

MACCHINE ASINCRONE TRIFASE

1. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Le macchine asincrone, utilizzate come motore, costituiscono il tipo più diffuso di macchine elettriche a corrente alternata, in quanto presentano una grande semplicità di costruzione a cui corrisponde una notevole robustezza ed una ridotta manutenzione, esse inoltre non richiedono complicate manovre di avviamento e sopportano notevoli sovraccarichi.

Il traferro delle macchine asincrone ha spessore costante e nelle cave di rotore e statore sono alloggiati due avvolgimenti trifase aventi lo stesso passo polare. L'avvolgimento di statore può essere collegato a stella (come illustrato nella figura 1.1), oppure a triangolo, mentre l'avvolgimento di rotore viene chiuso in corto circuito secondo lo schema illustrato nella figura 1.1.

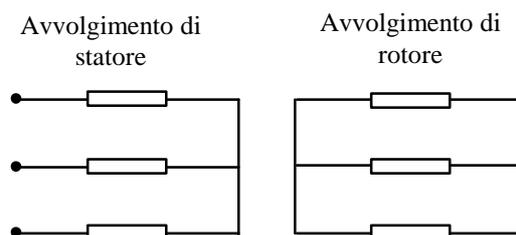


Figura 1.1 - Collegamento degli avvolgimenti di statore e di rotore di un motore asincrono

Una volta alimentato con una terna di tensioni concatenate simmetriche aventi una pulsazione ω , l'avvolgimento di statore viene percorso da una terna equilibrata di correnti. Come visto nel capitolo dedicato al campo rotante, le correnti di statore generano al traferro della macchina un campo, la cui prima armonica ruota con una velocità angolare ω_c data dalla seguente espressione, dove p è il numero di coppie polari dell'avvolgimento:

$$\omega_c = \frac{\omega}{p} \quad (1.1)$$

Il campo di statore (campo induttore) si richiude nel rotore e quindi si concatena con l'avvolgimento di rotore che è in rotazione, nel verso concorde con quello di rotazione del campo induttore, con una velocità angolare ω_m . Se la velocità di rotazione del rotore è diversa da quella del campo, un osservatore solidale con ciascuna fase dell'avvolgimento di rotore vede un campo rotante avente una velocità angolare $\omega'_c = \omega_c - \omega_m$ ed è quindi soggetta ad una f.e.m. indotta avente una pulsazione $\omega' = p \omega'_c$, dato che il rotore ha lo stesso numero di coppie polari dello statore.

Il sistema di f.e.m. indotte nelle fasi dell'avvolgimento di rotore, essendo queste ultime chiuse in cortocircuito, fa sì che un sistema equilibrato di correnti, aventi pulsazione ω' circoli nell'avvolgimento stesso. Tali correnti, interagendo con il campo induttore, danno origine ad una coppia elettromagnetica che si oppone alla causa che l'ha generata; la coppia elettromagnetica tende quindi a fare sì che il rotore ruoti alla velocità del campo induttore, in modo da annullare la f.e.m. indotta e quindi le correnti di rotore. Ciò significa che se il rotore ruota ad una velocità inferiore a quella del campo induttore, la coppia elettromagnetica è diretta nel verso del moto e la macchina asincrona funziona come un motore; viceversa, se la velocità del rotore è superiore alla velocità del campo induttore la coppia elettromagnetica è diretta nel verso opposto al moto e la macchina asincrona funziona come un generatore o come un freno.

Le correnti di rotore producono al traferro un campo (campo indotto) la cui prima armonica è in rotazione con una velocità angolare ω'_c rispetto al rotore. La velocità di rotazione della prima armonica del campo indotto risulta quindi coincidente con la velocità angolare ω_c del campo induttore. Il campo indotto induce nelle fasi di statore un sistema trifase simmetrico di f.e.m. avente la stessa pulsazione del sistema di tensioni di alimentazione. Tali f.e.m. indotte hanno verso discorde o concorde con le tensioni di alimentazione a seconda che la macchina stia funzionando da motore o freno oppure da generatore.

Il nome di macchina asincrona esprime il fatto che la velocità di rotazione del rotore della macchina (ω_m) non coincide con quella di rotazione del campo al traferro (ω_c); lo **scorrimento** (s) viene definito come il rapporto tra le velocità di rotazione del campo al traferro rispetto al rotore ($\omega'_c = \omega_c - \omega_m$) e allo statore (ω_c):

$$s = \frac{\omega_c - \omega_m}{\omega_c} \quad (1.2)$$

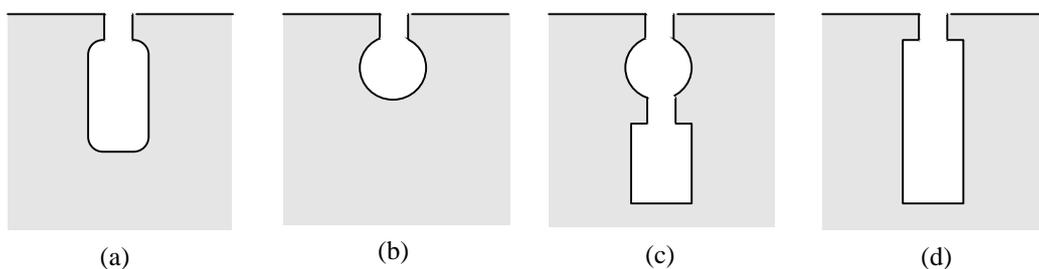
La pulsazione delle f.e.m. indotte e delle correnti nelle fasi di rotore risulta quindi:

$$\omega' = p \omega'_c = s \omega \quad (1.3)$$

2. CENNI COSTRUTTIVI

2.1 STATORE

Lo statore è formato dalla carcassa (di ghisa per basse potenze, di lamiera saldata per potenze maggiori) e dal pacco statorico nelle cui cave è alloggiato l'avvolgimento trifase destinato alla generazione del campo rotante. Il pacco statorico è formato dalla sovrapposizione di lamiere di piccolo spessore, fra loro isolate con vernici allo scopo di ridurre la potenza perduta per correnti parassite. Nelle grosse macchine, come negli alternatori, il pacco statorico viene suddiviso in più pacchi elementari per formare i canali di ventilazione al fine di rendere più efficiente il raffreddamento delle macchine. Le cave statoriche sono solitamente del tipo semichiuso (vedi figura 2.1), il che permette di ridurre sia il flusso disperso sia le perturbazioni del campo al traferro. La carcassa porta una base isolante con i morsetti ai quali vengono collegati i terminali delle fasi costituenti l'avvolgimento.



*Figura 2.1 - Forme più comuni di cave di rotore per macchine asincrone:
 (a) cava semichiusa per rotore avvolto, (b) cava per rotore a gabbia semplice,
 (c) cava per rotore a doppia gabbia, (d) cava per rotore a barre alte.*

2.2 ROTORE

Il rotore è costituito essenzialmente dall'albero e dal pacco rotorico. Nei motori di potenza minore il pacco di lamiere viene montato direttamente sull'albero. Nei motori di maggiore potenza il pacco lamellare rotorico, costituito da corone circolari, viene sistemato su una superficie cilindrica collegata da nervature all'albero. Le cave, uniformemente distribuite sulla periferia del pacco rotorico sono di tipo chiuso o semichiuso. Il numero delle cave rotoriche è diverso (in generale maggiore) del numero delle cave statoriche; ciò per evitare pulsazioni periodiche del flusso da cui derivano vibrazioni e rumore durante la marcia. In particolare, al fine di agevolare l'avviamento del motore e renderlo più silenzioso in marcia, il pacco rotorico ha talvolta le cave inclinate rispetto all'asse. Questo artificio richiama i vantaggi che si ottengono in meccanica sostituendo un ingranaggio a denti dritti con un ingranaggio a denti elicoidali.

Per quanto riguarda l'avvolgimento distinguiamo i **motori con rotore avvolto** ed i **motori con rotore a gabbia**.

Rotore a Gabbia Semplice

Nelle cave rotoriche (vedi figura 2.1.b) sono alloggiati delle sbarre di rame che vengono saldate a due anelli frontali, pure di rame, in modo da formare una gabbia, chiamata **gabbia di scoiattolo** (vedi figura 2.2). Così collegate le sbarre formano tra loro circuiti chiusi che sono percorsi dalle correnti indotte dal campo rotante. Si può dimostrare che **il numero dei poli magnetici determinati dalle correnti indotte nella gabbia è lo stesso di quello del campo rotante**. L'impiego del rotore a gabbia semplice avviene soprattutto per le basse potenze.

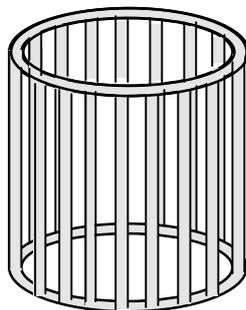


Figura 2.2 - Gabbia semplice per rotore di macchina asincrona

Rotore a Doppia Gabbia

Questo tipo di motore è molto diffuso per le potenze medie, perché è quello che presenta la maggiore elasticità nelle caratteristiche di avviamento. In questo caso il rotore è provvisto di due gabbie concentriche aventi caratteristiche opposte (vedi figura 2.1.c). La gabbia esterna (o di avviamento), è costituita di barre di piccola sezione aventi una elevata resistenza ed una piccola reattanza di dispersione. La gabbia interna (o di lavoro), è costituita di barre di grande sezione aventi una piccola resistenza ed una elevata reattanza di dispersione. All'avviamento la corrente circola prevalentemente nella gabbia esterna. Mano a mano che la macchina accelera e diminuisce la frequenza delle correnti di rotore, diminuisce la reattanza di dispersione e la corrente si sposta progressivamente sulla gabbia interna.

Rotore a Barre Alte

Il rotore di questo motore è provvisto di barre di forma allungata, sistemate in cave alte e strette (vedi figura 2.1.d) in cui si determina, all'avviamento, uno spostamento di corrente, dall'esterno verso l'interno, in modo simile a quello che si verifica nel rotore a doppia gabbia. Costruttivamente semplice, questa macchina è utilizzata soprattutto per le alte potenze.

Rotore avvolto

Nei motori asincroni con rotore avvolto (prevalentemente utilizzati nelle macchine di media e di grande potenza), nelle cave di rotore è alloggiato un avvolgimento avente lo stesso passo polare dell'avvolgimento di statore. Il numero delle fasi dell'avvolgimento di rotore può in generale essere anche diverso da quello dell'avvolgimento di statore. L'avvolgimento di rotore è collegato a stella con i terminali facenti capo a tre anelli conduttori, isolati sia tra loro che dall'albero sul quale sono calettati. Sugli anelli poggiano delle spazzole mediante le quali le fasi dell'avvolgimento rotorico vengono collegate a tre resistenze esterne, variabili, solitamente collegate a stella. Il complesso delle tre resistenze variabili forma il **reostato di avviamento**, il cui scopo principale è quello di limitare le correnti assorbite dal motore durante l'avviamento ed aumentare la coppia di spunto.

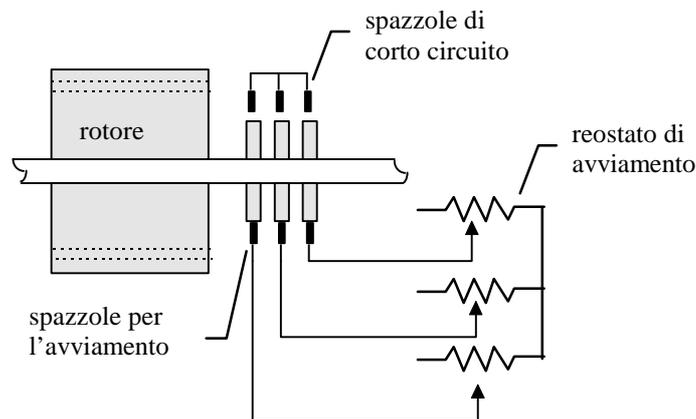


Figura 2.3 - Sezione longitudinale di un rotore avvolto

La manovra di avviamento si esegue con tutte le resistenze inserite. Man mano che il motore accelera le resistenze vengono gradualmente escluse. Durante il funzionamento a regime i tre anelli vengono cortocircuitati.

3. EQUAZIONI INTERNE

Nel seguito si fa riferimento al funzionamento a regime della macchina asincrona, caratterizzata da un valore costante della velocità di rotazione del rotore, e da una terna simmetrica di tensioni concatenate di alimentazione dello statore, funzioni sinusoidali del tempo con pulsazione ω . Vengono trascurate le armoniche spaziali superiori alla fondamentale della f.m.m. al traferro prodotta dagli avvolgimenti di statore e di rotore. Si suppongono inoltre valide le ipotesi di campo illustrate nel capitolo relativo al campo rotante. In particolare quindi si trascurano gli effetti della saturazione del ferro; di conseguenza tutte le grandezze, correnti, tensioni e f.e.m. di statore e di rotore risultano funzioni sinusoidali del tempo anche se la pulsazione delle correnti di rotore è diversa da quella delle grandezze di statore. Risulta infatti:

- lo statore è sede di un sistema trifase equilibrato di correnti aventi pulsazione ω ;

- il rotore è sede di un sistema trifase equilibrato di correnti aventi pulsazione $\omega' = s\omega$.
- La f.m.m. al traferro prodotta dallo statore ruota alla stessa velocità angolare $\omega_c = \omega/p$ della f.m.m. al traferro prodotta dagli avvolgimenti di rotore.

Seguendo un procedimento del tutto analogo a quello seguito per ottenere le equazioni interne del trasformatore, si riconosce che le linee di campo prodotte dalla corrente che circola in un generico avvolgimento possono essere raggruppate in due categorie principali (vedi figura 3.1):

- linee che, attraversano il traferro e si concatenano quindi con le fasi di rotore e statore;
- linee che si richiudono nel traferro e che, sostanzialmente, si concatenano solo con una fase dell'avvolgimento (di statore o di rotore), descrivendo gran parte del loro tragitto nell'aria del traferro.

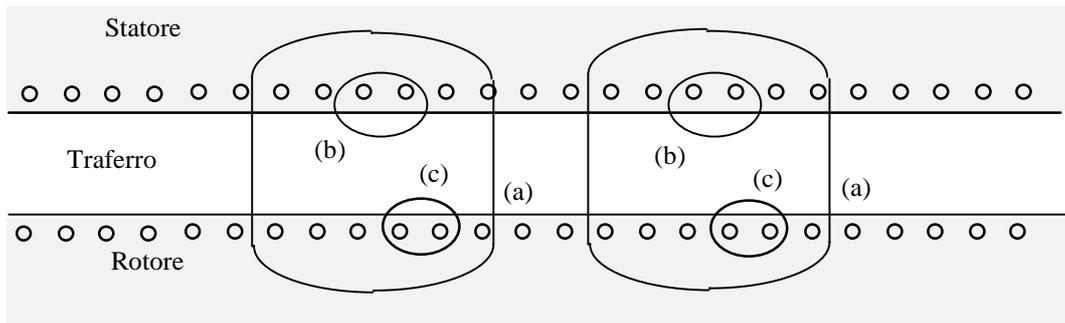


Figura 3.1 - Flusso principale (linee di campo del tipo a) e flusso disperso (linee di campo del tipo b e c)

Alle linee del primo tipo è associato il flusso principale, che si concatena con ciascuna spira dell'avvolgimento sia di statore che di rotore. Il campo magnetico (H) ad esso associato è legato alla rispettiva f.m.m. al traferro (F) dalla relazione (vedi capitolo relativo al campo rotante)

$$H(x) = \frac{F(x)}{\delta} \quad (3.1)$$

Alle linee del secondo tipo sono associati i flussi dispersi che si concatenano solo con l'avvolgimento che li ha generati e che, sviluppandosi principalmente nell'aria del traferro, possono essere descritti mediante dei coefficienti di autoinduzione di dispersione.

Si consideri un sistema di riferimento avente l'origine nel punto centrale della fase di statore; si consideri inoltre una origine dei tempi tale che, all'istante $t = 0$, il campo al traferro (a cui è associato il flusso principale) in corrispondenza dell'osservatore centrale della fase di statore ha il suo valore massimo. L'espressione del campo magnetico al traferro risulta:

$$H(x, t) = H_M \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t\right) \quad (3.2)$$

Indicando con x_0 la coordinata dell'osservatore centrale della fase di rotore all'istante $t = 0$, la legge del moto di tale osservatore risulta:

$$x_r(t) = x_0 + \omega_m R t \quad (3.3)$$

La corrente e la tensione nella fase di statore (I_1, V_1) sono funzioni sinusoidali del tempo con pulsazione ω , la corrente nella fase di rotore (I_2) è una funzione sinusoidale del tempo con pulsazione $\omega' = s\omega$.

$$\begin{aligned} i_1(t) &= I_{1M} \cos(\omega t + \varphi_1) \\ v_1(t) &= V_{1M} \cos(\omega t + \varphi) \\ i_2(t) &= I_{2M} \cos(\omega' t + \varphi_2) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Procedendo sempre analogamente a quanto fatto per i trasformatori, applicando la legge della induzione elettromagnetica a due opportune linee chiuse, una solidale con una fase di statore, l'altra solidale con la corrispondente fase di rotore^(*), si ottengono le seguenti relazioni:

$$\underline{V}_1 = (R_1 + jX_{d1})\underline{I}_1 + j\omega k_{a1} \frac{N_1}{2} \underline{\Phi} \quad (3.5)$$

$$0 = (R_2 + jX'_{d2})\underline{I}'_2 + j\omega' k_{a2} \frac{N_2}{2} \underline{\Phi}' \quad (3.6)$$

La (3.5) è la legge di Kirchhoff delle tensioni per la fase di statore. La corrente nella fase, la tensione ai suoi capi ed il flusso concatenato con la spira centrale della fase sono grandezze sinusoidali con pulsazione ω e sono quindi rappresentate mediante i rispettivi fasori $\underline{I}_1, \underline{V}_1, \underline{\Phi}$. R_1 è la resistenza elettrica; X_{d1} è la reattanza di dispersione valutata alla pulsazione ω ; k_{a1} è il fattore di avvolgimento ed N_1 è il numero totale di conduttori attivi; $j\omega k_{a1} N_1 \underline{\Phi} / 2$ rappresenta la f.e.m. indotta nella fase statorica considerata (vedi capitolo relativo al campo rotante).

La (3.6) è la legge di Kirchhoff delle tensioni per la fase rotorica. La corrente nella fase ed il flusso concatenato con la spira centrale della fase sono grandezze sinusoidali con pulsazione ω' e sono quindi rappresentate mediante i rispettivi fasori $\underline{I}'_2, \underline{\Phi}'$. R_2 è la resistenza elettrica; X'_{d2} è la reattanza di dispersione valutata alla pulsazione ω' ; k_{a2} è il fattore di avvolgimento ed N_2 è il numero totale di conduttori attivi; $j\omega' k_{a2} N_2 \underline{\Phi}' / 2$ rappresenta la f.e.m. indotta nella fase rotorica considerata.

^(*)La legge della induzione elettromagnetica riferita ad una linea chiusa in moto con una velocità \mathbf{v} , può essere espressa nel riferimento rispetto a cui la linea chiusa C e la superficie S che ad essa si appoggia sono in quiete. In tal caso, indicando con un apice le grandezze valutate nel nuovo sistema di riferimento, risulta:

$$\oint_C \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B}' \cdot \mathbf{n} dS$$

Tra il valore delle grandezze nei due sistemi di riferimento, quello fisso e quello in moto, se la velocità di quest'ultimo è trascurabile rispetto a quella della luce, valgono le relazioni di trasformazione (di Galileo):

$$t' = t \quad \mathbf{x}' = \mathbf{x} - \mathbf{v}t \quad \mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad \mathbf{B}' = \mathbf{B} \quad \rho' = \rho \quad \mathbf{J}' = \mathbf{J}$$

Il flusso concatenato con la spira centrale di statore (Φ) e quello concatenato con la spira centrale di rotore (Φ') hanno la seguente espressione, dove l è la dimensione della macchina nella direzione assiale:

$$\begin{aligned}\Phi(t) &= \int_{-\tau/2}^{\tau/2} \mu_0 l H_M \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t\right) dx = \frac{2\tau\mu_0 l H_M}{\pi} \cos(\omega t) \\ \Phi'(t) &= \int_{x_r(t)-\tau/2}^{x_r(t)+\tau/2} \mu_0 l H_M \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t\right) dx = \frac{2\tau\mu_0 l H_M}{\pi} \cos\left(\omega' t - \frac{\pi}{\tau} x_0\right)\end{aligned}\quad (3.7)$$

Dalla (3.7), applicando la trasformata di Steinmetz, tenendo però presente che i fasori senza apice si riferiscono a grandezze con pulsazione ω , mentre i fasori con apice si riferiscono a grandezze con pulsazione $s\omega$, si ottiene:

$$\begin{aligned}\underline{\Phi} &= \frac{\sqrt{2}\tau\mu_0 l H_M}{\pi} \\ \underline{\Phi}' &= \frac{\sqrt{2}\tau\mu_0 l H_M}{\pi} e^{-j\frac{\pi}{\tau}x_0} = \underline{\Phi} e^{-j\frac{\pi}{\tau}x_0}\end{aligned}\quad (3.8)$$

Indicando con X_{d2} la reattanza di dispersione della fase rotorica valutata alla pulsazione ω ($X_{d2} = X'_{d2}/s$), dalla (3.6) e (3.8) segue:

$$0 = \left(R_2 + R_2 \frac{1-s}{s} + jX_{d2} \right) \underline{I}'_2 e^{j\frac{\pi}{\tau}x_0} + j\omega k_{a2} \frac{N_2}{2} \underline{\Phi} \quad (3.9)$$

L'ultima equazione che descrive il comportamento elettrico della macchina asincrona è l'equazione di accoppiamento magnetico delle fasi di statore e di rotore: essa esprime la relazione che intercorre tra il flusso principale Φ e le correnti di statore e di rotore che l'hanno generato. Tale relazione può essere ricavata dalla relazione che intercorre (sempre nelle ipotesi di campo sopra menzionate) tra il campo e la f.m.m. al traferro. Indicando con F_1 ed F_2 rispettivamente la f.m.m. al traferro dovuta alle correnti di statore e quella dovuta alle correnti di rotore e prendendo l'origine del sistema di riferimento nell'osservatore centrale della fase di statore, risulta:

$$F_1(x, t) + F_2(x, t) = \delta H_M \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t\right) \quad (3.10)$$

Nell'origine, punto centrale della fase di statore, risulta, tenendo conto della (3.7):

$$F_1(t) + F_2(t) = \delta H_M \cos(\omega t) = R_t \Phi(t) \quad (3.11)$$

Dove R_t è la riluttanza al traferro che ha la seguente espressione:

$$R_t = \frac{\pi\delta}{2\tau\mu_0 l} \quad (3.12)$$

L'espressione delle f.m.m. F_1 ed F_2 (vedi capitolo relativo al campo rotante), supponendo entrambi gli avvolgimenti trifase, è la seguente:

$$\begin{aligned} F_1(x, t) &= \frac{3k_{a1}N_1I_{1M}}{2p\pi} \cos\left(\frac{\pi}{\tau}x - \omega t - \varphi_1\right) \\ F_2(x, t) &= \frac{3k_{a2}N_2I_{2M}}{2p\pi} \cos\left(\frac{\pi}{\tau}x' - \omega' t - \varphi_2\right) = \\ &= \frac{3k_{a2}N_2I_{2M}}{2p\pi} \cos\left(\frac{\pi}{\tau}(x - x_0) - \omega t - \varphi_2\right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Dalle (3.11) e (3.13) segue quindi:

$$3k_{a1}N_1\underline{I}_1 + 3k_{a2}N_2\underline{I}'_2 e^{j\frac{\pi}{\tau}x_0} = 2p\pi\underline{R}_t\underline{\Phi} \quad (3.14)$$

Nelle equazioni sino qui formulate compaiono fasori non omogenei, cioè fasori che si riferiscono a grandezze sinusoidali nel tempo con pulsazioni diverse. E' possibile ovviare a questo inconveniente se si considera il funzionamento della macchina asincrona con il rotore bloccato e con le fasi di rotore chiuse su una stella di resistori aventi resistenza $R_2(1-s)/s$. In questo caso sia lo statore che il rotore sono sedi di un sistema trifase di correnti equilibrato con pulsazione ω . Pertanto, le equazioni che descrivono il comportamento elettrico della macchina sono le seguenti:

$$\underline{V}_{1e} = (\underline{R}_1 + j\underline{X}_{d1})\underline{I}_{1e} + j\omega k_{a1} \frac{N_1}{2} \underline{\Phi}_e \quad (3.15)$$

$$0 = \left(\underline{R}_2 + \underline{R}_2 \frac{1-s}{s} + j\underline{X}_{d2} \right) \underline{I}_{2e} + j\omega k_{a2} \frac{N_2}{2} \underline{\Phi}_e e^{-j\frac{\pi}{\tau}x_1} \quad (3.16)$$

$$3k_{a1}N_1\underline{I}_{1e} + 3k_{a2}N_2\underline{I}_{2e} e^{j\frac{\pi}{\tau}x_1} = 2p\pi\underline{R}_t\underline{\Phi}_e \quad (3.17)$$

dove x_1 è la coordinata dell'osservatore centrale della della fase di rotore. Le equazioni (3.5), (3.9) e (3.14) rappresentano un sistema di tre equazioni complesse. Se è nota la tensione di alimentazione statorica \underline{V}_1 , tale sistema permette di determinare le correnti nelle fasi statoriche e rotoriche \underline{I}_1 ed \underline{I}'_2 ed il flusso principale $\underline{\Phi}$. Analogamente, le equazioni (3.15 - 3.17) rappresentano un sistema di tre equazioni complesse. Se è nota la tensione di alimentazione statorica \underline{V}_{1e} , tale sistema permette di determinare le correnti nelle fasi statoriche e rotoriche \underline{I}_{1e} ed \underline{I}_{2e} ed il flusso principale $\underline{\Phi}_e$. Si può notare che, a parità di tensione di alimentazione statorica ($\underline{V}_{1e}=\underline{V}_1$), risulta:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{I}_{1e} \\ \underline{\Phi} &= \underline{\Phi}_e \\ \underline{I}'_2 &= \underline{I}_{2e} e^{j\frac{\pi}{\tau}(x_1-x_0)} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Dalle (3.18) segue che l'unica differenza esistente tra i due casi considerati consiste nella frequenza e nella fase della corrente di rotore di cui peraltro rimane invariato il valore efficace. Rimane così provato il seguente teorema.

Teorema di Equivalenza delle macchine Asincrone

Una macchina asincrona funzionante (con le fasi di rotore in cortocircuito) ad una generica velocità (a cui corrisponde un generico valore s dello scorrimento) equivale, sotto il profilo del funzionamento elettrico, alla stessa macchina mantenuta a rotore bloccato ma con le fasi di rotore che alimentano ciascuna una resistenza pari a $R_2(1-s)/s$, essendo R_2 la resistenza di una fase rotorica.

L'equivalenza consiste nel fatto che il campo al traferro, la corrente di statore, il valore efficace della corrente di rotore e lo sfasamento tra corrente di rotore e flusso concatenato con la spira centrale rotorica, sono gli stessi nelle due condizioni di funzionamento. Ne consegue che risultano identiche : le perdite per effetto Joule in entrambi gli avvolgimenti, la potenza elettrica assorbita dallo statore, le perdite nel ferro di statore. Nel funzionamento con rotore bloccato non viene però erogata alcuna potenza meccanica, bensì parte della energia elettrica assorbita dallo statore viene dissipata per effetto Joule sulle resistenze fittizie $R_2(1-s)/s$. Trascurando le perdite nel ferro di rotore, dal bilancio energetico della macchina asincrona segue che la potenza meccanica (P_m) erogata all'albero dalla macchina funzionante col valore s dello scorrimento, comprensiva della potenza spesa per vincere l'attrito interno alla macchina stessa, è data dalla seguente espressione:

$$P_m = 3 R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2 \quad (3.19)$$

Si noti che lo sfasamento spaziale α tra i campi H_s ed H_r è uguale in entrambi i funzionamenti. Infatti, dalle eq. (3.13) risulta $\alpha = \varphi_2 - \varphi_1 + \pi x_0/\tau$. Nel caso di funzionamento a rotore bloccato risulta (vedi eq.(7.1) del capitolo sul Campo Rotante):

$$F_1(x,t) = \frac{3 k_{a1} N_1 I_{1M}}{2p\pi} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t - \varphi_1\right)$$
$$F_2(x,t) = \frac{3 k_{a2} N_2 I_{2Me}}{2p\pi} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} (x - x_1) - \omega t - \varphi_{2e}\right)$$

Dalla eq. (3.18) risulta $I_{2e} = I_2$ e $\varphi_{2e} = \varphi_2 + \pi(x_0 - x_1)/\tau$. Quindi lo sfasamento spaziale α tra i campi H_s ed H_r a rotore bloccato risulta $\alpha = \varphi_{2e} - \varphi_1 + \pi x_1/\tau = \varphi_2 - \varphi_1 + \pi x_0/\tau$.

4. COPPIA ELETTROMAGNETICA

L'espressione della coppia di origine elettromagnetica che agisce sugli avvolgimenti del rotore di una macchina asincrona può essere ricavata dalla (3.19) tenendo conto che la potenza meccanica che compare a primo membro è data dal prodotto della coppia cercata per la velocità angolare del rotore. Risulta:

$$C_e = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{3R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2}{\omega_c (1-s)} = 3 \frac{p}{\omega} \frac{s R_2 E_2^2}{R_2^2 + s^2 X_{d2}^2} \quad (4.1)$$

dove con $E_2 = \omega k_{a2} (N_2/2) \Phi$ si è indicata la f.e.m. indotta nella fase di rotore.

5. EQUAZIONI ESTERNE

Le variabili che definiscono univocamente il regime di funzionamento della macchina asincrona, tenendo conto del teorema di equivalenza, sono la pulsazione statorica ω , la velocità di rotazione ω_m (da cui si ricava il valore dello scorrimento s), la tensione statorica \underline{V}_1 , la corrente statorica \underline{I}_1 , la corrente rotorica \underline{I}_2 , ed il flusso principale $\underline{\Phi}$ concatenato con la spira centrale statorica. Il valore di tali variabili può essere determinato risolvendo il sistema costituito dalle 3 equazioni interne complesse (3.15-17) e dalle equazioni esterne che individuano l'accoppiamento della macchina stessa con l'ambiente esterno. Un primo gruppo di equazioni individua l'alimentazione elettrica della macchina; ad esempio, se la macchina è alimentata a statore da una rete avente tensione concatenata e frequenza assegnata, rispettivamente pari a V_{10} ed f_0 , risulta:

$$V = V_{10} \quad ; \quad f = f_0 \quad (5.1)$$

L'equazione del moto del rotore impone a regime l'uguaglianza fra la coppia di origine elettromagnetica C_e , data dalla equazione (4.1) e la coppia di origine meccanica C_m applicata all'albero, che è una funzione nota della velocità di rotazione:

$$C_e = C_m \quad (5.2)$$

6. CIRCUITO ELETTRICO EQUIVALENTE

Quando la macchina asincrona funziona con il rotore bloccato, gli avvolgimenti statorici e gli avvolgimenti rotorici possono essere considerati il primario ed il secondario di un trasformatore: i due avvolgimenti infatti sono magneticamente accoppiati e correnti alternate nello statore inducono correnti alternate di uguale frequenza nel rotore; da questo fatto deriva il nome di macchine ad induzione con cui vengono spesso indicate le macchine asincrone. Le due macchine, macchina asincrona con rotore bloccato e trasformatore, differiscono unicamente per la diversa struttura del circuito magnetico di accoppiamento tra primario e secondario. In entrambi i casi il circuito magnetico è realizzato in modo da ridurre il più possibile la riluttanza dello stesso ed i flussi dispersi, ma nella macchina asincrona questa esigenza deve essere mediata dalla necessità di garantire in ogni caso un traferro di adeguato spessore tra statore e rotore in grado di permettere la rotazione di quest'ultimo. Analogamente a quanto visto nel caso del trasformatore, si riconosce che le equazioni interne della macchina asincrona (3.15) - (3.17), costituiscono le leggi di Kirchhoff del circuito illustrato nella figura 6.1, che rappresenta quindi il circuito elettrico equivalente per fase della macchina asincrona.

La reattanza magnetizzante X_0 e la corrente magnetizzante \underline{I}_μ sono date dalle seguenti espressioni:

$$X_0 = \omega \frac{3(k_{a1}N_1)^2}{2R} \quad ; \quad \underline{I}_\mu = \frac{R}{3k_{a1}N_1} \underline{\Phi} \quad \text{dove} \quad R = 2 p \pi R_t \quad (6.1)$$

Nella trattazione svolta sino ad ora sono state trascurate per semplicità le perdite nel ferro. E' possibile tenere conto di queste ultime, in modo analogo a quanto si fa per i trasformatori, modificando la rete equivalente della macchina asincrona ponendo in parallelo ad X_0 una opportuna resistenza R_0 percorsa da una corrente I_a denominata componente attiva della corrente a vuoto I_0 .

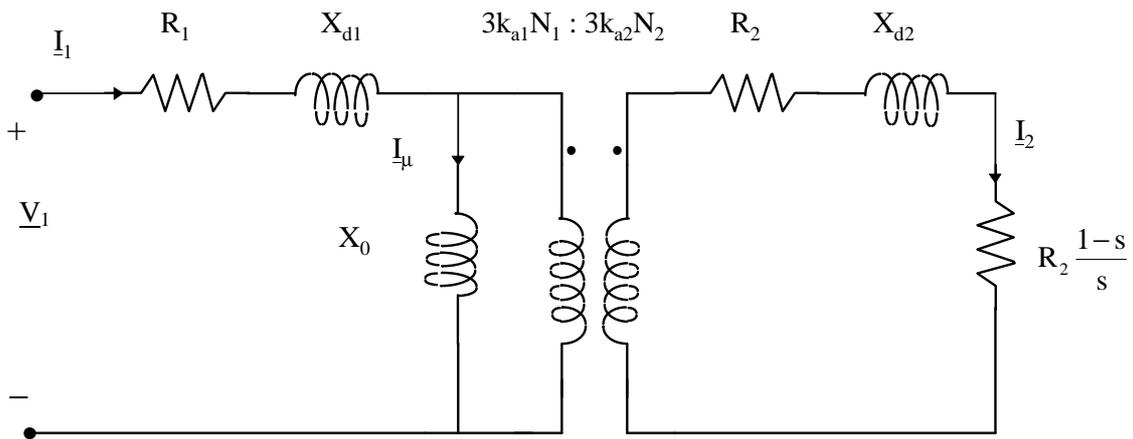


Figura 6.1 - Circuito elettrico equivalente per una fase della macchina asincrona (trascurando le perdite nel ferro)

Si è inoltre considerata una macchina con rotore avvolto. Si può dimostrare che, nel limite delle approssimazioni fatte, una macchina con rotore a gabbia si comporta come una macchina con rotore avvolto. L'unica differenza consiste nel fatto che in una macchina con rotore a gabbia la corrente rotorica non è direttamente misurabile. Risulta quindi più conveniente riferire tutte le grandezze di rotore a statore, secondo le trasformazioni (6.2) e considerare il circuito elettrico equivalente riferito ad una fase di statore mostrato nella figura (6.2).

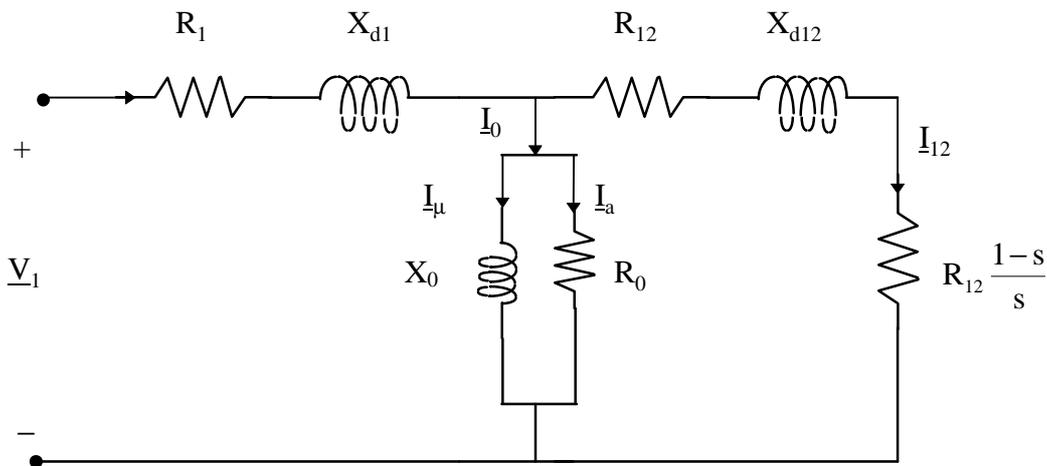


Figura 6.2 - Circuito elettrico equivalente della macchina asincrona riferito ad una fase di statore

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_{12} &= \underline{I}_2 \frac{3k_{a2}N_2}{3k_{a1}N_1} && \text{corrente della fase di rotore ridotta a statore} \\
 R_{12} &= R_2 \left(\frac{3k_{a1}N_1}{3k_{a2}N_2} \right)^2 && \text{resistenza della fase di rotore ridotta a statore} \\
 X_{d12} &= X_{d2} \left(\frac{3k_{a1}N_1}{3k_{a2}N_2} \right)^2 && \text{reattanza di dispersione della fase di rotore ridotta a statore}
 \end{aligned}
 \tag{6.2}$$

Come precedentemente detto, il circuito equivalente per fase della macchina asincrona (figura 6.2) coincide con quello di un trasformatore. Esiste però una differenza significativa relativamente ai valori delle grandezze in gioco. Nel caso del trasformatore la corrente a vuoto è una piccola frazione

della corrente nominale primaria; nel caso della macchina asincrona, a causa dell'elevato valore della riluttanza al traferro, la corrente magnetizzante e quindi la corrente a vuoto risultano considerevolmente più elevate. Non è quindi più accettabile, se non in prima approssimazione, semplificare ulteriormente la rete equivalente spostando il parallelo di R_0 ed X_0 a monte della impedenza primaria ed inglobando l'impedenza primaria e secondaria in una unica impedenza equivalente.

7. CARATTERISTICA MECCANICA

La caratteristica meccanica di una macchina asincrona è rappresentata nella figura 7.1. In ascisse è riportata la velocità angolare del rotore n (in numero di giri al minuto $n = 60 \omega_m / 2\pi$) ed in ordinate è riportata la coppia elettromagnetica; la curva si riferisce ad un valore della frequenza e della tensione di alimentazione statorica. Nella figura, in ascissa sono anche riportati i valori dello scorrimento s legato ad n ed f dalle relazioni (1.1) ed (1.2). La velocità angolare del campo rotante n_c , in numero di giri al minuto è data dalla seguente relazione:

$$n_c = \frac{60f}{p} \quad (7.1)$$

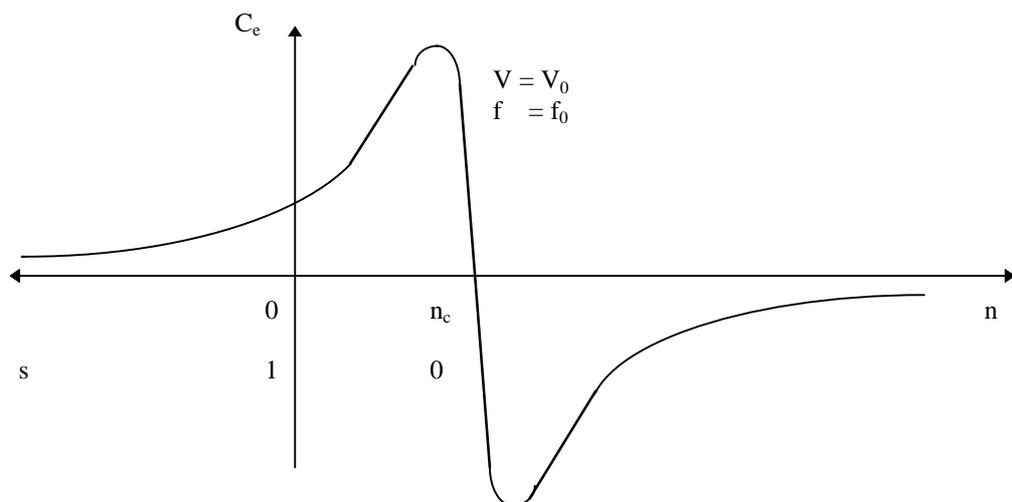


Figura 7.1 - Caratteristica meccanica di una macchina asincrona

Quando il rotore ruota alla velocità del campo rotante lo scorrimento risulta nullo, il rotore vede un campo fermo rispetto a se stesso, risultano quindi nulle le f.e.m. indotte e le correnti nelle fasi di rotore: la coppia risulta nulla. In tale regime di funzionamento il rotore viene mantenuto in moto da una coppia meccanica applicata dall'esterno che è necessaria per vincere la coppia resistente dovuta all'attrito interno alla macchina. La caratteristica meccanica, vedi la espressione (4.1), risulta antisimmetrica rispetto ai valori dello scorrimento: $C_e(-s) = -C_e(s)$. La coppia elettromagnetica risulta positiva, cioè concorde col verso di rotazione del campo, per valori positivi dello scorrimento, negativa altrimenti. Ne segue che la coppia elettromagnetica ha verso concorde col verso di rotazione del rotore (**funzionamento da motore**) solo per valori di scorrimento compresi tra 0 ed 1 (0 ed n_c se ci si riferisce al numero di giri), mentre si oppone al moto in ogni altro caso. Per scorrimenti negativi (il rotore ruota nel verso di rotazione del campo ma ad una velocità superiore) o superiori ad 1 (il rotore ruota nel verso opposto a quello di rotazione del campo) la macchina assorbe potenza meccanica; tale potenza meccanica può essere resa, a meno delle perdite,

alla rete di alimentazione di statore sotto forma di potenza elettrica (**funzionamento da generatore**) oppure interamente dissipata all'interno della macchina stessa (**funzionamento da freno**). Per individuare il regime di funzionamento è necessario valutare il segno della potenza elettrica P_c assorbita a statore. Facendo riferimento al circuito elettrico equivalente illustrato nella figura 6.2 e trascurando le perdite nel ferro si ottiene:

$$P_c = 3 \frac{I_1^2}{R_{12}^2 + s^2 (X_0 + X_{d12})^2} \left[(X_0 + X_{d12})^2 R_1 s^2 + X_0^2 R_{12} s + R_1 R_{12}^2 \right] \quad (7.2)$$

La potenza elettrica assorbita a statore risulta quindi negativa (funzionamento da generatore) nell'intervallo di valori di scorrimento compreso tra un valore s' negativo e generalmente molto piccolo ed un valore s'' , generalmente molto prossimo a $-R_{12}/R_1$. La figura 7.2 sintetizza tutti i regimi di funzionamento della macchina asincrona.

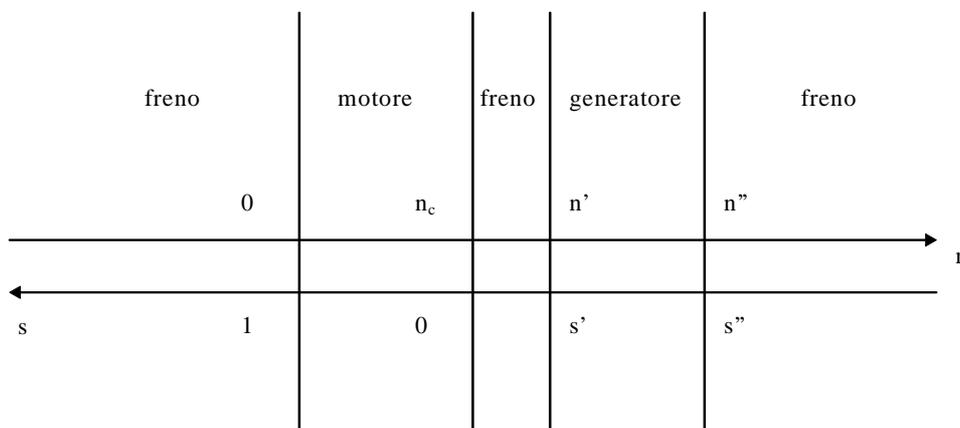


Figura 7.2 - Regimi di funzionamento della macchina asincrona

8 MOTORE ASINCRONO

Come già detto, l'impiego più diffuso delle macchine asincrone è come motore: lo statore è alimentato con una terna di tensioni concatenate simmetrica e diretta ed il rotore deve trascinare in rotazione un carico meccanico. Allo spunto, quando cioè il rotore è fermo, come si rileva dalla caratteristica meccanica (vedi figura 8.1), è presente una coppia (coppia di spunto) che, se superiore alla coppia resistente, permette al motore di avviarsi e di portarsi alla velocità di regime n_0 , corrispondente al valore V_0 ed f_0 rispettivamente della tensione e frequenza di alimentazione, in cui la coppia elettromagnetica (C_e) uguaglia quella resistente (C_m , comprensiva degli attriti interni della

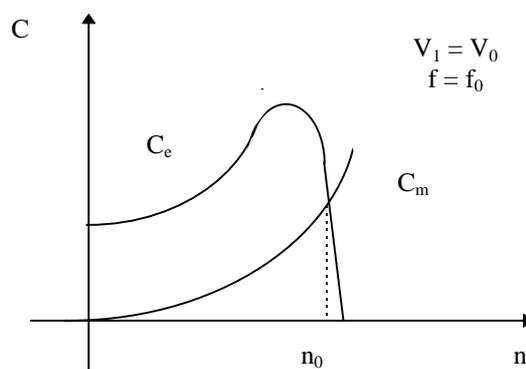


Figura 8.1 - Caratteristica meccanica del motore asincrono

macchina). La condizione di regime raggiunta è stabile. Infatti, ad un aumento di velocità dovuto ad una perturbazione esterna corrisponde un aumento della coppia resistente rispetto a quella motrice: la macchina rallenta e raggiunge spontaneamente il regime di funzionamento precedente la perturbazione. Viceversa, ad un diminuzione della velocità corrisponde un aumento della coppia motrice rispetto a quella resistente: la macchina accelera e raggiunge spontaneamente il regime di funzionamento precedente la perturbazione.

Il rendimento di un motore viene definito come il rapporto fra la potenza meccanica erogata e la potenza elettrica assorbita. Dal teorema di equivalenza e dal circuito equivalente (vedi figura 6.2) segue la seguente espressione del rendimento η di un motore asincrono trifase:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} = \frac{R_{12} \frac{1-s}{s} I_{12}^2}{R_1 I_1^2 + R_0 I_a^2 + R_{12} I_{12}^2 + R_{12} \frac{1-s}{s} I_{12}^2} \quad (8.1)$$

Il rendimento può essere espresso come il prodotto di due rendimenti η_r (rendimento rotorico) ed η_s (rendimento statorico) rispettivamente dati dalle seguenti espressioni:

$$\eta = \eta_s \eta_r \quad \left\{ \begin{array}{l} \eta_s = \frac{R_{12} I_{12}^2 + R_{12} \frac{1-s}{s} I_{12}^2}{R_1 I_1^2 + R_0 I_a^2 + R_{12} I_{12}^2 + R_{12} \frac{1-s}{s} I_{12}^2} \\ \eta_r = \frac{R_{12} \frac{1-s}{s} I_{12}^2}{R_{12} I_{12}^2 + R_{12} \frac{1-s}{s} I_{12}^2} = 1-s \end{array} \right. \quad (8.2)$$

Dall'espressione del rendimento rotorico si vede come sia necessario, al fine di realizzare rendimenti elevati, che il regime di funzionamento della macchina sia caratterizzato da un valore dello scorrimento piccolo (valori tipici sono dell'ordine del qualche per cento), cosa peraltro facilmente realizzabile dato l'elevata pendenza della caratteristica meccanica in prossimità della velocità di sincronismo.

E' da notare che la caratteristica meccanica del motore asincrono presenta una coppia di spunto (C_{sp}) sensibilmente minore della coppia massima (C_{max}); risulta (vedi (4.1)):

$$C_{sp} = 3 \frac{P}{\omega} \frac{R_2 E_2^2}{R_2^2 + X_{d2}^2} \quad (8.3)$$

$$C_{max} = 3 \frac{P}{\omega} \frac{E_2^2}{2X_{d2}} = C_e \Big|_{s=\frac{R_2}{X_{d2}}}$$

Questa caratteristica ha effetti negativi in quanto si può verificare il caso di una coppia resistente costante al variare del numero di giri (il motore di una gru), minore della coppia massima della macchina, ma maggiore della sua coppia di spunto, come illustrato nella figura 8.2.

In questo caso, il motore asincrono, pur essendo in grado di mantenersi in rotazione alla velocità n_0 (è da notare che delle due possibili condizioni di funzionamento corrispondenti alla uguaglianza della coppia motrice con quella resistente, solo quella indicata nella figura risulta essere stabile) non parte in quanto la sua coppia di spunto è troppo bassa.

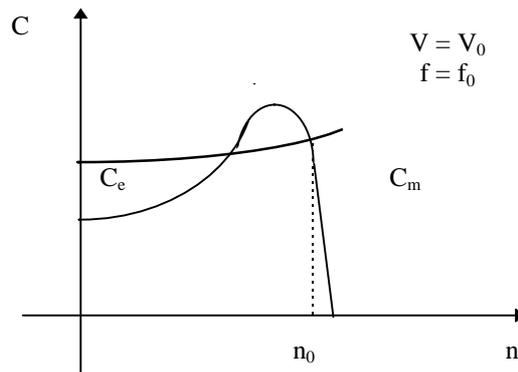


Figura 8.2

Un ulteriore problema che si verifica all'avviamento del motore asincrono è rappresentato dall'elevato valore delle correnti assorbite sia a statore che a rotore, rispetto al valore corrispondente al funzionamento a regime. La caratteristica elettromeccanica di statore e di rotore, ricavabile dalla soluzione del circuito equivalente di figura 6.2 in corrispondenza di un assegnato valore della tensione e della frequenza di alimentazione, è illustrata nella figura 8.3

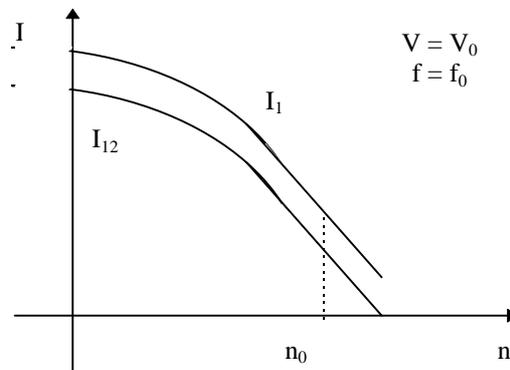


Figura 8.3 - Caratteristica elettromeccanica di statore e di rotore

La corrente allo spunto può risultare anche cinque volte maggiore della corrente a regime. Sia la coppia che la corrente allo spunto dipendono dalla resistenza rotorica: in particolare, al crescere della resistenza rotorica, la coppia elettromagnetica cresce e la corrente, sia statorica che rotorica, cala. Per i motori con rotore avvolto è quindi possibile innalzare la coppia e ridurre la corrente allo spunto, collegando, mediante un collettore ad anelli (vedi figura 2.3), l'avvolgimento rotorico ad un reostato di avviamento, in tal modo aumentando la resistenza rotorica. Raggiunto il regime di funzionamento richiesto il reostato viene escluso e sostituito dalle connessioni di cortocircuito.

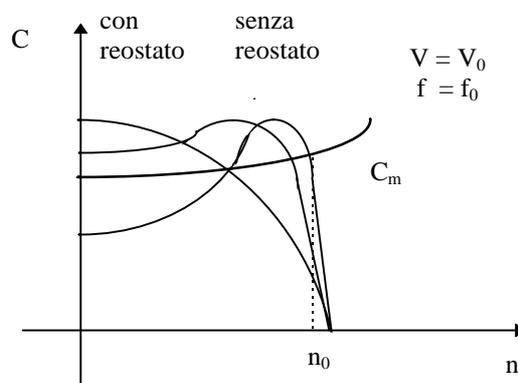


Figura 8.4 - Avviamento mediante inserzione del reostato di avviamento

Nei motori con rotore a gabbia, preferibili rispetto a quelli con rotore avvolto per la loro semplicità e robustezza, non essendo accessibile l'avvolgimento rotorico, non è possibile utilizzare il reostato di avviamento. La riduzione delle correnti e l'innalzamento della coppia allo spunto vengono in questo caso ottenuti, se necessario, con l'introduzione di una doppia gabbia. La gabbia più esterna, rispetto alla gabbia interna, è caratterizzata da un valore più elevato della resistenza (la sezione dei conduttori è più piccola), ma da un valore più piccolo del coefficiente di autoinduzione di dispersione. Allo spunto, quando la frequenza delle correnti rotoriche coincide con quella dell'alimentazione di statore, la reattanza di dispersione della gabbia interna è molto maggiore di quella della gabbia esterna, tanto da compensare la minore resistenza e da fare sì che la corrente circoli prevalentemente nella gabbia esterna. Man mano che il motore accelera, la frequenza di rotore si riduce e con essa la reattanza di dispersione e l'impedenza delle due gabbie viene ad essere caratterizzata dal valore della resistenza: la corrente progressivamente si sposta dalla gabbia esterna a quella interna. Una regolazione analoga si può ottenere mediante l'introduzione di barre alte.

Un altro modo per ridurre le correnti allo spunto, utilizzabile anche nei motori con rotore a gabbia, consiste nell'avviamento con una tensione di alimentazione ridotta rispetto a quella nominale. L'inconveniente di tale procedura consiste nella contemporanea riduzione della coppia di spunto. I sistemi di avviamento a tensione ridotta comunemente usati, per motori con rotore a gabbia, sono:

1. Avviamento a stella/triangolo

Il commutatore stella/triangolo collega, allo spunto, le fasi statoriche a stella. Quando il motore raggiunge circa l'80% dei giri sincroni le collega invece a triangolo (collegamento di lavoro). Con questo artificio si limita l'intensità della corrente assorbita dalla linea a circa 1/3 dell'intensità che il motore assorbirebbe se invece lo si avviasse con le fasi collegate a triangolo.

2. Avviamento con esclusione di resistenze statoriche

Se si inserisce una resistenza su ogni fase del circuito di alimentazione del motore, a monte della morsettiera, si provoca una caduta di tensione di linea e, di conseguenza, una proporzionale riduzione della corrente assorbita. Questa resistenza statorica si può cortocircuitare progressivamente durante l'avviamento oppure un sola volta a fine avviamento. Con questo sistema si ottiene una accelerazione uniforme e senza strappi da zero fino alla piena velocità.

3. Avviamento con autotrasformatore

In questo caso si alimenta il motore, tramite l'autotrasformatore, con una tensione variabile con continuità da un valore ridotto, allo spunto, fino al valore nominale, a regime. Questo sistema ha prestazioni migliori rispetto ai precedenti, ma risulta più oneroso in termini di costo. Esso viene utilizzato per i motori di grande potenza.

8.1 REGOLAZIONE DELLA VELOCITÀ

Come già detto, il motore asincrono parte autonomamente e raggiunge la velocità di regime quando la coppia motrice elettromagnetica uguaglia quella resistente meccanica. Per variare la velocità di regime è quindi necessario variare la caratteristica meccanica del motore. E' possibile ottenere la regolazione della velocità del motore agendo sulle caratteristiche del circuito rotorico, sulle caratteristiche del circuito statorico, sul valore efficace della tensione di alimentazione e sulla frequenza della tensione di alimentazione.

Variatione della resistenza rotorica

Come già visto nel paragrafo precedente, se il rotore è avvolto, è possibile variare, tramite il reostato di avviamento, la resistenza di ciascuna fase dell'avvolgimento rotorico. La conseguente variazione della caratteristica meccanica avviene a coppia massima costante; la velocità varia in un campo molto piccolo (vedi figura 8.5), ed il rendimento del motore viene penalizzato dalle perdite per effetto Joule sulle resistenze rotoriche.

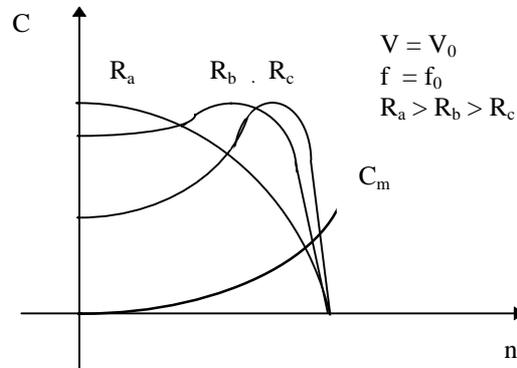


Figura 8.5 - Regolazione della velocità mediante variazione della resistenza rotorica

Iniezione di f.e.m. nei circuiti di rotore

E' possibile modificare la caratteristica meccanica del motore asincrono con rotore avvolto, inserendo in ciascuna fase di rotore una f.e.m. alla frequenza di rotore, regolabile in valore efficace e fase. Numerosi schemi sono stati proposti per la realizzazione di tale dispositivo. Grossolanamente, tali schemi possono essere suddivisi in due tipi, come illustrato nella figura 8.6 dove IM rappresenta il motore di cui si vuole regolare la velocità.

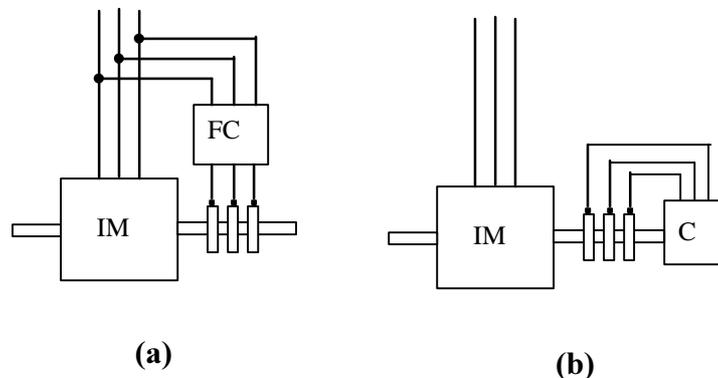


Figura 8.6 - Regolazione della velocità mediante iniezione di f.e.m. nella fasi rotoriche

Nello schema della figura 8.6.a, i circuiti di rotore del motore IM sono collegati ad un dispositivo ausiliario di conversione di frequenza, che viene realizzato mediante componenti elettronici, rappresentato dal blocco FC, nel quale la potenza elettrica a frequenza di scorrimento generata nel rotore del motore principale è convertita in potenza elettrica a frequenza di statore e restituita alla linea. Nella figura 8.6.b i circuiti di rotore del motore IM sono collegati ad una apparecchiatura ausiliaria, rappresentata dal blocco C che può essere costituito da un sistema discretamente complicato di macchine rotanti, nella quale la potenza elettrica a frequenza di scorrimento è convertita in potenza meccanica ed aggiunta alla potenza sull'albero sviluppata dal motore principale. In entrambi gli schemi, la velocità ed il fattore di potenza del motore principale possono essere regolati controllando l'ampiezza e la fase delle f.e.m. a frequenza di scorrimento del dispositivo ausiliario. Tale dispositivo ausiliario risulta in generale piuttosto piccolo rispetto al

motore principale, perché deve essere dimensionato solo per la frazione di potenza elettrica assorbita dallo statore e ceduta al rotore. Tra i sistemi più impiegati vi sono il sistema Leblanc, il motore Schrage ed il sistema Kramer modificato.

Variatione della tensione di alimentazione

Aumentando o diminuendo il valore efficace della tensione di alimentazione si ottiene una regolazione della velocità come mostrato nella figura 8.7.

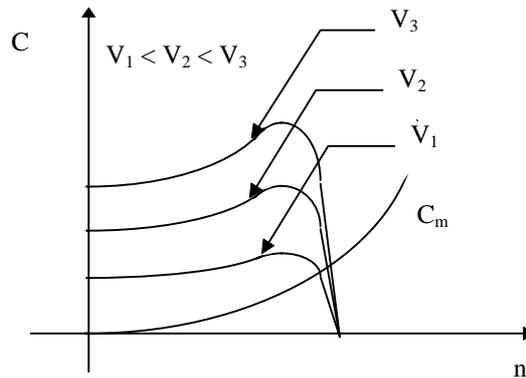


Figura 8.7 - Regolazione di velocità mediante variazione della frequenza e del valore efficace della tensione di alimentazione

La variazione del valore efficace della tensione di alimentazione può essere ottenuta alimentando lo statore con un autotrasformatore con rapporto di trasformazione variabile oppure mediante un opportuno dispositivo elettronico. La variazione di velocità che si ottiene è in ogni caso molto contenuta ed ottenuta a scapito della coppia massima.

Variatione del numero di coppie polari

Nelle macchine con rotore a gabbia, è possibile, tramite opportuni commutatori, variare il numero di coppie polari dell'avvolgimento statorico (e conseguentemente dell'avvolgimento rotorico, in quanto il rotore a gabbia assume spontaneamente un passo polare pari a quello del campo induttore). Generalmente si utilizzano motori con l'avvolgimento statorico eseguito in modo da realizzare, a seconda dei collegamenti sulla morsettiera, 2 oppure 4 coppie polari. Questo schema permette di ottenere un motore asincrono a due velocità. Avvolgimenti più complessi permettono di ottenere anche tre o quattro regimi di velocità.

Variatione della frequenza di alimentazione

E' possibile, pur disponendo di una rete trifase a frequenza e tensione costante, alimentare gli avvolgimenti statorici con un sistema di tensioni concatenate aventi frequenza e valore efficace variabili. Ciò viene ottenuto inserendo tra la rete a frequenza e tensione costante e lo statore del motore asincrono un opportuno dispositivo elettronico, costituito ad esempio da un raddrizzatore ad onda intera, realizzato mediante diodi, che trasforma la tensione alternata in tensione continua, e da un inverter in serie al raddrizzatore. Quest'ultimo è realizzato mediante transistori di potenza e la frequenza ed il valore efficace delle tensioni concatenate in uscita è facilmente variabile agendo sul circuito di controllo dell'angolo di innesco dei transistori. Si rimanda al capitolo sui dispositivi elettronici per una trattazione più approfondita dell'argomento. La figura 8.8 mostra la regolazione

della velocità ottenibile, con una variazione della frequenza, mantenendo inalterato il valore efficace della tensione di alimentazione.

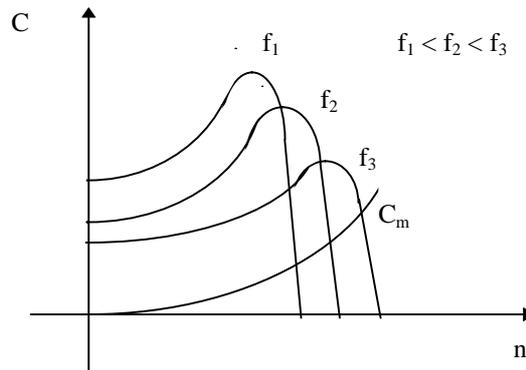


Figura 8.8 - Regolazione di velocità mediante variazione della frequenza di alimentazione

Si può notare che così facendo è possibile ottenere ampie variazioni della velocità, a scapito però della coppia massima. A tale inconveniente si può ovviare, variando contemporaneamente anche il valore efficace della tensione di alimentazione, in modo da mantenere costante il flusso per polo (vedi figura 8.9). Si ottiene così la regolazione della velocità desiderata mantenendo inalterata la coppia massima.

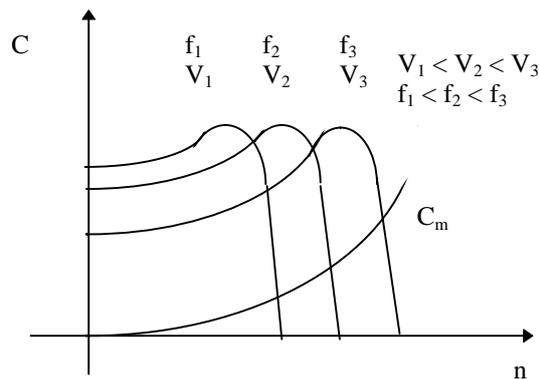


Figura 8.9 - Regolazione di velocità mediante variazione della frequenza e del valore efficace della tensione di alimentazione

9. GENERATORE ASINCRONO

Come precedentemente illustrato nel paragrafo 7, la macchina asincrona può funzionare da generatore se le si fornisce energia meccanica facendola ruotare a velocità superiore al sincronismo (scorrimento negativo). Il funzionamento da generatore della macchina asincrona presenta però alcuni aspetti che ne limitano l'impiego. Il generatore asincrono non può infatti funzionare in modo indipendente, ma deve essere collegato ad una rete, da cui deve sempre e comunque assorbire la potenza reattiva necessaria al suo funzionamento (corrente magnetizzante). Il generatore asincrono può quindi fornire alla rete solo potenza attiva per variare la quale è necessario variare la velocità di rotazione del generatore. Per questi motivi, nelle centrali per la produzione dell'energia elettrica i generatori impiegati non sono macchine asincrone bensì macchine sincrone (alternatori). I generatori asincroni trifasi sono utilizzati spesso come riserva. La macchina viene avviata come motore e funziona come tale a vuoto. Appena le esigenze di servizio lo richiedano, si passa al funzionamento da generatore.

10. MOTORE ASINCRONO MONOFASE

L'avvolgimento di statore di un motore asincrono monofase è costituito da una sola fase; il rotore ha generalmente una struttura a gabbia. Per alimentare lo statore del motore monofase è quindi sufficiente disporre di una sola tensione alternata. Come visto nel capitolo relativo al campo rotante, l'avvolgimento monofase di statore, una volta alimentato e percorso da una corrente alternata con pulsazione ω , produce al traferro un campo alternato che può essere scomposto nella somma di due campi controrotanti, il campo diretto H_d ed il campo inverso H_i , entrambi in moto con una velocità angolare $\omega_c = \omega/p$, ma in versi opposti. Si supponga che il rotore sia in rotazione con una velocità ω_m nel verso del campo diretto. Lo scorrimento della macchina assume i valori s_d ed s_i , a seconda che venga riferito al campo diretto od al campo inverso:

$$\begin{aligned} s_d &= \frac{\omega_c - \omega_m}{\omega_c} \\ s_i &= \frac{(-\omega_c) - \omega_m}{(-\omega_c)} = 2 - s_d \end{aligned} \quad (10.1)$$

Ciascuno dei due campi, se fosse l'unico presente al traferro, indurrebbe delle correnti nel rotore e quindi produrrebbe una coppia legata al valore dello scorrimento dalla relazione (4.1), in cui deve essere considerato il valore appropriato dello scorrimento. Se la macchina non è satura, vale il principio di sovrapposizione degli effetti e la coppia elettromagnetica applicata sul rotore risulta la somma algebrica delle due coppie prodotte dai due campi controrotanti separatamente. La caratteristica meccanica del motore asincrono monofase, unitamente alle caratteristiche meccaniche dovute ai campi diretto ed inverso è riportata nella figura 10.1.

Quando il rotore è fermo, la coppia diretta e la coppia inversa risultano uguali ma agiscono in direzioni opposte: la coppia di spunto risultante risulta nulla e perciò il motore non è in grado di avviarsi. Una volta in rotazione, in un verso qualunque, la coppia dovuta al campo rotante con verso concorde con quello del moto, prevale su l'altra ed il motore è in grado di mantenersi in rotazione. Il motore asincrono monofase necessita perciò di un sistema per l'avviamento; a tale riguardo si distinguono:

1. motori con avviamento a resistenza,
2. motori con avviamento a capacità,
3. motori a poli schermati.

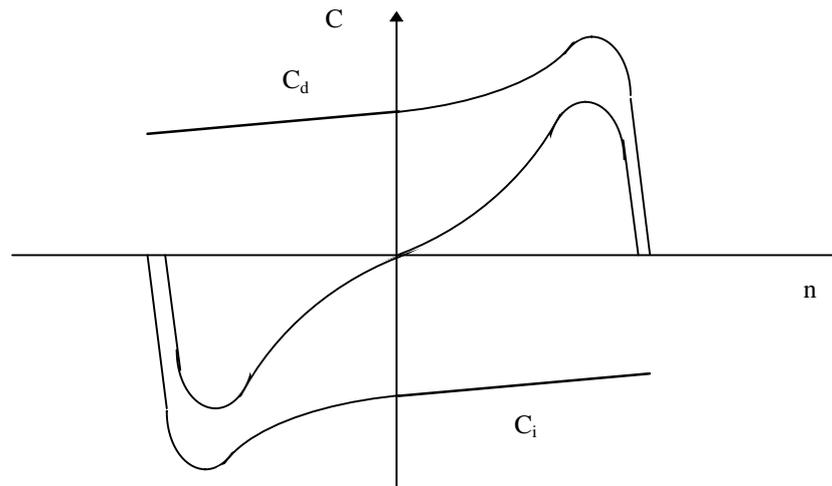


Figura 10.1 - Caratteristica meccanica del motore asincrono monofase

Nei motori con avviamento a resistenza o capacità, nelle cave di statore è alloggiato un avvolgimento ausiliario. Questi viene alimentato con la stessa tensione dell'avvolgimento principale, in parallelo con quest'ultimo, durante il transitorio di avviamento e può essere escluso o meno durante il funzionamento a regime. L'avvolgimento ausiliario è dotato di caratteristiche circuitali (resistenza e reattanza) tali da costituire, con l'avvolgimento principale, un sistema con caratteristiche simili a quelle di un sistema bifase. Tale sistema, caratterizzato da due avvolgimenti sfasati spazialmente di 90° elettrici e percorsi da correnti in quadratura, produce, come visto nel capitolo del campo rotante, un unico campo rotante ed è quindi caratterizzato da una coppia di spunto non nulla.

Motore con avviamento a resistenza

Nel motore con avviamento a resistenza, la differenza di fase tra corrente dell'avvolgimento principale e corrente dell'avvolgimento ausiliario è ottenuta mediante un elevato valore della resistenza di quest'ultimo. Ne consegue che la corrente dell'avvolgimento ausiliario risulta sfasata in ritardo rispetto a quella dell'avvolgimento principale di un angolo prossimo a 90° . Per non penalizzare eccessivamente il rendimento del motore, l'avvolgimento ausiliario deve essere escluso durante il funzionamento a regime. Ciò viene fatto mediante un interruttore centrifugo che interviene non appena la velocità raggiunge un valore sufficiente. La figura 10.2 mostra lo schema circuitale e la caratteristica meccanica del motore.

Motore con avviamento a capacità

Nel motore con avviamento a capacità (vedi figura 10.3), un condensatore di capacità adeguata viene inserito in serie all'avvolgimento ausiliario in modo da fare sì che la corrente che circola in tale avvolgimento risulti sfasata in anticipo, di un angolo prossimo a 90° , rispetto alla corrente nell'avvolgimento principale.

L'avvolgimento ausiliario può essere escluso nel funzionamento a regime mediante un interruttore centrifugo. Mediante l'impiego di un interruttore centrifugo e di due condensatori di capacità adeguata, è infine possibile ottimizzare le prestazioni del motore come mostrato nella figura 10.4.

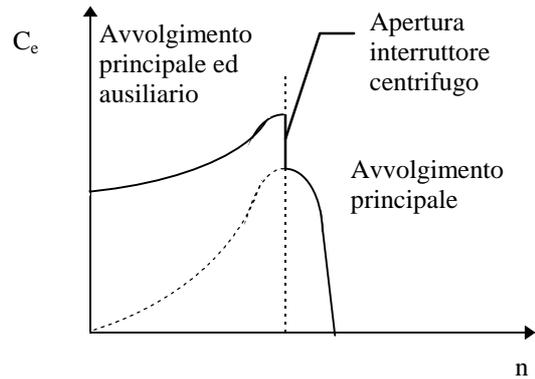
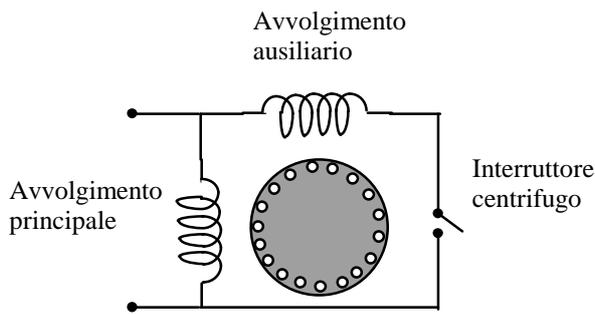


Figura 10.2 - Motore monofase con avviamento a resistenza

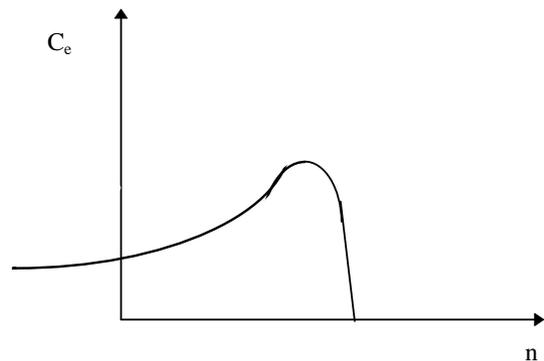
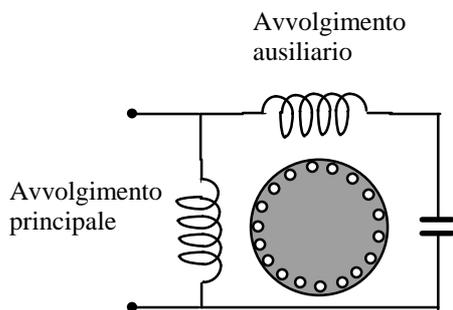


Figura 10.3 - Motore monofase con avviamento a capacità

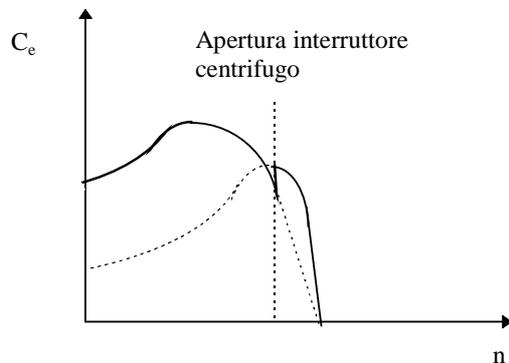
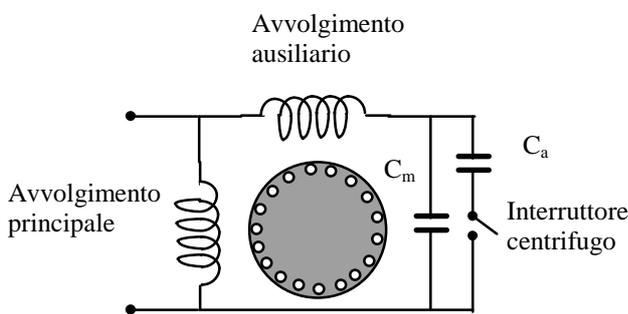


Figura 10.4

Motore monofase con avviamento a capacità: C_a capacità di avviamento, C_m capacità a regime

Motore con poli schermati

Nel motore con poli schermati, il circuito magnetico di statore presenta delle espansioni polari attorno a cui è avvolto l'avvolgimento principale (vedi figura 10.5). Nelle espansioni polari sono ricavati degli incavi in cui vengono alloggiati delle bobine di schermatura, costituite da spire di rame cortocircuitate. La corrente indotta nelle bobine di schermatura fa sì che il flusso nella porzione di polo abbracciata dalla spira sia in ritardo rispetto al flusso che interessa la rimanente parte del polo. Il campo magnetico prodotto dalla corrente alternata dell'avvolgimento principale risulta perciò un campo rotante nel verso individuato dalle bobine di schermatura (verso della freccia nella figura 10.5). La coppia di spunto del motore risulta perciò diversa da zero, anche se di piccolo valore.

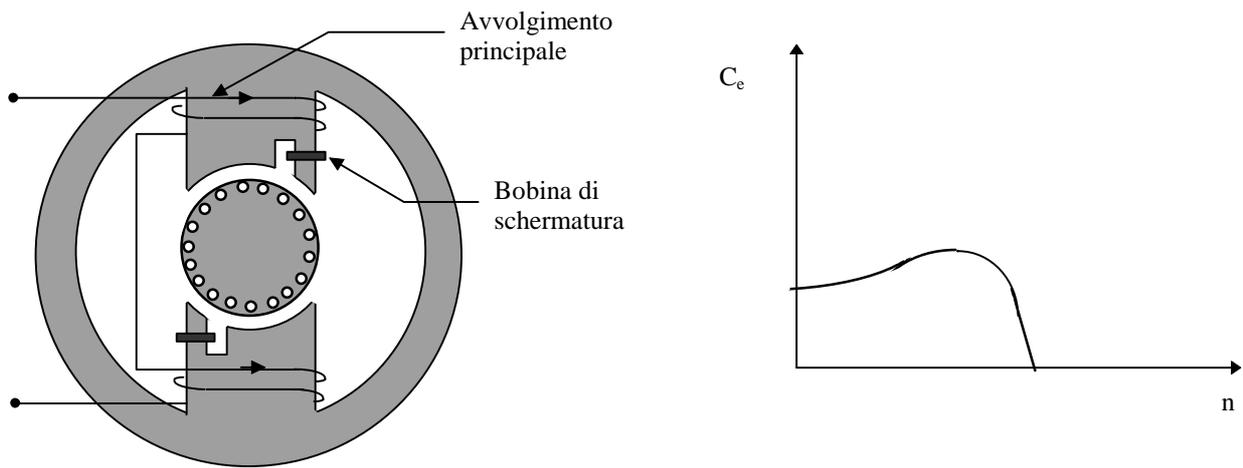


Figura 10.5 - Motore monofase con poli schermati