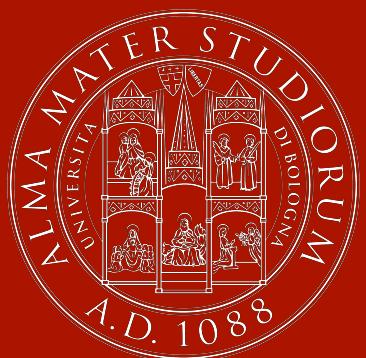




SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



Introduzione al controllo del moto

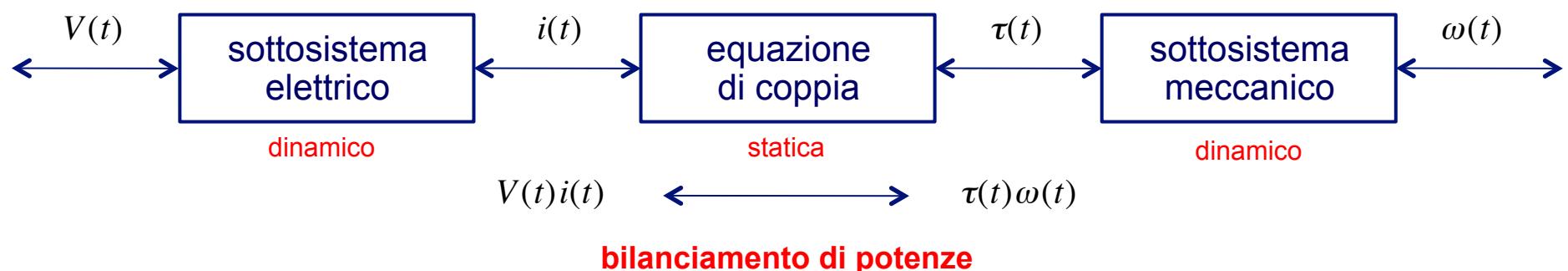
Automazione

3/11/2015

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** (vedi slides: "Automazione_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

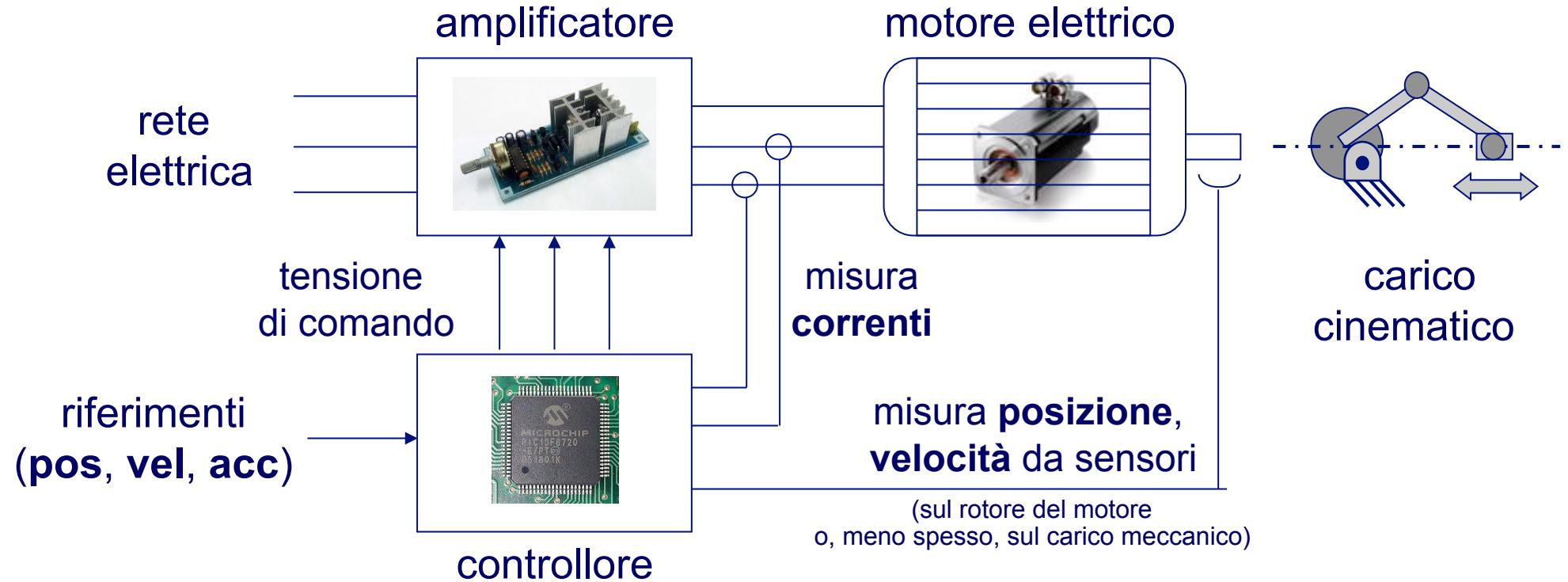
- conversione controllata di energia elettrica in meccanica
- trasduttori “di potenza”
 - ➔ imposizione del moto ad un carico meccanico

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

Azionamenti elettrici

- attua la tensione richiesta dal comando proveniente dal controllo



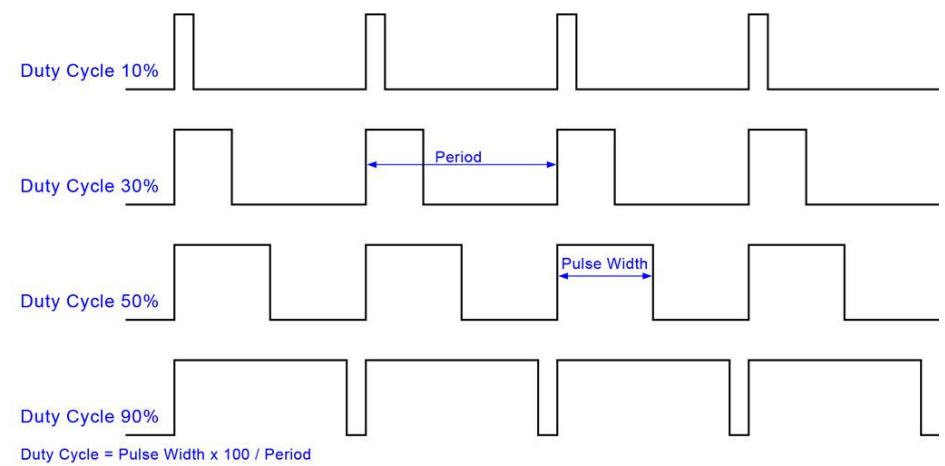
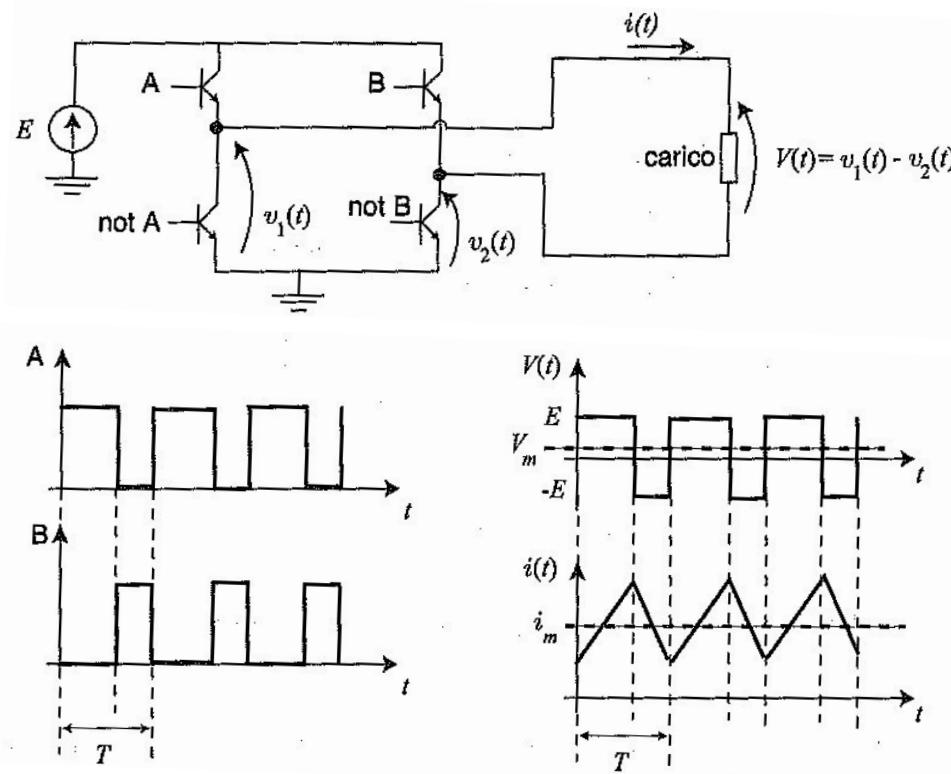
(sul rotore del motore
o, meno spesso, sul carico meccanico)

- 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

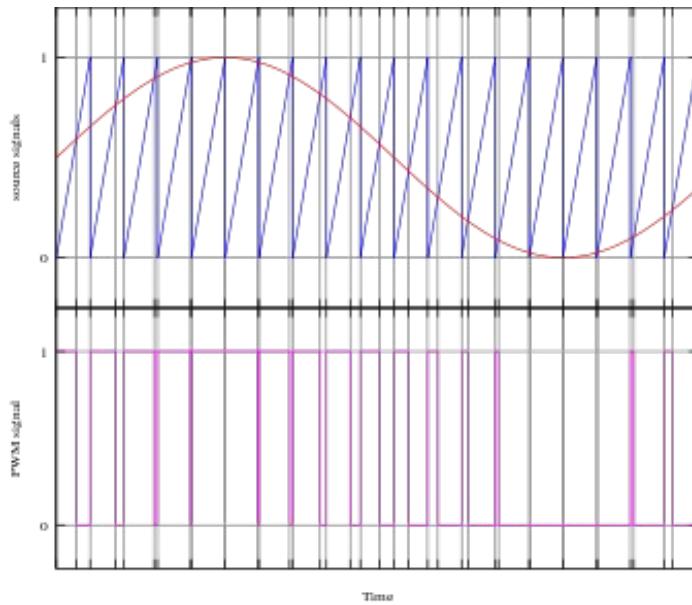
- dalla tensione costante E si generano, mediante 4 interruttori on/off, due onde quadre in contro-fase (A e B, e i loro negati) di durata variabile (e complementare) nel periodo T
- grazie alla “modulazione” degli interruttori, si fornisce al motore una tensione media V_m pari a una frazione desiderata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



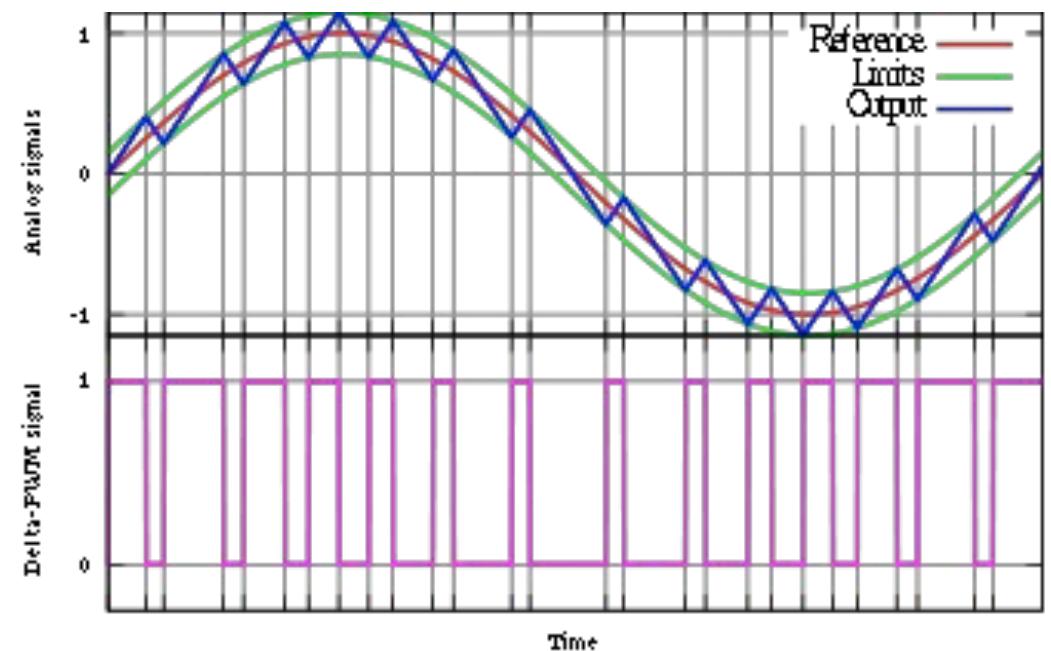
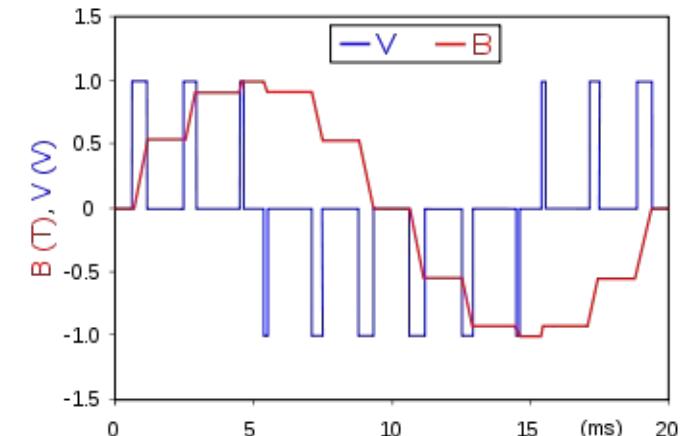
- bassa potenza dissipata dagli switch negli stati ON e OFF (solo durante un transitorio di 100ns c'è sia tensione che corrente)
- elevata frequenza $f=1/T$ (ad es., 50 KHz) rispetto alle variazioni desiderate di V_m

- 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



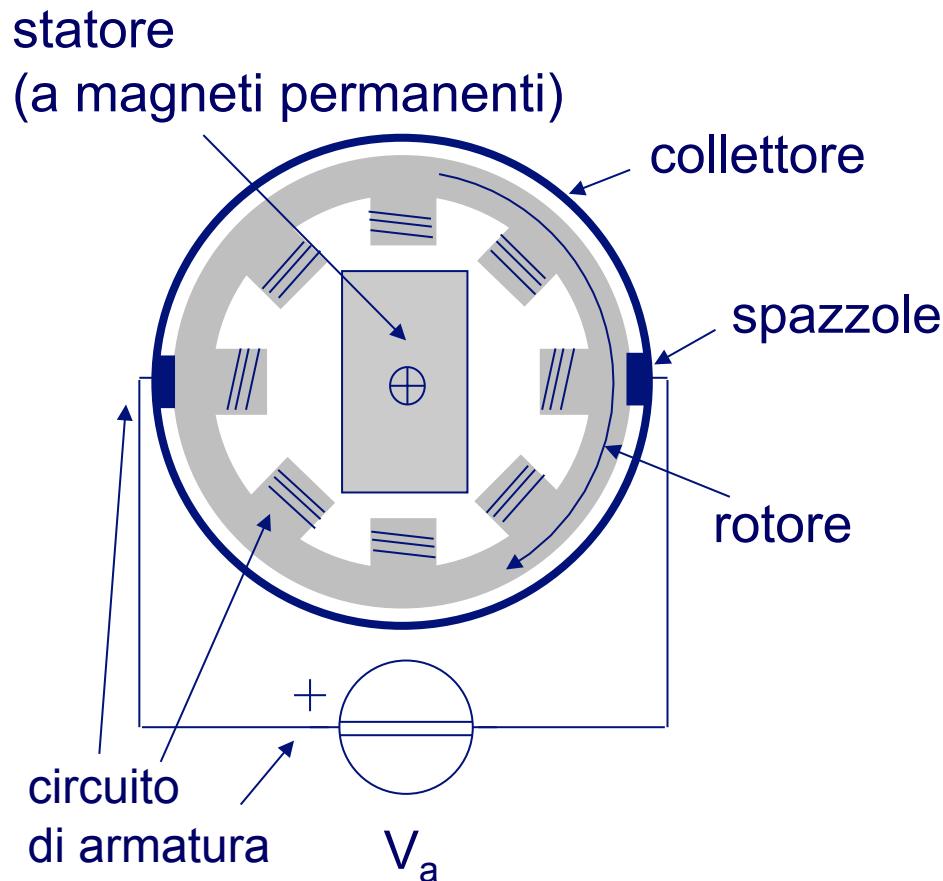
metodo dell'intersezione: si genera un onda **quadra** PWM corrispondente ad un dato segnale (la sinusoide in **rosso**), confrontando il segnale con una onda, ad es. a dente di sega (ON quando è più alto, OFF else)



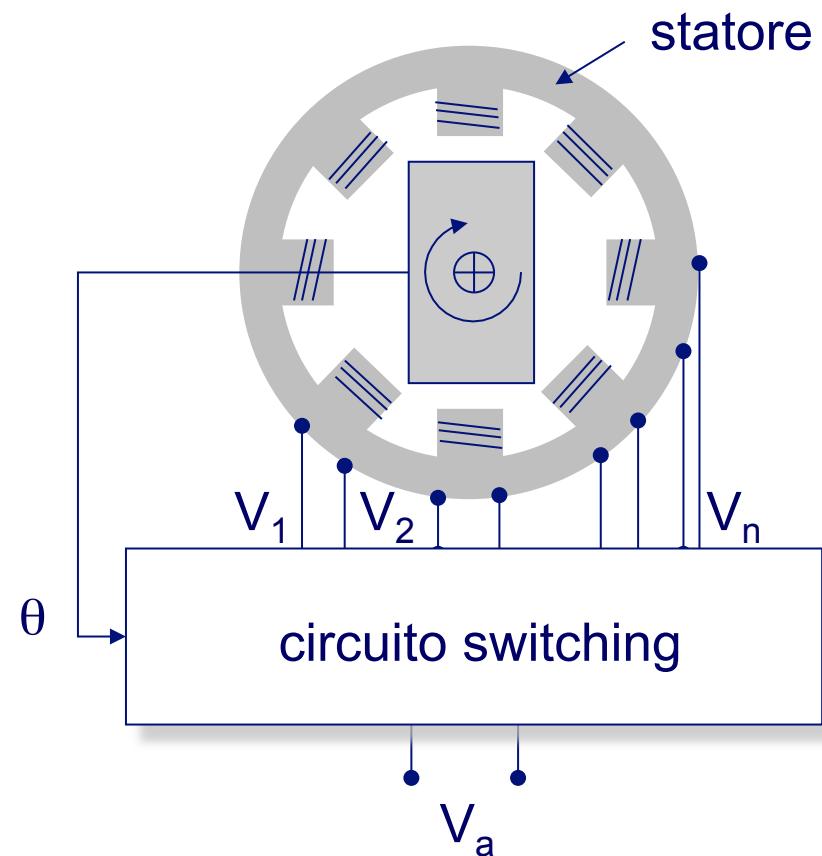
metodo delta: il segnale (la sinusoide in **rosso**) è **integritato** e confrontato ai valori **limite** (segnalet \pm offset); l'**uscita PWM** commuta ON/OFF ogni volta che si raggiunge un limite (invertendo anche l'integrazione)

Statoe e rotore

Nei motori elettrici, due schemi realizzativi di principio



motore con spazzole
alimentato in corrente continua

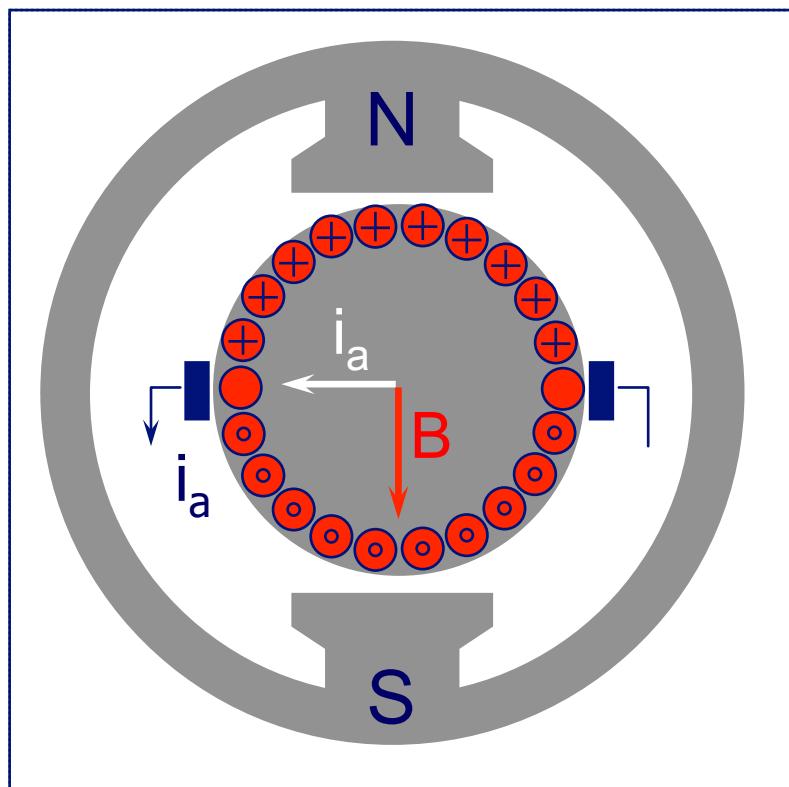


motore sincrono "brushless"
pilotato con elettronica switching

Caratteristiche generali

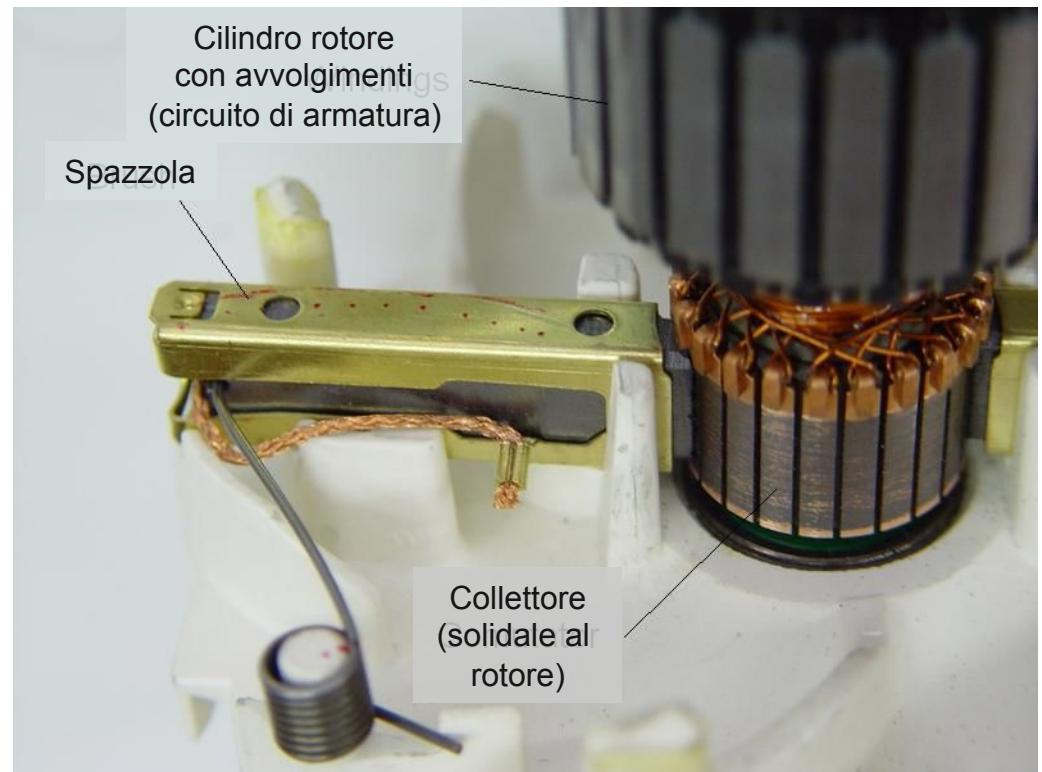
- circuito di rotore a collettore
- alimentabile in corrente continua (Direct Current = DC)
- diverse configurazioni: qui a magneti permanenti
- largo utilizzo, anche se in progressivo calo
- costruzione complessa, ma modello matematico semplice
 - ➔ altri motori, più semplici dal punto di vista costruttivo 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:

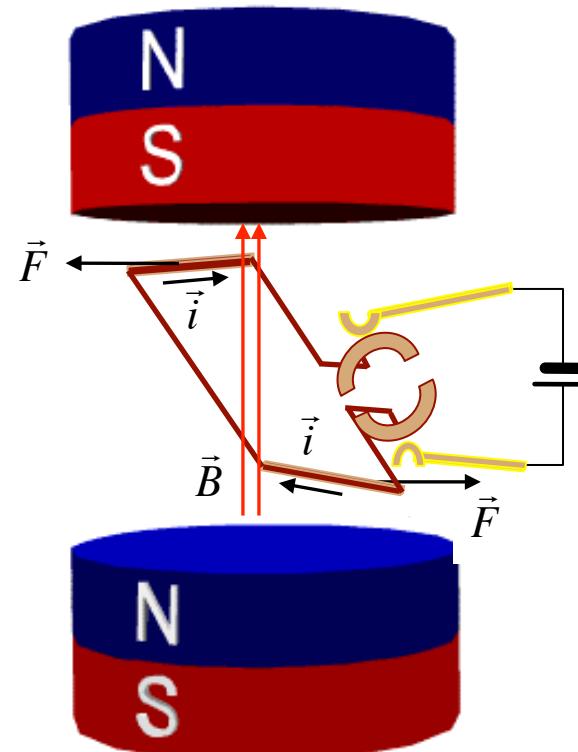
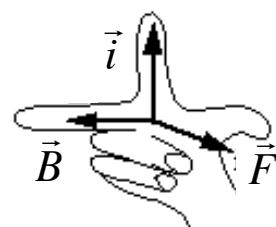
entrante uscente
+ -
dal foglio



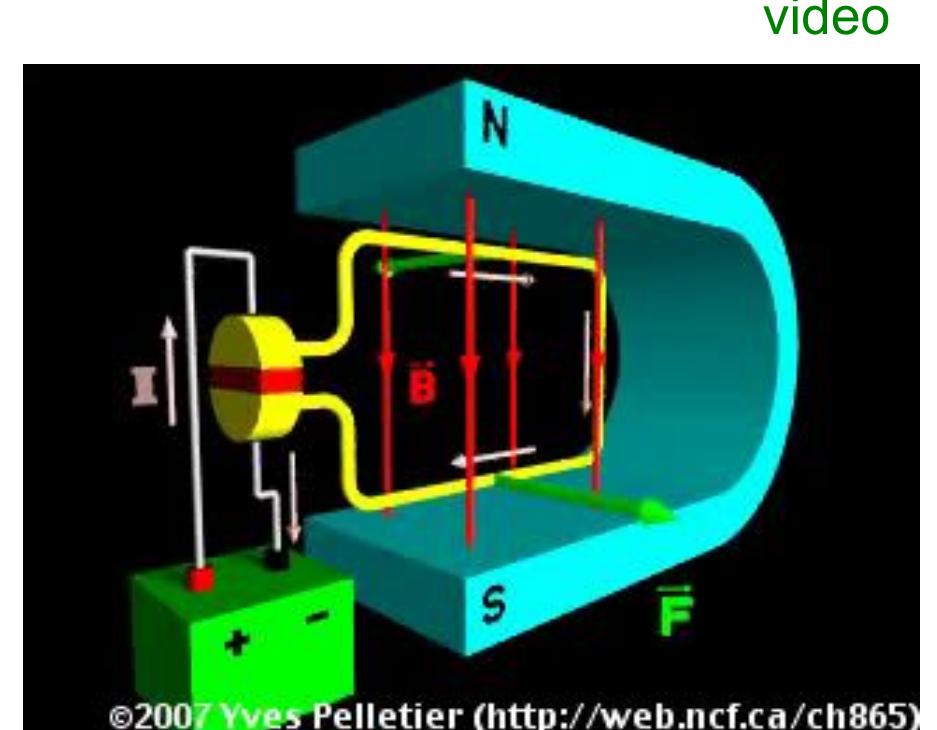
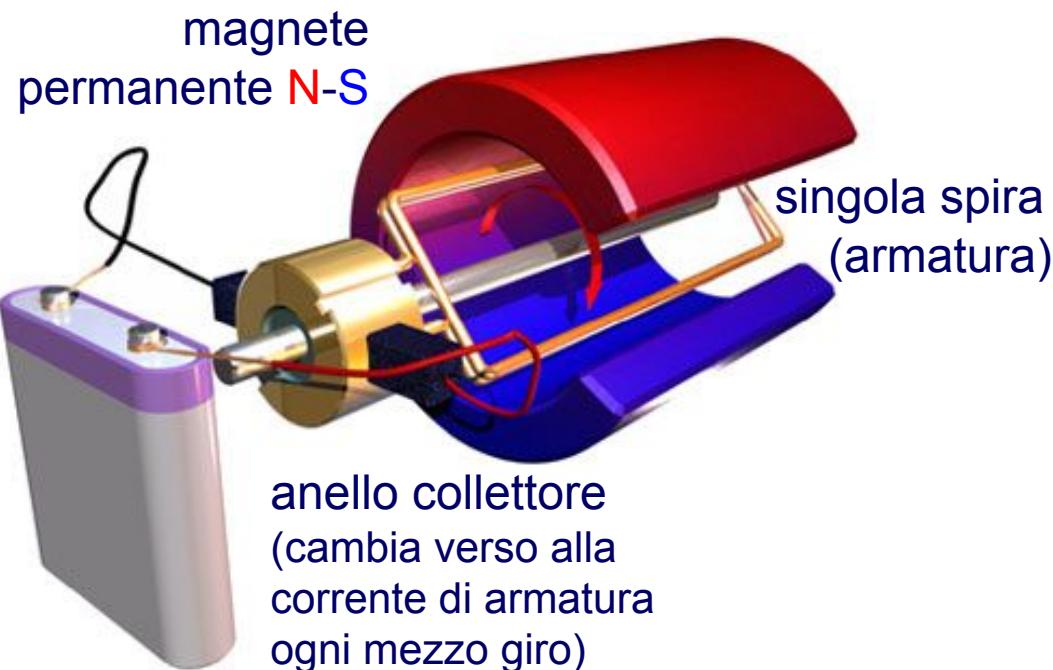
basato sulla legge di Lorentz

- 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

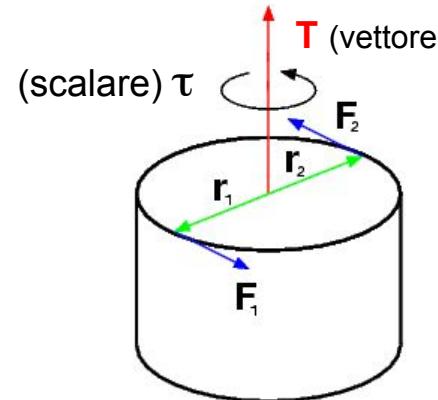


$$\vec{F} = L (\vec{i} \times \vec{B})$$

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:

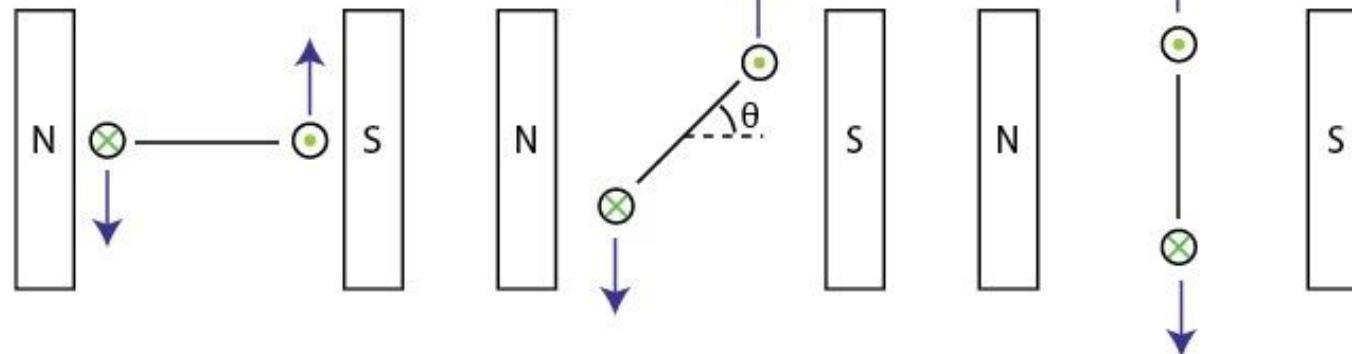
$$\tau = \pm |\vec{T}|$$

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

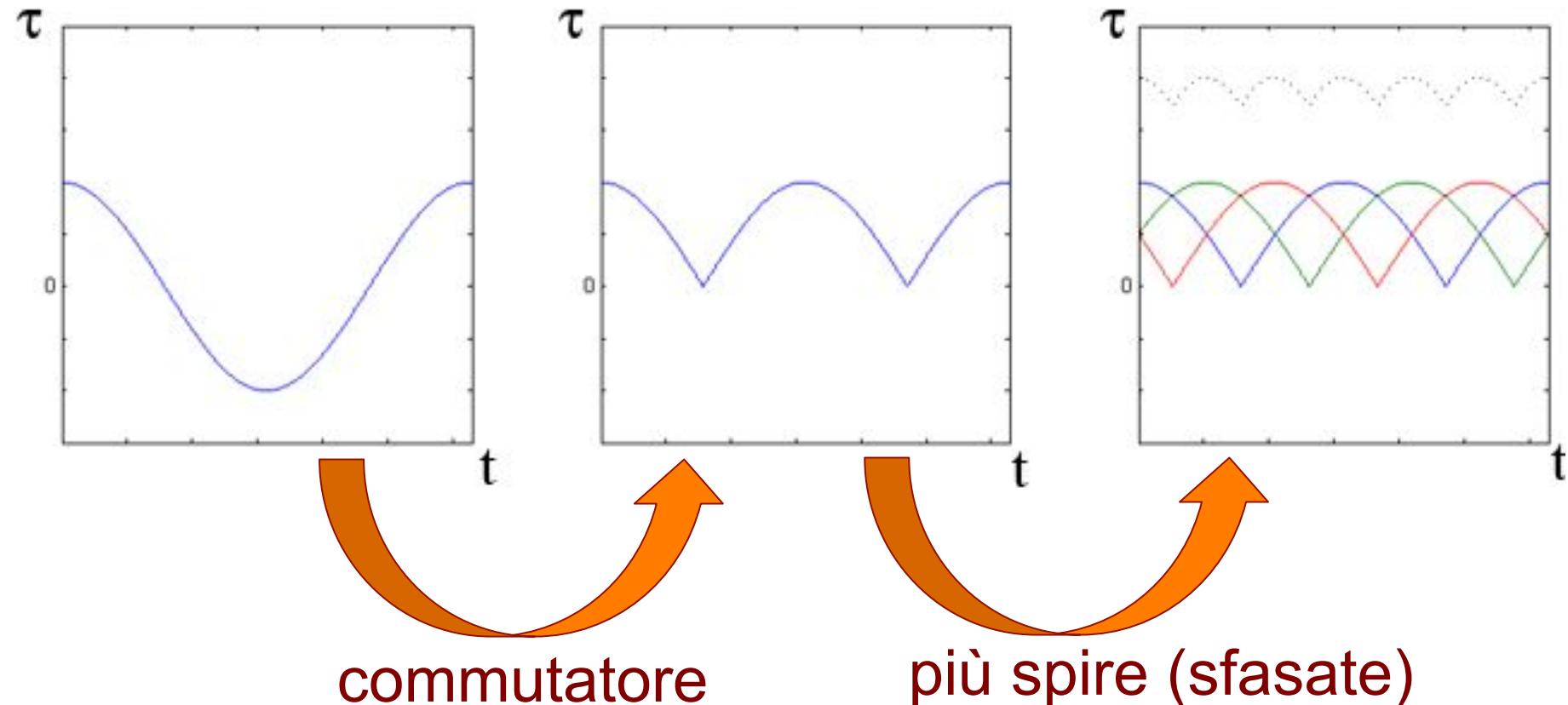
- nel caso di una singola spira, la coppia va a zero a multipli di 180° al variare dell'angolo tra la forza generata e il braccio di rotazione

current into page

current out of page

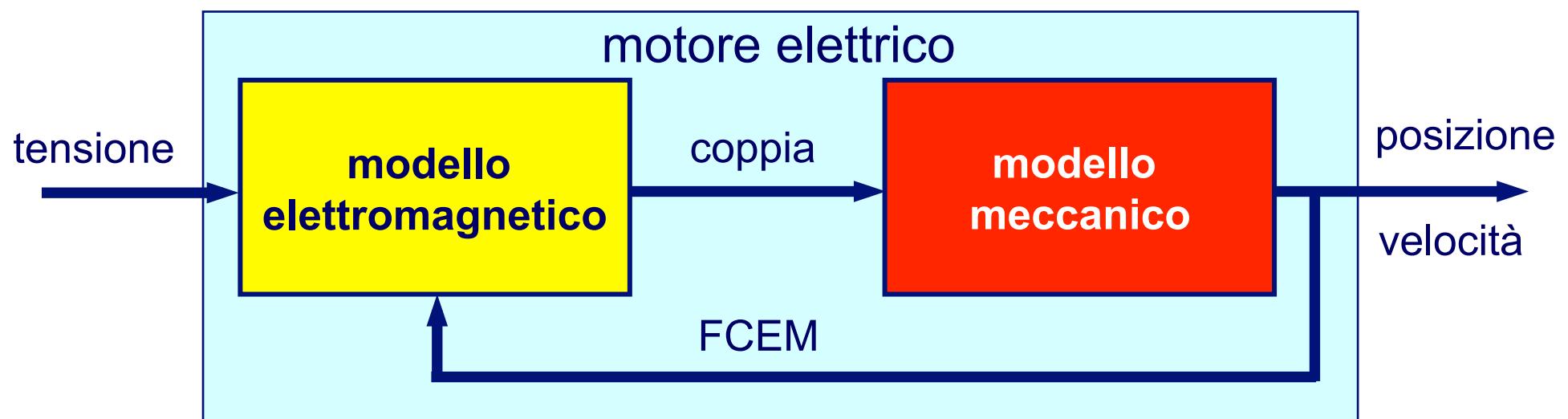


- il commutatore permette di avere una coppia sempre nello stesso verso di rotazione, ma non elimina le oscillazioni (“**ripple**”)
- per limitare il ripple di coppia si usano più spire



Motore DC: modellistica

- ❑ modello elettromagnetico: equazione di bilancio circuitale (“maglia”)
- ❑ 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)



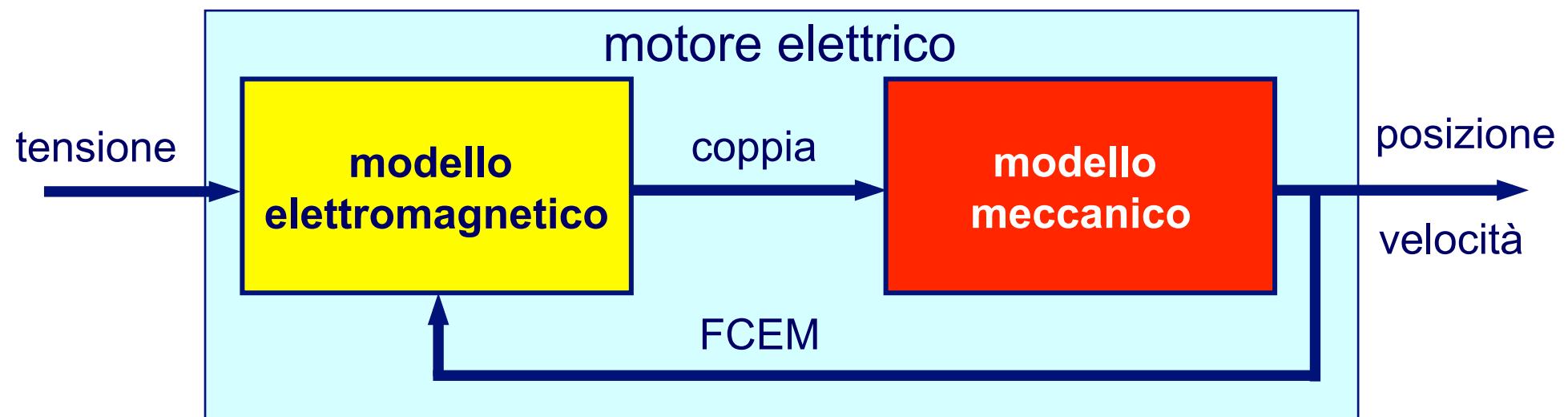
Motore DC: limiti fisici

□ 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)

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

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

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

- per segnali sinusoidali (con componente in continua)

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

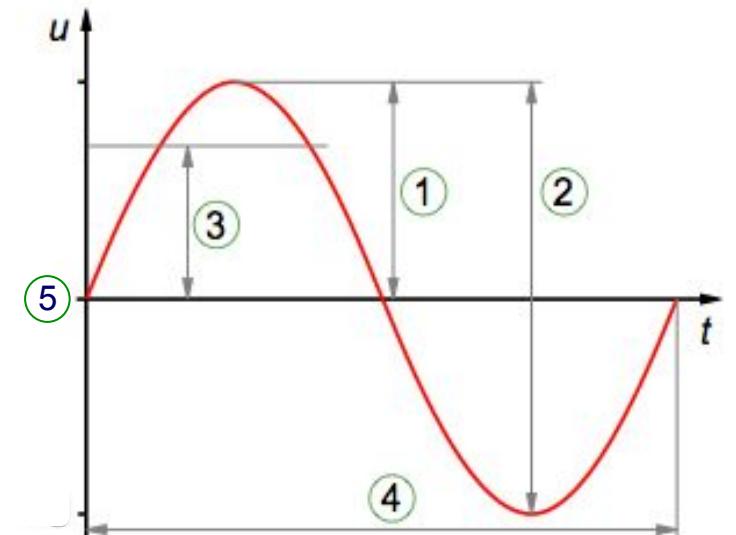
$$u_{peak} = U - |U_0| \quad \textcircled{1}$$

$$u_{avg} = U_0 \quad \textcircled{5}$$

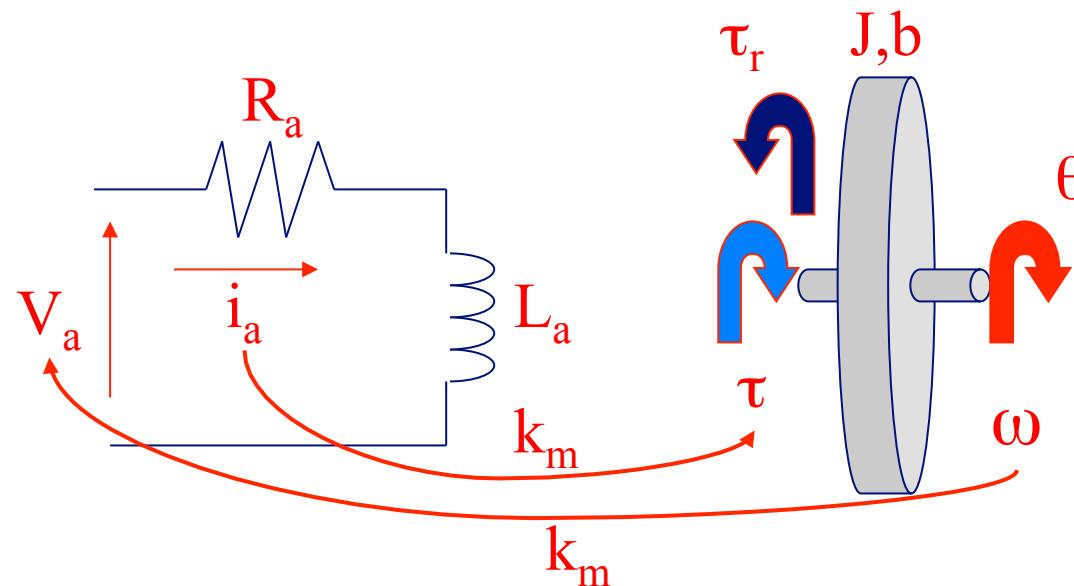
$$u_{peak-to-peak} = 2U \quad \textcircled{2}$$

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

$$\Rightarrow u_{rms}^2 = u_{avg}^2 + \sigma_u^2 = (u^2)_{avg} \quad \text{relazione tra valore efficace e deviazione standard}$$



Motore DC: modello matematico



* = stesso valore
numerico usando
le unità SI !!

□ parametri

R_a : resistenza di armatura

L_a : induzione di armatura

k_m : coefficiente* di coppia e FCEM

J : inerzia del rotore

b : coefficiente di attrito

□ variabili

i_a : corrente di armatura

ω : velocità del rotore

θ : posizione del rotore

V_a : tensione di ingresso

τ_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 ω^* o la capacità di bilanciare una coppia τ_r^* sul carico)

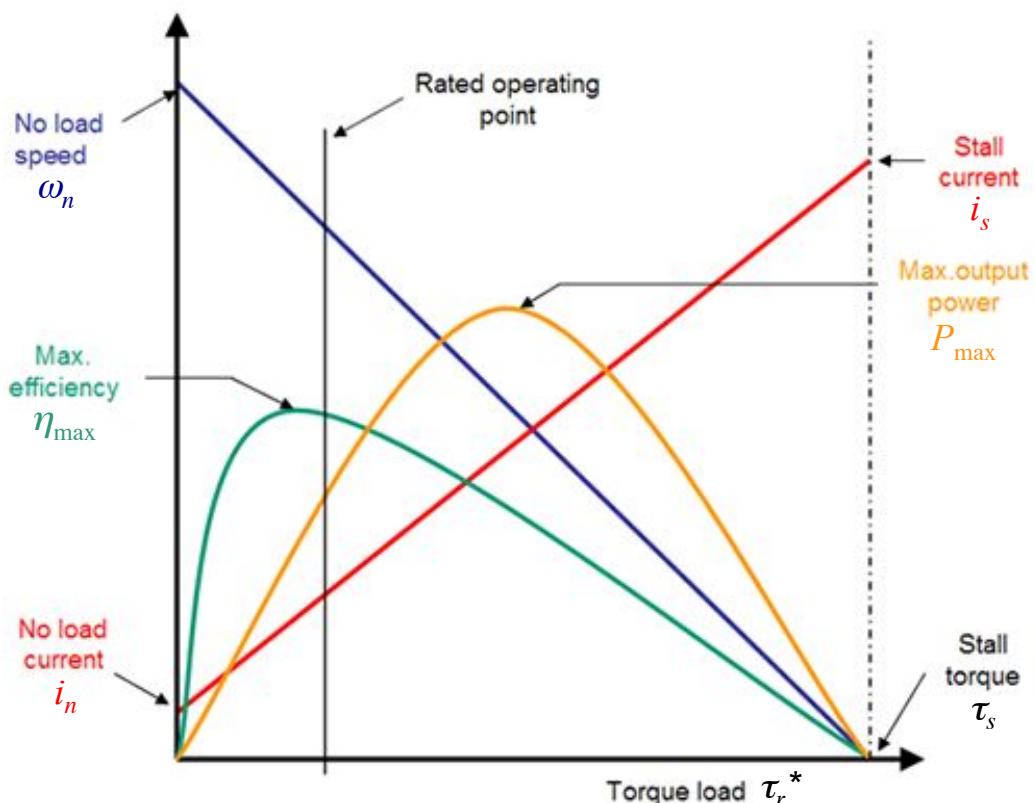
$$\frac{di_a}{dt} = 0 \rightarrow V_a - R_a i_a - k_m \omega = 0 \quad \frac{d\omega}{dt} = 0 \rightarrow k_m i_a - b\omega - \tau_r = 0$$

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

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

⇒ se ne possono tracciare gli andamenti ('affini', ossia lineari con offset) in funzione di τ_r^* o di ω^*

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 η_{max} pari a ... (esercizio)

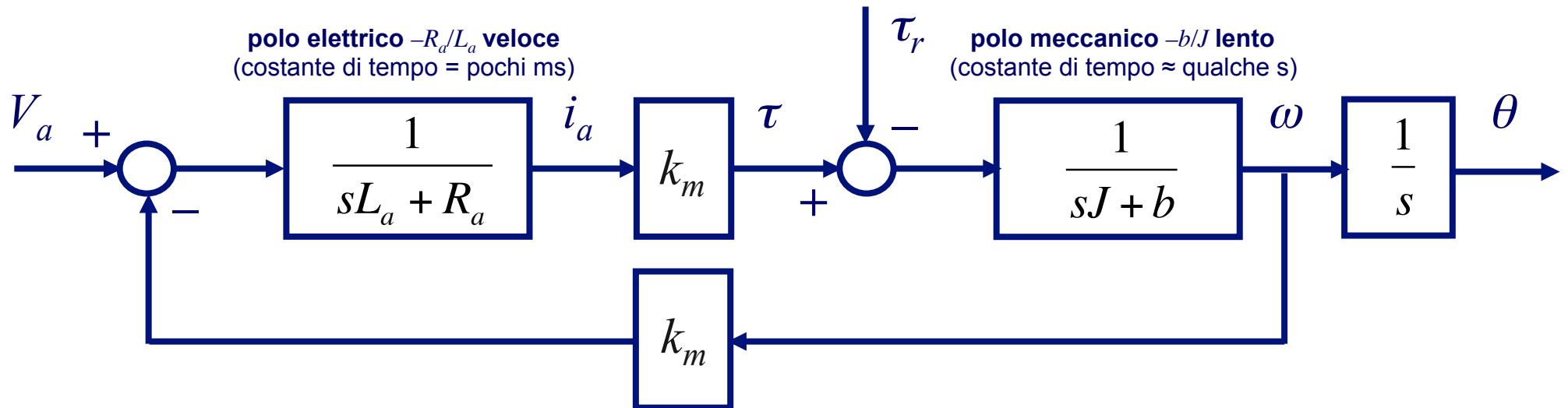
Schema a blocchi del motore DC

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

nel dominio
della trasformata
di Laplace

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

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



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

Progetto del controllore

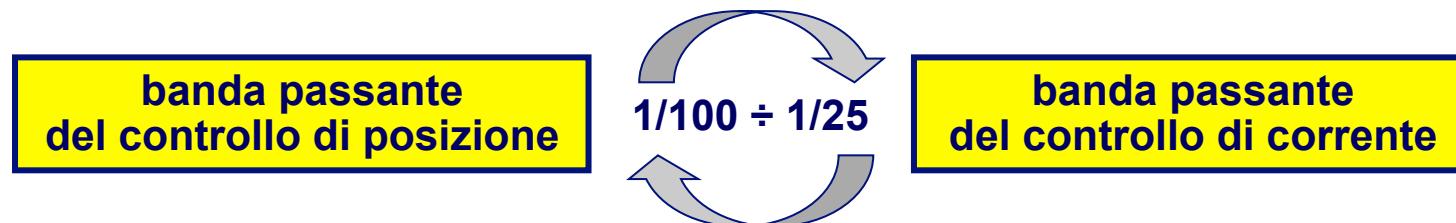
□ obiettivi di controllo

- ➔ 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 “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



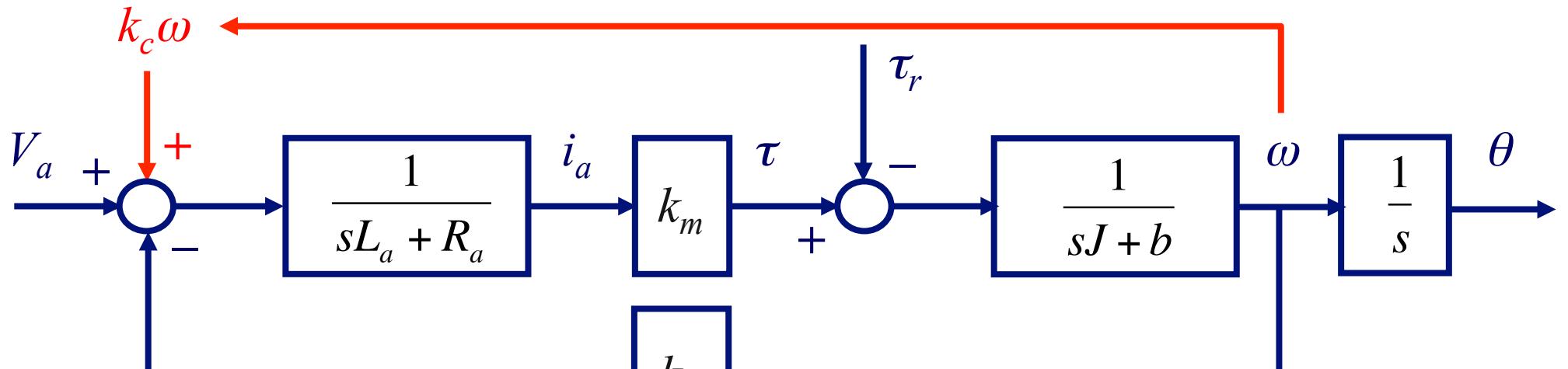
□ limitazioni nell’implementazione

- ➔ 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

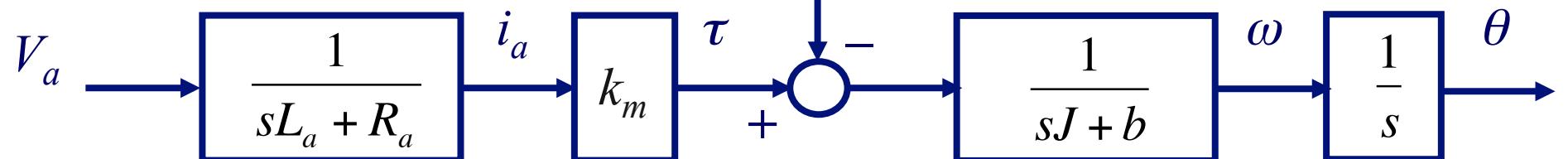
Controllo del motore DC

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 $k_c > k_m$)



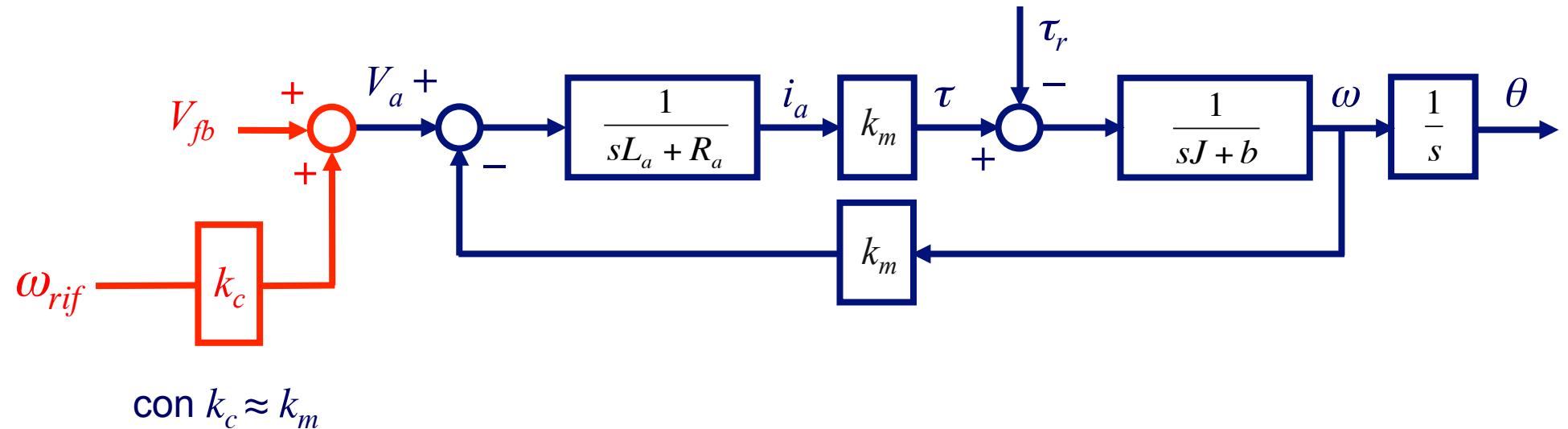
se $k_c = k_m$



Controllo del motore DC

compensazione via *feedforward* della FCEM nominale

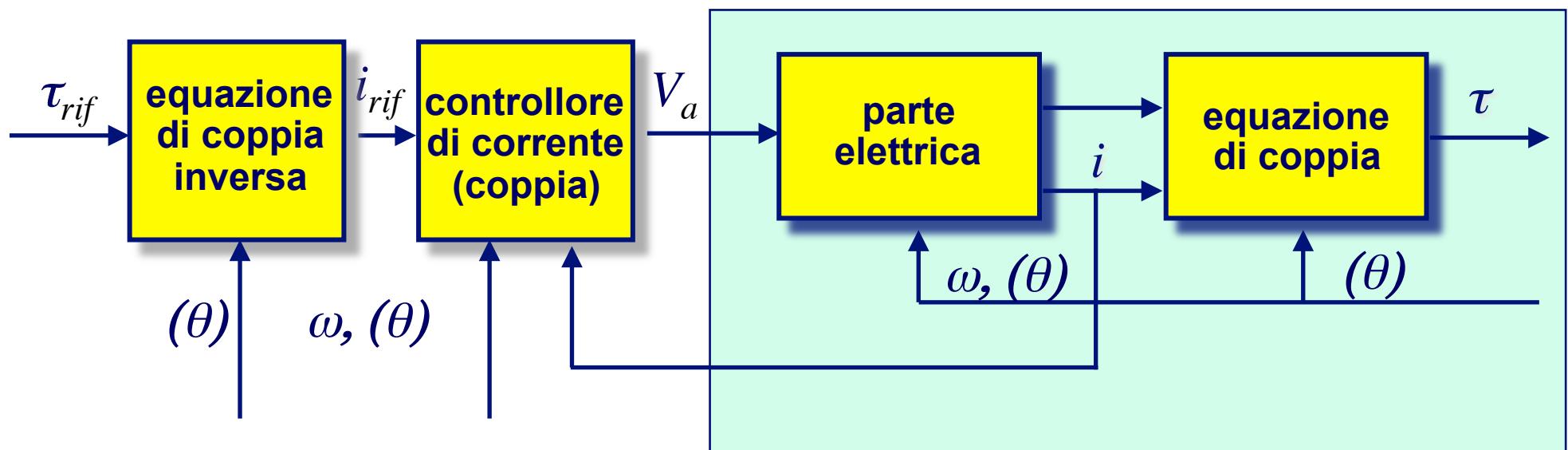
- azione in avanti per compensare, almeno in modo approssimato, il fenomeno



Controllo del motore DC

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

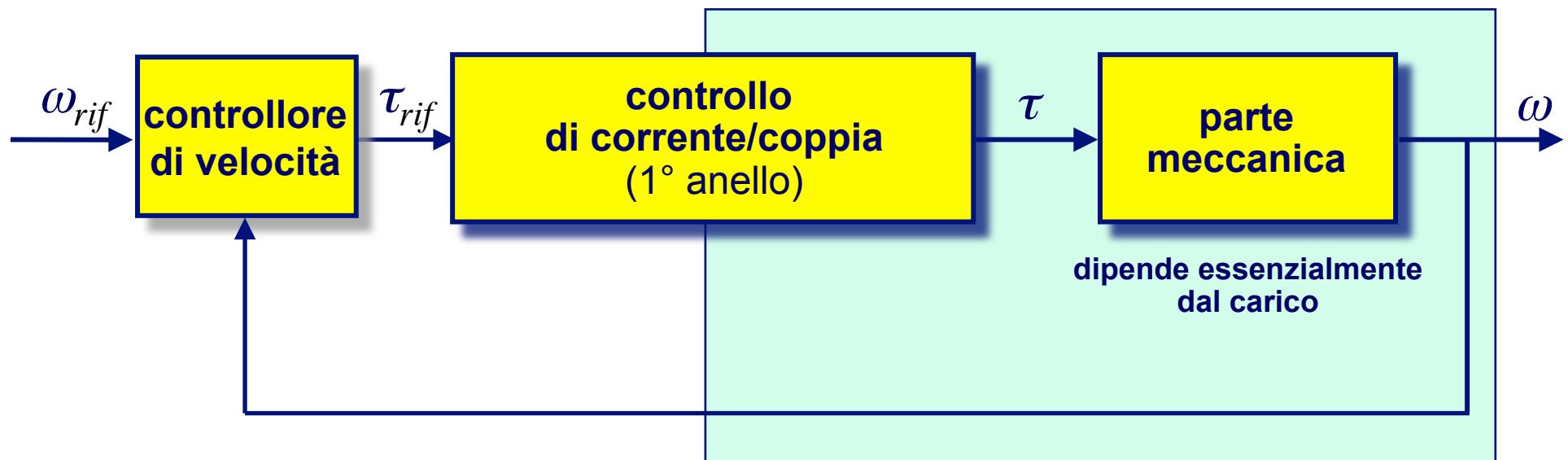
- risente degli effetti dell'amplificatore
- risente direttamente della natura del motore
- usa la relazione coppia-corrente statica (non si ha una misura diretta di coppia)



Controllo del motore DC

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



Controllo del motore DC

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

} puramente cinematico



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

Controllo del motore DC

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

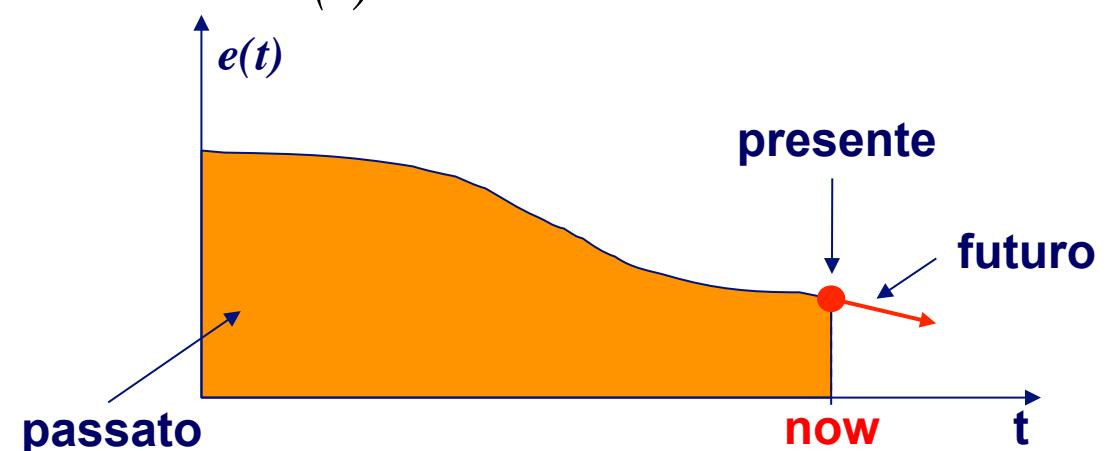
caratteristiche desiderate

- ➔ 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)

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

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

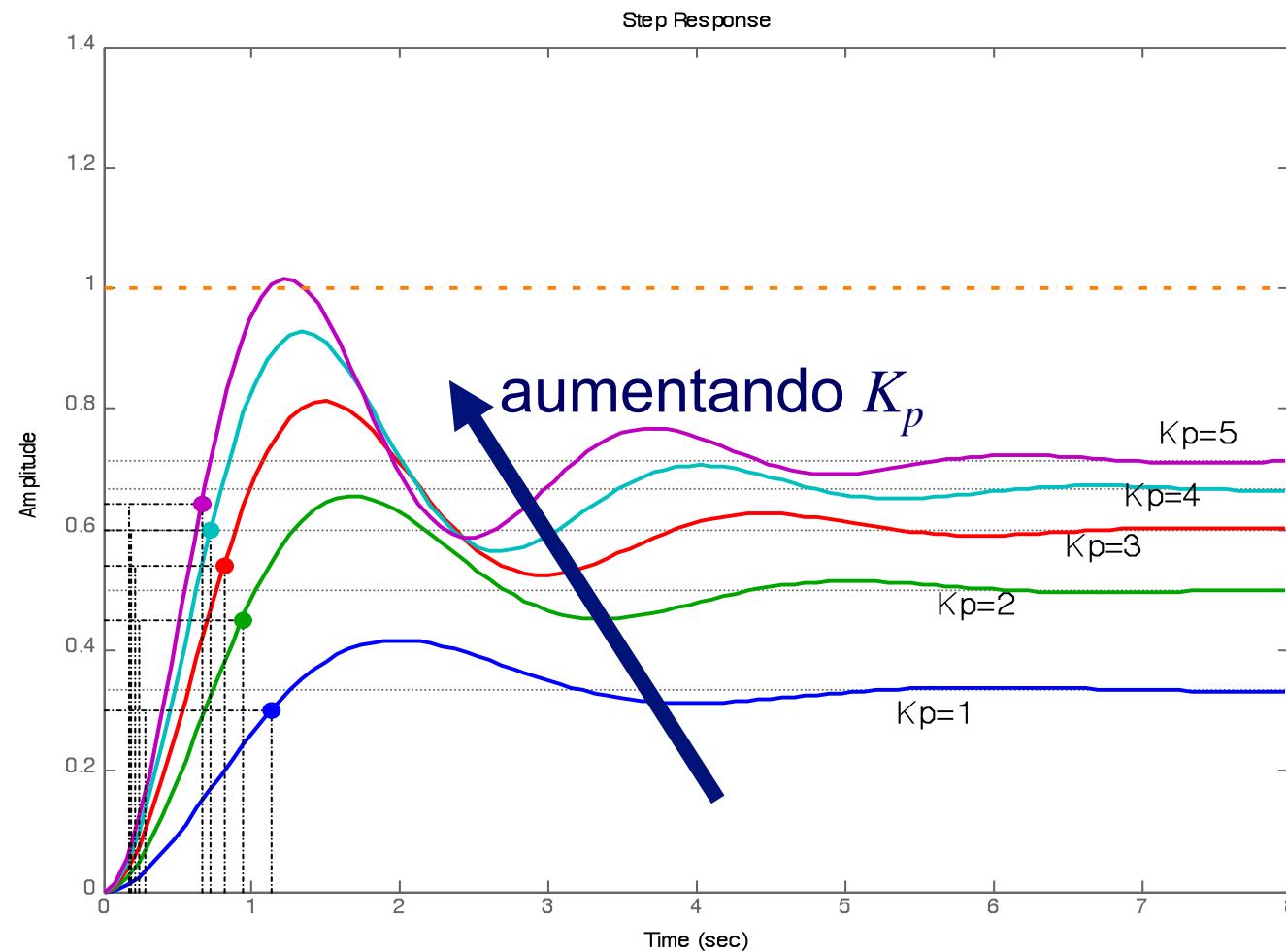
T_i = tempo di integrazione
 $(K_i = K_p / T_i)$

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...
- svantaggio: tende a destabilizzare il sistema all'aumento del guadagno K_p

Azione P



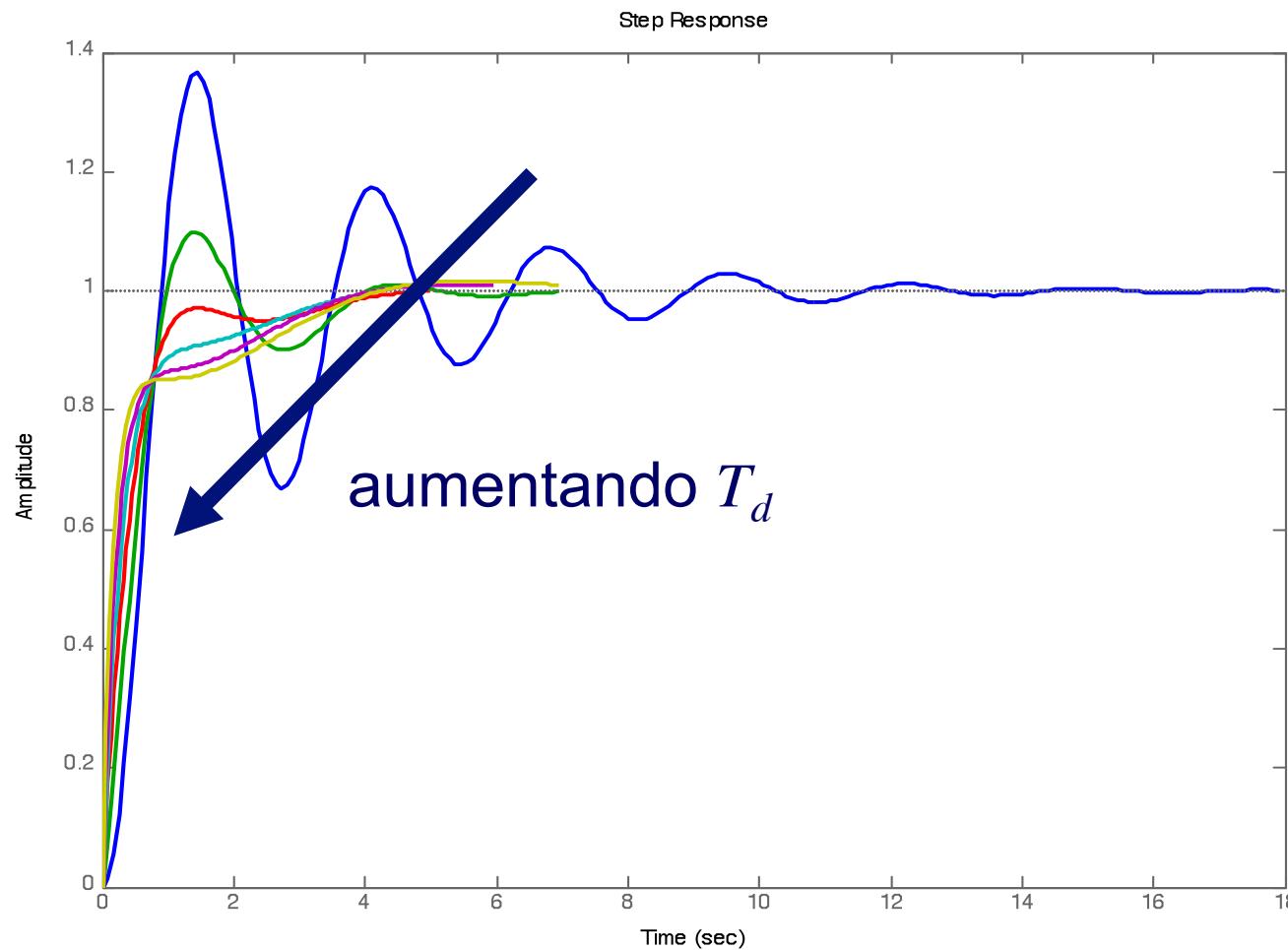
Azione I

- 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

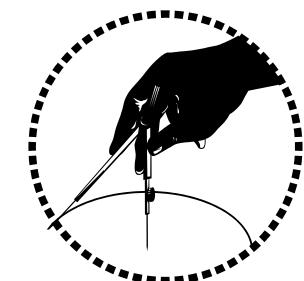
Azione D

- 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
- tende a stabilizzare il sistema
- svantaggio: rallenta la risposta del sistema

Azione D



regole di massima sulle
singole azioni di controllo

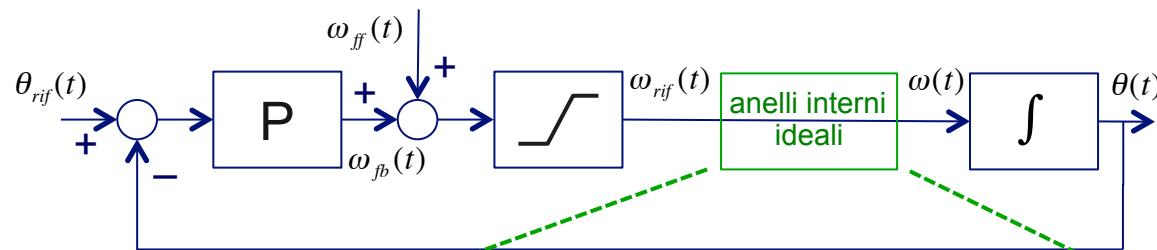


aumentando l'azione	prontezza di risposta	margine di stabilità	errore a regime
P $K_p \uparrow$	aumenta	diminuisce	diminuisce
I $T_i \downarrow$	diminuisce	diminuisce	nullo (se azione presente)
D $T_d \uparrow$	diminuisce	migliora (se azione presente)	ininfluente

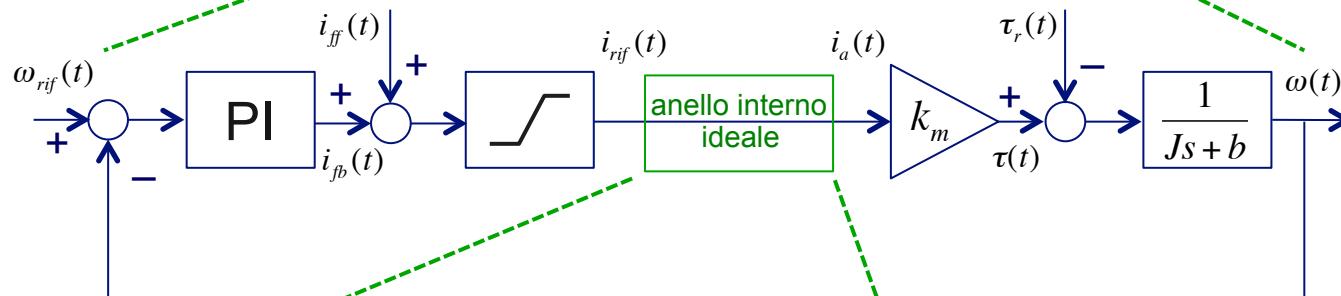
N.B. In seguito, si vedranno metodi empirici di 'auto-tuning'/sintonizzazione
dei guadagni e possibili implementazioni digitali dei PID

Progetto dei singoli anelli per un motore DC

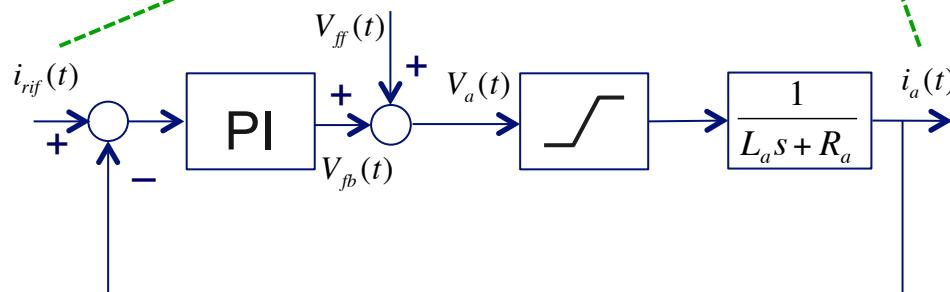
- nell'ipotesi di separazione dinamica, si procede a ritroso dall'anello più esterno:
posizione \Rightarrow velocità \Rightarrow corrente



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

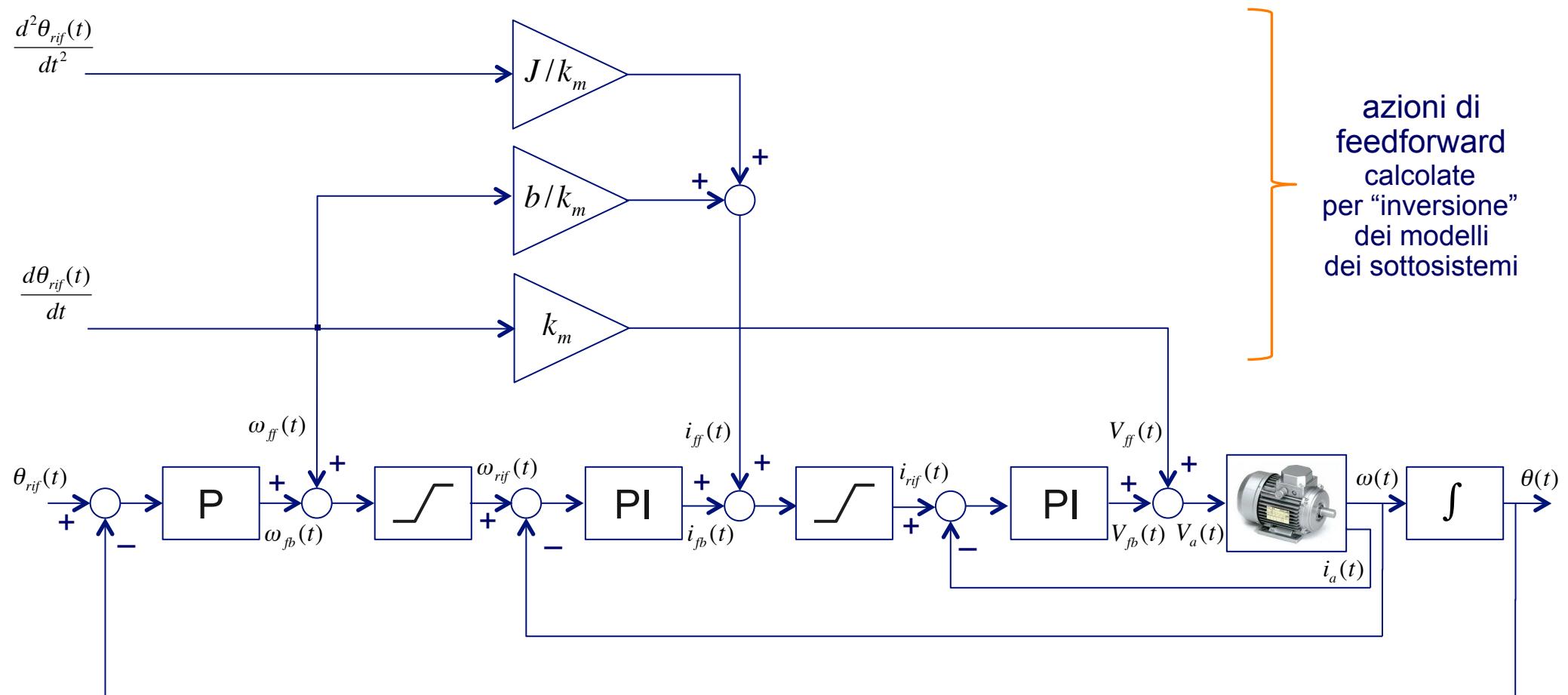


\Rightarrow regolatore **PI** di velocità
 \Rightarrow azione integrale per reiezione
del disturbo (di coppia)



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

Schema di controllo finale di un motore DC

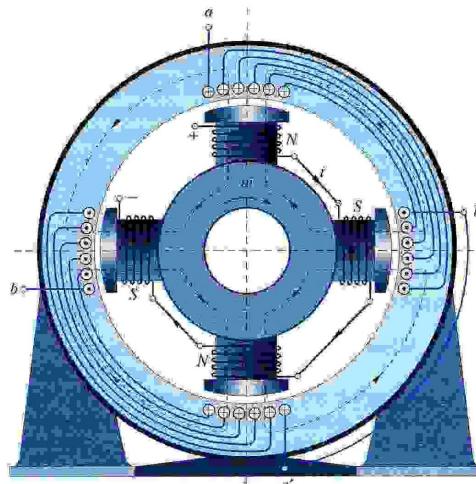


- **anelli di feedback:** PI su corrente; PI su velocità; P su posizione
- **compensazioni (feedforward):** per inseguimento di traiettoria e rimozione FCEM

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 di 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

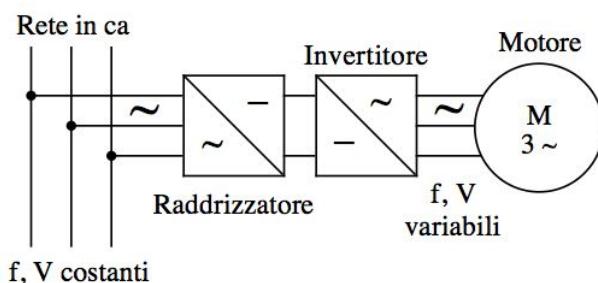
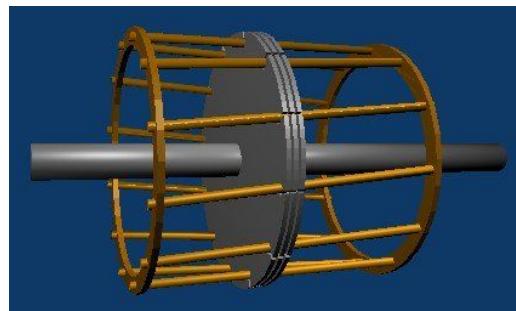
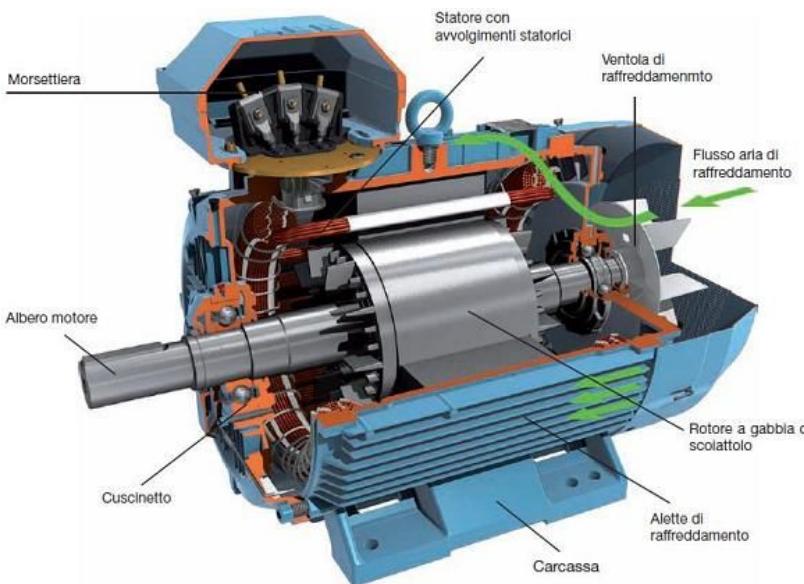


animazione

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



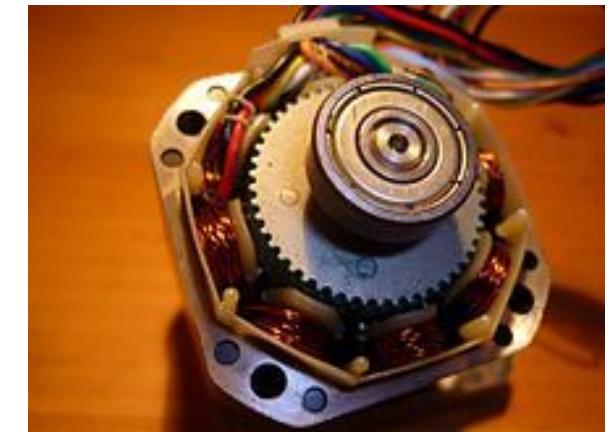
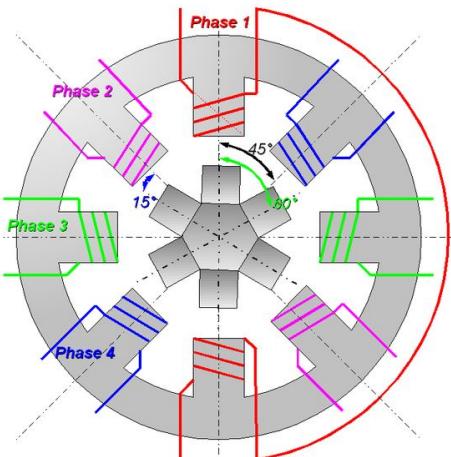
motore asincrono (a induzione)

- alimentato in corrente alternata (AC)
- sistema *trifase*
 - statore con tre avvolgimenti uguali (*fasi*) disposti a 120° sui quali circolano correnti sinusoidali a pulsazione ω sfasate di 120°
 - si genera un campo magnetico di ampiezza costante e rotante alla stessa pulsazione ω
 - 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

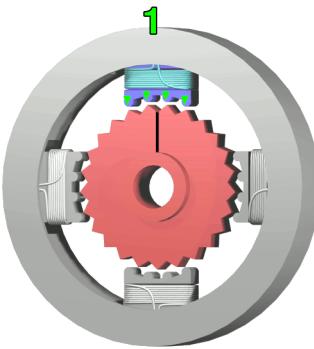
motore passo-passo (stepper motor)

- 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 α (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)

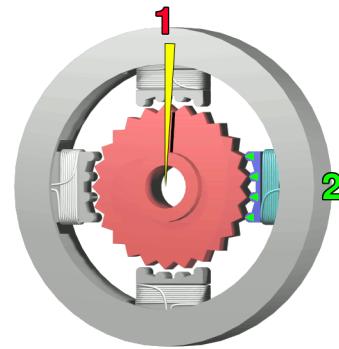


$$F_s = 8 \text{ (bipolare)}, E_r = 6 \Leftrightarrow \alpha = 360^\circ / [E_r \cdot (F_s/2)] = 360^\circ / [6 \cdot (8/2)] = 15^\circ$$

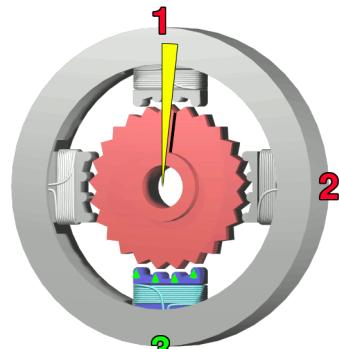
Stepper motor in azione



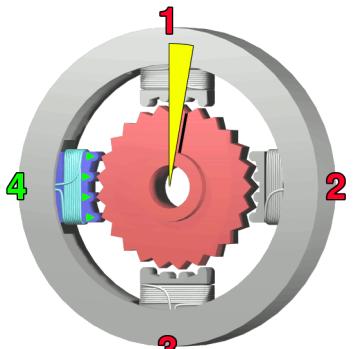
elettromagnete 1 eccitato
attrae l'espansione
più vicina del rotore,
allineandola in fase 1



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

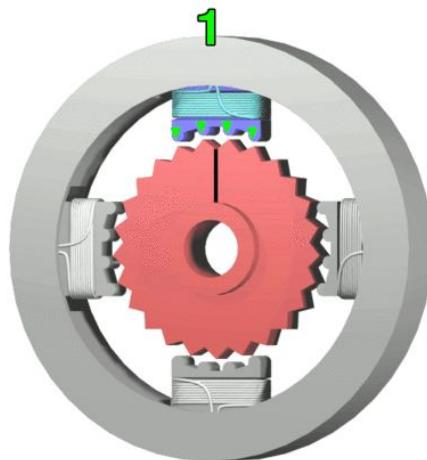


elettromagnete 2 spento
con il 3 eccitato e simile
rotazione oraria di α
fino all'allineamento in fase 3



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

ciclando, si ha ancora una
rotazione oraria di α



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)

Confronto tra tipi di azionamenti elettrici

TIPO	Regolazione	Tracking	Risposta dinamica	Extra coppia	Extra velocità	Taglia	Diffusione	Costo
DC 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
sincrono brushless a campo trapezoidale	ottima, buona ad alta velocità	buono	buona	≤ 2-4 volte	no (solo con soluzioni particolari)	≤ 5 KW	ampia, in calo	contenuto
sincrono brushless 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
asincrono (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)
asincrono (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
passo-passo (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

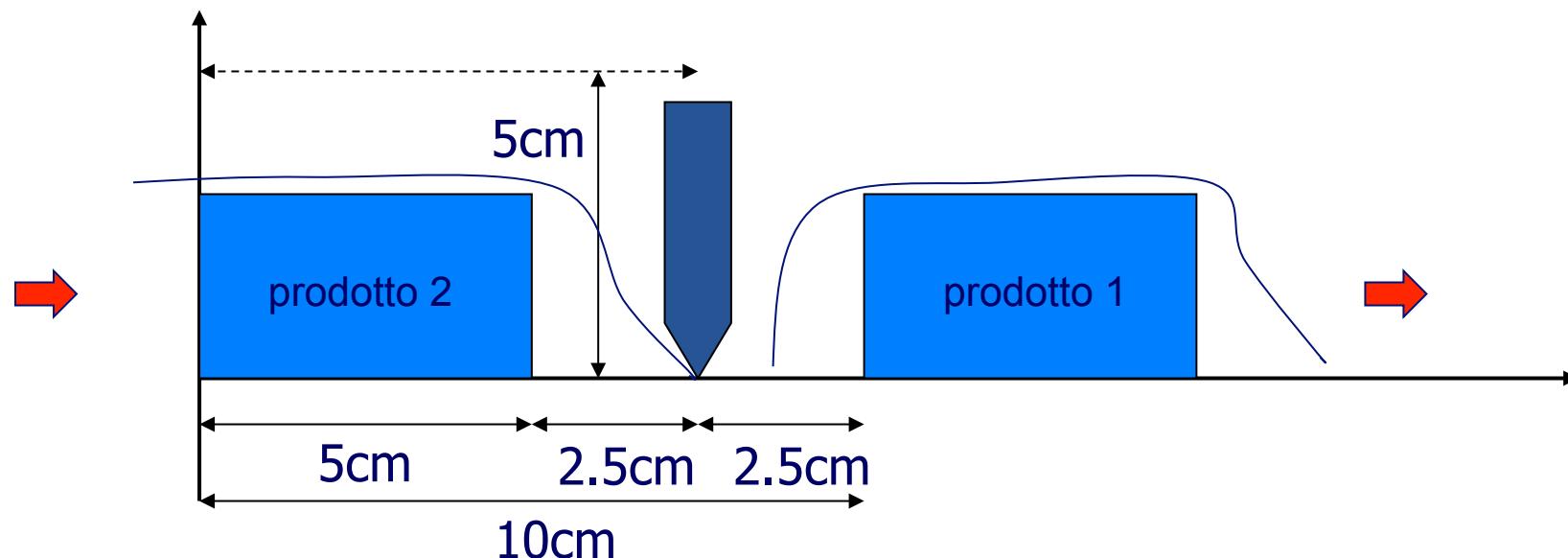


Automi della Maison Roulet-Decamps, costruiti nel XIX-XX secolo (ognuno ha un solo motore)
Musée de l'Automate, Souillac sur Dordogne, France
<http://www.musee-automate.fr>

Sincronizzazione dei moti

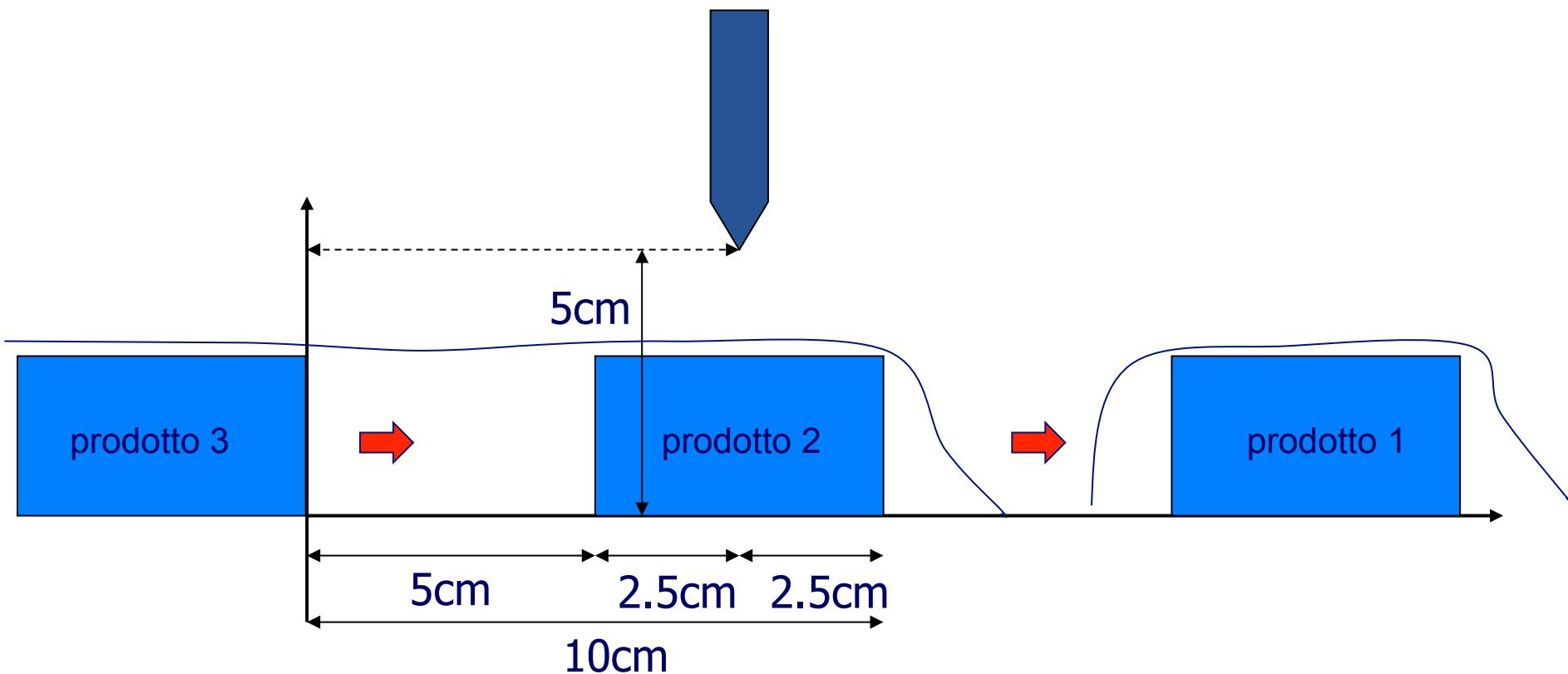
- se abbiamo più assi da muovere in modo coordinato, utilizziamo un solo attuatore o più attuatori?

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



Sincronizzazione dei moti

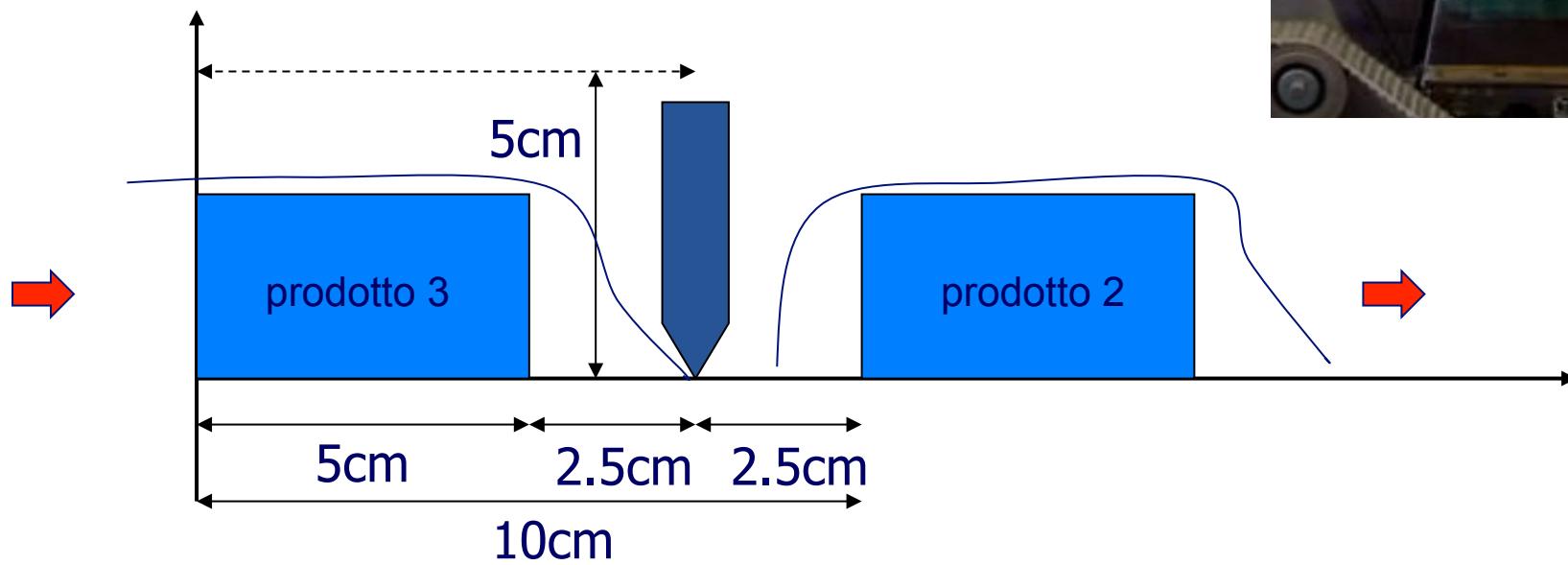
problema di movimentazione sincronizzata:
taglierina di pellicola per avvolgere prodotti su nastro trasportatore



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



Sincronizzazione dei moti

Coordinamento della movimentazione delle parti meccaniche in un sistema meccatronico

- meccanica
- elettronica
- automatica

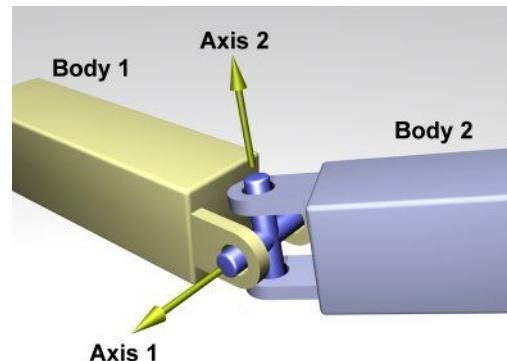
Inizialmente il controllo e la distribuzione del moto era demandato a una serie di dispositivi meccanici (**catene cinematiche**) azionati da un'unica sorgente di moto (motore elettrico a velocità costante)

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

Cinematismi



ruotismi



giunti



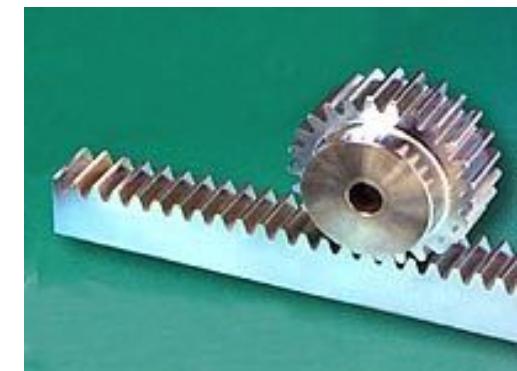
manovellismi



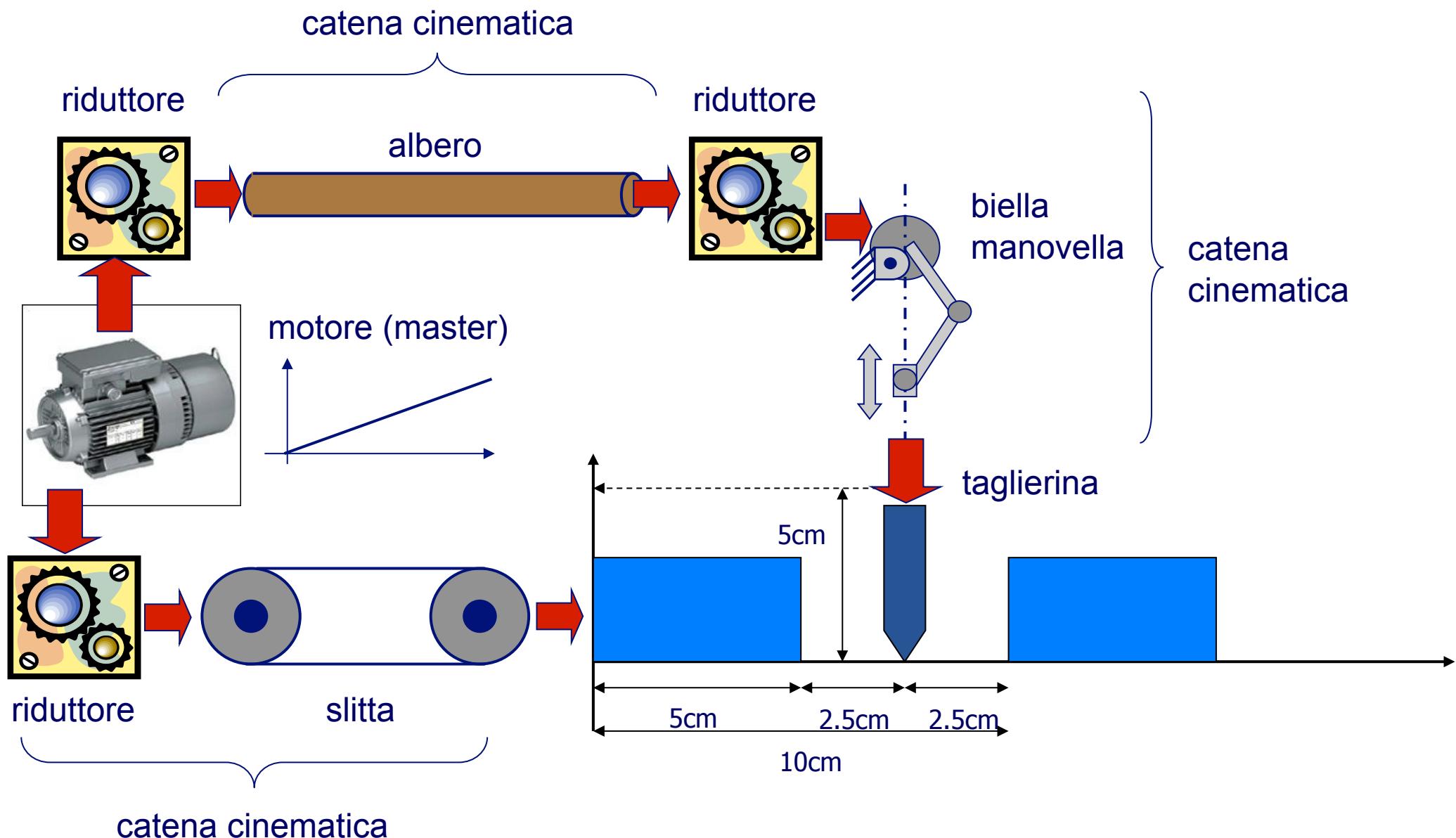
camme



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

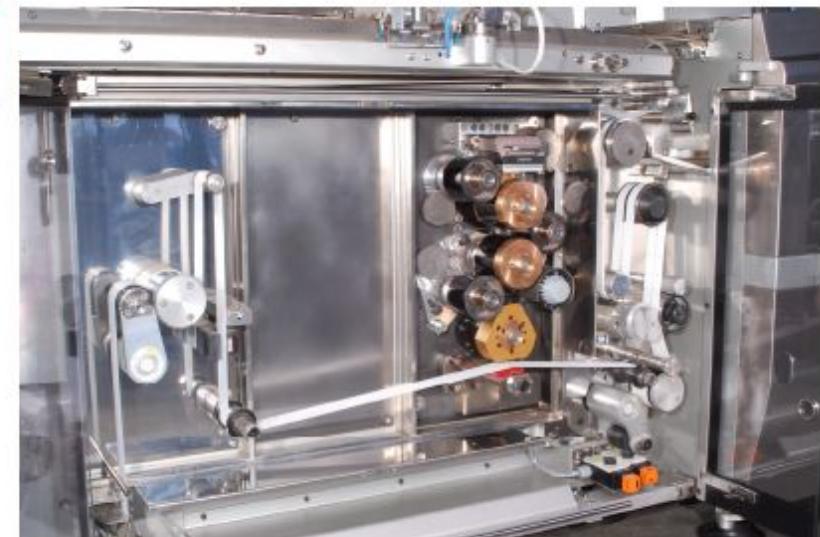
asservire assi elettrici a riferimenti di posizione impostati via software

- 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)



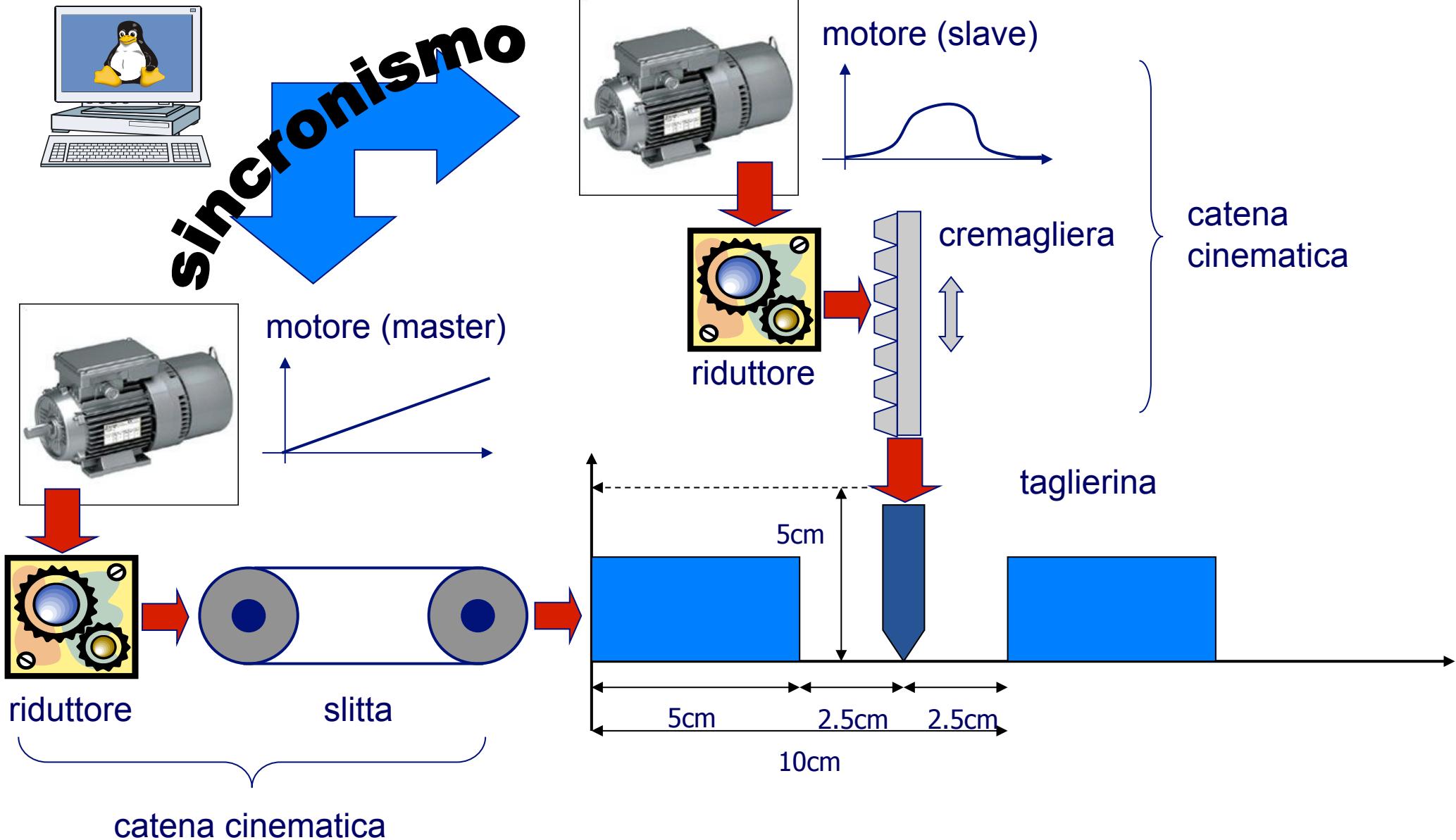
ieri

G.D



oggi

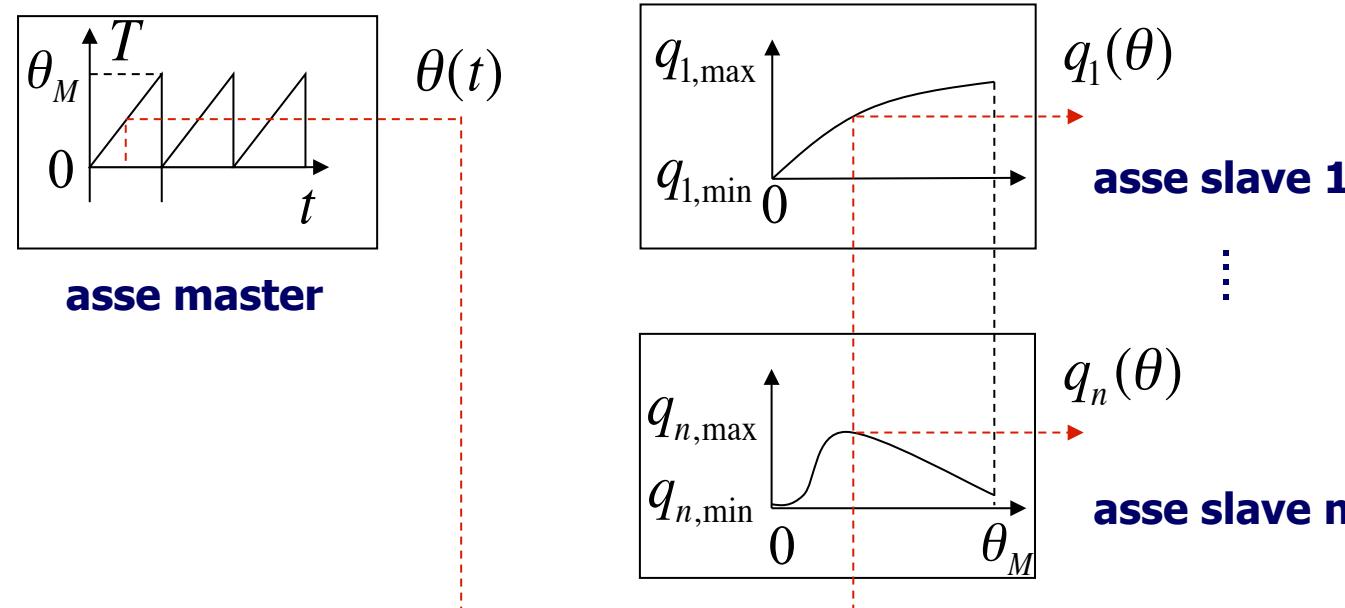
Sincronizzazione dei moti



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)
- leggi parametriche $q = f(\theta)$ (rispetto al parametro)
- trattazione comune

→ leggi polinomiali: $q = f(\theta) = a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + \dots + a_n\theta^n$

→ doppia normalizzazione

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

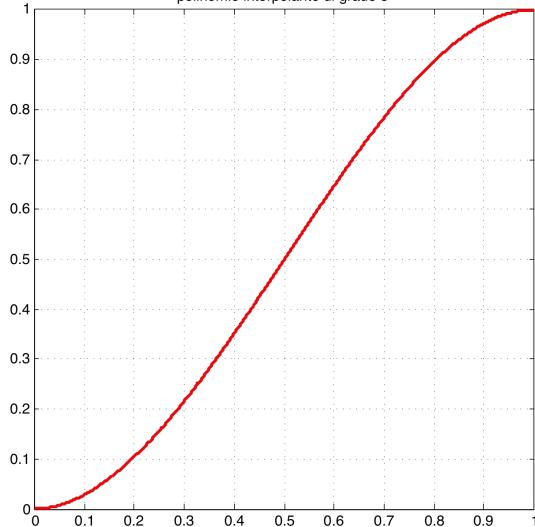
- condizioni (sulle derivate) al contorno (valori iniziale e finale)
 - casi notevoli: cubica, quintica (con derivate al contorno nulle)
- leggi trapezoidali: combinazione di tratti a derivata costante
 - casi notevoli: trapezio in “velocità”, in “accelerazione” (a doppia esse)
- splines (polinomi cubici 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)

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

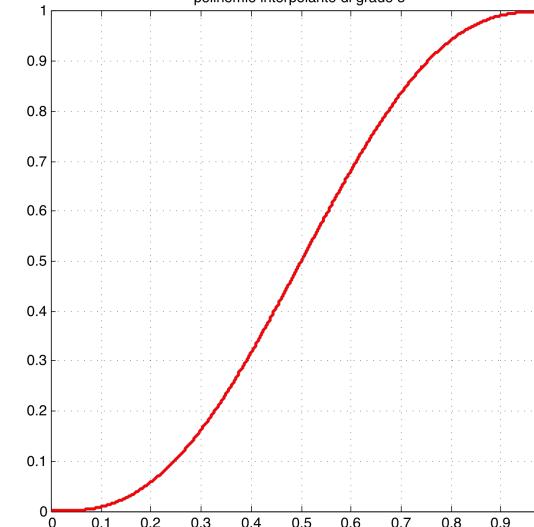
polinomio interpolante di grado 3



posizione

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

polinomio interpolante di grado 5

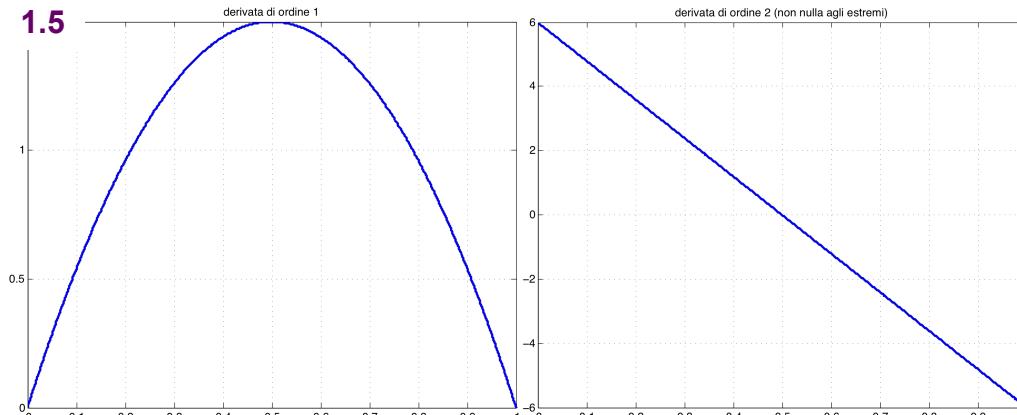


posizione

se le derivate fossero
rispetto al tempo...

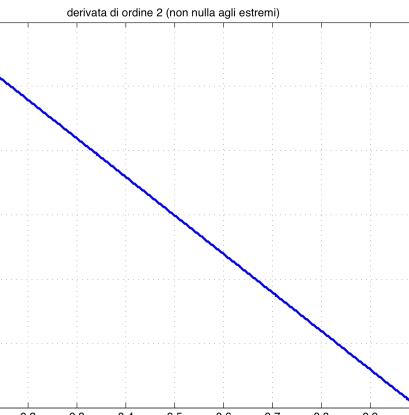
“velocità”

derivata di ordine 1



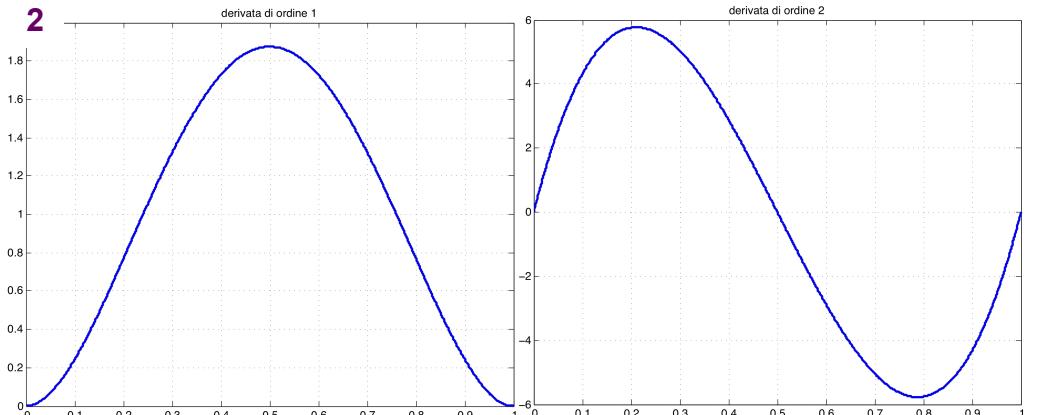
“accelerazione”

derivata di ordine 2 (non nulla agli estremi)



“velocità”

derivata di ordine 1

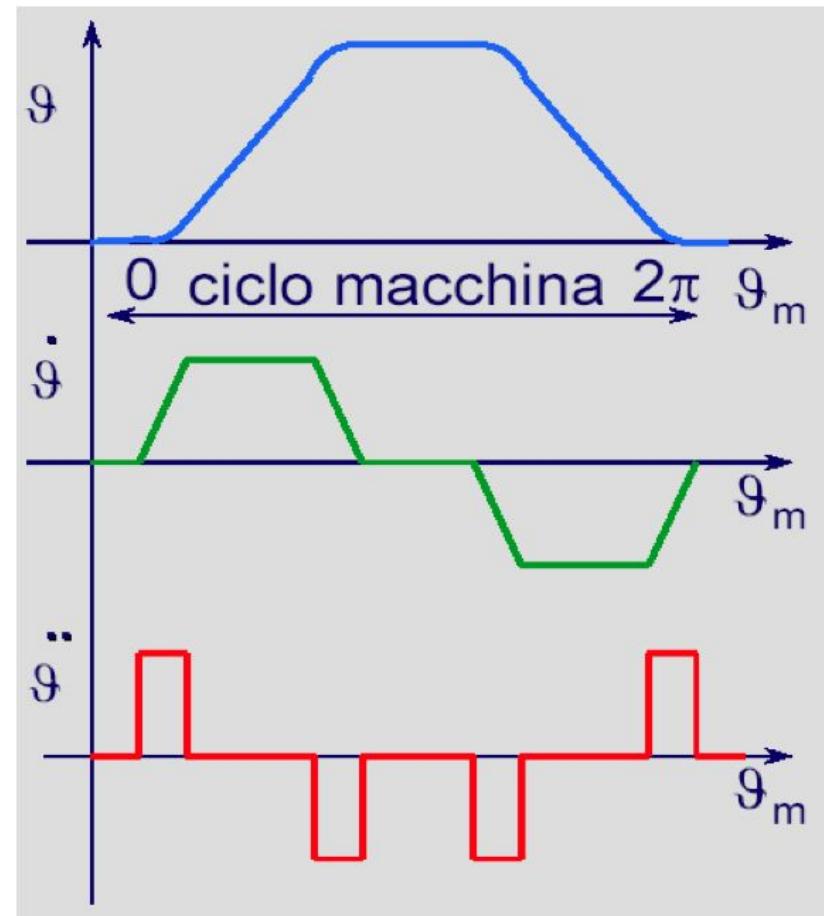
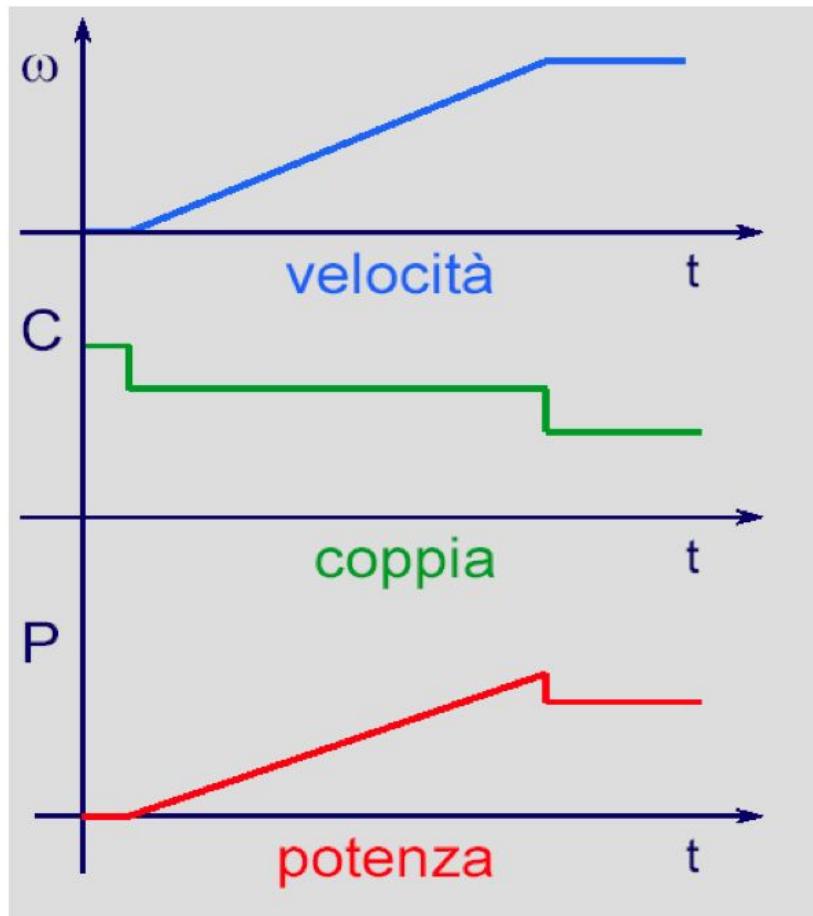


“accelerazione”

derivata di ordine 2

Profili per moti uniformi o ciclici

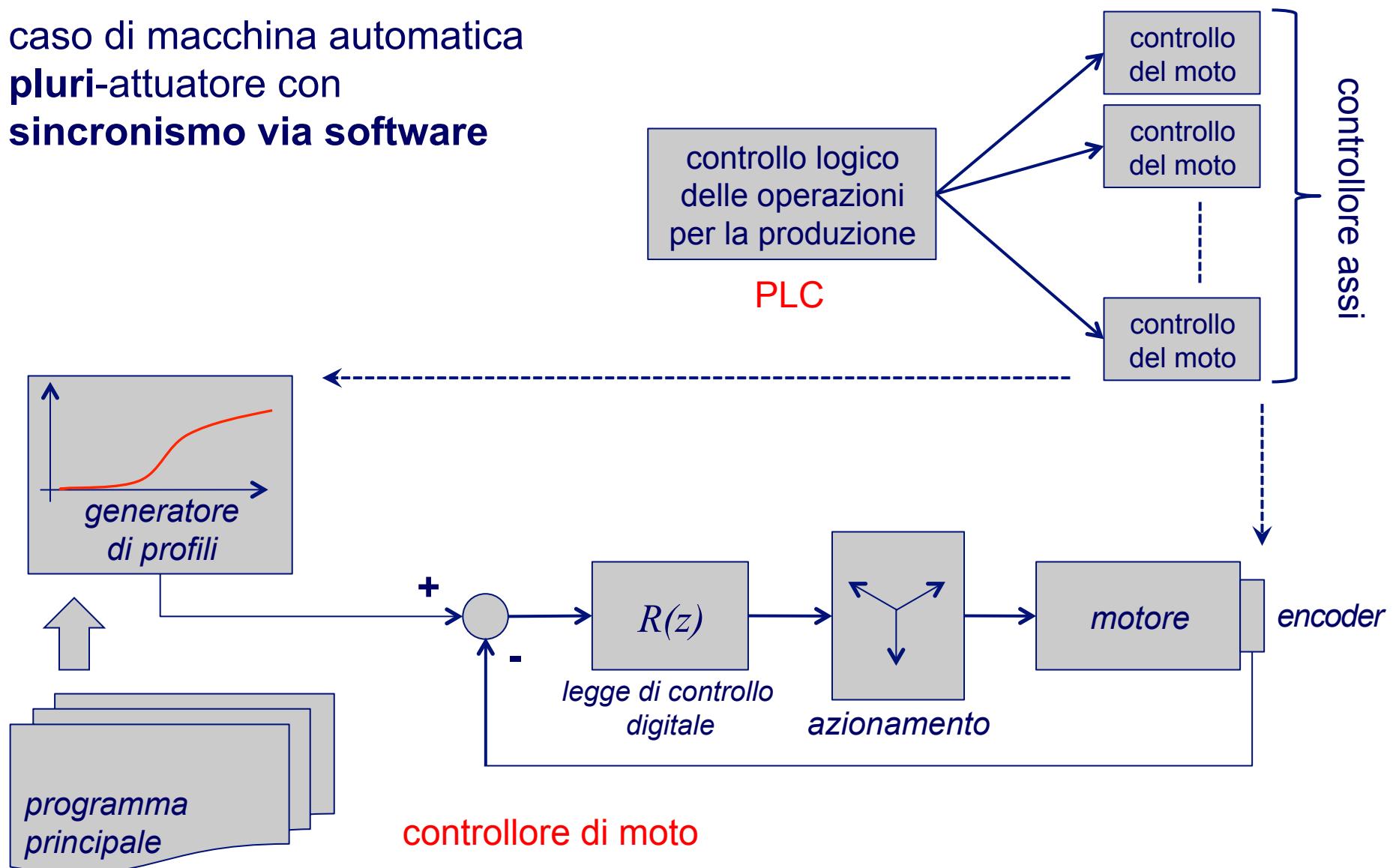
- moto **uniforme**, ad es. rampa di velocità da fermo a velocità costante di regime
- moto **ciclico**, ad es. profilo “a doppia esse” (ritorna alla posizione iniziale)



sono mostrate qui due possibili leggi orarie (**nel tempo**)

Controllo assi di una macchina automatica

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



Azionamenti e controllori del moto

Principali produttori

- www.rockwellautomation.com
- www.automation.siemens.com
- www.schneider-electric.com
- www.controltechniques.com (Emerson)
- www.br-automation.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