

Università degli Studi di Trieste
Facoltà di Ingegneria

APPUNTI del CORSO di ELETTROTECNICA

Macchine asincrone

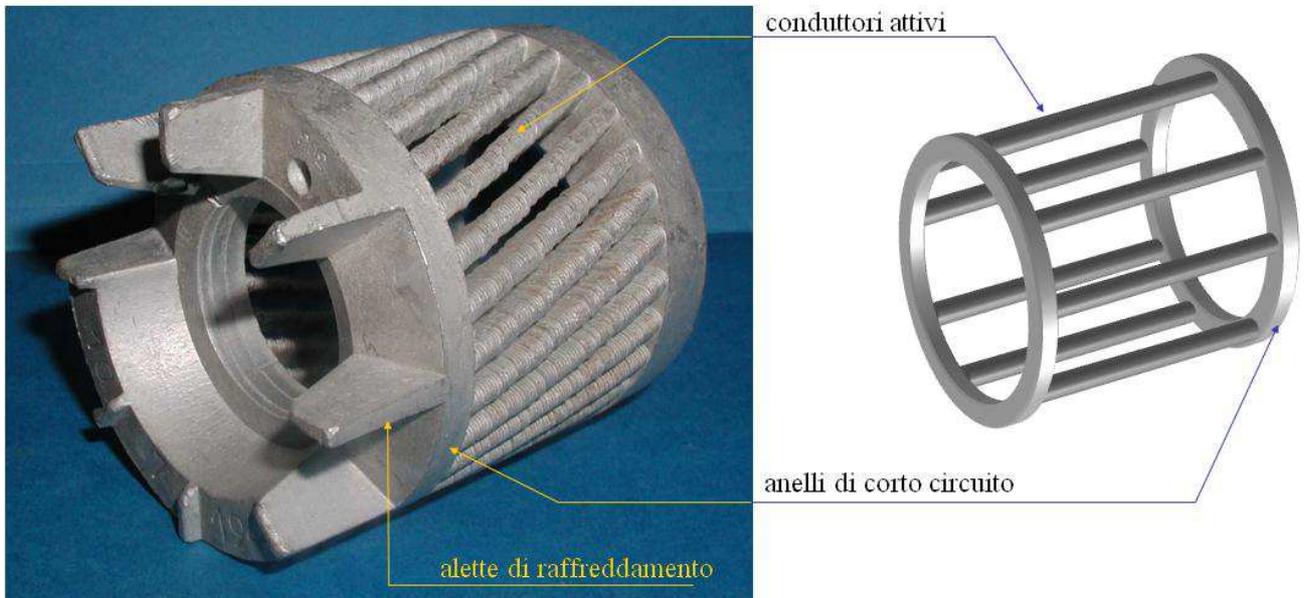
prof. ing. Stefano Longhi

a.a. 2017-2018

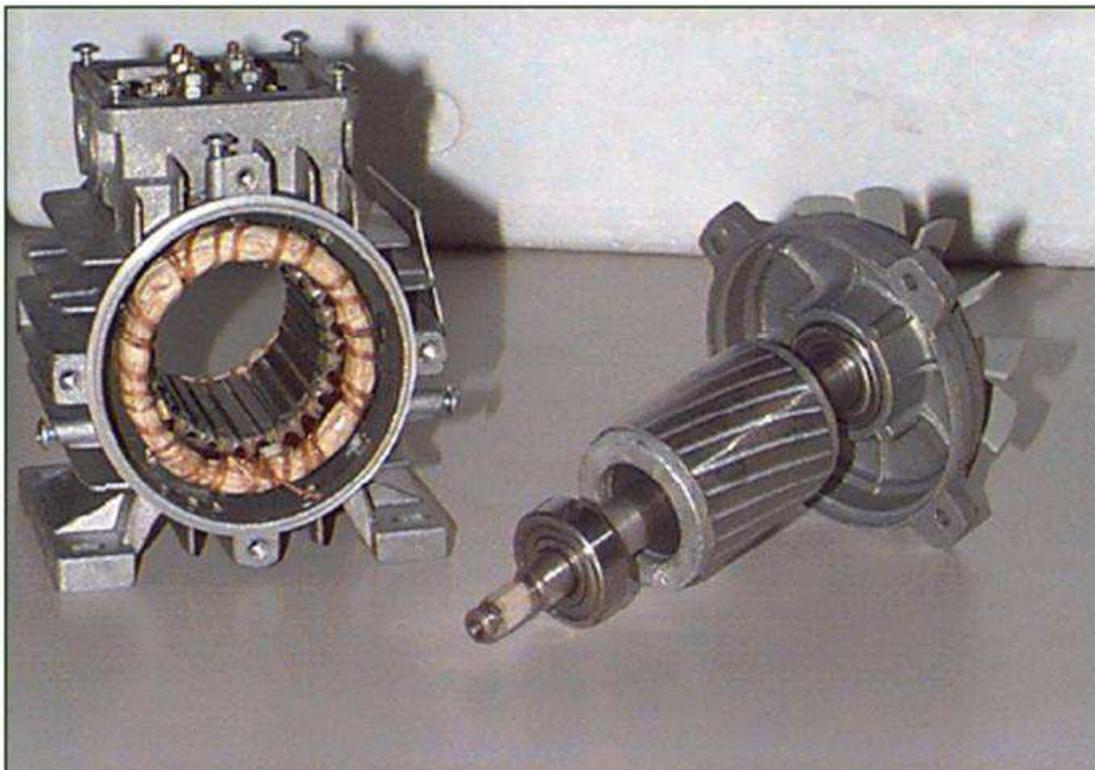
Introduzione

- Sono dette Macchine ad Induzione (trifase)
- Rotore a gabbia o rotore avvolto
- Statore e rotore sono formati entrambi da pacchi di lamierini isolati tra loro
- Nelle cave di statore e di rotore trovano posto gli avvolgimenti
- Fra statore e rotore esiste un traferro di ampiezza costante

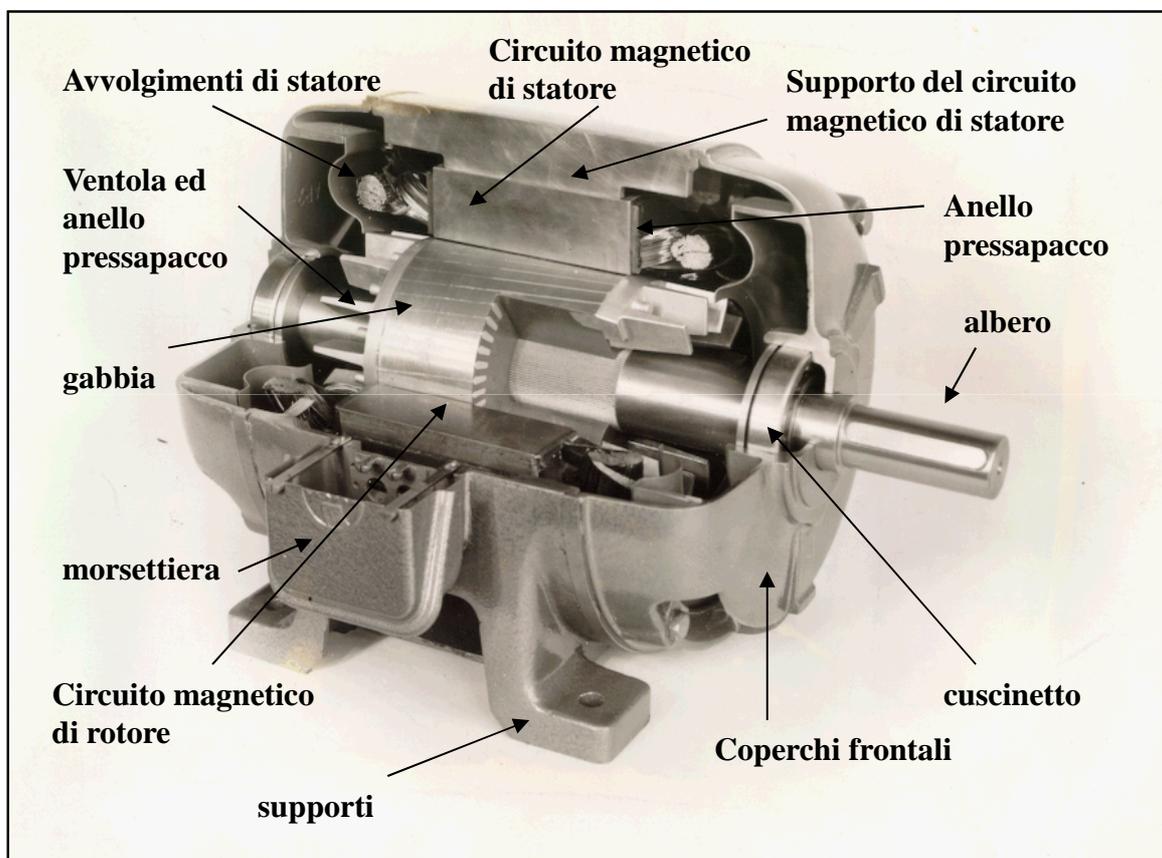
Esempi di rotore e statore



Rotore a gabbia in alluminio pressofuso



Macchina asincrona



Parametri della macchina

- $m=3$: numero di fasi
- p : numero di coppie polari
- n : numero di conduttori per cava
- q : numero di cave per polo e per fase
- $N_c = 2 p q m$ (numero totale di cave)
- $N = 2 p q n$ (numero tot. di cond. per fase)
- $N_s = \frac{1}{2} N$ (numero totale di spire per fase)
- $N_m = p q$ (numero di matasse per fase)

- ω_c : velocità angolare del campo di statore
 - dove: $\omega_c = \omega/p$
- ω_r : velocità angolare meccanica del rotore
- $s\omega_c$: velocità angolare del campo di rotore rispetto al rotore
- s (scorrimento): $s = (\omega_c - \omega_r) / \omega_c$
 - $\omega_r = (1-s) \omega_c$, $\omega_r + s\omega_c = \omega_c$
- $0 < s < 1 \rightarrow \omega_r < \omega_c$, $s < 0 \rightarrow \omega_r > \omega_c$

Funzionamento intuitivo

- Macchina in equilibrio con rotore che gira a velocità angolare costante ω_r :
 - 1) Correnti statoriche I_s producono campo rotante B_s con velocità ω_c
 - 2) Questo genera un sistema simmetrico di f.e.m. E_s (statore) a pulsazione ω e E_r (rotore) a pulsazione $s\omega$
 - 3) sistema E_r genera correnti equilibrate I_r con pulsazione $s\omega$
 - 4) I_r producono campo rotante B_r con velocità di rotazione rispetto al rotore di $s\omega_c$ e allo statore di $\omega_r + s\omega_c = \omega_c$
 - 5) B_s e B_r si compongono in B che genera le tensioni simmetriche complessive E_{Ts} e E_{Tr}
 - 6) Sommando a E_{Ts} le cadute \mathbf{zI}_s sullo statore si ottengono le tensioni di alimentazione V_s

Velocità angolari

- La velocità angolare del campo di statore rispetto al rotore è $\omega_c - \omega_r$
- La pulsazione della tensione (corrente) di rotore è:

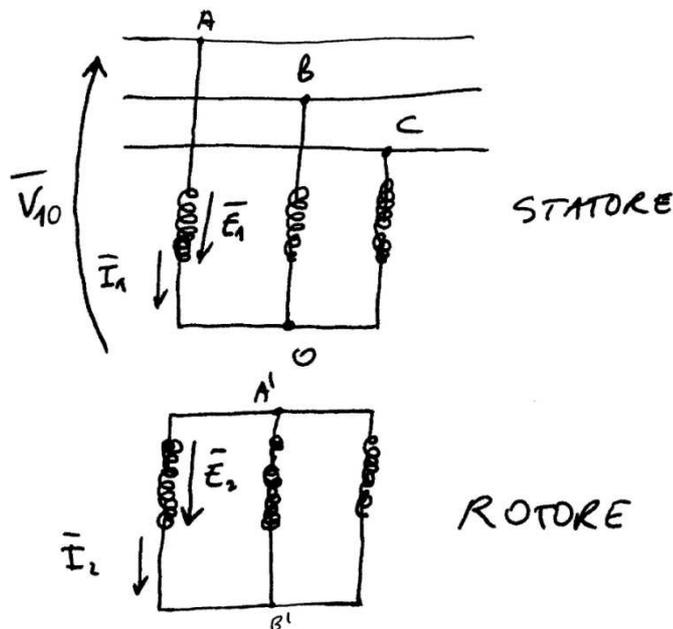
$$\omega_{er} = p(\omega_c - \omega_r) \rightarrow$$

$$\omega_{er} = p(s\omega_c) = s(p\omega_c) = s\omega$$

- Ricordando che $\omega_c = \omega/p$ e $s\omega_c = (\omega_c - \omega_r)$

Schema della macchina ed equazioni interne

- Fasi dello statore collegate principalmente a stella (possono essere anche a triangolo)
- $\mathbf{V}'_B - \mathbf{V}'_A = 0 \text{ V}$ (fasi del rotore in corto-circuito)
- Tensioni di alimentazione equilibrate o simmetriche



$$\begin{cases} \mathbf{V}_{10} + \mathbf{E}_1 = (R_1 + jX_{d1})\mathbf{I}_1 \\ \mathbf{E}'_2 = (R_2 + jsX_{d2})\mathbf{I}'_2 \\ \mathbf{A}\mathbf{s}_1 + \mathbf{A}\mathbf{s}_2 = \mathcal{R}_t \Phi \end{cases}$$

Fattori delle equazioni interne

- $K_{a1}(2)$: fattore di avvolg. dello statore (rotore)
- Φ : flusso concatenato con la spira centrale (ideale) dello statore a pulsazione ω
- Φ' : flusso concatenato con la spira centrale (ideale) del rotore a pulsazione $s\omega$
- Flussi di dispersione che si concatenano solo con l'avvolgimento statorico o solo con il rotorico \rightarrow reattanze di dispersione X_{d1} e X_{d2}
- \mathcal{R}_t : riluttanza al traferro

$$\mathcal{R}_t = \frac{\pi}{2} \frac{\delta}{\mu_0 l \tau}$$

$$\Phi = \frac{2}{\pi} l \tau \mathbf{B}$$

$$\mathbf{E}_1 = -j \frac{\omega}{2} k_{a1} N_1 \Phi$$

$$\mathbf{E}'_2 = -j \frac{s\omega}{2} k_{a2} N_2 \Phi'$$

$$As = \delta H = \frac{3}{\pi} k_a q n I$$

Equazioni interne non iso-frequenziali

- Non sono considerate le perdite nel ferro
- Sistema di equazioni non iso-frequenziali, a pulsazione ω per lo statore e $s\omega$ per il rotore
- Nella terza equazione le amperspire dipendono sia dalle correnti di statore che di rotore generate però da correnti non iso-frequenziali
- Questo sistema di equazioni non è risolvibile!

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{V}_{10} = (R_1 + jX_{d1})\mathbf{I}_1 + j\frac{\omega}{2}k_{a1}N_1\Phi \\ 0 = (R_2 + jsX_{d2})\mathbf{I}'_2 + j\frac{s\omega}{2}k_{a2}N_2\Phi' \\ \mathbf{As}_1 + \mathbf{As}_2 = \mathcal{R}_t\Phi \end{array} \right.$$

Rotore bloccato

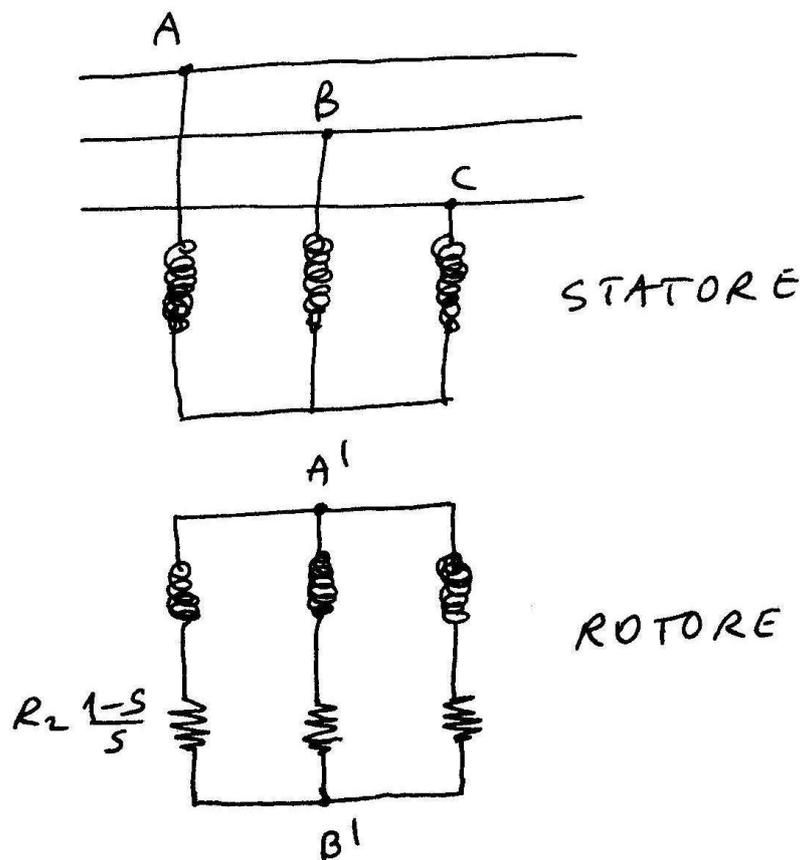
- $s = 1$
- La macchina si comporta da trasformatore con rapporto di trasformazione t :

$$\begin{cases} \mathbf{E}_1 = -j \frac{\omega}{2} k_{a1} N_1 \Phi \\ \mathbf{E}_2 = -j \frac{\omega}{2} k_{a2} N_2 \Phi \end{cases}$$

$$t = \frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{a1} N_1}{k_{a2} N_2}$$

Teorema di equivalenza

- Consideriamo la stessa macchina asincrona di prima, ma con il rotore bloccato ($s = 1$) e con l'avvolgimento rotorico chiuso su una stella equilibrata di resistenze pari a $R_2(1 - s)/s$.



Teorema di equivalenza (2)

Una macchina asincrona funzionante ad una generica velocità (s) equivale, sotto il profilo del funzionamento elettrico, alla stessa macchina mantenuta a rotore bloccato e con le fasi del rotore stesso che alimentano, ciascuna, una resistenza pari a $R_2(1 - s)/s$

- La reazione magnetica rotorica è la stessa nei due casi; il rotore è sede delle stesse correnti e il campo magnetico rotante ha la stessa ampiezza e la stessa posizione.
- Sotto il profilo energetico si mantiene l'equivalenza
- La potenza meccanica P_m erogata all'albero motore della macchina reale si ritrova nella macchina equivalente come potenza dissipata per effetto Joule dalle resistenze fittizie $R_2(1 - s)/s$. La coppia meccanica C dal rapporto tra la potenza P_m e la pulsazione angolare ω_r :

$$P_m = 3R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2, \quad C = \frac{P_m}{\omega_r} = 3 \frac{R_2}{s \omega_c} I_2^2$$

Equazioni interne ed esterne

- Sistema interno di 3 equazioni complesse (6 reali) in 4 variabili complesse iso-frequenziali e una reale (8 variabili).

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{V}_{10} = (R_1 + jX_{d1})\mathbf{I}_1 + j\frac{\omega}{2}k_{a1}N_1\Phi \\ 0 = (R_2 + R_2\frac{1-s}{s} + jX_{d2})\mathbf{I}_2 + j\frac{\omega}{2}k_{a2}N_2\Phi \\ \frac{3}{\pi}k_{a1}q_1n_1\mathbf{I}_1 + \frac{3}{\pi}k_{a2}q_2n_2\mathbf{I}_2 = \mathcal{R}_t\Phi \end{array} \right.$$

- Le 2 condizioni che mancano sono costituite dalle equazioni esterne:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{10} = \cos t \\ C(s) = 3\frac{R_2}{s\omega_c}I_2^2 \end{array} \right.$$

- dove $C(s)$ (ovvero dipendente dalla pulsazione ω_r) è ricavata dalla macchina collegata a quella asincrona

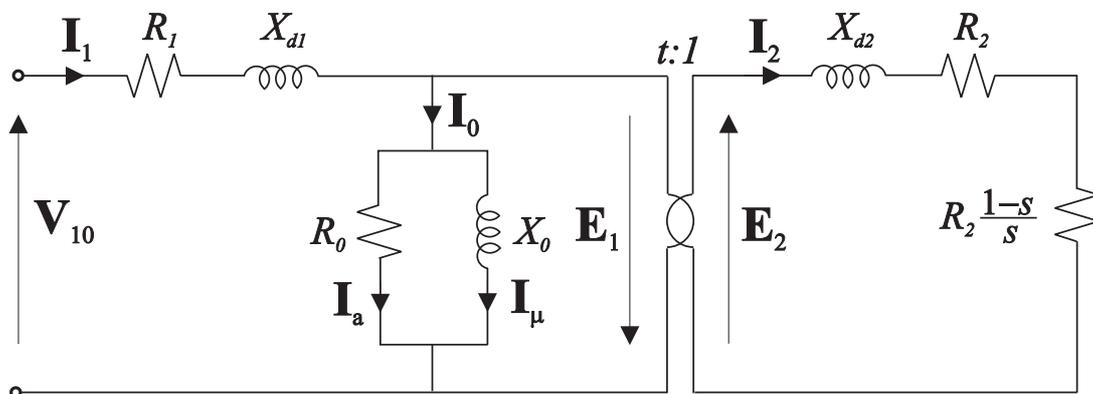
Circuito equivalente

- Chiamiamo \mathbf{I}_0 la corrente equilibrata di magnetizzazione nelle fasi dello statore:

$$3k_{a1}N_1 \mathbf{I}_1 + 3k_{a2}N_2 \mathbf{I}_2 = \mathcal{R}\Phi \quad \text{con : } \mathcal{R} = 2p\pi \mathcal{R}_t$$

$$\Rightarrow k_{a1}N_1 \mathbf{I}_1 + k_{a2}N_2 \mathbf{I}_2 = k_{a1}N_1 \mathbf{I}_0$$

- Si ottiene il seguente circuito

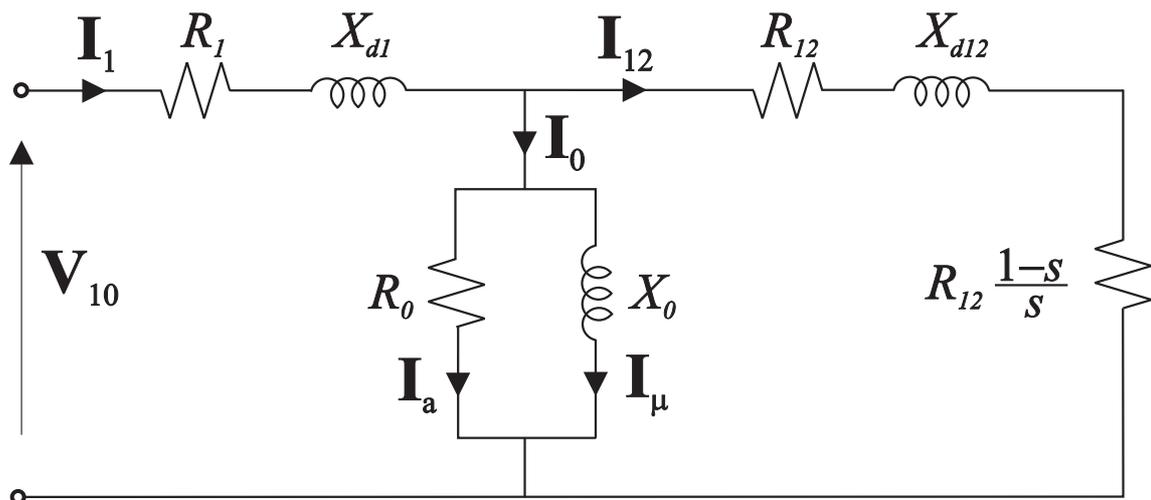


Circuito equivalente modificato

- Eliminando il trasformatore ideale

$$\mathbf{I}_{12} = \mathbf{I}_2 / t, R_{12} = t^2 R_2, X_{d12} = t^2 X_{d2}$$

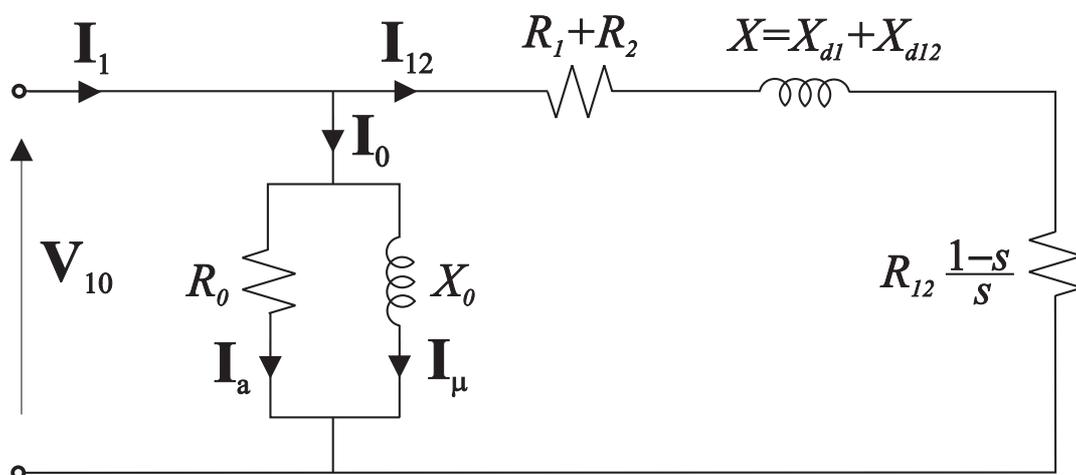
- Si ottiene infine



- Quando $s = 1$ (rotore bloccato)
 $\rightarrow R_{12}(1-s)/s = 0$
- si ha il funzionamento equivalente al corto circuito

Circuito equivalente semplificato

- La corrente I_μ non è percentualmente piccola a causa del traferro, tuttavia si può utilizzare in prima approssimazione il circuito semplificato, dove unisco le perdite nel rame e i flussi dispersi dello statore e del rotore



Potenza di una macchina asincrona

- Le perdite della macchina sono costituite dalle perdite nel rame di statore e rotore, dalle perdite nel ferro dello statore e dalle perdite meccaniche.
- $P_a = P_d + P_m$
- Utilizziamo il circuito semplificato senza considerare le perdite nel ferro e ponendo: $V_1 = \sqrt{3} V_{10}$

$$P_a = 3 \left(R_1 + \frac{R_{12}}{s} \right) I_{12}^2 = \left(R_1 + \frac{R_{12}}{s} \right) \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s} \right)^2 + X^2}$$

$$\begin{aligned} P_d &= 3(R_1 + R_{12})I_{12}^2 = (R_1 + R_{12}) \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s} \right)^2 + X^2} = \\ &= \frac{R_1 + R_{12}}{sR_1 + R_{12}} sP_a \end{aligned}$$

$$P_m = 3R_{12} \frac{1-s}{s} I_{12}^2 = R_{12} \frac{1-s}{s} \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s} \right)^2 + X^2}$$

Coppia di una macchina asincrona

- La coppia dalla potenza meccanica è:

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{P_m}{\omega_c (1 - s)} = 3 \frac{R_{12}}{s \omega_c} I_{12}^2 = \\
 &= \frac{R_{12}}{\omega_c s} \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s} \right)^2 + X^2} = \\
 &= \frac{V_1^2}{\omega_c z \left(\frac{zs}{R_{12}} + \frac{R_{12}}{zs} + 2 \frac{R_1}{z} \right)} \\
 \text{dove : } z &= \sqrt{R_1^2 + X^2}
 \end{aligned}$$

- Si può anche ottenere dallo studio dell'interazione tra i due campi rotanti di statore e di rotore, applicando il principio dei lavori virtuali (bilancio energetico)

Funzionamento della macchina

- Per $\omega_r = 0$ ($s = 1$) il rotore è fermo:
($P_a = P_d > 0$, $P_m = 0$)

$$C_a = \frac{V_1^2}{\omega_c z \left(\frac{z}{R_{12}} + \frac{R_{12}}{z} + 2 \frac{R_1}{z} \right)} \approx \frac{V_1^2}{\omega_c z^2} R_{12}$$

per : $R_{12}, R_1 \ll z$

- Per $0 \leq \omega_r \leq \omega_c$ ($0 < s < 1$) il rotore è in moto e la macchina funziona come motore ($P_a > 0$, $P_m > 0$). La coppia massima si ottiene per $s = R_{12}/z$:

$$C_M = \frac{V_1^2}{2\omega_c z \left(1 + \frac{R_1}{z} \right)} \approx \frac{V_1^2}{2\omega_c z} \propto \frac{V_1^2}{f_c^2}$$

- Per $\omega_r = \omega_c$ ($s = 0$) la macchina non assorbe né eroga potenza ($P_a > 0$, $P_m = 0$) e la coppia è nulla

Funzionamento della macchina (2)

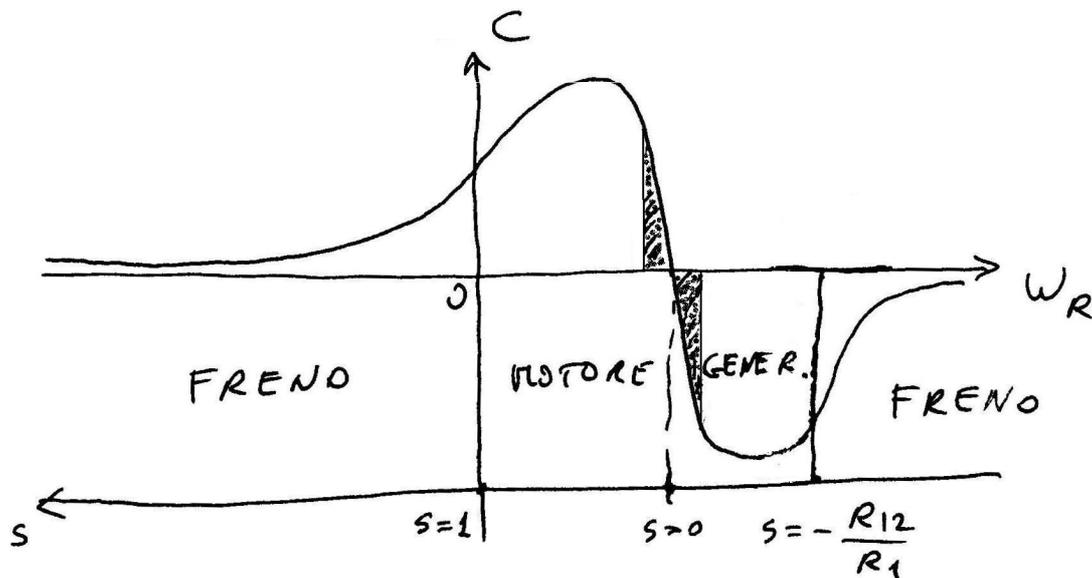
- Per $\omega_r > \omega_c$ ($-R_{12}/R_1 < s < 0$) la macchina funziona da generatore ($P_a < 0, P_m < 0$) e la potenza meccanica necessaria a portare il rotore a velocità superiore a quella di sincronismo viene trasformata in potenza elettrica. La frequenza della tensione in uscita è f indipendentemente dal numero di giri del rotore. La coppia massima si ottiene per $s = -R_{12}/z$

$$C'_M = \frac{V_1^2}{2\omega_c z \left(1 - \frac{R_1}{z}\right)} \approx \frac{V_1^2}{2\omega_c z} \propto \frac{V_1^2}{f_c^2}$$

- Per $\omega_r < 0$ ($s > 1$) e $\omega_r > \omega'_r$ ($s < -R_{12}/R_1$) (ω'_r è tale che $s = -R_{12}/R_1$) la macchina funziona da freno ($P_a > 0, P_m < 0$)

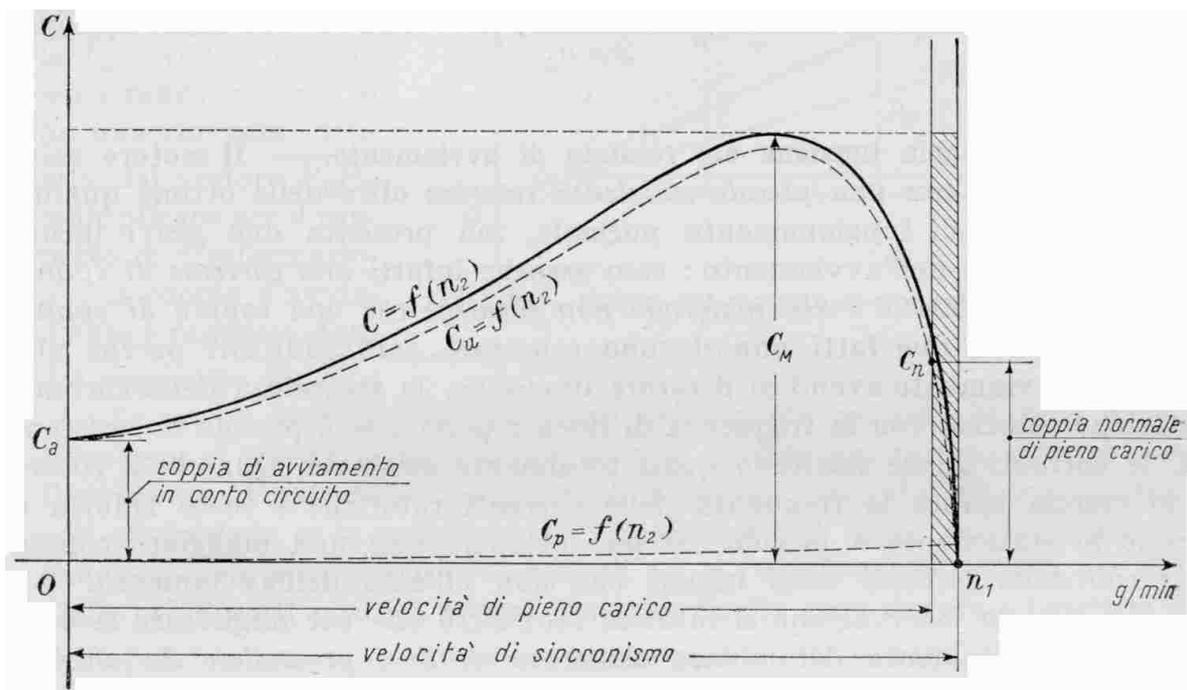
Curve caratteristiche

- Valori normali dello scorrimento sono tra 1% e 5%. La macchina funziona praticamente a velocità costante e di poco diversa da quella del campo rotante.



Curve caratteristiche (2)

- grafico della coppia in funzione del numero di giri

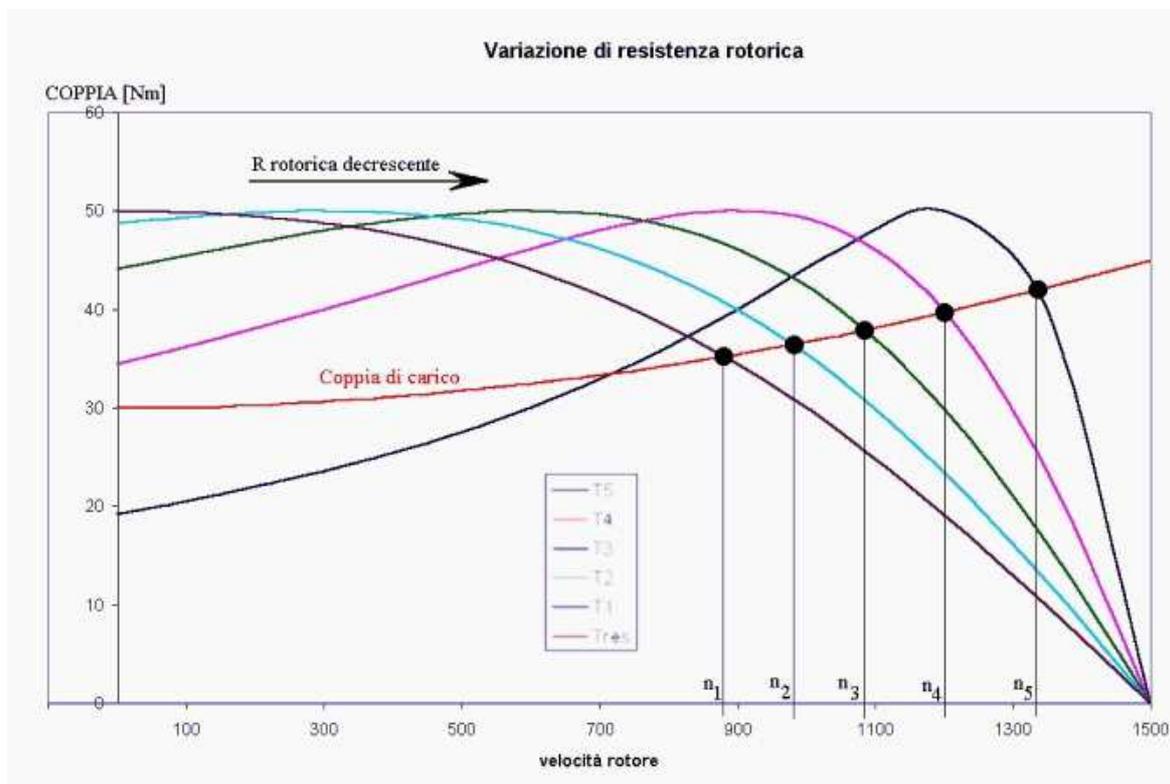


Curve caratteristiche (3)

- Il punto di funzionamento è stabile se:

$$\frac{dC}{ds} > \frac{dC_R}{ds} \Rightarrow \frac{d(C - C_R)}{ds} > 0$$

- Se s aumenta (cala la velocità), la coppia motrice diventa maggiore della coppia resistente e si ripristina l'equilibrio. Analogamente se s diminuisce.



Avviamento

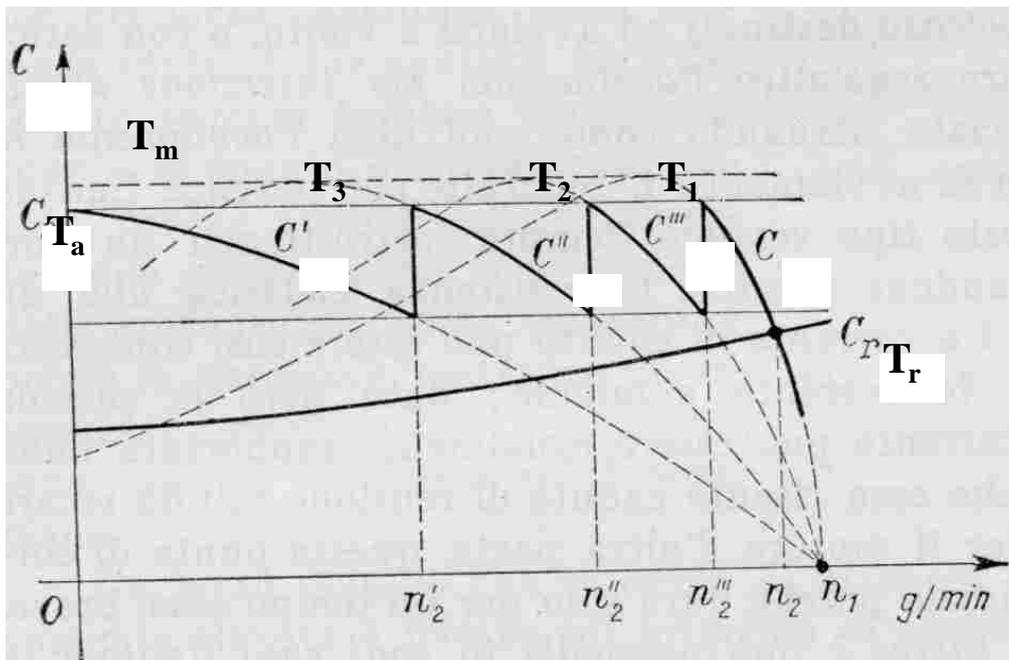
- All'avviamento ($s = 1$) i motori asincroni presentano due problemi:
 - 1) Coppia di spunto bassa
 - 2) Correnti di spunto al rotore e allo statore alte
- Il primo punto è un problema se il motore deve partire già sotto carico, ovvero con una coppia resistente piuttosto alta
- Il secondo è da tenere presente perché valori eccessivi di corrente possono danneggiare il motore
- Per ridurre le correnti si può avviare il motore con una tensione ridotta, però questo riduce anche la coppia. Perciò si attua solo con motori che partono a vuoto

Avviamento (2)

- Coppia all'avviamento:

$$C_a \approx \frac{V_1^2}{\omega_c Z^2} R_{12}$$

- Per superare entrambi i problemi, per aumentare C_a e ridurre le correnti, si usa mettere dei reostati in serie al circuito di rotore aumentando R_{12}



Avviamento (3)

- Ulteriore metodo consiste nel avviare il motore con le fasi dello statore poste a stella, per poi commutare le stesse a triangolo. Questo metodo riduce la tensione di alimentazione nominale, però riduce anche la coppia.
- Motori a doppia gabbia o a gabbia unica a sbarre profonde (motori a gabbia fino a pochi kW, a doppia gabbia fino a qualche centinaio di kW). La gabbia interna è formata da sbarre più grosse per diminuire la resistenza, quella esterna da sbarre di sezione più piccola. Le reattanze di dispersione si comportano inversamente.

Azionamenti

- Insieme di componenti elettro-meccanici che consente la trasformazione dell'energia elettrica, fornita dalla rete, in energia meccanica con coppia e velocità controllabili all'asse di un motore.
- Un azionamento è costituito da:
 - a) Il motore elettrico
 - b) Il convertitore statico
 - c) Il dispositivo di controllo (circuiti di tipo analogico, digitale, a microprocessore)

Regolazione di velocità

- Il numero di giri di una macchina asincrona è pari a:

$$n = \frac{60 f}{p} = \frac{60 \omega}{2\pi p} = \frac{60}{2\pi} \omega_c$$

- Variazione del numero di poli, ottenuta commutando opportunamente le bobine (di solito si possono ottenere due velocità)
- Variazione della tensione di alimentazione (la coppia è proporzionale al quadrato della tensione di alimentazione – metodo usato per i piccoli motori a gabbia per i ventilatori)
- Variazione della resistenza rotorica (nei motori a rotore avvolto)
 - Perdita di energia (potenza dissipata proporzionale a s)
 - Forte variare del numero di giri al variare della coppia resistente
 - Velocità sempre prossima a quella di sincronismo quando la coppia resistente si riduce a valori molto bassi
- Controllo della tensione e della frequenza di alimentazione per non ridurre la coppia massima $\left(C_M \propto \frac{V_1^2}{f^2} \right)$