

# Macchine elettriche in corrente alternata trifase (Motori asincroni)

Applicazioni Industriali Elettriche  
2021-22

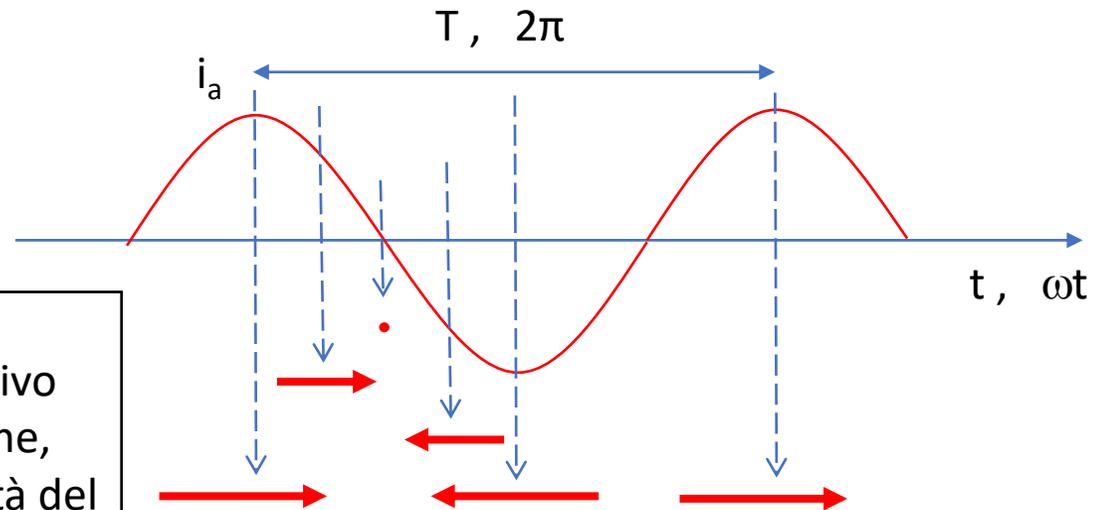
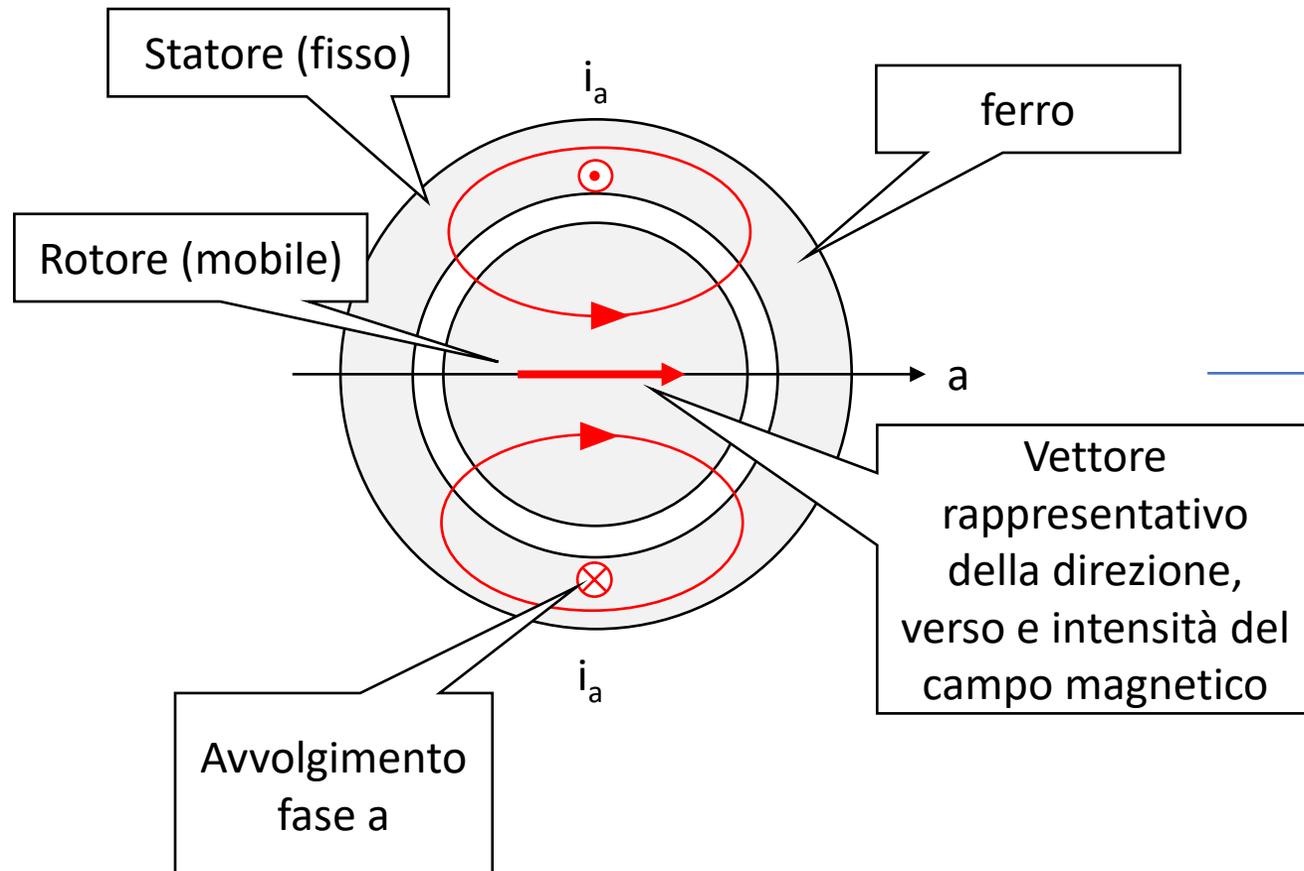
# Campo magnetico rotante

- Campo magnetico con intensità costante che ruota attorno ad un asse con velocità angolare costante  $\omega$
- Un campo magnetico rotante può essere prodotto facendo ruotare a velocità angolare costante un magnete permanente oppure un solenoide percorso da corrente costante
- Un campo magnetico rotante può essere anche generato da un insieme di avvolgimenti fissi opportunamente disposti e percorsi da correnti sinusoidali opportunamente sfasate tra loro, per esempio un sistema trifase

# Campo magnetico rotante

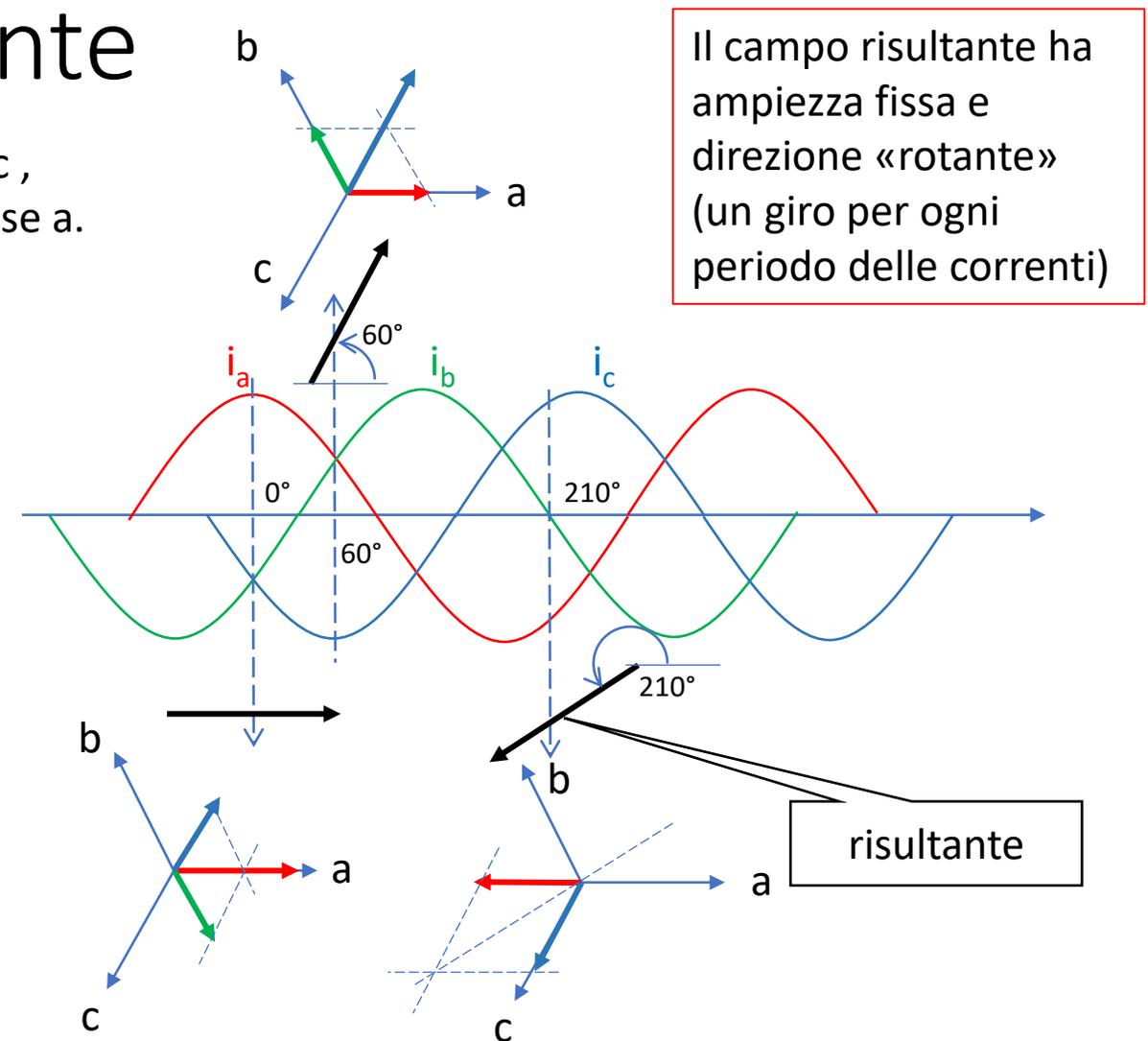
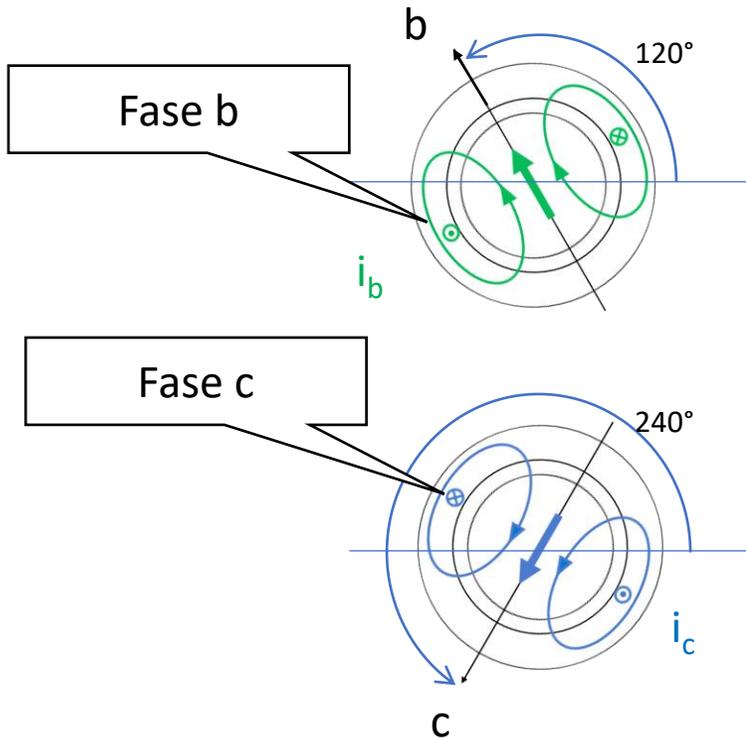
Struttura di una macchina elettrica rotante con una sola fase (fase a) percorsa da corrente sinusoidale  $i_a$ .

Il campo risultante ha ampiezza «pulsante» (una pulsazione per ogni periodo delle correnti) e direzione fissa



# Campo magnetico rotante

Struttura di una macchina elettrica rotante con le fasi d e c ,  
relativi campi magnetici e composizione degli stessi con fase a.



# Campo magnetico rotante

- La configurazione precedente era a «due poli» ( $2p=2$ ) ovvero ad una coppia polare ( $p=1$ ). Si può «condensare» la distribuzione dei conduttori (avvolgimenti) in soli  $180^\circ$  e poi ripeterla per gli altri  $180^\circ$  ottenendo una macchina a 4 poli ossia 2 coppie polari ( $p=2$ ). Si possono realizzare macchine con qualsiasi numero di coppie polari.
- La velocità di rotazione è pari a

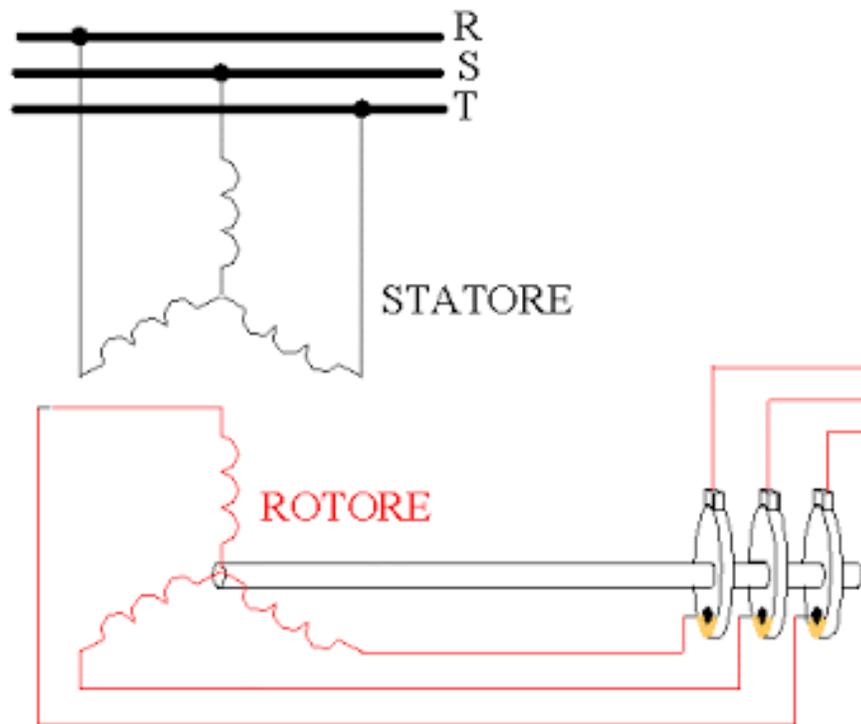
$$\omega_o = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p} \quad n_o = \frac{60\omega_o}{2\pi} = \frac{60f}{p}$$

con  $p$  pari al numero di **coppie polari** (paia di poli).

- I valori risultanti di  $n_o$  sono in tabella per la frequenza “europea” e quella “americana”.

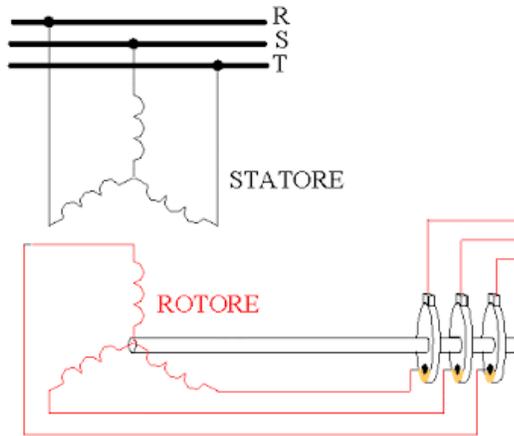
$p$ (n. poli $2p$ )	$n_o$ ( $f=50$ Hz) rpm	$n_o$ ( $f=60$ Hz) rpm
1 (2)	3000	3600
2 (4)	1500	1800
3 (6)	1000	1200
...8 (16)	375	450

# Macchina asincrona: Circuito rotorico



- Immaginiamo che ci sia un circuito trifase anche sul rotore, analogo a quello di statore (ma potrebbe essere anche bifase o con più di tre fasi)
- Immaginiamo che sia accessibile mediante tre anelli striscianti, fissati sull'albero del rotore
- E' una specie di trasformatore trifase

# Comportamento con rotore fermo



## a) Rotore aperto

- Nello statore (alimentato da rete) ci saranno fem  $E_1$ , alla frequenza  $f$  di rete
- Nel rotore (aperto) ci saranno fem  $E_2$ , alla stessa frequenza  $f$  di rete, e con ampiezza dettata dal rapporto di trasformazione.
- La fem  $E_2$  possono essere sfasate rispetto alle rispettive fem di statore a seconda della posizione del rotore

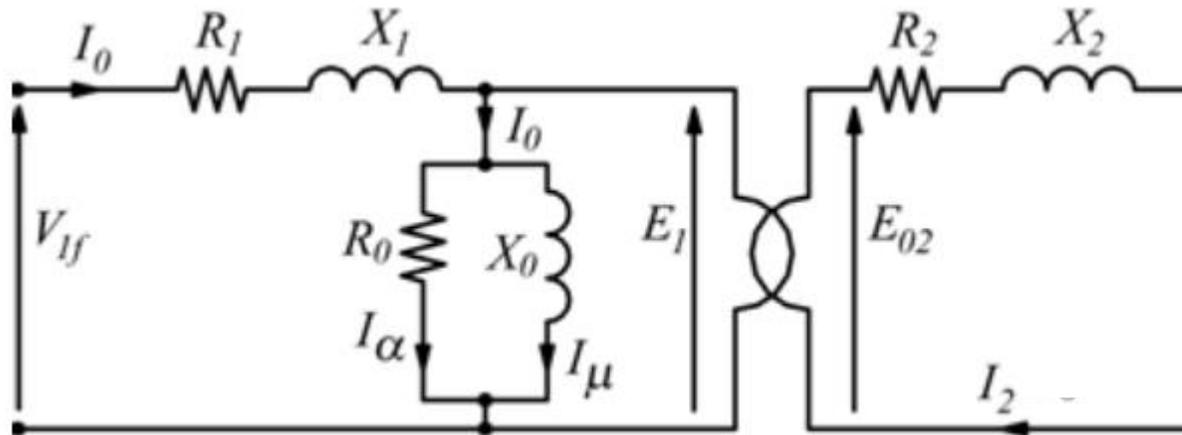
## b) Rotore collegato ad un carico equilibrato trifase Z

- Il comportamento si può studiare come per un trasformatore trifase
- Lo sfasamento fra le fem si può ignorare e considerare lo schema elettrico monofase (di una fase)

## c) Rotore in corto circuito

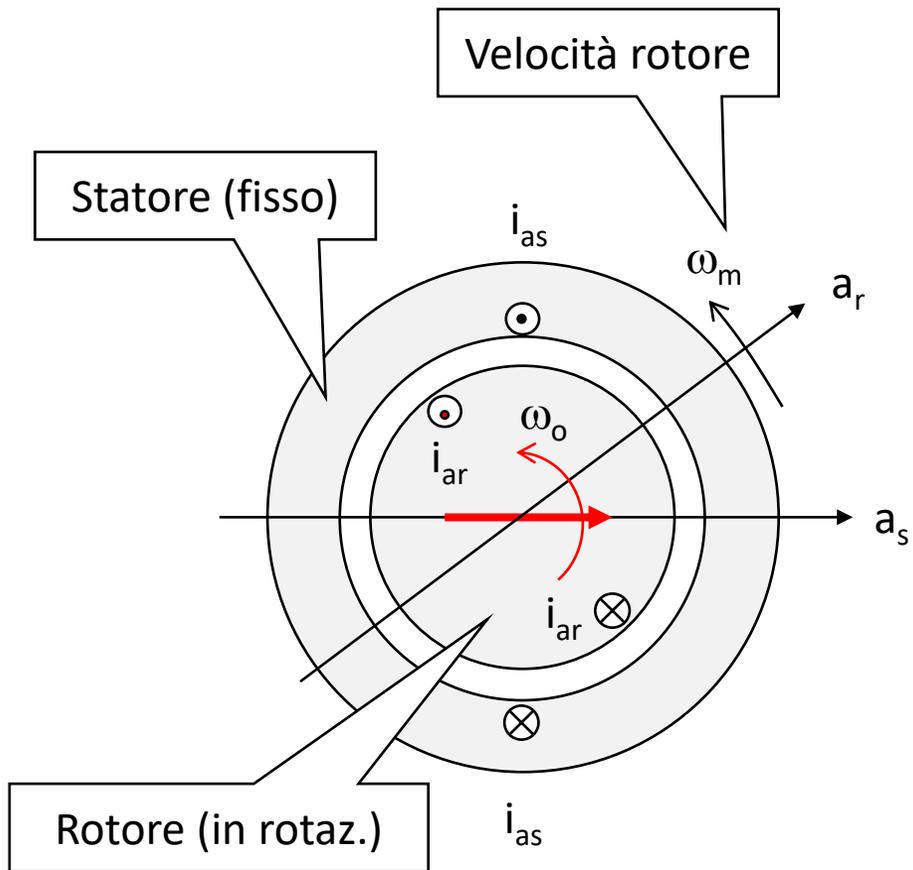
- E' il caso di maggiore interesse (normale funzionamento del motore)

# Comportamento con rotore fermo in cto-cto



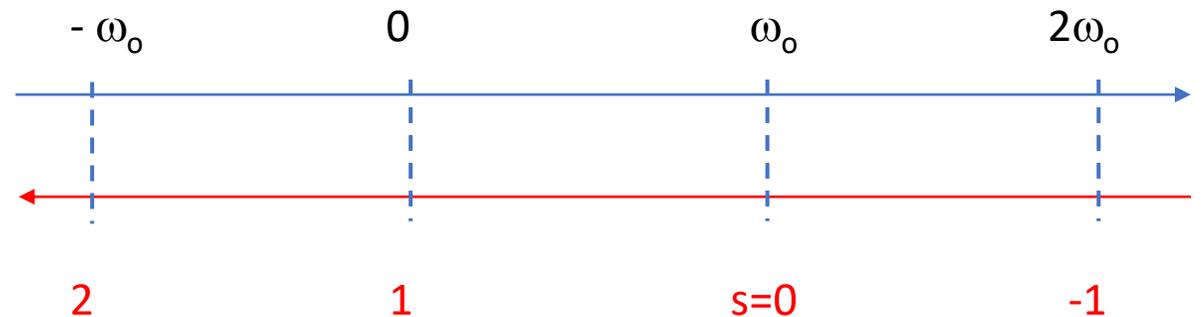
- Usiamo lo schema elettrico equivalente monofase di un trasformatore.
- Nel caso del motore asincrono la corrente a vuoto è percentualmente maggiore (20-40%) perché c'è il traferro.

# Comportamento con rotore in rotazione



- Nello statore (alimentato da rete) ci saranno fem  $E_1$ , alla frequenza  $f$  di rete, dovute al campo che gira a velocità  $\omega_o$
- La velocità relativa fra campo rotante e rotore è  $\omega_o - \omega_m$  detta «**velocità di scorrimento**»  $\omega_s$  ed espressa come  $s\omega_o$

ove  $s = (\omega_o - \omega_m) / \omega_o$



# Comportamento con rotore in rotazione

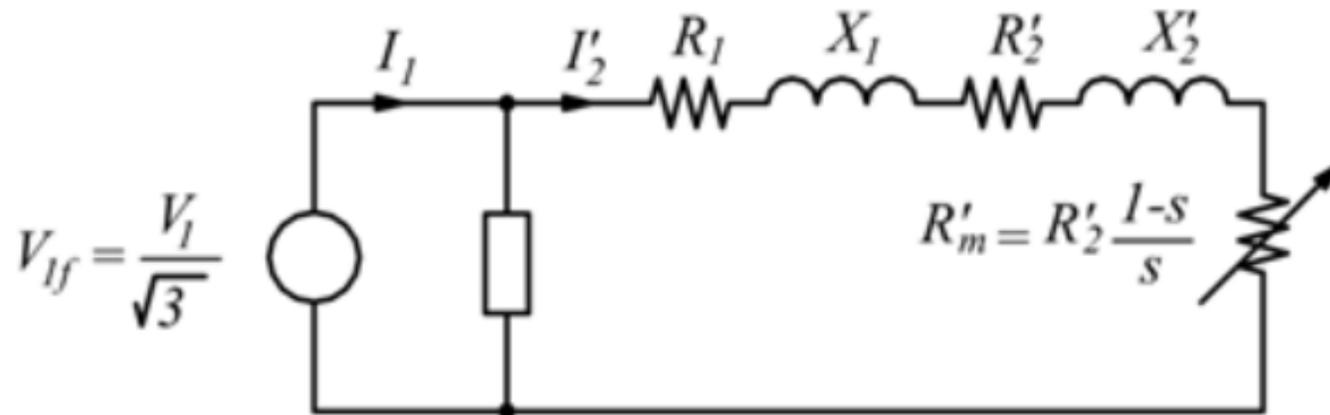
Equazioni di rotore

- $f_2(s) = s f$
- $\bar{E}_2(s) = s \bar{E}_{02} = (R_2 + j s X_2) \bar{I}_2$

Divido la seconda equazione per s

- $\bar{E}_{02} = \left(\frac{R_2}{s} + j X_2\right) \bar{I}_2$       come se il rotore fosse fermo e la resistenza  $\frac{R_2}{s}$
- $\frac{R_2}{s} = R_2 + \left(R_2 \frac{1-s}{s}\right)$       come se in serie a  $R_2$  ci fosse una  $R_m = \left(R_2 \frac{1-s}{s}\right)$

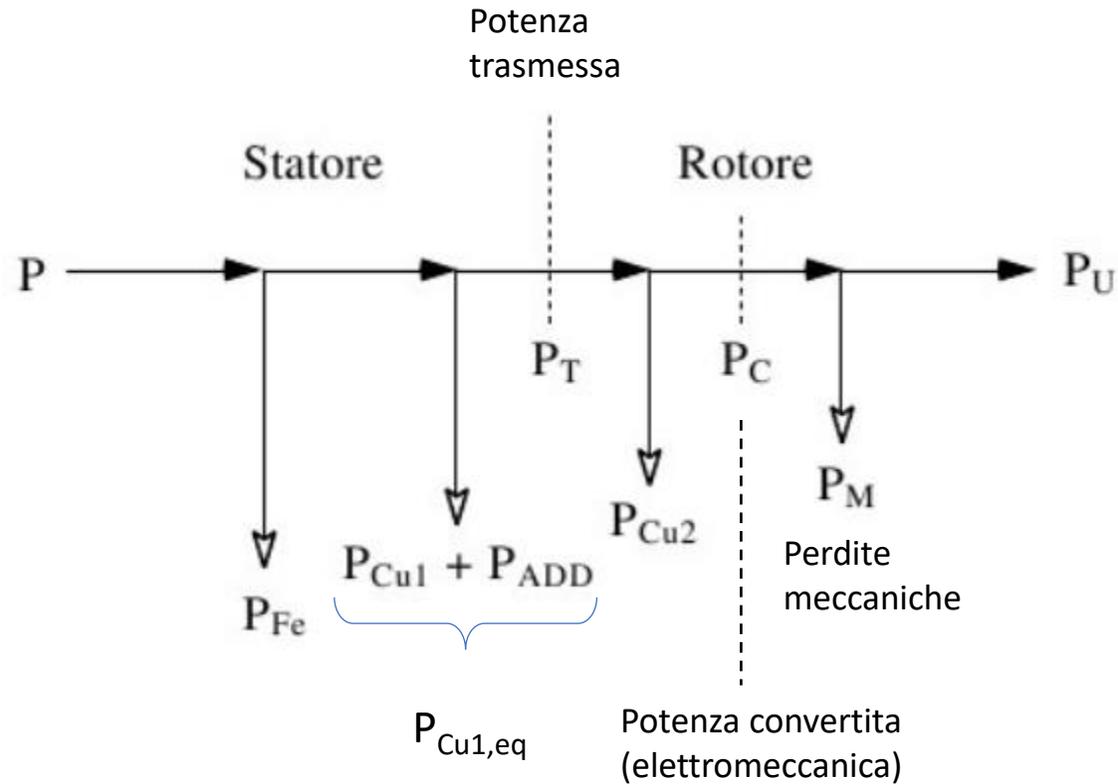
# Comportamento con rotore in rotazione



Circuito equivalente monofase semplificato:

- Rotore riportato a statore
- Impedenza a vuoto portata a monte
- La potenza su  $R'_m$  è la potenza elettromeccanica (potenza convertita da elettrica a meccanica o viceversa).

# Bilancio delle potenze



$$P_{Cu2} = 3R'_2 I_2'^2$$

$$P_C = 3R'_m I_2'^2 = 3R'_2 \frac{1-s}{s} I_2'^2 = P_{Cu2} \frac{1-s}{s}$$

$$P_T = P_{Cu2} + P_C = 3 \frac{R'_2}{s} I_2'^2 = \frac{P_{Cu2}}{s}$$

$$P_{Cu2} = s P_T$$

$$P_C = (1-s) P_T$$

$$P_C = C \omega_m = C \omega_o (1-s) \rightarrow P_T = C \omega_o$$

$$C = \frac{P_T}{\omega_o} = p \frac{P_T}{\omega}$$

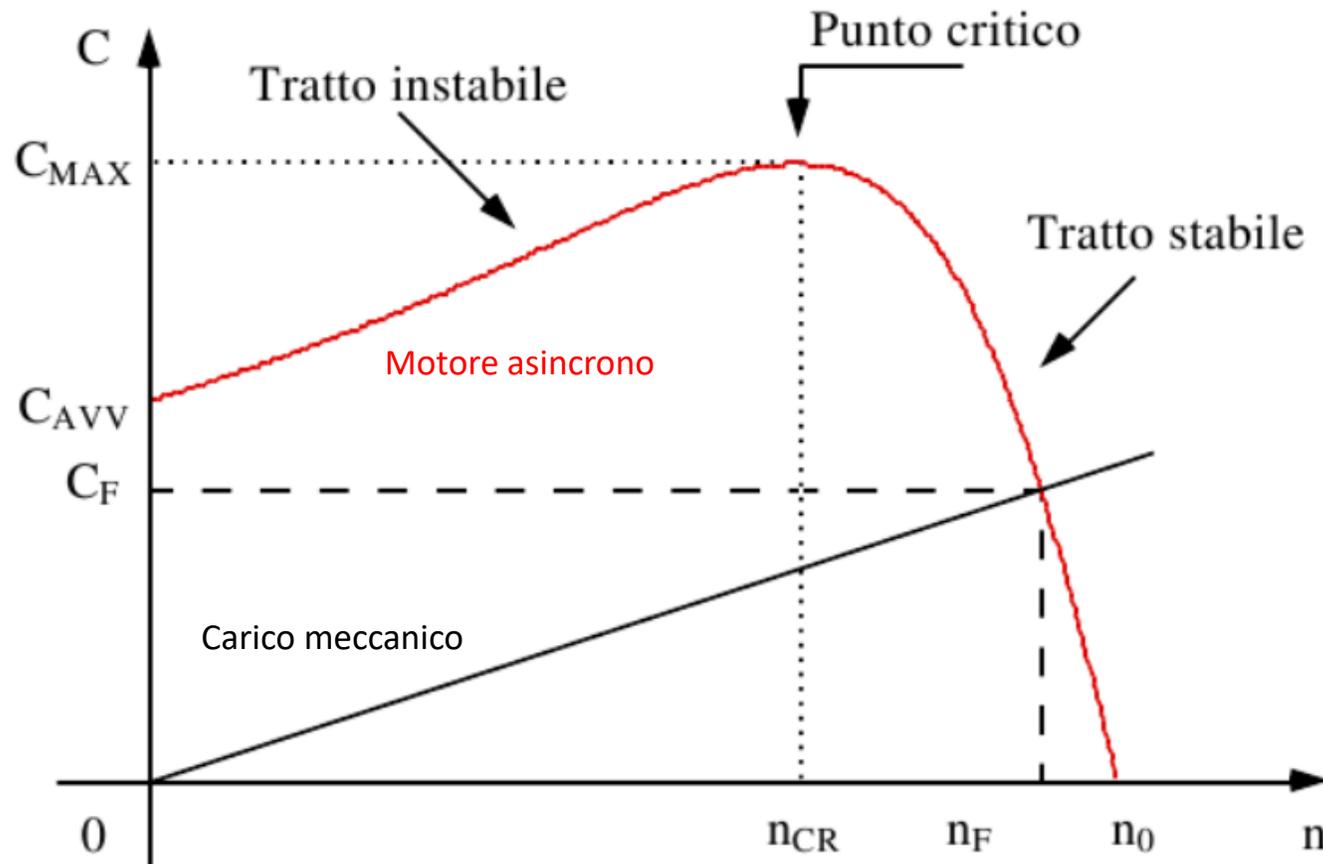
# Coppia

- Sia  $X=X_1+X'_2$  e  $R_1 \approx 0$  allora:

- $I'_2 = \frac{V}{\sqrt{\left(\frac{R_2^1}{s}\right)^2 + X^2}}$  cui segue  $P_T = 3 \frac{R'_2}{s} I_2'^2 = 3 \frac{R'_2}{s} \frac{V^2}{\left(\frac{R_2^1}{s}\right)^2 + X^2}$

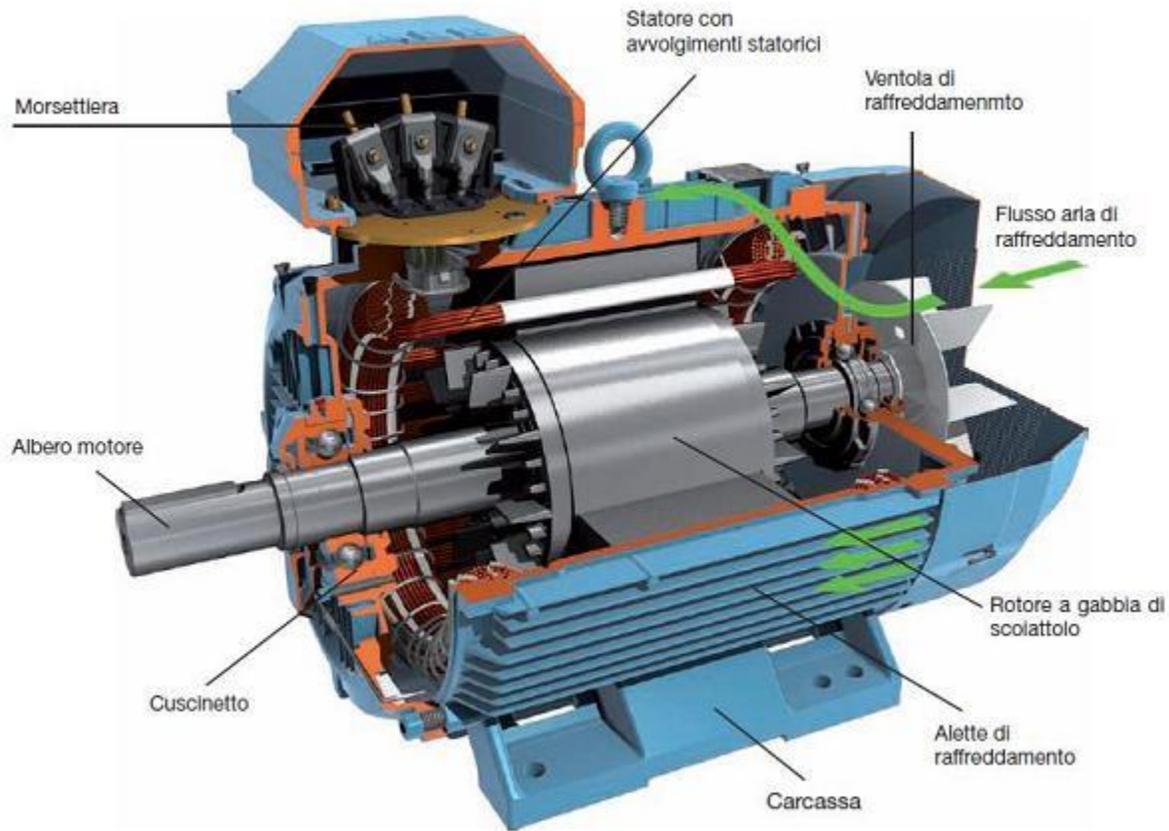
- $C = p \frac{P_T}{\omega} = 3p \frac{R'_2}{s\omega} \frac{V^2}{\left(\frac{R_2^1}{s}\right)^2 + X^2} = 3p \left(\frac{V^2}{\omega^2}\right) \frac{s\omega R'_2}{R_2^{1^2} + (sX)^2} = 3p \left(\frac{V^2}{\omega^2}\right) f(s)$

# Caratteristica meccanica (a tensione e frequenza costanti: alimentazione da rete)



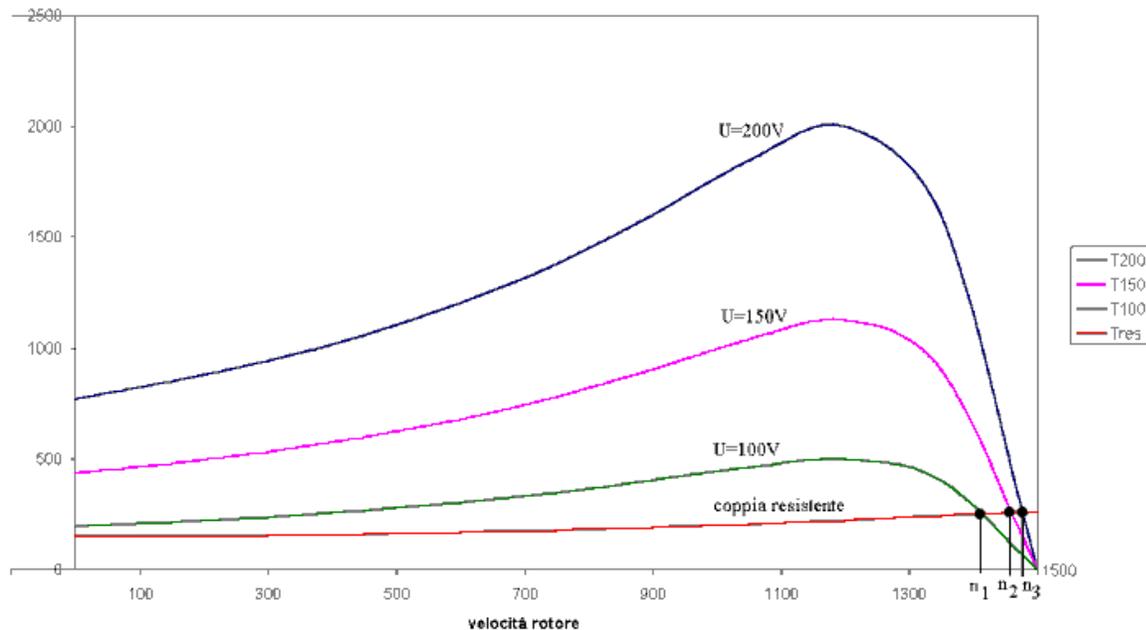
La macchina può funzionare anche a velocità superiori a quella di sincronismo  $n_0$  con coppie negative (se il carico meccanico è «attivo» e la trascina a quelle velocità).  
E' il caso della macchina usata come generatore trascinato dalle turbine eoliche.

# Aspetto fisico – Asincrono con rotore a gabbia



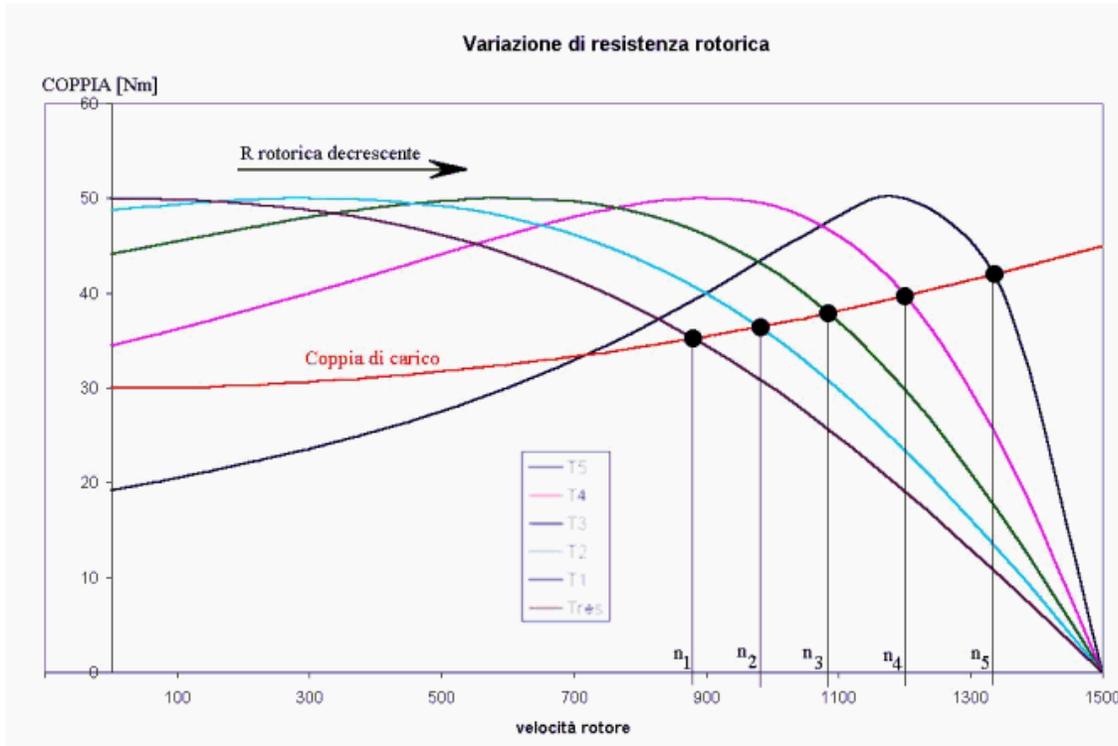
# Avviamento - Regolazione della velocità

- Quando il carico meccanico lo ammette e si vuole ridurre la corrente di avviamento si ricorre all'avviamento stella – triangolo o con avviatore statico



La regolazione di velocità agendo sulla tensione di alimentazione (frequenza costante) è poco efficiente

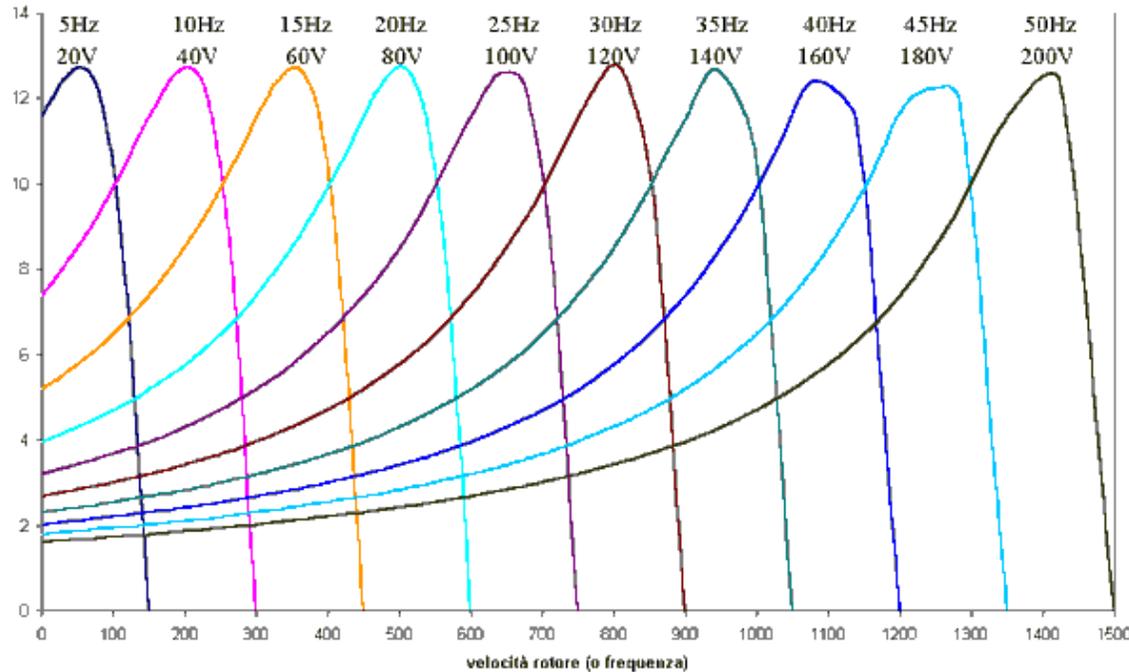
# Avviamento - Regolazione della velocità



Regolazione di velocità agendo sulla resistenza rotorica (con rotore ad anelli e resistenza esterna

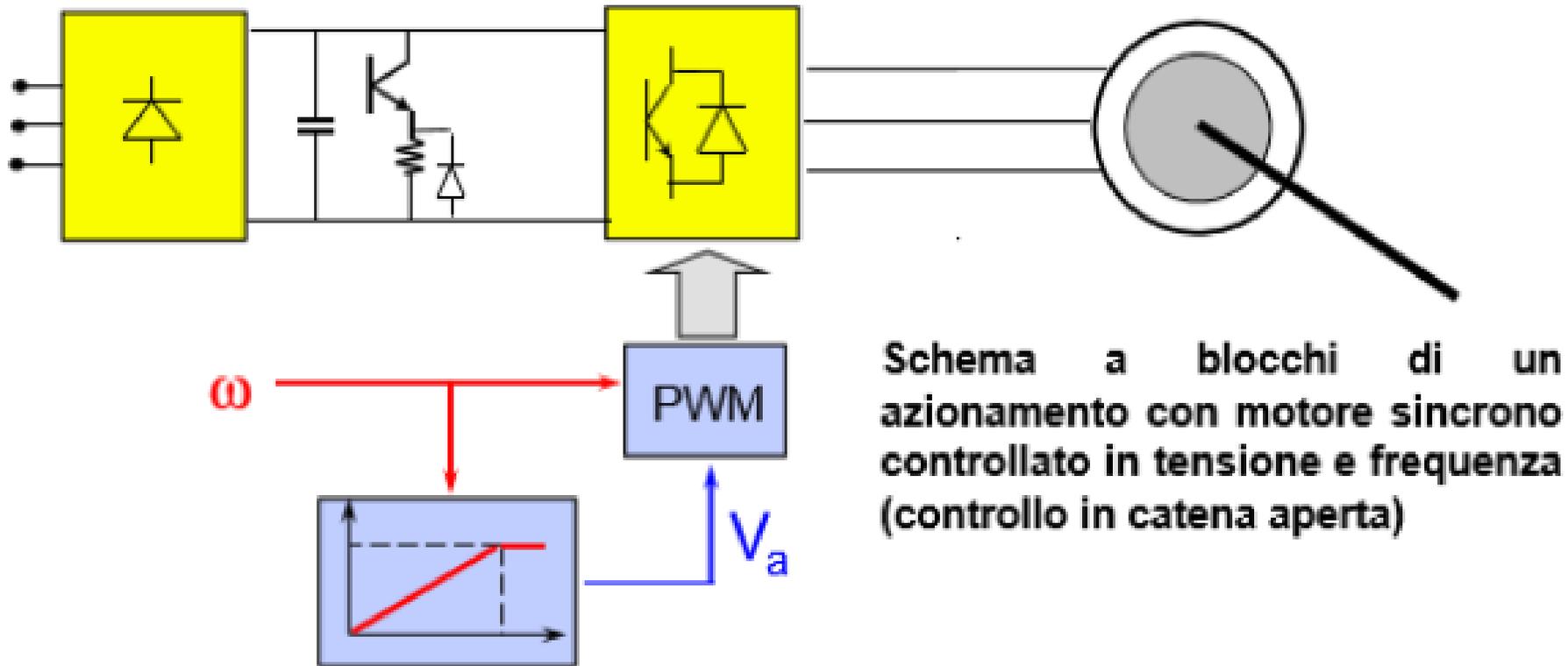
La resistenza esterna può essere sostituita da un convertitore statico elettronico che, invece di dissiparla, restituisce in rete la potenza prelevata dal rotore.

# Avviamento - Regolazione della velocità



Migliori prestazioni si ottengono con la regolazione coordinata della tensione e della frequenza, mediante convertitori elettronici (invertitori)

# Avviamento - Regolazione della velocità



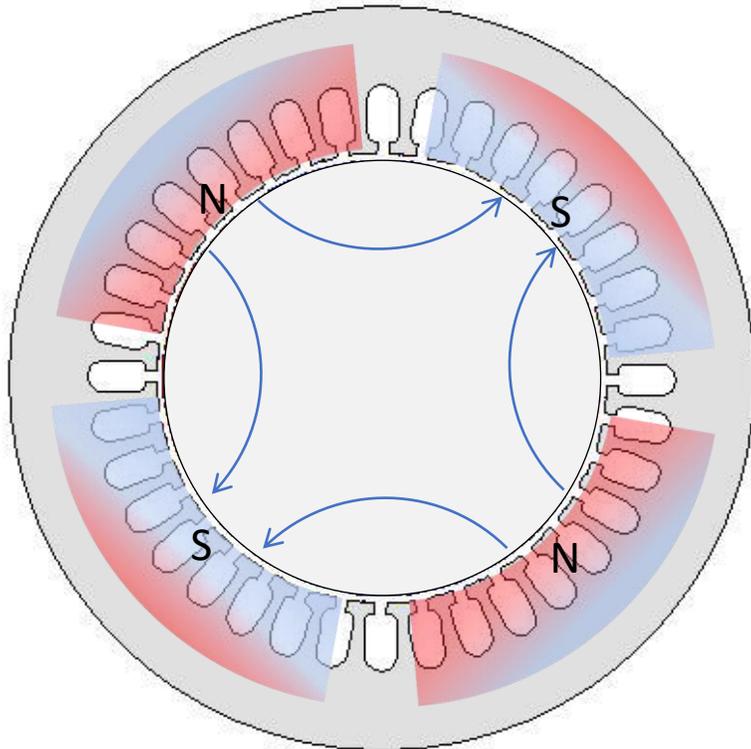
**Schema a blocchi di un azionamento con motore sincrono controllato in tensione e frequenza (controllo in catena aperta)**



# Macchine elettriche in corrente alternata trifase (Motori brushless e a riluttanza)

Applicazioni Industriali Elettriche  
2021-22

# Statore e campo rotante a $2p=4$ poli, $p=2$ coppie polari



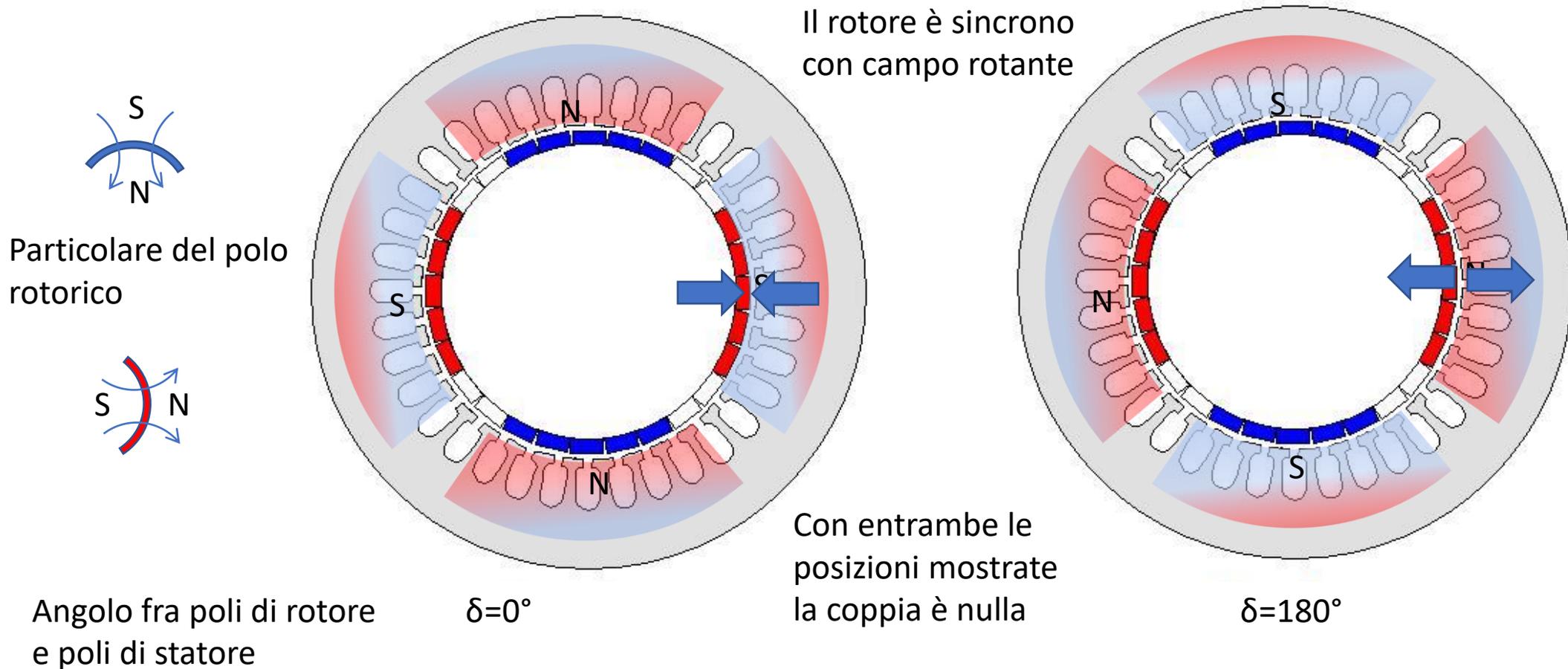
**4 poli**

- Due poli opposti Nord Sud adiacenti sono distanziati di  $90^\circ$  geometrici, ma di  $180^\circ$  elettrici (elettromagnetici)

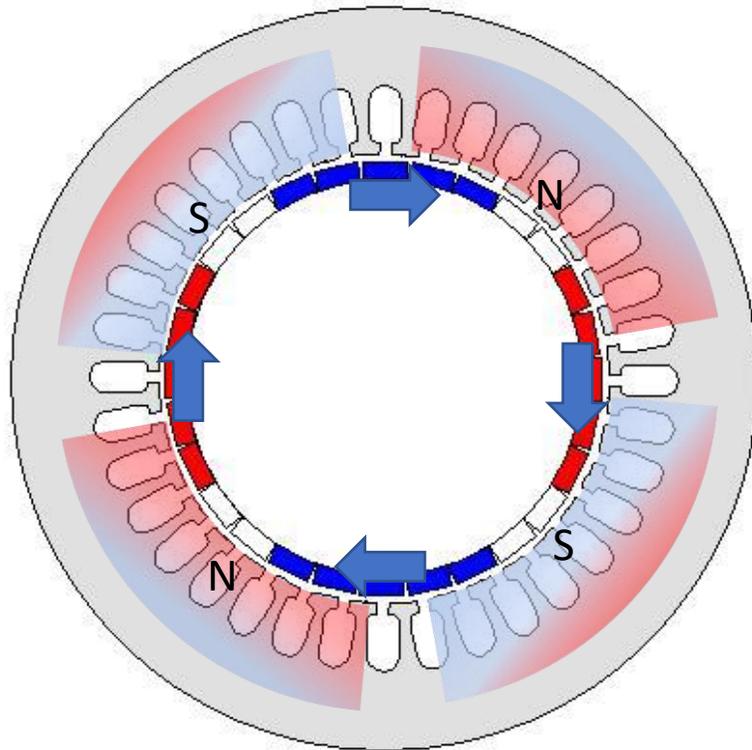
$$\text{Angolo elettrico} = \text{Angolo geometrico} * p$$

- Nella **macchina asincrona** le correnti “indotte” nel rotore generano sempre  $2p$  poli, sincroni (stessa velocità) con quelli di statore.
- Nella **macchina sincrona** i  $2p$  poli sono prodotti sul rotore da altra sorgente, non per induzione e sono fissi (ancorati) con il rotore.

# Macchina sincrona con rotore a magneti permanenti (SPM, Surface Permanent Magnet)



# Macchina sincrona con rotore SPM (genericamente anche «Brushless»)



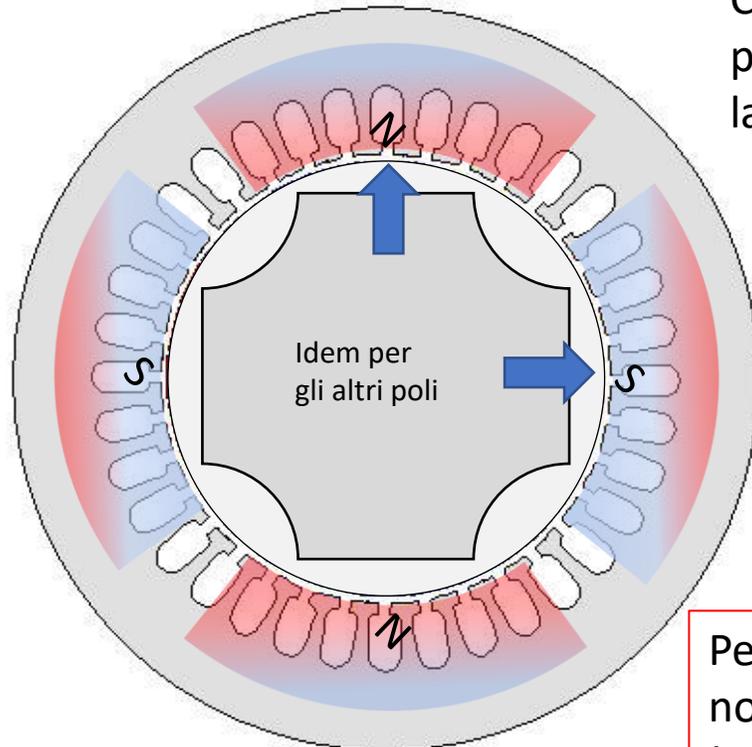
$\delta=90^\circ$  (costante per avere coppia costante)

- Per avere coppia devo alimentare la macchina con una terna di correnti che crei un campo statorico con poli a  $90^\circ$  elettrici rispetto a quelli (rotorici campo/correnti statorici in quadratura).
- Devo mantenere la posizione reciproca mentre il rotore ruota: fase istantanea delle correnti comandata dalla posizione rotorica.
- La coppia dipende dall'intensità della corrente statorica

# Macchina sincrona a riluttanza

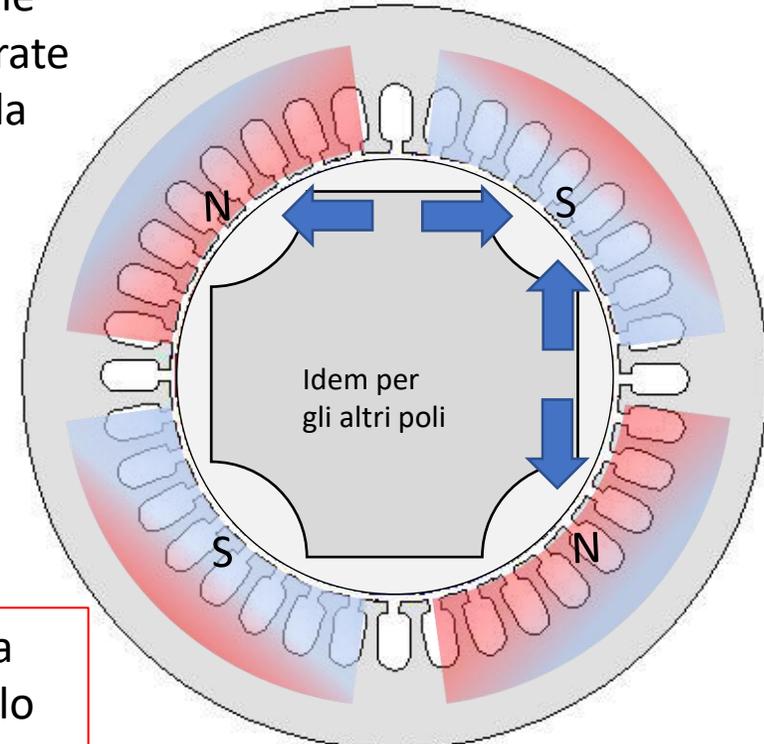
I poli sul rotore sono creati per «sagomatura» del rotore

Lo schema dell'azionamento come quello di brushless



$\delta=0^\circ$

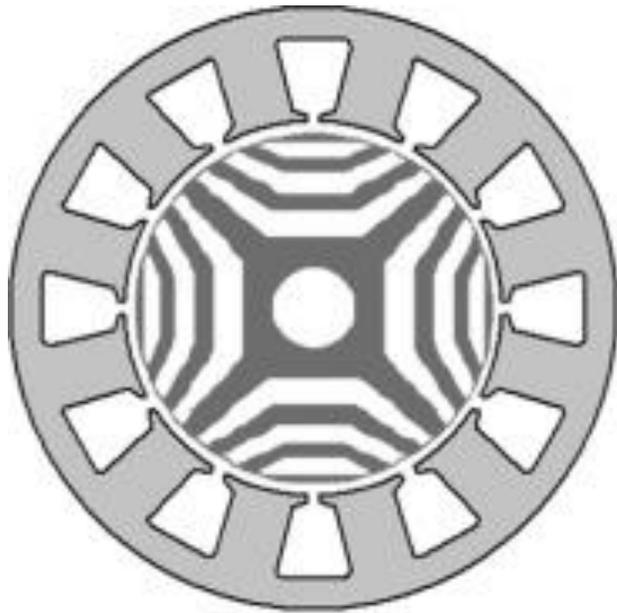
Con entrambe le posizioni mostrate la coppia è nulla



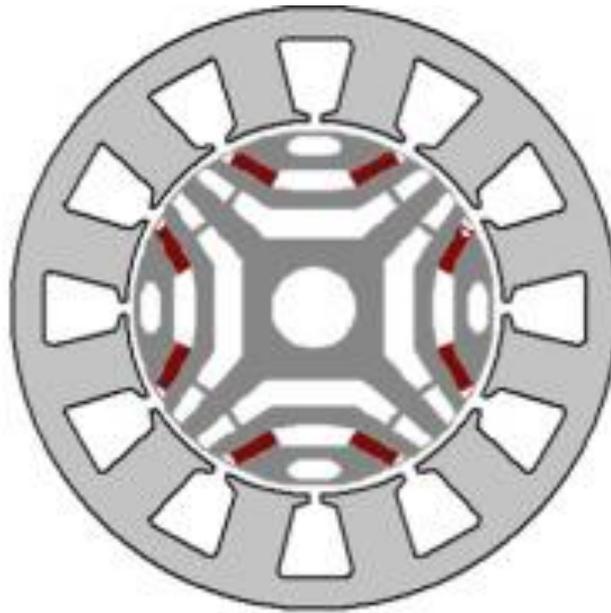
$\delta=90^\circ$

Per avere coppia non nulla l'angolo è di  $45^\circ$  elettrici costanti (teorico)

# Macchina sincrona a riluttanza (con PM)



SynRM



PMa-SynRM

I due principi per ottenere una coppia nei motori sincroni (cioè mediante PM o riluttanza) si possono combinare. Ci sono molte configurazioni:

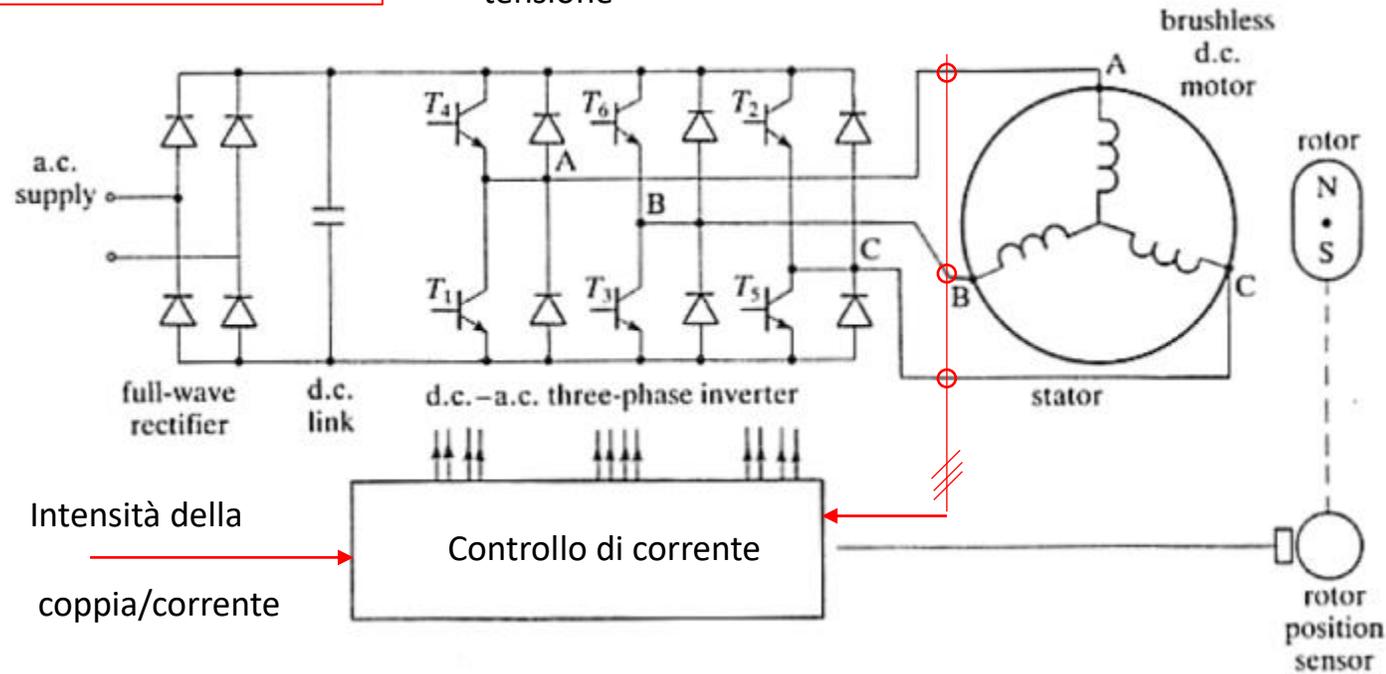
IPM (interior PM), PM assisted RM, Spoke, ...

Il rendimento e la coppia/volume è in genere superiore a qualsiasi altro motore

# Azionamento con motore sincrono

Schema di principio di azionamento con motore sincrono PM

Invertitore: generatore controllato trifase di tensione



Le prestazioni dinamiche sono in genere superiori a quelle di qualsiasi altro tipo di azionamento

# Macchina sincrona a riluttanza (con PM): esempi nel settore «trazione elettrica»

$2p=8$



$2p=10$



$2p=8$



Motore con  
statore interno e  
rotore esterno  
 $2p=16$

