



## Lezione 1

# AZIONAMENTI ELETTRICI

## PRESENTAZIONE DEL CORSO

Il corso di **azionamenti elettrici** verte sugli attuali azionamenti industriali impiegati nel campo dell'automazione ad alte prestazioni.

Vedremo l'azionamento nei suoi componenti e in riferimento al tipo di applicazione.

## Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Ingegneria Elettronica

# AZIONAMENTI ELETTRICI

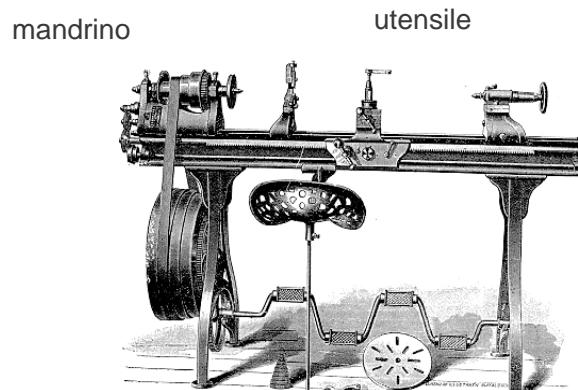
Renato Mattioli

## Definizione di azionamento elettrico.

Secondo la norma CEI 301-1 si definisce azionamento (Power Drive System: PDS) un sistema che converte l'energia elettrica in meccanica, con l'uso di apparecchiature elettroniche di potenza.

(conversione controllata)

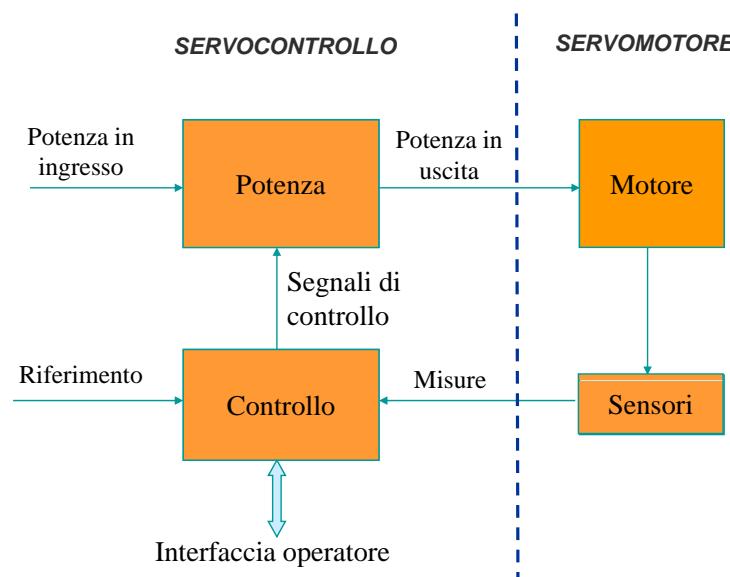
- *Coppia*
- *Velocità*
- *Posizione*



Tornio del 1885

## Struttura di un azionamento elettrico.

- POTENZA
  - ◆ Sezione di alimentazione
  - ◆ Convertitore di potenza
- MOTORE
- SENSORI
- CONTROLLO



## Programma

### 1 Introduzione

- 1.1 Tendenze tecnologiche ed applicative
- 1.2 Struttura e caratteristiche
- 1.3 Azionamenti ad elevate prestazioni
  - ◆ 1.3.1 Alte prestazioni dinamiche
- 1.4 Generalità sul motore elettrico
- 1.5 Circuito di potenza
- 1.6 Esempi applicativi

## **2 Parametri caratteristici di un motore elettrico**

- 2.1 *Coppia in servizio continuo*
- 2.2 *Coppia di picco  $T_p$*
- 2.3 *Coppia limite dovuta alla tensione massima*

## **3 Tipo di Azionamento**

- 3.1 *Azionamenti tipo-asse ed azionamenti tipo-mandrino*
- 3.2 *Azionamento tipo asse*
- 3.3 *Azionamento tipo mandrino*

## **4 Controllo di azionamento**

- 4.1 *Caratteristica meccanica del motore elettrico*
- 4.2 *Schema generale di controllo*
- 4.3 *Generalità sul controllo di azionamento*
- 4.4 *Controllo di azionamento*
- 4.5 *Elasticità nell'accoppiamento tachimetrico*
  - ◆ 4.5.1 *Notch filter*
  - ◆ 4.5.2 *Considerazioni sull'acc. fra motore e sensore*
- 4.6 *Elasticità torsionali dell'accoppiamento fra motore e carico*

- 4.7 *Risposta al disturbo additivo*
  - ◆ 4.7.1 *Regolatore proporzionale*
- 4.8 *Regolatore PI*
- 4.9 *Wind-Up*
- 4.10 *Ondulazione tachimetrica*
  - ◆ 4.10.1 *Effetti del ripple tachimetrico sul controllo*
- 4.11 *Analisi del controllo di azionamento*
  - ◆ 4.11.1 *Esempio di un azionamento tipo-asse*
  - ◆ 4.11.2 *Esempio di un azionamento tipo-mandrino*
- 4.12 *Sequenza progettuale del regolatore PI*
- 4.13 *Variazione del momento d'inerzia*

## 5 Materiali magnetici permanenti

- 5.1 Materiali ferromagnetici ad alta isteresi
- 5.2 Punto di lavoro
- 5.3 Tipologie di materiali magnetici permanenti
- 5.4 Dipendenza dalla temperatura

## 6 Motori in corrente continua

- 6.1 Induzione elettromagnetica
- 6.2 Correnti parassite (Foucault)
  - ◆ 6.2.1 Cenni sull'induttanza di dispersione
- 6.3 Forza elettromagnetica
- 6.4 Struttura di un motore in CC
- 6.5 Principio di funzionamento di un motore in CC
- 6.6 Equazioni del motore in CC
- 6.7 Interazioni fra il flusso di eccitazione ed il flusso di armatura
- 6.8 Curva caratteristica di un motore in corrente continua
- 6.9 Servomotori a magneti permanenti

## 7 Controllo di macchina

- 7.1 Controllo in cascata
- 7.2 Predizione della coppia motrice

## 8 Convertitori per servomotori in C.C.

- 8.1 Convertitori AC/DC non controllati
  - ◆ 8.1.1 Convertitore AC/DC monofase
  - ◆ 8.1.2 Convertitore AC/DC trifase
- 8.2 Convertitori DC/DC
  - ◆ 8.2.1 Struttura monoquadrante
  - ◆ 8.2.2 Modulazione a larghezza di impulso (PWM)
  - ◆ 8.2.3 Modulazione ad isteresi
  - ◆ 8.2.4 Struttura a due quadranti
  - ◆ 8.2.5 Struttura a Quattro quadranti
- 8.3 Dispositivi di potenza
  - ◆ 8.3.1 Potenza dissipata nei dispositivi
- 8.4 Effetto lato alimentazione
- 8.5 Circuito di comando
- 8.6 Caratteristica di coppia dei motori in corrente continua
- 8.7 Considerazioni di tipo energetico

## 9 Azionamenti Brushless

- 9.1 Principio di funz. motori brushless e tec. di controllo
  - ◆ 9.1.1 Strutture multipolo
- 9.2 Progetto Trapezoidale
- 9.3 Progetto sinusoidale
- 9.4 Auto e mutue induttanze nei motori Brushless
  - ◆ 9.4.1 Autoinduttanza di una fase
  - ◆ 9.4.2 Mutua induttanza fra le fasi
- 9.5 Espressione della coppia

## 10 Controllo di macchina dei Brushless

- 10.1 Controllo di tipo Trapezoidale
  - ◆ 10.1.1 Controllo semplificato (unipolare)
- 10.2 Brushless Sinusoidale
- 10.3 Corrente e forza magnetomotrice
- 10.4 Flusso concatenato
- 10.5 Comando tipo sinusoidale
- 10.6 Trasformata di Park
- 10.7 Trasformata di Clarke
- 10.8 Brushless sinusoidale

## 11 Motori ad induzione

- 11.1 Struttura del motore ad induzione
- 11.2 Legame fra correnti e flussi concatenati
- 11.3 Equazione della Coppia
- 11.4 Circuito equivalente stazionario
- 11.5 Inverter
- 11.6 Controllo ad orientamento di campo
  - ◆ 11.6.1 Determinazione della stima del flusso rotorico

## 12 Scelta dell'azionamento

- 12.1 Analisi del tipo di carico meccanico
- 12.2 Rapporto inerzia carico e inerzia motore
- 12.3 Scelta del motore
- 12.4 Scelta del drive

## Requisiti

- Per il carattere interdisciplinare del corso, sono richieste le nozioni fondamentali di Elettrotecnica, Elettronica e di Controlli Automatici, e si consiglia la frequentazione del corso di Elettronica Industriale e Tecnologia dei Sistemi di Controllo.

## Esami

- Durante il corso: due scritti parziali
- Per il restante periodo: orale

## Materiale in supporto alla didattica

Dispense redatte dal docente

> <https://www.unife.it/db/esami/studenti/>

selezionare la Facoltà, il corso ed il docente.

## Azionamenti ad elevate prestazioni

- Processi discontinui (es. posizionamento)
- Processi continui (es. laminatoi)

### **1. Alte prestazioni dinamiche:**

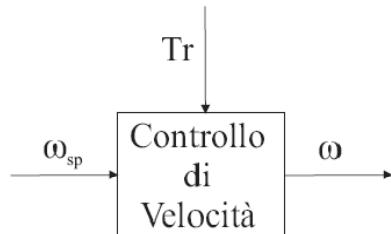
- posizione
- velocità
- coppia

### **2. Qualità del moto in generale:**

- bassa ondulazione (ripple) di coppia
- interfaccia digitale

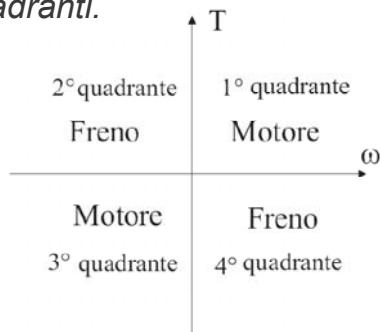
## Alte prestazioni dinamiche

1.  $\omega(t)$  deve inseguire  $\omega_{sp}(t)$
2.  $\omega(t)$  insensibile a  $Tr$



## ■ Coppia e velocità

Le grandezze da controllare sono la **Coppia** e la **velocità**. Normalmente nelle applicazioni di nostro interesse devono poter essere entrambe positive, negative o di segno discorde: *Azionamenti a quattro quadranti*.



Schema a quattro quadranti

*Motore*  
 $P_m = T\omega > 0$

*Freno*  
 $P_m = T\omega < 0$

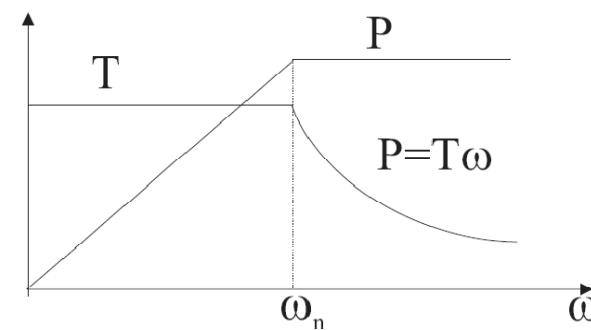
$T$  = Coppia del motore  
 $\omega$  = Velocità di rotazione angolare

## Qualità del moto

Bassa ondulazione di coppia (ripple)

1. Fattori costruttivi (motore)
2. Imperfezioni schema di controllo

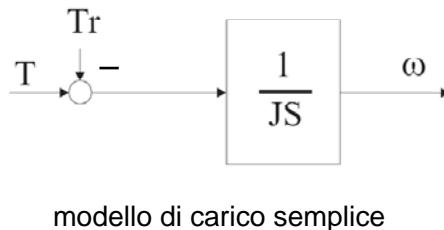
- La curva di coppia (*massima*) di un azionamento è in genere costante fino ad una certa velocità e poi decresce in modo da essere a potenza costante



curva di coppia e potenza

## Tipi di carico

- Dipende dal tipo di processo.
- Il modello più semplice è rappresentato in figura:



$$T = Tr + J \frac{d\omega}{dt}$$

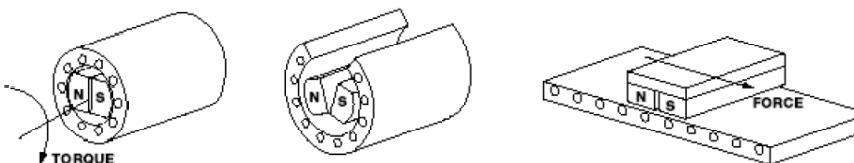
$$\omega = (T - Tr) \frac{1}{J_s}$$

Il modello può diventare estremamente più complesso.

- presenza di elasticità
- l'inerzia può variare (robot)

- Motori elettrici rotanti (coppie)
- Motori elettrici lineari (forze)

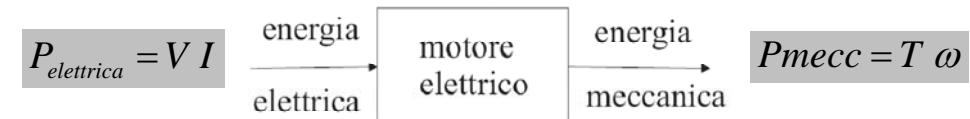
- Il principio di funzionamento dei due motori è lo stesso



- Controllo di posizione (no velocità)
- Accelerazioni elevate
- Motore aperto

## Motori elettrici

- Il motore è l'elemento centrale dell'azionamento, quello che effettua la conversione dell'energia:



V = Tensione di alimentazione

I = Corrente elettrica

T = Coppia motore

$\omega$  = Velocità di rotazione angolare

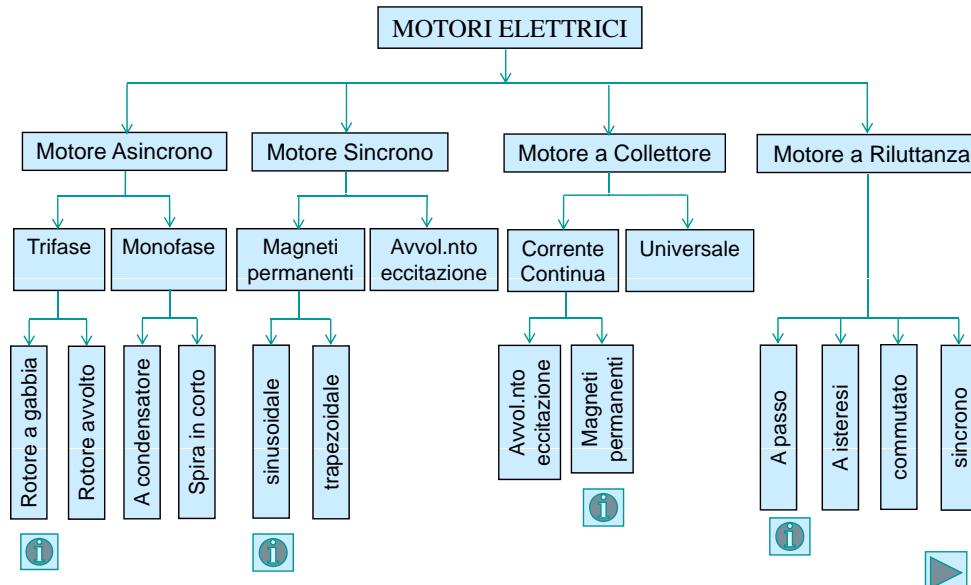
tutti i motori elettrici sono macchine reversibili

## ■Motori impiegati negli azionamenti

- I motori elettrici utilizzati nella movimentazione automatica si possono suddividere in quattro grandi famiglie:

- Motori a collettore
- Motori sincroni
- Motori a riluttanza
- Motori asincroni

# MOTORI PER AZIONAMENTI



- I **motori a collettore** sono caratterizzati dalla presenza del *collettore-spazzole* che svolge le funzioni di un convertitore di potenza.

## Motori in corrente continua (C.C.)

- Motori con avvolgimento di eccitazione
  - Motori a magneti permanenti
- Motori universali

### ■ Motori a collettore in CC

- ◆ Semplicità di controllo
- ◆ Hardware semplice
- ◆ Collettore e contatti strisciati (*manutenzione*)
- ◆ Genera calore sul rotore
- ◆ Ingombro e peso elevato
- ◆ Non idoneo in ambienti esplosivi
- ◆ Costo elevato
- ◆ Velocità di rotazione limitate (*usura del collettore*)

- I **motori sincroni** sono alimentati con una tensione alternata e la velocità di rotazione è rigidamente legata alla frequenza della tensione di alimentazione.

Motori sincroni con avvolgimento di eccitazione

Motori sincroni a magneti permanenti (Brushless)

- sinusoidali
- trapezoidali



- Motori sincroni a magneti permanenti

- ◆ Elevato rapporto potenza/peso
- ◆ Bassa inerzia
- ◆ Elevata affidabilità (assenza spazzole)
- ◆ Elevata capacità di sovraccarico
- ◆ Elevata velocità massima
- ◆ Calore generato solo sullo statore
- ◆ Idoneo per funzionare in ambiente ostile
  
- ◆ Hardware e controllo complessi
- ◆ Problemi alle alte temperature
- ◆ Costo elevato



- **I motori asincroni** sono alimentati con una tensione alternata e la velocità di rotazione non è rigidamente legata alla frequenza della tensione di alimentazione, ma vi è uno *scorrimento*.

- Motori asincroni monofase

- a condensatore
- spira in corto

- Motori asincroni trifase

- rotore a gabbia di scoiattolo
- rotore avvolto

- Motori asincroni trifase a gabbia

- ◆ Elevata affidabilità (assenza di spazzole)
- ◆ Basso costo
- ◆ Nessun problema alle alte temperature
- ◆ Funzionamento in ambiente ostile (degradando la coppia)
- ◆ Elevata capacità di sovraccarico
  
- ◆ Controllo di elevata complessità
- ◆ Genera calore sul rotore
- ◆ Inerzia elevata (non sempre un difetto)



- **I motori a riluttanza variabile** si basano sul principio che il flusso tende a fluire lungo la via a minor riluttanza.

- Motori a riluttanza variabile con circuito magnetico fortemente anisotropo

- sincroni
- isteresi

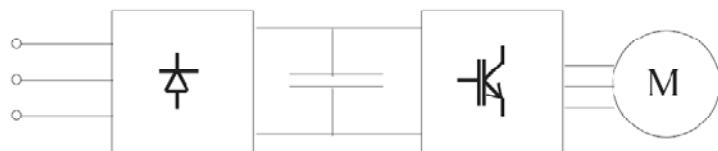
- Motori a riluttanza variabile con numero di denti statorico diverso da quello rotorico.

- a passo
- commutato

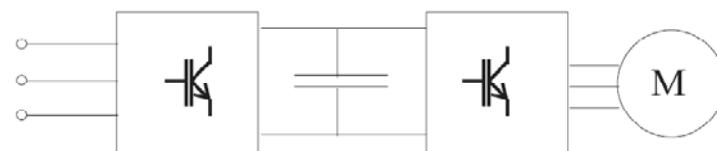


- Motori usati negli azionamenti ad elevate prestazioni

- Motori in corrente continua (C.C.)
- Motori sincroni a magneti permanenti
- Motori asincroni trifase a gabbia di scoiattolo
- Motori a riluttanza variabile (sincroni) ?



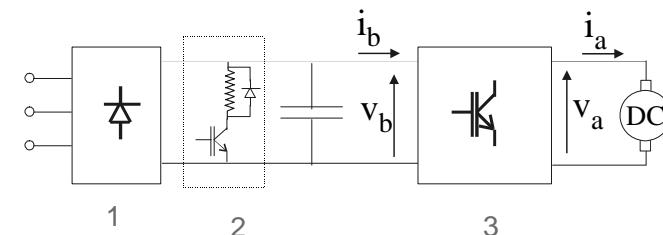
Circuito di potenza non reversibile



Circuito di potenza reversibile

## Circuito di potenza

- 1) Sezione di alimentazione
- 2) Circuito di frenatura
- 3) Convertitore di potenza



## Esempi applicativi

- Macchine utensili a controllo numerico
- Robotica Industriale
- Macchine per la lavorazione del legno
- Macchine speciali in campo tessile
- Macchine confezionate
- Gru
- Ascensori ad alte prestazioni
- Macchine da stampa, laminatoi, ..
- Svolgitori

# Trend di utilizzo in crescita

1. Richiesta di maggiori prestazioni.
2. Sostituzioni di regolazioni meccaniche
3. Sostituzione di azionamenti idraulici
4. Ragioni energetiche
5. Esigenze di automazione computerizzata



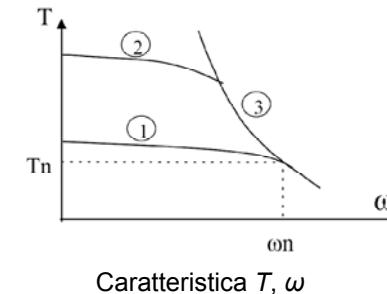
Panoramica generale sugli azionamenti elettrici

## Lezione 2

### Parametri caratteristici di un motore

- Coppia e velocità ( $T$ ,  $\omega$ )
- prestazioni dinamiche ( $Jr$ )
- caratteristiche di alimentazione

- I parametri più importanti sono  $T_n$  e  $\omega_n$  che definiscono  $P_n$



#### (1) Coppia in servizio continuo

- è la coppia che il motore riesce ad erogare in modo continuo a rotore bloccato.
- è definita come quel valore che mantiene la temperatura del motore entro valori accettabili (degradazione isolamento, smagnetizzazione...)

Non c'è uniformità, da parte dei produttori, per le condizioni a cui si fa riferimento per la determinazione della coppia.

- Temp. flangia → 20°C÷45°C
- Temp. ambiente → 20°C÷25°C
- $\Delta\theta_{avv}$  → 65°C÷115°C

La coppia in servizio continuo dipende da come viene utilizzato il motore:

- calettato su una flangia metallica di una grande macchina
- calettato su una flangia isolata
- posizionato in ambiente chiuso

Spesso occorre declassare il motore, usando la formula semplificata:

$$T_d^2 = \frac{\Delta\theta_d}{\Delta\theta_n} T_n^2$$

- $\Delta\theta_d$  e  $T_d$  sono la differenza di temperatura e la coppia del motore declassato
- $\Delta\theta_n$  e  $T_n$  sono i valori nominali

## Modello termico del motore (semplificato)

- Esempio: sia  $T_n = 10Nm$  a  $115^\circ C$  con  $\theta_a = 20^\circ C$ , se  $\theta_a = 40^\circ C$  allora  $T_d$  sarà data da:

– Differenza temperatura avvolgimento nominale

$$\Delta\theta_n = 115^\circ - 20^\circ = 95^\circ C$$

– Differenza temperatura avvolgimento declassata

$$\Delta\theta_d = 115^\circ - 40^\circ = 75^\circ C$$

– Coppia declassata  $T_d = 10\sqrt{75/95} = 8,9Nm$

- La potenza dissipata dal motore è data (qualitativamente) da:

$$P_D = n R I^2 + \frac{\omega^2}{\omega_n^2} P_0$$

–  $R$  resistenza dell'avvolgimento

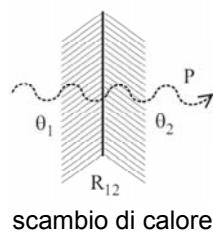
–  $P_0$  potenza assorbita dal motore a vuoto ad  $\omega_n$

–  $n R I^2$  potenza dissipata per effetto joule

–  $(\omega^2/\omega_n^2) P_0$  Potenza dissipata nel ferro

Scambio di calore fra motore e l'ambiente

- conduzione termica
- convezione (naturale o forzata)
- irraggiamento

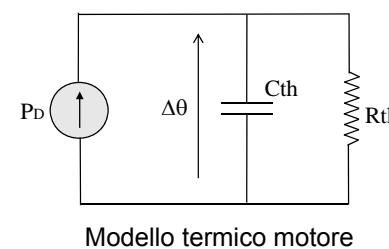


Lo scambio avviene per conduzione e convezione, si può considerare una legge di trasporto di calore lineare (a regime termico):

$P = \text{flux di calore } (\dot{Q})$

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = R_{12} P$$

Supponendo il motore una massa omogenea di capacità termica  $C_{th}$  con una resistenza termica  $R_{th}$  fra l'avvolgimento e l'esterno, il modello termico:



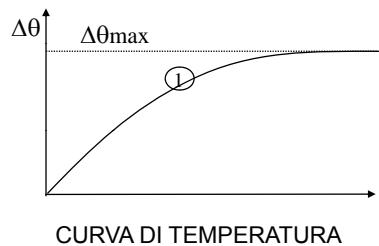
dove:  $\Delta\theta = \theta_{avv} - \theta_{amb}$

A regime termico:

$$\Delta\theta_{\max} = \theta_{avv} - \theta_{amb} = P_D R_{th}$$

$$R_{th} = \frac{\Delta\theta_{\max}}{P_D} \quad C_{th} = \frac{\tau_{th}}{R_{th}}$$

$$\Delta\theta(t) = \Delta\theta_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{th}}}\right)$$



- $\Delta\theta(t)$  è la differenza fra  $\theta(t)$  la temperatura dell'avvolgimento e  $\theta_{amb}$  la temperatura esterna

$$\Delta\theta(t) = \Delta\theta_{\max} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\theta}}})$$

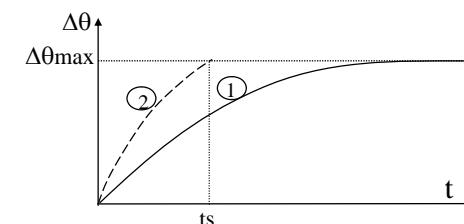
- *Formula per declassamento coppia (trascuro perdite ferro) a regime termico:*

$$\left. \begin{array}{l} P_D \propto I^2 \\ T \propto I \end{array} \right\} P_D \propto T^2 \quad R_{th} = \frac{\Delta\vartheta}{P_D} = \text{cost} \Rightarrow \frac{\Delta\vartheta}{T^2} = \text{cost} \propto R_{th}$$

$$\frac{\Delta\vartheta_1}{T_1^2} = \frac{\Delta\vartheta_2}{T_2^2} \Rightarrow T_2^2 = \frac{\Delta\vartheta_2}{\Delta\vartheta_1} T_1^2$$

## (2) Coppia di picco $T_p$

- 2÷5  $T_n$
- $ts$ : tempo massimo di utilizzo di  $T_p$
- non utilizzata tutta per evitare il sovradimensionamento del Driver



### (3) Coppia limite dovuta alla tensione massima di alimentazione dell'avvolgimento

$$f_{cem} = K \omega$$

Esempio:

$$T = K i_a$$

$$f_{cem} = K \omega$$

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

## Azionamenti tipo-asse ed azionamenti tipo-mandrino

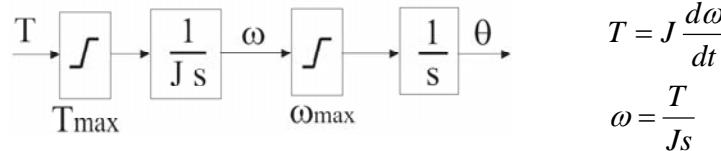
- Suddivisione di larga massima:
  - Azionamenti tipo-asse
  - Azionamenti tipo mandrino

Con **asse** si fa riferimento ad una coordinata del sistema lungo la quale agisce l'azionamento preso in considerazione

Con **mandrino** si intende il supporto dell'utensile che ha il compito di fare lavorare l'utensile stesso.

## Azionamento tipo-asse

- esegue una predeterminata legge del moto  $\theta(t) \rightarrow \omega(t)$ , ad alta dinamica
- compatibilmente con i vincoli  $T_{max}$  ed  $\omega_{max}$

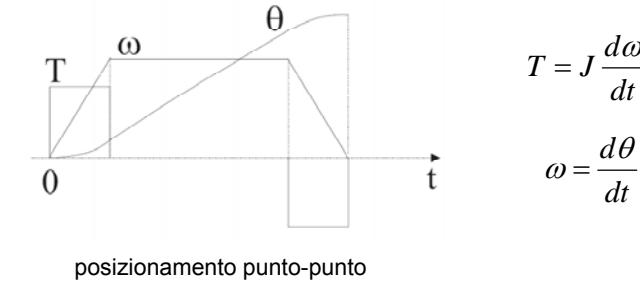


- Negli azionamenti asse il carico è prevalentemente inerziale.
- $T_{max}$ : dipende dai limiti termici del servomotore.
- $\omega_{max}$ : dipende sia da aspetti meccanici che dalla tensione di alimentazione

- Questi vincoli rendono meno ideale lo studio del sistema controllato.

- Per eseguire la legge del moto si richiede in generale un funzionamento sui quattro quadranti:  $T, \omega > 0$  e  $< 0$

- deve erogare coppia a velocità zero.



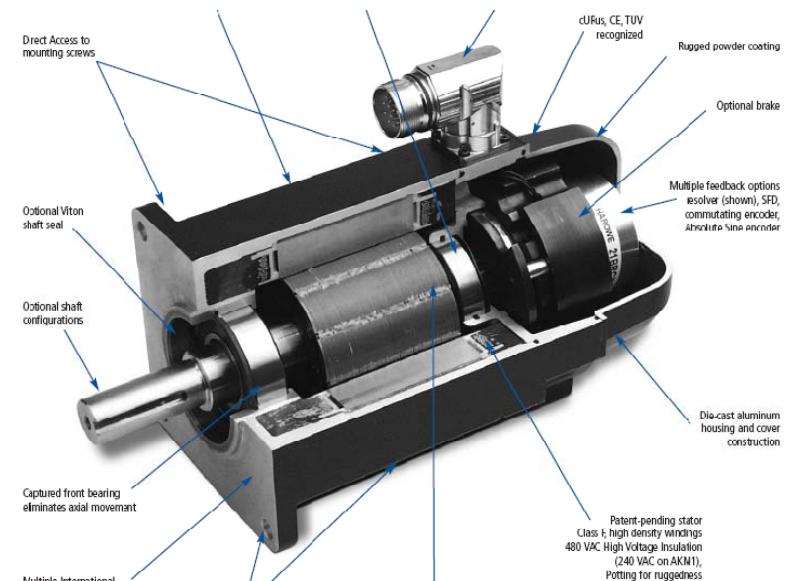
- Il motore viene sovraccaricato, transitoriamente.
- Il convertitore è surdimensionato.

## Il motore (servomotore):

- Coppia continua e di sovraccarico.
- Velocità massima.
- Raffreddamento naturale (esecuzione chiusa).
- Trasduttore di posizione o velocità.
- Spesso ha un freno di stazionamento elettromagnetico.

### • Prestazioni di coppia

1. Alta densità di coppia (Nm/Vol) o (Nm/peso).
2. Buona qualità di coppia (bassa ondulazione, in funzione di  $\theta$ ).
3. Alto rapporto  $T_{max}/J_r$  (accelerazione naturale).



## Il convertitore

- Dimensionato per la corrente di sovraccarico e la tensione massima (massima velocità) kVA.
- Condizioni peggiori di lavoro a velocità zero.
- Convertitore non reversibile (l'energia di frenatura viene dissipata).
- Operante su quattro quadranti (V,I) ad alta dinamica.

## Potenze

- Coppie da 1 Nm a 50 Nm (continuativi)
- Velocità massima:
  - \* da 3000 rpm (motori C.C.):  $\approx 300$  rad/sec
  - \* a 6000 rpm (motori C.A.):  $\approx 600$  rad/sec
- Potenza da  $\approx 500$ W a 15kW
- Potenza del convertitore più alta (kVA) (fattore di sovraccarico, 2÷3 volte).

- Le velocità massime variano al variare della dimensione dei motori (6000rpm  $\rightarrow$  motori piccoli e 3000 rpm  $\rightarrow$  motori grandi), la potenza massima:  $50\text{Nm} \times 300\text{rad/sec} \approx 15\text{kW}$ .

## Azionamento tipo-mandrino

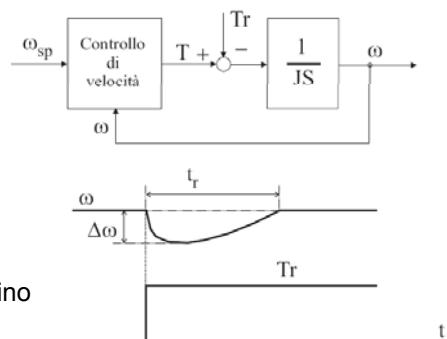
- Azionamento sostanzialmente a velocità costante.
- Permette anche il posizionamento (cambio utensile - asse C)
- Elevate prestazioni dinamiche (presa di carico)
- Carico a potenza costante, per un ampio intervallo di velocità.

### Presca di carico

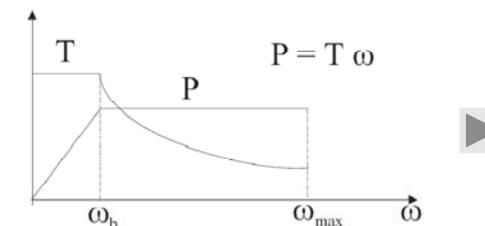
$$T = Tr + J \frac{d\omega}{dt}$$

$$\omega = (T - Tr) \frac{1}{J_s}$$

$\Delta\omega$  e  $t_r$  sono fattori di merito dell'azionamento tipo-mandrino



- intervallo di velocità a potenza costante:



- Il dimensionamento del motore dipende (prevalentemente) dalla coppia continuativa.

- Il dimensionamento del convertitore (kVA) dipende dal prodotto  $I_{max} V_{max}$ .

- Per un motore C.C.:

- Equazione di della forza elettromotrice  $E$ :

$$E = K\phi \omega$$

- Equazione della coppia:

$$T = K\phi I_a$$

$$P = T \omega = K\phi I_a \omega = E I_a$$

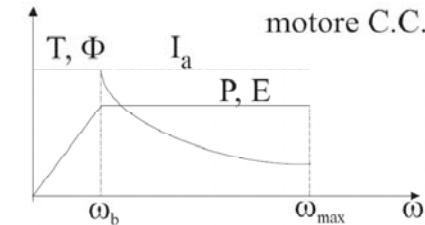
- Se  $K\phi = \text{cost.}$   $\Rightarrow E \propto \omega$  e  $T \propto I_a$



- Se  $K\phi \omega = \text{cost.}$   $\Rightarrow E = \text{cost.}$  e  $T \propto \omega^{-1}$



- Si deflussa ( $\Phi \omega = \text{cost}$ ) a partire da  $\omega_b$ .



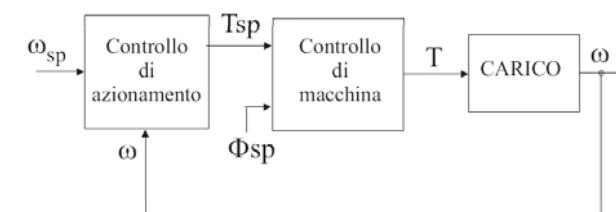
- deflussando la tensione smette di crescere con  $\omega$

- Il risparmio (teorico) in kVA dipende da  $\omega_{\text{max}}/\omega_b$

## Deflussaggio

- Il deflussaggio allevia il dimensionamento del convertitore.
- Si può utilizzare dove è richiesta meno coppia ad alte velocità.
- L'operazione è più complessa nel caso di motore in corrente alternata.
- Introduce dei problemi di controllo perché variando il coefficiente  $K\phi$  [ $Nm/A$ ] varia il guadagno dell'anello di  $\omega$ .

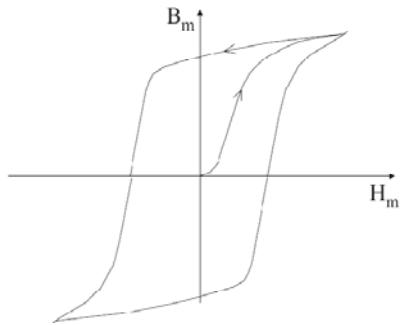
## Schema generale di controllo



- Controllo di macchina (dipende dalla macchina).
- Controllo di azionamento.

## Lezione 3

- La caratteristica fa parte di un ciclo d'isteresi, che si raggiunge nella fase di prima magnetizzazione.

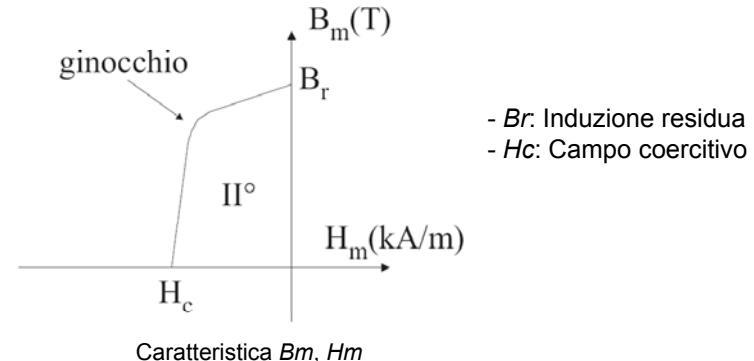


La magnetizzazione può essere fatta in fabbrica, oppure nel circuito magnetico di impiego, a seconda del materiale e delle esigenze produttive.

## Materiali magnetici permanenti

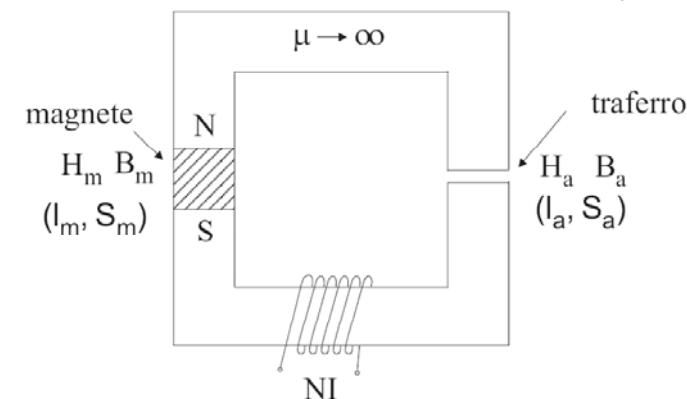
### Materiali ferromagnetici ad alta isteresi

- Generica caratteristica nel quadrante di impiego



- Consideriamo un circuito magnetico ideale

- $\bullet$  No flux disperso
- $\bullet$   $\mu \rightarrow \infty$



$$H_m I_m + H_a I_a = NI$$

$$S_m B_m = S_a B_a$$

- Cerchiamo di mettere in evidenza la retta di carico, quindi la relazione fra  $B_m$  ed  $H_m$ .

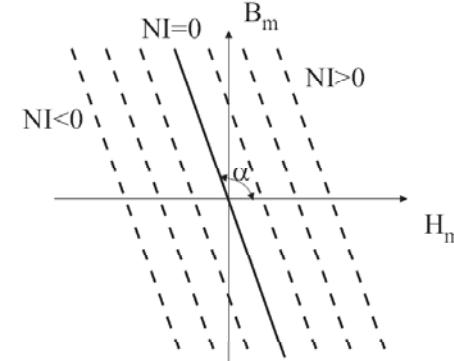
Si elimina  $H_a$ ,  $B_a$ , essendo  $B_a = \mu_0 H_a$ :

$$B_m = B_a \frac{S_a}{S_m} = \mu_0 H_a \frac{S_a}{S_m} = \mu_0 \frac{S_a}{S_m} \frac{NI - H_m l_m}{l_a}$$

equazione retta di carico, nel piano  $(H_m, B_m)$ :

$$B_m = \mu_0 \frac{S_a}{S_m} \frac{l_m}{l_a} \left( -H_m + \frac{NI}{l_m} \right)$$

### Retta di carico nel piano $(H_m, B_m)$



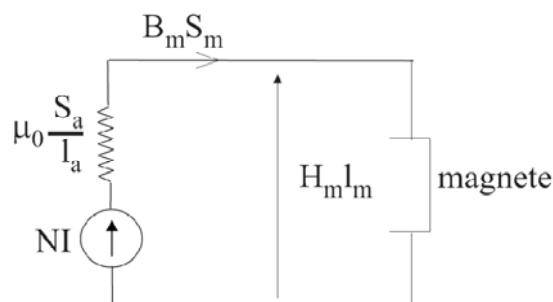
- Il coefficiente angolare è  $< 0$ :

$$\tan \alpha = -\mu_0 \frac{S_a}{S_m} \frac{l_m}{l_a}$$

- Il punto di lavoro dipende dalla f.m.m. esterna NI.

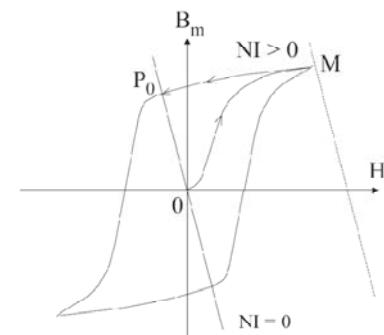
- In termini di flusso ( $B_m S_m$ ) e f.m.m. ( $H_m l_m$ ):

$$B_m S_m = \mu_0 \frac{S_a}{l_a} \left( -H_m l_m + NI \right)$$



Circuito elettrico equivalente

### • Magnetizzazione

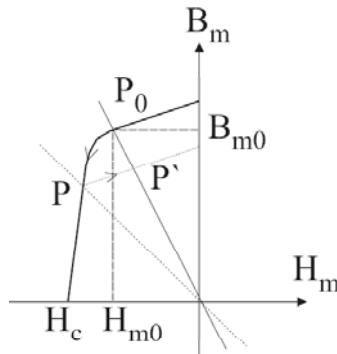


Il punto di lavoro va da 0 ad M.  
Quindi  $NI=0$  si porta in  $P0$ .

- Ci sono due modi per variare questo punto di lavoro:

- Si può aumentare il traferro.
- Si può applicare dall'esterno una f.m.m.

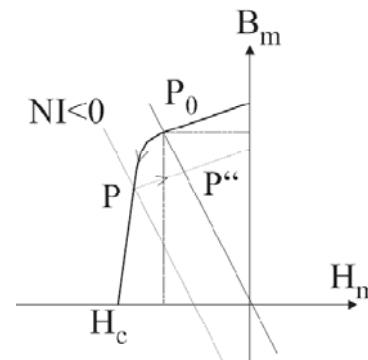
### Punto di lavoro a $NI = 0$



- Se si aumenta il traferro:  $P_0 \rightarrow P$ .
- Se si supera il ginocchio, anche riportando il traferro come prima non si torna in  $P_0$  ma in  $P'$ .

- Certi materiali devono essere magnetizzati nel circuito definitivo.

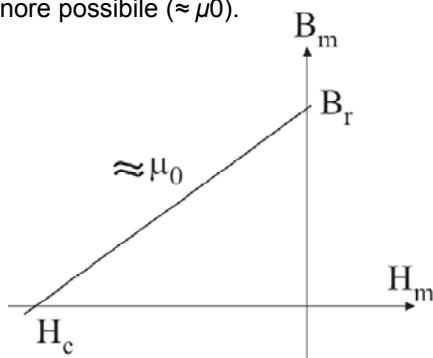
### Punto di lavoro a $NI \neq 0$



- Se si applica  $NI < 0$  tale da superare il ginocchio, anche annullando la f.m.m. non si torna in  $P_0$  ma in  $P''$ .
- Tale smagnetizzazione può avvenire nei motori, dove  $NI$  varia da punto a punto.

- Il materiale magnetico ideale deve avere:

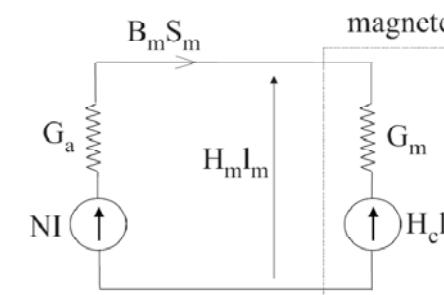
- Caratteristica rettilinea (reversibile) nel 2 quadrante.
- pendenza minore possibile ( $\approx \mu_0$ ).



- Per smagnetizzare il magnete occorre portarlo a  $B_m < 0$ .
- La curva si può approssimare con la relazione:

$$\mu_0 |H_c| \approx B_r$$

- Essendo lineare la caratteristica del magnete, vale il circuito equivalente:



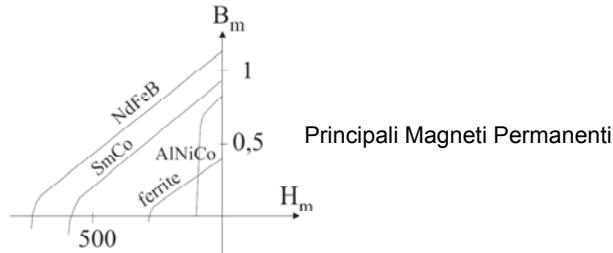
$$G_a = \mu_0 \frac{S_a}{l_a} \quad G_m = \mu_0 \frac{S_m}{l_m}$$

## Tipologie di materiali magnetici permanenti

• **Leghe (AlNiCo)**: alta Br e basso Hc. Caratteristica non lineare ( $\mu > \mu_0$ )

• **Ferriti**: basso Br ma  $\mu \approx \mu_0$   $|H_c| \approx \frac{B_r}{\mu_0}$

• **Terre rare**: alta Br con  $\mu \approx \mu_0$   $|H_c| \approx \frac{B_r}{\mu_0}$



Le caratteristiche variano con la temperatura.

## Dipendenza dalla temperatura

Deriva termica del valore Br (al C°)

- Ferrite -0,2%

- SmCo -0,05%

- NdFeBo -0,1%

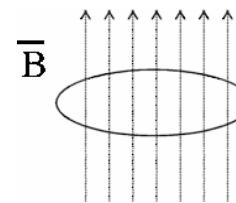
Per le ferriti la deriva di Hc è di segno opposto rispetto a quella di Br.

Al crescere della temperatura si instaura un fenomeno di "smagnetizzazione irreversibile", che termina nel punto di Curie.

## Lezione 4

- Il segno “-” della 3 deriva dal principio dell’azione e reazione: “Legge di Lenz”:  
“*la reazione è tale da opporsi all’azione che l’ha prodotta.*”

## Induzione Elettromagnetica



- Legge dell’induzione elettromagnetica (Faraday-Neumann)

$$e(t) = -\frac{d\Phi_c}{dt} \quad (3)$$

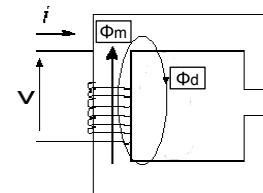
- $\Phi_c$ : flusso concatenato con la spira
- $e(t)$ : f.e.m. indotta

- L’intensità di  $e$  è proporzionale alla variazione di  $\Phi_c$ . Il flusso concatenato può variare per due motivi:

- si sposta la spira.
- varia il campo magnetico.

## Cenni sull’induttanza di dispersione

In un circuito magnetico non ideale parte del flusso si richiude nell’aria (flusso disperso):



- $\lambda_m = N\Phi_m$  flusso magnetico nel ferro concatenato con l’avvolgimento.
- $\lambda_d = N\Phi_d$  flusso magnetico disperso in aria concatenato con l’avvolgimento.
- $N$ : numero di spire dell’avvolgimento.

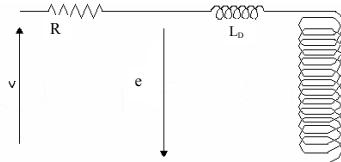
Il flusso magnetico totale concatenato con l’avvolgimento è:  $\lambda = \lambda_m + \lambda_d$  che produrrà un f.e.m. data dalla 3:

$$e = -\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{d\lambda_m}{dt} - \frac{d\lambda_d}{dt}$$

dato che per il flusso disperso la relazione con la corrente è lineare:  $\mu = \mu_0$ , si può porre:  $\lambda d = L_d i$ ; la f.e.m. indotta diventa:

$$e = -\frac{d\lambda_m}{dt} - L_d \frac{di}{dt}$$

In questo modo il circuito equivalente dell'avvolgimento diventa:



Le equazioni dell'avvolgimento diventano:

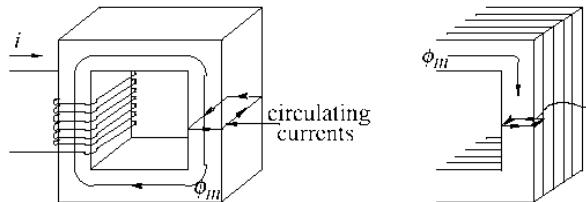
$$v(t) + e = Ri$$

$$v(t) = Ri + L_d \frac{di}{dt} + \frac{d\lambda_m}{dt}$$

Il flusso di dispersione può essere rappresentato come un'induttanza  $L_d$  detta di dispersione.

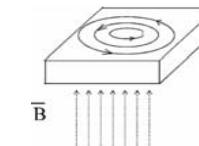
- Le correnti parassite vengono ridotte:

- suddividendo il materiale conduttore in tante superfici parallele alle linee di flusso (lamierini isolati).  
- aumentando la resistività del materiale.

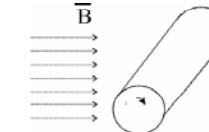


## Correnti parassite (Foucault)

- Le correnti parassite nascono nei corpi conduttori investiti da flussi magnetici variabili e/o quando si muovono in campi magnetici.

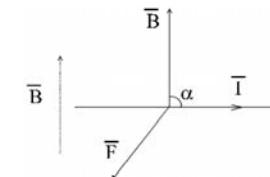


- Le correnti parassite sono delle correnti indotte.
- L'effetto è una dissipazione di energia elettrica in calore per effetto Joule.



- Su un materiale conduttore in movimento per la legge di Lenz hanno anche un effetto frenante.

## Forza elettromagnetica



- Un conduttore rettilineo lungo  $l$  percorso da corrente elettrica  $I$  ed immerso in un campo magnetico uniforme  $B$  è sottoposto ad una forza  $F$ :

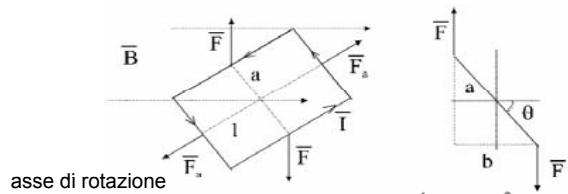
$$\bar{F} = l \bar{I} \times \bar{B} \quad (\bar{F} = l I \wedge \bar{B})$$

il cui modulo vale:

$$|\bar{F}| = I l B \sin \alpha$$

Nel nostro caso  $\alpha = 90^\circ \rightarrow |F| = l B I$

- Nel caso di una spira rettangolare percorsa da una corrente  $I$ , posta in un campo elettromagnetico uniforme  $B$ , il cui asse è ortogonale alle linee di flusso, le forze  $F$  formano una coppia:



$$B \perp l \quad \Rightarrow \quad F = BlI$$

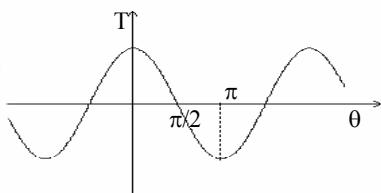
$$T = F \cdot b$$

$$T = Fb = Fa \cos \theta = lBlIa \cos \theta = SBI \cos \theta$$

dove  $S = la$  è l'area della spira.

$$T = SBI \cos \theta$$

- La coppia è massima per  $\theta = 0$  e si annulla per  $\theta = 90^\circ$
- La coppia varia sinusoidalmente
- Un qualsiasi circuito elettrico libero di muoversi o deformarsi assume la posizione o la forma per le quali il flusso concatenato diventa massimo.
- Per  $\theta = 0$  il campo prodotto dalla corrente nella spira è perpendicolare al campo magnetico  $B$ : se questa condizione viene mantenuta più a lungo, la coppia massima si avrebbe per un range più ampio.



dato che:

$$\Phi_C = BS \sin \theta = \Phi_{CM} \sin \theta$$

$$T = SBI \cos \theta$$

$$T = I \frac{d\Phi_C}{d\theta}$$

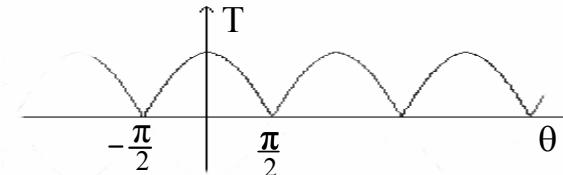
Nel caso di una bobina con  $N$  spire si ha:

$$\lambda_C = N\Phi_C \quad T = I \frac{d\lambda_C}{d\theta}$$

$$T = \lambda_{CM} \cos \theta I = \frac{d\lambda_C}{d\theta} I \quad ; \quad \lambda_C = \lambda_{CM} \sin \theta = N\Phi_{CM} \sin \theta = NBS \sin \theta$$

$$T_{MAX} = NBS I$$

Invertendo la corrente al di fuori dell'intervallo  $[-\pi/2, \pi/2]$  si può ottenere una coppia che ha sempre lo stesso verso ma con un ripple elevato:

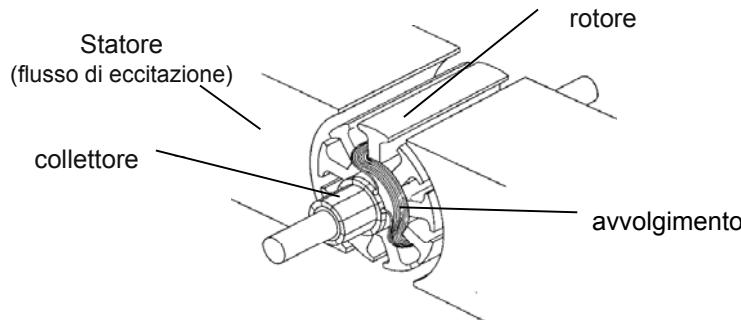


$$T = NSBI \cos \theta = \Phi_{CM} I \cos \theta$$

$$T_{MAX} = NBS I$$

Per mantenere lo stesso segno della coppia occorre invertire il segno della corrente

## Struttura di un motore in CC

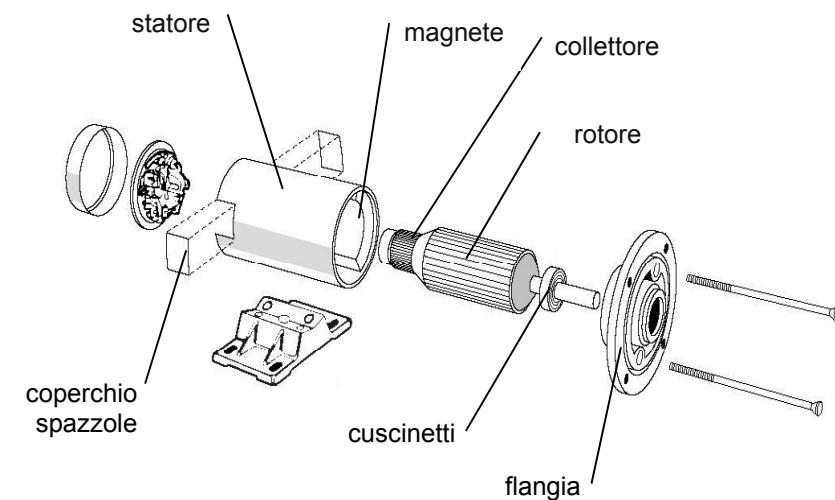
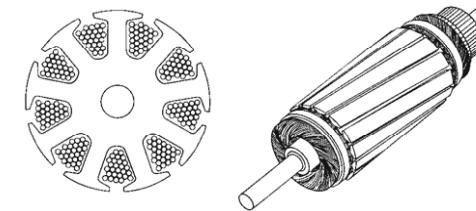


• Lo statore ha il compito di generare il campo magnetico, questo può essere fatto:

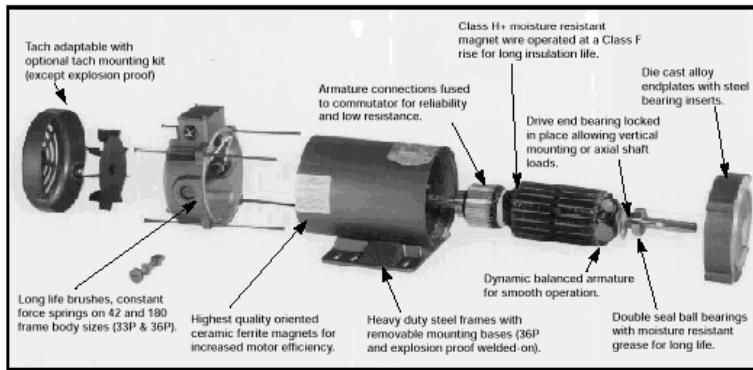
- con magneti permanenti
- con un avvolgimento detto di eccitazione



- Il rotore, un cilindro di materiale ferromagnetico (lamierini), ha:
  - un avvolgimento di armatura, all'interno di scanalature (cave)
  - un collettore, costituito da delle lamelle isolate fra di loro, e delle spazzole



## • Principio di funzionamento di un motore DC

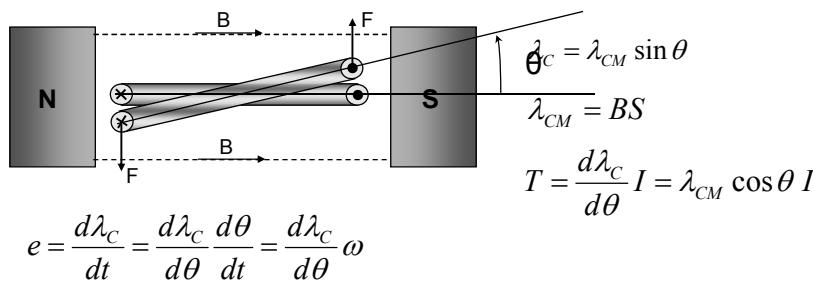


Supponiamo che il campo magnetico sia realizzato da due magneti in modo da avere un ampio sviluppo a traferro costante nel quale l'induzione è uniforme ad andamento radiale.

Questo accorgimento ci permette di avere la coppia massima per un range ampio della posizione.

Supponiamo di alimentare l'avvolgimento di armatura con una corrente costante  $ia$ .

### CAMPO MAGNETICO "NON RADIALE":



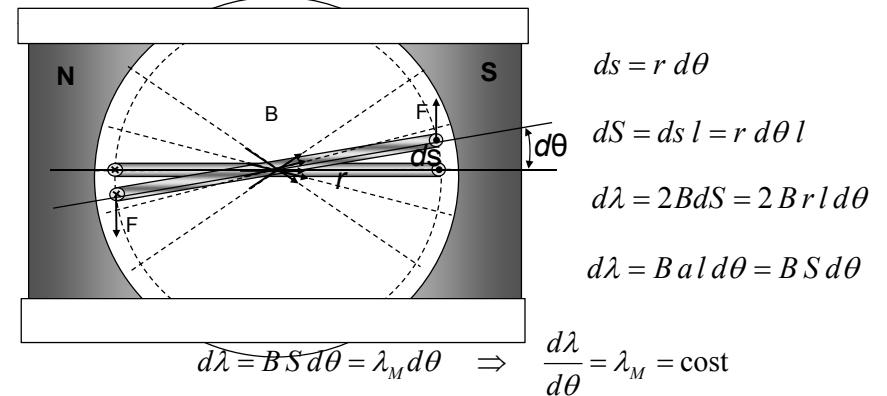
Se  $I$  ed  $\omega$  sono costanti allora "e" e "T" hanno lo stesso andamento:

$$T = \frac{d\lambda_{CM}}{d\theta} I = \lambda_{CM} \cos \theta I$$

$$e = \frac{d\lambda_{CM}}{d\theta} \omega = \lambda_{CM} \cos \theta \omega$$

Importante per definire il legame fra  $I$  e  $T$

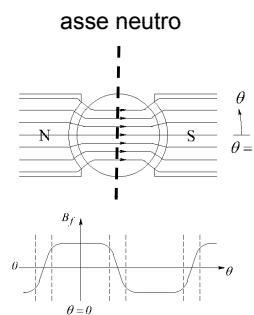
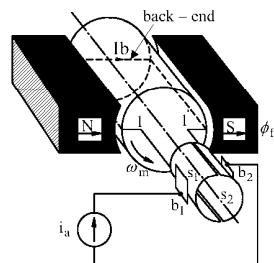
### CAMPO MAGNETICO "RADIALE":



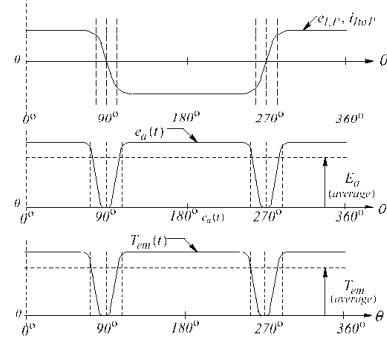
$$T = \frac{d\lambda}{d\theta} I = \frac{2Brl}{d\theta} I = 2Brl I$$

$$e = \frac{d\lambda}{d\theta} \omega = \frac{2Brl}{d\theta} \omega = 2Brl \omega$$

In tutto l'intervallo con campo radiale la coppia assume il massimo valore



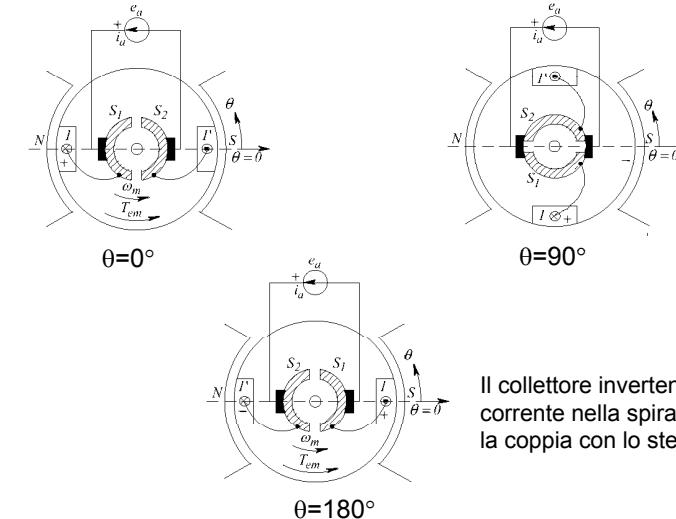
In figura è indicato l'andamento dell'induzione al traferro in funzione della posizione.



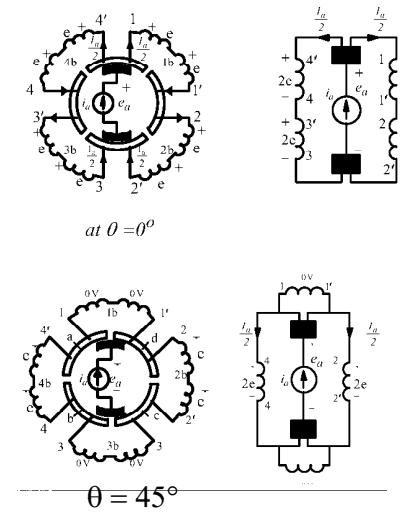
• La coppia è:  $T = 2lrBia$

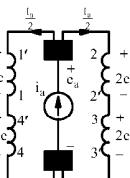
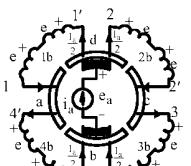
• La f.e.m. indotta (f.c.e.m.), nell'intervallo in cui il flusso è costante, è proporzionale alla velocità angolare:  $e_a = 2B l(r \omega_m)$

## Azione di commutazione

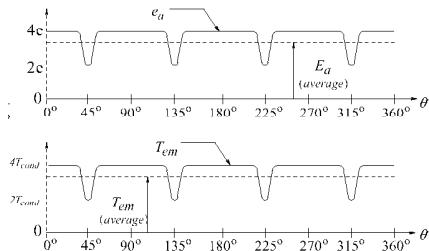


## Caso di quattro avvolgimenti





$$\theta = 90^\circ$$



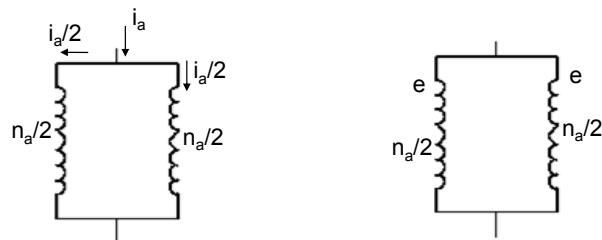
Il ripple di coppia  $T$  e di f.c.e.m.  $ea$  può essere ridotto aumentando il numero di avvolgimenti.

- La corrente  $ia$  si divide equamente tra i due circuiti paralleli.
- La coppia prodotta su ogni avvolgimento ha la stessa direzione.
- La direzione di  $ia$  determina il verso della coppia.
- La polarità della f.c.e.m. dipende solo dalla direzione di rotazione.

$$T = B2rl i_a = n_a Brl i_a$$

$$e = B2rl \omega = n_a Brl \omega$$

-  $n_a$  rappresenta il numero di conduttori



$$T = n_a Brl \left( \frac{i_a}{2} \right) = \left( \frac{n_a}{2} Brl \right) i_a = k_T i_a$$

$$e = \frac{n_a}{2} Brl \omega = \left( \frac{n_a}{2} Brl \right) \omega = k_E \omega$$

Nelle unità M.K.S. si ha:  $KE = KT$