



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA



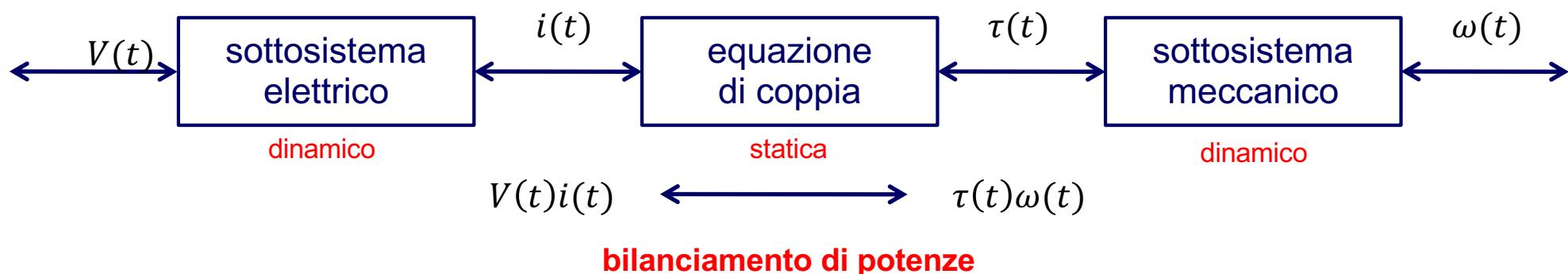
# Attuazione e controllo del moto

Automazione

Alessandro De Luca

# Sistemi di movimentazione automatica

- azionamenti elettrici e attuatori elettromeccanici per il moto
- trasduttori
  - ➔ dispositivi che convertono energia da una forma in un'altra (elettrica in meccanica o viceversa, termica in meccanica o viceversa, ...)
  - ➔ **sensori**
    - misurano grandezze fisiche e le convertono in un dominio proprio (elettrico, pneumatico o idraulico) utile per elaborare il contenuto informativo
  - ➔ **attuatori**
    - trasformano informazione di comando in potenza nel dominio fisico del sistema sui quali agiscono
- **trasduttori elettromeccanici**
  - ➔ sottosistemi elettrico e meccanico accoppiati da un campo elettromagnetico
  - ➔ **generatori**: conversione energia meccanica  $\Rightarrow$  elettrica
  - ➔ **motori**: conversione energia elettrica  $\Rightarrow$  meccanica



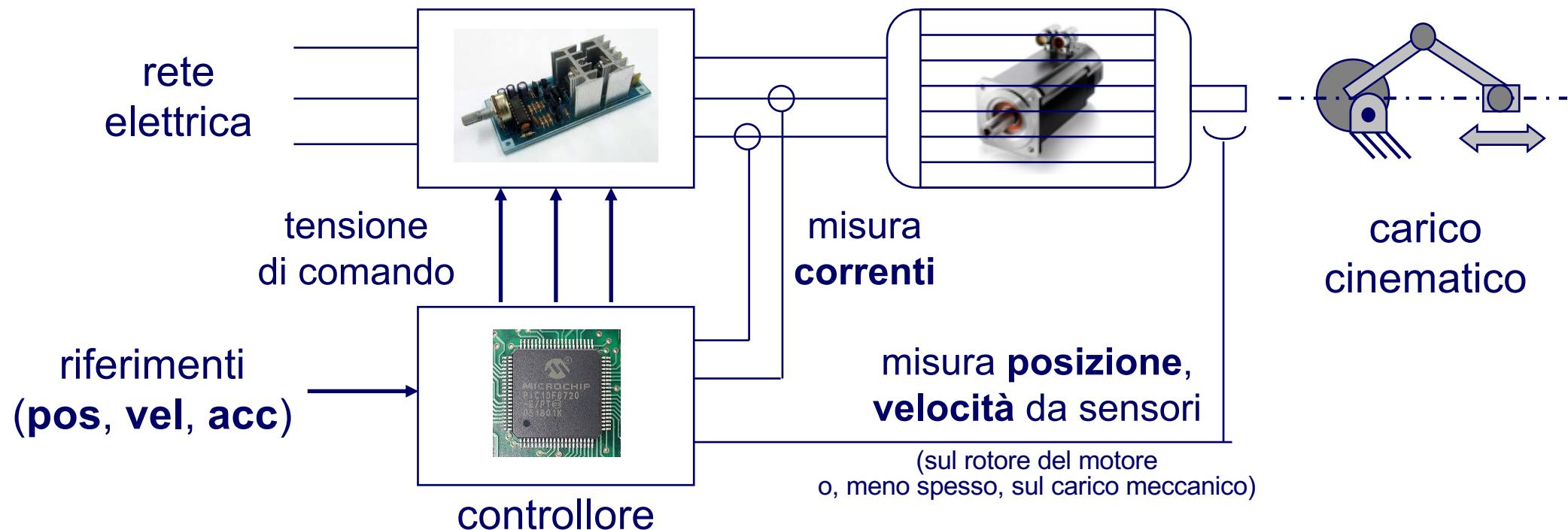
Gli azionamenti elettrici sono dispositivi per la

- conversione controllata di energia elettrica in meccanica
- trasduzione “di potenza”
  - ➔ imposizione del moto ad un carico meccanico

Tre componenti fondamentali

- amplificatore/convertitore di potenza
  - ➔ piccole potenze: amplificatori analogici lineari
  - ➔ grandi potenze: componenti elettronici di tipo switching (migliore rendimento) comandati con tecniche di modulazione (PWM)
- motore elettrico
  - ➔ diverse tipologie: alimentato in corrente continua (DC) o alternata (AC), brushless, passo-passo (stepper), asincrono (a induzione), sincrono, ...
- controllore
  - ➔ leggi a feedback (ad es., PID) e generazione di riferimenti

- attua la tensione richiesta dal comando proveniente dal controllo amplificatore

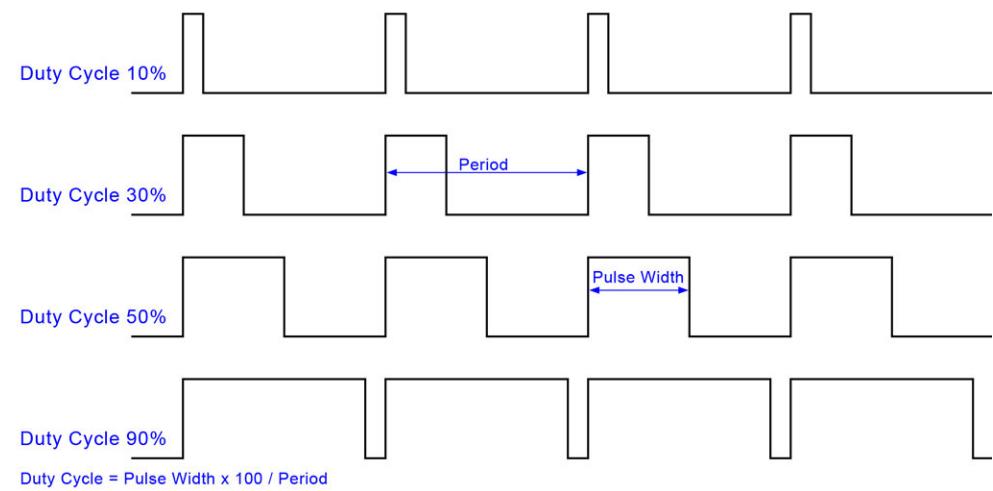
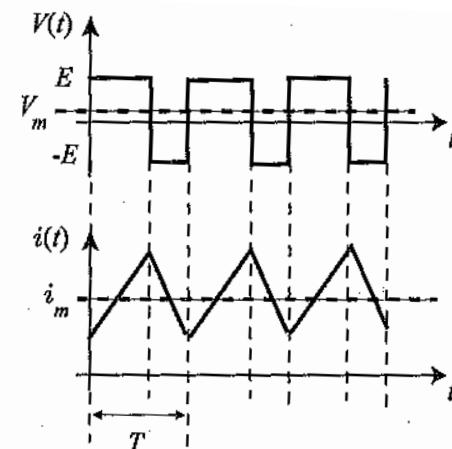
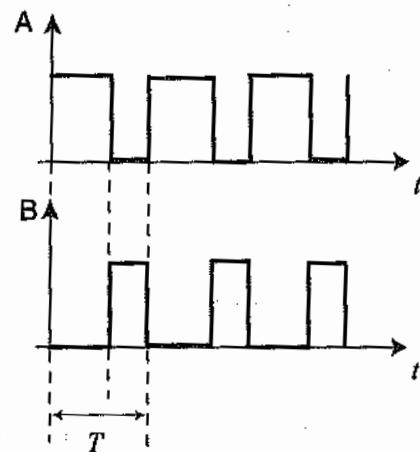
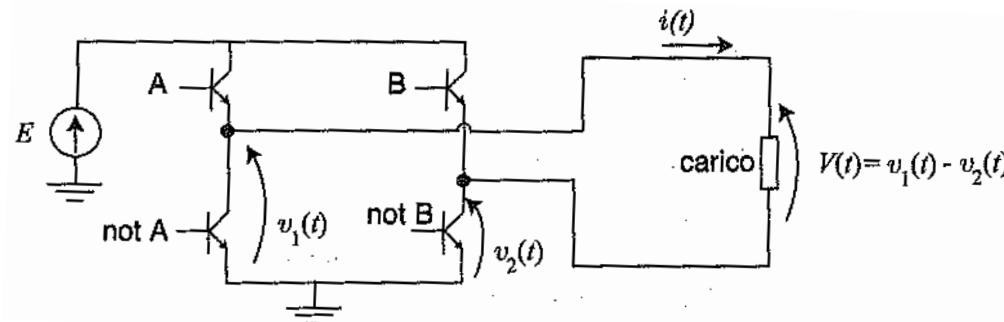


- tipicamente digitale
- regolazione o ...
- ... inseguimento di posizione o velocità
- controllo di coppia

# Duty cycle in PWM

Amplificatore di potenza con componenti elettronici di tipo switching

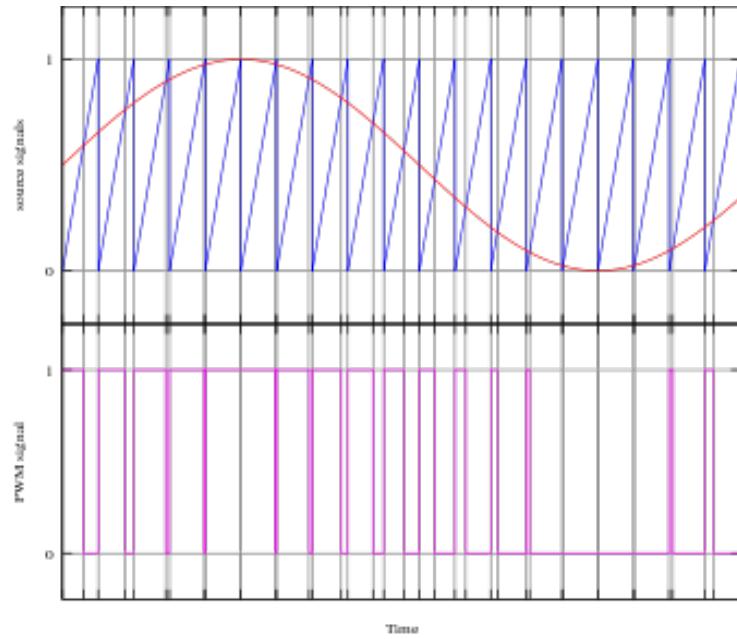
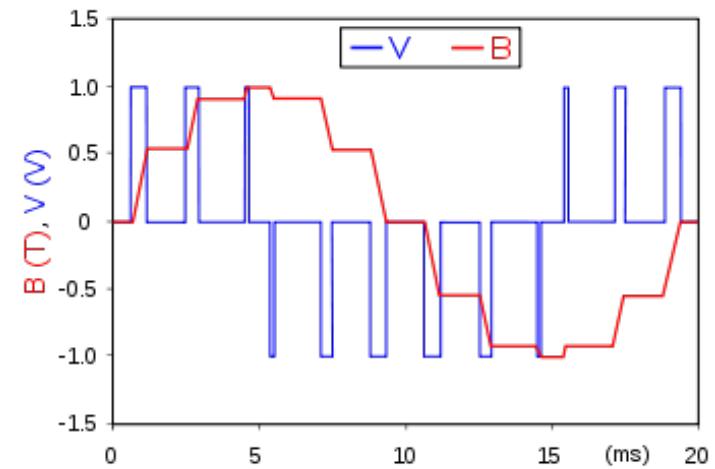
- dalla tensione costante  $E$  si generano, mediante 4 interruttori on/off, due onde quadre in contro-fase (A e B, e i loro negati) di durata variabile (e complementare) nel periodo  $T$
- grazie alla “modulazione” degli interruttori, si fornisce al motore una tensione media  $V_m$  pari a una frazione desiderata di  $E \Rightarrow V_m$  è **proporzionale al duty cycle** ( $= T_{on}/T \%$ )



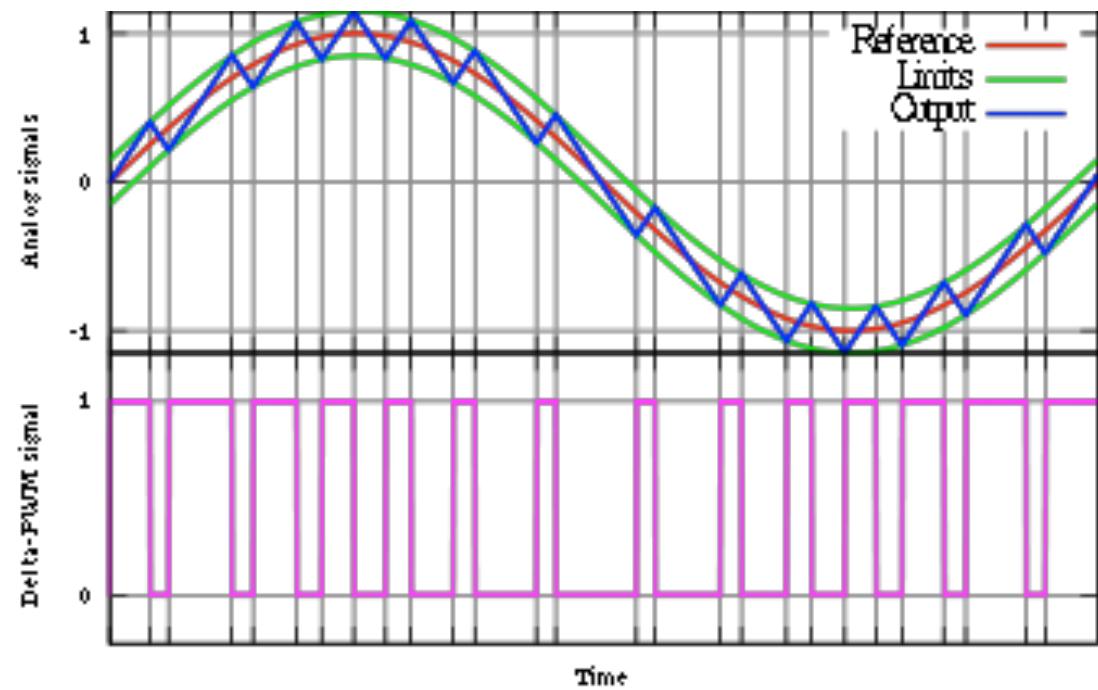
- bassa potenza dissipata dagli **switch** negli stati ON e OFF (solo durante un transitorio di 100ns c’è sia tensione che corrente)
- elevata frequenza  $f=1/T$  (ad es., 50 KHz) rispetto alle variazioni desiderate di  $V_m$

- modulazione a larghezza di impulso (Pulse Width Modulation = **PWM**)
- nelle figure, varie implementazioni di schemi PWM

PWM nel **pilotaggio di un motore AC**:  
la sequenza di **impulsi V** a durata variabile genera una variazione  
( $\approx$  sinusoidale) della densità di flusso magnetico **B** nel motore

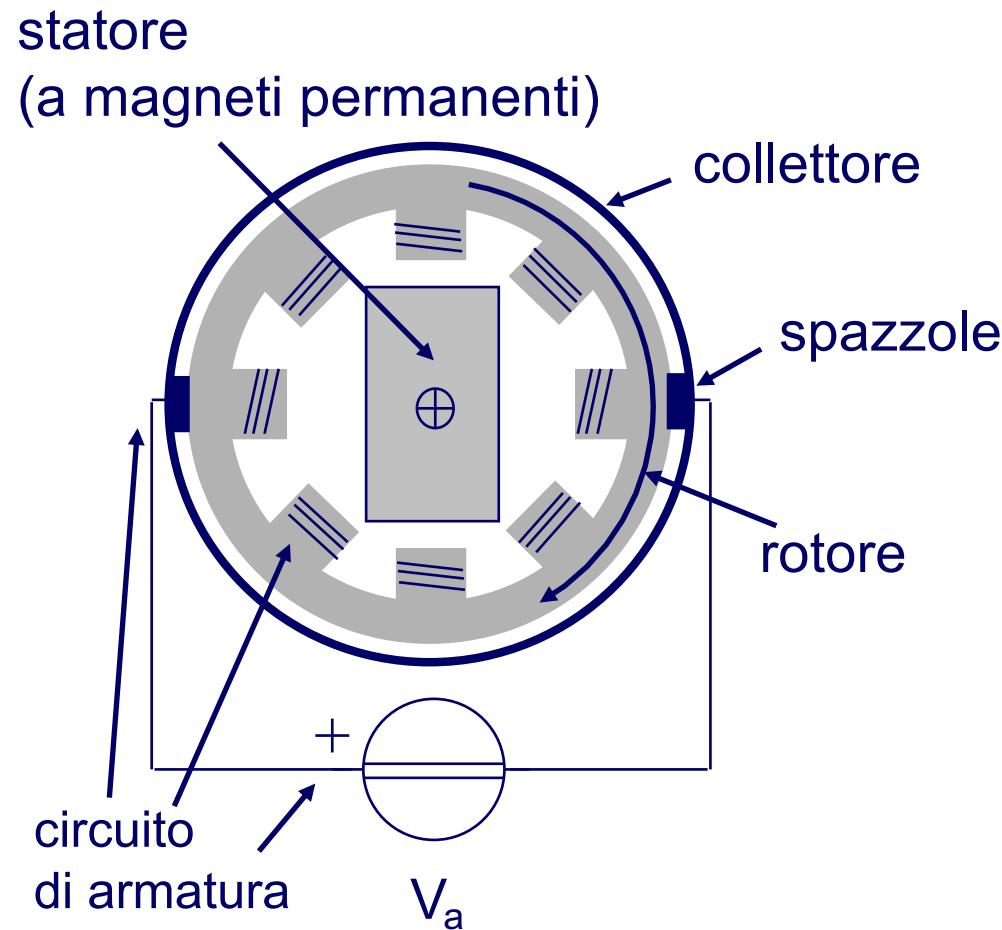


**metodo dell'intersezione**: si genera un onda quadra PWM corrispondente ad un dato segnale (la sinusoide in **rosso**), confrontando il segnale con una onda, ad es. a dente di sega (ON quando è più alto, OFF else)

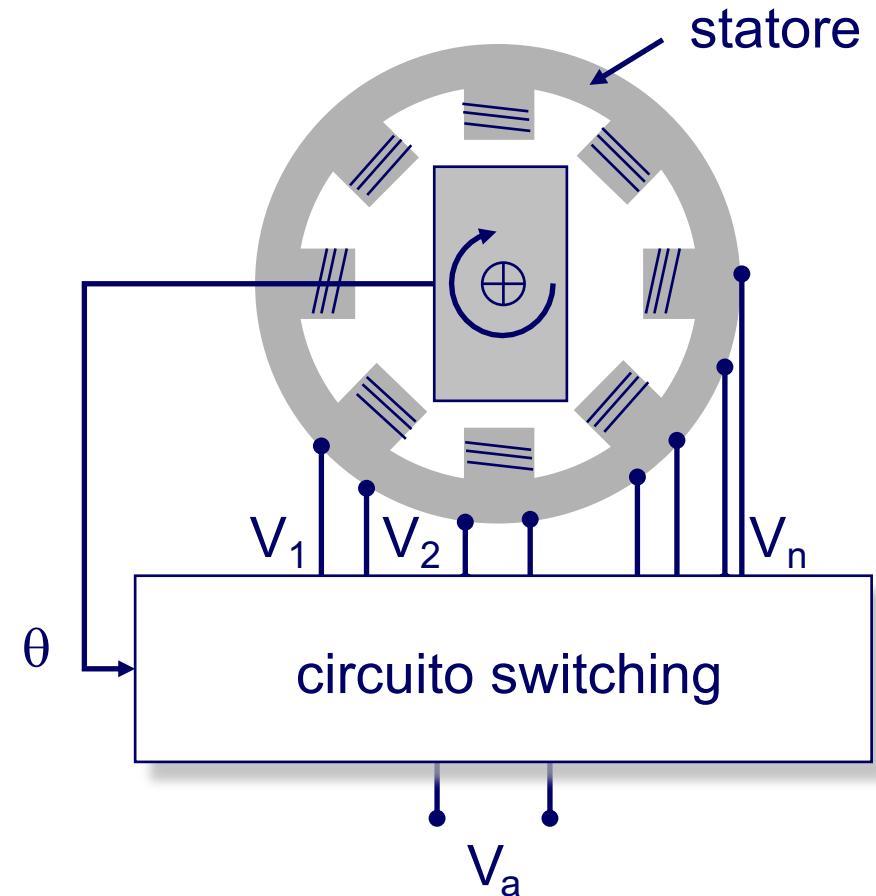


**metodo delta**: il segnale (la sinusoide in **rosso**) è integrato e confrontato ai valori **limite** (segnale  $\pm$  offset); l'uscita PWM commuta ON/OFF ogni volta che si raggiunge un limite (invertendo anche l'integrazione)

Nei motori elettrici, due schemi realizzativi di principio



motore con spazzole  
alimentato in corrente continua

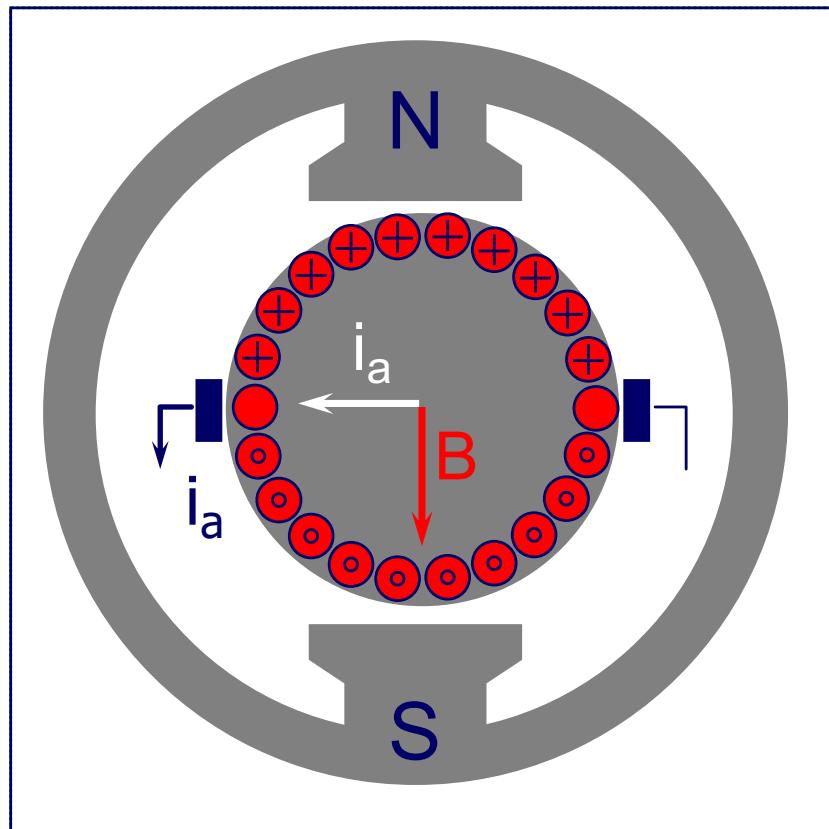


motore sincrono “brushless”  
pilotato con elettronica switching

## Caratteristiche generali

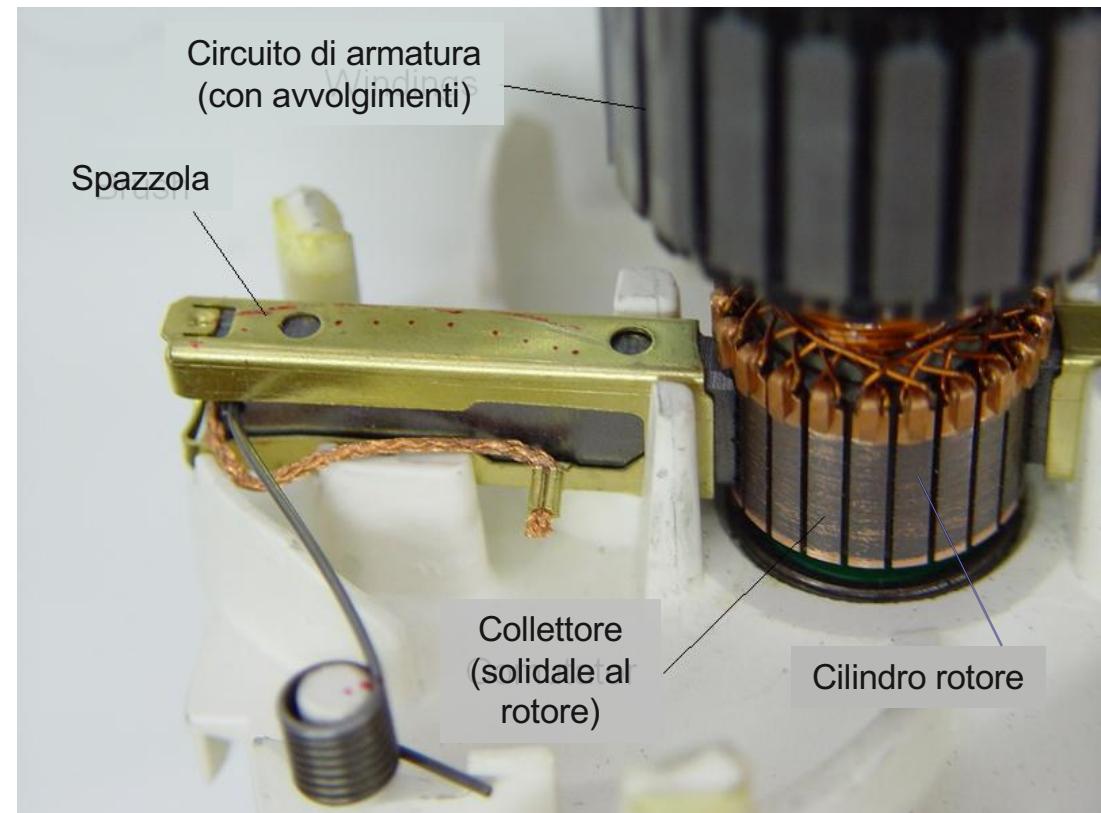
- ❑ circuito di rotore a collettore
- ❑ alimentabile in corrente continua (Direct Current = DC)
- ❑ diverse configurazioni: qui a magneti permanenti
- ❑ largo utilizzo, anche se in progressivo calo
- ❑ costruzione complessa, ma modello matematico semplice
  - ➔ altri motori, più semplici dal punto di vista costruttivo e meno costosi, hanno modelli matematici più complessi ma che con opportune elaborazioni possono essere ricondotti ad una forma molto simile a quella del motore DC

## avvolgimenti e collettore (con spazzole)



convenzione  
per le correnti  
nelle spire:

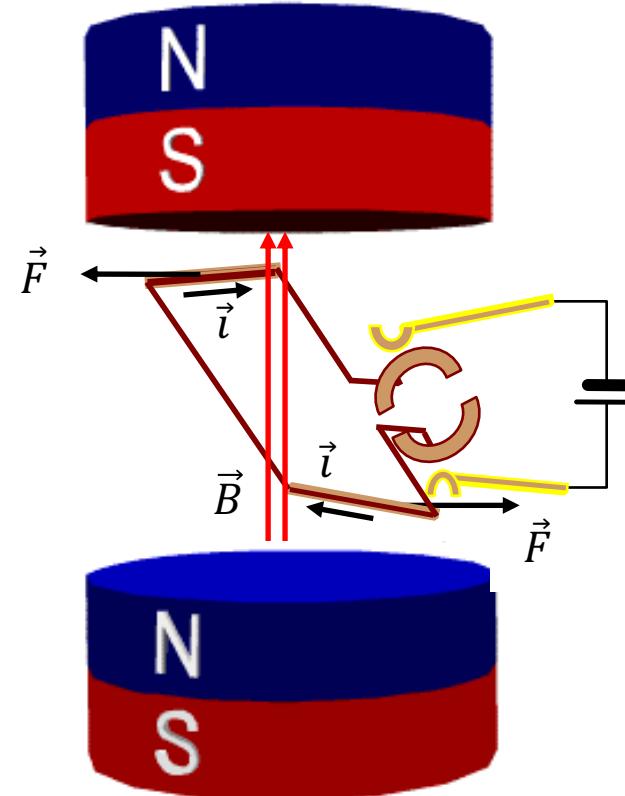
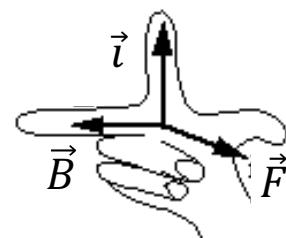
entrante      uscente  
+                -  
dal foglio



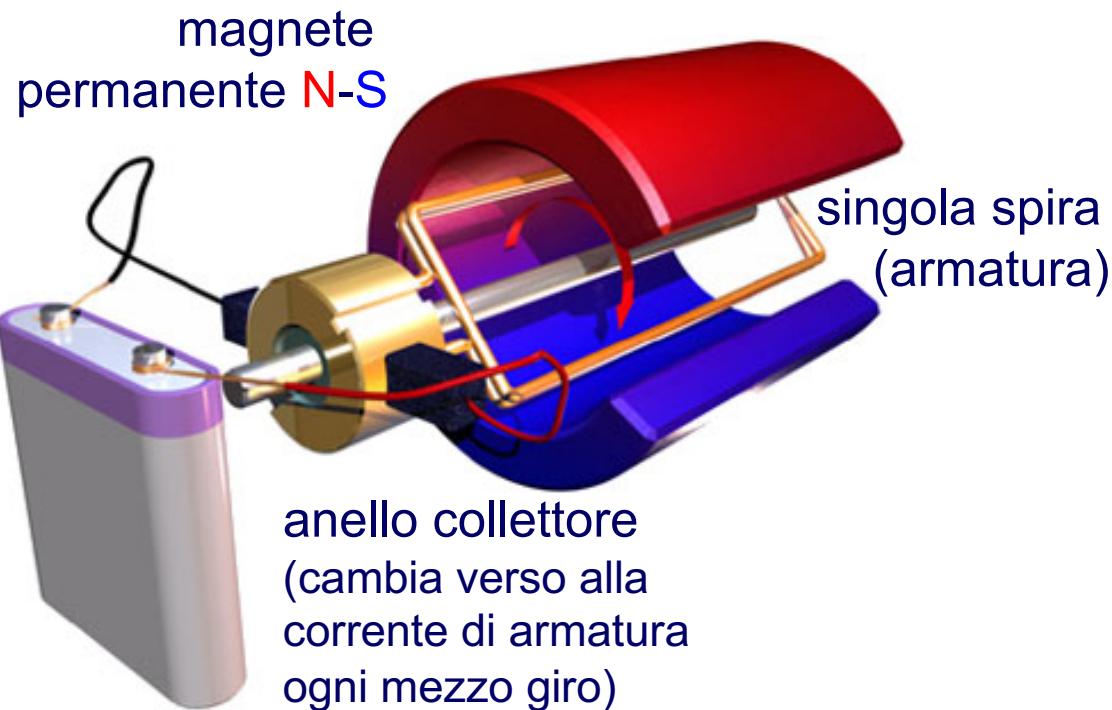
basato sulla legge di Lorentz

- campo magnetico  $B$  costante (con verso da polo N a polo S)
- corrente  $i$  costante e perpendicolare al campo magnetico

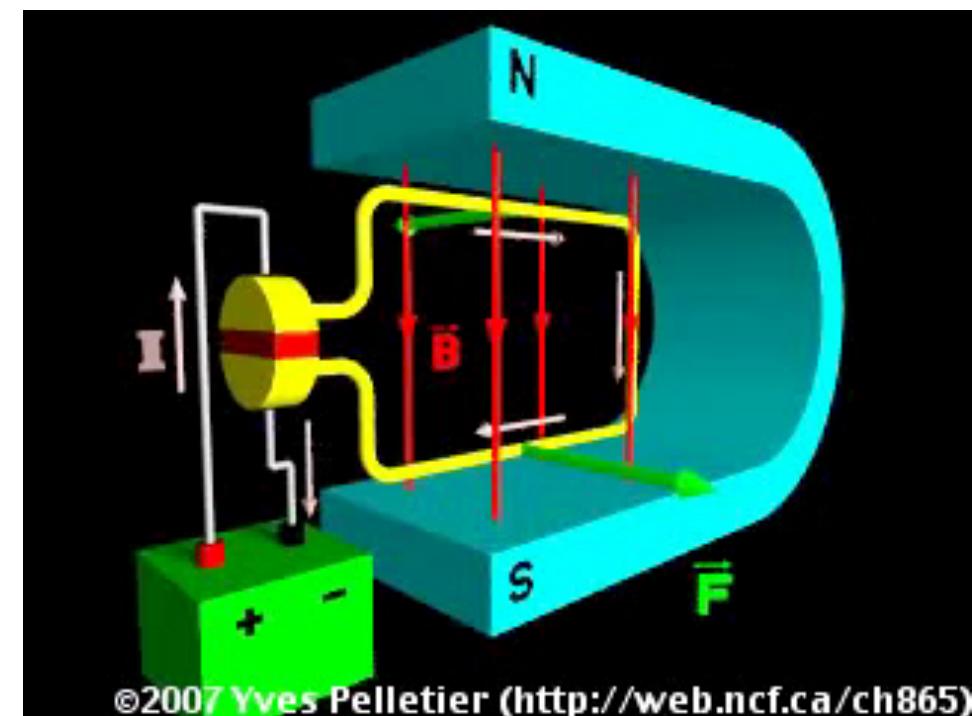
$$\vec{F} = L(\vec{i} \times \vec{B})$$



regola della mano destra  
per il prodotto vettore:  
indice  $\times$  medio = pollice



alimentazione in corrente continua (c.c.)

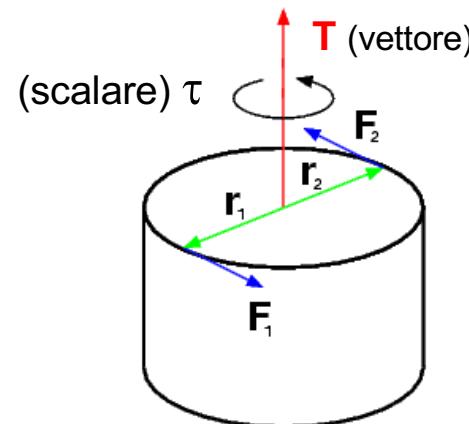


$$\vec{F} = L(\vec{l} \times \vec{B})$$

utilizzando una sola spira

□ momento torcente (coppia)

$$\vec{T} = (\vec{r}_1 \times \vec{F}_1 + \vec{r}_2 \times \vec{F}_2)$$



notazione per la **coppia scalare**:

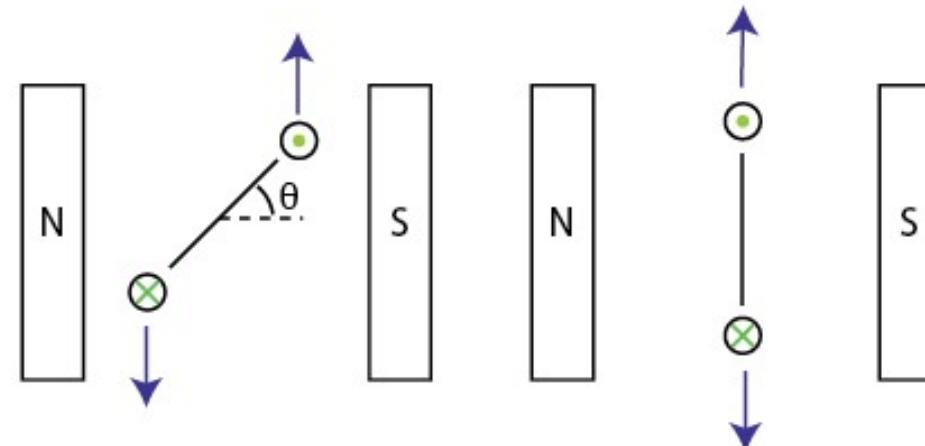
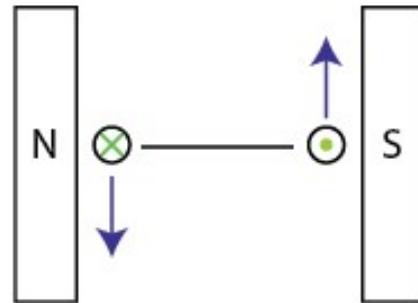
$$\tau = \pm |\vec{T}|$$

intensità del **vettore** di coppia con segno (per convenzione, positivo se antiorario)

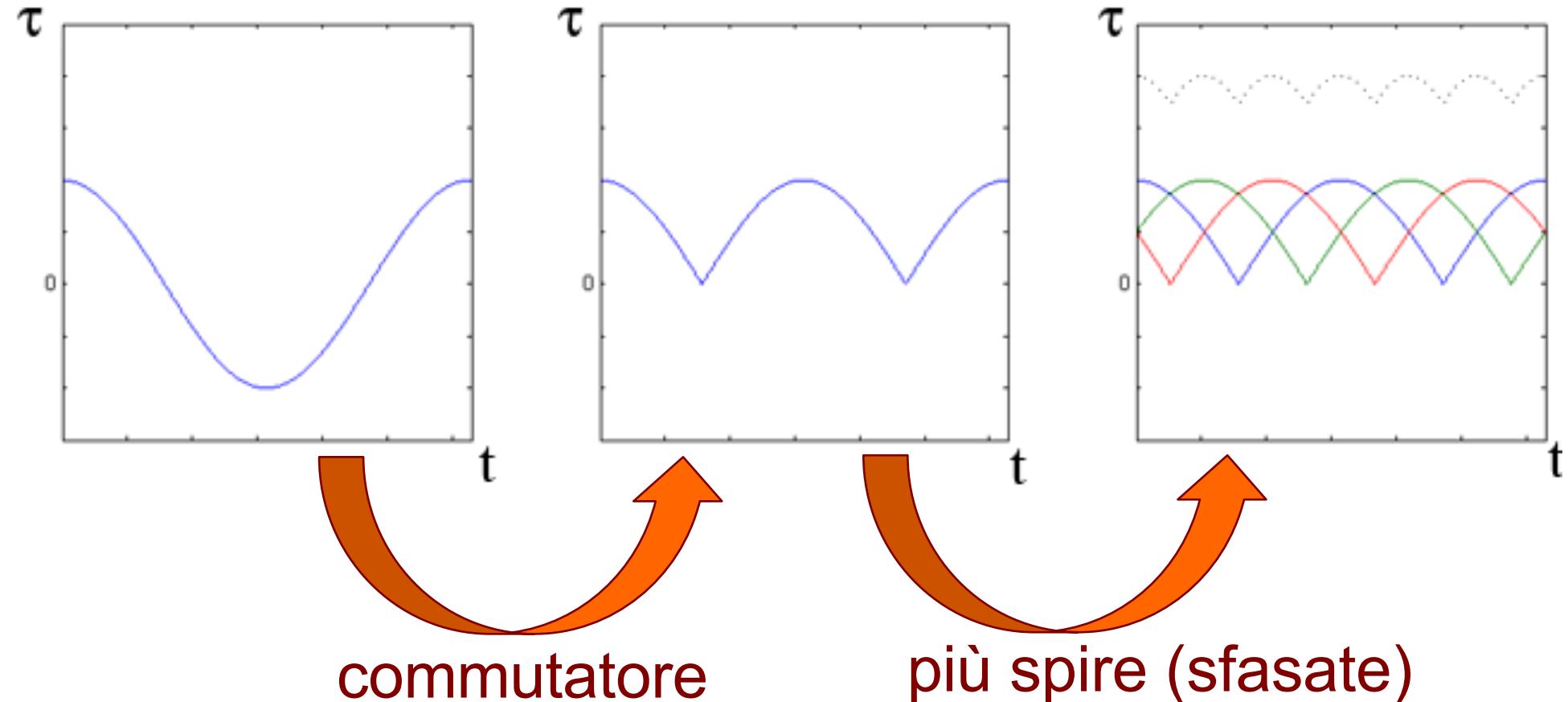
□ nel caso di una singola spira, la coppia va a zero a multipli di 180° al variare dell'angolo tra la forza generata e il braccio di rotazione

✖ current into page

✖ current out of page

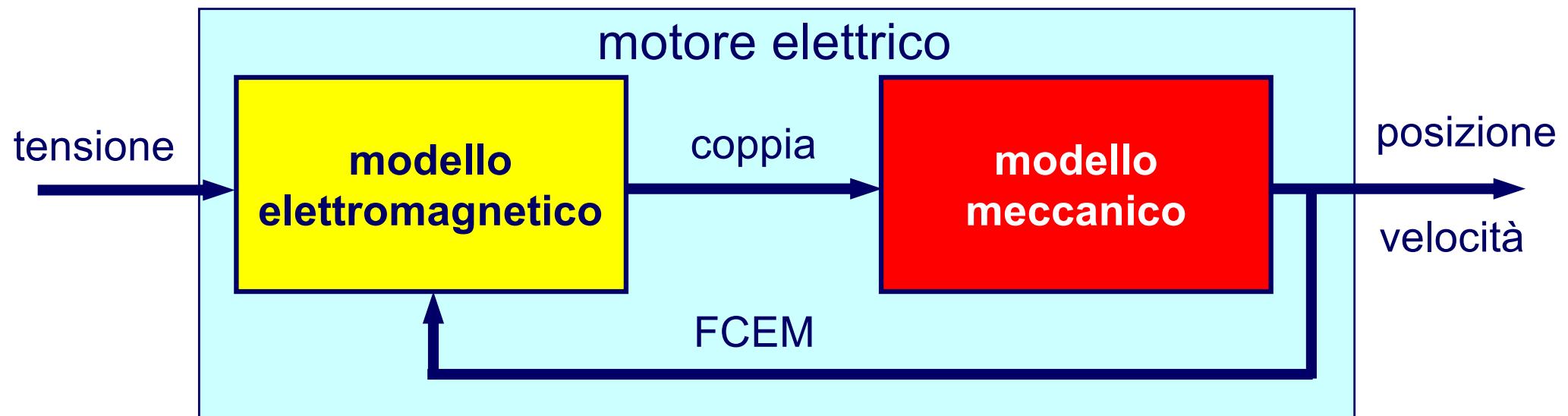


- il commutatore permette di avere una coppia sempre nello stesso verso di rotazione, ma non elimina le oscillazioni (“**ripple**”)
- per limitare il ripple di coppia si usano più spire



# Motore DC: modellistica

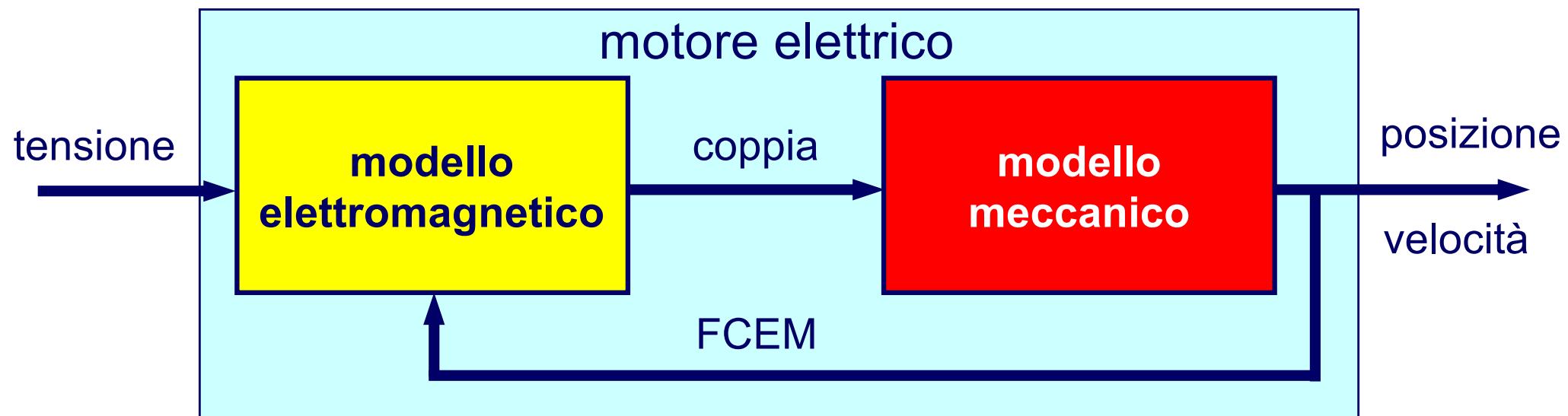
- ❑ modello elettromagnetico: equazione di bilancio circuitale (tensioni nella “maglia” di ingresso)
- ❑ produce una coppia **proporzionale** alla corrente
- ❑ modello meccanico: equazione di bilancio delle forze (qui, coppie)
- ❑ è sempre presente una forza contro-elettromotrice (FCEM o “Back EMF”) proporzionale alla velocità (per il bilancio energetico)



- nella modellistica ci si limita ad un comportamento lineare, tenendo presente che tutti gli azionamenti elettrici presentano limiti di
  - ✓ tensione massima
  - ✓ corrente massima

che si traducono in limiti per

- ✓ velocità massima per il motore
- ✓ coppia efficace (o rms = root mean square) e coppia di picco massima erogabile dal motore



# Valore medio, efficace, di picco

- definizioni standard per variabili continue, periodiche (di periodo  $T$ )

$$y_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt \quad \text{valore medio}$$

$$y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [y(t)]^2 dt} \quad \text{valore efficace}$$

$$y_{peak} = \max_{t \in T} |y(t) - y_{avg}| \quad \text{valore di picco}$$

- per segnali sinusoidali (con componente in continua)

$$u(t) = U_0 + U \sin \omega t \iff U > 0 \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \textcircled{4}$$

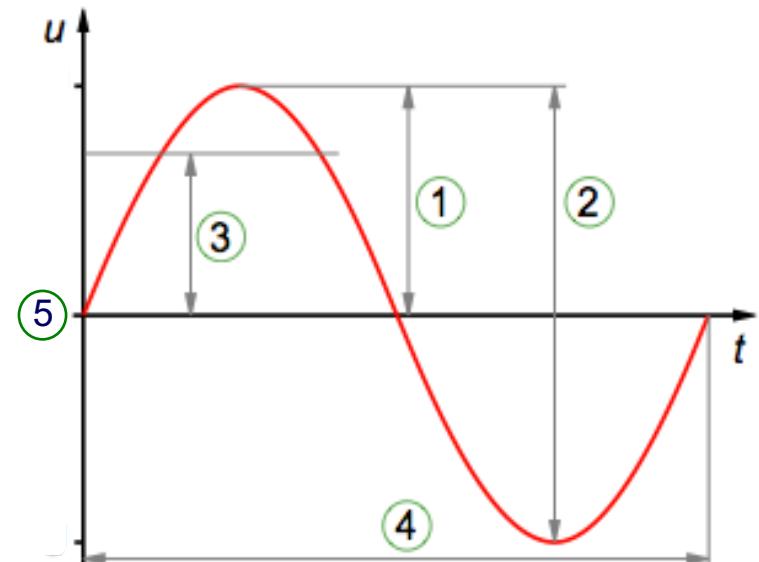
$$u_{peak} = U - |U_0| \quad \textcircled{1} \quad u_{avg} = U_0 \quad \textcircled{5}$$

$$u_{peak-to-peak} = 2U \quad \textcircled{2}$$

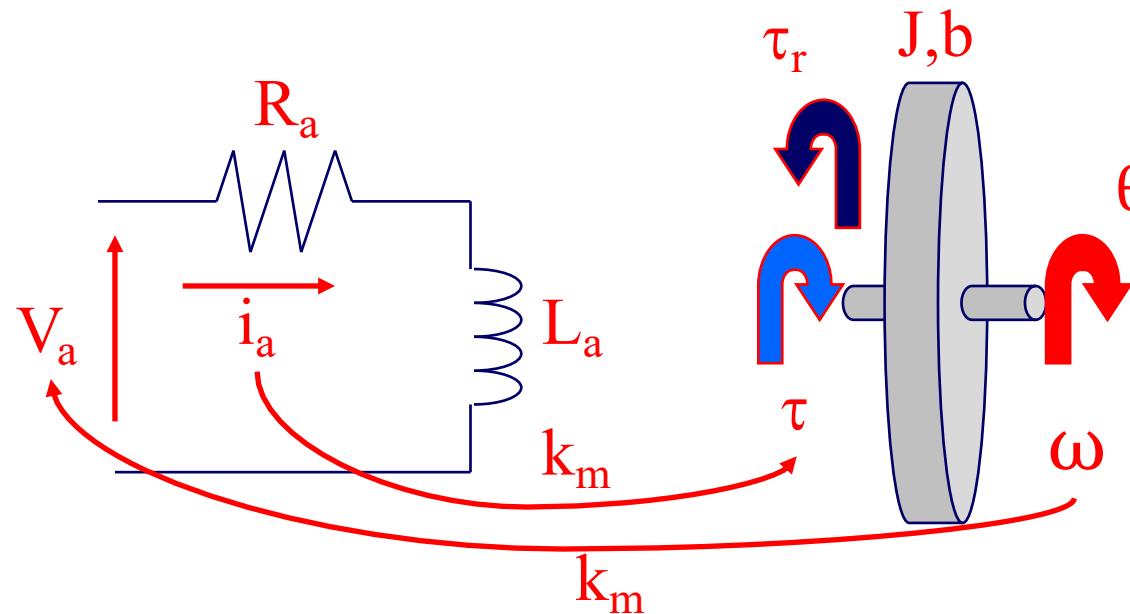
$$(u - U_0)_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [U \sin \omega t]^2 dt} = \dots = \frac{U}{\sqrt{2}} \quad \textcircled{3}$$

$$\Rightarrow u_{rms} = \sqrt{U_0^2 + \frac{U^2}{2}}$$

relazione tra valore efficace del segnale sinusoidale e sua componente continua



# Motore DC: modello matematico



\* = stesso valore  
numerico usando  
le unità SI !!

## □ parametri

$R_a$  resistenza di armatura

$L_a$  induttanza di armatura

$k_m$  coefficiente\* di coppia e FCEM

$J$  inerzia del rotore

$b$  coefficiente di attrito

## □ variabili

$i_a$  corrente di armatura

$\omega$  velocità del rotore

$\theta$  posizione del rotore

$V_a$  tensione di ingresso

$\tau_r$  coppia di carico (disturbo)

# Motore DC: modello matematico

$$L_a \frac{di_a}{dt} = V_a - R_a i_a - k_m \omega \quad \rightarrow$$

modello elettrico

$$J \frac{d\omega}{dt} = k_m i_a - b\omega - \tau_r \quad \rightarrow$$

modello  
meccanico

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad \rightarrow$$

# Motore DC: modello matematico

$$L_a \frac{di_a}{dt} = V_a - R_a i_a - k_m \omega \rightarrow$$

FCEM

$$J \frac{d\omega}{dt} = k_m i_a - b\omega - \tau_r \rightarrow$$

coppia prodotta

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \rightarrow$$

integratore

# Motore DC: regime a tensione costante

- supponiamo di alimentare il motore con una **tensione  $V_a$  costante**
- dopo un transitorio, si raggiunge una situazione di regime (*perché?*) con corrente costante e velocità angolare costante
- si possono valutare allora le **caratteristiche statiche** del motore (ad es., la velocità di regime  $\omega^*$  o la capacità di bilanciare una coppia  $\tau_r^*$  sul carico)

$$\frac{di_a}{dt} = 0 \xrightarrow{\quad} V_a - R_a i_a - k_m \omega = 0 \quad \frac{d\omega}{dt} = 0 \xrightarrow{\quad} k_m i_a - b\omega - \tau_r = 0$$

- risolvendo il sistema algebrico, si hanno le relazioni di regime

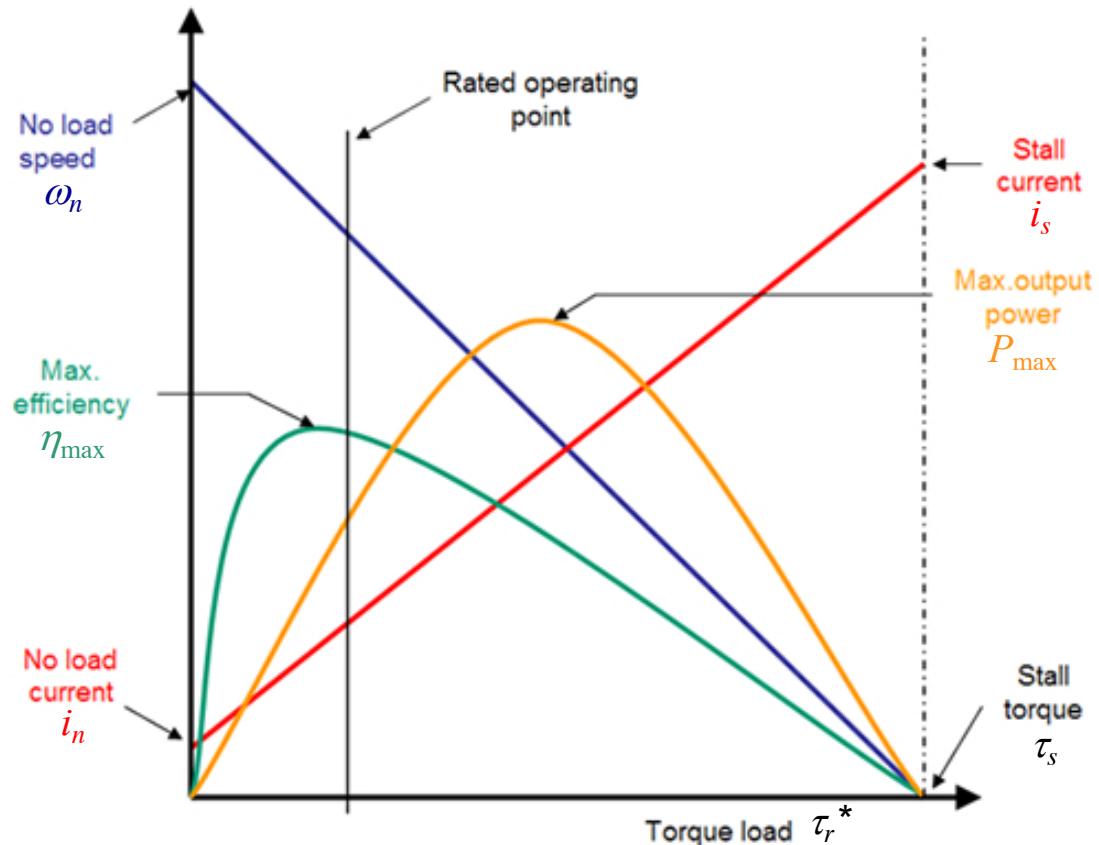
$$\omega^* = \left( b + \frac{k_m^2}{R_a} \right)^{-1} \left( \frac{k_m}{R_a} V_a - \tau_r^* \right)$$

$$\tau_r^* = \frac{k_m}{R_a} V_a - \left( b + \frac{k_m^2}{R_a} \right) \omega^*$$

$$\begin{aligned} i_a^* &= \frac{1}{R_a} \left( b + \frac{k_m^2}{R_a} \right)^{-1} (bV_a + k_m \tau_r^*) \\ &= \frac{1}{R_a} (V_a - k_m \omega^*) \end{aligned}$$

⇒ se ne possono tracciare gli andamenti ('affini', ossia lineari con offset) in funzione di  $\tau_r^*$  o di  $\omega^*$

# Motore DC: caratteristiche statiche



- coppia e corrente di stallo (= al max carico)

$$\tau_s = \tau_r^* \Big|_{\omega^* = 0} = \frac{k_m}{R_a} V_a \quad i_s = i_a^* \Big|_{\omega^* = 0} = \frac{V_a}{R_a}$$

- velocità e corrente a carico nullo

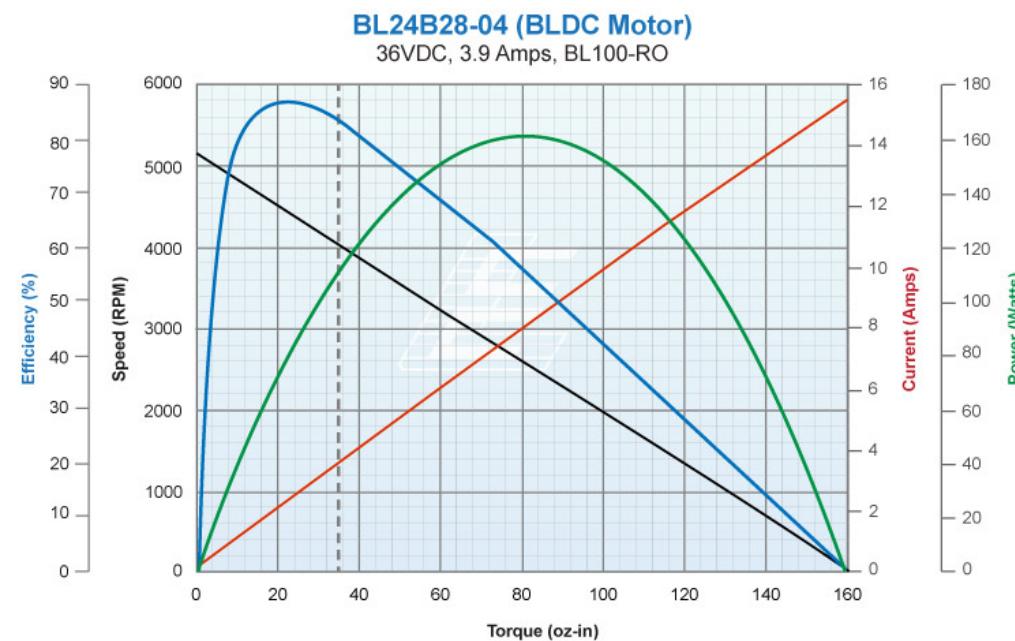
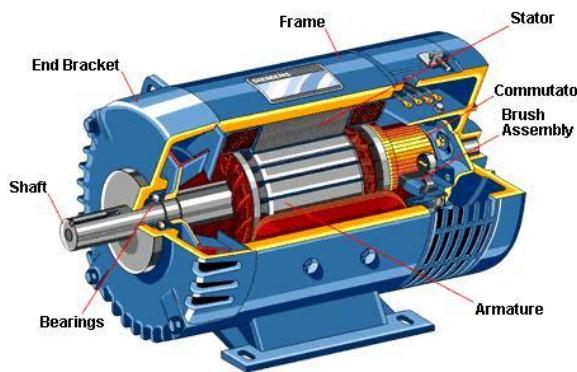
$$\omega_n = \omega^* \Big|_{\tau_r^* = 0} = \left( b + \frac{k_m^2}{R_a} \right)^{-1} \tau_s \quad i_n = i_a^* \Big|_{\tau_r^* = 0} = \frac{b}{k_m} \omega_n$$

- potenza in uscita a regime (quadratica)

$$\begin{aligned} P^* &= \tau_r^* \omega^* = \tau_s \omega^* - \left( b + \frac{k_m^2}{R_a} \right) \omega^{*2} \\ &= \left( b + \frac{k_m^2}{R_a} \right)^{-1} \left( \tau_s \tau_r^* - \tau_r^{*2} \right) \end{aligned}$$

- la massima potenza si ha quando  $\frac{dP^*}{d\tau_r^*} = 0 \Rightarrow \tau_r^* = \frac{\tau_s}{2}$  (per  $\omega^* = \frac{\omega_n}{2}$ )  $\Rightarrow P_{max} = \frac{\tau_s \omega_n}{4}$
- l'efficienza è data da  $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\tau_r^* \omega^*}{V_a i_a^*}$  (non lineare), con valore massimo  $\eta_{max}$  pari a ... (esercizio)

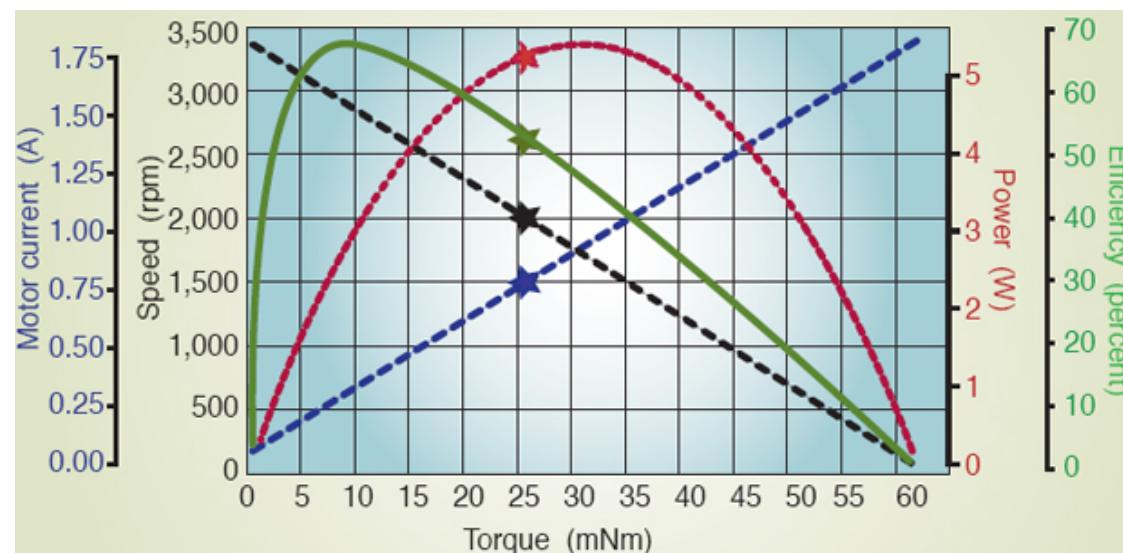
# Motore DC: caratteristiche statiche



motore di  
media taglia  
160W

a regime, per tensione  
applicata  $V_a$  costante

conversione SI  $\leftrightarrow$  US  
1 Nm = 141.61 oz-in  
100 oz-in = 0.70 Nm



motore di  
piccola taglia  
5.5W

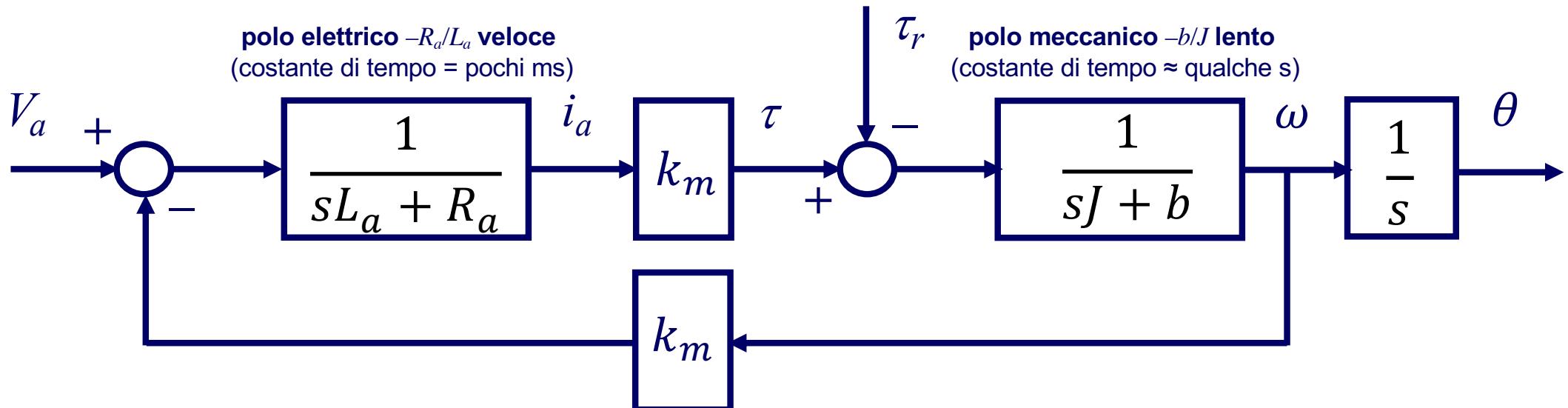
# Schema a blocchi del motore DC

$$L_a \frac{di_a}{dt} = V_a - R_a i_a - k_m \omega \Rightarrow \frac{i_a}{V_a - k_m \omega} = \frac{1}{sL_a + R_a}$$

nel dominio della trasformata di Laplace

$$J \frac{d\omega}{dt} = k_m i_a - b\omega - \tau_r \Rightarrow \frac{\omega}{k_m i_a - \tau_r} = \frac{1}{sJ + b}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \Rightarrow \frac{\theta}{\omega} = \frac{1}{s}$$



Domande classiche:  $G(s) = \omega(s)/V_a(s)$  ? Stabilità (ad anello aperto)? “Luogo delle radici” al variare di  $k_m > 0$  ?

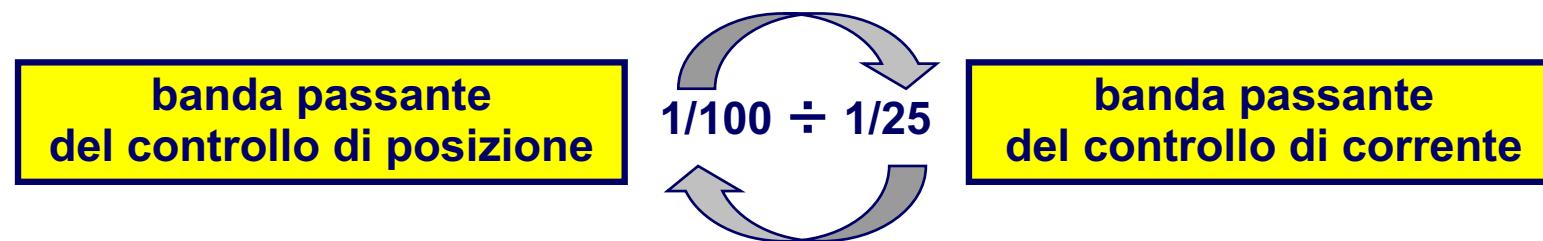
## □ obiettivi di controllo

- ➔ stabilità (meglio, *robusta*: anche in condizioni operative incerte)
- ➔ *inseguimento* di un riferimento desiderato di posizione  $\theta_{rif}(t)$
- ➔ *reiezione* dei disturbi di coppia non nota  $\tau_r(t)$

## □ progetto “centralizzato” o “in cascata” (per successivi anelli/loop) del controllore

- ➔ difficile il primo, vantaggioso il secondo sotto l’ipotesi di *idealità* degli anelli interni
- ➔ tre anelli di feedback (e azioni di feedforward) su **corrente**, **velocità** e **posizione**

## □ separazione dinamica



## □ limitazioni nell’implementazione

- ➔ saturazioni ‘fisiche’ di tensione e corrente
- ➔ rumori
- ➔ limite inferiore sul tempo di campionamento
- ➔ banda dell’anello di corrente tipicamente  $0.5 \div 1 \times 10^4$  rad/sec
- ➔ banda dell’anello di posizione circa 400 rad/sec

# Azioni di controllo in avanti (feedforward)

## □ richiami sull'uso del feedforward

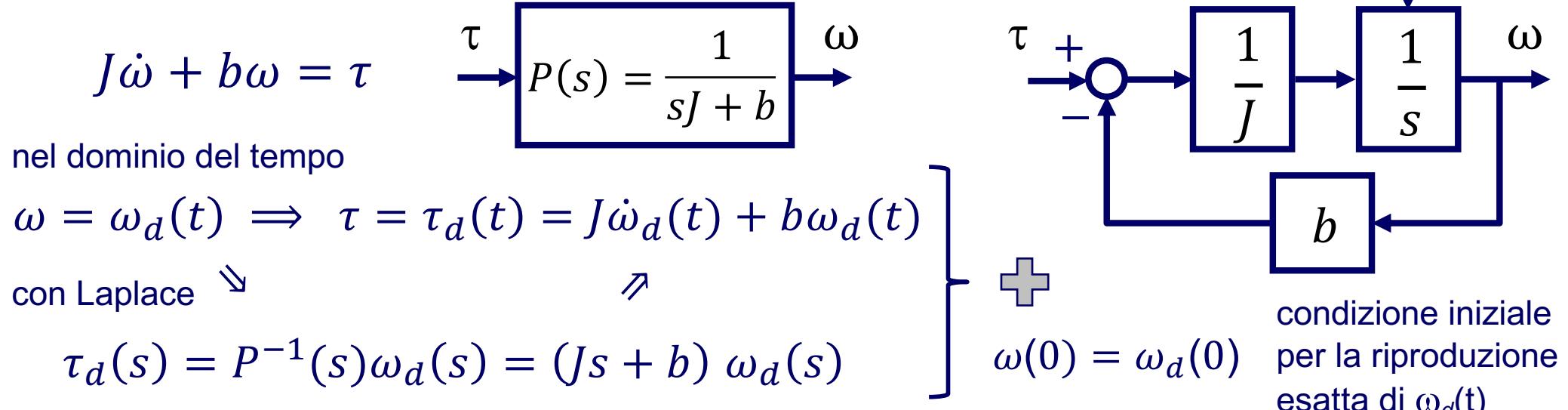
- ➔ comandi ad anello aperto per compensare **disturbi noti** e/o per eseguire in modo accurato **traiettorie di riferimento note e arbitrarie** (ma sufficientemente “smooth”)
- ➔ sono definiti in **condizioni nominali** (è richiesta in generale un'accurata conoscenza del modello e dei parametri del processo)
- ➔ i comandi sono basati sulla **inversione ingresso-uscita** del modello dinamico del processo di interesse (ad anello aperto o ad anello chiuso)
- ➔ per sistemi dinamici lineari, tale inversione può effettuarsi nel dominio del tempo o nel dominio di Laplace (o anche di Fourier, se gli andamenti sono periodici)
- ➔ i comandi in avanti si calcolano in modo diretto per processi stabili o instabili, ma senza zeri o **solo con zeri “a fase minima”** ( $\Rightarrow$  asintotica stabilità del sistema inverso)
- ➔ non si ha un “vincolo di causalità” per il processo inverso, proprio perché l’andamento completo del riferimento (o del disturbo compensato) è **noto a priori**
- ➔ per la riproduzione **esatta** (da  $t = 0$  in poi) di una traiettoria di riferimento in uscita, è necessario che il sistema (processo e eventuale controllore) si trovi in un ben definito stato iniziale, funzione della traiettoria desiderata e delle sue derivate all’istante  $t = 0$
- ➔ il feedforward non viene **quasi mai usato da solo**, ma in combinazione con una legge di controllo in feedback che garantisca la stabilità del sistema ad anello chiuso

# Azioni di controllo in avanti (feedforward)

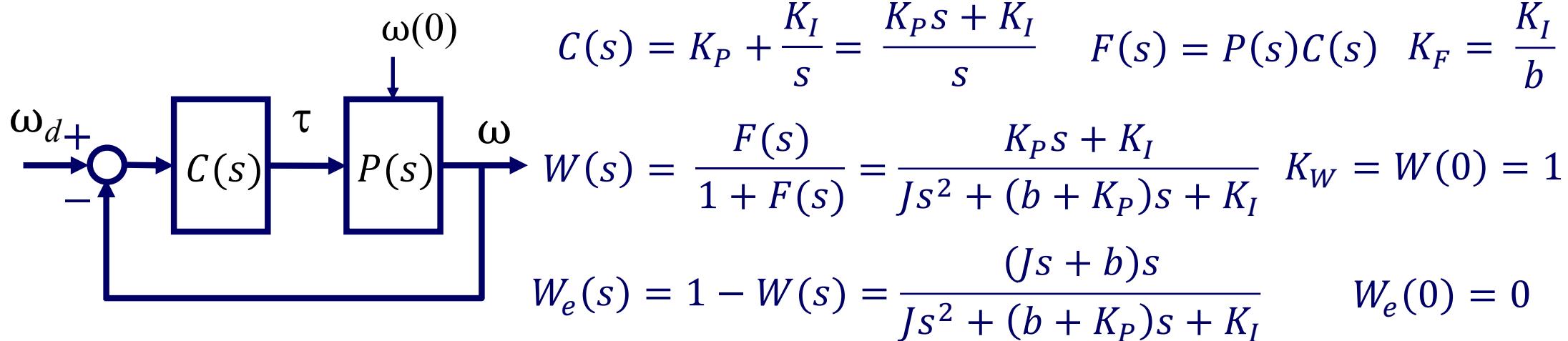
- uso combinato del controllo in feedback e dei comandi di feedforward
  - ➔ in presenza di **parametri incerti** (ad esempio, note solo delle stime approssimate  $\hat{J}$ ,  $\hat{b}$  dell'inerzia  $J$  e del coefficiente viscoso  $b$ ) e/o per condizioni iniziali non “matched” con quelle richieste, il feedforward calcolato darà luogo ad **errori**
  - ➔ la sola azione in **feedback**, oltre a permettere stabilità ad anello chiuso, fornisce già **riproduzione** di classi di riferimenti canonici (di tipo polinomiale e sinusoidali)
    - **senza** necessità di conoscere i valori dei parametri del processo
    - **senza** necessità di conoscere le ampiezze dei riferimenti
    - **solo** a regime permanente (cioè a valle di un periodo transitorio)
  - ➔ l'azione di feedback garantirà **stabilità asintotica** e **robustezza** di comportamento rispetto a incertezze e/o errori iniziali, mentre le azioni di feedforward miglioreranno le **prestazioni**, in particolare per la riproduzione di **riferimenti con andamento temporale complesso**
  - ➔ due **schemi alternativi** per l'aggiunta dell'azione di feedforward al controllo in feedback
  - ➔ illustriamo questi concetti in un problema di controllo della velocità angolare  $\omega$ , quando l'ingresso è la coppia  $\tau$  (è un sotto-caso parziale del controllo del motore DC)

# Esempio di uso del feedforward

- inversione ad anello aperto nel controllo di velocità

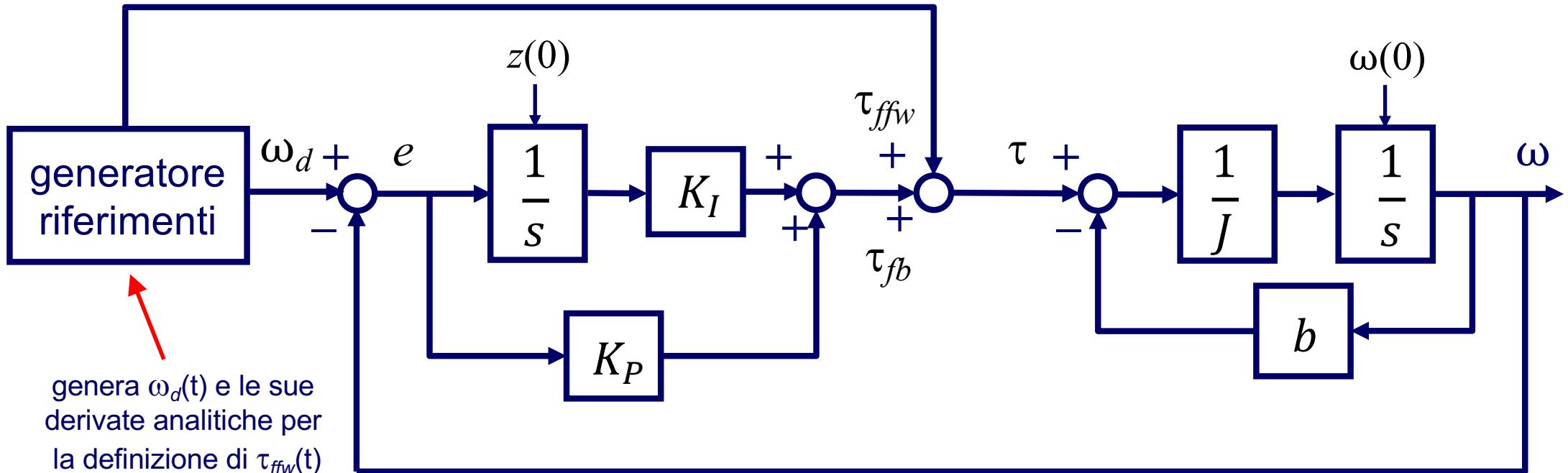


- controllore PI (ad es., per avere errore nullo a regime per velocità  $\omega_d$  costante)



# Esempio di uso del feedforward

- controllo PI in feedback e aggiunta dell'azione di feedforward a livello di coppia



$$\omega = \omega_d(t) \Rightarrow \tau_{ffw}(t) = J\dot{\omega}_d(t) + b\omega_d(t)$$

$$PI \Rightarrow \tau_{fb}(t) = K_P(\omega_d(t) - \omega(t)) + K_I \int_0^t (\omega_d(\sigma) - \omega(\sigma)) d\sigma$$

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \tau_{fb} + \tau_{ffw} \end{aligned} \right\}$$

+

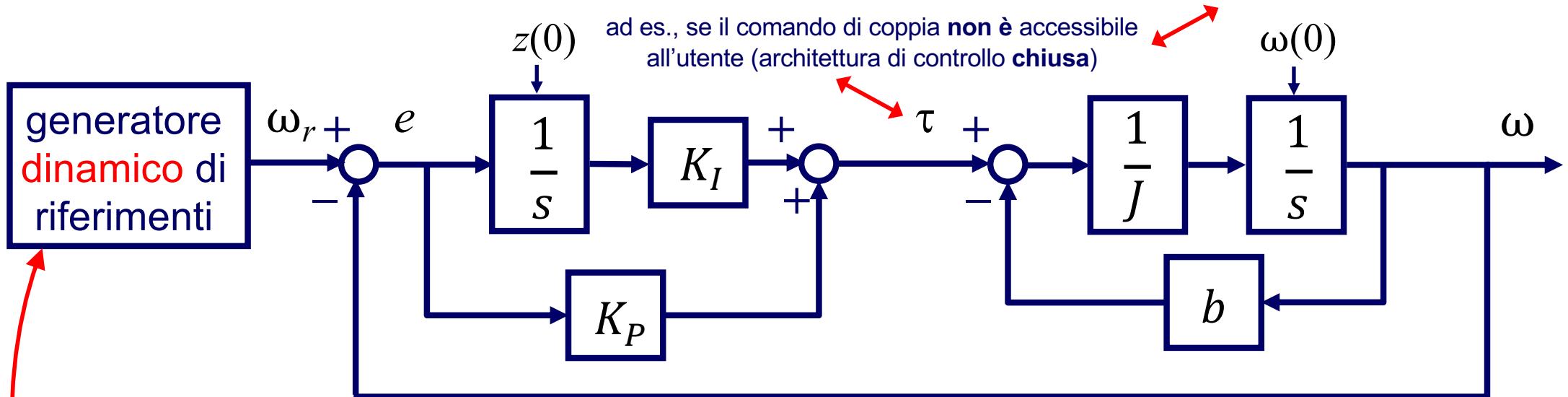
condizioni iniziali degli integratori  
(stati del processo e del controllore)  
per la riproduzione esatta di  $\omega_d(t)$

$$\omega(0) = \omega_d(0)$$

$$z(0) = 0$$

# Esempio di uso del feedforward

- controllo PI in feedback con aggiunta del feedforward **a livello di riferimento**



$$\omega = \omega_d(t) \quad \& \quad W(s) = \frac{\omega(s)}{\omega_r(s)} = \frac{K_P s + K_I}{J s^2 + (b + K_P)s + K_I} \quad \Rightarrow \quad \omega_r(s) = W^{-1}(s)\omega_d(s)$$

$$\Rightarrow (K_P s + K_I) \omega_r(s) = (J s^2 + (b + K_P)s + K_I) \omega_d(s)$$

$$\Rightarrow \dot{\omega}_r(t) = \frac{1}{K_P} \left( J \ddot{\omega}_d(t) + (b + K_P) \dot{\omega}_d(t) + K_I (\omega_d(t) - \omega_r(t)) \right)$$

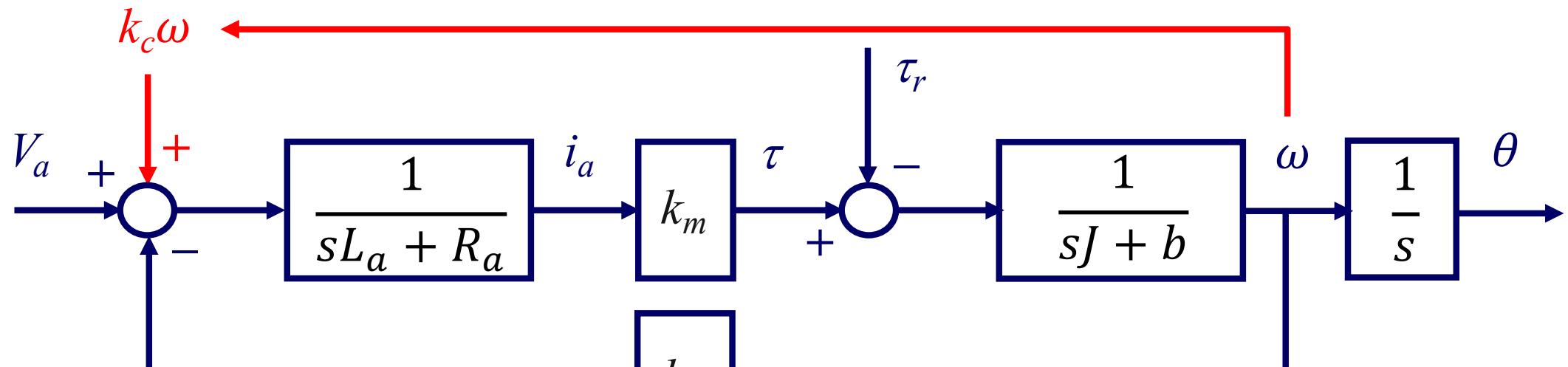
+

condizioni iniziali per la riproduzione esatta di  $\omega_d(t)$

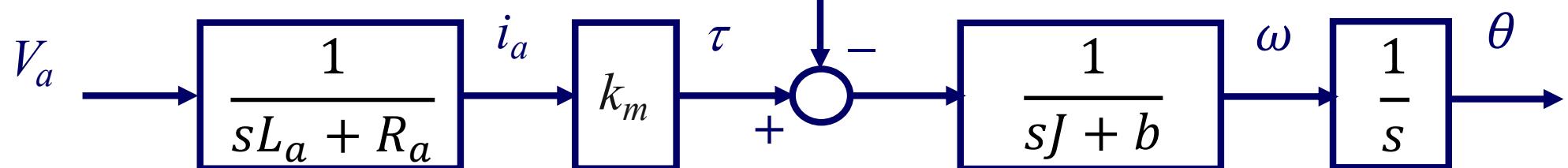
$$\omega(0) = \omega_d(0) \quad \boxed{\omega_r(0) = \omega_d(0)} \quad z(0) = \frac{1}{K_I} (J \dot{\omega}_d(0) + b \omega_d(0))$$

cancellazione via *feedback* della FCEM attuale

- la corrente risente anche del modello meccanico e del disturbo di coppia
- cancellazione con retroazione positiva (ma problemi di *instabilità* quando  $k_c > k_m$ )

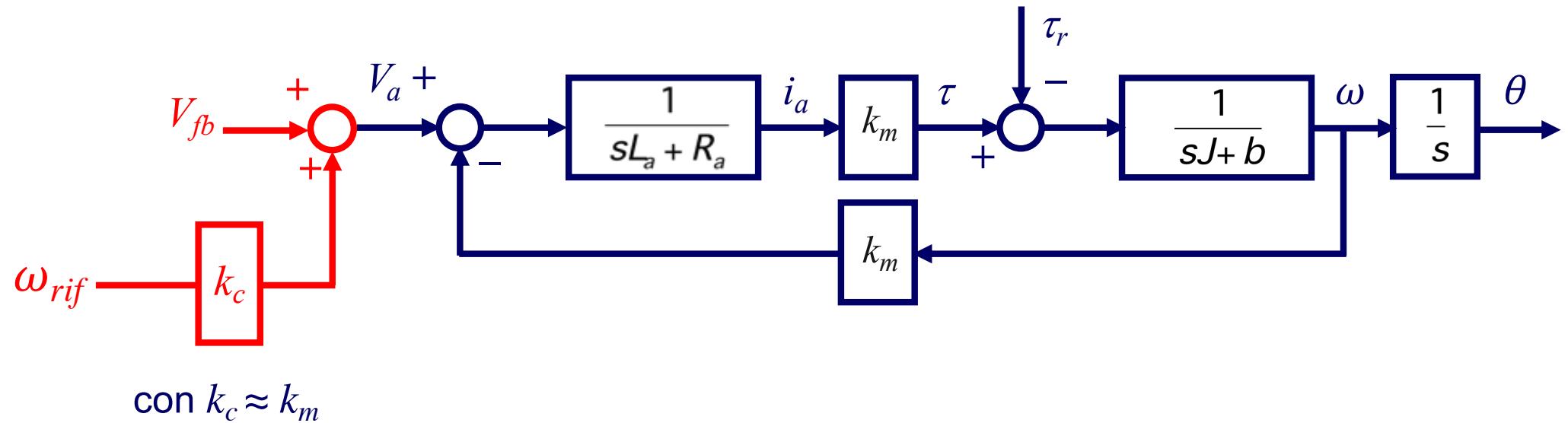


se  $k_c = k_m$



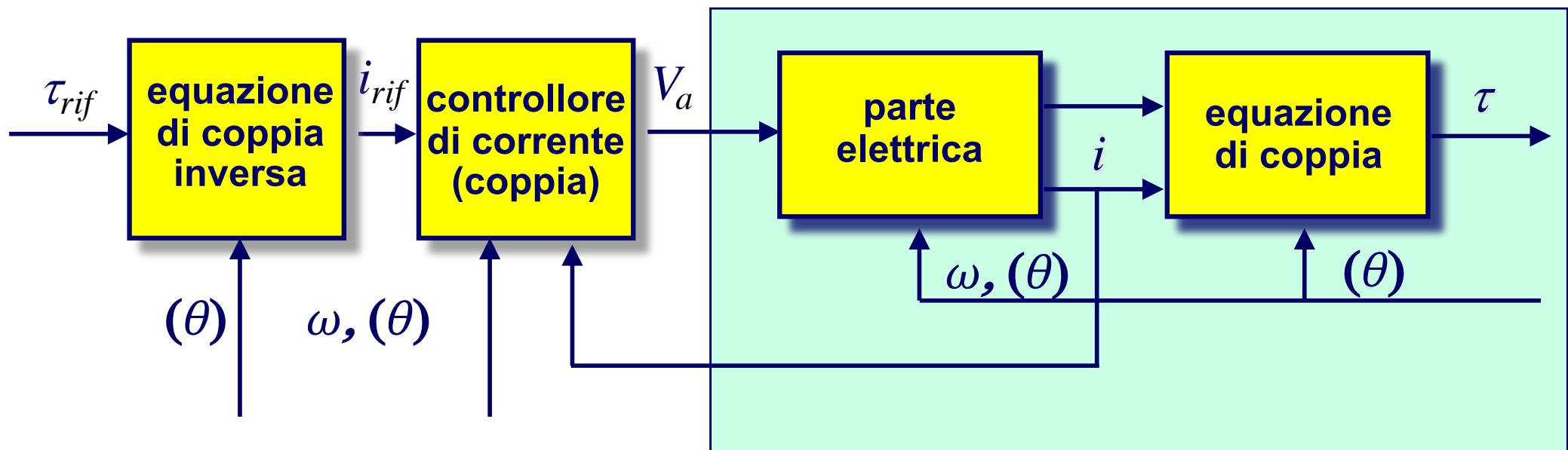
compensazione via *feedforward* della FCEM nominale

- azione in avanti per compensare, almeno in modo approssimato, il fenomeno



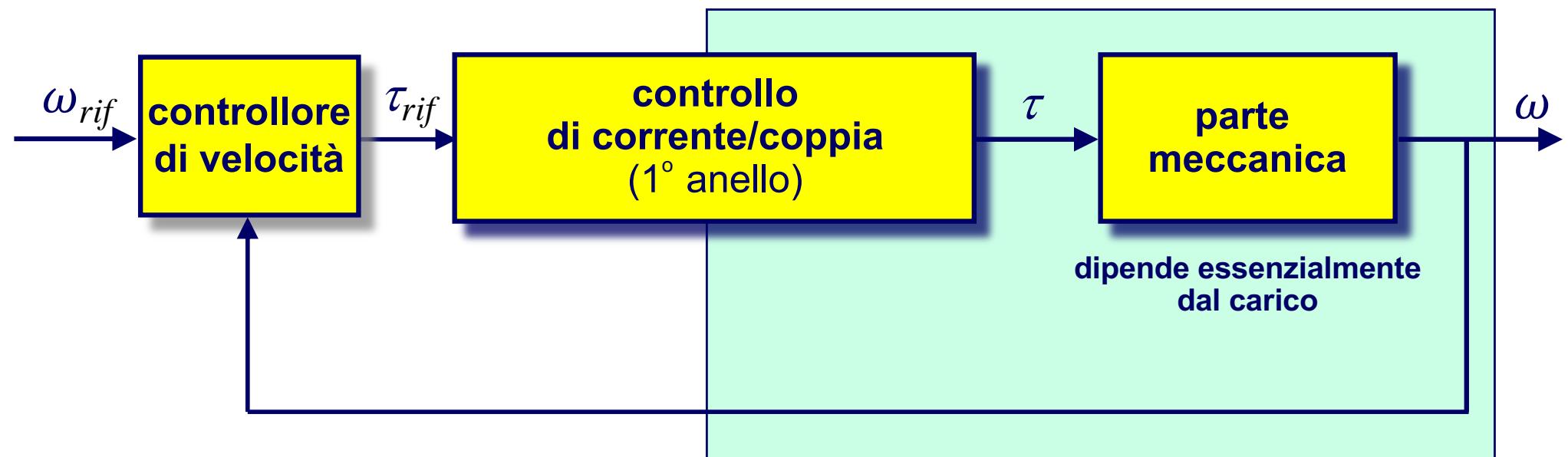
1° anello (più interno) di corrente (o di coppia)

- ❑ risente degli effetti dell'amplificatore
- ❑ risente direttamente della natura del motore
- ❑ usa la relazione coppia-corrente statica (non si ha una misura diretta di coppia)



## 2° anello (intermedio) di velocità

- ❑ l'anello più interno è visto come un attuatore “ideale” (o quasi) di coppia
- ❑ risente indirettamente della natura del motore
- ❑ risente direttamente della natura meccanica del carico



## 3° anello (esterno) di posizione

- il secondo anello interno è visto come un attuatore “ideale” (o quasi) di velocità
- risente indirettamente della natura elettrica del motore
- risente indirettamente della natura meccanica del carico

} schema di controllo  
puramente  
cinematico



- nel progetto effettivo
  - si parte dall’anello più esterno (assumendo gli anelli più interni come ideali) e si procede verso quelli interni
  - l’uscita di comando di un anello esterno è l’ingresso di riferimento per l’anello immediatamente più interno

Che tipo di regolatori si usano **nei diversi loop** di controllo?

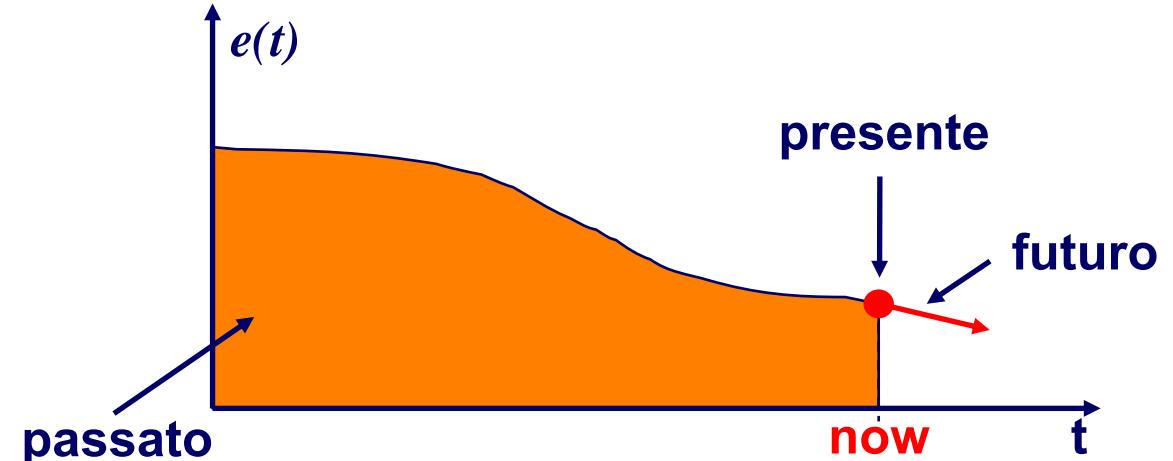
**caratteristiche desiderate**

- ➔ basso costo
- ➔ standardizzazione
- ➔ semplicità della legge (algoritmi complessi non servono, le limitazioni maggiori sono imposte dalla tecnologia)
- ➔ semplicità di taratura dei parametri (tuning)

**soluzione più comune ⇒ regolatori PID**

Quali informazioni sul segnale di errore  $e(t)$  si introducono nell'azione di controllo?

- presente:**  $e(t)$
- passato:**  $\int e(t)dt$
- futuro:**  $de(t)/dt$



## Regolatore Proporzionale-Integrale-Derivativo (PID)

- produce in generale tre azioni, ciascuna proporzionale a
  - errore istantaneo (azione P)
  - integrale del segnale di errore (azione I)
  - (stima) della derivata del segnale di errore (azione D)
- è ampiamente usato in automazione (**standard**)
  - semplice da tarare (solo tre parametri)
  - con procedure automatiche (che non usano in genere informazioni sul modello)
  - comportamento piuttosto robusto rispetto a incertezze
- è un sistema dinamico (se l'azione integrale è effettivamente presente)

$$e(t) = y_{rif}(t) - y(t)$$

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

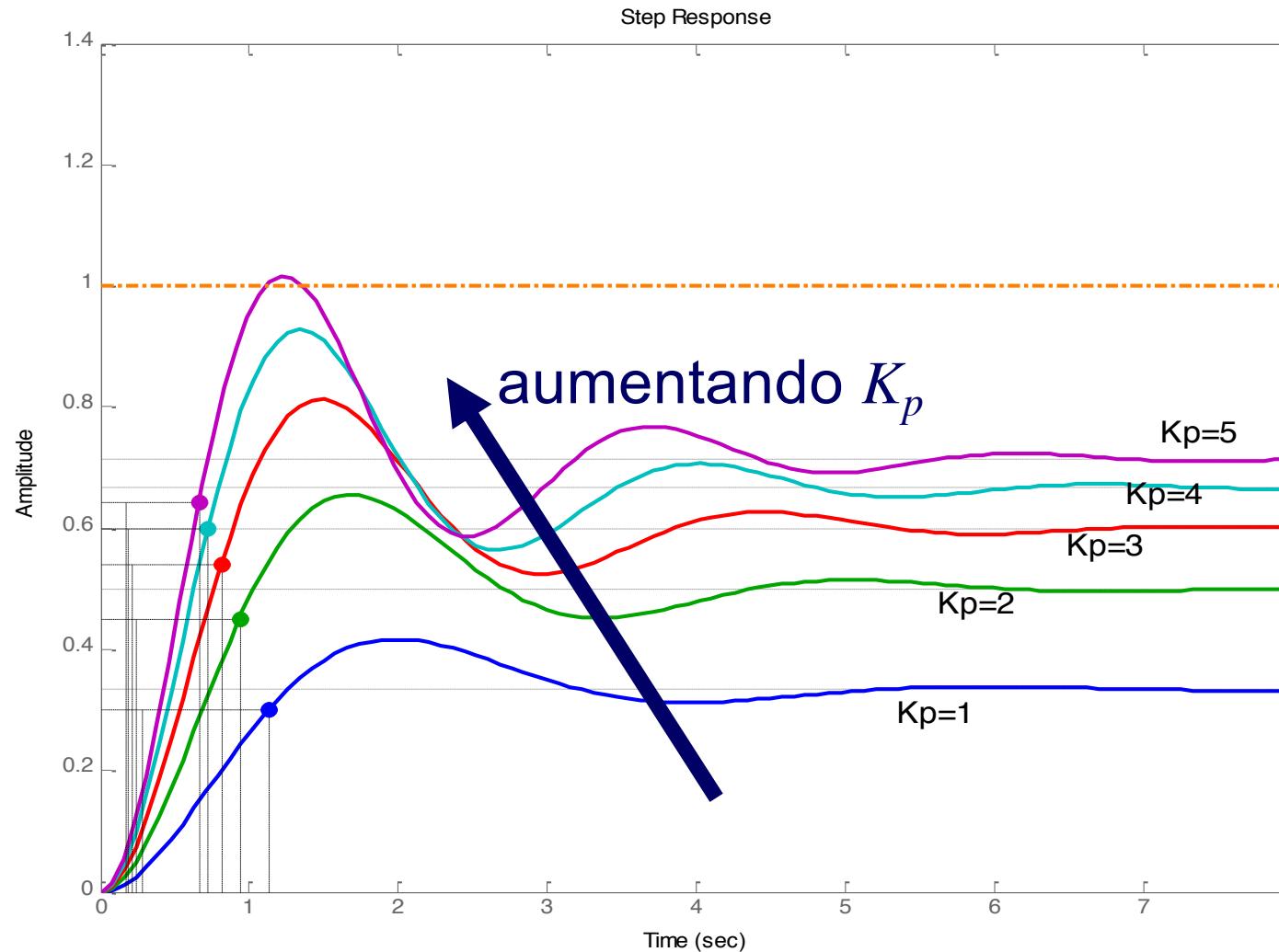
$T_i$  = tempo di integrazione  
( $K_i = K_p/T_i$ )

$T_d$  = tempo di derivazione  
( $K_d = K_p T_d$ )

## Azione P

- accelera il comportamento transitorio del sistema
- **riduce l'errore a regime**
  - ➔ per avere errore a regime nullo, il guadagno  $K_p$  dovrebbe essere infinito (per avere un'azione non trascurabile anche in presenza di errore molto piccolo)
  - ➔ per questo motivo si introduce l'azione integrale...
  - ➔ ...a meno che il processo non abbia già un'azione integrale al suo interno (sistema di controllo di tipo 1)  $\Rightarrow$  errore a regime in risposta a un gradino è nullo per qualsiasi  $K_p$
- **svantaggio: tende a destabilizzare il sistema all'aumento del guadagno  $K_p$**

## Azione P



## Azione I

- azione diversa da zero anche quando  $e(t) = 0$
- **annulla** l'errore a regime per riferimenti costanti
  - ➔ equivale ad un guadagno proporzionale infinito per segnali costanti (a frequenza nulla)
- svantaggio: tende a destabilizzare il sistema al diminuire del tempo di integrazione  $T_i$

## Azione PI

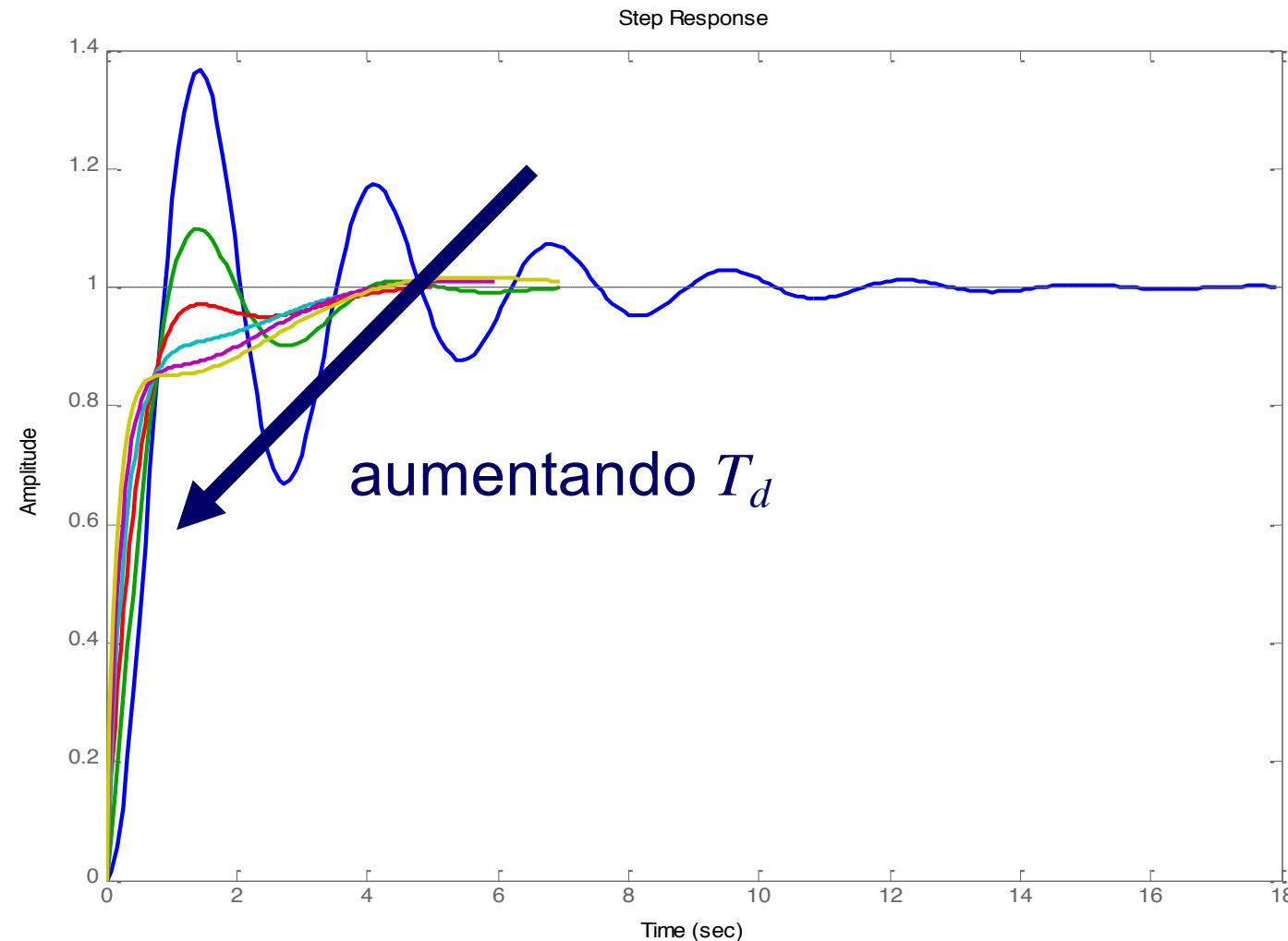
- $\approx$  guadagno + polo in  $s=0$  + rete anticipatrice opportuna

$$C(s) = \frac{K}{s} \frac{1+\tau_a s}{1+(\tau_a/m_a)s} \xrightarrow{m_a \gg \tau_a} C(s) = \frac{K}{s} (1 + \tau_a s) = (K\tau_a) + \frac{K}{s} = K_p + \frac{K_i}{s}$$

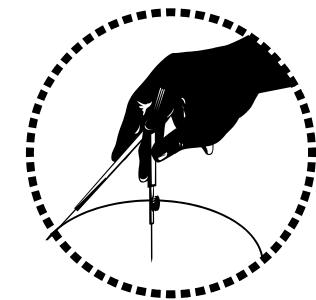
## Azione D

- azione basata su stima dell'evoluzione futura del sistema
  - ➔ per motivi di causalità, si può solo “approssimare” la derivata del segnale di errore
- **anticipa** l'errore, evitando che l'uscita si allontani dal riferimento a causa dell'accelerazione data dall'azione proporzionale
  - ➔ simile all'azione di una rete anticipatrice (zero/polo) nella sintesi in frequenza, con il polo molto in alta frequenza
- tende a stabilizzare il sistema
- svantaggio: rallenta la risposta del sistema

## Azione D



## regole di massima sulle singole azioni di controllo

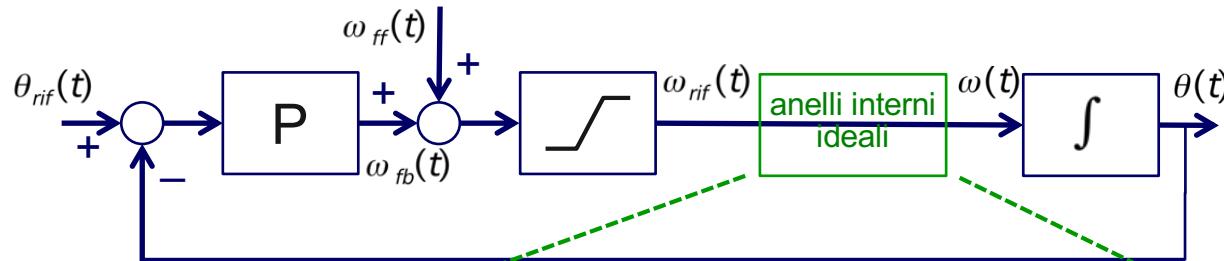


aumentando l'azione	prontezza di risposta	margine di stabilità	errore a regime
<b>P</b> $K_p \uparrow$	aumenta	diminuisce	diminuisce
<b>I</b> $T_i \downarrow$	diminuisce	diminuisce	nullo (se azione presente)
<b>D</b> $T_d \uparrow$	diminuisce	migliora (se azione presente)	ininfluente

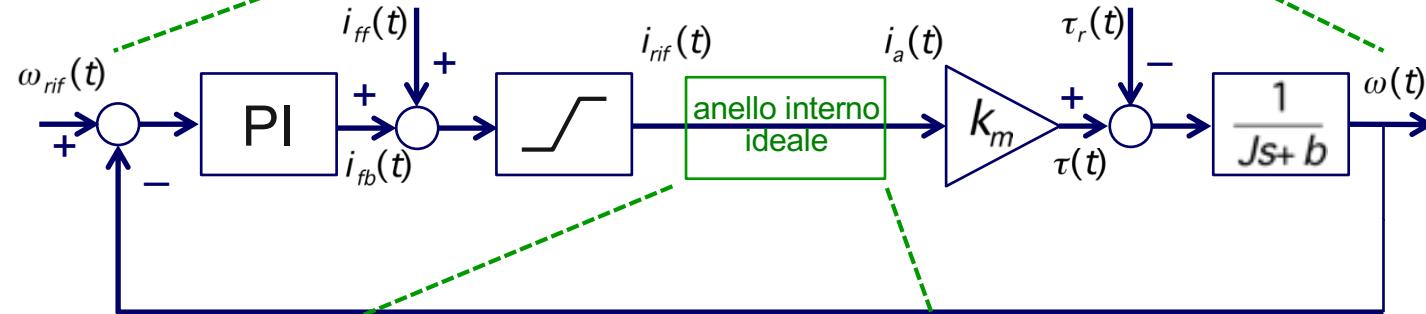
N.B. In seguito, si vedranno metodi empirici di 'auto-tuning'/sintonizzazione dei guadagni e possibili implementazioni digitali dei PID

# Progetto dei singoli anelli per un motore DC

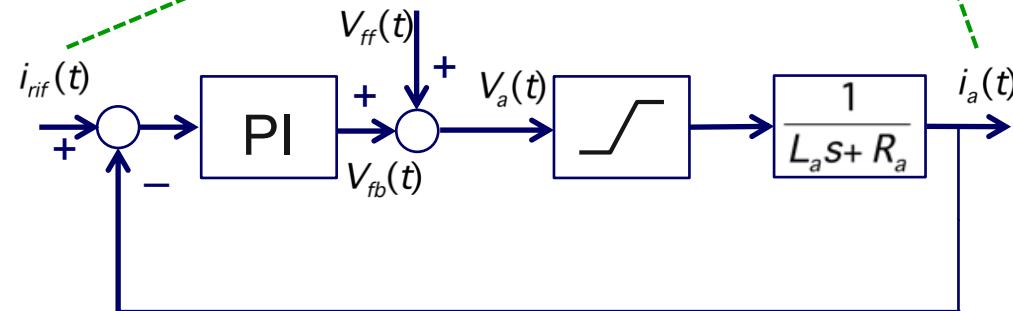
- nell'ipotesi di separazione dinamica, si procede a ritroso dall'anello più esterno:  
posizione  $\Rightarrow$  velocità  $\Rightarrow$  corrente



- $\Rightarrow$  regolatore **P** di posizione
- $\Rightarrow$  il processo è un integratore (sistema di tipo 1!)

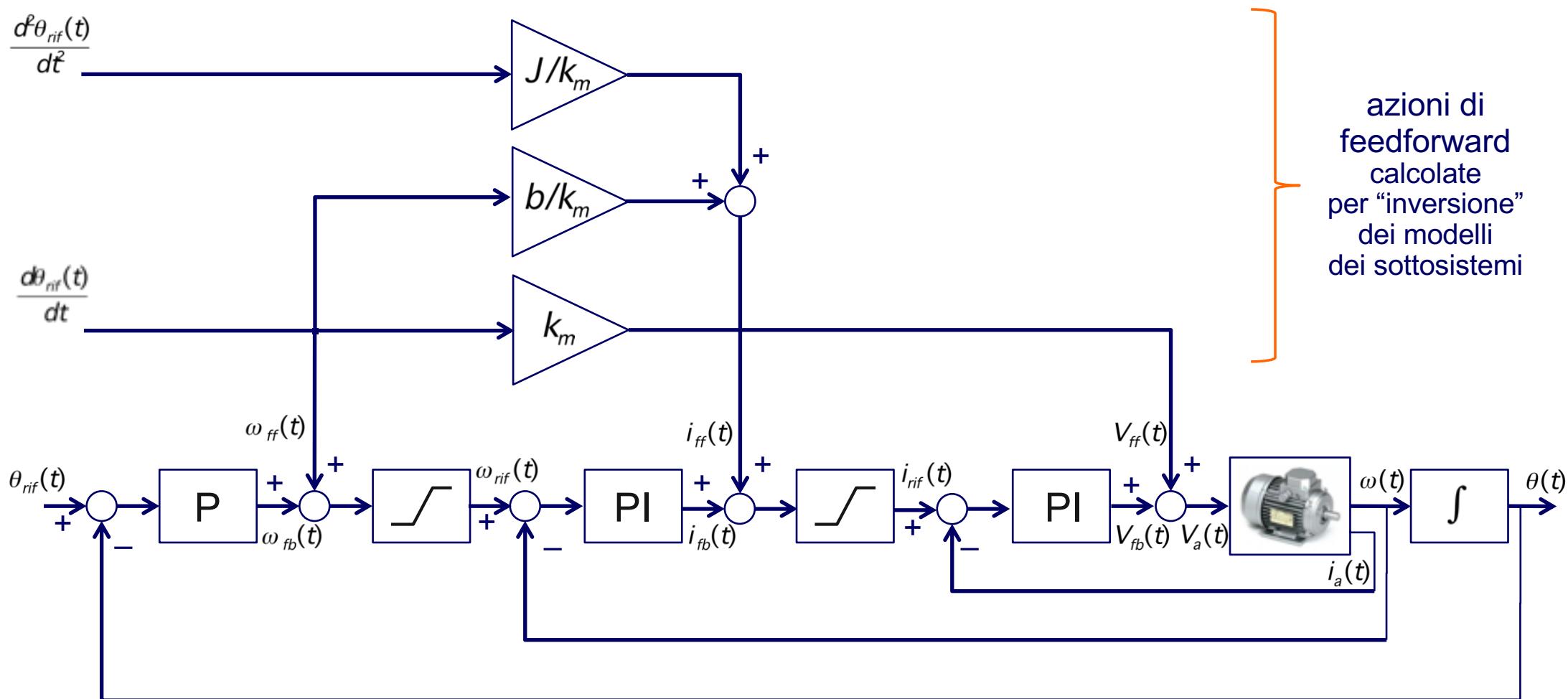


- $\Rightarrow$  regolatore **PI** di velocità
- $\Rightarrow$  azione integrale per reiezione del disturbo (di coppia)



- $\Rightarrow$  regolatore **PI** di corrente
- $\Rightarrow$  azione integrale per robustezza a incertezze dei parametri elettrici

# Schema di controllo finale di un motore DC

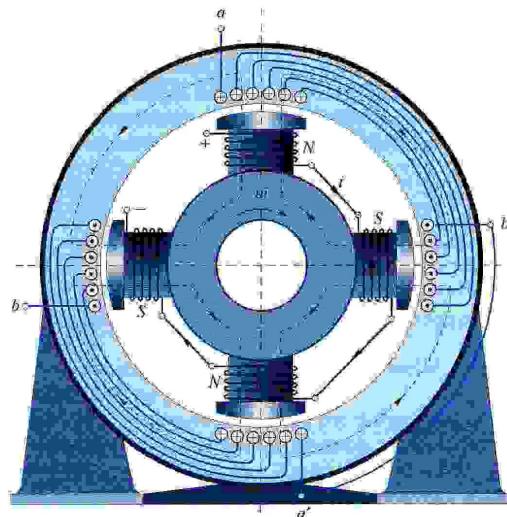


- **anelli di feedback:** PI su corrente; PI su velocità; P su posizione
- **compensazioni (feedforward):** per inseguimento di traiettoria e rimozione FCEM

# Altri azionamenti elettrici

- oltre al motore DC visto nel dettaglio, c'è un'enorme varietà di altri motori elettrici con le relative architetture di controllo
- un azionamento elettrico (motore elettrico + sistema di controllo) è caratterizzato da
  - ➔ potenza meccanica (la "taglia" deve soddisfare le richieste del task di movimentazione)
  - ➔ parametri elettro-meccanici
  - ➔ costo di realizzazione (HW del motore e dispositivi annessi)
  - ➔ costo del sistema di controllo (HW/SW, dettato dalle specifiche sulle prestazioni)
- qualche "rule of thumb"…
  - motore di semplice realizzazione  $\Leftrightarrow$  modello complesso  $\Leftrightarrow$  algoritmo controllo sofisticato
  - applicazioni di piccola taglia: motori complessi, ma con hardware di controllo semplice
  - applicazioni di media/grande taglia: motori di semplice realizzazione con controlli complessi
- aspetti rilevanti nella scelta di un azionamento elettrico per automazione industriale
  - ➔ prestazioni in regolazione e inseguimento (tracking), risposta dinamica nel transitorio
  - ➔ capacità di erogare extra coppia e/o velocità oltre i valori nominali
  - ➔ taglia (potenza e/o coppia massima erogabile), costo e diffusione
  - ➔ *inoltre*: allocazione fisica, raffreddamento, influenza su meccanica del sistema restante

# Altri motori per azionamenti elettrici

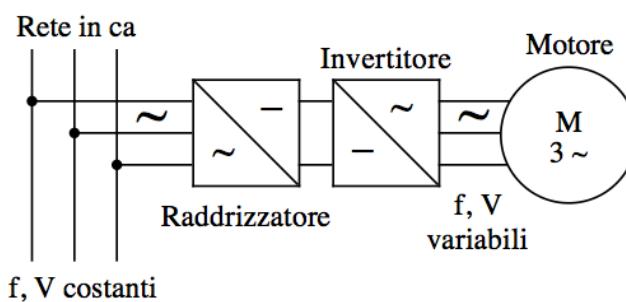
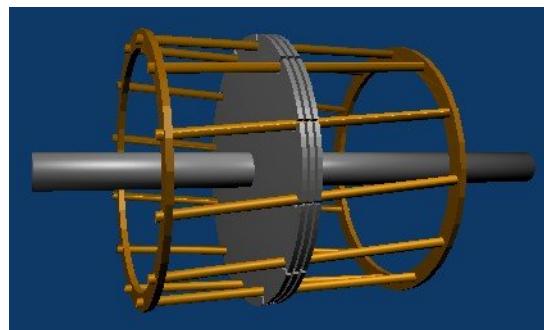
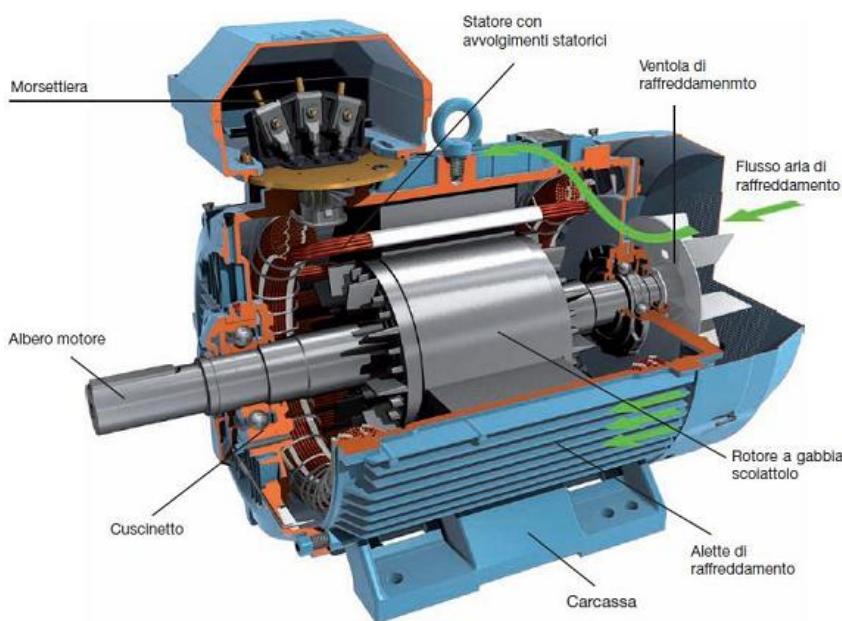


animazione

## motore sincrono

- *brushless*, alimentato in corrente alternata (AC)
- statore con avvolgimenti organizzati in (3-6) fasi
- rotore a magnete permanente
- logica di switching per alimentare ciclicamente le fasi in modo da generare un campo magnetico ortogonale a quello del rotore
- i due campi rimangono sempre sincroni e sfasati per generare coppia
- problemi di ondulazione della coppia (*cogging*) a velocità ridotta
- velocità di rotazione resta costante e proporzionale alla frequenza di alimentazione (da cui il nome “sincrono”) in tutto il campo di coppie ammissibili
- problemi nell'avviamento da fermo
- due realizzazioni
  - a campo trapezoidale
  - a campo sinusoidale (controllo più complesso)

# Altri motori per azionamenti elettrici



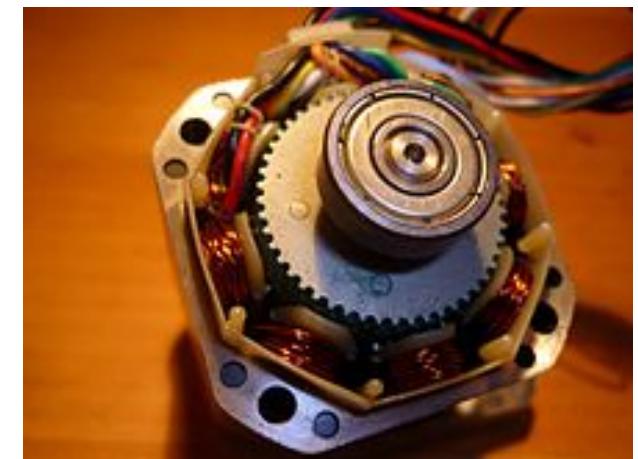
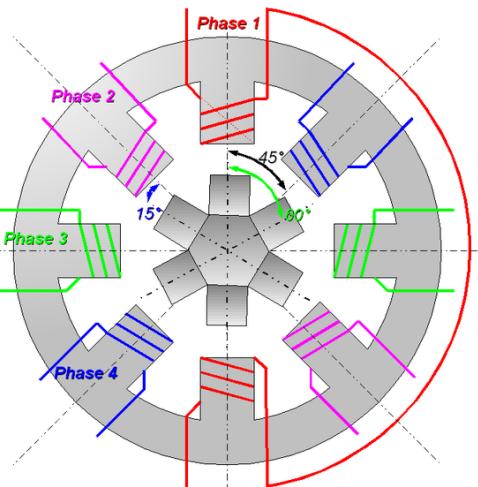
## motore asincrono (a induzione)

- alimentato in corrente alternata (AC)
- sistema *trifase*
  - statore con tre avvolgimenti uguali (*fasi*) disposti a  $120^\circ$  sui quali circolano correnti sinusoidali a pulsazione  $\omega$  e sfasate di  $120^\circ$
  - si genera un campo magnetico di ampiezza costante e rotante alla stessa pulsazione  $\omega$
  - sul rotore (*a gabbia di scoiattolo*), con tre fasi analoghe e cortocircuitate, si “inducono” correnti che lo mettono in rotazione (da cui il nome)
- il rotore insegue il campo magnetico rotante, ma sempre con uno scorrimento relativo (*slip*)
- due schemi di comando/controllo
  - commutatore elettronico (*inverter*) comanda ad anello aperto la tensione  $V$  e la frequenza  $f$  per modulare la velocità
  - controllo vettoriale (*a orientamento di campo*) ad anello chiuso per disaccoppiare la regolazione del flusso di induzione e della coppia

# Altri motori per azionamenti elettrici

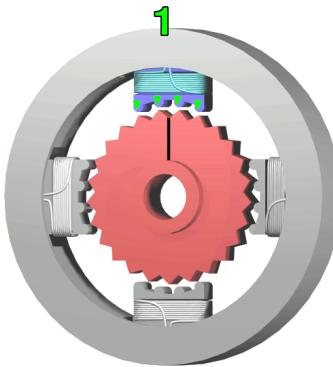
## motore passo-passo (stepper motor)

- statore con  $F_s$  avvolgimenti eccitabili in sequenza in modo separato (*fasi unipolari*,  $F_s = 5, 6$  o  $8$ ) o a coppie (*fasi bipolari*,  $F_s = 4$  o  $8$ ) con circuito di switching
- rotore ferromagnetico con  $E_r$  espansioni polari, spesso  $E_r = 50$
- principio di *minima riluttanza magnetica*
  - quando la corrente circola in una delle fasi dello statore, il rotore si dispone in modo da minimizzare la riluttanza (massimizzare il flusso)
  - ad ogni commutazione dell'elettronica di pilotaggio, il motore ruota di un angolo  $\alpha$  (passo) che dipende dal numero di fasi dello statore (diviso 2 se bipolari) e di espansioni del rotore
- comandato **ad anello aperto** (non serve un sensore di posizione angolare)
- per controllo di posizione (se alimentato ma senza switch di fase, mantiene la posizione)

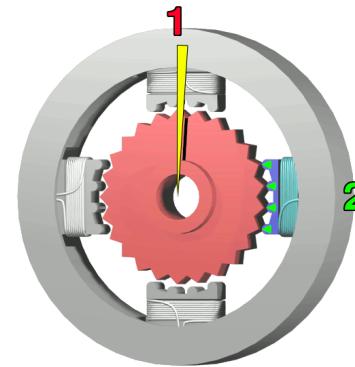


$$F_s = 8 \text{ (bipolare)}, E_r = 6 \Leftrightarrow \alpha = 360^\circ/[E_r \cdot (F_s/2)] = 360^\circ/[6 \cdot (8/2)] = 15^\circ$$

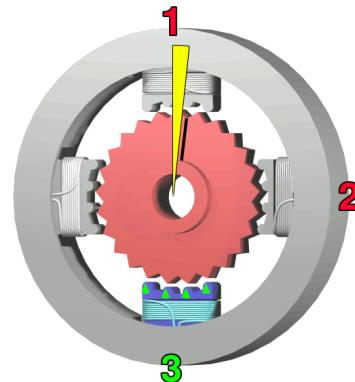
# Stepper motor in azione



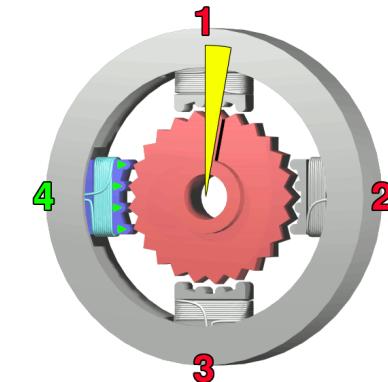
elettromagnete 1 eccitato  
attrae l'espansione  
più vicina del rotore,  
allineandola in fase 1



elettromagnete 1 spento  
con il 2 eccitato che attrae  
l'espansione più vicina  
con una rotazione oraria di  $\alpha$   
fino all'allineamento in fase 2

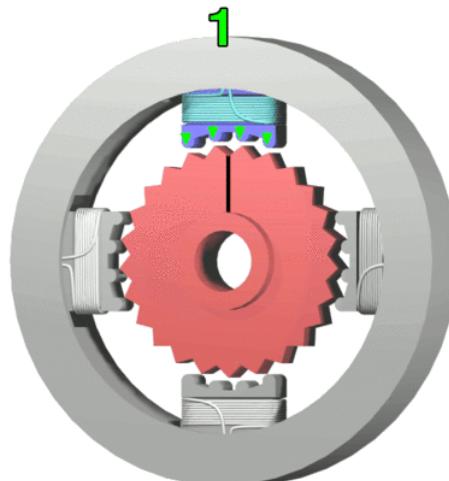


elettromagnete 2 spento  
con il 3 eccitato e simile  
rotazione oraria di  $\alpha$   
fino all'allineamento in fase 3



elettromagnete 3 spento  
con il 4 eccitato e simile  
rotazione oraria di  $\alpha$   
fino all'allineamento in fase 4

ciclando, si ha ancora una  
rotazione oraria di  $\alpha$



animazione di uno **stepper motor**  
con  $F_s = 4$  (unipolare),  $E_r = 25$

$\alpha = 360^\circ / (E_r \cdot F_s) = 360^\circ / 100 = 3.6^\circ$   
(100 passi per una rotazione intera)



video  
(+ audio!)

## Prestazioni di un motore passo-passo e di un motore DC di taglia analoga

- a bassa, media e alta velocità  $v$
- se si comanda  $v > 105\% v_{max}$ , lo stepper motor "perde il passo" e si blocca ...
- il motore DC mantiene un buon comportamento anche per  $v = 120\% v_{max}$

# Confronto tra tipi di azionamenti elettrici

TIPO	Regolazione	Tracking	Risposta dinamica	Extra coppia	Extra velocità	Taglia	Diffusione	Costo
<b>DC</b> a magneti permanenti	ottima	ottimo	eccellente	≤ 6-8 volte con motori speciali	no	fino a 3-4 MW, se collettore con circuito di eccitazione	ampia, in calo	contenuto per basse potenze
<b>sincrono brushless</b> a campo trapezoidale	ottima, buona ad alta velocità	buono	buona	≤ 2-4 volte	no (solo con soluzioni particolari)	≤ 5 KW	ampia, in calo	contenuto
<b>sincrono brushless</b> a campo sinusoidale	ottima, cogging a bassissima velocità	eccellente	massima	≤ 4-6 volte	no (solo con soluzioni particolari)	≤ 10 KW	standard industriale	elevato, in calo
<b>asincrono</b> (a induzione) con inverter	scadente (comando ad anello aperto in V/f)	scadente	discreta	≤ 2-4 volte	si, con deflussaggio	0.5 ÷ 1 KW	molto ampia, standard industriale	minimo (per KW)
<b>asincrono</b> (a induzione) vettoriale	eccellente	eccellente	eccellente (poco meno del sincrono)	≤ 4-6 volte	si, con deflussaggio	≤ 500 KW	modesta, in grande crescita	elevato, in calo
<b>passo-passo</b> (stepper) a riluttanza variabile	buona	buono	discreta	no	no, problemi alle alte velocità	≤ 5 KW	ampia per piccole potenze	contenuto

# Sincronizzazione dei moti

- se abbiamo più assi (arbitrariamente complessi) da muovere in modo coordinato, utilizziamo un solo attuatore o più attuatori?

video



video



Automi della Maison Roullet-Decamps, costruiti nel XIX-XX secolo

Musée de l'Automate, Souillac sur Dordogne, France

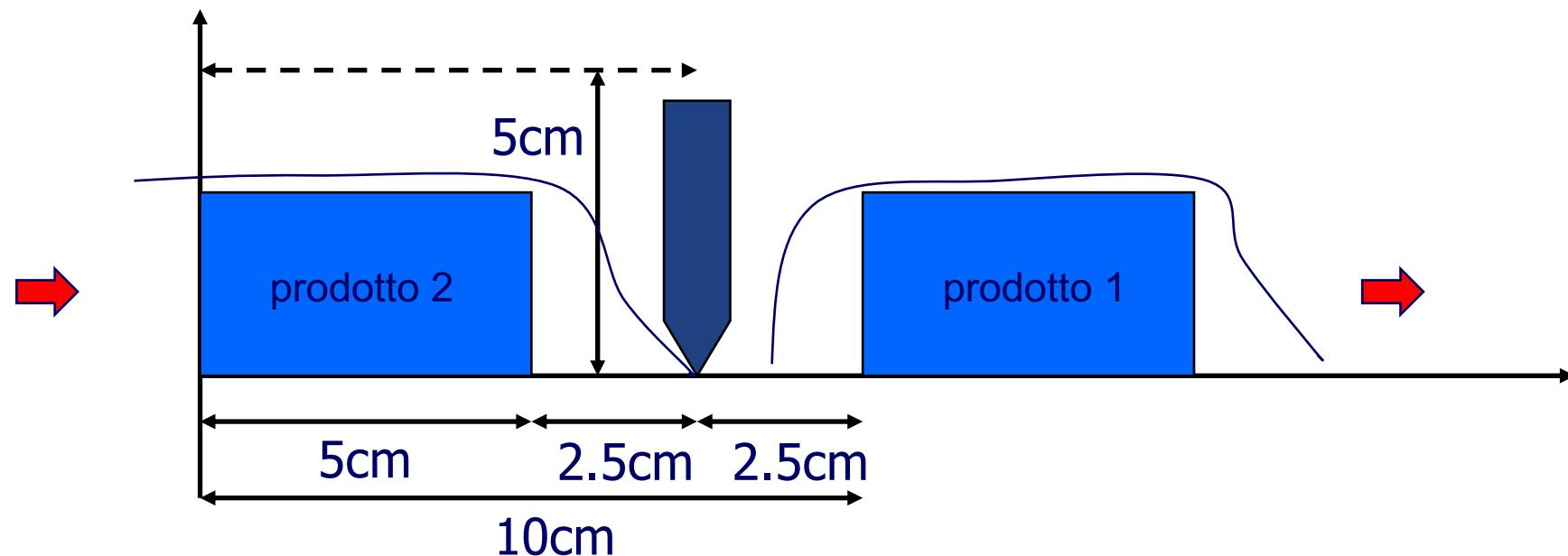
<http://www.musee-automate.fr>

(ognuno ha un solo motore)

# Sincronizzazione dei moti

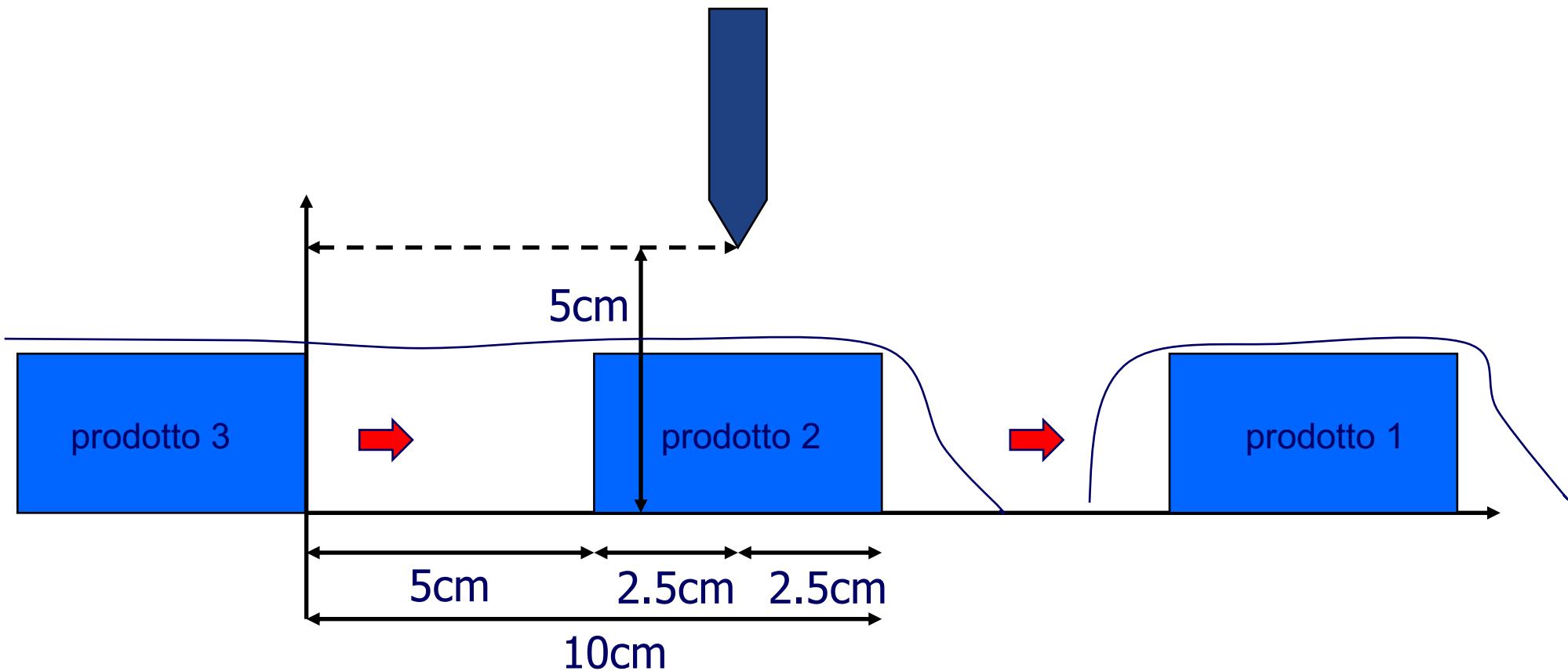
- se abbiamo più assi da muovere in modo coordinato, utilizziamo un solo attuatore o più attuatori?

problema di movimentazione sincronizzata:  
taglierina di pellicola per avvolgere prodotti su nastro trasportatore



# Sincronizzazione dei moti

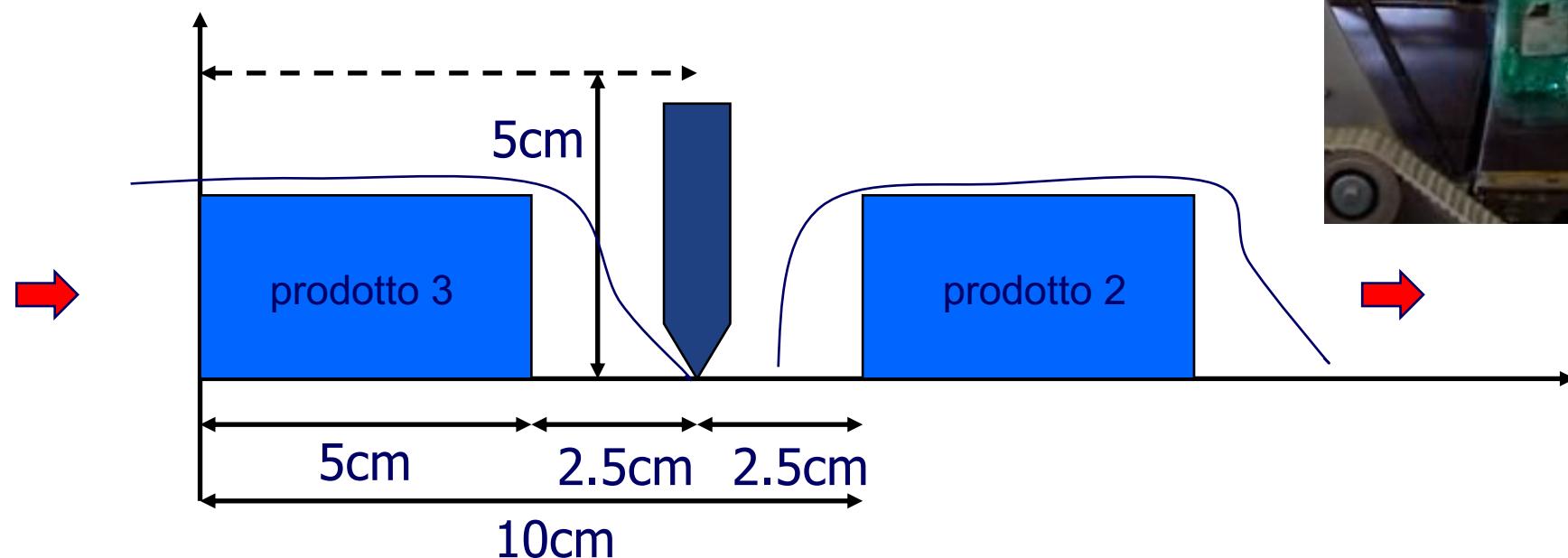
problema di movimentazione sincronizzata:  
taglierina di pellicola per avvolgere prodotti su nastro trasportatore



# Sincronizzazione dei moti

problema di movimentazione sincronizzata:  
taglierina di pellicola per avvolgere prodotti su nastro trasportatore

esempio di prodotto:  
pacco di 6 bottiglie  
di acqua minerale  
“imballate” in plastica

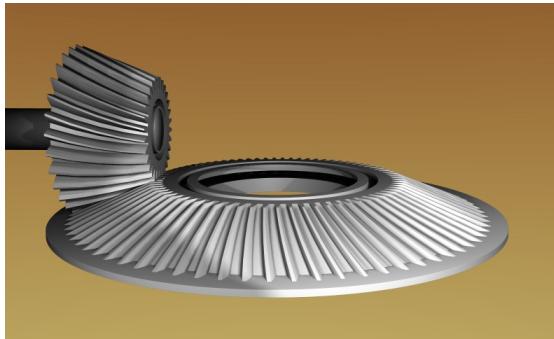


Coordinamento della movimentazione delle parti meccaniche in un sistema meccatronico

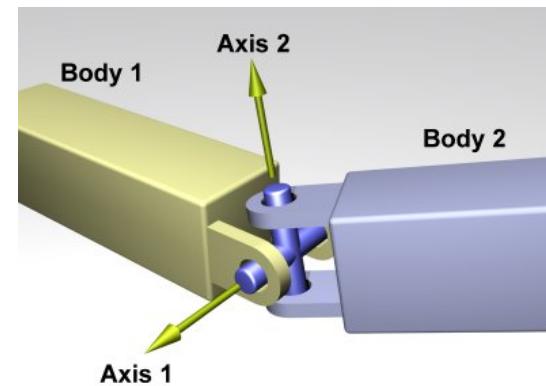
- ❑ meccanica
- ❑ elettronica
- ❑ automatica

Inizialmente il controllo e la distribuzione del moto era demandato a una serie di dispositivi meccanici (**catene cinematiche**) azionati da un'unica sorgente di moto (motore elettrico a velocità costante)

- ❑ **soluzione robusta e affidabile, ma estremamente rigida**
  - ➔ cambio formato = cambio parti meccaniche
- ❑ macchine automatiche **mono-attuatore**



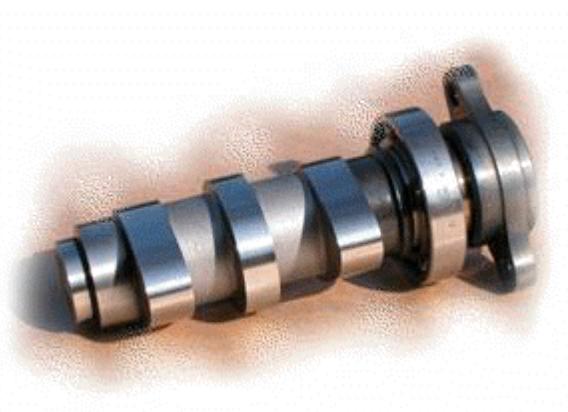
ruotismi



giunti



manovellismi



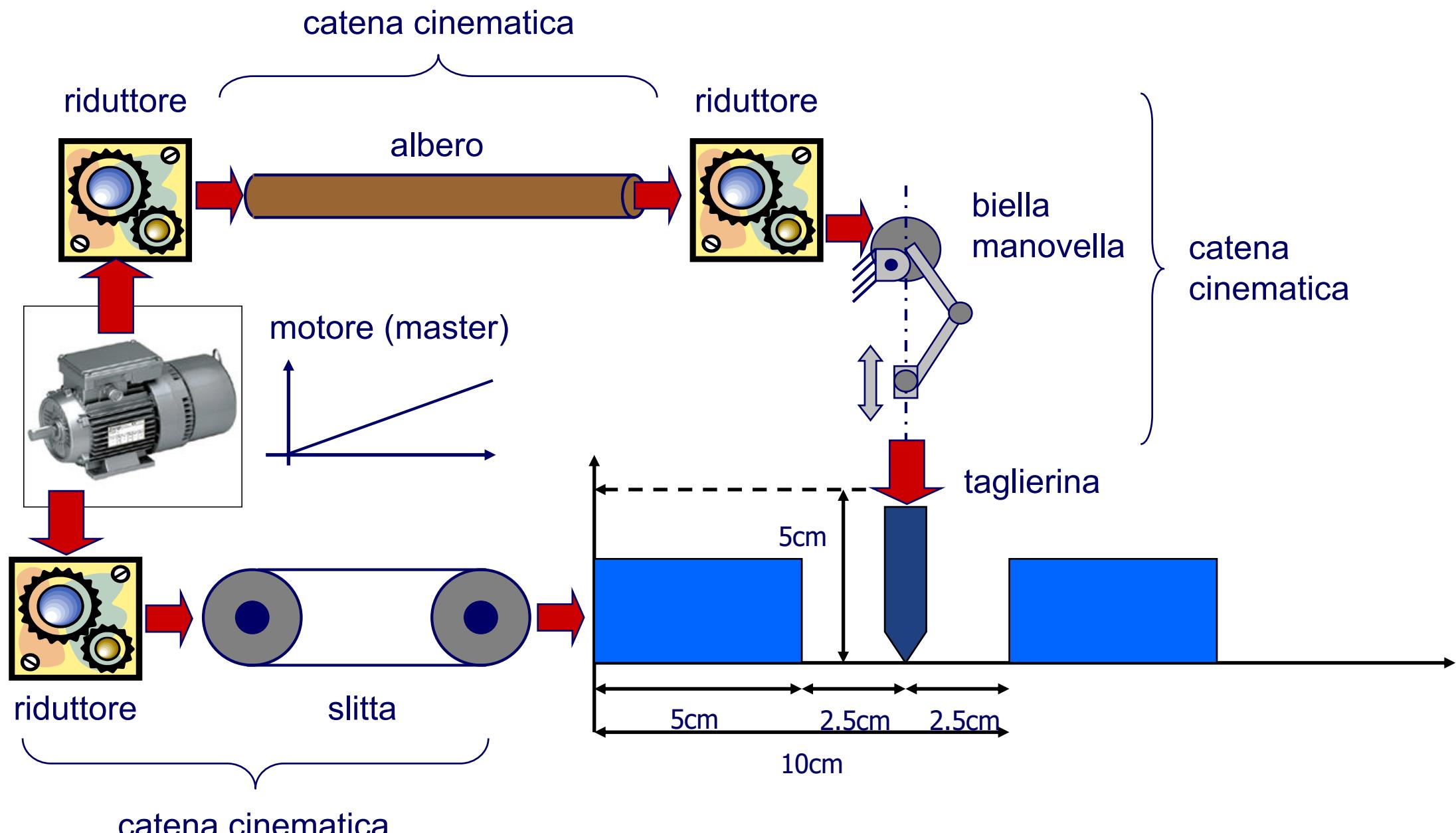
camme



cinghie/pulegge



cremagliere

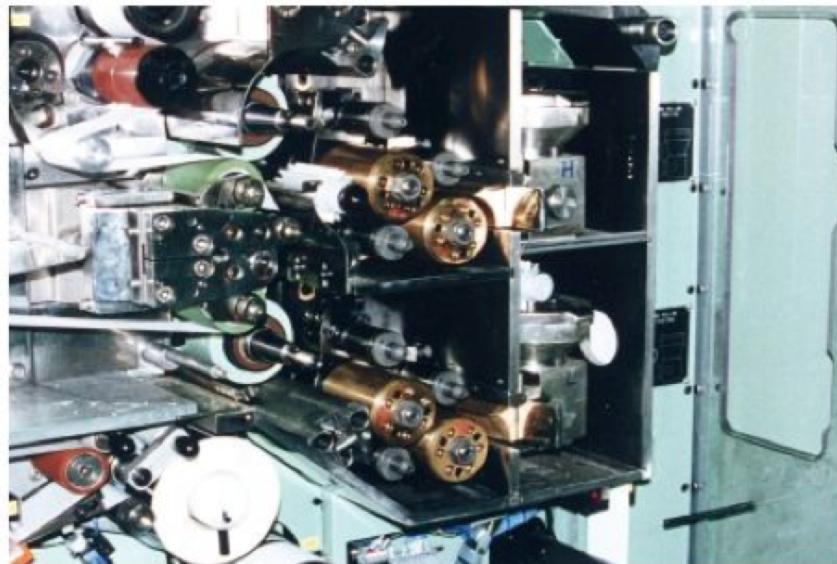


# Sincronizzazione dei moti

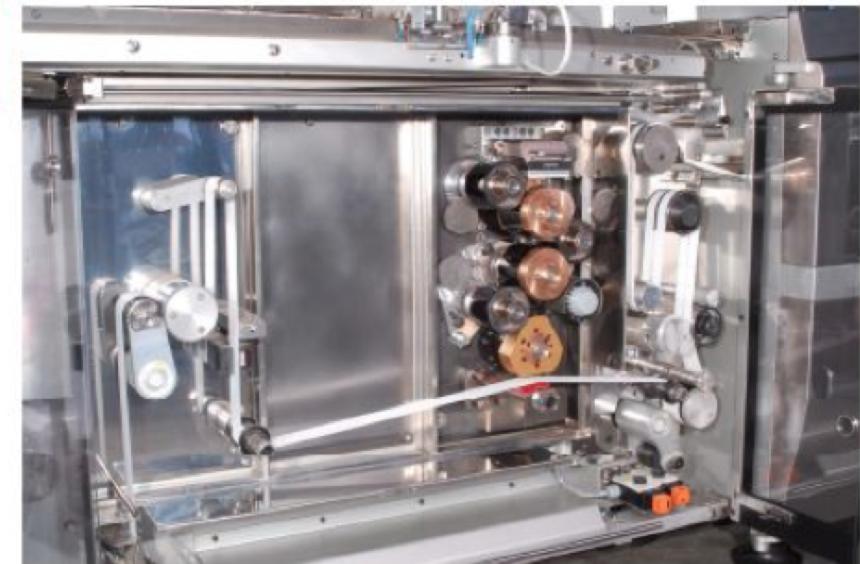
Dalla metà degli anni 1980 si è adottata una nuova soluzione basata sul controllo elettronico del moto mediante retroazione

asservire assi elettrici a riferimenti di posizione impostati via software

- asse principale (master) a cui sono sincronizzati **più** assi secondari (slave) secondo profili di moto gestiti completamente via software
- sincronizzazione basata sul concetto di “camma elettronica”
- macchine automatiche **pluri**-attuatore (integrate)

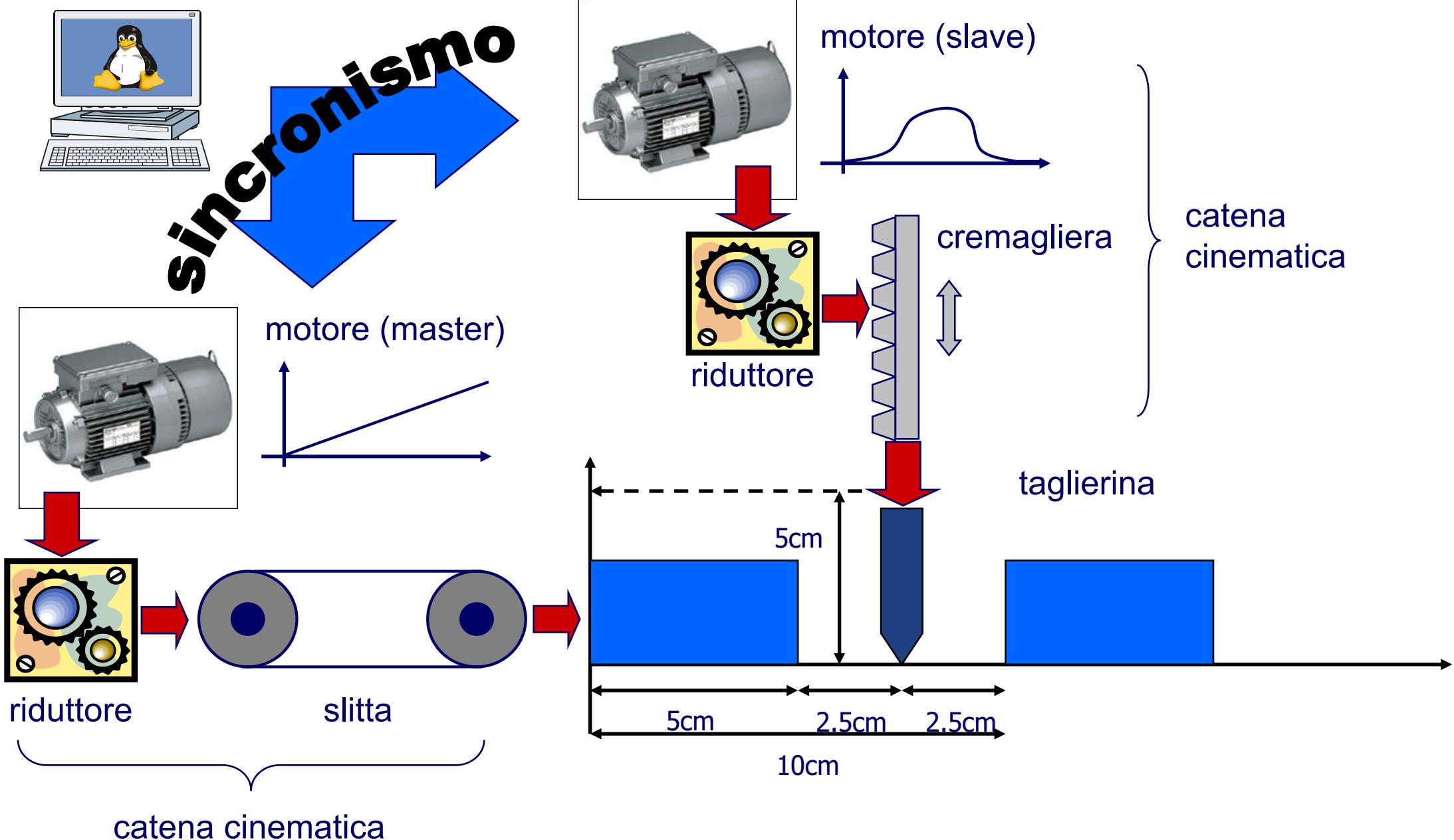


ieri



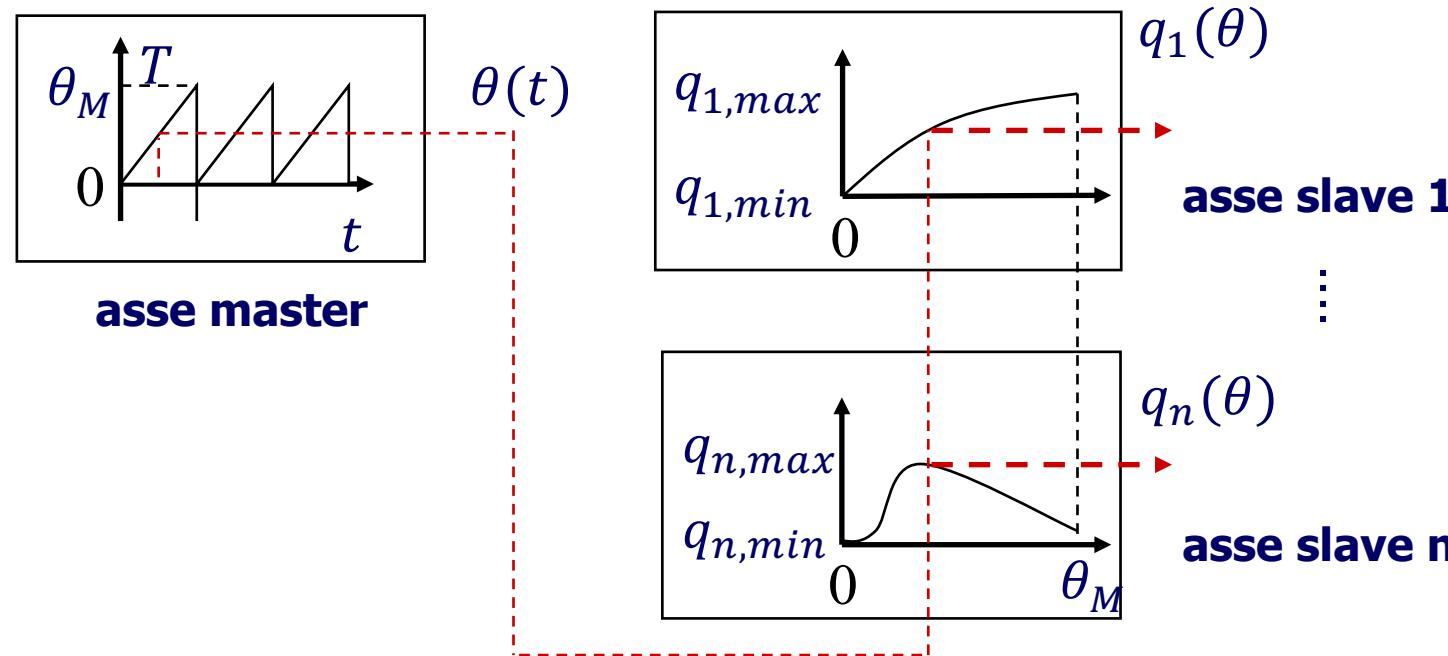
oggi

# Sincronizzazione dei moti



## □ sincronizzazione master-slave

- asse motore master tipicamente a velocità costante
- profili di moto degli assi dei motori slave **parametrizzati** sul profilo di moto master
- problema di inseguimento della traiettoria per un motore elettrico



- leggi orarie  $\theta = \theta(t)$  (rispetto al tempo, per il **master**)
- leggi parametriche  $q = f(\theta)$  (rispetto al parametro, per gli **slave**)
- trattazione **comune**

- leggi polinomiali:  $q = f(\theta) = a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + \cdots + a_n\theta^n$
- doppia normalizzazione

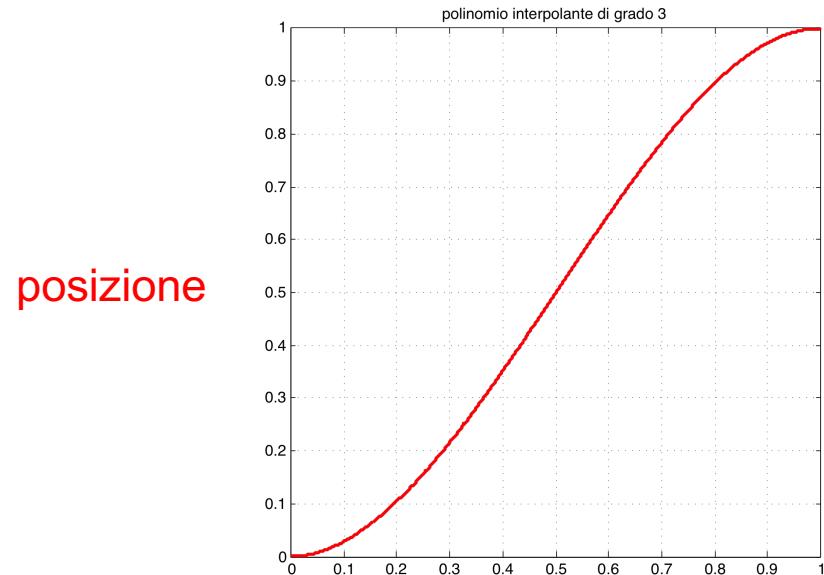
$$\theta \in [\theta_i, \theta_f] \Rightarrow \theta_N = \frac{\theta - \theta_i}{\theta_f - \theta_i} \in [0,1] \quad q \in [q_i, q_f] \Rightarrow q_N = q_i + (q_f - q_i) f_N(\theta_N)$$
$$\Rightarrow f_N(0) = 0, f_N(1) = 1$$

- condizioni (sulle derivate) al contorno (valori iniziale e finale)
  - casi notevoli: cubica, quintica (con derivate al contorno nulle), ...
- leggi trapezoidali: combinazione di tratti a derivata costante
  - casi notevoli: trapezio in “velocità”, in “accelerazione” (a doppia esse)
- splines (polinomi cubici a tratti) per interpolazione di n punti
- analisi “spettrale” in frequenza (continuità  $\Leftrightarrow$  vibrazioni)

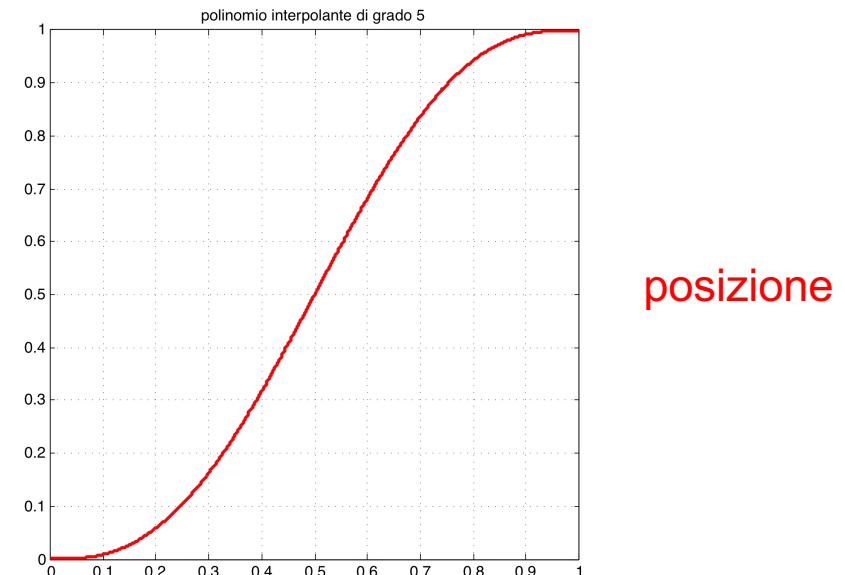
# Profili di moto

- profili binormalizzati di una cubica e una quintica (con derivate nulle al contorno)

$$f_N(\theta_N) = 3\theta_N^2 - 2\theta_N^3$$

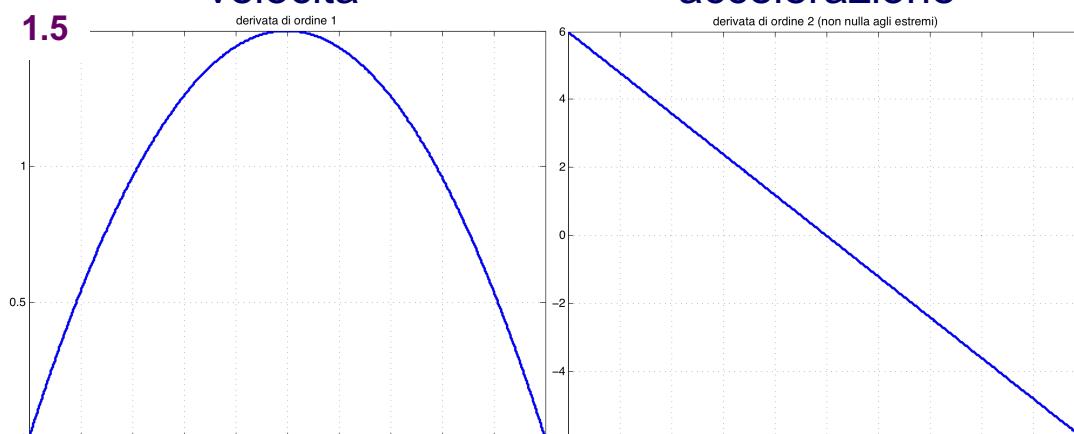


$$f_N(\theta_N) = 10\theta_N^3 - 15\theta_N^4 + 6\theta_N^5$$

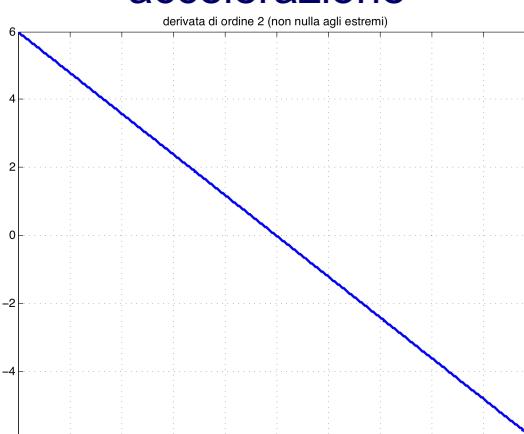


se le derivate fossero  
rispetto al tempo...

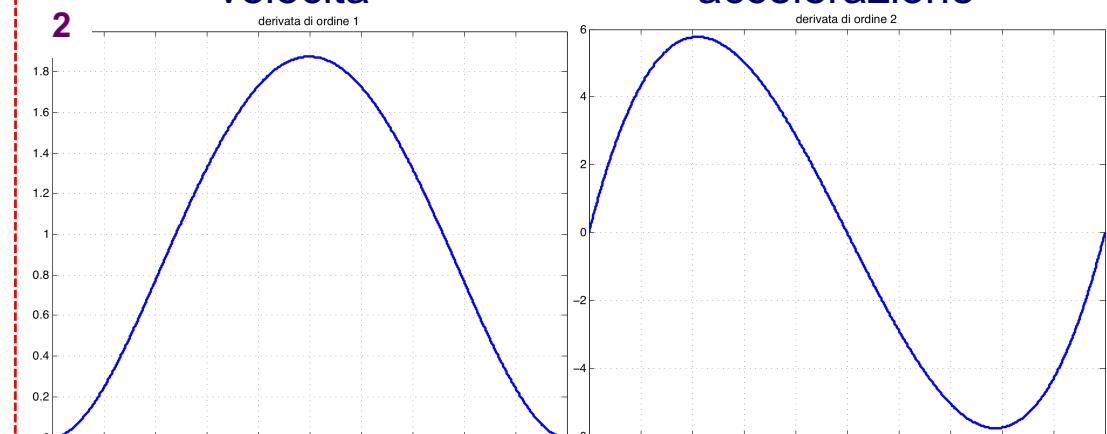
“velocità”



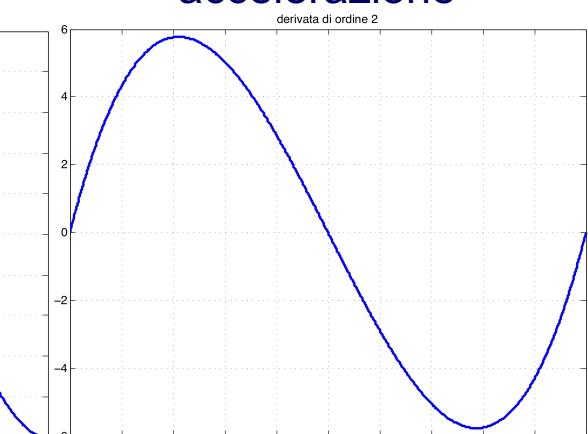
“accelerazione”



“velocità”

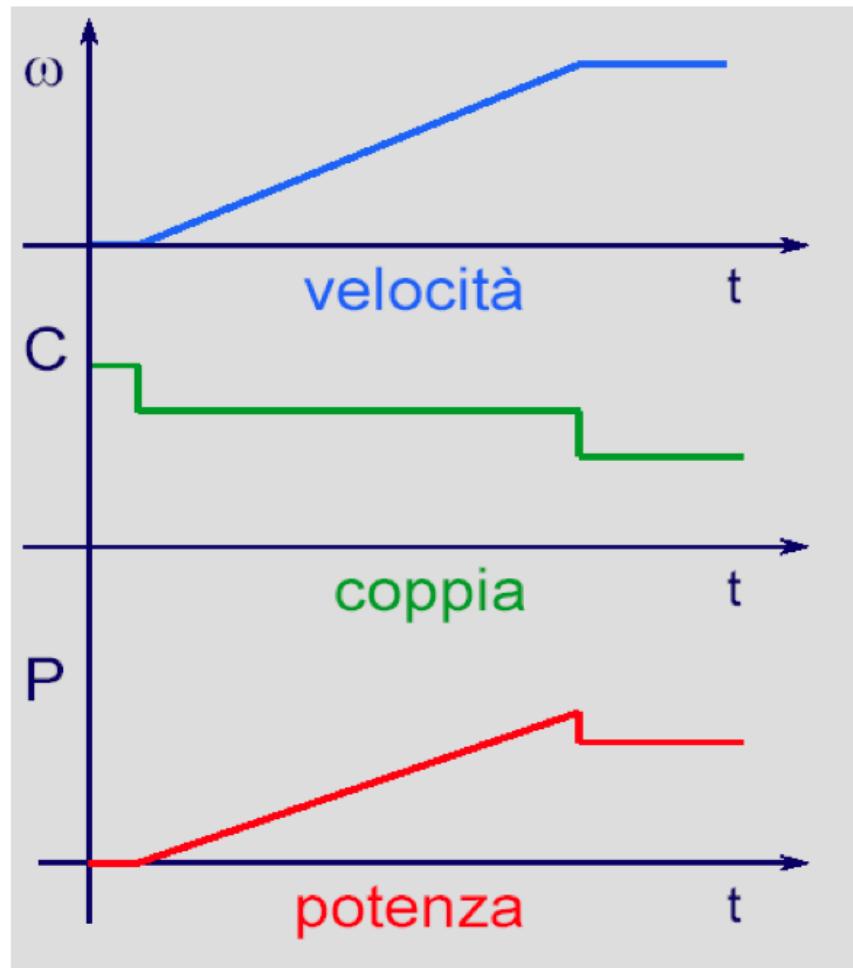


“accelerazione”

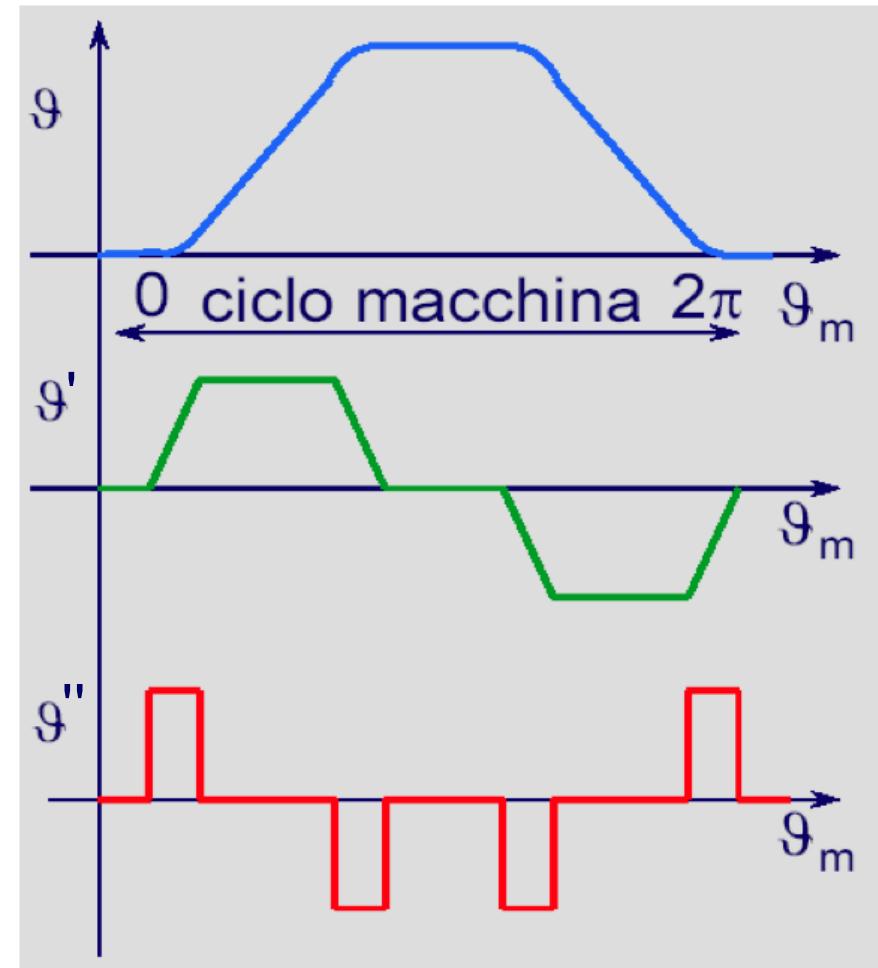


# Profili per moti uniformi o ciclici

- moto **uniforme**, ad es. rampa di velocità da fermo  $\Rightarrow$  a velocità costante di regime
- moto **ciclico**, ad es. profilo “a doppia esse” (ritorna alla posizione iniziale)



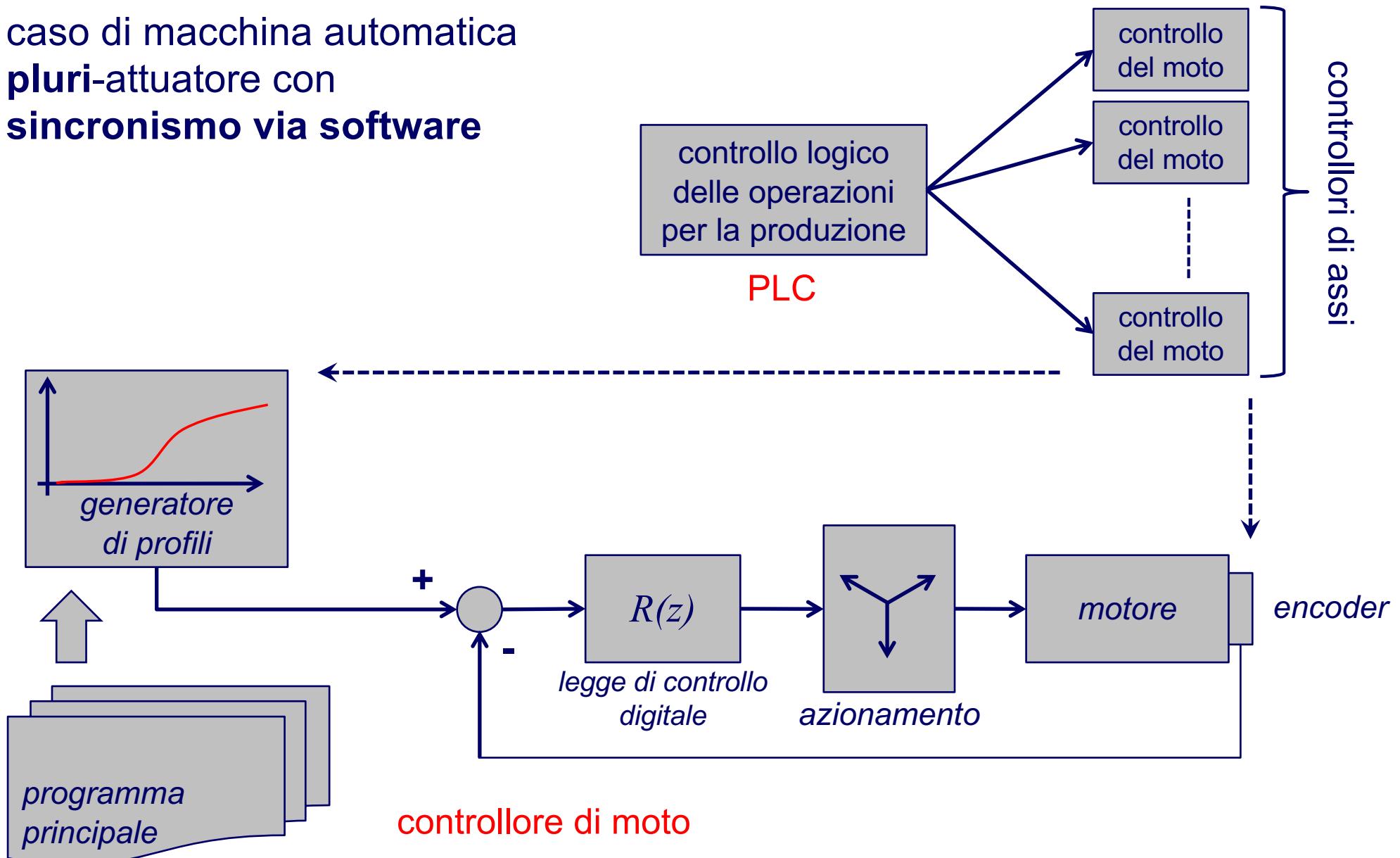
legge oraria (**nel tempo**)



legge parametrica (**nello spazio**)

# Controllo assi di una macchina automatica

- caso di macchina automatica pluri-attuatore con sincronismo via software



# Azionamenti e controllori del moto

Principali produttori (in ordine alfabetico)

- [www.beckhoff.com](http://www.beckhoff.com)



- [www.br-automation.com](http://www.br-automation.com) (ABB)



- [www.controltechniques.com](http://www.controltechniques.com) (Nidec)



- [www.rockwellautomation.com](http://www.rockwellautomation.com) (Allen Bradley)



- [www.schneider-electric.com](http://www.schneider-electric.com)



- [www.automation.siemens.com](http://www.automation.siemens.com)



## Sezioni 5.1-5.5.1



### TITOLO

**Sistemi di automazione industriale  
Architetture e controllo**

### AUTORI

Claudio Bonivento  
Luca Gentili  
Andrea Paoli

### EDITORE

McGraw-Hill