

Azionamenti

Elettrici

Parte 1

**Generazione del moto
mediante
motori elettrici**

Prof. Alberto Tonielli

DEIS - Università di Bologna

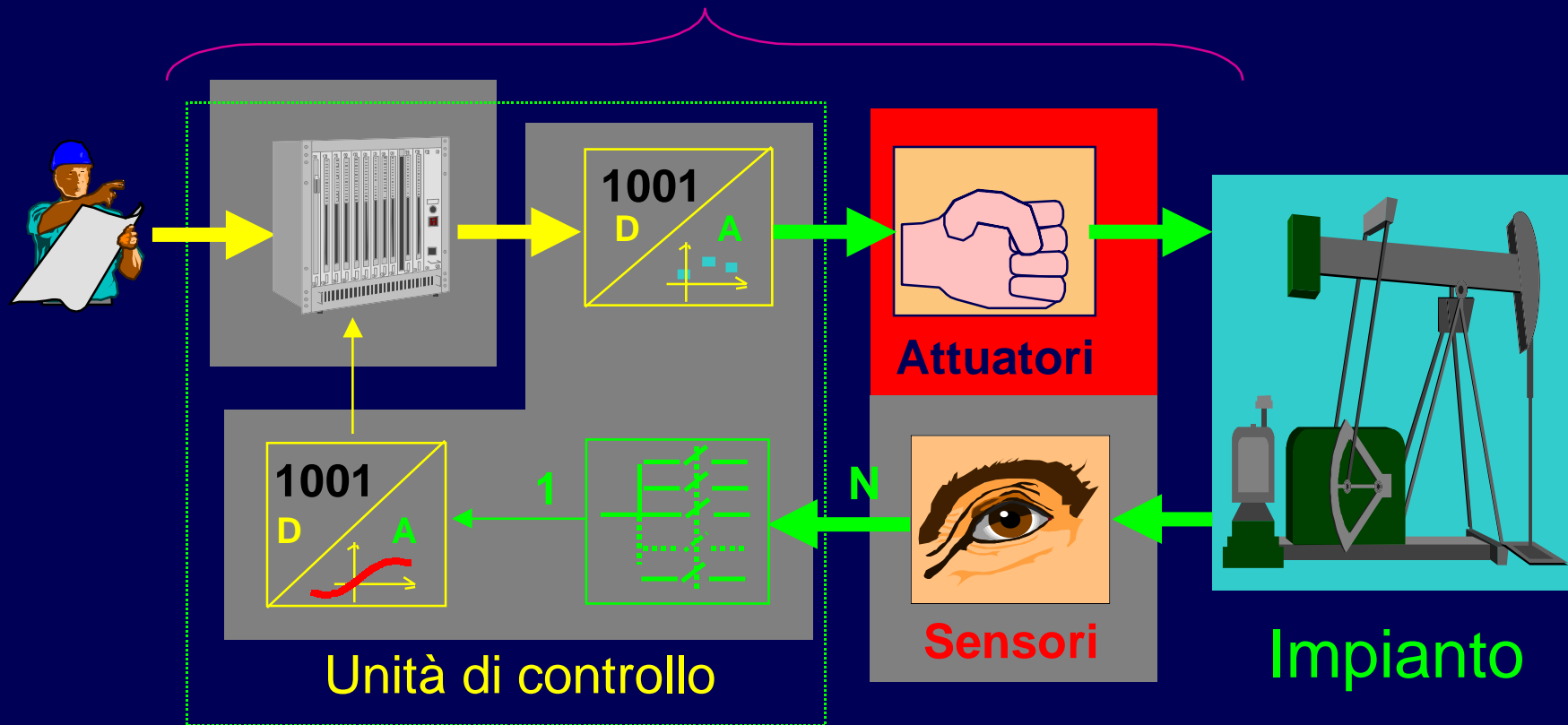
Tel. 051-6443024

E-mail: atonielli@deis.unibo.it

Collocazione del corso

Schema tecnologico di un sistema di controllo

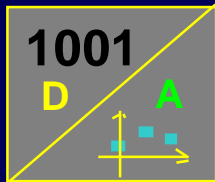
Compatibilità Elettromagnetica



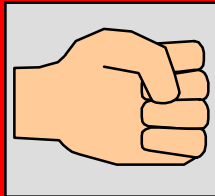
Corso di Ingegneria e Tecnologie dei Sistemi di Controllo



Caratteristiche generali dei sensori
Sensori ad uscita analogica
Sensori ad uscita logica



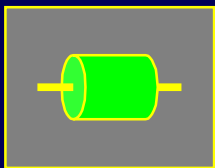
Condizionamento e conversione dei segnali
Amplificatori, convertitori, isolatori



Azionamenti Elettrici
Tipologie di motori ed algoritmi di controllo
Scelta e dimensionamento



Progettazione del software di Automazione
Standard IEC 1131
Messa in scala di algoritmi digitali



Compatibilità Elettromagnetica
Normative, principi e metodi

Indice generale del modulo Azionamenti

■ Parte 1

- Introduzione
- Generazione elettromagnetica di coppia

■ Parte 2

- Tipologie dei motori elettrici e dei relativi azionamenti
 - Motori ed azionamenti C.C.
 - Motori ed azionamenti Brushless
 - Motori ed azionamenti Asincroni ad Induzione
 - Motori passo-passo e coppia

■ Parte 3

- Controllo assi

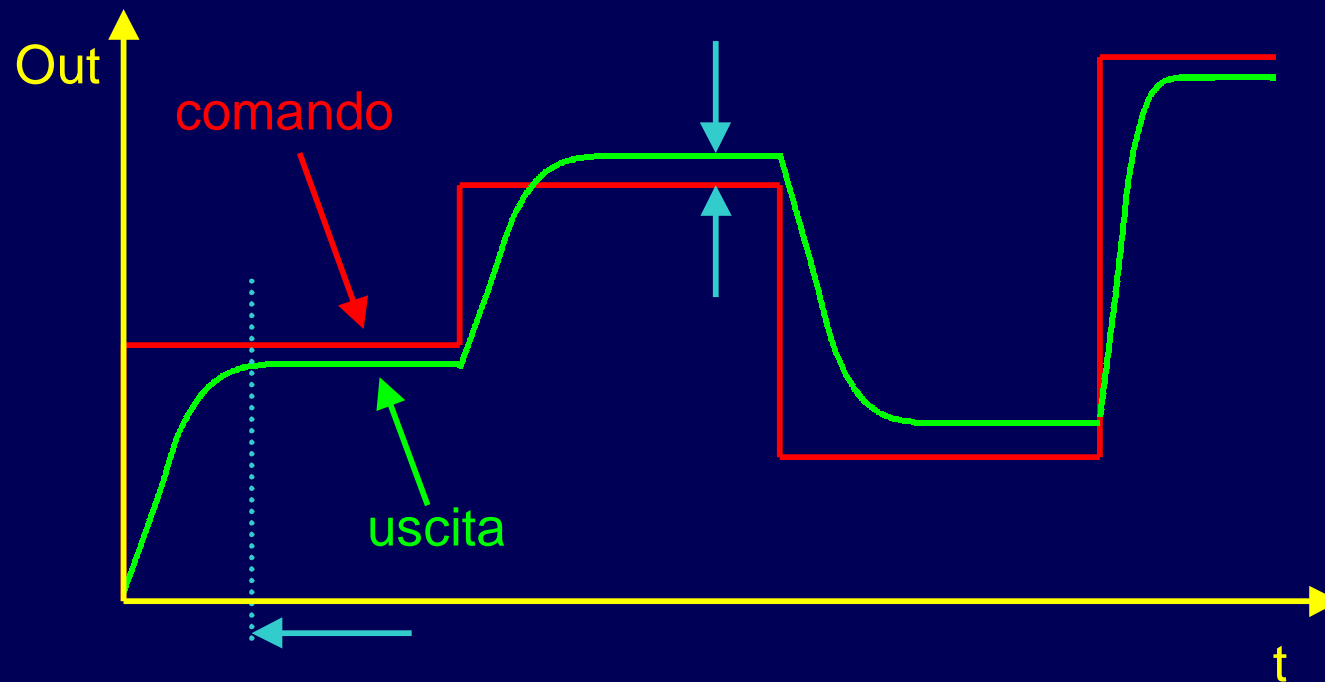
■ Parte 4

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

Richiami di Controlli Automatici

Specifiche

Variazione dell'uscita



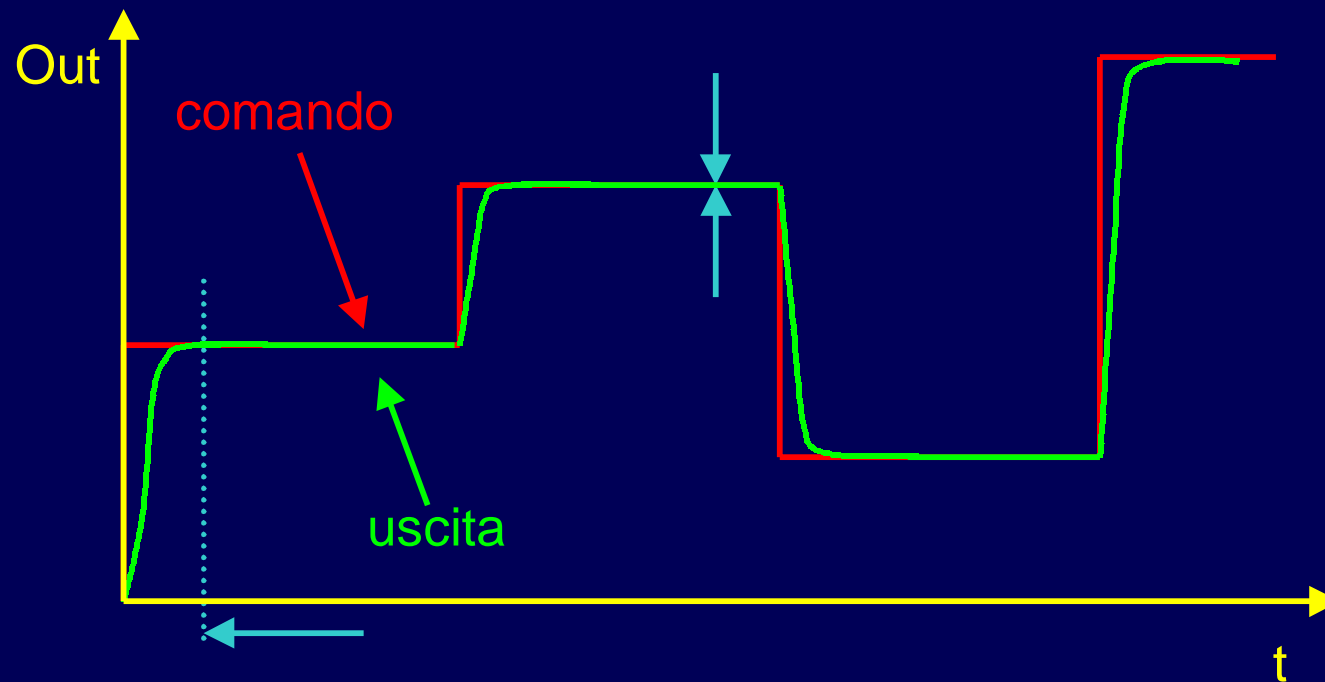
Non interessano:

- tempo di assestamento
- errore a regime

Richiami di Controlli Automatici

Specifiche

Regolazione dell'uscita

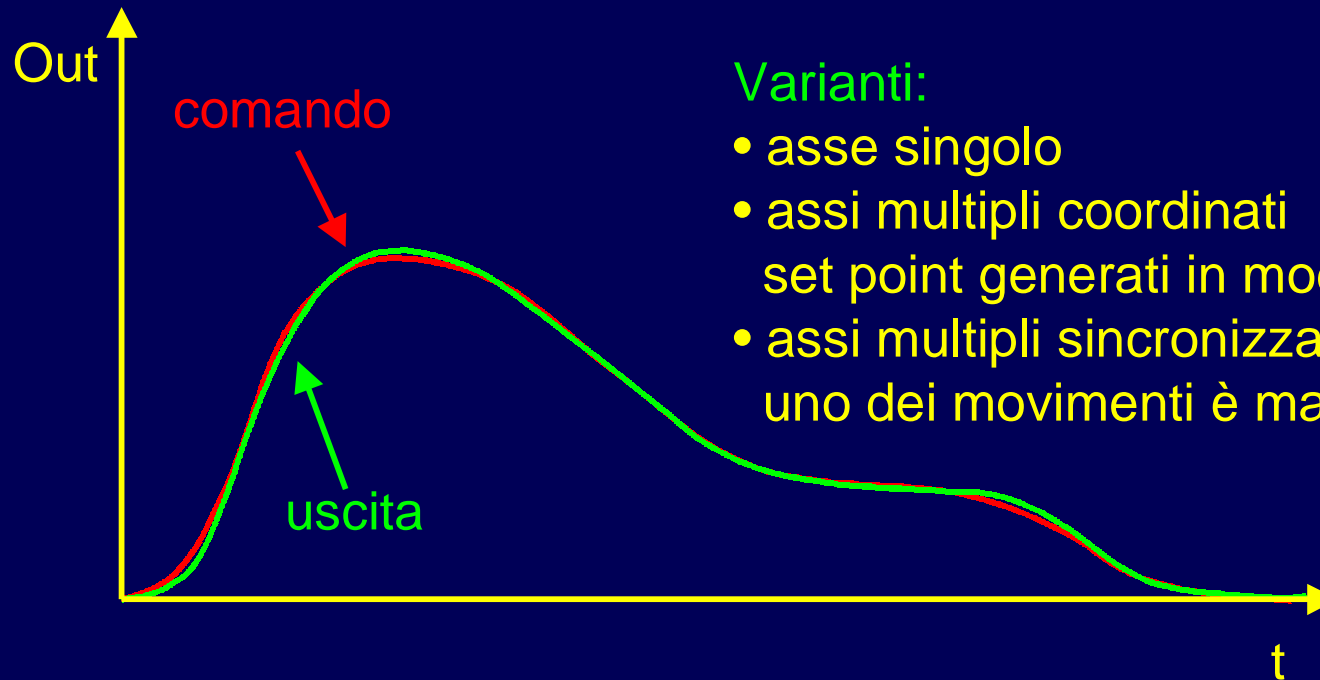


Interessano:

- tempo di assestamento
- errore a regime

Specifiche

Inseguimento dell'uscita



Varianti:

- asse singolo
- assi multipli coordinati
set point generati in modo coordinato
- assi multipli sincronizzati
uno dei movimenti è master di tutti gli altri

Interessano:

- la capacità di inseguire riferimento ad elevata dinamica
- l'errore di inseguimento

Controllo del moto

Considerazioni conclusive

- **la definizione di un problema di controllo del moto richiede la specifica delle esigenze di**
 - ➔ **precisione a regime**
 - ➔ **capacità di minimizzare gli effetti dei disturbi di carico**
 - ➔ **qualità del transitorio**
 - ➔ **qualità dell'inseguimento**
 - ➔ **coordinamento con altri assi**
 - ➔ **costi**

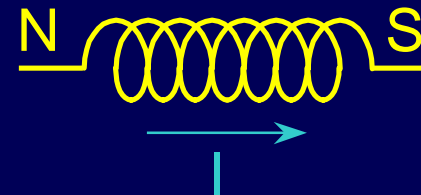
Per ogni problema occorre scegliere il sistema di azionamento più idoneo

Componenti magnetici

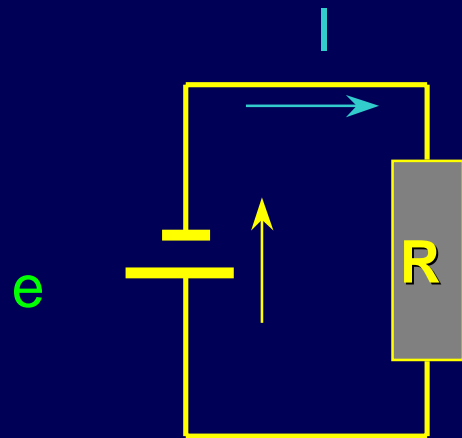
■ Magneti permanenti



■ Elettromagneti

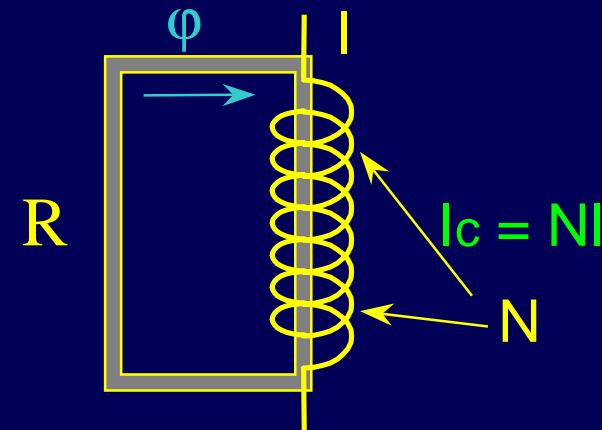


Circuiti elettrici



f.e.m. e
corrente I
resistenza R

Circuiti magnetici



f.m.m. I_c
flusso ϕ
riluttanza R

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

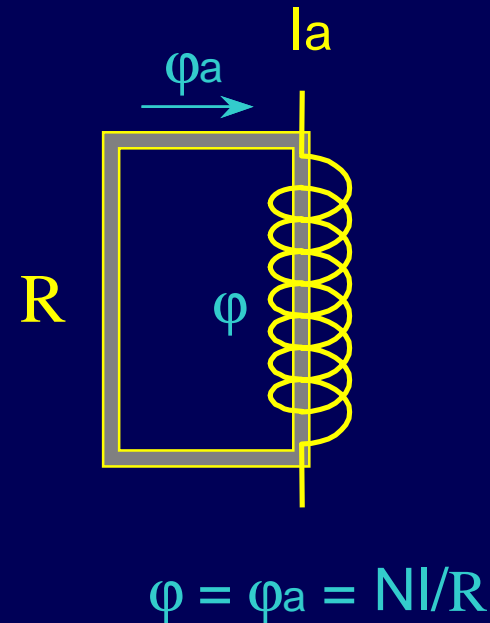
Definizioni

■ legge di Hopkinson

$$NI = Ic = R j$$

■ flusso di autoinduzione

→ flusso in una bobina generato dalla corrente che la percorre



Definizioni

■ legge di Hopkinson

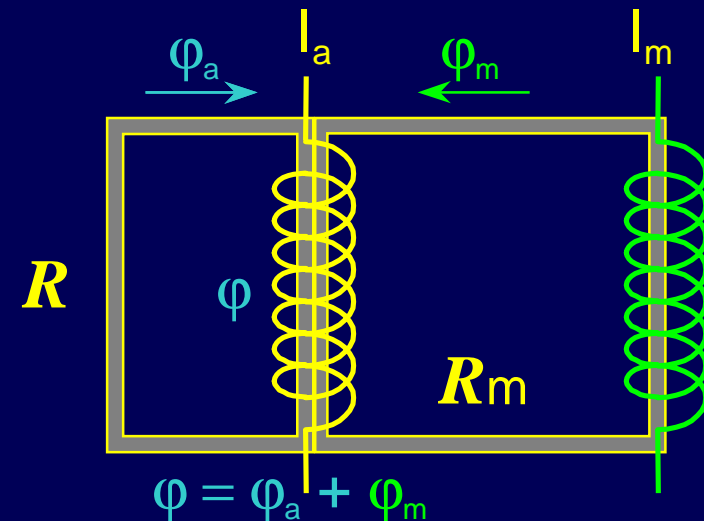
$$NI = I_c = R \varphi_c$$

■ flusso di autoinduzione

→ flusso in una bobina generato dalla corrente che la percorre

■ flusso di mutua induzione

→ flusso in una bobina concatenato da un altro circuito magnetico rispetto al quale la riluttanza R_m non sia infinita



Definizioni

■ legge di Hopkinson

$$NI = I_c = R \varphi_c$$

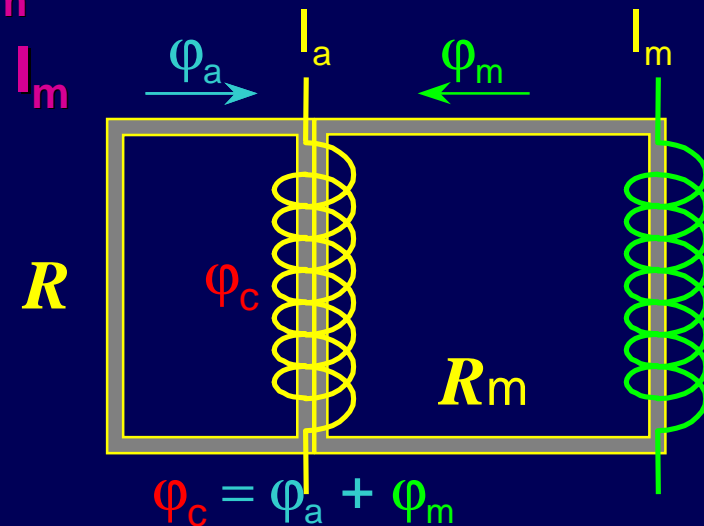
■ per circuiti magnetici lineari a parametri costanti

$$\varphi_a = (N_a/R) I_a = L I_a$$

$$\varphi_m = (N_m/R_m) I_m = M I_m$$

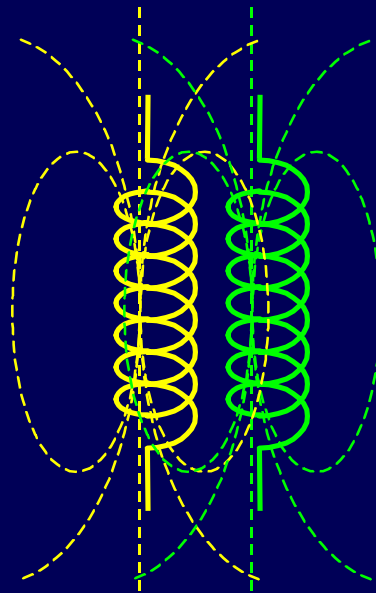
$$\varphi_c = \varphi_a + \varphi_m$$

$$\varphi_c = L I_a + M I_m$$



Circuiti magnetici in aria

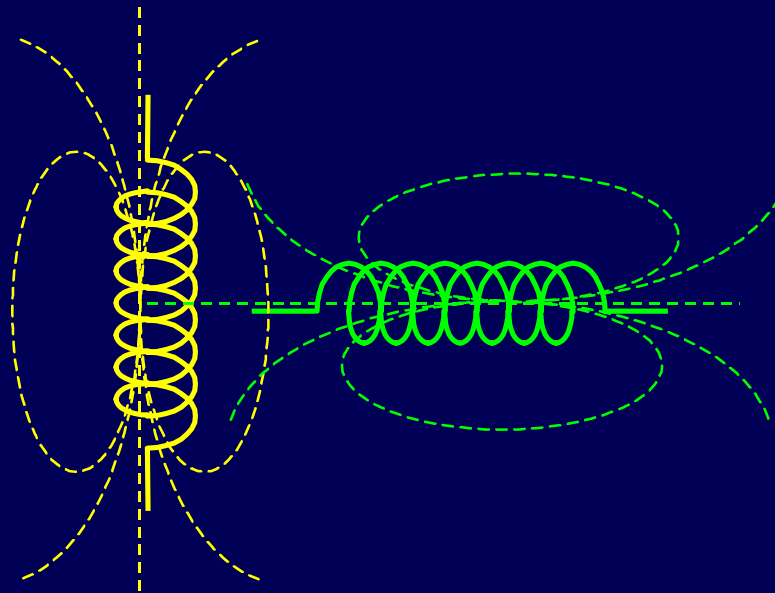
- i flussi concatenati dipendono dalla posizione reciproca e dalla distanza dei due avvolgimenti



massimo accoppiamento

Circuiti magnetici in aria

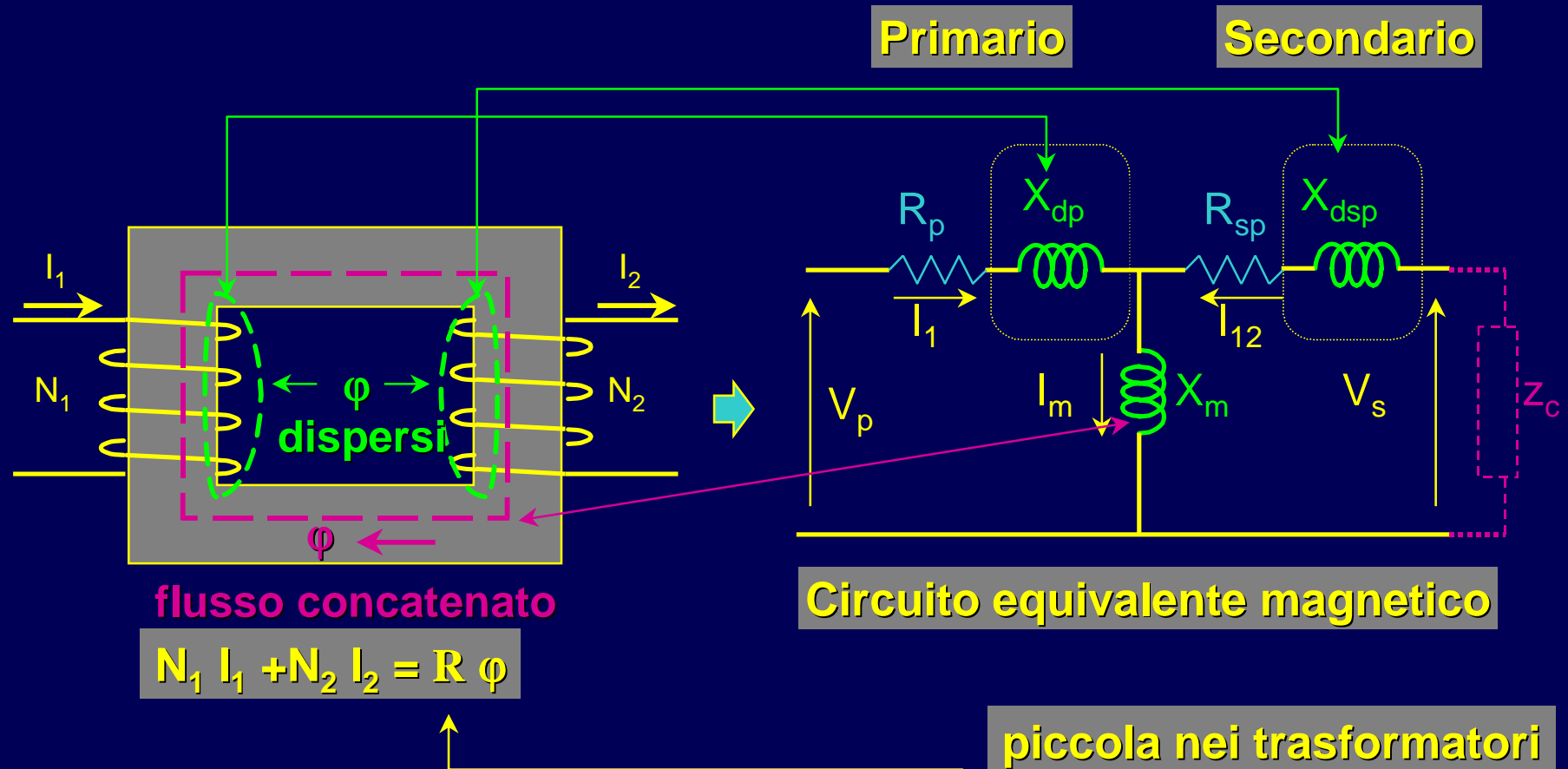
- i flussi concatenati dipendono dalla posizione reciproca e dalla distanza dei due avvolgimenti



minimo accoppiamento

Circuiti magnetici nel ferro

■ Trasformatori

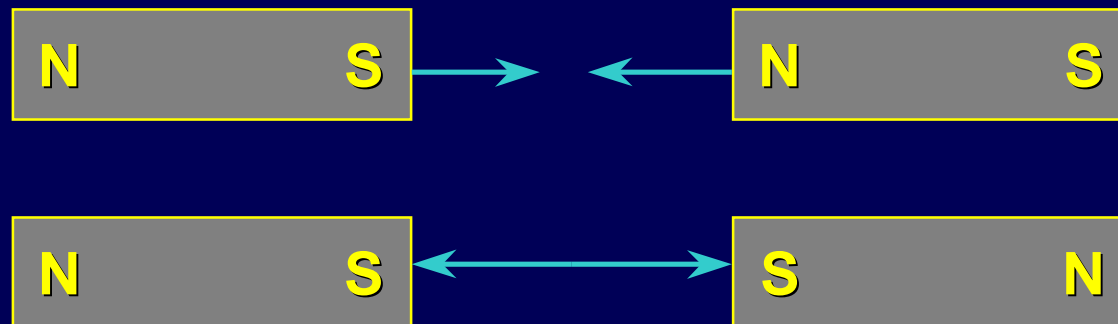


Legge di Lenz

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

$$v = dj_c/dt$$

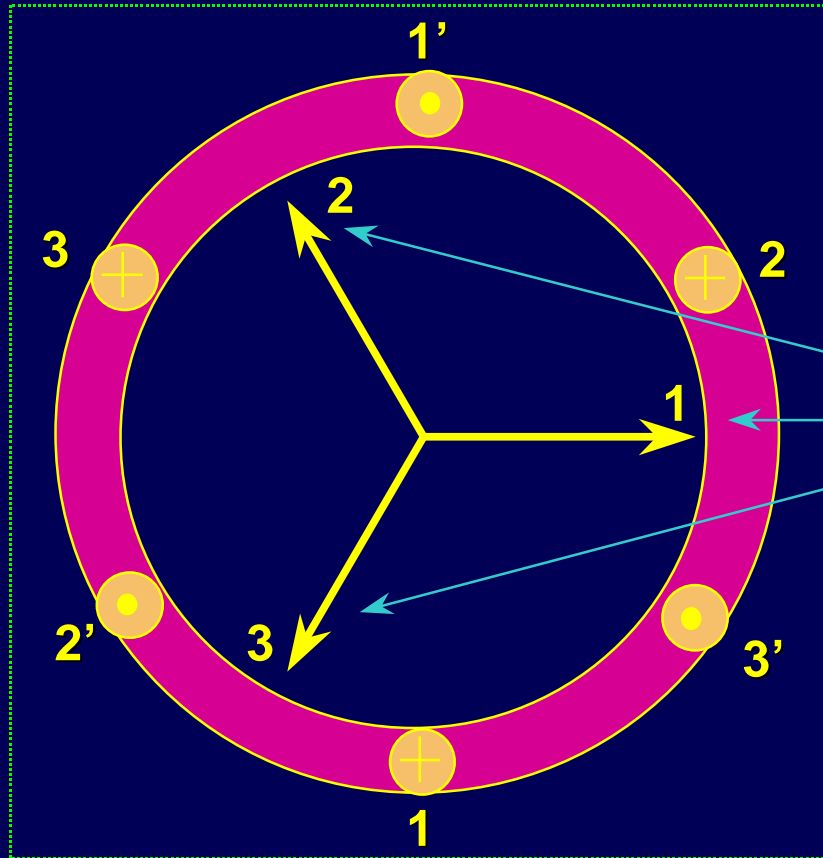
- forza generata da magneti permanenti
 - dall'esperienza



vale anche per gli elettromagneti

Campo rotante

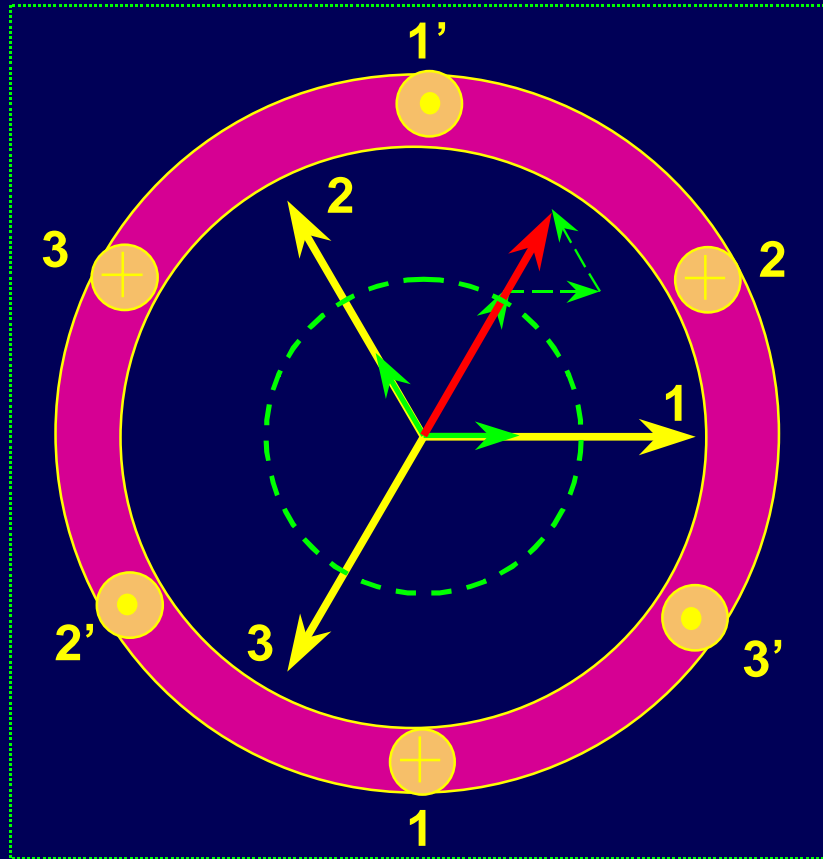
Avvolgimenti multipli
interagenti:
tipica realizzazione trifase



assi magnetici dei tre
avvolgimenti

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

Richiami di Elettrotecnica



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

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

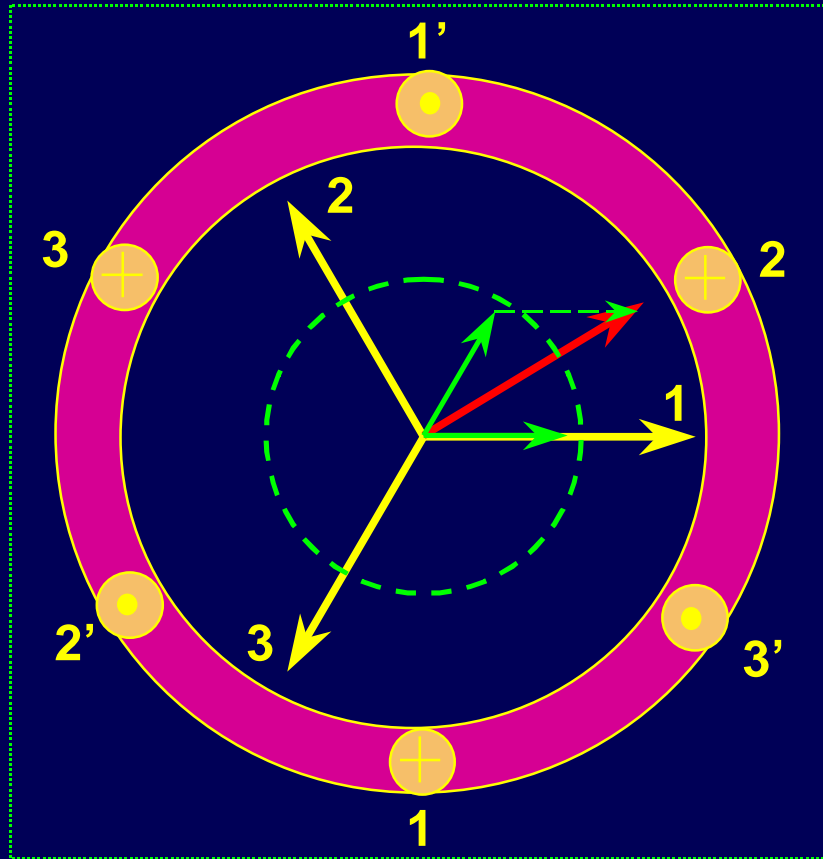
$$i_2 = I_m \sin 150^\circ = +0.5 I_m$$

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

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

**la risultante è un vettore
di ampiezza costante**

Richiami di Elettrotecnica



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

$$i_1 = I_m \sin 60^\circ = +0.86 I_m$$

$$i_2 = I_m \sin 180^\circ = +0.0 I_m$$

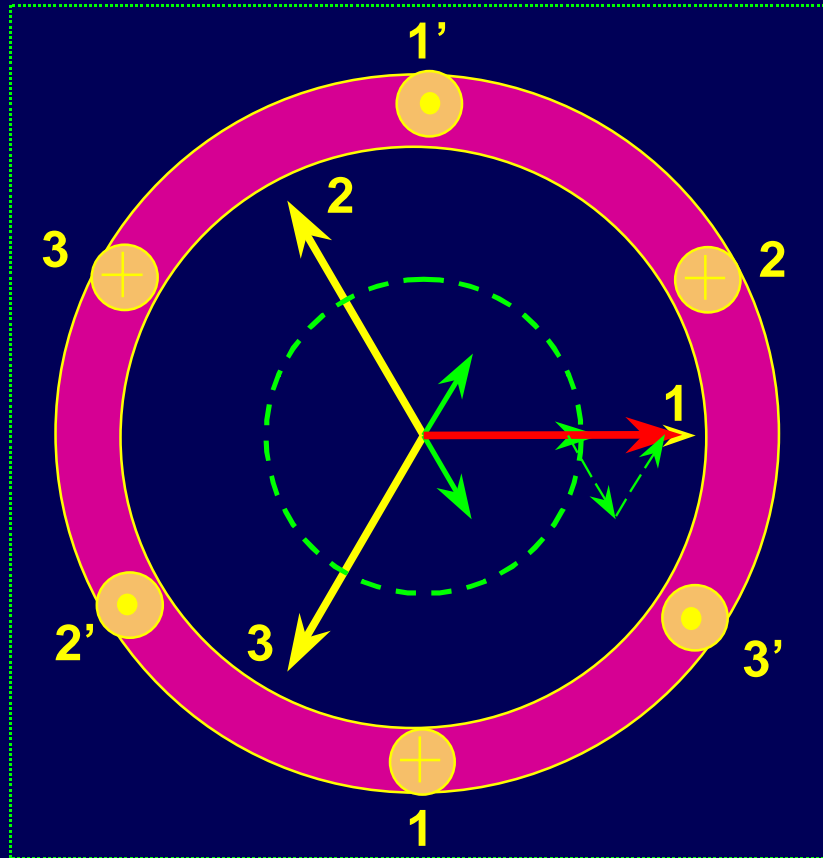
$$i_3 = I_m \sin 300^\circ = -0.86 I_m$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

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

↓
campo rotante

Richiami di Elettrotecnica



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

$$i_1 = I_m \sin 90^\circ = +1.0 I_m$$

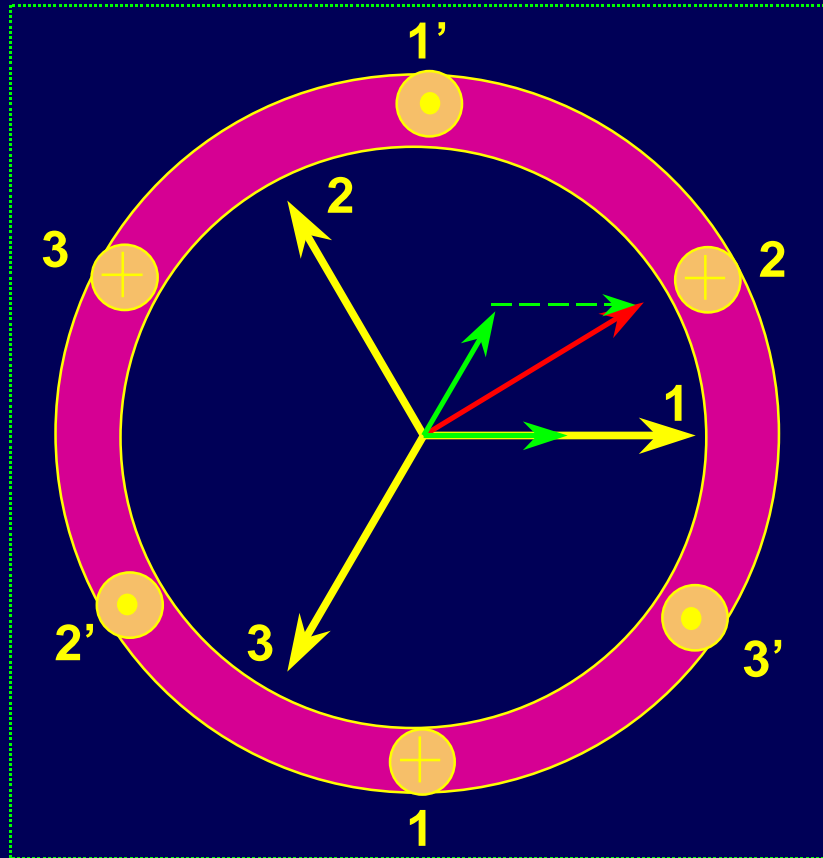
$$i_2 = I_m \sin 210^\circ = -0.5 I_m$$

$$i_3 = I_m \sin 330^\circ = -0.5 I_m$$

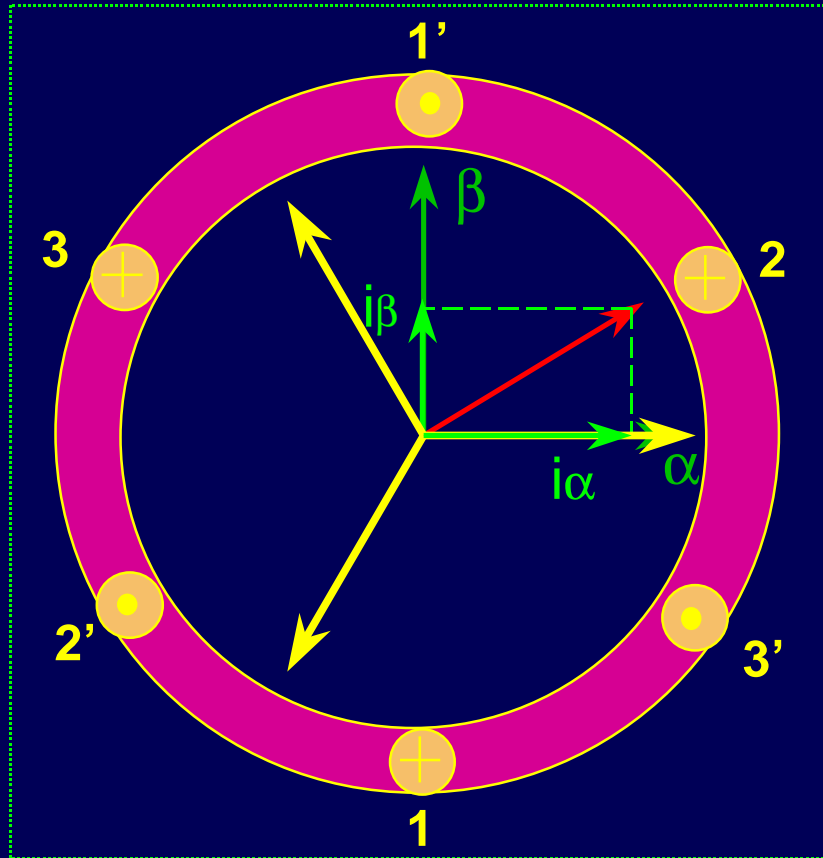
$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

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

campo rotante



Il campo rotante si può rappresentare in un sistema di riferimento trifase



Il campo rotante si può rappresentare in un sistema di riferimento trifase oppure in uno cartesiano bifase equivalente

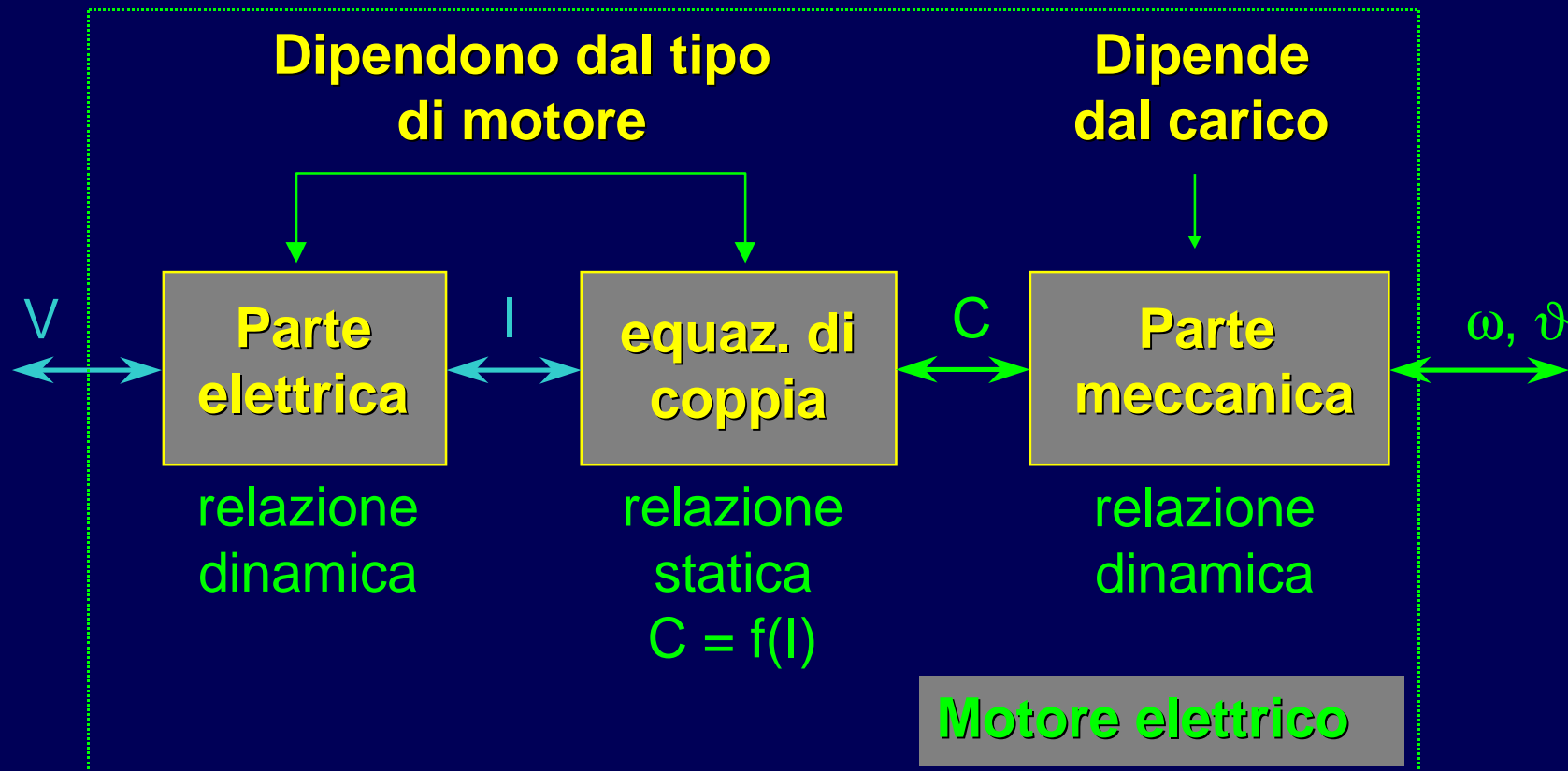
$$i_\alpha = i_1$$
$$i_\beta = .86 (i_1 + 2i_2)$$

Generazione elettromagnetica di coppia

Conversione **bidirezionale** di energia

elettrica \Leftrightarrow **meccanica**

Schema a blocchi

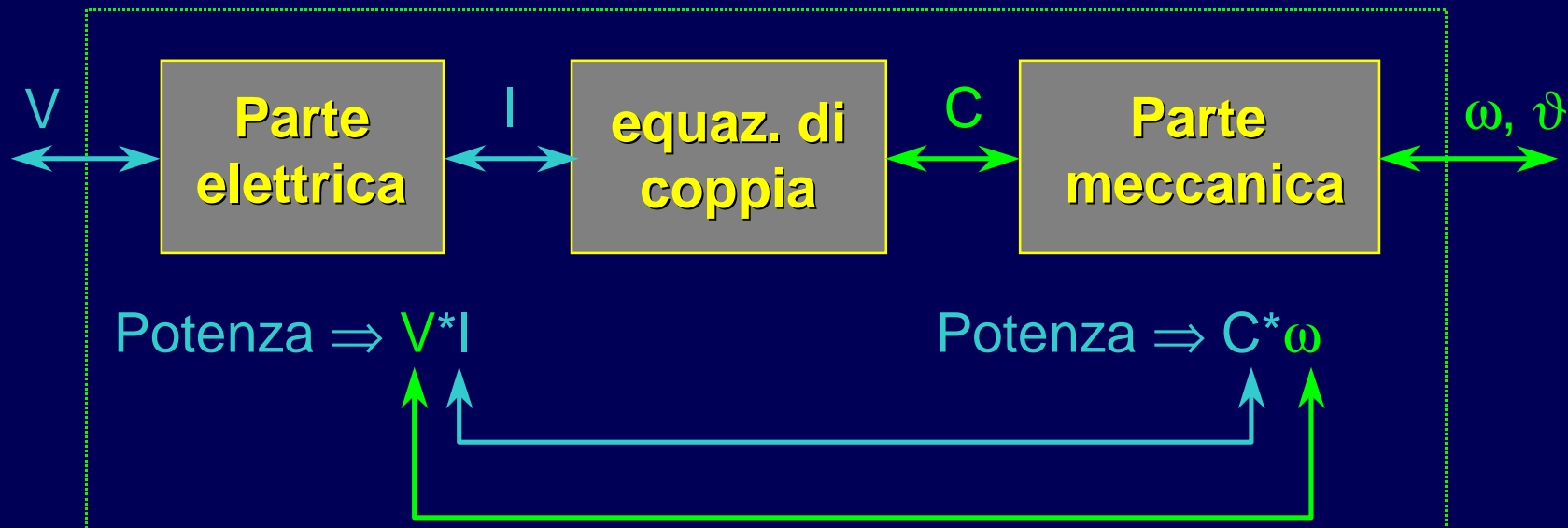


Generazione elettromagnetica di coppia

Motore Elettrico

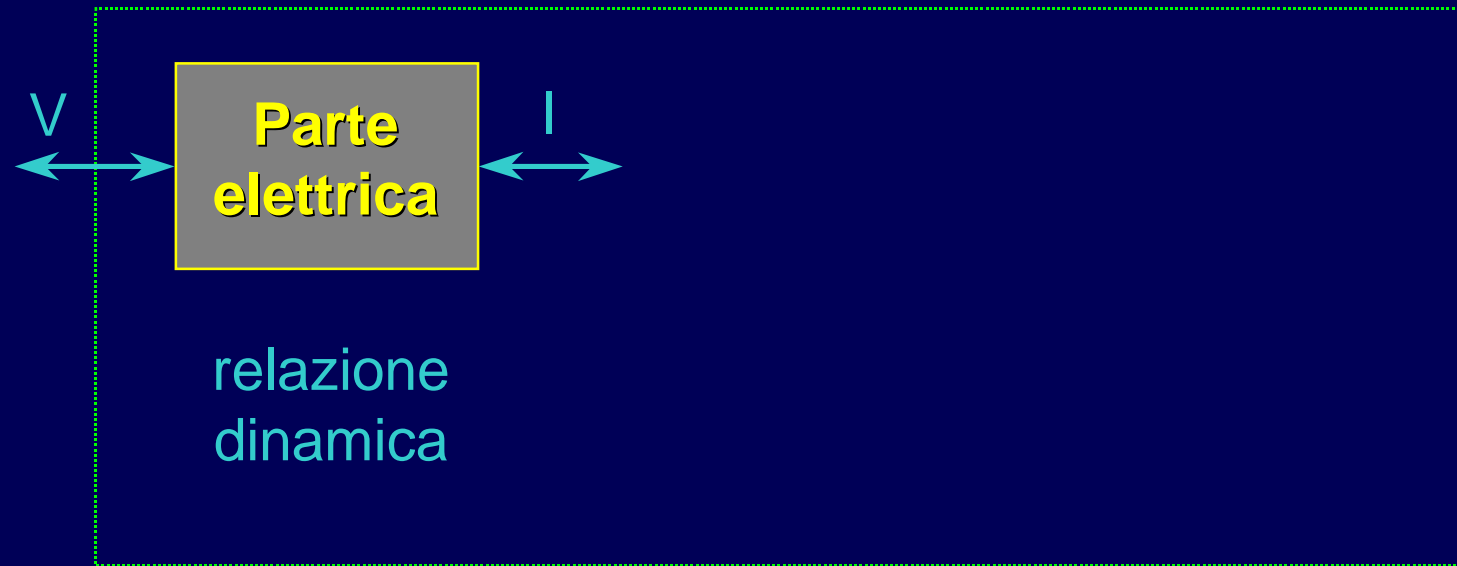
Convertitore **bidirezionale** di energia
elettrica \Leftrightarrow meccanica

Equivalenza delle potenze



Generazione elettromagnetica di coppia

Relazione tensione/corrente



Generazione elettromagnetica di coppia

Relazione tensione/corrente

Legge di Lenz

$$v_j = R_j * i_j + \frac{d\varphi_{cj}}{dt}$$

Flusso concatenato

$$\varphi_{cj} = \sum_{l=1}^n L_{lj} * i_l * f(\vartheta) = \varphi_{cj}(i_l, \vartheta)$$

definizione di differenziale

$$d\varphi_{cj}(i_l, \vartheta) = \sum_{l=1}^n \frac{\partial \varphi_{cj}}{\partial i_l} di_l + \frac{\partial \varphi_{cj}}{\partial \vartheta} d\vartheta$$

differenziale del flusso

$$d\varphi_{cj} = \sum_{l=1}^n L_{lj} di_l + \frac{\partial \varphi_{cj}}{\partial \vartheta} d\vartheta$$

equazione elettrica

$$v_j = R_j * i_j + \sum_{l=1}^n L_{lj} \frac{di_l}{dt} + \frac{\partial \varphi_{cj}}{\partial \vartheta} \omega$$

f.c.e.m.

Ipotesi di linearità magnetica

Generazione elettromagnetica di coppia

Esempio - 2 circuiti magnetici

■ equazioni elettriche della spira

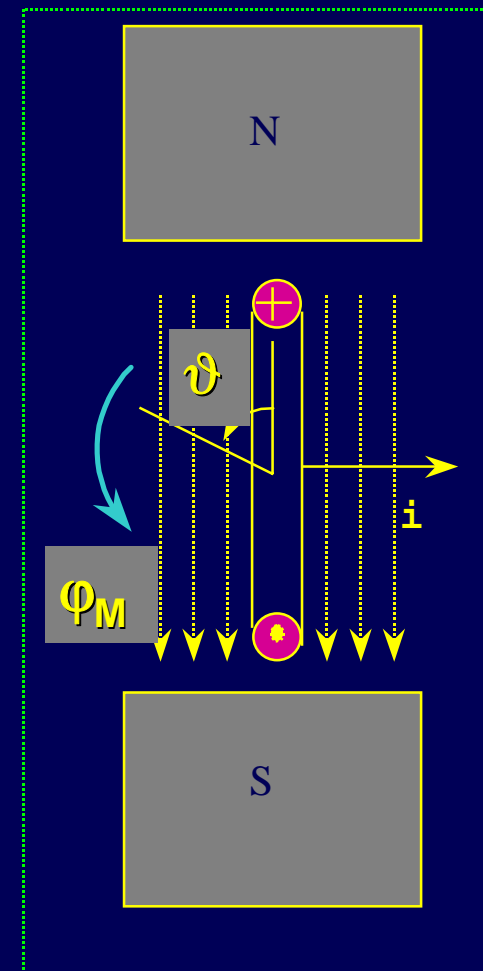
$$v = R * i + \frac{d\varphi_C}{dt}$$

$$\varphi_C = L * i + \varphi_M \sin\vartheta$$

$$d\varphi_C = L di + \varphi_M \cos\vartheta d\vartheta$$


$$v = R * i + L \frac{di}{dt} + \varphi_M \cos\vartheta * \omega$$

f.c.e.m.



Generazione elettromagnetica di coppia

Equazioni elettriche del motore

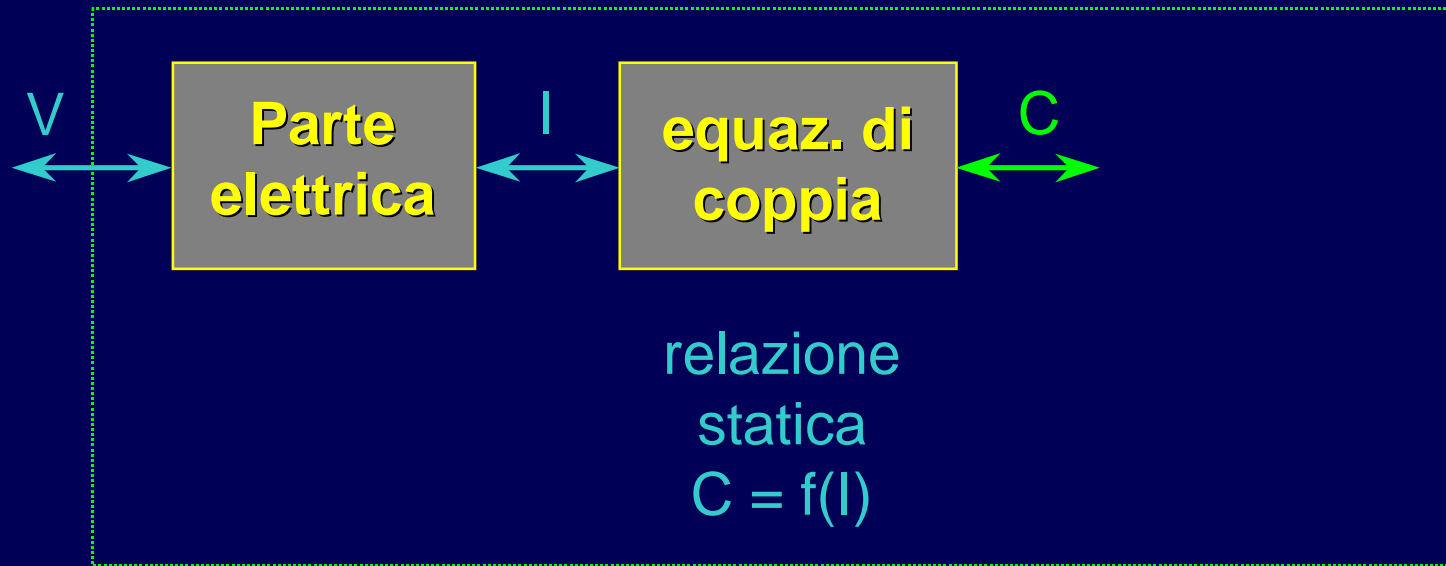
$$v_j = R_{jj} i_j + \sum_{l=1}^n L_{jl} \frac{di_l}{dt} + \frac{\partial \varphi_{cj}}{\partial \vartheta} \omega$$


se in almeno un circuito magnetico il flusso dipende dalla posizione, in quel circuito è presente una forza contro-elettromotrice funzione della velocità di rotazione

una parte della tensione è spesa per compensare la f.c.e.m.

Generazione elettromagnetica di coppia

Equazione della Coppia



Generazione elettromagnetica di coppia

Equazione della Coppia

$$v_j = R_j * i_j + \sum_{l=1}^n L_{jl} \frac{di_l}{dt} + \frac{\partial \varphi_{cj}}{\partial \vartheta} \omega$$

$$P_e = \sum_{j=1}^n v_j * i_j$$

$P_{meccanica}$

$$P_e = \sum_{j=1}^n R_j * i_j^2 + \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n L_{jl} \frac{di_l}{dt} * i_j + \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial \varphi_{cj}}{\partial \vartheta} * i_j \right] * \omega$$

$P_{dissipata}$

$P_{immagazzinata}$
se $i_l = \text{cost.}$
 $P_{imm} = 0$

Coppia

$$C_m = \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial \varphi_{cj}}{\partial \vartheta} * i_j \right]_{i_j = \text{cost}}$$

Generazione elettromagnetica di coppia

Modello elettrico del motore

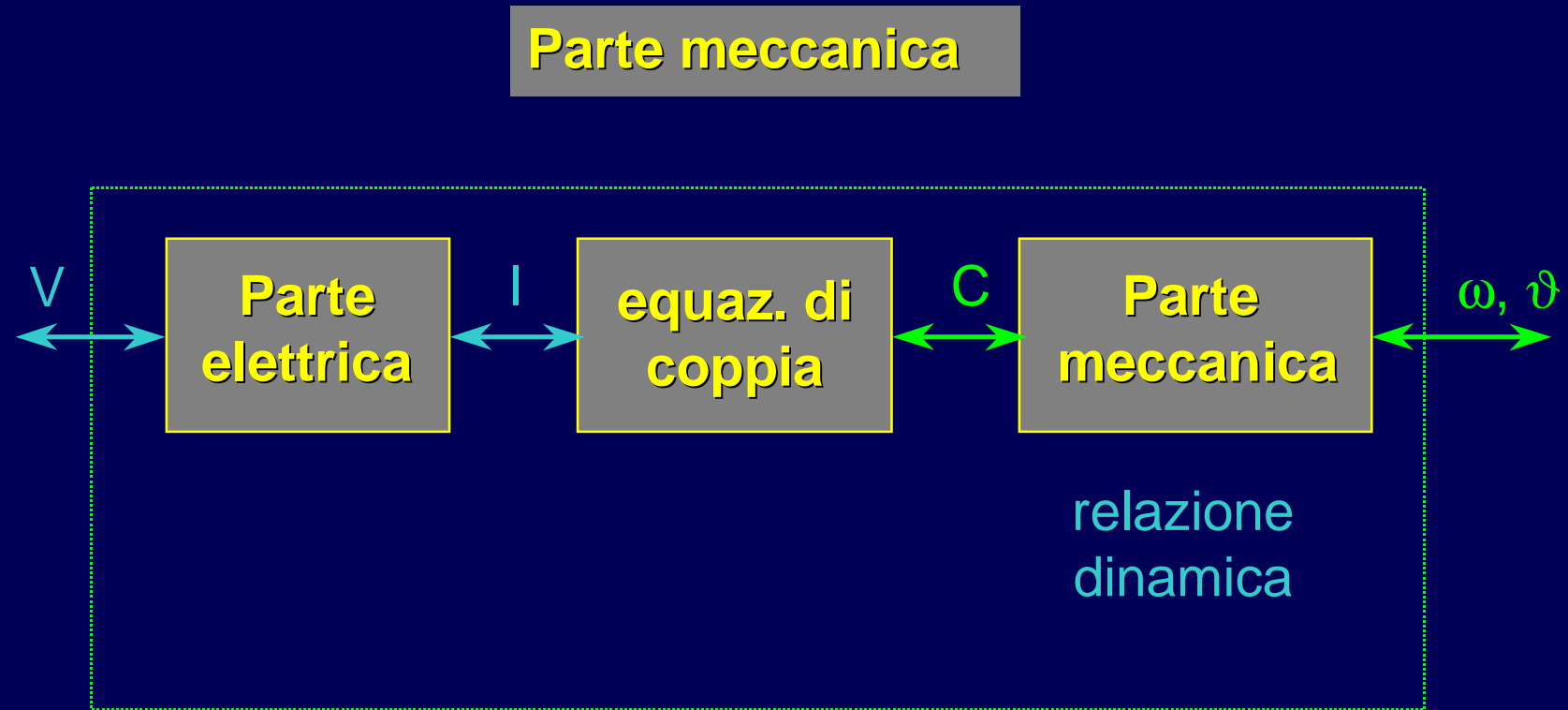
$$v_j = R_{jj} i_j + \sum_{l=1}^n L_{jl} \frac{di_l}{dt} + \frac{\partial \phi_{cj}}{\partial \vartheta} \omega$$

$$C_m = \sum_{j=1}^n i_j \frac{\partial \phi_{cj}}{\partial \vartheta} \Big|_{i_j = \cos t}$$

coefficiente di f.c.e.m.
=
coefficiente di coppia

Per generare coppia il flusso concatenato deve dipendere dalla posizione angolare del motore

Generazione elettromagnetica di coppia



Generazione elettromagnetica di coppia

Modello completo del motore

$$v_j = R_{jj} i_j + \sum_{l=1}^n L_{jl} \frac{di_l}{dt} + \frac{\partial \varphi_{cj}}{\partial \vartheta} \omega$$

f.e.m.

parte elettrica
(dinamica del
1° ordine)

$$C_m = \sum_{j=1}^n i_j \frac{\partial \varphi_{cj}}{\partial \vartheta} \Big|_{i_j = \cos t}$$

Costante di coppia

Ogni motore è anche
un generatore

equazione di coppia
(statica)

In un motore c'è almeno un circuito in cui, a corrente costante,
il flusso concatenato varia con la posizione

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_m - C_r)$$
$$\frac{d\vartheta}{dt} = \omega$$

parte meccanica
(dinamica del
2° ordine)

Generazione elettromagnetica di coppia

Tre tipi di motore

■ Motori a Riluttanza costante

- i circuiti magnetici hanno riluttanza costante con la posizione
 - a corrente costante variano i flussi concatenati
 - occorrono almeno due circuiti magnetici per generare coppia localmente

■ Motori a Riluttanza variabile

- i circuiti magnetici hanno riluttanza variabile con la posizione
 - a corrente costante variano i flussi di autoinduzione
 - basta un solo circuito magnetico per generare coppia localmente

■ Motori ibridi

- sono presenti entrambe le caratteristiche

Generazione elettromagnetica di coppia

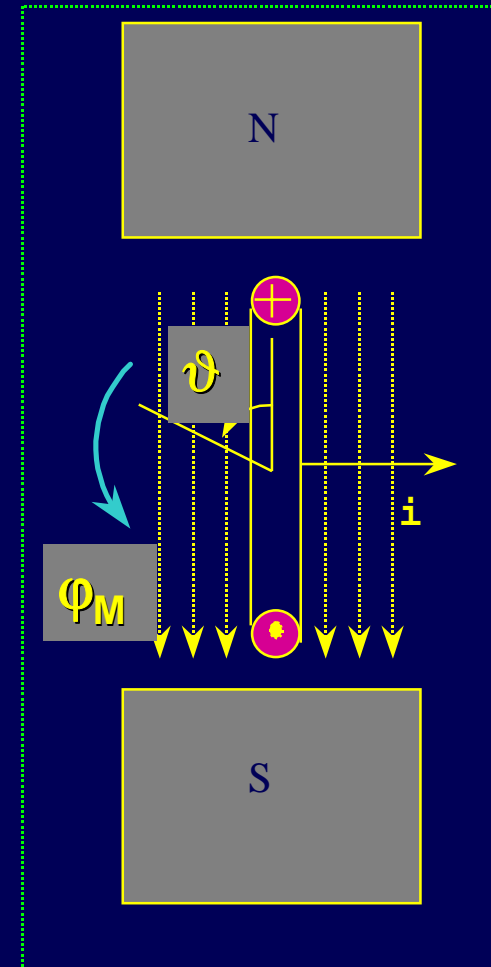
Motori a riluttanza fissa

■ Due circuiti magnetici

- ➔ uno genera flusso ϕ_M
(magnete in questo caso)
- ➔ l'altro è percorso da corrente i (spira equivalente)

Espressione della coppia

$$C_m = \frac{\partial \phi_c}{\partial \vartheta} i = \frac{d\phi_M \sin \vartheta}{d\vartheta} i$$
$$= i \phi_M \cos \vartheta$$



Motori in C.C., A.C. sincroni ed asincroni

Generazione elettromagnetica di coppia

Motori a Riluttanza Variabile

■ Un solo circuito magnetico

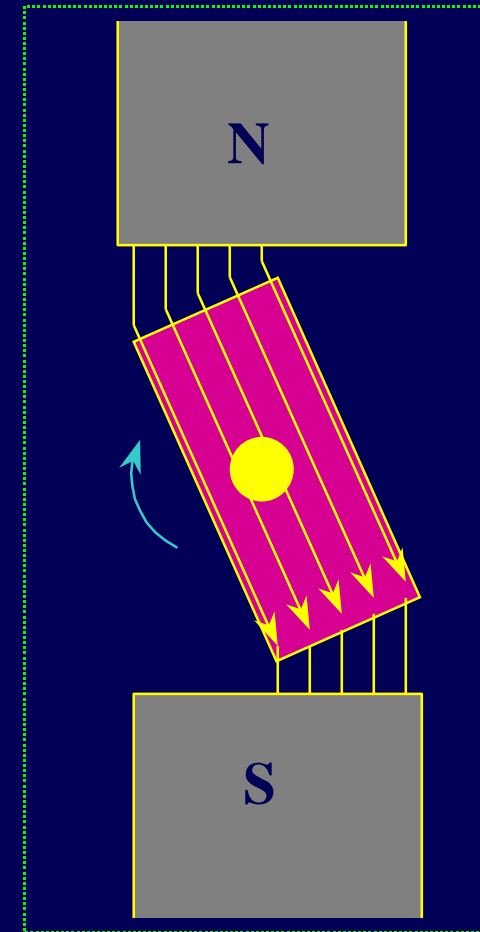
- geometria magnetica variabile con la posizione
- il rotore si porta nella posizione di minima riluttanza

Espressione della coppia



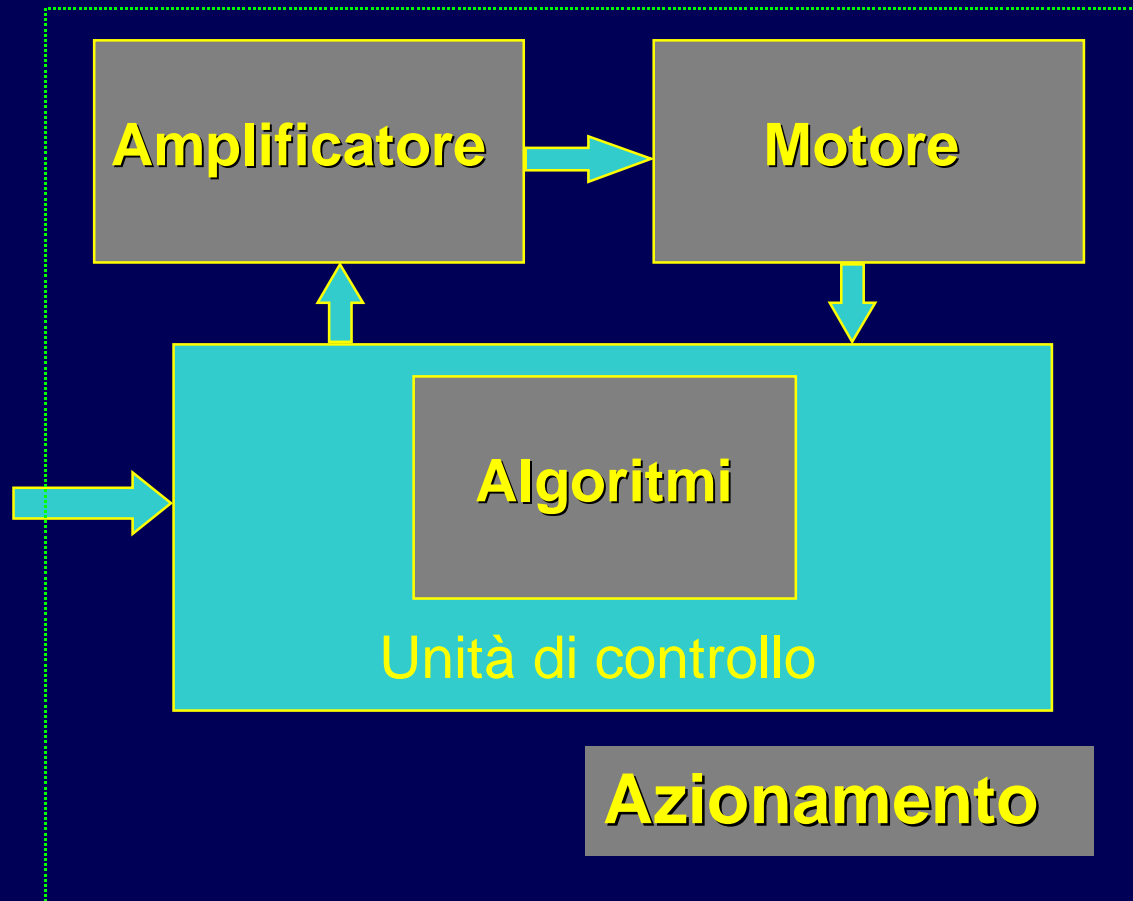
$$C_m = \frac{dR(\vartheta)}{d\vartheta} \varphi^2$$

Motori Passo-passo, coppia



Generazione elettromagnetica di coppia

Il Concetto di Azionamento

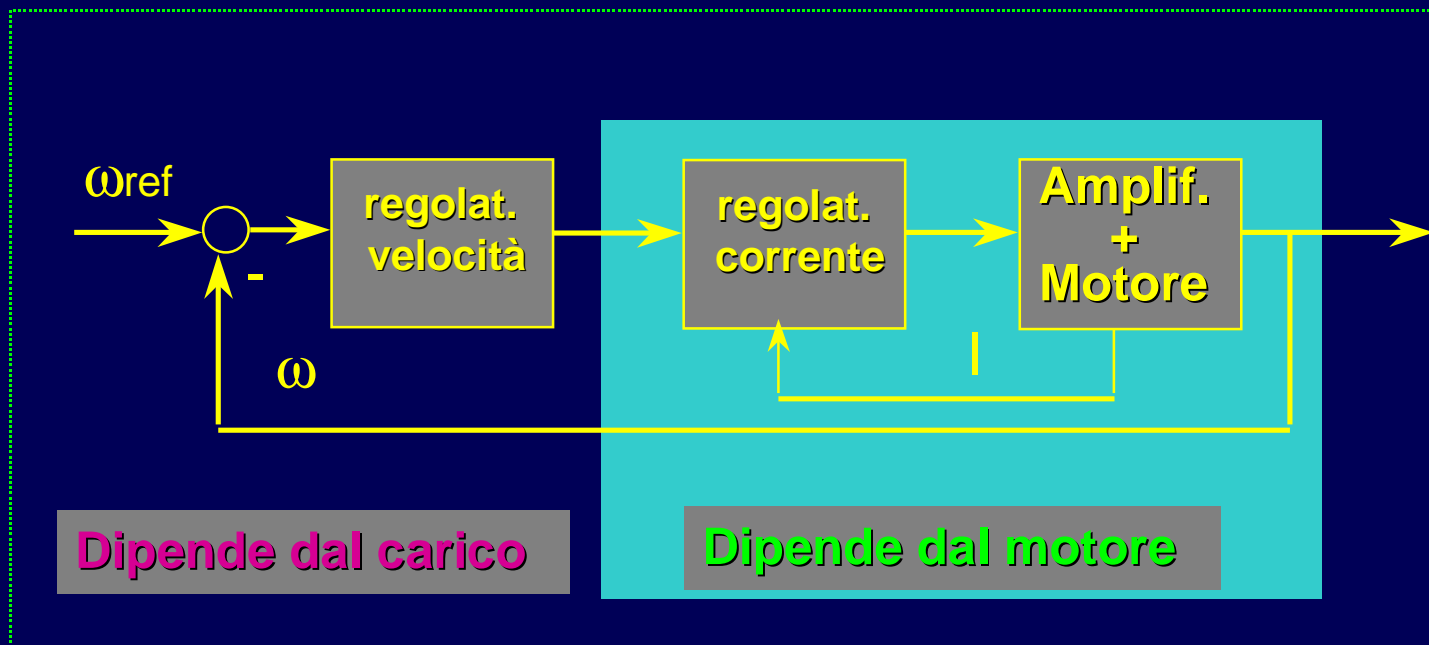


L'azionamento è un vero e proprio sistema di controllo in retroazione

Generazione elettromagnetica di coppia

Schema di controllo di un Azionamento

Struttura di controllo in cascata



Azionamenti Elettrici

Parte 1

Generazione del moto
mediante
motori elettrici
FINE

Prof. Alberto Tonielli

DEIS - Università di Bologna

Tel. 051-6443024

E-mail: atonielli@deis.unibo.it