

Azionamenti Elettrici

Parte 2

Tipologie dei motori
e relativi azionamenti:

Motori a collettore
e Sincroni

Prof. Alberto Tonielli

DEIS - Università di Bologna

Tel. 051-6443024

E-mail: atonielli@deis.unibo.it

Indice generale del corso

■ Parte 1

- Introduzione, richiami di Controlli Automatici ed Elettrotecnica
- Generazione elettromagnetica di coppia

■ Parte 2

➤ Tipologie dei motori elettrici e dei relativi azionamenti

- Motori ed azionamenti C.C.
- Motori ed azionamenti Brushless (sincroni a magneti permanenti)
- Motori ed azionamenti Asincroni ad Induzione
- Motori passo-passo e coppia

■ Parte 3

- Introduzione al controllo assi

■ Parte 4

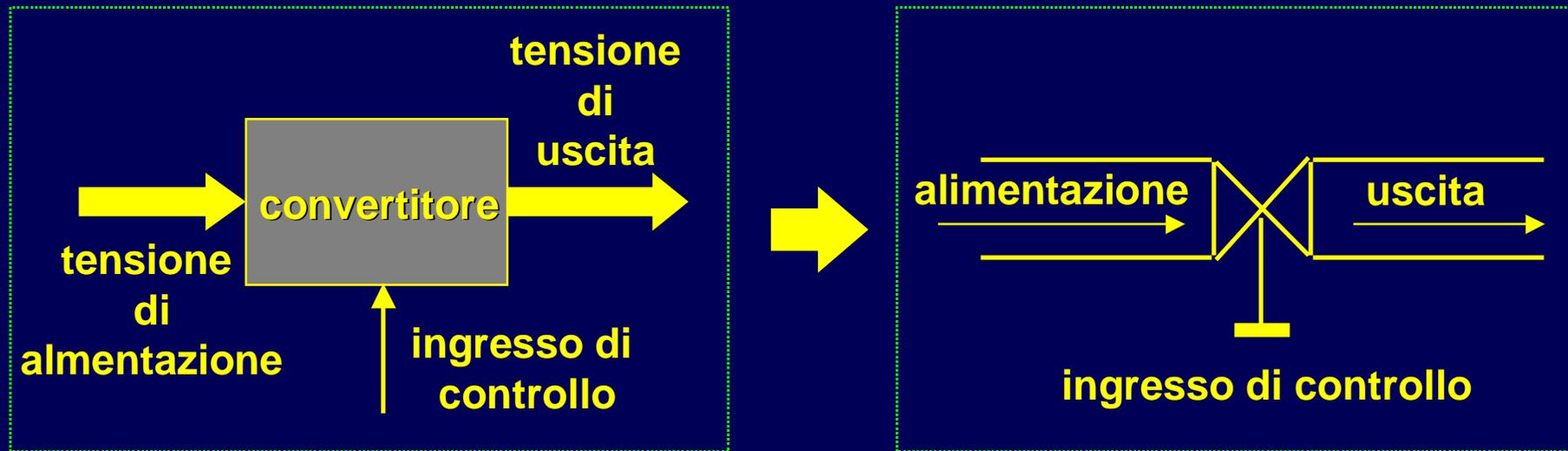
- Scelta dell'azionamento
- Dimensionamento del motore e dell'amplificatore
- Esempi di dimensionamento

Indice della Seconda Parte

- **Cenni sugli amplificatori di potenza**
- **Motori a collettore (C.C.)**
 - principio di funzionamento
 - controllo di coppia
- **Motori Brushless a campo trapezoidale**
 - principio di funzionamento
 - controllo di coppia
- **Motori Brushless a campo sinusoidale**
 - principio di funzionamento
 - controllo vettoriale di coppia
- **Motori asincroni ad induzione**
 - principio di funzionamento
 - controllo di velocità in catena aperta e vettoriale di coppia
- **Motori a riluttanza variabile**
 - passo-passo e motori coppia

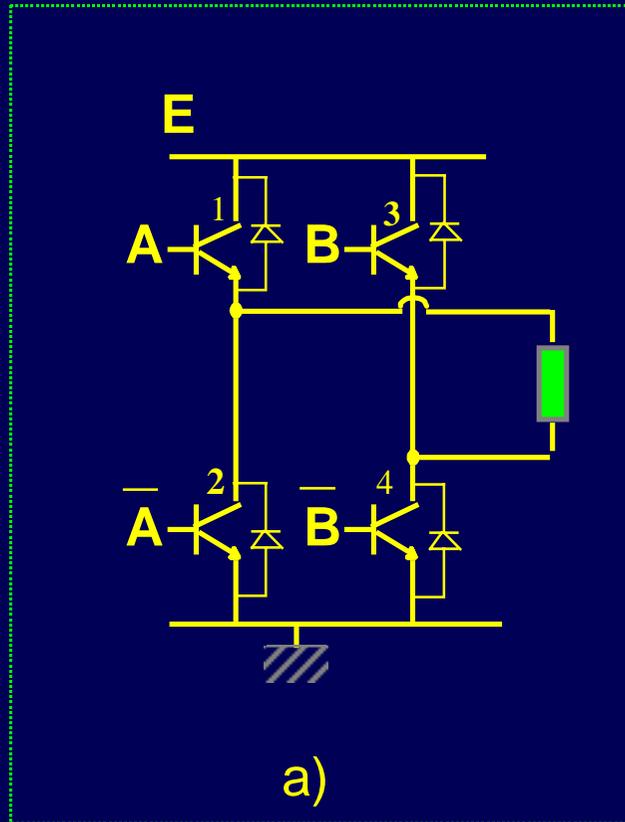
Componenti di un Azionamento

Convertitore di potenza

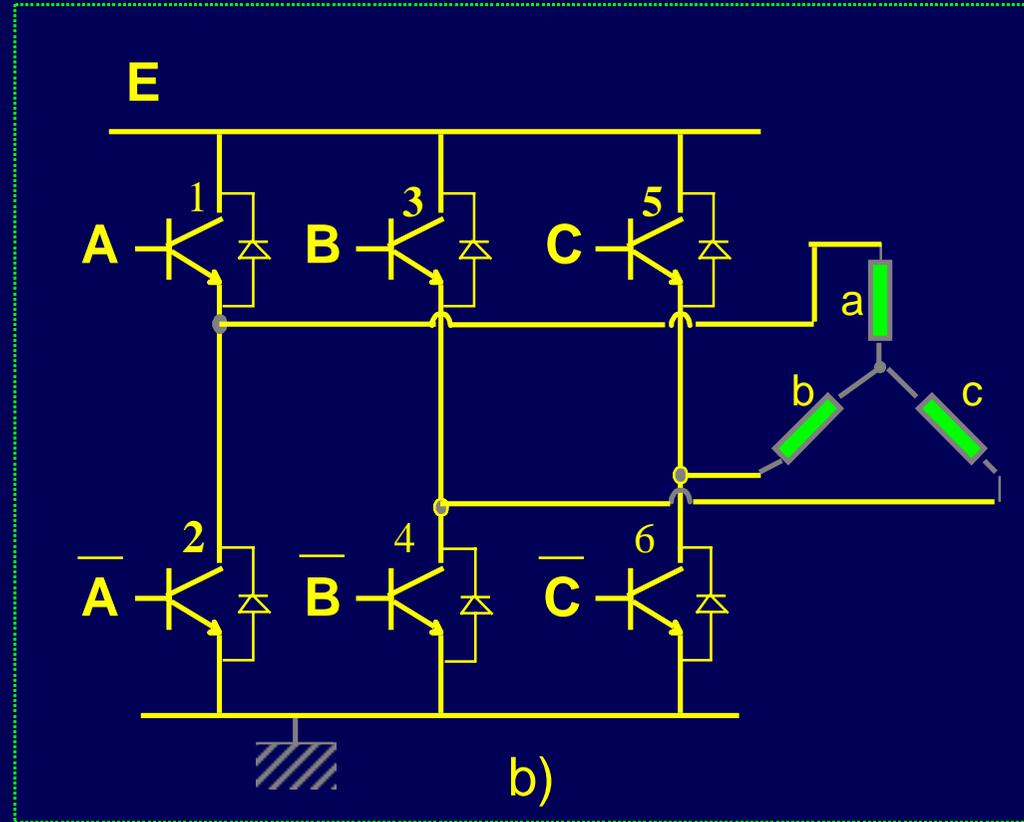


Componenti di un Azionamento

Convertitore di potenza



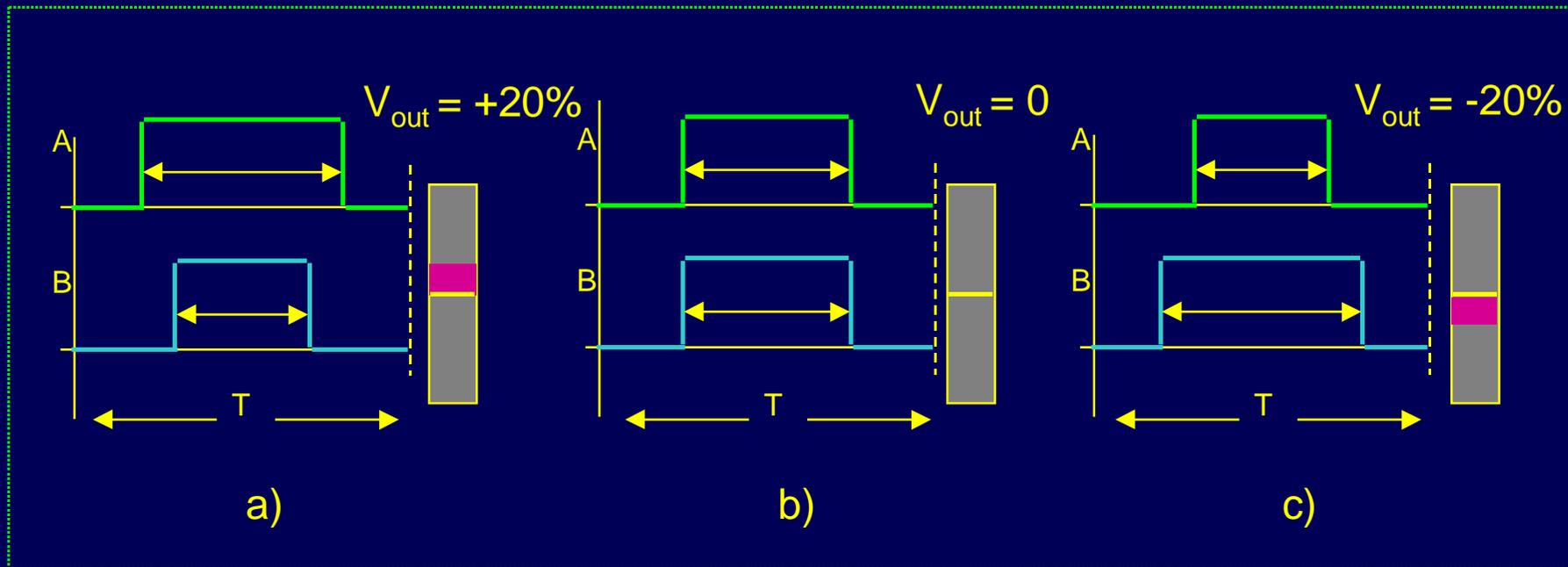
monofase



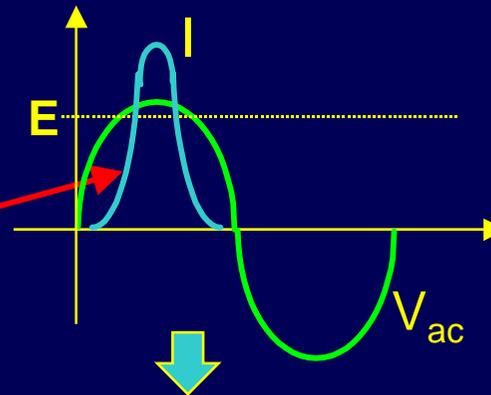
3-fase

Componenti di un Azionamento

Modulazione a larghezza di impulso (PWM)



Convertitore di Potenza

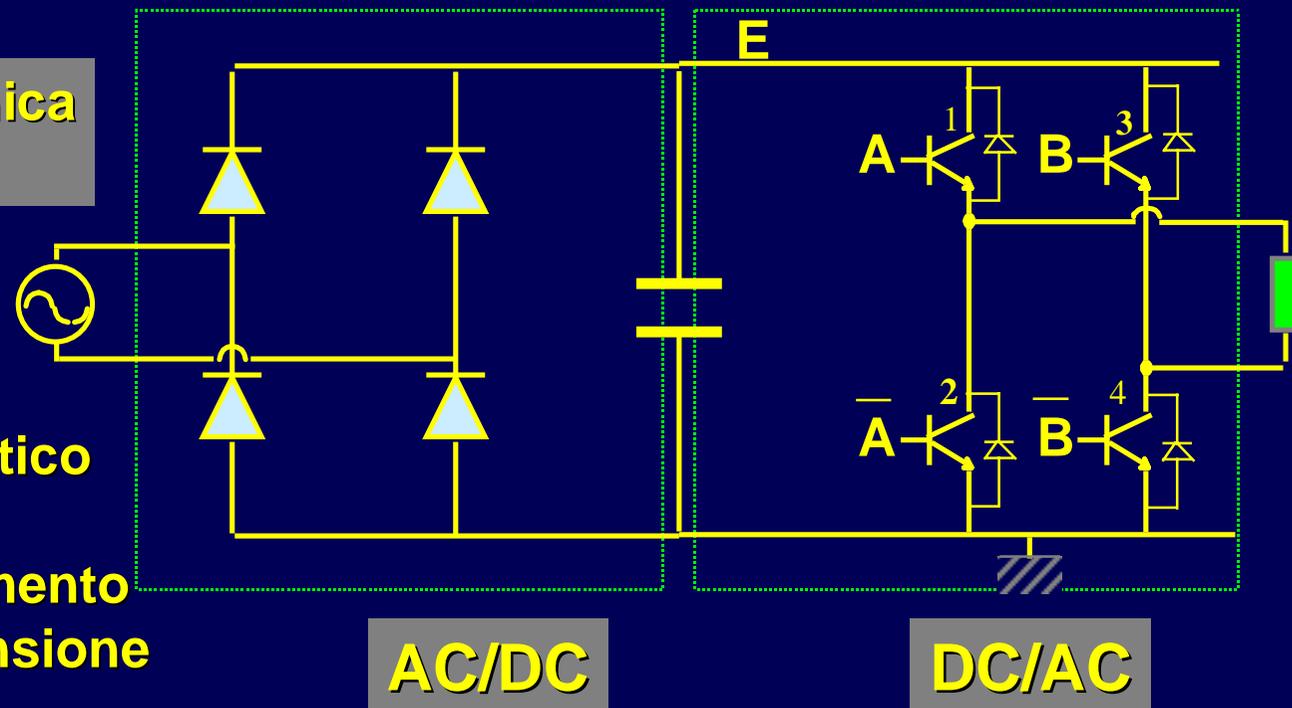


Corrente non sinusoidale

distorsione armonica
sulla rete

Problemi:

- rendimento energetico
- malfunzionamenti
- condens. di rifasamento
- trasform. media tensione



Componenti di un Azionamento

Power transistors

Tipo	Bipolare	MOS-FET	IGBT
Potenza	< 400KW	< 10KW	< 600 KW
Frequenza	5-8KHz	20-30 KHz	12-20KHz
Corrente	< 500A	< 100A	< 800A
Tensione	< 1400V	< 800V	< 1800V

Componenti di un Azionamento

Motori a riluttanza fissa

- **Motore a collettore a magneti permanenti**
 - in corrente continua
- **Motore sincrono a magneti permanenti**
 - Brushless a campo trapezoidale
 - Brushless a campo sinusoidale
- **Motore asincrono ad induzione**
 - con rotore a gabbia di scoiattolo

Motore a collettore

Pro

- Nella versione a MP è un sistema lineare
- Sistema autostabilizzante
- Alimentazione singola in continua
- Semplicità di controllo
- Molto usato in automazione

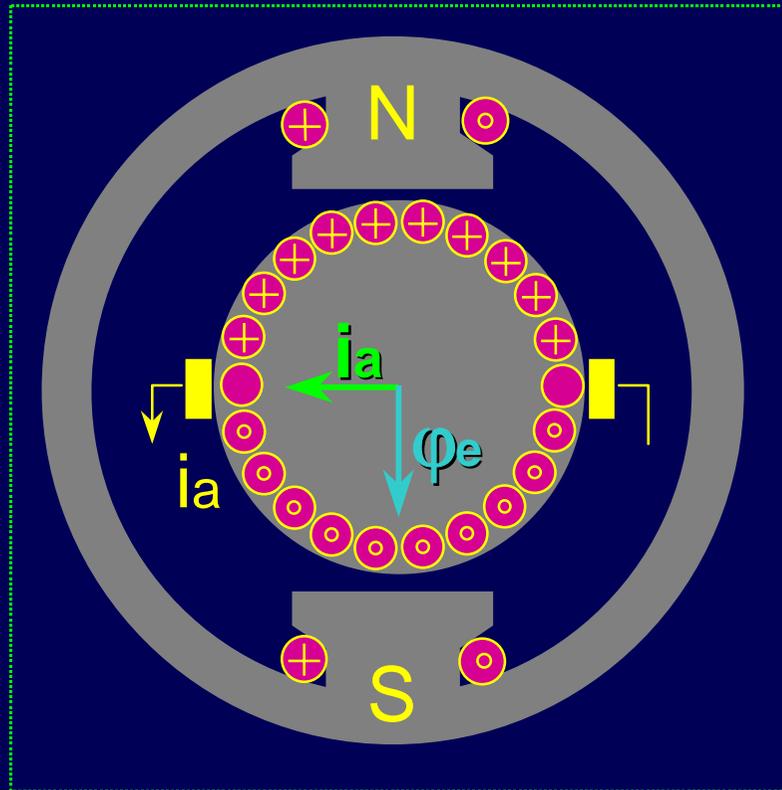
Contro

- Collettore e contatti striscianti
- Genera calore sul rotore
- Non idoneo in ambienti saturi di gas infiammabili (verniciatura)
- velocità massima fissa e limitata dalla tensione

Motore a collettore

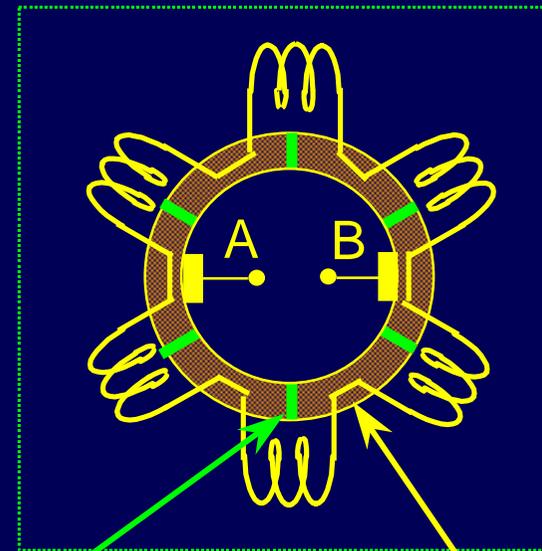
Statore

Rotore



sezione trasversale

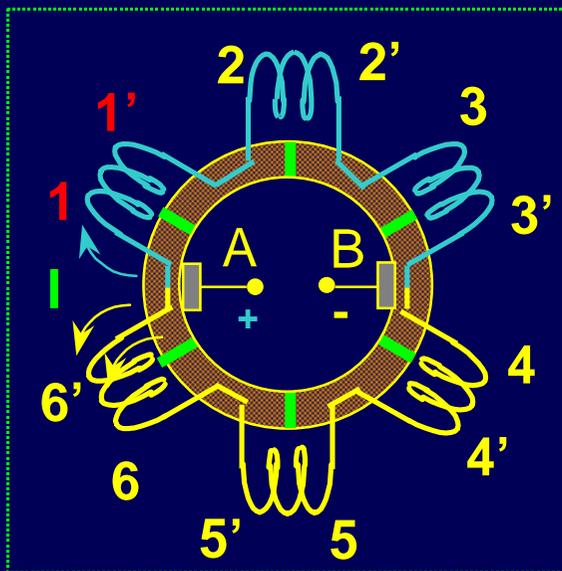
Rotore:
avvolgimenti in serie
cortocircuitati



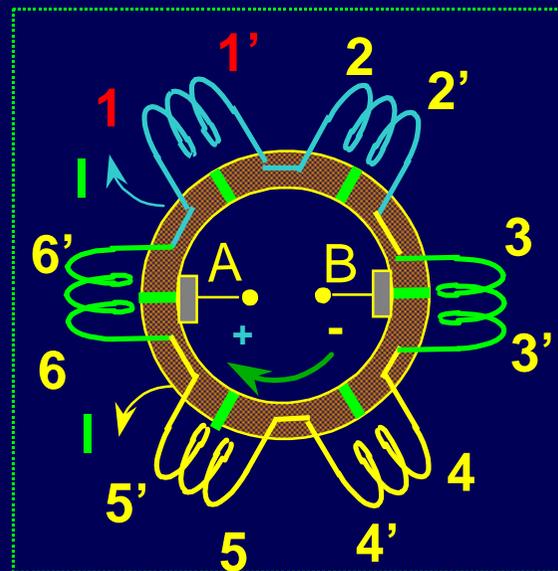
Isolante

Conduttore

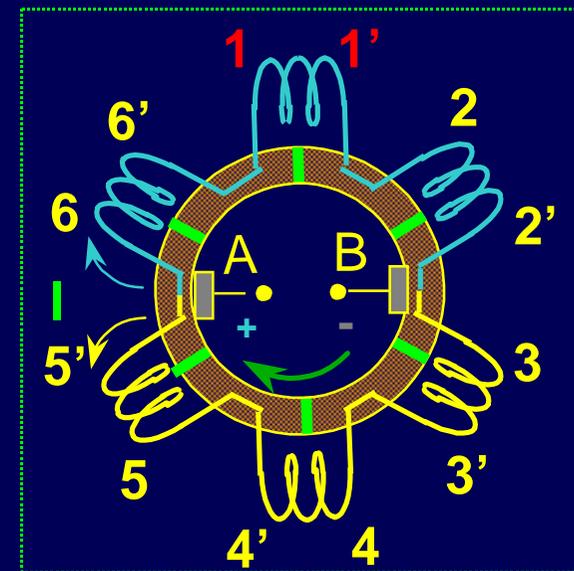
Collegamenti degli avvolgimenti di rotore Azione delle spazzole e del collettore



0°



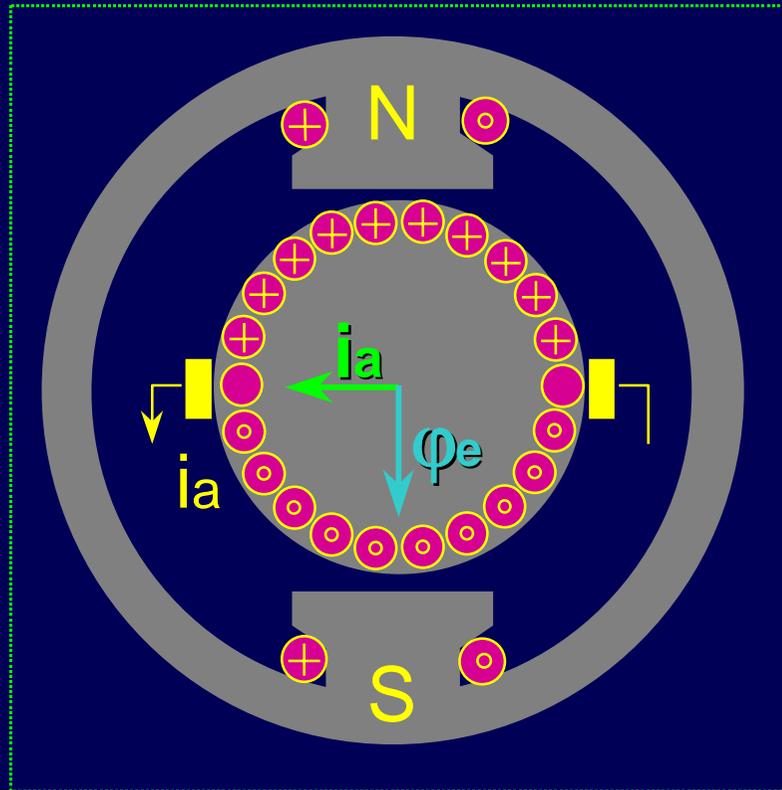
$+30^\circ$



$+60^\circ$

Motore a collettore

Caratteristiche strutturali derivanti dalla costruzione



- direzione di I_a costante
 - collettore/spazzole
- direzione di I_e costante
 - per costruzione
- valore di $I_a \Rightarrow$ variabile
- valore di ϕ_e
 - ecc. separ. \Rightarrow variabile
 - magn. perm. \Rightarrow costante

Motore a collettore - modello

Due circuiti elettrici

$$C_m = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 i_j \left. \frac{d\varphi_{cj}}{d\vartheta} \right|_{i_j = \cos t.}$$

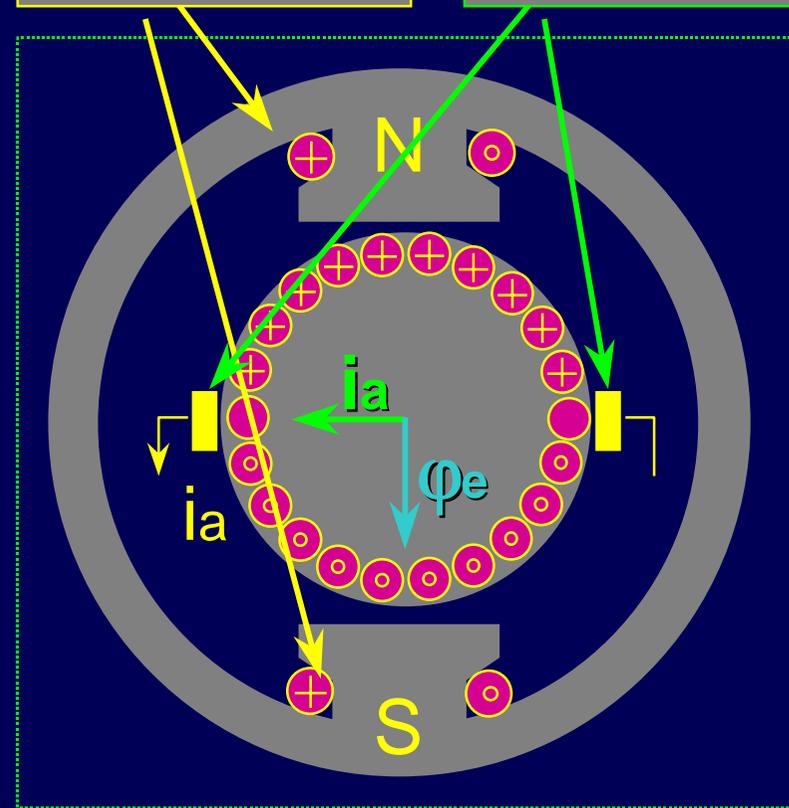
$$\frac{d\varphi_{ce}}{d\vartheta} = 0$$

$$\left. \frac{d\varphi_{ca}}{d\vartheta} \right|_{\vartheta=0} = \varphi_e$$



Eccitazione

Armatura



Coppia

F.e.m.

$$C_m = -K \varphi_e i_a$$

$$e = -K \varphi_e \omega$$

Motore a collettore - modello matematico

Armatura



$$v_a = r_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K \varphi_e \omega$$

Eccitazione



$$v_e = r_e i_e + \frac{d\varphi_e}{dt}$$

Coppia



$$c_m = -K \varphi_e i_a$$

motore con
magneti
permanenti



$$v_a = r_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_m \omega$$

$$c_m = -K_m i_a$$

Motore a collettore a MP - schema a blocchi

$$v_a - K_m \omega = r_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}$$

$$v_i = r_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}$$

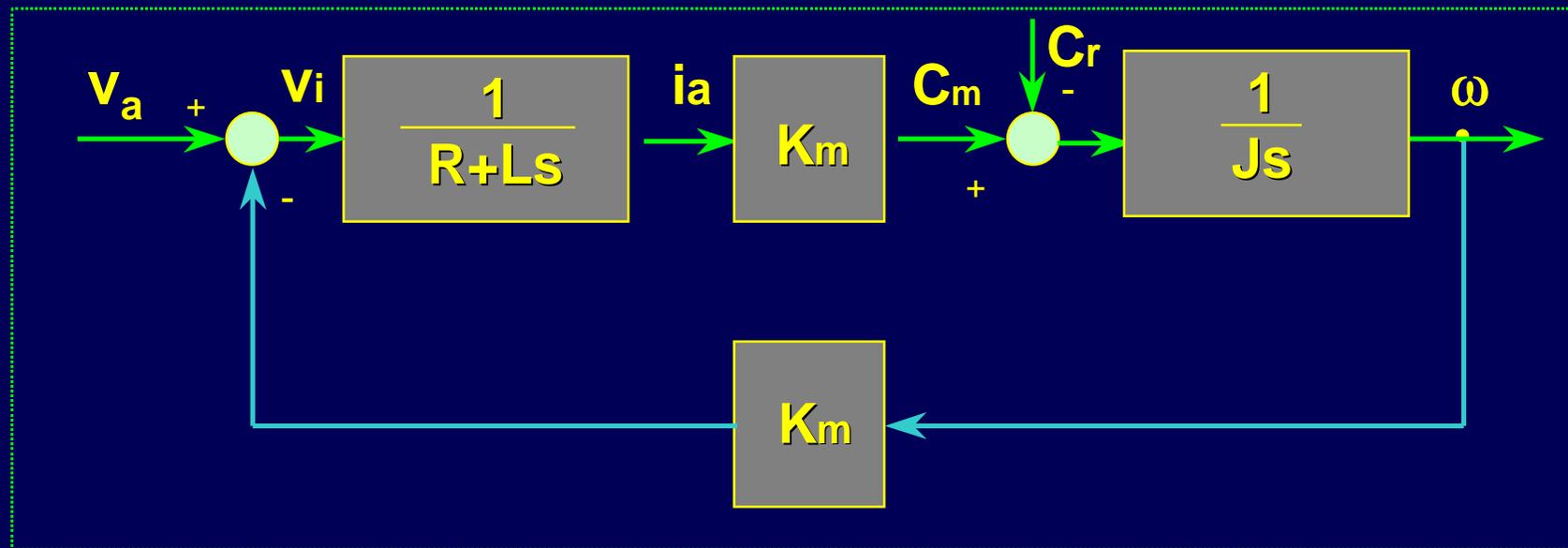
$$J \frac{d\omega}{dt} = (c_m - c_r)$$



$$v_i(s) = r_a i_a(s) + sL_a i_a(s)$$

$$c_m = -K_m i_a$$

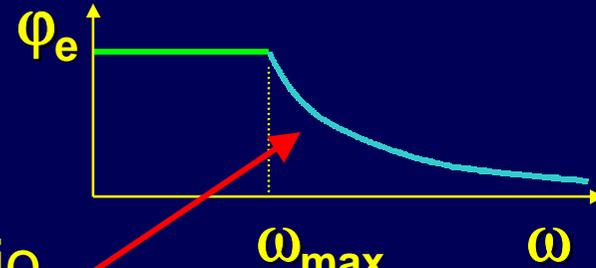
$$J\omega s = (c_m - c_r)$$



Motore a collettore - Velocità massima di rotazione

$$v_a - K\varphi_e\omega = r_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}$$

se $\omega = \frac{v_a}{K\varphi_e} = \omega_{\max}$

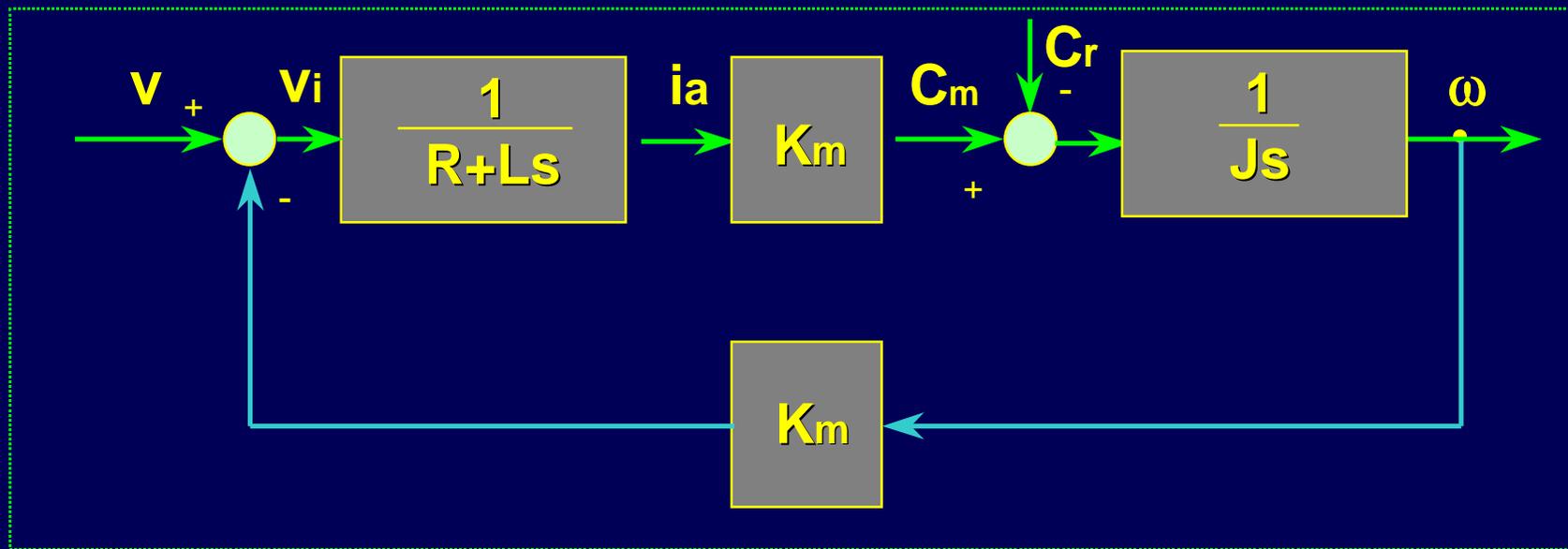


deflussaggio
non con MP

$v_i = 0 \Rightarrow C_m = 0$

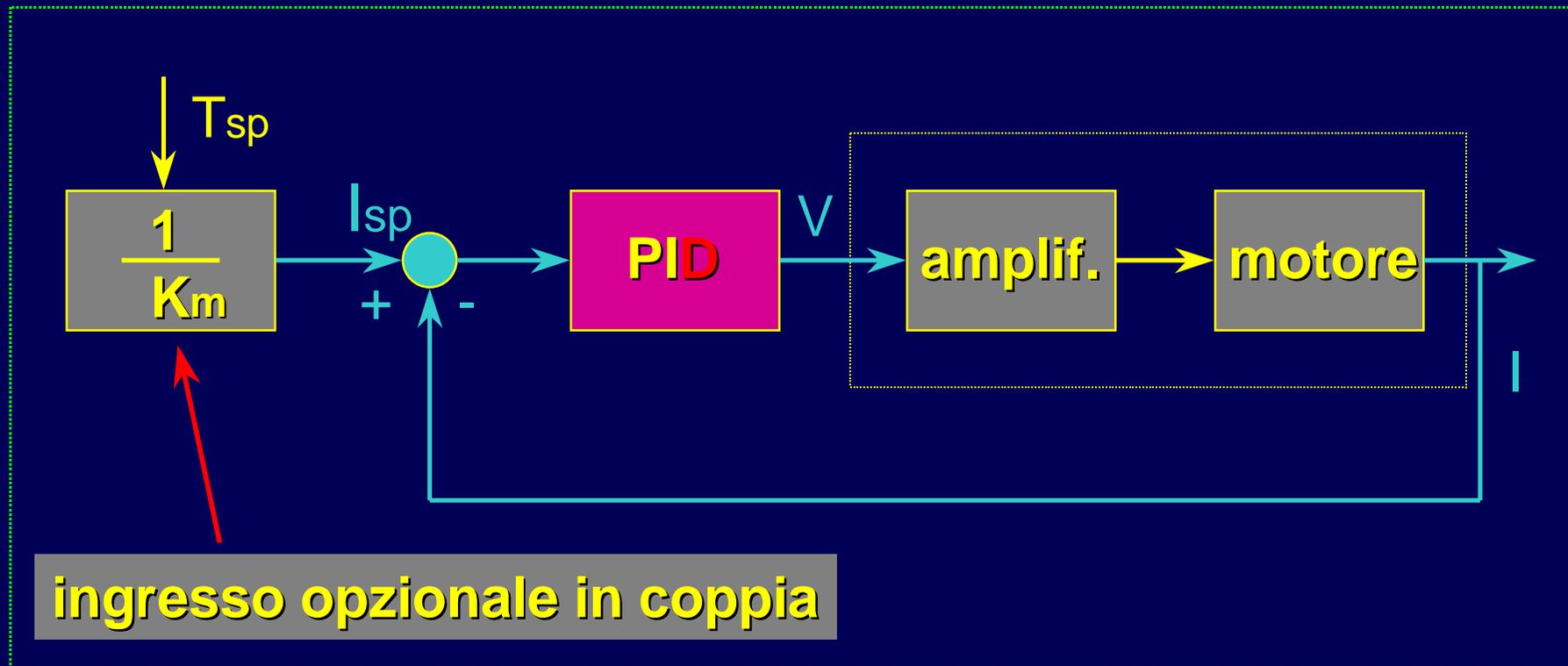
$\omega < \omega_{\max}$

ω può essere $> \omega_{\max}$



Azionamenti per motore c.c. a M.P.

Controllo di coppia = controllo di corrente



Sincrono a Magneti Permanenti - Brushless

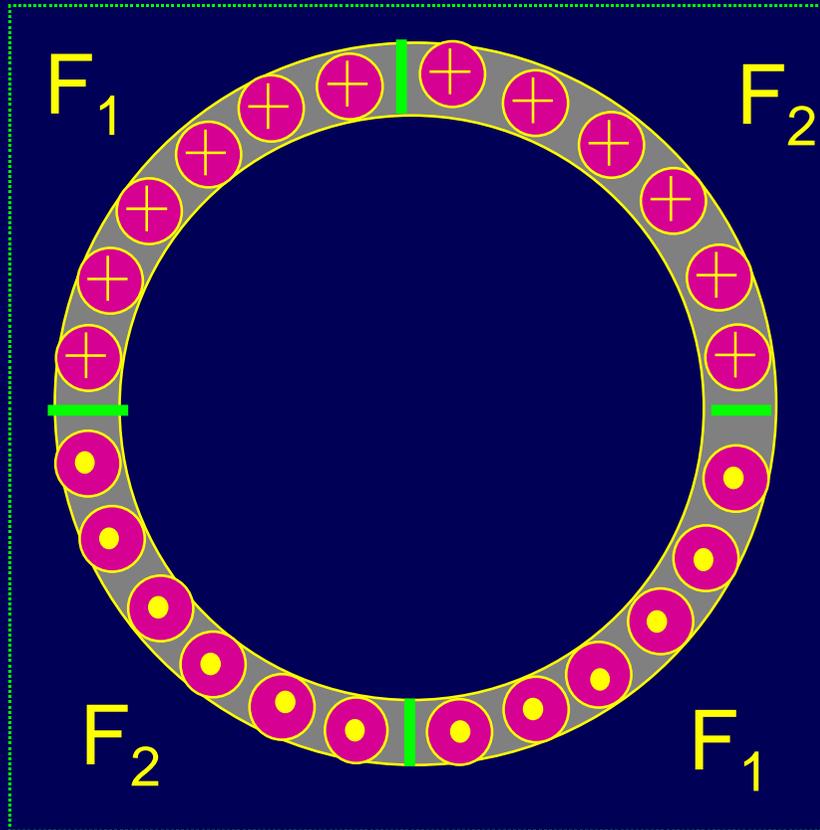
Pro

- elevati:
 - rapporto potenza/peso
 - affidabilità
 - capacità di sovraccarico
 - velocità massima
- assenza di spazzole
- bassa inerzia
 - elevate accelerazioni
- calore solo sullo statore
- la potenza fornita genera solo coppia e non campo
- funzionamento in ambiente ostile

Contro

- costo relativamente elevato
- problemi
 - alle alte temperature (smagnetizzazione)
 - in ambienti con presenza di polveri ferromagnetiche.
- velocità massima limitata dalla tensione
 - limitata extravelocità con azionamento vettoriale

Sincrono a Magneti Permanenti (Brushless)



- Sezione dello statore di un motore bifase a due poli

F1 ⇒ fase #1

F2 ⇒ fase #2

Tutto quanto ricavato nel seguito vale anche per motori trifase con neutro inaccessibile

Sincrono a Magneti Permanenti (Brushless)

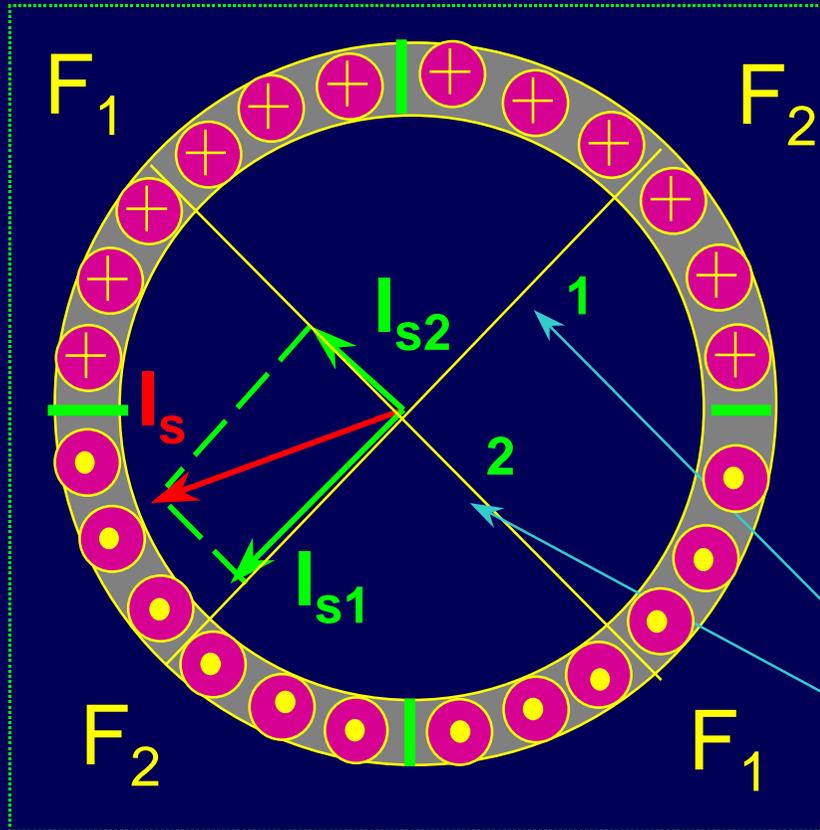
Diagramma vettoriale delle correnti di fase (I_{s1} , I_{s2}) e della loro risultante I_s

Se:

$$I_{s1} = IM \sin \omega t$$

$$I_{s2} = IM \cos \omega t$$

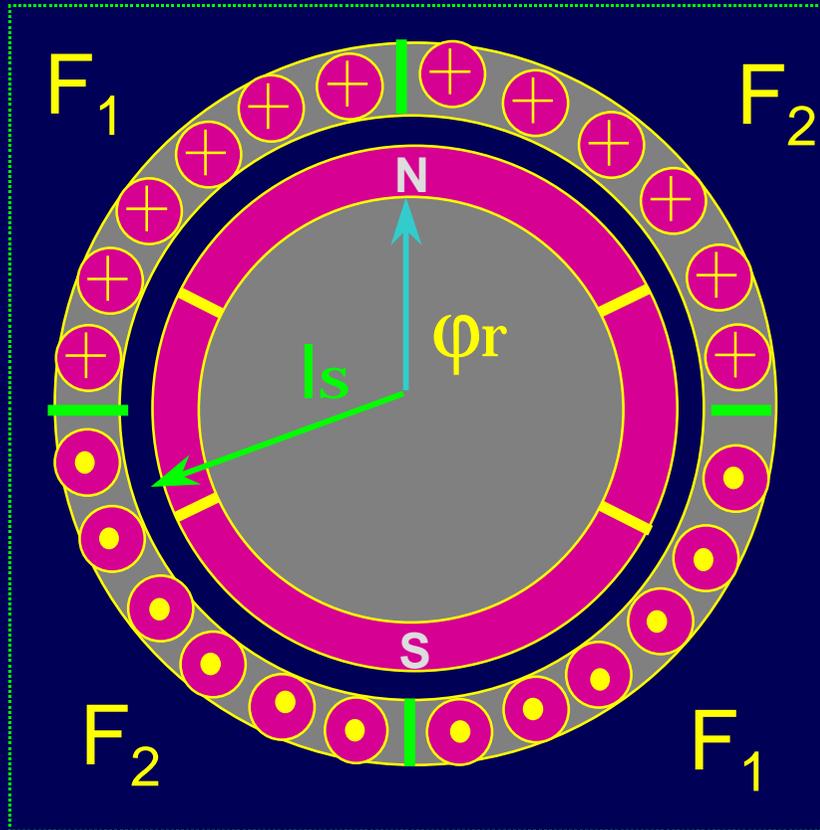
$$\Rightarrow I_s = 1.41 IM \cos(\omega t - \pi/4)$$



assi delle spire equivalenti ai due avvolgimenti di statore

Sincrono a Magneti Permanenti (Brushless)

Sezione del motore completo



■ Struttura opposta al motore a collettore

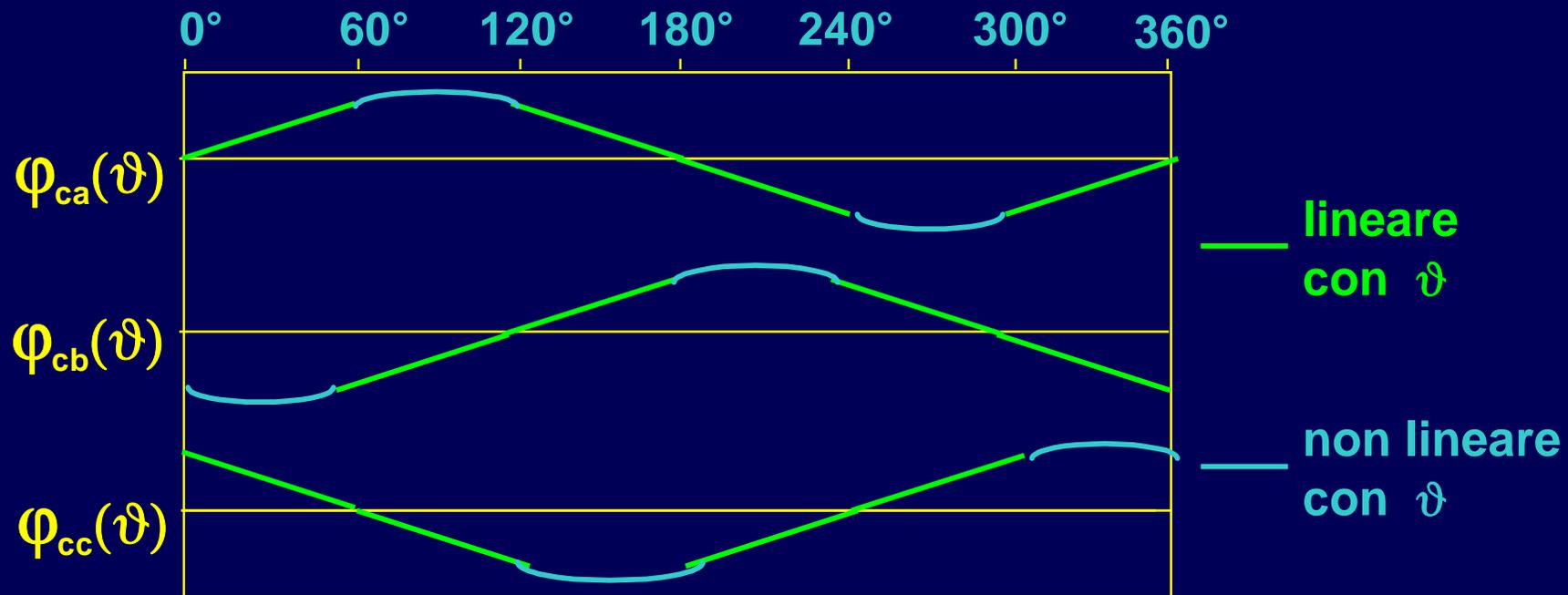
- magneti permanenti sul rotore
- avvolgimenti sullo statore

■ brushless

- senza spazzole
 - tutti i motori AC sono Brushless

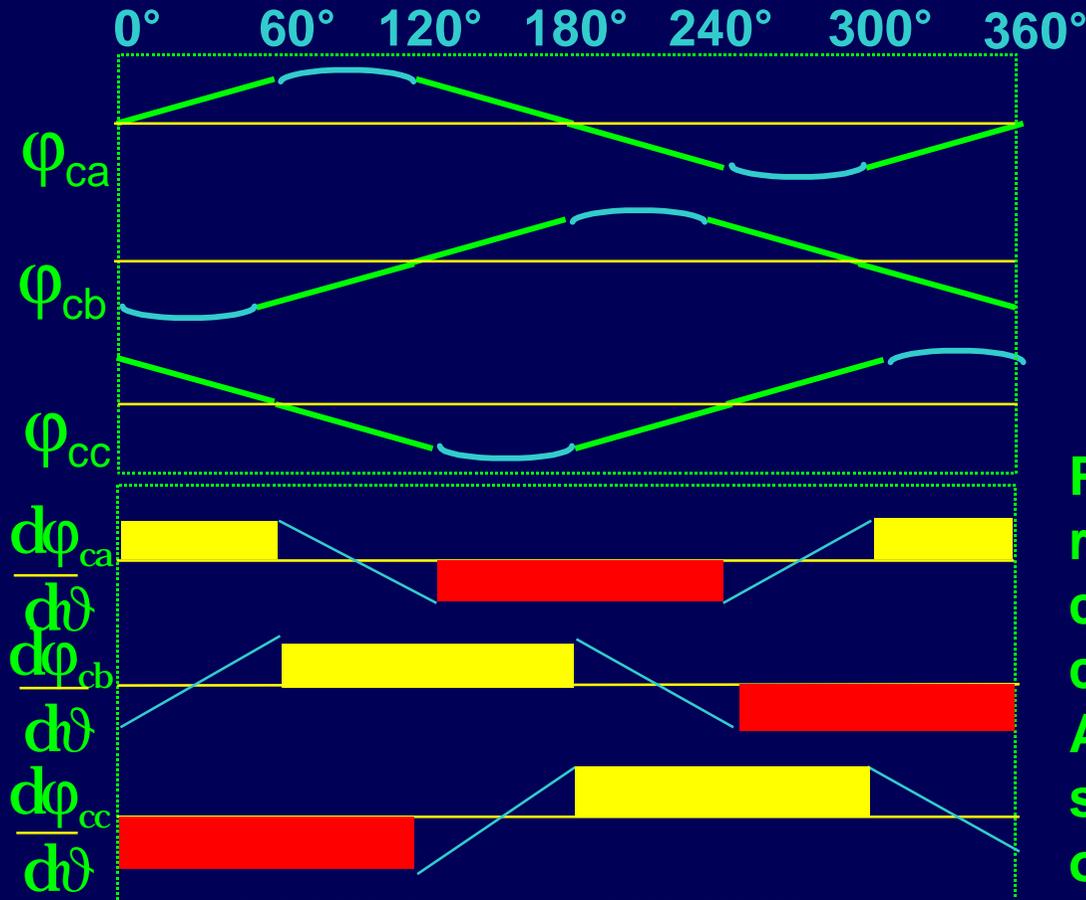
Brushless a campo trapezoidale

Realizzazione a campo trapezoidale \Rightarrow almeno tre fasi



andamento del flusso concatenato (φ_c)
a corrente costante

Brushless a campo trapezoidale



$$C_m = \sum_{j=1}^n i_j \left. \frac{d\varphi_{cj}}{d\vartheta} \right|_{i_j = \cos t.}$$



Per ogni fase ci sono due regioni ■ ■ nelle quali, con corrente costante, la coppia è costante. Alternando le fasi ed i segni delle correnti si può ottenere coppia costante sul giro.

Brushless a campo trapezoidale

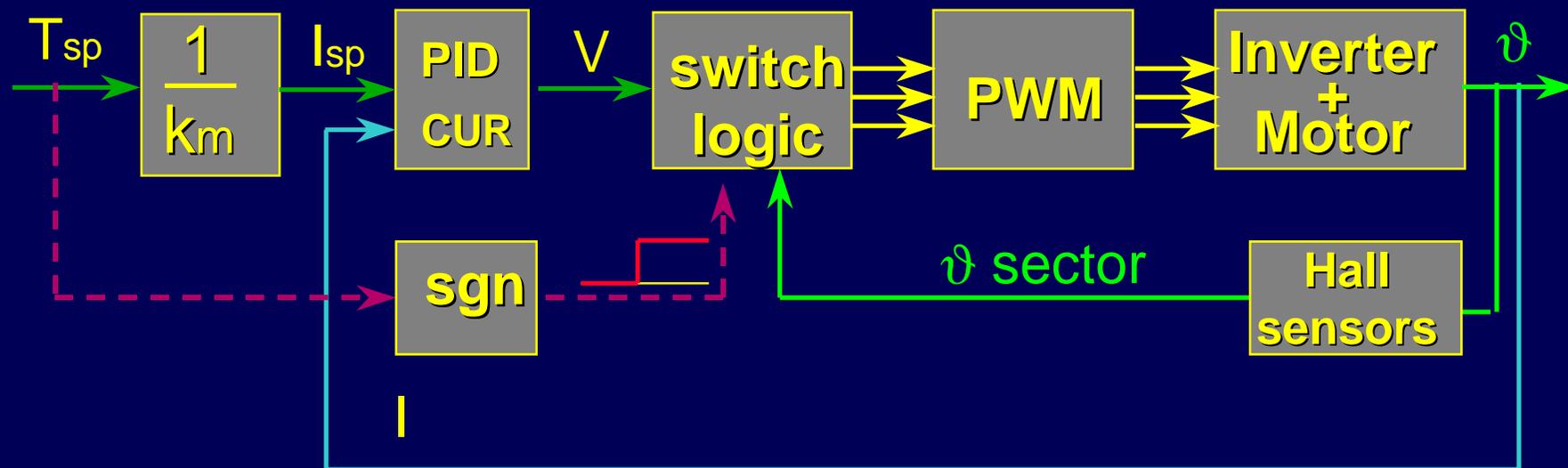
Caratteristiche principali

- **Progettato per fornire f.c.e.m. trapezoidale**
 - sottoutilizzo in termini di inerzia, rendimento e peso
- **La presenza della induttanza di statore impedisce alla corrente di commutare in tempo nullo**
 - ondulazione di coppia
- **Dispositivo per la misura della posizione semplice ed economico**
- **Primo tipo di Brushless in commercio (SIEMENS)**
- **Applicazioni fino a qualche centinaia di Watt**
- **periferiche per calcolatori**

Azionamenti per motore sincrono a M.P

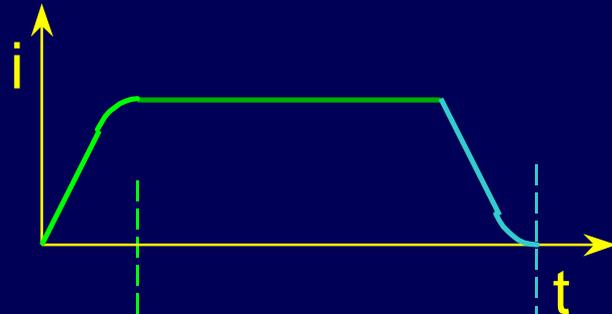
controllo di coppia \Rightarrow controllo di corrente
schema per pilotaggio di fase singola

Problemi nelle commutazioni di settore
la corrente di fase evolve con dinamica $\neq 0$



Azionamenti per motore sincrono a M.P

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{1}{L}(v - e)$$



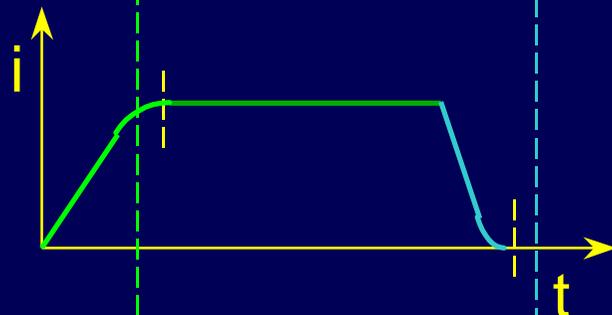
**bassa
velocità**

$$\omega \approx 0$$

$$e \approx 0$$

$$\frac{di^+}{dt} \approx +\frac{E}{L}$$

$$\frac{di^-}{dt} \approx -\frac{E}{L}$$



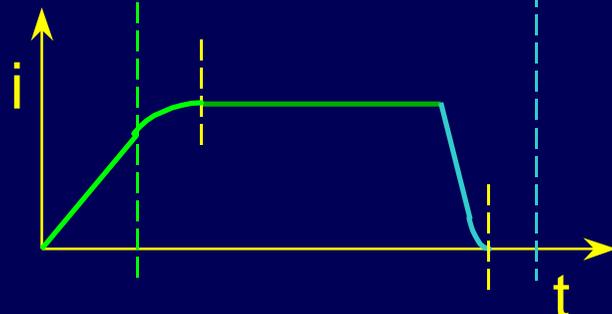
**media
velocità**

$$\omega \approx \omega_{\max}/2$$

$$e \approx E/2$$

$$\frac{di^+}{dt} \approx +\frac{E}{2L}$$

$$\frac{di^-}{dt} \approx -\frac{3E}{2L}$$



**alta
velocità**

$$\omega \approx \omega_{\max}$$

$$e \approx E$$

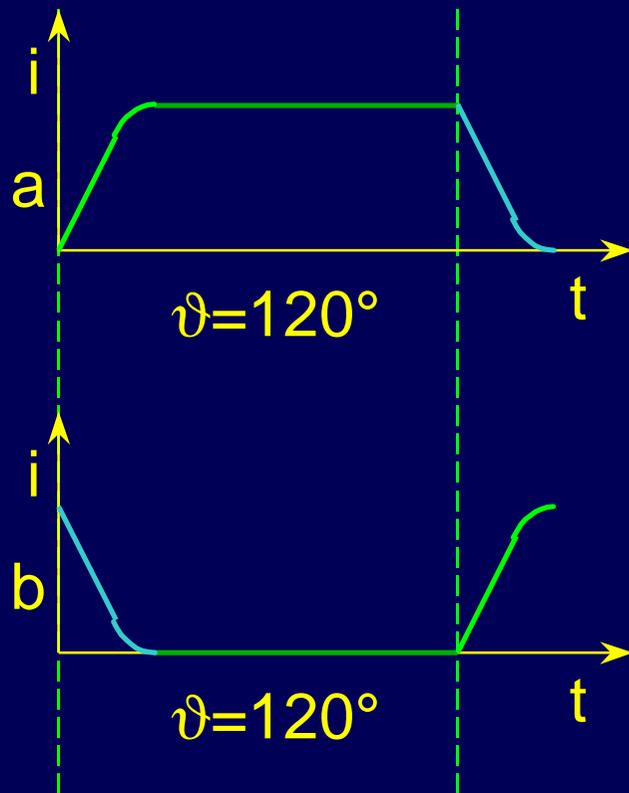
$$\frac{di^+}{dt} \ll +\frac{E}{L}$$

$$\frac{di^-}{dt} \approx -\frac{2E}{L}$$

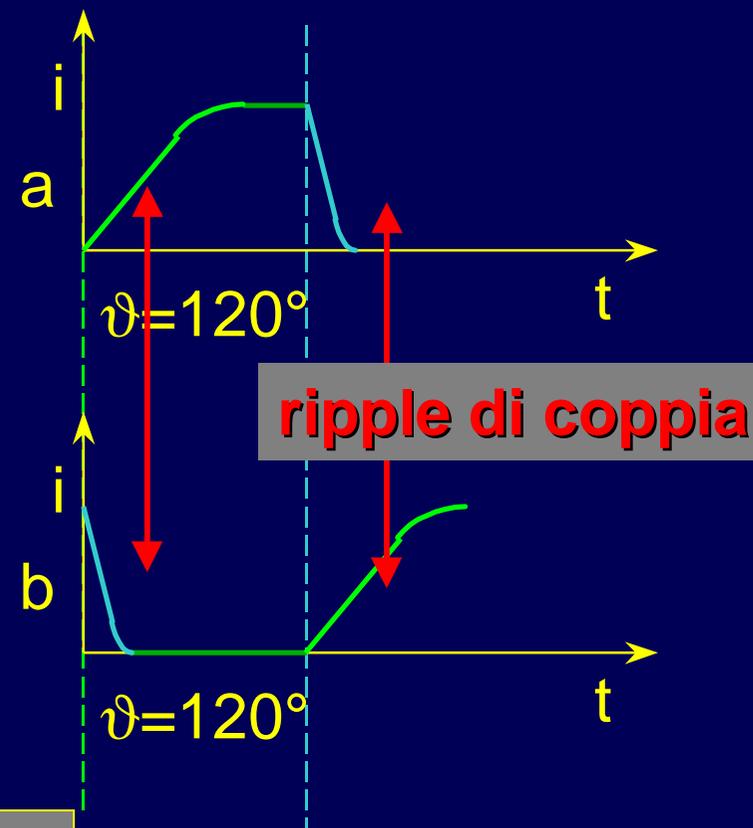
Azionamenti per motore sincrono a M.P

Effetti dinamici della correnti sulle commutazioni

A bassa velocità



Ad alta velocità



controllo di corrente per ogni fase

Brushless a campo sinusoidale - modello

Due circuiti elettrici



fase 1

fase 2

$$v_{\alpha} = Ri_{\alpha} + \frac{d\varphi_{c\alpha}}{dt}$$

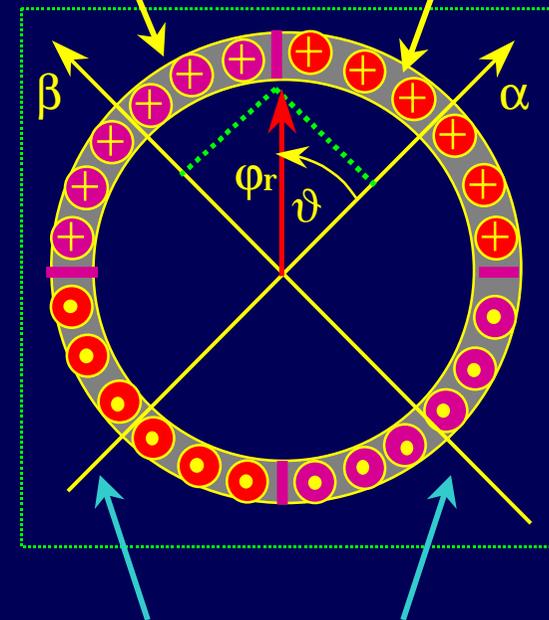
$$v_{\beta} = Ri_{\beta} + \frac{d\varphi_{c\beta}}{dt}$$

$$\varphi_{c\alpha} = \varphi_{\alpha} + \varphi_r \cos \vartheta$$

$$\varphi_{c\beta} = \varphi_{\beta} + \varphi_r \sin \vartheta$$

$$v_{\alpha} = Ri_{\alpha} + \frac{d\varphi_{\alpha}}{dt} - \omega * \varphi_r \sin \vartheta$$

$$v_{\beta} = Ri_{\beta} + \frac{d\varphi_{\beta}}{dt} + \omega * \varphi_r \cos \vartheta$$



assi magnetici delle fasi

Per ricavare la coppia si calcola la potenza assorbita dal motore come

$$v_{\alpha} * i_{\alpha} + v_{\beta} * i_{\beta} = P_A = P_{Diss} + P_{Im\ m} + P_{Mecc}$$

Brushless a campo sinusoidale - modello

Due circuiti elettrici



fase 1

fase 2

$$v_\alpha * i_\alpha + v_\beta * i_\beta = P_A = P_{Diss} + P_{Imm} + P_{Mecc}$$

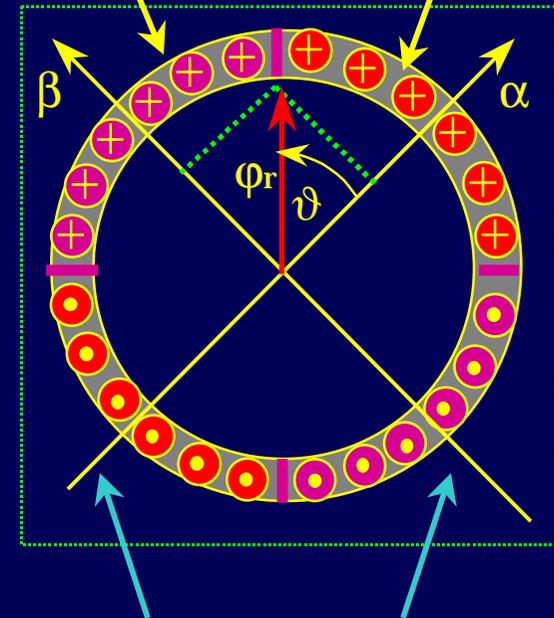
$$P_{Diss} = Ri_\alpha^2 + Ri_\beta^2$$

$$P_{Imm} = \frac{d\varphi_\alpha}{dt} i_\alpha + \frac{d\varphi_\beta}{dt} i_\beta$$

$$P_{Mecc} = \omega * \varphi_r (-i_\alpha * \sin\vartheta + i_\beta * \cos\vartheta)$$



$$C_m = k_c (-i_\alpha * \sin\vartheta + i_\beta * \cos\vartheta)$$



assi magnetici delle fasi

Brushless a campo sinusoidale - modello

Due circuiti elettrici



fase 1

fase 2

$$C_m = k_c (-i_\alpha * \sin \vartheta + i_\beta * \cos \vartheta)$$

se $I_1 = I_m \cos \alpha$ $I_2 = I_m \sin \alpha$



$$c_m = k_c * I_m (-\cos \alpha \sin \vartheta + \sin \alpha \cos \vartheta)$$

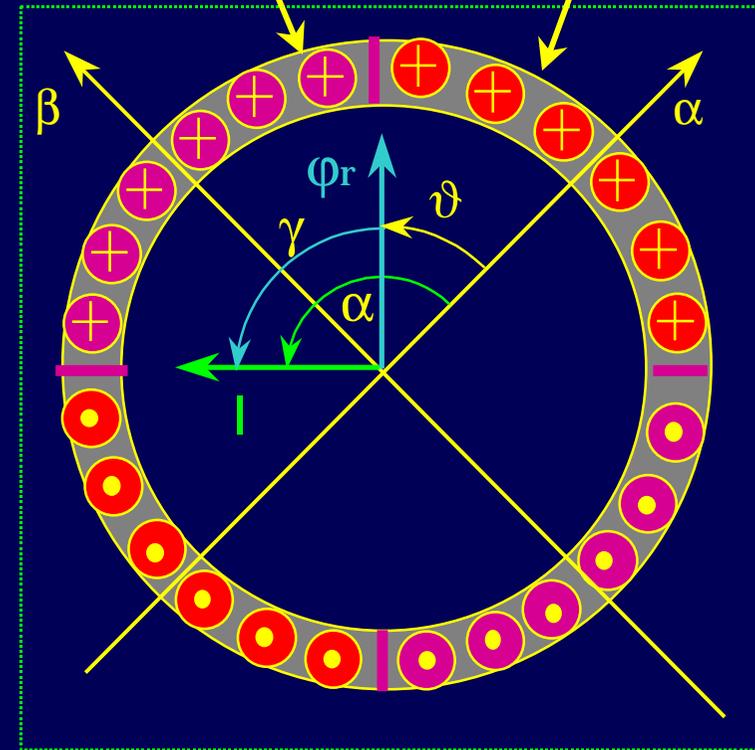
$$c_m = k_c * I_m \sin(\alpha - \vartheta)$$

se $\alpha = \vartheta + \gamma$

$$c_m = k_c * I_m \sin \gamma$$

c_m costante solo se α e ϑ ruotano sincroni

$c_m = c_{mmax}$ per una data I_m se $\gamma = \pm\pi/2$



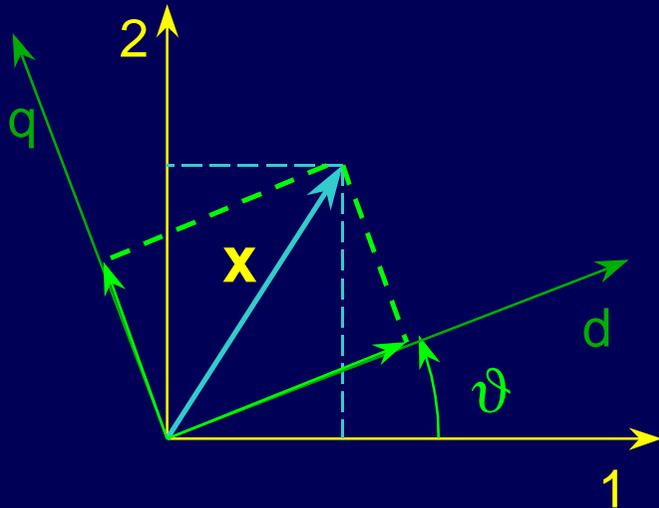
Brushless bifase a campo sinusoidale - modello

Equazioni del motore

$$\frac{di_{\alpha}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{\alpha} + \left(\frac{\varphi_r}{L} \sin \vartheta\right)\omega + \frac{v_{\alpha}}{L}$$

$$\frac{di_{\beta}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{\beta} - \left(\frac{\varphi_r}{L} \cos \vartheta\right)\omega + \frac{v_{\beta}}{L}$$

$$c_m = k_c (-i_1 \sin \vartheta + i_2 \cos \vartheta)$$



riferimento fisso di statore



grandezze sinusoidali



Riferimento rotante sincrono



grandezze continue

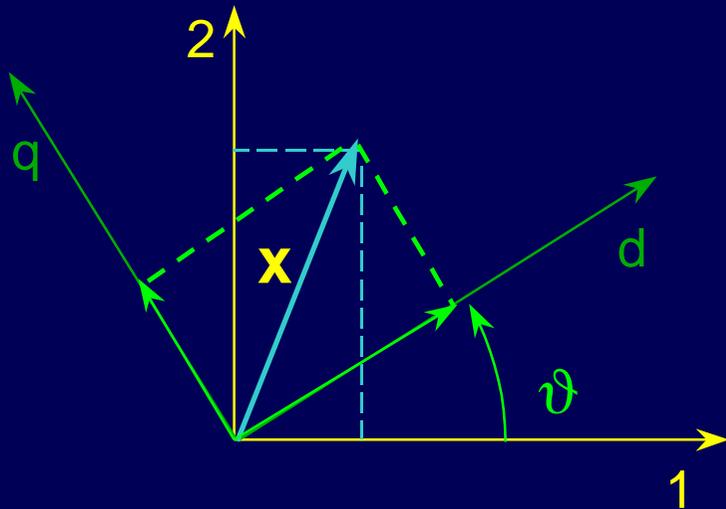
Brushless bifase a campo sinusoidale - modello

Equazioni del motore

$$\frac{di_{\alpha}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{\alpha} + \left(\frac{\varphi_r}{L} \sin \vartheta\right)\omega + \frac{v_{\alpha}}{L}$$

$$\frac{di_{\beta}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{\beta} - \left(\frac{\varphi_r}{L} \cos \vartheta\right)\omega + \frac{v_{\beta}}{L}$$

$$c_m = k_c (-i_1 \sin \vartheta + i_2 \cos \vartheta)$$



riferimento fisso di statore



grandezze sinusoidali



Riferimento rotante sincrono



grandezze continue

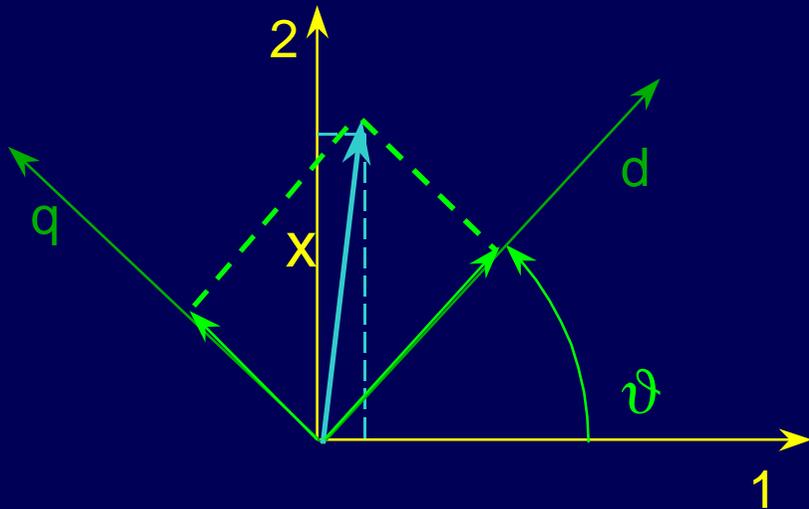
Brushless bifase a campo sinusoidale - modello

Equazioni del motore

$$\frac{di_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L}i_\alpha + \left(\frac{\varphi_r}{L}\sin\vartheta\right)\omega + \frac{v_\alpha}{L}$$

$$\frac{di_\beta}{dt} = -\frac{R}{L}i_\beta - \left(\frac{\varphi_r}{L}\cos\vartheta\right)\omega + \frac{v_\beta}{L}$$

$$c_m = k_c (-i_1 \sin\vartheta + i_2 \cos\vartheta)$$



riferimento fisso di statore



grandezze sinusoidali



Riferimento rotante sincrono



grandezze continue

Brushless bifase a campo sinusoidale - modello

Equazioni del motore

$$\frac{di_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L}i_\alpha + \left(\frac{\varphi_r}{L} \sin \vartheta\right)\omega + \frac{v_\alpha}{L}$$

$$\frac{di_\beta}{dt} = -\frac{R}{L}i_\beta - \left(\frac{\varphi_r}{L} \cos \vartheta\right)\omega + \frac{v_\beta}{L}$$

$$c_m = k_c (-i_1 \sin \vartheta + i_2 \cos \vartheta)$$

modello nel
riferimento fisso di statore



grandezze sinusoidali

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + \omega i_q + \frac{1}{L}v_d$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - \omega i_d - \frac{k_e \omega}{L} + \frac{1}{L}v_q$$

$$c_m = k_c * i_q$$

modello nel
riferimento rotante di flusso



grandezze continue

non linearità

f.e.m.

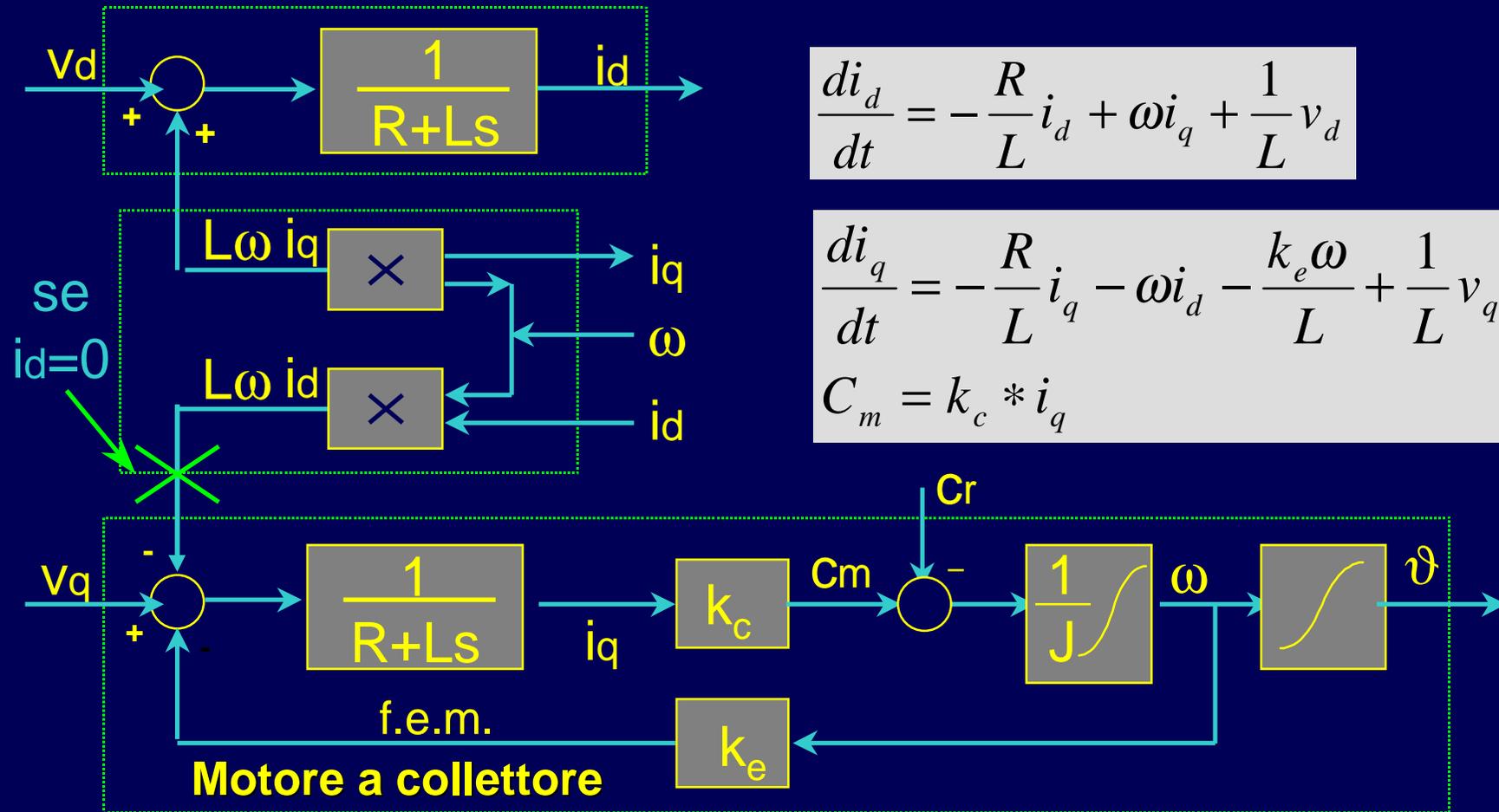
Brushless a campo sinusoidale - modello

I motori industriali sono tutti trifase

- le equazioni del motore trifase (a,b,c) si trasformano nelle stesse equazioni già viste per il motore bifase (1,2) sostituendo alle induttanze di fase L le induttanze equivalenti (L-M)
 - M è la mutua induttanza tra due fasi
- La deduzione successiva delle equazioni nel riferimento (d-q) è la medesima

Brushless sinusoidale

Schema a blocchi



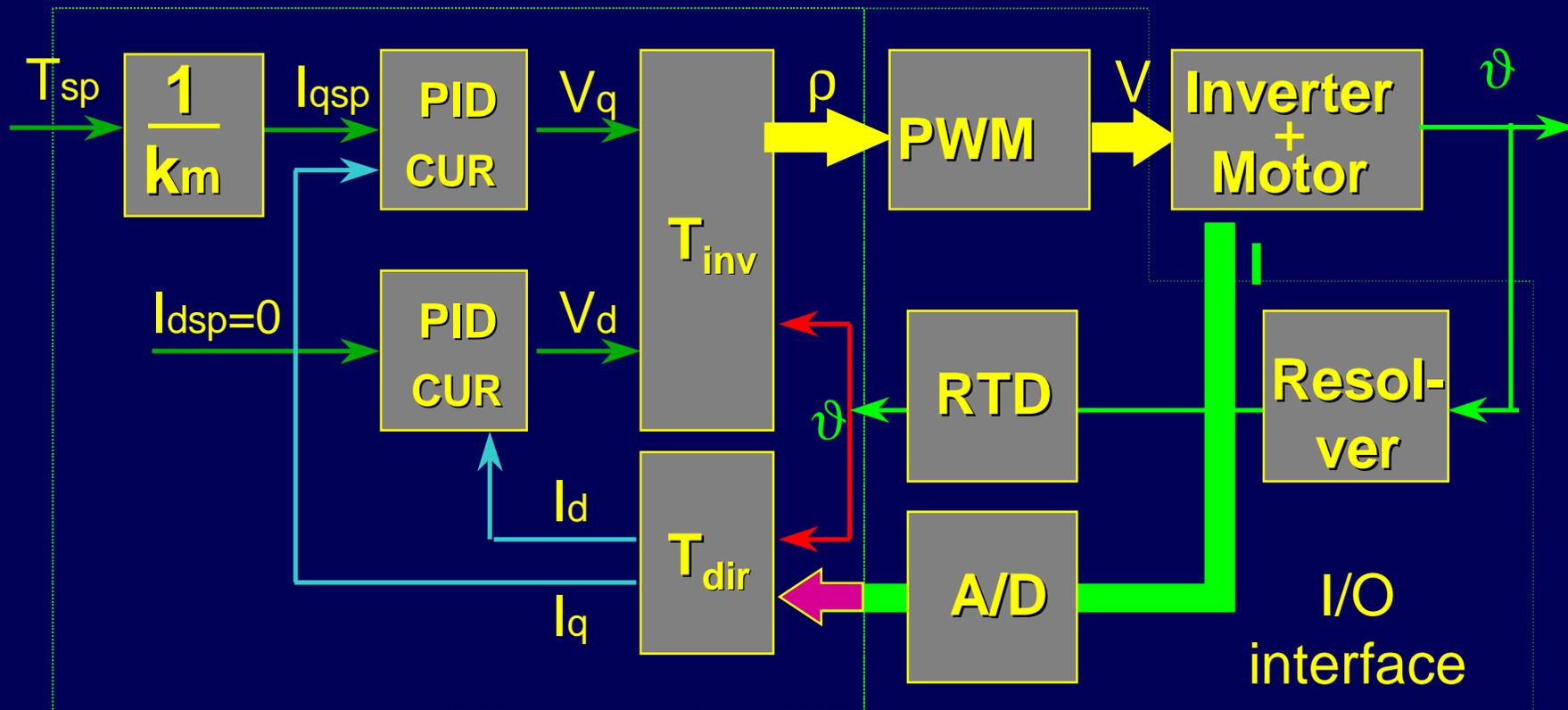
$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + \omega i_q + \frac{1}{L}v_d$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - \omega i_d - \frac{k_e \omega}{L} + \frac{1}{L}v_q$$

$$C_m = k_c * i_q$$

Azionamenti per motore sincrono a M.P.

AC Brushless - campo sinusoidale Controllo ad orientamento di campo (Vettoriale)



Azionamenti per motore sincrono a M.P.

AC Brushless - campo sinusoidale

Controllo Vettoriale

- **Occorre un sensore continuo di posizione**
 - ➔ Resolver
- **elevata complessita' computazionale**
- **linearizzazione dei loop di corrente**
- **massime prestazioni dinamiche**
- **velocita' un poco superiore a quella nominale**
- **ottime prestazioni a tutte le velocità (coppia da fermo)**
- **possibilità di cogging a bassa velocità**

Azionamenti

Elettrici

Parte 2

**Tipologie dei motori
e relativi azionamenti:**

**Motori a collettore
e Sincroni**

FINE

Prof. Alberto Tonielli

DEIS - Università di Bologna

Tel. 051-6443024

E-mail: atonielli@deis.unibo.it