

MACCHINA ASINCRONA

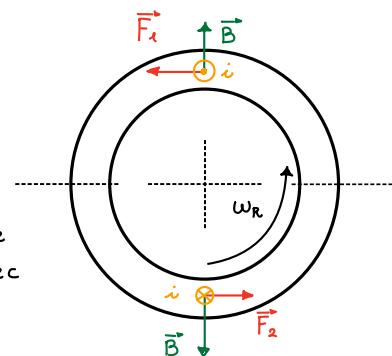
MODELLO SEMPLIFICATO

Consideriamo un cilindro cavo di materiale ferrromagnetico immerso in un campo magnetico rotante generato da uno statore. Nel cilindro si andranno a impartire correnti indotte nel verso (mano dx) assegnato. Le cariche saranno soggette a due forze.

$$F = qvB \quad \triangleright \text{Ovviamente il cilindro ruota di } \omega_r < \omega, \\ (\omega = \text{velocità di rotazione del campo magnetico})$$

$$F = i l B \quad \text{senza } F \text{ sarebbe nulla.}$$

Prendendo in considerazione punti diametralmente opposti noto che F_1 e F_2 costituiscono una coppia di forze e si genera P_{mec} da Pel.



ASINCRONA: Fa riferimento al fatto che $\omega_c \neq \omega_r$ (è proprio questa differenza alla base del principio).

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE

In genere è impiegato come motore e prende il nome di "MOTORE A INDUZIONE"; qua è lo statore a produrre il campo.

STATORE

E' del tutto analogo a quello della macchina sincrona; è laminato e presenta le cave dove alloggiano i **3 avvolgimenti di statore**, che costituiscono l'**induttore (INDUTTORE = STATORE)**

ROTORE

Il rotore è laminato stavolta e presenta le cave che ospitano gli avvolgimenti di indotto; tra statore e rotore è presente un **TRAFFERRO** di piccolo spessore. (**INDOTTO = ROTORE**)

Si può trovare in due configurazioni:

- ROTORE LISCIO
- ROTORE A GABBIA DI SCIATTOLLO (sono più facili da fabbricare e più economiche, può essere a gabbia singola o doppia)

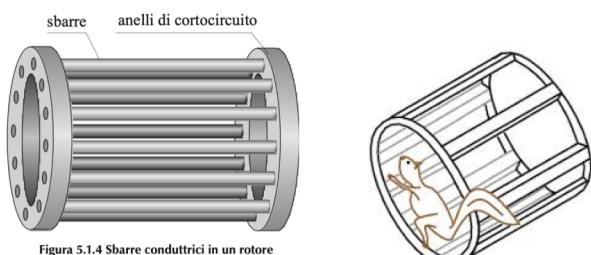
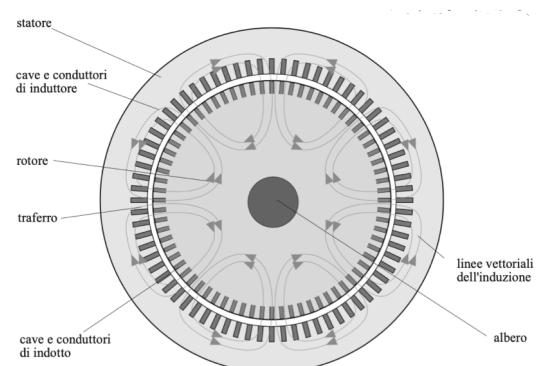
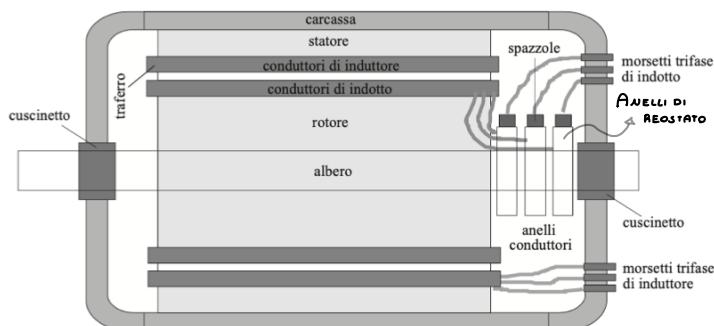
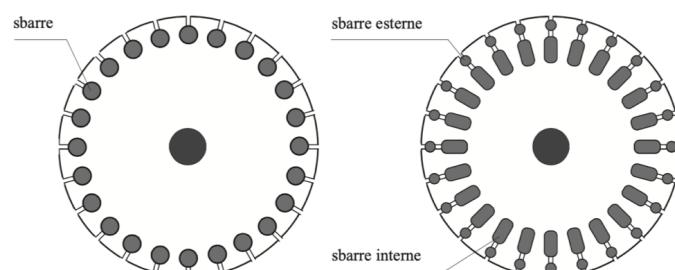


Figura 5.1.4 Sbarre conduttrici in un rotore a gabbia di sciattollo.



💡 Gli anelli chiudono il circuito magnetico in modo che passi corrente

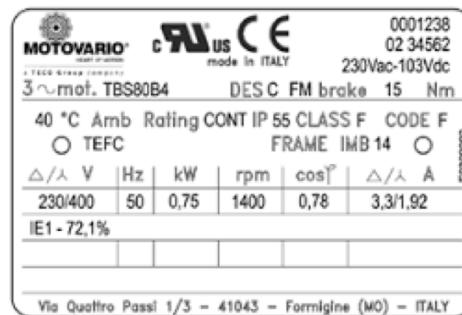
a) rotore a gabbia singola

b) rotore a doppia gabbia

DATI DI TARGA

In genere nei dati di targa di un motore a induzione si trovano:

- TEMPERATURA MASSIMA DI UTILIZZO
- TIPO DI SERVIZIO (continuo)
- CLASSE DI ISOLAMENTO IP
- CLASSE DI ISOLAMENTO TERMICO (F)
- V_n , I_n , $\cos\phi$, $\Delta\phi^*$
- POTENZA NOMINALE (ATTIVA [W])
- VELOCITÀ NOMINALE (ω_R)
- RENDIMENTO



$$\omega_c = \frac{\omega_R}{P}$$

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Gli avvolgimenti, investiti dal \vec{B} di statore, sono sede di fem e correnti (poiché chiusi in corto); le correnti interagiscono con il \vec{B} , generando forze (ossia la **COPPIA MOTRICE**).

ANALOGIA CON TRASFORMATORE

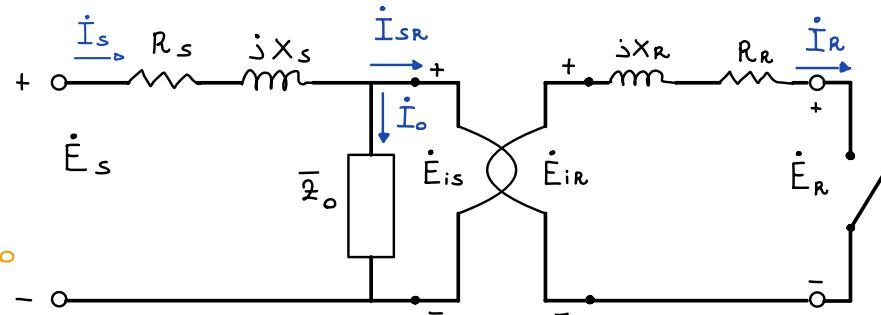
Immaginiamo (caso non reale) di tagliare gli avvolgimenti del rotore in modo che non passi corrente e quindi ROTORE FERMO; si osserva che dai terminali del circuito aperto del rotore si può prelevare una tensione e sostanzialmente la macchina ha funzionato come un trasformatore (con presenza di un traferro e di un campo rotante). Il circuito 1° è lo statore e il 2° il rotore:

Si ha quindi che le fem sono date da:

$$\dot{E}_{is} = j\omega K_s N_s \dot{\Phi}$$

$$\dot{E}_{ir} = -j\omega K_r N_r \dot{\Phi}$$

▼ K_s e K_r sono i **fattori di avvolgimento** di statore e rotore e tengono conto dello sfasamento tra la fem di ogni singola spira.



S = STATORE

R = ROTORE

$$z = \frac{\dot{E}_{is}}{\dot{E}_{ir}} = \frac{K_s N_s}{K_r N_r} \quad (\text{RAPPORTO DI TRASFORMAZIONE})$$

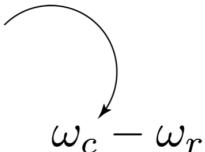
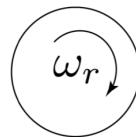
$$\dot{I}_o = \frac{\dot{E}_{is}}{Z_o} \longrightarrow \dot{I}_s = \dot{I}_o \quad \text{e} \quad \dot{I}_{sr} = 0$$

Se in alternativa il rotore è tenuto fermo, ma in CC, in esso scorreva'

$$\dot{I}_r = \frac{\dot{E}_{ir}}{R_r + jX_r}$$

FUNZIONAMENTO DA MOTORE (Rotore libero)

La fem indotta nel rotore tende a ridurre il flusso concatenato (Legge di Lenz) facendo ruotare il rotore nello stesso verso del campo \vec{B} ; tuttavia il rotore tende ad accelerare fino a raggiungere la **velocità di sincronismo** ($\omega = \omega_R$), a cui corrisponde una $\Delta\Phi_{\text{concatenato}} = 0$, dunque una fem indotta pari a zero e quindi correnti \rightarrow **ROTORE LIBERO** (si assimila al funzionamento di un trasformatore a vuoto).



▼ Si verifica se le forze di attrito si considerano nulle

SCORRIMENTO

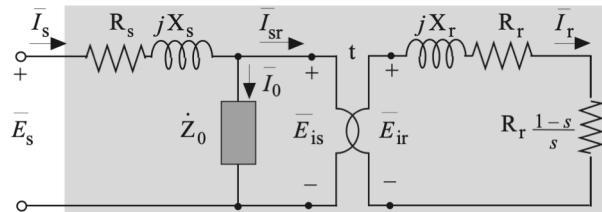
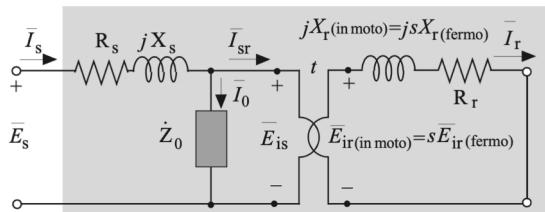
Si intuisce quindi che la $\Delta\omega = \omega_c - \omega_R$ e' un parametro fondamentale, che normalizzato prende il nome di **SCORRIMENTO**, da cui dipendono le grandezze elettriche del rotore:

$$S = \frac{\omega_c - \omega_R}{\omega_c}$$

- $S = 1$ ROTORE FERMO
- $S = 0$ ROTORE LIBERO (velocita' di sincronismo, si raggiunge idealmente in assenza di attrito)

CIRCUITO EQUIVALENTE

Le grandezze elettriche di rotore hanno un ω che dipende da ω_{REL} , quindi:
INDUTTORE E INDOTTO SONO CARATTERIZZATI DA FREQUENZE DIVERSE



$$f_s = S \cdot f \rightarrow \dot{E}_{ir}(\text{MOTO}) = -j(S\omega) N_R K_R \dot{\Phi}$$

$$\dot{I}_R = \frac{S \dot{E}_{ir}}{R_R + jS X_R} = \frac{\dot{E}_{ir}}{\frac{R_R}{S} + j X_R}$$

$$\dot{E}_{ir}(\text{IN MOTO}) = S \cdot \dot{E}_{ir}(\text{DA FERMO})$$

$$\dot{I}_R = \frac{\dot{E}_{ir}}{R_R + j X_R + R_R \cdot \left(\frac{1-S}{S}\right)}$$

Abbiamo quindi che, aggiungendo al circuito equivalente una resistenza che dipende da s , solo la resistenza in questione dipende da s (molto comodo)

$$R_C = R_R \left(\frac{1-S}{S} \right)$$

RESISTENZA
DI CARICO

CIRCUITO EQUIVALENTE E POTENZA

Riportando ora al 1^o X_R , R_R , R_C si ottiene il circuito equivalente da cui scrivo le grandezze di interesse:

- La corrente I_o e' piu' grande che in un trasformatore, poiche Z_0 e' piccola a causa del traferro. Si nota inoltre che in un impiego da motore, I_s non ha interesse pratico.

$$P = 3 E_s I_s \cos \varphi$$

$$Q = 3 E_s I_s \sin \varphi$$

GENERATE

$$P_{Fe} = 3 E_s I_o \cos \varphi$$

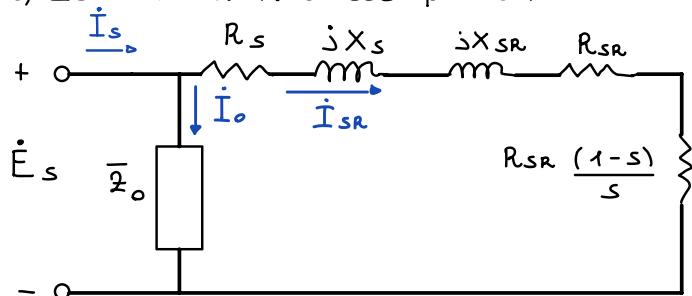
$$P_{Cu}(\text{STATOR}) = 3 R_s I_{SR}^2$$

$$P_{Cu}(\text{ROT}) = 3 R_{SR} I_{SR}^2$$

DISSIPATE

$$P_m = 3 R_{SR} \left(\frac{1-S}{S} \right) I_{SR}^2$$

POTENZA FORNITA
ALL'ALBERO MOTORE



⚠ In pratica la resistenza di carico dissipata la P_{mec} fornita dalla macchina

VALUTAZIONE DEL FUNZIONAMENTO

Dipende dallo scorrimento:

- $0 < s < 1 \longrightarrow$ MOTORE ($\omega_c > \omega_R$)
- $s < 0 \longrightarrow$ GENERATORE ($\omega_R > \omega_c$)
- $s > 1 \longrightarrow$ FRENO E.MAGNETICO ($\omega_R < 0$, in pratica gira nel verso opposto allo statore)

CARATTERISTICA MECCANICA

Si intende l' "ANDAMENTO DELLA COPPIA MECCANICA AL VARIARE DELLA VELOCITA' DEL ROTORE". Si puo' ricavare un'espressione di C , che dipende da:

- P (m° PAIA DI POLI) e parametri costruttivi (R_R , X_R)
- Tensione di alimentazione (E_1)
- Frequenza di alimentazione (ω)

$$P_m = C \omega_R \longrightarrow C = \frac{P_m}{\omega_R} = \frac{3R_{SR} \left(\frac{1-s}{s}\right) I_{SR}^2}{\frac{\omega(1-s)}{P}} = \frac{3P}{\omega} \frac{R_{SR} I_{SR}^2}{s} = \frac{3P E_1^2}{\omega Z^2} \cdot \frac{R_R}{\frac{R_R^2}{s} + s X_R^2}$$

MAGGIORE LA DIMENSIONE
DELLA MACCHINA, MAGGIORE η

$$C = \frac{3}{\omega} \frac{P}{Z} \frac{E_1^2}{s} \frac{R_R}{R_{SR}^2 + s X_R^2}$$

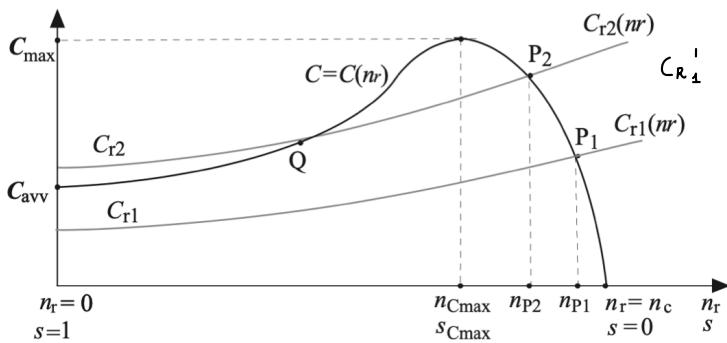
COPPIA MECCANICA
EROGATA

$$\eta = \frac{P_m}{P_m + P_{Fe} + P_{CuS} + P_{CuR}}$$

RENDIMENTO
M. ASINCRONO

Si considerano noti i parametri costruttivi e fissata E_1 , abbiamo che C dipende solo dalla ω_c e quindi da ω_R .

GRAFICO $C(s)$



- ASSE X VA DA $s=0$ A $s=1$ ($s>1$ non sarebbe un motore, ma un freno)
- C_{avv} = COPPIA DI AVVIAMENTO (si produce a rotore fermo collegato alla rete)
- COPPIA MOTRICE = Coppia generata dalla macchina funzionando da motore
- COPPIA RESISTENTE = Coppia del carico meccanico, ossia quella che oppone il carico (attrito, forza peso, ...)

$$C_{TOT} = C_{MOT} - C_{RES} = J \frac{d\omega_R}{dt}$$

▽ SPOSTAMENTO SU ASSE X A SX = RALLENTAMENTO DELLA MACCHINA

Se la mia coppia resistente e' C_{R1} , vuol dire che la macchina si ferma ($C_{TOT} = 0$) quando $C_m = C_{R1}$, ossia nel punto P_1 . Notiamo inoltre una COPPIA MASSIMA (C_{max}), per cui:

1. $s > s_{max} \longrightarrow$ TRATTO DI FUNZIONAMENTO STABILE, se ad esempio aumento C_R in P_1 risalgo la curva verso sinistra; anche C_{TOT} aumenta, compensando il rallentamento.
2. $s < s_{max} \longrightarrow$ TRATTO DI FUNZIONAMENTO INSTABILE, se in questa zona aumento la C_R ho un rallentamento della macchina e scendo lungo la curva (C_m diminuisce); la macchina tende a rallentare sempre di piu' finche' non si ferma. (PUNTO Q)

$$m_R = \omega_R \text{ (in GIRI/MIN)}$$

$$m_c = \omega_c \text{ (in GIRI/MIN)}$$

- C_{R1} : COPPIA RESISTENTE DI UN CARICO 1
- C_{R2} : COPPIA R DI UN CARICO 2

Lo spartiacque lo fa il punto di massimo:

$$s_{C_{MAX}} = \frac{R_R}{X_R}$$

$$C_{MAX} = \frac{3P E_1^2}{2Z^2 \omega X_R}$$

AVVIAMENTO

La macchina sincrona presenta due problemi all'avviamento:

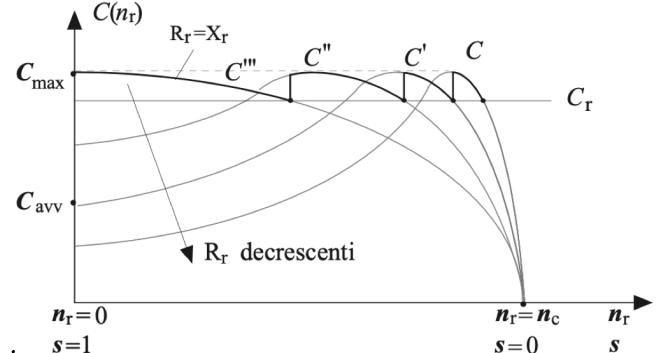
- Se all'avvio ho una C_R più piccola della C_{avv} , la **MACCHINA PARTE**. (ad esempio C_R va bene), se invece all'avvio ho una coppia resistente più grande della C_{avv} , la **MACCHINA NON CE LA FA** (C_R).
- All'avviamento ho $s=1$ quindi $R_C = \frac{1-s}{s} R_S = 0$ e il motore è cortocircuitato, quindi le correnti hanno valori alti (**STRESS TERMICO**) → il tempo di avviamento deve essere piccolo

AVVIAMENTO CON REOSTATO

Abbiamo visto che C_{max} non dipende da R_R , mentre lo S_{MAX} sì; quindi se riesco ad aumentare R_R , aggiungendo una **RESISTENZA** R_a sul rotore, il punto di MAX cresce e si sposta a sinistra, mentre C_{MAX} non varia. Inoltre aumentando R_a , riduco lo stress termico dovuto alle correnti di c.circuito (diminuiscono) AUMENTO R_a → AUMENTO C_{avv} (Effetto collaterale)

$$S'_{MAX} = \frac{R_R + R_a}{X_R}$$

- R_a si può aggiungere tramite contatti strisciati sul rotore (R_a è in serie a R_R)
- Una volta partita si rimuove R_a , per evitare perdite di potenza (ossia aumenta il rendimento).
⚠ Il reostato è applicato solo a motori con avvolgimenti.



ROTORE A DOPPIA GABBIA

Nei motori a gabbia di scorrimento è complicato aggiungere una resistenza, ma si arriva al problema con l'utilizzo di una seconda gabbia chiusa in corto.

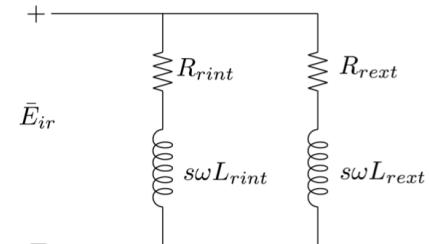
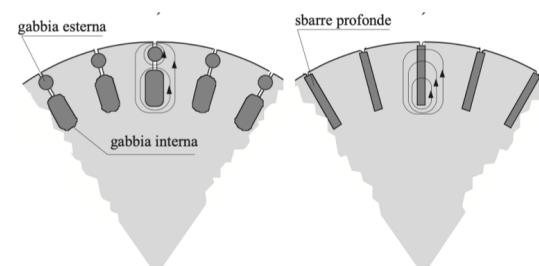
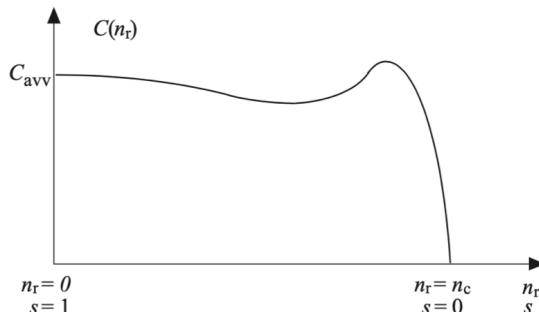
La gabbia interna ha:

- X_R maggiore, ossia più linee di campo che non si concatenano con lo statore (maggior FLUSSO DISPERSO)
- R minore, si realizza aumentando la sezione della gabbia

Per $s=1$ (avviamento), i termini delle X hanno peso maggiore, quindi la corrente scorre su quella esterna (X_R minore), ossia è come mettere un reostato.

Per $s=0$ prevalgono i termini R , quindi la corrente passa nella gabbia a R minore (è come togliere il reostato)

Andamento della caratteristica meccanica con reostato inserito



AVVIAMENTO CON CONVERTITORE

Il convertitore può cambiare la ω e quindi posso alimentare la macchina a ω più bassa di 50 Hz, in modo da spostare la velocità di sincronismo e quindi la caratteristica meccanica. (molto utilizzato rispetto agli altri)

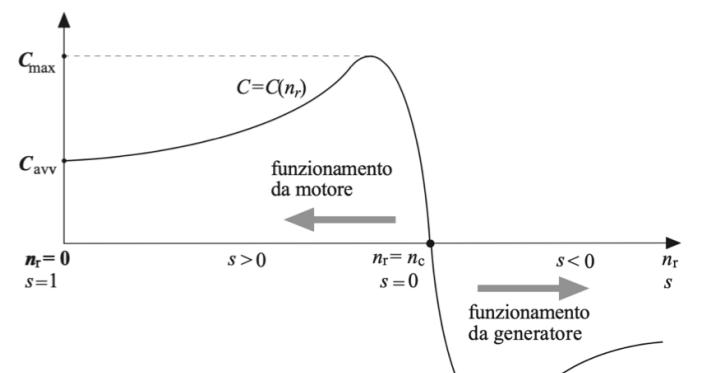
FUNZIONAMENTO DA GENERATORE

Avevamo visto che per $\omega_R > \omega_c$ ($s < 0$) la macchina asincrona funziona da generatore. Per valutare la coppia meccanica fornita dalla macchina basta prolungare il grafico oltre $s = 0$. La resistenza di carico diventa negativa ($R_c < 0$), si dissipà $P < 0$, quindi P_e ceduta alla rete e la coppia è **FRENANTE**.

PERCHE' NON SI USA

Ricordiamo che la macchina asincrona ha pur sempre bisogno di un campo rotante e quindi di alimentazione allo statore dall'esterno.

Cio' significa che consuma costantemente POTENZA REATTIVA, anche se eroga POTENZA ATTIVA (ossia funge da generatore).



FUNZIONAMENTO DA FRENO MAGNETICO

Si ottiene quando la ω_R è opposta a quella del campo:

$$\omega_R < 0 \rightarrow s > 1$$

Anche in questo caso $R_c < 0$ quindi tutta l'energia cinetica del rotore è dissipata sulle resistenze R_s e R_R . Come un freno meccanico dissipava P tramite Frattura, un freno elettromagnetico lo fa per effetto Joule.

MOTORE ASINCRONO MONOFASE

Lo statore ha un **UNICO AVVOLGIMENTO**, quindi non si crea campo rotante, in realtà un campo fisso si può pensare come somma di due campi **CONTROROTANTI**, con velocità angolari ω_{ci} e ω_{cd} :

$$\omega_{cd} = \omega_c, \omega_{ci} = -\omega_c \text{ da cui possiamo definire due scoramenti}$$

$$s_d = \frac{\omega_c - \omega_R}{\omega_c}; \quad s_i = \frac{-\omega_c - \omega_R}{-\omega_c} = 2 - s_d$$

Cio' significa che (guarda grafico), la coppia risultante è somma dei due contributi e la **COPPIA DI AVVIAMENTO**

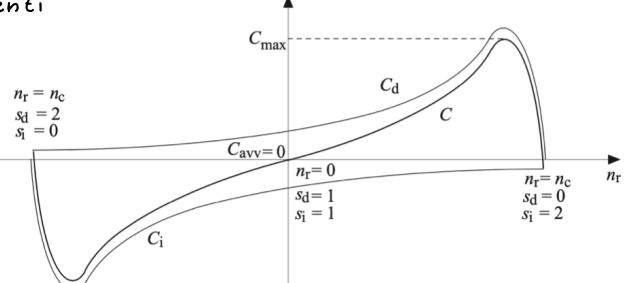
E' NULLA $\rightarrow \{$ SE SPOSTO L'EQUILIBRIO DI AVVIAMENTO (instabile),

FACENDOLO GIRARE (anche minimamente) IN UN SENSO, IL MOTORE

Sviluppa una coppia di avviamento non nulla che tende

a farlo accelerare fino a un eq. stabile". $\}$

Il motore A. MONO ha bisogno di una **COPPIA AUXILIARIA** per avviarsi, che imponga un verso di rotazione



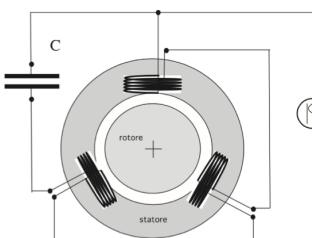
AVVIAMENTO CON CONDENSATORE

Si crea un 2° avvolgimento sul rotore, collegato a un **CONDENSATORE**, in questo modo il campo del 2° avvolgimento risulta sfasato rispetto a quello principale; ciò produce un campo rotante piccolo che fornisce la coppia di avviamento

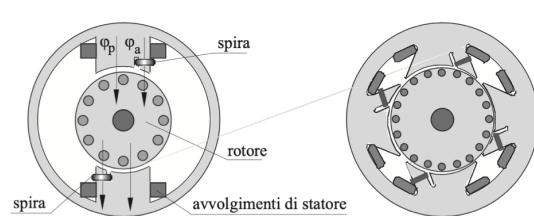
AVVIAMENTO A POLI SCHERMATI

Lo statore ha unico avvolgimento e quindi il campo di statore lo attraversa lungo l'asse. Dotando i poli di care in cui alloggiano **bobine di rame**, induce una f.e.m. che crea un campo sfasato simili-rotante.

MOTORE A CONDENSATORE



MOTORE A POLI SCHERMATI

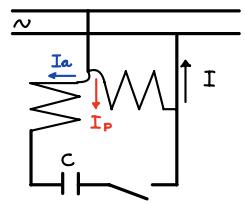


AVVOLGIMENTI A 90°

Due avvolgimenti posti a 90° e alimentati da correnti sfasate a 90° producono un campo rotante con $\omega = \omega_c$.

Tale corrente si può ottenere con un condensatore sull'avvolgimento ausiliario.

! L'interruttore serve a "staccare" l'ausiliario una volta avviato il motore.



PROVE PER VALUTAZIONE DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

PROVA A ROTORE LIBERO

Sostituisce la **PROVA A VUOTO**, ma ha stesso significato; si DETERMINA Z_0

PROVA A ROTORE FERMO

Analogia al **CORTO CIRCUITO**, il rotore è tenuto fermo da una morsa ($s = 1$) ; si DETERMINA $Z_{cc} = Z_s + Z^2 R_R$

