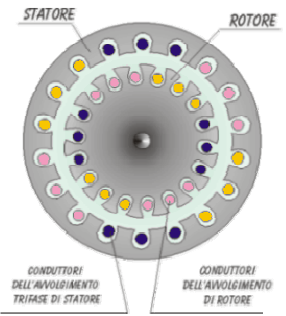
I motori elettrici: brushless



LAI LABORATORI S.p.A. - LAVORATORI PER L'AUTOMAZIONE

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

I motori elettrici: asincroni


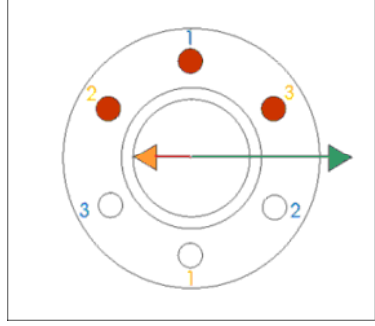


STATORE


ROTORE

CONDUTTORI DELL'AVVOLGIMENTO TRIFASE DI STATORE

CONDUTTORI DELL'AVVOLGIMENTO DI ROTORE



AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



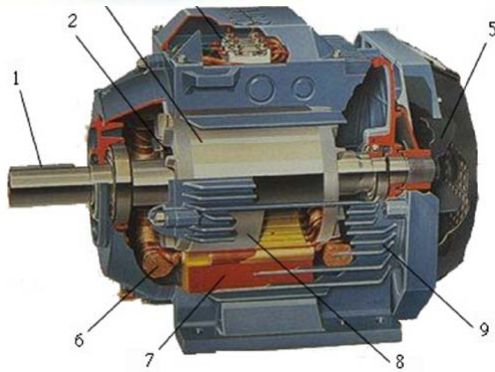
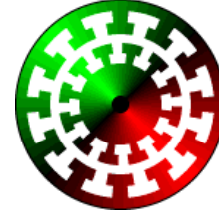
I motori elettrici: asincroni



AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



I motori elettrici: asincroni

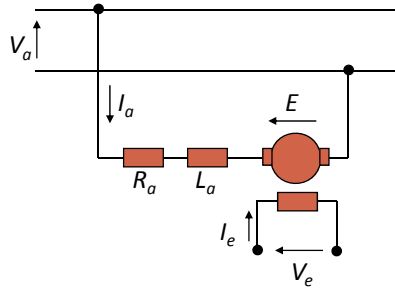


AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



GLI AZIONAMENTI IN CONTINUA

Gli azionamenti elettrici: azionamenti in cc

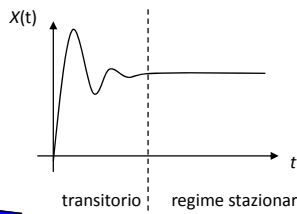


$$\begin{cases} V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \\ V_e = R_e I_e + N_e \frac{d\Phi_e}{dt} \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_L \end{cases}$$

$$\begin{aligned} E &= k\Phi\omega \\ M &= k\Phi I_a \\ \Phi &= \Phi_e - \Phi_{\sigma,e} \end{aligned}$$



Gli azionamenti elettrici: azionamenti in cc



$$\begin{cases} V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \\ V_e = R_e I_e + N_e \frac{d\Phi_e}{dt} \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_L \end{cases}$$



$$\begin{cases} V_a = R_a I_a + E \\ M = M_L \\ E = k\Phi\omega \\ M = k\Phi I_a \end{cases}$$



**Gli azionamenti elettrici: azionamenti in cc**

$$V_a = R_a I_a + E$$

$$M = M_L$$

$$E = k\Phi\omega$$

$$M = k\Phi I_a$$

$$\omega = \frac{V_a}{k\Phi} - \frac{R_a}{(k\Phi)^2} M$$

AZIONAMENTI ELETTRICI IN CONTINUA

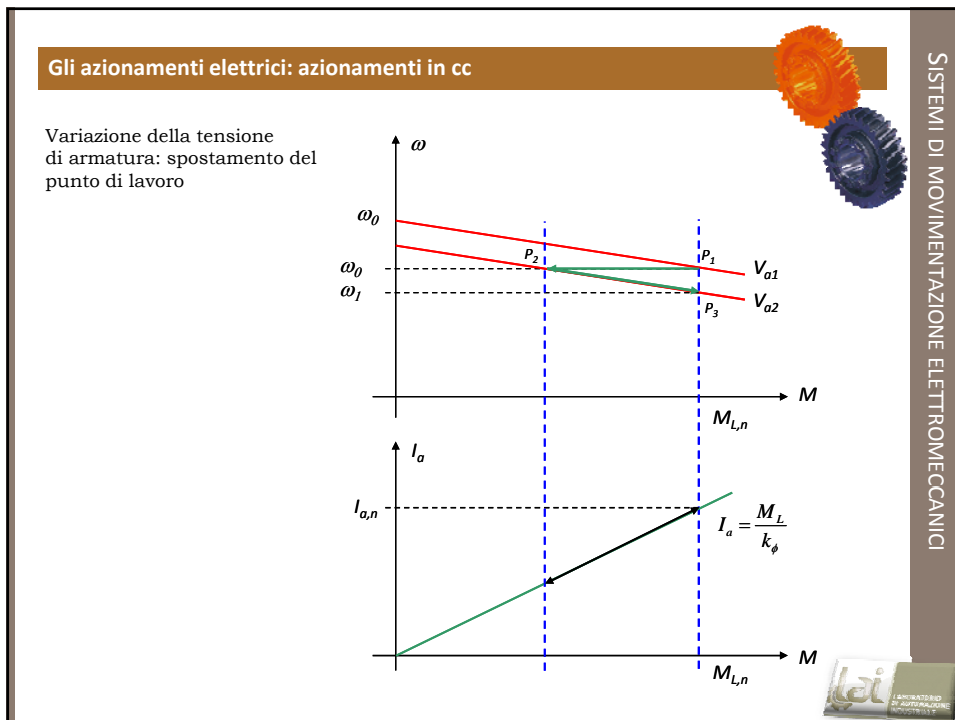
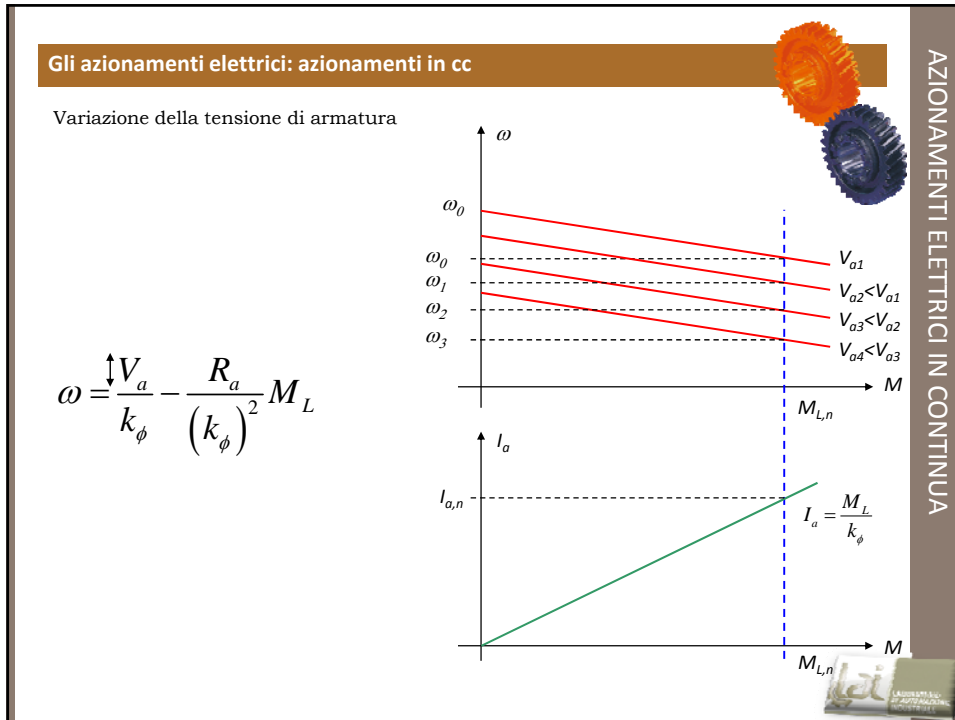
**Gli azionamenti elettrici: azionamenti in cc**

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + k_\phi \omega$$

$$k_\phi I_a - M_L = J \frac{d\omega}{dt}$$
$$V_a = R_a I_a + k_\phi \omega$$

$$k_\phi I_a = M_L$$
$$\left[ \begin{array}{l} \omega = \frac{V_a}{k_\phi} - \frac{R_a}{(k_\phi)^2} M_L \\ I_a = \frac{M_L}{k_\phi} \end{array} \right.$$

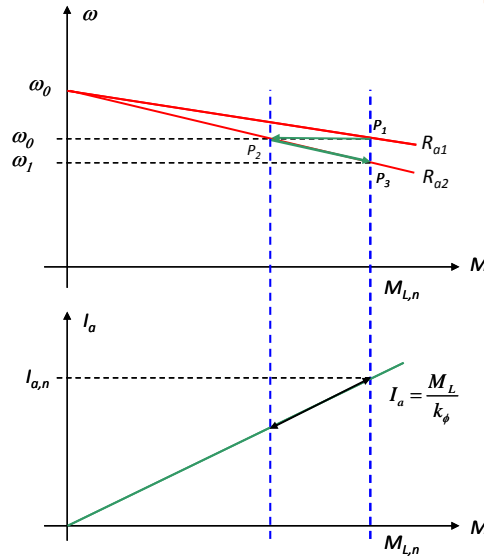
AZIONAMENTI ELETTRICI IN CONTINUA



Gli azionamenti elettrici: azionamenti in cc

Variazione della resistenza di armatura

$$\omega = \frac{V_a}{k_\phi} - \frac{\uparrow R_a}{(k_\phi)^2} M_L$$



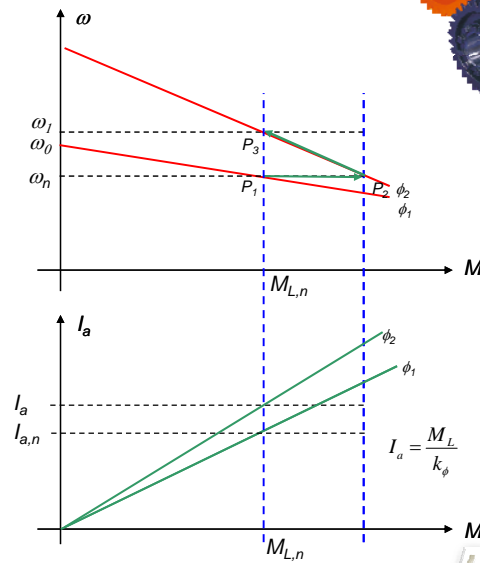
SISTEMI DI MOVIMENTAZIONE ELETTROMECCANICI



Gli azionamenti elettrici: azionamenti in cc

Variazione del flusso di eccitazione

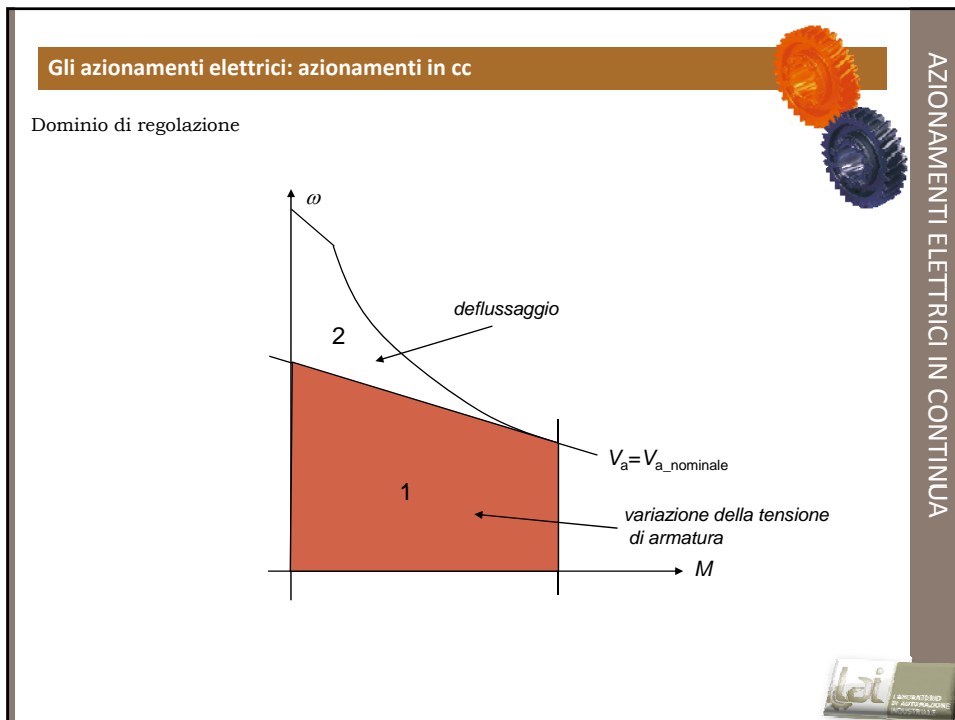
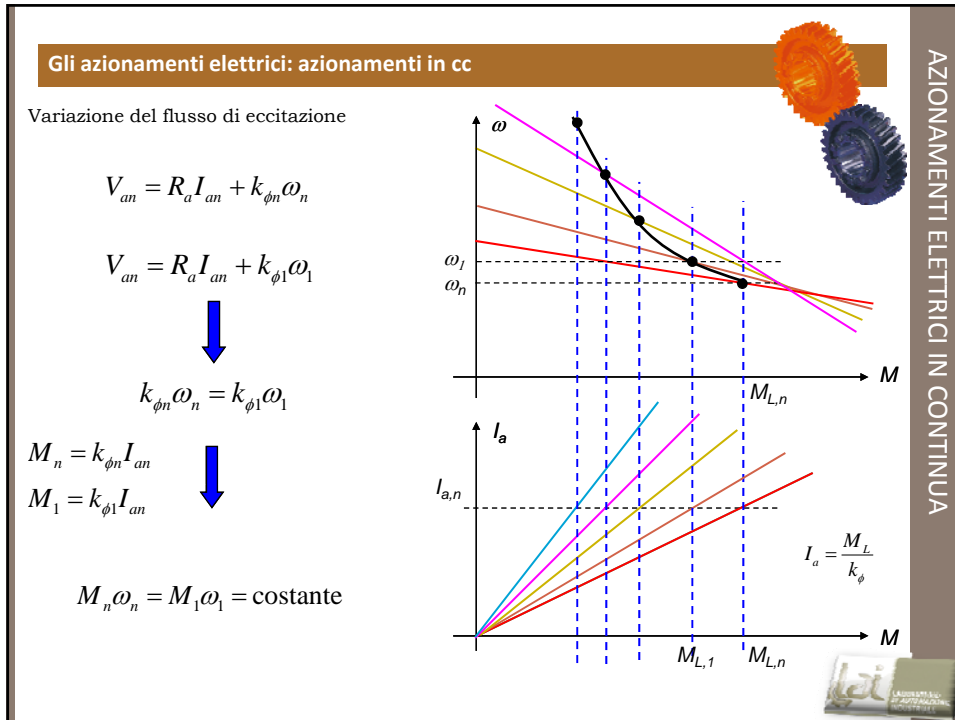
$$\omega = \frac{V_a}{\uparrow k_\phi} - \frac{R_a}{(\downarrow k_\phi)^2} M_L$$



AZIONAMENTI ELETTRICI IN CONTINUA








Gli azionamenti elettrici: azionamenti in cc

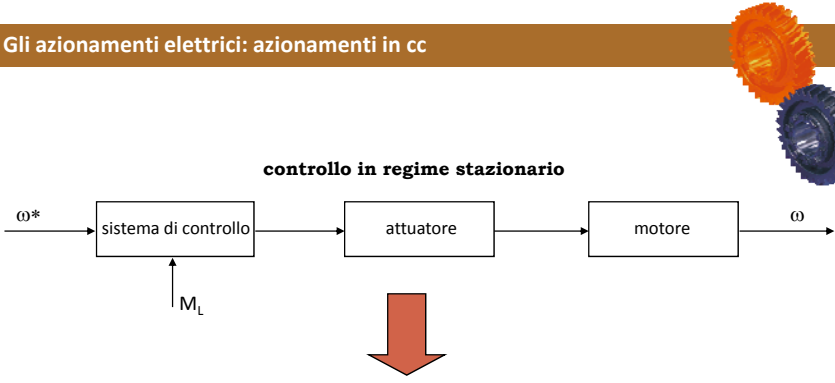
AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



Gli azionamenti elettrici: azionamenti in cc

AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

**controllo in regime stazionario**




SI TRATTA DI UN CONTROLLO A CATENA APERTA

**Vantaggi:**

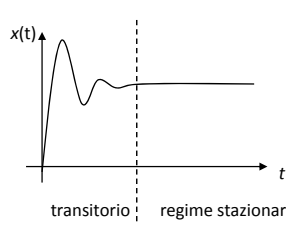
1. semplicità;
2. possibilità di regolazione senza un convertitore statico;
3. assenza di sensori.

**Svantaggi:**

1. bassa precisione;
2. basse prestazioni dinamiche;
3. perdita del controllo nella fase transitoria.

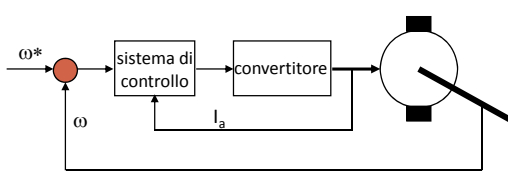


### Gli azionamenti elettrici: azionamenti in cc




transitorio      regime stazionario


Si utilizza una struttura di controllo a catena chiusa

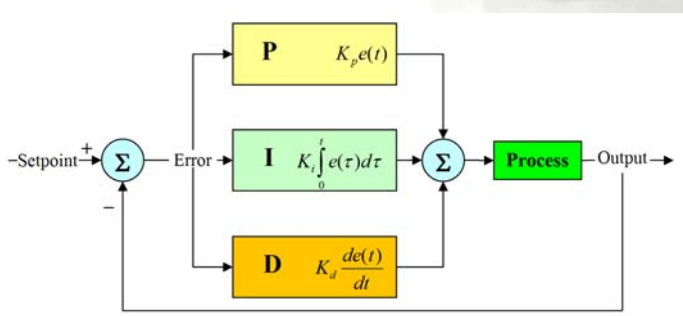



$$\begin{cases} V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \\ V_e = R_e I_e + N_e \frac{d\Phi_e}{dt} \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_L \end{cases}$$

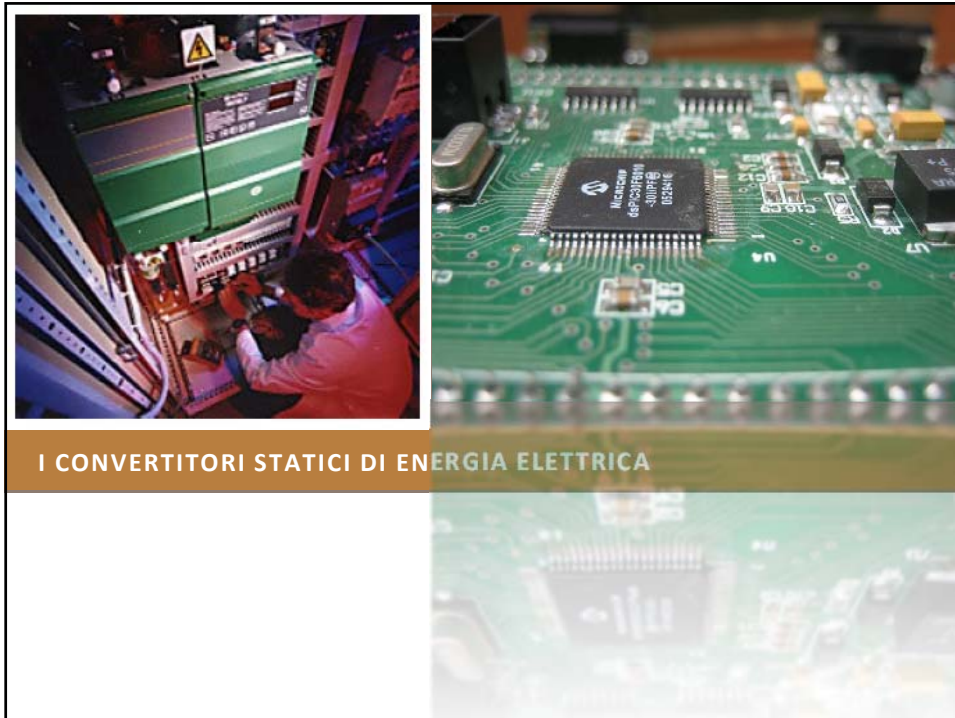


### Gli azionamenti elettrici: il regolatore PID



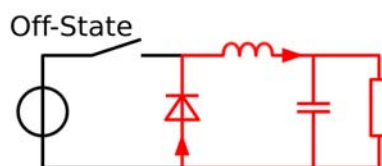
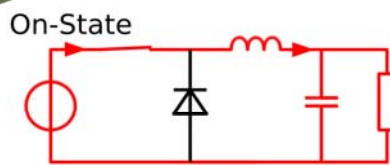
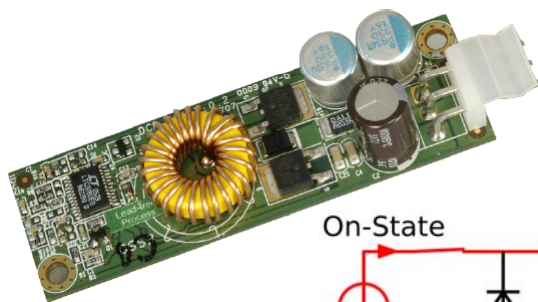






Gli azionamenti elettrici: i convertitori

Convertitori DC/DC: il chopper

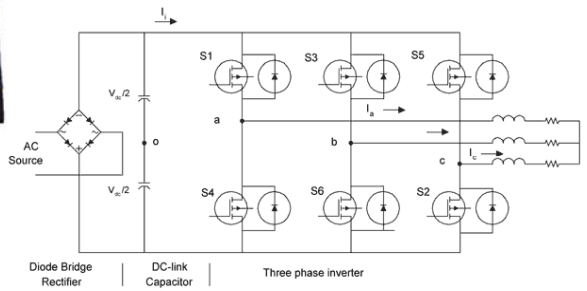


AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



Gli azionamenti elettrici: i convertitori

Convertitori DC/AC: inverter

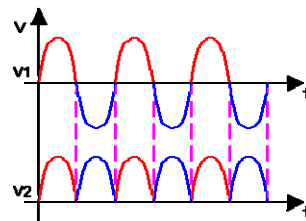
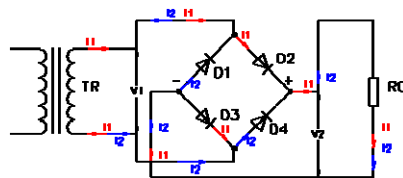


AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



Gli azionamenti elettrici: i convertitori


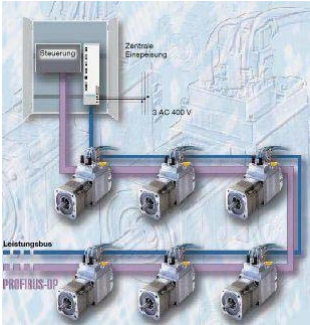
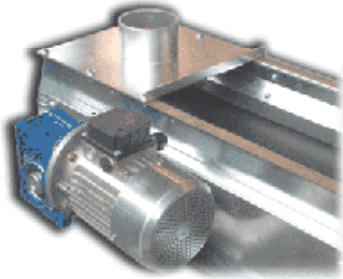
Convertitori AC/DC: raddrizzatori




AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



**Gli azionamenti elettrici: gerarchizzazione**

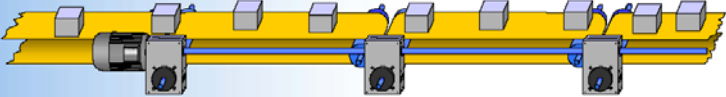
**AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE**



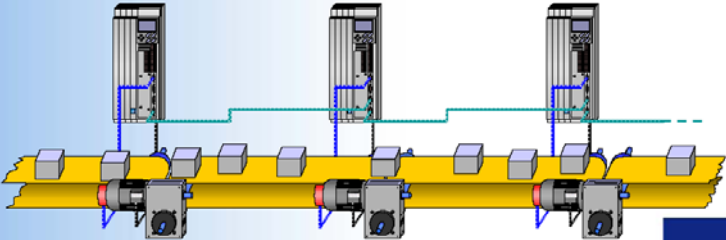
**Gli azionamenti elettrici: gerarchizzazione**

### Proprietà albero elettrico


Connessione meccanica ("albero di linea"):



Sostituzione con azionamenti separati ("albero elettrico"):

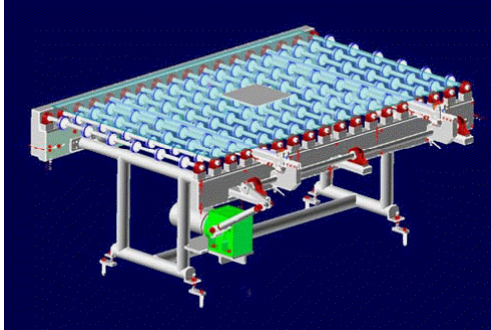


**SISTEMI DI MOVIMENTAZIONE ELETTROMECCANICI**





Gli azionamenti elettrici: gerarchizzazione



AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE

Gli azionamenti elettrici: gerarchizzazione



AZIONAMENTI ELETTRICI PER L'AUTOMAZIONE



