

MACCHINE ASINCRONE TRIFASE

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.

1. MACCHINE ASINCRONE CON ROTORE AVVOLTO

Il traferro delle macchine asincrone ha spessore costante e nelle cave di rotore e statore sono alloggiati due avvolgimenti trifase con parametri costruttivi (n , q , K_a) in genere diversi, ma col medesimo numero di poli $2p$. L'avvolgimento trifase di statore è alimentato da una linea trifase, e può essere collegato a stella (come illustrato nella figura 1.1), oppure a triangolo. Con V_1 si indica la tensione ai capi di ciascuna fase ($V_1 = V_{AO}$ in Fig. 1.1). L'avvolgimento di rotore è anch'esso a stella, ma viene chiuso in corto circuito.

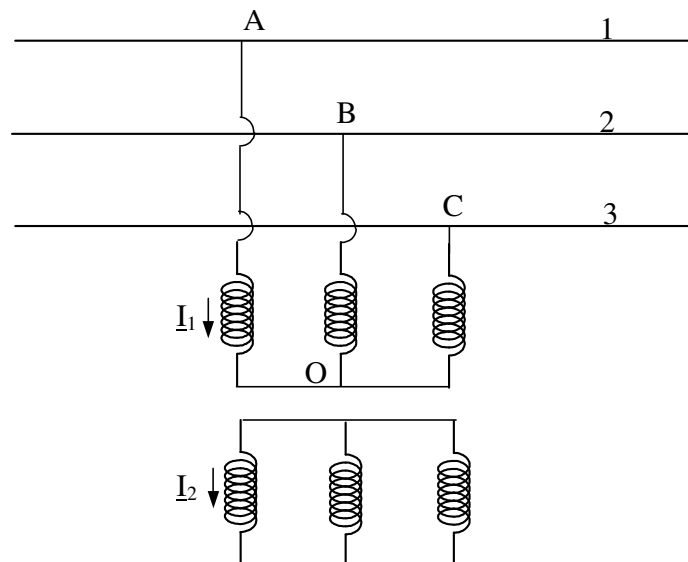


Figura 1.1 - Collegamento degli avvolgimenti di statore e di rotore di un motore asincrono

Alimentato con una terna di tensioni concatenate simmetriche di pulsazione ω , l'avvolgimento di statore, data la simmetria della macchina, 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, che 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, determina nell'avvolgimento stesso la circolazione di un sistema equilibrato di correnti. 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, di pulsazione ω' , producono al traferro un campo (campo indotto) che ruota con velocità angolare $\omega'_c = \omega'p$ rispetto al rotore come visto dalla teoria del campo rotante. La velocità di rotazione del campo indotto risulta quindi pari a $\omega_m + \omega'_c = \omega_c$ ed è quindi coincidente con la velocità angolare ω_c del campo induttore. I due campi, generati dalle correnti rotoriche e statoriche, si sommano pertanto al tra ferro generando un unico campo rotante.

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:

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

Condizioni di funzionamento di particolare rilievo

- a) $s = 1$: questa condizione equivale a $\omega_m = 0$, per cui il rotore è fermo, $\omega' = \omega$ (le correnti di rotore e di statore hanno la stessa pulsazione) e nella macchina si sviluppa una coppia diversa da zero
- b) $s = 0$: si ha $\omega_m = \omega_c$: il rotore ruota alla stessa velocità del campo di statore. Il flusso concatenato alle spire di rotore non è variabile nel tempo, pertanto non si sviluppano fem rotoriche, e, conseguentemente, correnti rotoriche e campo di rotore. La coppia risulta pertanto nulla.

2. EQUAZIONI INTERNE

Ad una generica velocità ω_m del rotore si hanno f.e.m. e correnti in statore di pulsazione ω , ma f.e.m. e correnti di rotore di pulsazione $\omega' = s\omega$. E' possibile studiare il motore asincrono avvalendosi del metodo simbolico per grandezze *isofrequenziali* solo avvalendosi del 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

elettromagnetico, alla stessa macchina 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.

Lo schema di Fig. 1.1 si può sostituire con quello di Fig. 2.1, dove le resistenze fittizie sono variabili con s . In virtù del teorema, la “reazione magnetica” del rotore è la stessa nei due casi, per cui lo statore non “avverte” alcuna differenza fra i due funzionamenti, reale e fittizio. La macchina rotante viene pertanto ricondotta ad una equivalente statica, con grandezze statoriche e rotoriche isofrequenziali di pulsazione ω .

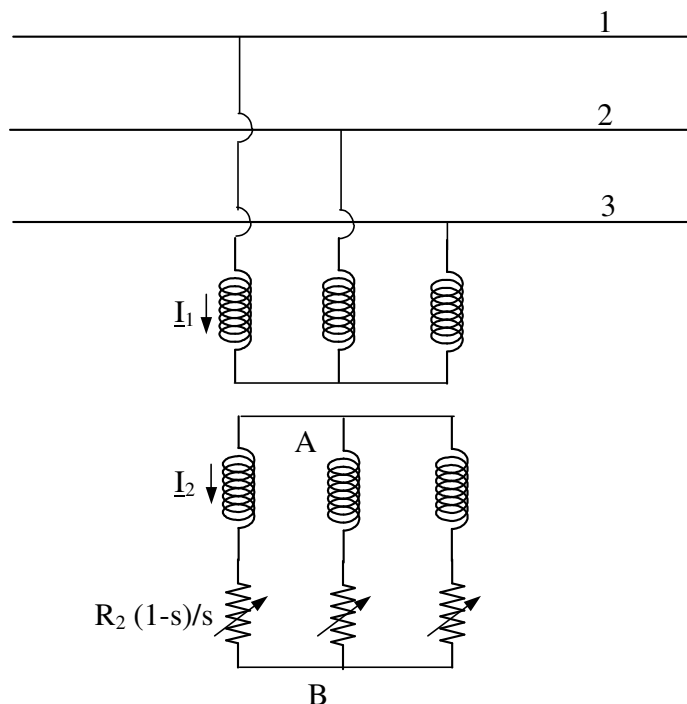


Fig. 2.1 Schema della macchina con rotore bloccato e resistenze fittizie

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:

$$P_m = 3 R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2 \quad (2.1)$$

Le linee di campo prodotte dalla corrente che circola in un generico avvolgimento possono essere raggruppate in due categorie principali (vedi figura 2.2):

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

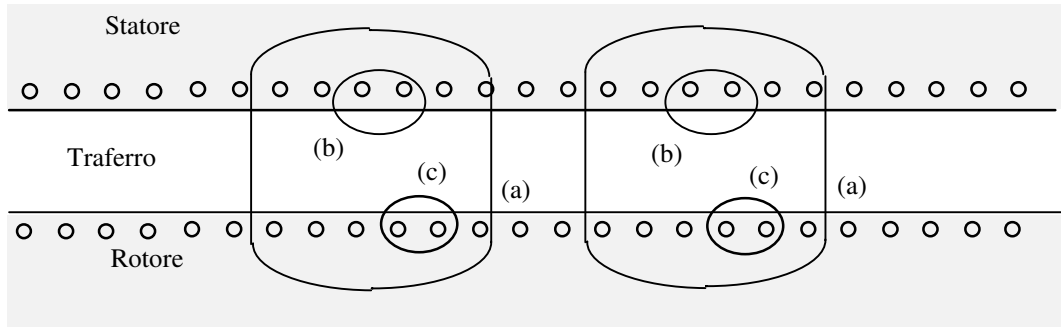


Figura 2.2 - Flusso principale (linee di campo del tipo a) e flusso disperso (linee di campo del tipo b e c)

Alle linee del primo tipo è associato il flusso principale, che si concatena con ciascuna spira dell'avvolgimento sia di statore che di rotore. Alle linee del secondo tipo sono associati i flussi dispersi che si concatenano solo con l'avvolgimento che li ha generati e che possono essere descritti mediante dei coefficienti di autoinduzione di dispersione.

Tenuto conto di questi flussi di dispersione è possibile scrivere le equazioni interne della macchina a rotore bloccato, con tutte le grandezze isofrequenziali a pulsazione ω :

$$\begin{cases} \underline{V}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j\omega \Phi_{c1} \\ 0 = R_2 \underline{I}_2 + R_2 \frac{1-s}{s} \underline{I}_2 + j\omega \Phi_{c2} \end{cases} \quad (2.2)$$

dove la tensione ai capi degli avvolgimenti di rotore è nulla essendo il rotore in cortocircuito. In tale situazione la tensione $\underline{V}_2 = \underline{V}_{AB}$ (vedi Fig. 2.1) è uguale a zero come la tensione tra centro stella dei generatori e centro stella del carico in un carico equilibrato a stella.

Potendosi pensare il rotore della macchina equivalente in posizione arbitraria, per semplicità lo si consideri posizionato con i punti centrali di fase statorica O_1 e di fase rotorica O_2 antistanti: in tal modo sono identici anche i flussi concatenati con le relative spire centrali (stesso $\underline{\Phi}$, vedi Fig. 2.3).

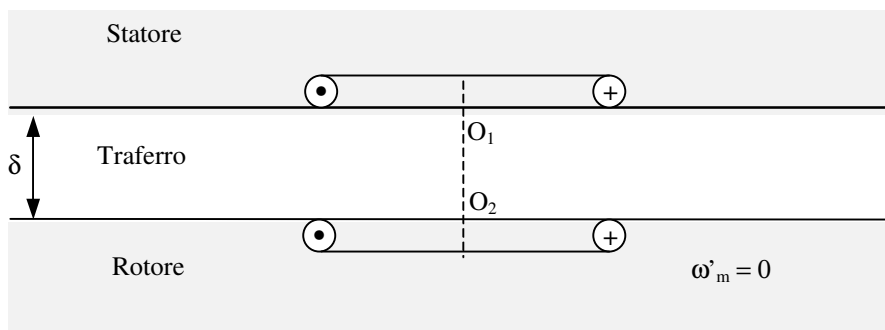


Figura 2.3 – Posizione relativa assunta per rotore e statore

Si possono pertanto riscrivere come segue le equazioni interne, considerando i due contributi del flusso disperso e di quello principale ai flussi concatenati:

$$\begin{cases} \underline{V}_1 = (R_1 + jX_{d1}) \underline{I}_1 + j\omega K_{a1} N_1 \underline{\Phi} \\ 0 = \left(\frac{R_2}{s} + jX_{d2} \right) \underline{I}_2 + j\omega K_{a2} N_2 \underline{\Phi} \end{cases} \quad (2.3)$$

dove K_{a1} e K_{a2} sono i fattori di avvolgimento di statore e di rotore, mentre K_{a1} e N_2 i numeri di spire in serie per fase di statore e di rotore.

La terza equazione interna, analogamente al caso studiato del trasformatore, è l'equazione di accoppiamento magnetico:

$$K_{a1} N_1 \underline{I}_1 + K_{a2} N_2 \underline{I}_2 = \mathcal{R} \underline{\Phi} \quad (2.4)$$

ove la riluttanza è imputabile al solo traferro, essendo per ipotesi nulla la riluttanza della parte ferromagnetica della macchina ($\mu_f = \infty$).

3. EQUAZIONI ESTERNE

Le variabili che compaiono nel sistema (2.3) e (2.4) sono $\underline{V}_1$, $\underline{I}_1$, $\underline{I}_2$, $\underline{\Phi}$, s corrispondenti a 8 variabili reali (scegliendo nulla la fase di $\underline{V}_1$), a fronte di sei equazioni reali. Per chiudere il sistema occorre scrivere le equazioni di collegamento con l'esterno:

$$\begin{cases} V_1 = V_{10} \\ C_{em} = C_r \end{cases} \quad (3.1)$$

ove la prima equazione definisce il valore efficace della tensione di fase statorica in base al valore fissato dalla linea trifase V_{10} (con $V_{10} = V$ se le fasi statoriche sono collegate a triangolo o ad E = $V/\sqrt{3}$ se esse sono collegate a stella), e la seconda corrisponde all'equilibrio dinamico raggiunto a regime, in cui la coppia elettromagnetica prodotta dalla macchina eguaglia quella resistente dovuta al carico ad essa applicato. Al fine di risolvere il sistema di equazioni interne ed esterne della macchina, deve essere noto l'andamento della coppia resistente applicata alla macchina in funzione dello scorrimento, ovvero della velocità angolare meccanica della macchina.

4. 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. Con posizioni analoghe a quelle fatte per i trasformatori, si può dimostrare che le equazioni interne della macchina asincrona corrispondono alle equazioni di Kirchhoff per il circuito mostrato in Fig. 4.1, che rappresenta il circuito equivalente della macchina asincrona.

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 .

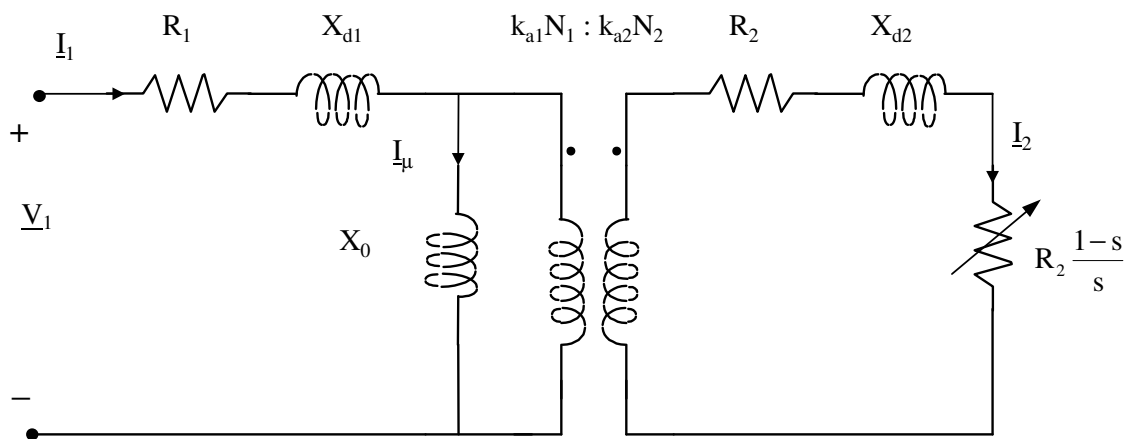


Figura 4.1 - Circuito elettrico equivalente per una fase della macchina asincrona (trascurando le perdite nel ferro)

E' spesso conveniente riferire tutte le grandezze di rotore a statore, secondo le trasformazioni (4.1) e considerare il circuito elettrico equivalente riferito ad una fase di statore mostrato nella figura (4.2).

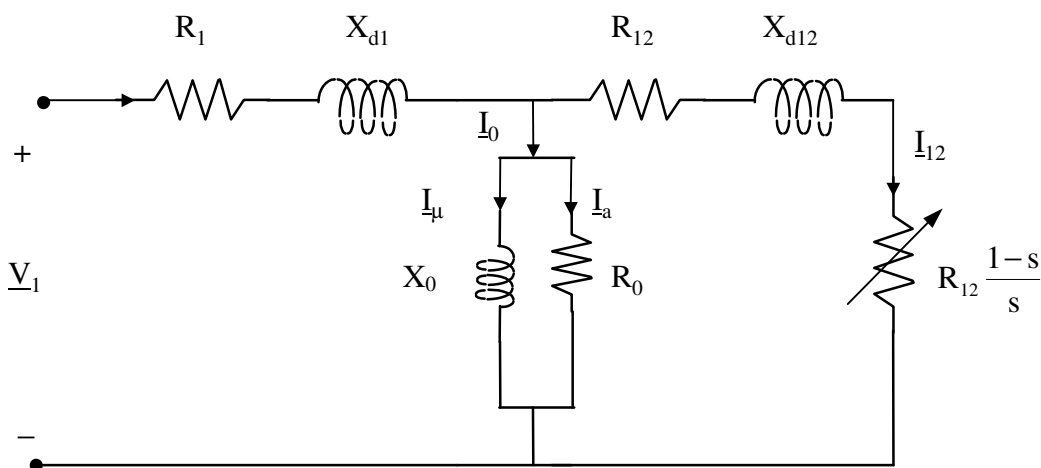


Figura 4.2 - Circuito elettrico equivalente della macchina asincrona riferito ad una fase di statore

$$\begin{aligned}
 I_{12} &= I_2 \frac{k_{a2} N_2}{k_{a1} N_1} && \text{corrente della fase di rotore ridotta a statore} \\
 R_{12} &= R_2 \left(\frac{k_{a1} N_1}{k_{a2} N_2} \right)^2 && \text{resistenza della fase di rotore ridotta a statore} \\
 X_{d12} &= X_{d2} \left(\frac{k_{a1} N_1}{k_{a2} N_2} \right)^2 && \text{reattanza di dispersione della fase di rotore ridotta a statore}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Come precedentemente detto, il circuito equivalente per fase della macchina asincrona (figura 4.2) 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, il valore di $X_0 = \omega \frac{n_1^2}{\mathcal{R}}$ (vedi la (6.2) del capitolo sui trasformatori) risulta limitato, e pertanto la corrente magnetizzante risulta considerevolmente più elevata. In pratica, si ha

$I_\mu \approx (20 \div 30) \% \text{ di } I_n$. L'ipotesi di Kapp non vale, e non è quindi più accettabile 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. Il significato dei componenti del circuito equivalente di Fig. 4.1 da un punto di vista energetico è descritto nel seguito. Le reattanze di dispersione tengono conto dell'energia associata ai campi dispersi, la reattanza magnetizzante rappresenta nel circuito equivalente l'energia associata al campo principale, le resistenze R_1 ed R_2 assorbono una potenza attiva pari alla potenza che si dissipa per effetto Joule negli avvolgimenti di statore e rotore. Le resistenze fittizie assorbono una potenza attiva che nel circuito equivalente rappresenta la potenza ceduta all'albero dalla macchina asincrona, da cui la espressione della potenza meccanica (2.1) anticipata nella sezione 2.

5. CURVE CARATTERISTICHE DELLA MACCHINA ASINCRONA

Caratteristica meccanica

L'espressione della coppia di origine elettromagnetica che agisce sugli avvolgimenti del rotore di una macchina asincrona può essere ricavata dalla (2.1) 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:

$$C_e = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{3R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2}{\omega_c (1-s)} = 3 \frac{p}{\omega} \frac{s R_2 E_2^2}{R_2^2 + s^2 X_{d2}^2} \quad (5.1)$$

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

Dalla equazione (5.1) si desume l'andamento della coppia della macchina asincrona in funzione dello scorrimento, a tensione costante. Tale curva prende il nome di *caratteristica meccanica*. Il suo andamento, antisimmetrico rispetto all'origine, poiché $C_e(-s) = -C_e(s)$ presenta le seguenti proprietà.

- per $s \rightarrow 0$: $C_e(s)$ è praticamente lineare
- per s sufficientemente elevato: $C_e(s)$ è praticamente iperbolico
- C_e raggiunge il massimo C_M per $s = s_M$; imponendo $dC_e/ds = 0$ si ha $s_M = \frac{R_2}{X_{d2}}$
- $C_M = 3 \frac{p}{\omega} \frac{E_2^2}{2X_{d2}}$ (indipendente da R_2)
- per $s = 1$ si ha la *coppia di spunto* C_s quasi proporzionale ad R_2 , essendo di norma $R_2 < X_{d2}$,

$$C_s = 3 \frac{p}{\omega} \frac{R_2 E_2^2}{R_2^2 + X_{d2}^2} \cong 3 \frac{p}{\omega} \frac{R_2 E_2^2}{X_{d2}^2} ; C_s \text{ è di norma relativamente bassa rispetto alla coppia}$$

massima tenuto conto che $R_2 < X_{d2}$
- per $s = 0$ la coppia si annulla (come discusso nella sezione 1)

La caratteristica meccanica di una macchina asincrona è rappresentata nella figura 5.1. e 5.2 in funzione dello scorrimento e del numero di giri. La prima curva è direttamente ottenibile dalla (5.1), mentre la seconda si ottiene per traslazione ed inversione della prima tenuto conto che valgono le relazioni: $\omega_m = (1-s)\omega_c$ e $n = \frac{\omega_m}{2\pi} 60 = \frac{60}{2\pi} (1-s)\omega_c$ dove n è il numero di giri al minuto.

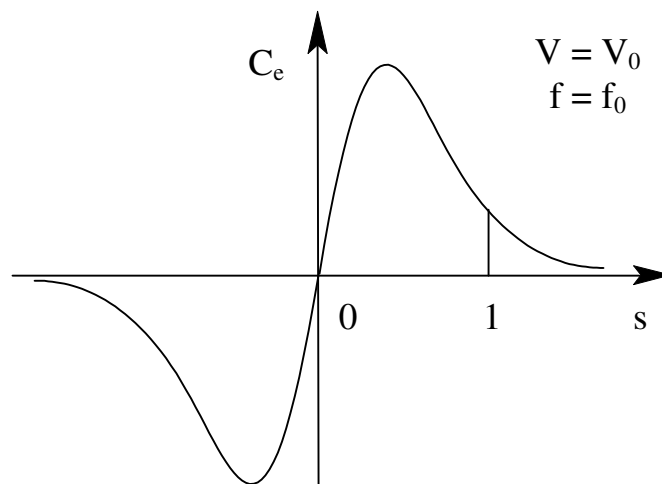


Figura 5.1 - Caratteristica meccanica di una macchina asincrona in funzione dello scorrimento

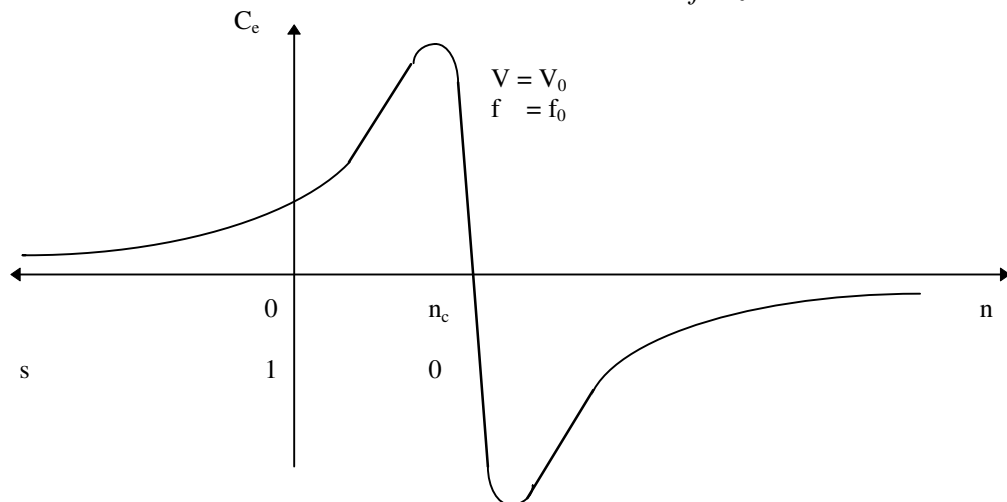


Figura 5.2 - Caratteristica meccanica di una macchina asincrona in funzione del numero di giri.

In Fig. 5.2 in ascisse è riportata la velocità angolare del rotore n ed in ordinate è riportata la coppia elettromagnetica; la curva si riferisce ad un valore della frequenza e della tensione di alimentazione statorica. La velocità angolare del campo rotante n_c , in numero di giri al minuto è data dalla seguente relazione:

$$n_c = \frac{60 \varpi_c}{2\pi} = \frac{60f}{p} \quad (6.1)$$

dato che vale la (1.1).

Caratteristica elettromeccanica

La *caratteristica elettromeccanica* di statore e di rotore, rappresenta l'andamento delle correnti assorbite dal motore (statoriche e rotoriche) al variare dello scorrimento (ovvero del numero di giri

del motore). Tale caratteristica è ricavabile calcolando il valore efficace di I_2 dalla equazione di rotore (seconda delle 2.3):

$$I_2 = \frac{\varpi K_{a2} N_2 \Phi}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{d2}^2}} = \frac{|s| E_2}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_{d2}^2}} \quad (6.2)$$

dove si è indicato con E_2 il valore efficace della fem indotta nella fase di rotore $E_2 = \varpi K_{a2} N_2 \Phi$.

L'andamento della funzione (6.2) è riportato in Fig. 5.3, sia in dipendenza dello scorrimento, sia del numero di giri (facilmente ottenibile dal primo come nel caso della caratteristica meccanica).

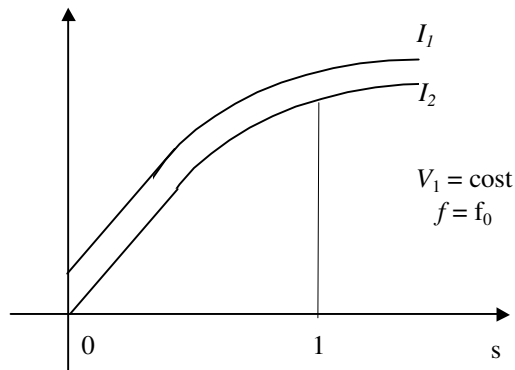


Figura 5.3.a - Caratteristica elettromeccanica di rotore in funzione dello scorrimento.

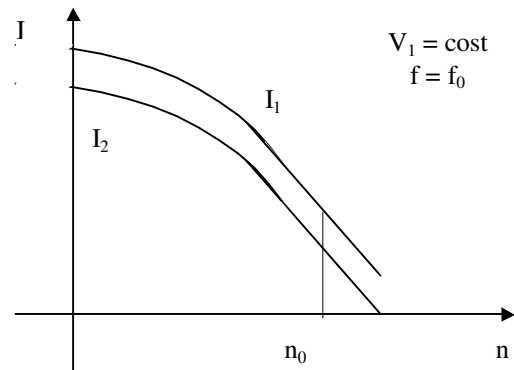


Figura 5.3.b - Caratteristica elettromeccanica di statore e di rotore in funzione del numero di giri.

La corrente allo spunto può risultare anche cinque volte maggiore della corrente a regime. Questo costituisce un considerevole problema all'avviamento della macchina. In particolare, occorre che le protezioni dalle sovracorrenti siano predisposte in modo tale da non intervenire interrompendo il circuito di alimentazione della macchina per correnti che superano la corrente di normale funzionamento durante l'avviamento, in quanto questo comportamento rappresenta una condizione di normale funzionamento.

6. FUNZIONAMENTO DA MOTORE, GENERATORE E FRENO

Il principale impiego delle macchine asincrone è da motore. In tale regime di funzionamento la macchina assorbe potenza elettrica dalla rete P_e e la cede, a meno delle perdite, all'utilizzatore U come potenza meccanica P_m . Assunti positivi i flussi di potenze come indicato nello schema 6.3, si può analizzare il segno delle potenze al variare di s :

- Per P_m vale la (2.1), da cui consegue: $P_m > 0$ per $0 < s < 1$
 $P_m < 0$ per $s < 0$ e per $s > 1$
- Per P_e , occorre considerare la potenza attiva assorbita dalla rete equivalente di ciascuna fase e moltiplicarla per 3: $P_e = 3 \left(R_1 I_1^2 + \frac{R_2}{s} I_2^2 \right) \cong 3 \frac{R_2}{s} I_2^2$, dove si è trascurata la potenza dissipata sulla resistenza rotorica. Si ha che: $P_e > 0$ per $s > 0$ e $P_e < 0$ per $s < 0$.

Si possono pertanto evidenziare tre intervalli rilevanti dello scorrimento s , cui corrispondono diversi tipi di funzionamento:

- a) Da motore, con $P_e > 0$ e $P_m > 0$, per $0 < s < 1$.

Dalla (1.2) si ricava che $\omega_m = (1-s)\omega_c$, pertanto si ha che $\omega_c > \omega_m > 0$. Il rotore ruota nello stesso verso del campo, ma con velocità minore. Dalla Fig. 5.1, $C_e > 0$.

- b) Da *generatore*, con $P_e < 0$ e $P_m < 0$ (flussi opposti a quelli di Fig. 6.1), per $s < 0$. La macchina assorbe potenza meccanica dall'albero e cede potenza elettrica alla rete. In tal caso si ha $\omega_m > \omega_c > 0$: il rotore ruota nello stesso verso del campo, ma con velocità maggiore (si parla di "ipersincronismo"). Dalla Fig. 5.1 si deduce $C_e < 0$: la coppia elettromagnetica è resistente, ovvero si oppone al moto del rotore imposto dalla macchina coassiale, che si comporta da motore primo.
- c) Da *freno*, con $P_e > 0$ e $P_m < 0$, per $s > 1$. La macchina assorbe potenza P_e dalla rete e potenza P_m dall'albero dissipando entrambe al suo interno. In tal caso si ha $\omega_m < 0$, il rotore ruota in verso opposto al campo rotante; inoltre, come evidenziato nella Fig. 5.1, $C_e > 0$. La coppia elettromagnetica si oppone al moto retrogrado del rotore, risultando in tal modo frenante.

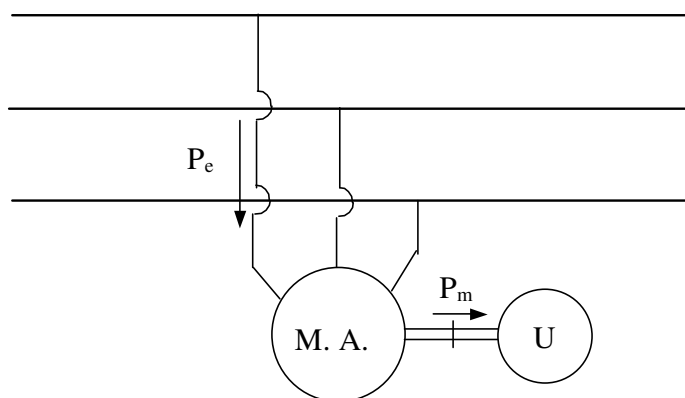


Fig. 6.1 Schema dei flussi di energia elettrica dalla rete alla macchina asincrona e di potenza meccanica dalla macchina asincrona all'utilizzatore meccanico.

7 MOTORE ASINCRONO

Stabilità del funzionamento a regime

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, 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 ai valori V_0 ed f_0 rispettivamente della tensione e frequenza di alimentazione, in cui la coppia elettromagnetica (C_e) eguaglia quella resistente C_m , comprensiva degli attriti interni della macchina.

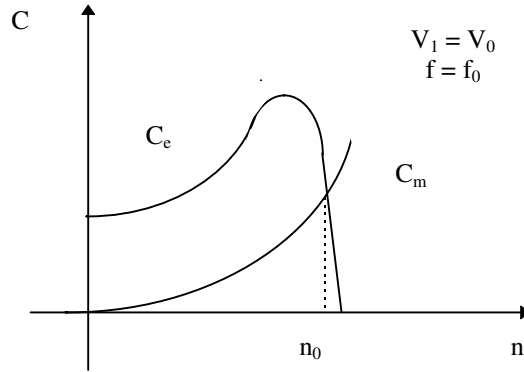


Figura 7.1 - Caratteristica meccanica del motore asincrono

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 una 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 segue la espressione del rendimento η di un motore asincrono trifase:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} = \frac{R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2}{R_1 I_1^2 + R_0 I_a^2 + R_2 I_2^2 + R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2} \quad (7.1)$$

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:

$$\eta = \eta_s \eta_r \quad \left\{ \begin{array}{l} \eta_s = \frac{R_2 I_2^2 + R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2}{R_1 I_1^2 + R_0 I_a^2 + R_2 I_2^2 + R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2} \\ \eta_r = \frac{R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2}{R_2 I_2^2 + R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2} = 1-s \end{array} \right. \quad (7.2)$$

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 di qualche percento).

Come anticipato nella sezione 6, la caratteristica meccanica del motore asincrono presenta una coppia di spunto C_s sensibilmente minore della coppia massima C_M .

Questa caratteristica può determinare problemi di avviamento nel caso di una coppia resistente pressoché 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 7.2.

In questo caso, il motore asincrono, pur essendo in grado di mantenersi in rotazione alla velocità n_0 non parte in quanto la sua coppia di spunto è troppo bassa (si noti che delle due possibili condizioni

di funzionamento corrispondenti alla uguaglianza della coppia motrice con quella resistente, solo quella indicata nella figura risulta essere stabile).

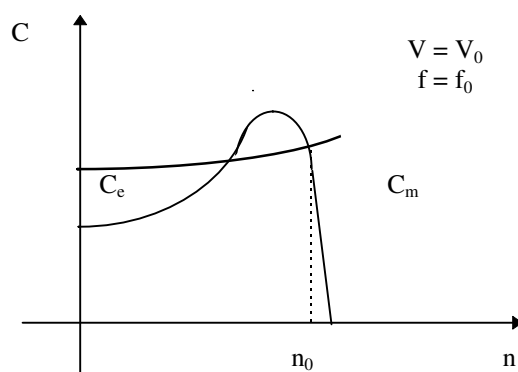


Figura 7.2

Come visto nella sezione relativa alla caratteristica elettromeccanica della macchina, 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. 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 7.3), l'avvolgimento rotorico ad un reostato di avviamento, in tal modo aumentando la resistenza rotorica. A tal fine 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**. Raggiunto il regime di funzionamento richiesto il reostato viene escluso e sostituito dalle connessioni di cortocircuito.

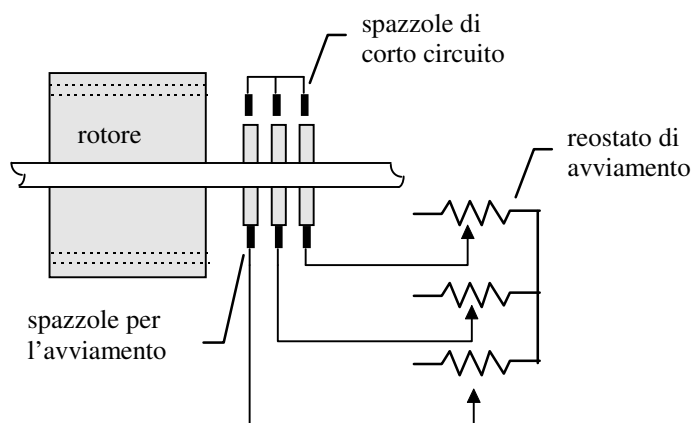


Figura 7.3 - Sezione longitudinale di un rotore avvolto

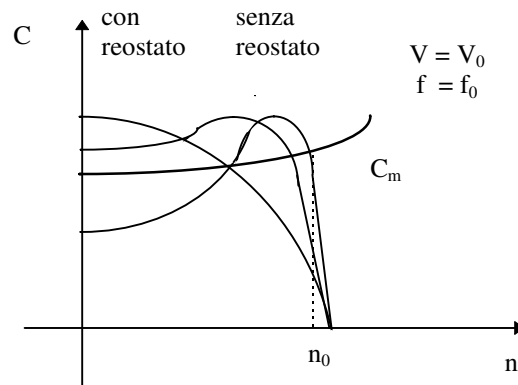


Figura 7.4 - Avviamento mediante inserzione del reostato di avviamento

8 MACCHINE ASINCRONE CON ROTORE A GABBIA

Una soluzione costruttiva con rotor più semplici e robusti di quelli di tipo avvolto, assai diffusa per motori asincroni di piccola e media potenza, è quella a *gabbia di scoiattolo*, dove un insieme di sbarre conduttrici sostituisce nelle cave gli avvolgimenti tradizionali. Le sbarre sono collegate tra loro da anelli frontali ai due lati opposti del nucleo ferromagnetico di rotore.

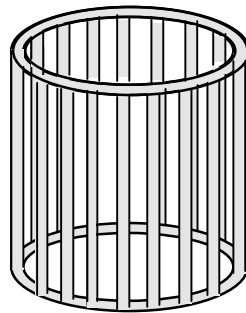


Figura 8.1 - Gabbia semplice per rotore di macchina asincrona

Con un numero di sbarre sufficientemente elevato, il rotore si comporta analogamente ad un rotore avvolto, reagendo magneticamente con un campo rotante al campo rotante di statore. Si dimostra che tale campo rotante presenta lo stesso numero di poli del campo di statore. La sezione delle sbarre viene scelta come soluzione di compromesso fra l'esigenza di avere resistenze elevate (per mantenere una buona coppia di spunto, e quella di avere resistenze basse al fine di ridurre le perdite per effetto Joule). Tale inconveniente viene automaticamente superato nei *rotori doppia gabbia*. In tali motori sono presenti due gabbie a raggi diversi e con caratteristiche complementari, evidenziate in fig. 8.2. Si può osservare una generica cava contenente una sbarra "esterna" ed una "interna":

- Per le diverse sezioni delle sbarre vale $R_e \gg R_i$
 - Per la diversa collocazione rispetto al traferro vale: $X_{di} \gg X_{de}$
- R: resistenze
 X_d : reattanze di dispersione

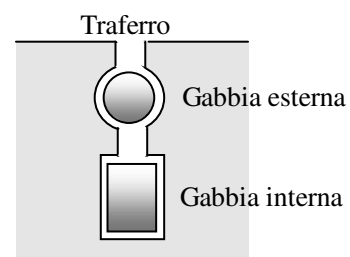


Fig. 8.2 Macchina asincrona a doppia gabbia

Ad un generico scorrimento s , le due impedenze di sbarra valgono:
 $\underline{Z}_e = R_e + j X_{de}$ $\underline{Z}_i = R_i + j X_{di}$. Si ricordi che ω rappresenta la effettiva pulsazione di tensioni e correnti rotoriche.

- Allo spunto, quando la frequenza delle correnti rotoriche coincide con quella dell'alimentazione di statore ($s = 1$), la reattanza di dispersione della gabbia interna è molto maggiore di quella della gabbia esterna. Poiché all'avviamento prevalgono i termini reattivi su quelli resistivi si ha: $\underline{Z}_e \ll \underline{Z}_i \Rightarrow I_e \gg I_i$ e la corrente circola prevalentemente nella gabbia esterna. Essendo questa dotata di elevata resistenza si ottiene una accettabile coppia di spunto.

Man mano che il motore accelera, la frequenza di rotore si riduce e con essa la reattanza di dispersione. Nelle determinazione dell'impedenza delle due gabbie viene gradualmente a prevalere la resistenza.

- A regime, con $s \rightarrow 0$, si ha pertanto $\underline{Z}_e \gg \underline{Z}_i \Rightarrow I_e \ll I_i$. La corrente circola prevalentemente nella gabbia interna, che consente basse perdite a regime essendo caratterizzata da bassa resistenza.

Si realizza in questo modo un graduale trasferimento di corrente dalla gabbia esterna a quella interna passando dallo spunto al funzionamento a regime.

Un altro modo per ridurre le correnti allo spunto 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% della velocità corrispondente al sincronismo, 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 morsetti, 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.

9 MOTORE ASINCRONO MONOFASE

Il motore asincrono monofase è largamente utilizzato nelle applicazioni di piccola potenza, in particolare per gli elettrodomestici. Lo statore è dotato di un solo avvolgimento, che viene collegato ai due capi al filo di fase e al filo di neutro. Come visto nella teoria relativa al campo rotante un solo avvolgimento produce un campo di induzione magnetica stazionario al tra ferro, scomponibile in due campi controrotanti. A tali campi il rotore a gabbia reagisce con due campi controrotanti di ugual numero di poli. Alla coppia dovuta ai campi diretti (C_d) si contrappone una analoga coppia dovuta ai campi inversi (C_i); la coppia risultante è data dalla sovrapposizione delle due: $C_{ris} = C_d - C_i$.

Oltre allo scorrimento del rotore relativo al campo diretto s , occorre definire lo scorrimento relativo al campo inverso:

$$s' = \frac{-\omega_c - \omega_m}{-\omega_c} = \frac{\omega_c + \omega_m}{\omega_c} \quad (9.1)$$

Tenuto conto che vale $\omega_m = (1-s)\omega_c = (s'-1)\omega_c$ si ottiene: $s' = 2 - s$.

L'andamento delle coppie generate dal campo diretto ed inverso sono riprodotti in Fig. 9.1

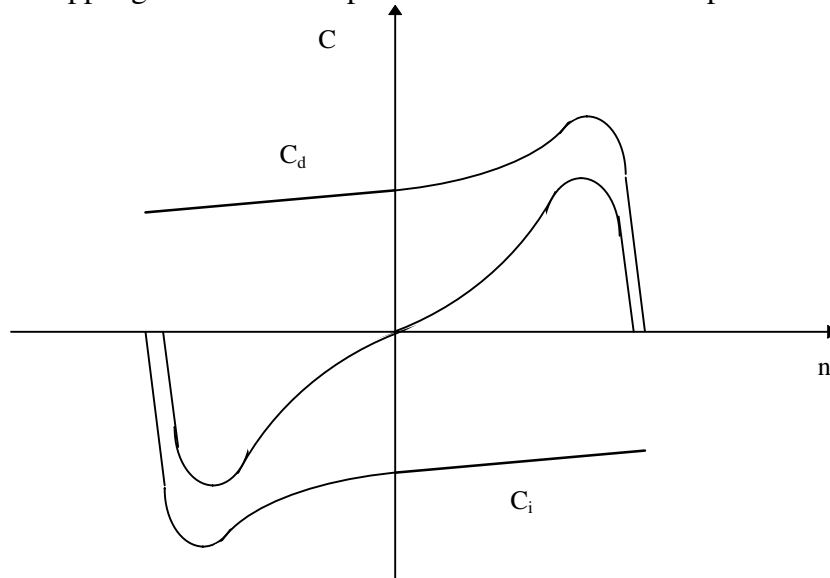


Figura 9.1 - Caratteristica meccanica del motore asincrono monofase.

Essendo i due campi controrotanti uguali in ampiezza, allo spunto si ha $C_{ris} = 0$, e pertanto il motore non può avviarsi. Una volta in rotazione, in un verso qualunque, la coppia dovuta al campo rotante con verso concorde con quello del moto, prevale sull'altra ed il motore è in grado di mantenersi in rotazione. Il motore necessita pertanto di un sistema di avviamento, tale da rendere $C_s \neq 0$ facendo prevalere il campo diretto su quello inverso. Fra gli accorgimenti utilizzati, si può dotare lo statore di un secondo avvolgimento ausiliario, sfasato spazialmente di 90° elettrici rispetto all'avvolgimento principale e percorso da corrente in quadratura:

$$\begin{cases} H_p(x, t) = H_M \cos(\omega t) \cos\left(\frac{\pi x}{\tau}\right) = \frac{1}{2} H_M \cos\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) + \frac{1}{2} H_M \cos\left(\omega t + \frac{\pi x}{\tau}\right) \\ H_a(x, t) = H_M \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi x}{\tau} + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2} H_M \cos\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) + \frac{1}{2} H_M \cos\left(\omega t + \frac{\pi x}{\tau} + \pi\right) \end{cases} \quad (9.2)$$

In questo caso, ideale poiché le correnti hanno identica intensità nei due avvolgimenti, il campo risultante è un solo campo diretto, eliminandosi perfettamente i due campi inversi:

$$\left\{ H(x, t) = H_p(x, t) + H_a(x, t) = H_M \cos\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) \right. \quad (9.3)$$

In pratica è sufficiente una attenuazione del campo inverso per rendere allo spunto $C_d > C_i$, e pertanto per avere $C_s \neq 0$ consentendo l'avviamento del motore. Al fine di sfasare le correnti dell'avvolgimento principale ed ausiliario, è possibile collegare l'avvolgimento ausiliario in serie ad un condensatore di opportuna capacità, come mostrato in Fig. 9.2.

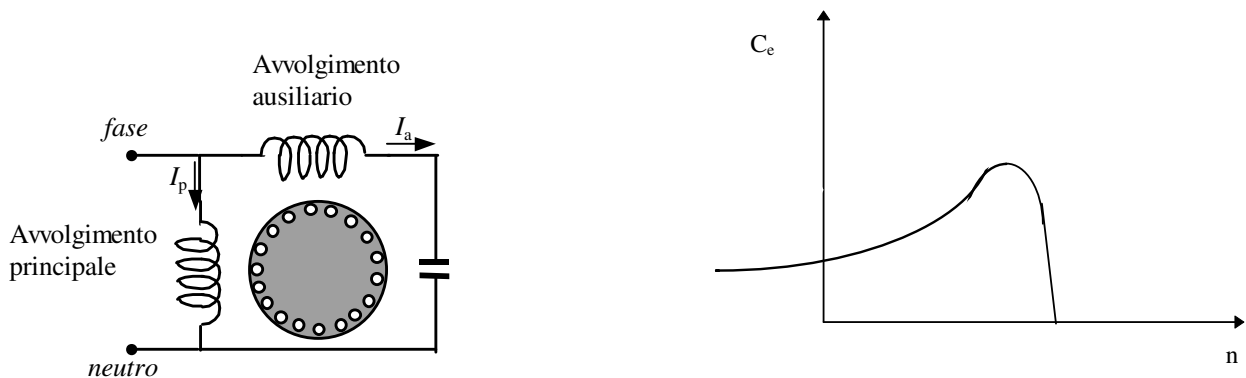


Figura 9.2 - Motore monofase con avviamento a capacità.