

L'effetto di questa differenza di comportamento tra i due dispositivi è che l'azione elettrodinamica esplicata sull'avvolgimento rotorico si estrinseca in una coppia che tende a trascinare il rotore alla velocità di sincronismo; nel caso del trasformatore invece le azioni elettrodinamiche non provocano spostamenti in quanto gli avvolgimenti non sono liberi di muoversi. L'entità della coppia dipende da vari fattori; in particolare essa è funzione della velocità del rotore. L'andamento della coppia in funzione di tale velocità costituisce la caratteristica meccanica del motore; la conoscenza di tale caratteristica è fondamentale per valutare il comportamento della macchina. Nel seguito considereremo in dettaglio il modo per ricavare questa caratteristica e per poterla variare in accordo alle esigenze di esercizio.

10.2 Campo magnetico rotante

Nell'intervallo d'aria tra statore e rotore (traferro) si esercitano le azioni elettrodinamiche che determinano il movimento del motore. È essenziale alla generazione di tale movimento l'esistenza nel traferro del campo magnetico rotante, cioè di un campo magnetico che si muova lungo il traferro stesso. Tale campo viene generato dalla particolare disposizione degli avvolgimenti dello statore e dalla particolare alimentazione di questi. Per comprendere il meccanismo da cui deriva la presenza del campo rotante a partire da avvolgimenti fissi, facciamo riferimento ad uno solo dei tre avvolgimenti dello statore e supponiamo di alimentarlo con una tensione costante nel tempo. Per effetto di questa eccitazione si ha nel traferro un andamento dell'induzione, che può rappresentarsi come una funzione dell'angolo σ con cui si individua il generico punto del traferro (fig. 10.1). Tale funzione $B(\sigma)$ è evidentemente periodica, in quanto il traferro ha una lunghezza finita e percorrendolo successivamente si ritrova la stessa induzione. Tuttavia, è possibile fare in modo che il periodo di tale andamento sia più corto della lunghezza del traferro; per fare ciò è sufficiente realizzare gli avvolgimenti in forma opportuna. In questo caso, usuale in pratica, l'induzione si ripete dopo un periodo λ , detto "passo polare"; è evidente che la lunghezza del traferro è uguale ad un numero intero di passi polari, cioè

$$P \lambda = 2\pi r \quad (10.1)$$

ziale alla trattazione successiva, che riguarda l'individuazione dell'induzione risultante dall'effetto dei tre avvolgimenti che costituiscono l'avvolgimento statorico trifase. Infatti solo in questo caso si può applicare il principio di sovrapposizione degli effetti. Tale principio è applicabile in modo estremamente semplice se: 1) ci riferiamo al caso di un avvolgimento equilibrato, cioè costituito da tre avvolgimenti identici e spostati lungo il traferro di $1/3$ del passo polare; 2) il circuito magnetico è equilibrato, cioè è identico per le tre fasi; 3) l'eccitazione è costituita da un sistema trifase simmetrico diretto.

Le ipotesi semplificative precedenti valgono in prima approssimazione. Il discostamento da esse viene tuttavia analizzato facilmente facendo riferimento alle armoniche di Fourier nel tempo e nello spazio dell'induzione. Poiché tale argomento non è essenziale alla comprensione del funzionamento della macchina, esso non verrà trattato di seguito.

Nell'ambito delle ipotesi precedenti l'induzione dovuta ai tre avvolgimenti è

$$\begin{aligned} B_1 &= B_M \cos(\omega t) \cos(P\sigma) \\ B_2 &= B_M \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \cos(P\sigma - \frac{2\pi}{3}) \\ B_3 &= B_M \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \cos(P\sigma - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (10.5)$$

e quindi l'induzione complessiva dovuta all'avvolgimento statorico è data da

$$\begin{aligned} B_t &= B_1 + B_2 + B_3 = \frac{1}{2} B_M \{ \cos(\omega t + P\sigma) + \cos(\omega t - P\sigma) \} + \\ &\quad \frac{1}{2} B_M \{ \cos(\omega t + P\sigma - \frac{4\pi}{3}) + \cos(\omega t - P\sigma) \} + \frac{1}{2} B_M \{ \cos(\omega t + P\sigma - \frac{2\pi}{3}) + \\ &\quad \cos(\omega t - P\sigma) \} = \frac{3}{2} B_M \cos(\omega t - P\sigma) \end{aligned} \quad (10.6)$$

Dalla (10.6) vediamo che l'avvolgimento fisso statorico genera un'induzione nel traferro avente un andamento sinusoidale fisso rispetto ad un riferimento che ruota ad una velocità angolare costante uguale a

$$\omega_c = \frac{\omega}{P} \quad (10.7)$$

$$\omega_z = |\omega_c - \omega_m| P \quad (10.10)$$

In effetti, come vedremo successivamente, nel caso del motore ω_m è sempre inferiore ad ω_c , per cui più semplicemente la (10.10) si può scrivere come

$$\omega_z = (\omega_c - \omega_m) P \quad (10.11)$$

Nell'esprimere la pulsazione ω_z od in generale nel descrivere il movimento della macchina, si preferisce usare al posto di ω_m una grandezza che misura il discostamento di ω_m da ω_c , cioè

$$s = 1 - \frac{\omega_m}{\omega_c} \quad (10.12)$$

Tale grandezza prende il nome di "scorrimento" e la sua introduzione risulterà più chiara di seguito, in quanto è legata al fatto che il motore funziona con velocità di rotazione molto vicina ad ω_c .

In funzione dello scorrimento risulta

$$\omega_m = \omega_c (1 - s) \quad (10.13)$$

$$\omega_z = s \omega \quad (10.14)$$

Nel caso più generale in cui il rotore si muove e l'avvolgimento rotorico è chiuso, occorre considerare accanto all'induzione dovuta all'avvolgimento statorico quella dovuta all'avvolgimento rotorico. E' facile intuire, però, che l'andamento complessivo dell'induzione risulta poco alterata rispetto a quella vista in precedenza, in quanto dal punto di vista dell'avvolgimento statorico è cambiata solo la corrente da esso erogata. Come in un trasformatore trifase il flusso d'induzione principale è poco variabile con il carico, essendo l'alimentazione del primario costante. Inoltre la componente dell'induzione nel traferro dovuta all'avvolgimento rotorico deve necessariamente ruotare alla velocità ω_c , poiché solo in questo caso essa provoca tensioni indotte nell'avvolgimento statorico della stessa pulsazione ω di quelle circolanti in tale av

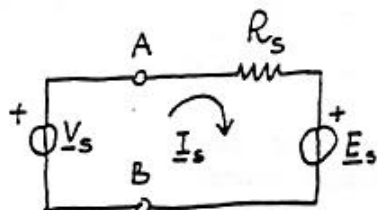


Fig.11.1

Circuito elettrico di una fase dell'avvolgimento statorico. I fasori si riferiscono alla pulsazione ω .

Il circuito elettrico del rotore è mostrato in fig.11.2. In esso: la quantità \bar{E}_r indica la tensione indotta su tale circuito per effetto del campo rotante, \bar{I}_r indica la corrente che vi scorre, R_r la resistenza dell'avvolgimento rotorico e \bar{Z}_c un'impedenza di carico esterna, corrispondente al bipolo collegato agli anelli del collettore (indicati con C e D in fig.11.2). Per quanto è stato detto nel paragrafo precedente, essendo il rotore in moto, la pulsazione delle grandezze elettriche nel rotore è pari ad ω_r ; quindi in regime permanente sinusoidale i fasori delle grandezze indicate devono essere considerati a pulsazione ω_r . Per distinguere i fasori relativi a tale pulsazione da quelli relativi ad ω , poniamo su di essi una barra al di sopra invece che al di sotto.

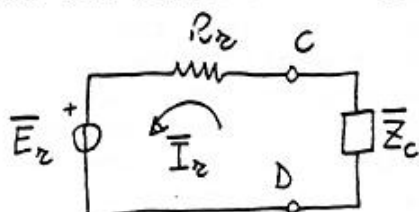
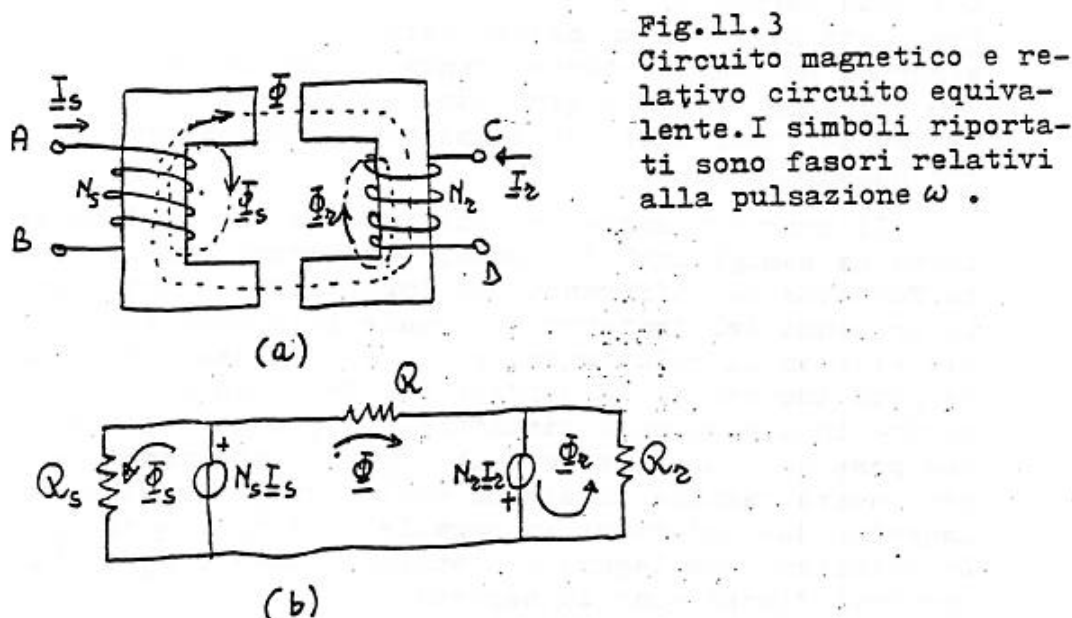


Fig.11.2

Circuito elettrico di una fase dell'avvolgimento rotorico. I fasori si riferiscono alla pulsazione ω_r .

Prima di descrivere il circuito magnetico del motore asincrono, è necessario fissare un opportuno sistema di riferimento. Infatti, se si sceglie tale riferimento fisso rispetto allo statore, il campo magnetico, in base alla (10.6), risulterà variabile con pulsazione ω , mentre se si fissa il riferimento solidale con il rotore (e cioè rotante con velocità angolare ω_m), allora il campo magnetico risulterà variabile con pulsazione ω_r , uguale a quella delle correnti rotoriche, a causa della composizione delle velocità angolari del campo magnetico e del rotore. Tale scelta è arbitraria; nel seguito considereremo un riferimento fisso con lo statore. In tale riferimento tutte le grandezze magnetiche hanno una pulsazione uguale ad ω . Il circuito magnetico si presenta come nella

parte (a) di fig.11.3 ed il relativo circuito equivalente è quello riportato nella parte (b) della stessa figura.



Nel circuito equivalente di fig.11.3(b) si è indicata con Q_s la riluttanza del percorso concatenato solo con lo statore, con Q_r la riluttanza del percorso concatenato solo con il rotore e con Q la riluttanza relativa al flusso principale Φ . E' da notare che quest'ultimo attraversa necessariamente un tratto in aria per la presenza del traferro. Perciò in questo caso non è necessario inserire un induttore per tenere conto delle perdite, come fatto nel trasformatore. La quantità $N_s I_s$ rappresenta la forza magneto-motrice relativa all'avvolgimento statorico; è evidente che tale quantità è un fasore di pulsazione ω . La quantità $N_r I_r$ rappresenta la forza magneto-motrice impressa dalle correnti che scorrono nel rotore. In tale caso la pulsazione è ancora uguale ad ω , in quanto, nel riferimento scelto la corrente I_r risulta variabile sia a causa della pulsazione propria delle correnti che scorrono nell'avvolgimento rotorico, sia per il fatto che quest'ultimo ruota a velocità angolare ω_m . Quindi la quantità I_r è anch'essa un fasore avente pulsazione ω , ma di valore uguale a quello riportato in fig.11.2 per indicare la corrente rotorica, cioè I_r .

12.1 Bilancio energetico del motore asincrono

Calcoliamo mediante il circuito di fig.11.4 la potenza attiva P_s trasferita dall'avvolgimento statorico al campo rotante e la potenza attiva P_r che tale campo cede all'avvolgimento rotorico. La prima è data da

$$P_s = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\underline{E}_s \underline{I}_s^* \right] \quad (12.1)$$

e la seconda da

$$P_r = -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\underline{E}_r \underline{I}_r^* \right] \quad (12.2)$$

Tenendo conto del valore dei componenti (fig.11.4) si ha

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ j\omega N_s^2 \left(\frac{1}{Q} + \frac{1}{Q_s} \right) \underline{I}_s \underline{I}_s^* + j\omega N_s N_r \frac{1}{Q} \underline{I}_r \underline{I}_s^* \right\} = \\ &= -\frac{1}{2} \omega N_s N_r \frac{1}{Q} \operatorname{Im} \left[\underline{I}_r \underline{I}_s^* \right] \end{aligned} \quad (12.3)$$

$$\begin{aligned} P_r &= -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ j\omega_2 N_s N_r \frac{1}{Q} \underline{I}_s \underline{I}_r^* + j\omega_2 N_s^2 \left(\frac{1}{Q} + \frac{1}{Q_s} \right) \underline{I}_r \underline{I}_r^* \right\} = \\ &= \frac{1}{2} \omega_2 N_s N_r \frac{1}{Q} \operatorname{Im} \left[\underline{I}_s \underline{I}_r^* \right] \end{aligned} \quad (12.4)$$

Poiché $\operatorname{Im} \left[\underline{I}_s \underline{I}_r^* \right] = -\operatorname{Im} \left[\underline{I}_r \underline{I}_s^* \right]$, si vede che tra le potenze P_s e P_r sussiste la seguente relazione

$$\frac{P_s}{\omega} = \frac{P_r}{\omega_2} \quad (12.5)$$

e cioè le potenze sono proporzionali alle rispettive pulsazioni. Ricordando la relazione (10.4), relativa allo scorrimento, la (12.5) si può anche scrivere nel modo seguente

$$P_r = s P_s \quad (12.6)$$

La (12.6) rappresenta un'altra relazione fondamentale della macchina asincrona e si può esprimere con la seguente proprietà:

Proprietà 12.1 " In un motore asincrono la potenza P_r assorbita dall'avvolgimento rotorico è uguale al prodotto della potenza ceduta dall'avvolgimento statorico al campo magnetico moltiplicata per lo scorrimento".

Dalla (12.6) si vede che il bilancio energetico non risulta soddisfatto se non si ha $s=1$ (corrispondente al rotore fermo). Quindi per $0 < s < 1$, solo una parte della potenza ceduta dall'avvolgimento statorico al circuito magnetico viene da questo restituita sotto forma elettrica all'avvolgimento rotorico. Poiché il circuito magnetico di fig.11.3(b) non assorbe potenza attiva, ciò implica che la rappresentazione circuitale del dispositivo non è completa, in quanto non ritorna il bilancio energetico. Occorre infatti aggiungere un'ulteriore parte riguardante il comportamento meccanico della macchina. Nel caso presente è sufficiente caratterizzare tale circuito meccanico solo grossolanamente. A questo scopo ricordiamo che la forza che si esercita su un conduttore percorso da una corrente ed immerso in un campo di induzione è proporzionale ad entrambe queste due grandezze. Ciò implica che la coppia meccanica che agisce sul rotore per effetto delle forze che si esercitano sui conduttori rotorici immersi nel campo rotante è proporzionale al flusso φ del campo rotante ed alla corrente i_r che scorre nell'avvolgimento rotorico. Tenendo conto che nell'analogia della mobilità meccanica (cfr. pag.2, G.Martinelli, M.Salerno, "Fondamenti di Elettrotecnica, Ed. Sidea, 1979), le grandezze applicate al circuito meccanico corrispondente al rotore sono la coppia e la velocità angolare, ne deriva per il rotore lo schema di fig.12.1. Mediante tale schema risulta chiaramente possibile fare quadrare il bilancio energetico. Infatti esso implica che la potenza fornita dall'avvolgimento statorico al circuito magnetico viene da questo integralmente restituita all'avvolgimento rotorico ed al circuito meccanico.

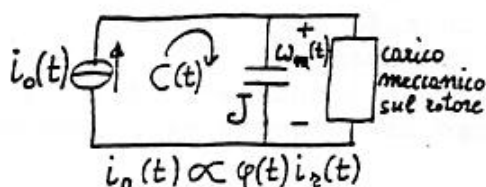


Fig.12.1

Circuito meccanico del rotore, in cui J è il momento d'inerzia del rotore, ω_m è la velocità angolare, C la coppia meccanica, i_0 la coppia impressa (campo rot.).

di chiusura del circuito rotorico, il quale, come si è detto, può essere chiuso in corto-circuito oppure su di un carico esterno attraverso gli anelli del collettore; infatti, poiché la potenza meccanica (e quindi la coppia) dipende dal valore della corrente rotorica e poiché la frequenza di tale corrente dipende dallo scorrimento (e quindi dalla velocità del rotore), è evidente che a seconda del tipo di carico utilizzato si avranno differenti andamenti della coppia. Nel seguito supporremo resistivo ed uguale ad R_c tale carico.

La determinazione della caratteristica meccanica è molto semplice, tenendo conto che la coppia applicata al rotore vale

$$C = 3 \frac{P_m}{\omega_m} \quad (12.9)$$

supponendo, come fatto finora, che P_m rappresenti la potenza meccanica ceduta al rotore per fase. Infatti possiamo ricondurre il calcolo di P_m , utilizzando le (12.7) e (12.3), al calcolo delle correnti rotorica e statorica, cioè

$$P_m = - \frac{1-s}{2} \omega M \operatorname{Im} [\underline{I}_r \underline{I}_s^*] \quad (12.10)$$

Tali correnti si possono dedurre dal circuito di fig. 11.4; in particolare conviene esprimere la (12.10) in termini della sola \underline{I}_r . Dall'equilibrio della maglia rotorica di fig. 11.4, si ha

$$j\omega_r M \underline{I}_s + (R + j\omega_r L_r) \underline{I}_r = 0 \quad (12.11)$$

essendo $R = R_r + R_c$.

Tenendo conto che i fasori sono uguali nei due riferimenti (fig. 11.4 e rotorico), si ricava

$$\underline{I}_s = \underline{I}_r \frac{R + j\omega_r L_r}{-j\omega_r M} \quad (12.12)$$

che inserita nella (12.10) dà

$$\begin{aligned} P_m &= - \frac{1-s}{2} \omega M \operatorname{Im} \left[|\underline{I}_r|^2 \frac{R - j\omega_r L_r}{j\omega_r M} \right] = \frac{1-s}{2} \frac{\omega}{\omega_r} R |\underline{I}_r|^2 \\ &= \frac{1-s}{2s} R |\underline{I}_r|^2 \end{aligned} \quad (12.13)$$

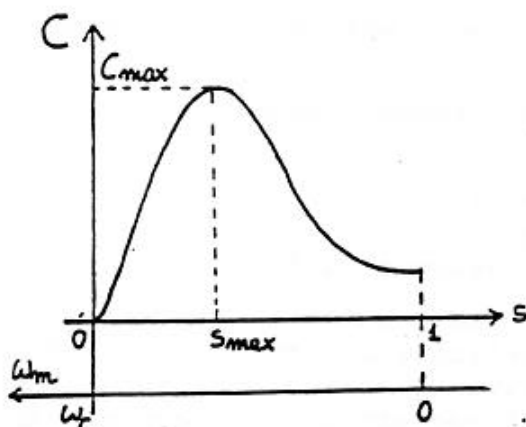


Fig.12.2
Caratteristica meccanica del
motore asincrono.

Inserendo tale valore nella (12.16) si ottiene il valore massimo di C , cioè

$$C_{\max} = \frac{3}{2} \frac{|V_s|^2 M^2}{\omega_c L_s^2} \frac{1}{A_2 + 2\sqrt{A_1 A_3}} \quad (12.19)$$

Dall'esame di fig.12.2 e delle formule (12.18) e (12.19) si possono ricavare le seguenti proprietà del motore asincrono:

- 1- alla velocità di sincronismo la coppia meccanica è nulla. Quindi ω_m non può mai raggiungere in un motore asincrono la velocità di sincronismo;
- 2- la velocità in corrispondenza alla quale la coppia è massima è funzione tra l'altro della resistenza di carico e può quindi essere variata cambiando tale resistenza;
- 3- il valore della coppia massima non dipende dalla resistenza di carico;
- 4- la coppia di spunto (a rotore fermo) può essere molto minore di quella massima.

Queste proprietà permettono di gestire nel modo migliore possibile le prestazioni della macchina a seconda delle esigenze di esercizio, in particolare nelle due fasi tipiche di funzionamento: l'avviamento ed il regime a velocità costante.

Nel primo caso l'esigenza più importante da soddisfare è quella di avere la massima coppia possibile. Ciò è facilmente ottenibile in base alle proprietà 2 e 3 precedenti nel motore a collettore inserendo un reostato di avviamento opportuno. In fatti, dalla (12.18) si vede che scegliendo R_c in modo che sia

no esplicitamente nelle due equazioni di equilibrio (12.11) e (12.14), che occorre considerare per analizzare il circuito stesso. E' facile però far apparire una sola pulsazione in queste equazioni, tenendo presente la (10.14). Per raggiungere questo scopo basta semplicemente dividere la (12.11) per lo scorrimento. Con questa operazione, le equazioni suddette divengono

$$\underline{V}_s = (j\omega L_s + R_s) \underline{I}_s + j\omega M \underline{I}_r \quad (12.20)$$

$$0 = j\omega M \underline{I}_s + \left(\frac{R}{s} + j\omega L_r \right) \underline{I}_r$$

tenendo conto che il valore dei fasori rimane inalterato passando da un riferimento rotorico ad uno fisso.

Le equazioni (12.20) sono quelle di un motore asincrono con rotore bloccato, avente una resistenza rotorica uguale a quella effettiva divisa per lo scorrimento e chiuso su un carico resistivo uguale a quello effettivo diviso per lo scorrimento. Poiché, d'altra parte, la corrente rotorica \underline{I}_r è rimasta inalterata in conseguenza della divisione precedente, ne risulta un aumento della potenza attiva assorbita dall'avvolgimento rotorico e dal carico in ragione di $1/s$, cioè viene assorbita in più rispetto al caso effettivo una potenza di valore

$$P_r \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \quad (12.21)$$

che in base alla (12.7) vale

$$s P_s \left(\frac{1}{s} - 1 \right) = P_m \quad (12.22)$$

Il semplice artificio, quindi, di dividere per s la (12.11) provoca le seguenti variazioni:

- 1- gli induttori accoppiati divengono di tipo normale, quali quelli che si ottengono eliminando le grandezze magnetiche in un trasformatore (funzionamento ad una sola pulsazione);
- 2- viene inserita una resistenza in serie al carico resistivo dipendente dallo scorrimento, che assorbe esattamente la potenza meccanica;
- 3- tutte le grandezze elettriche rimangono invariate salvo

che i relativi fasori si riferiscono tutti alla stessa pulsazione ω .

Ciò giustifica il circuito equivalente elettrico completo di fig.12.4 per il motore asincrono; tale circuito è quello cercato ed è stato ottenuto ovviando alle difficoltà dette all'inizio.

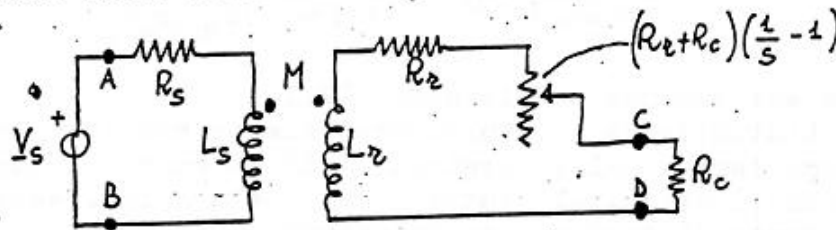


Fig.12.4 Circuito equivalente elettrico (per fase) del motore asincrono. Il resistore fittizio $(R_2 + R_c)(\frac{1}{s} - 1)$ rappresenta l'effetto della parte meccanica e la potenza che assorbe è quella meccanica.

Lo schema di fig.12.4 può essere anche ricavato da quello del trasformatore, poiché per quanto riguarda tutti i componenti eccetto il resistore fittizio, esso coincide con quello di un motore asincrono fermo, che come detto è identico a quello di un trasformatore. Perciò possiamo anche usare per rappresentare il motore asincrono lo schema di fig.12.5.

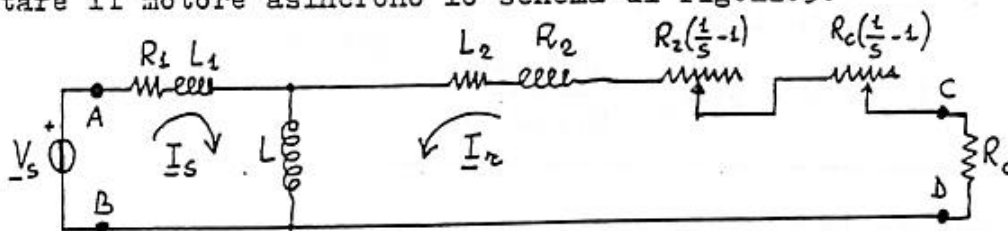


fig.12.5 Circuito equivalente per fase del motore asincrono, ottenuto come nel caso del trasformatore. Le grandezze sono riportate allo statore.

Il circuito elettrico equivalente completo del motore permette di dedurre facilmente tutte le proprietà della macchina viste in precedenza. In particolare, l'espressione del-

Calcolo del fattore di potenza per $s=0,02$

Il fattore di potenza è uguale al coseno dell'argomento dell'impedenza vista dal generatore applicato all'avvolgimento statorico nelle condizioni di funzionamento d'interesse. Tale impedenza risulta

$$Z_i = R_1 + j\omega L_1 + \frac{(\frac{R_2}{s} + j\omega L_2)j\omega L}{\frac{R_2}{s} + j\omega(L+L_2)} = 5,70 + j 3,61$$

Quindi si ha

$$Z_i = |Z_i| e^{-j\varphi_i} \quad \text{con} \quad |Z_i| = 6,75 \quad , \quad \varphi_i = 32,4^\circ$$

Il fattore di potenza vale

$$\cos(32,4^\circ) = 0,844 \text{ (ritardo)}$$

Calcolo della velocità del rotore per $s=0,02$

La velocità di sincronismo del motore è

$$\omega_c = \frac{\omega}{3} = 2\pi \frac{60}{3} = 125,6 \text{ rad/sec}$$

che corrisponde a 20 giri al secondo e quindi a 1200 giri al minuto primo.

La velocità del rotore è perciò

$$\omega_m = (1-s)\omega_c = 0,98 \cdot 1200 = 1176 \text{ giri al minuto primo}$$

Calcolo della potenza meccanica e della coppia disponibile sull'albero per $s=0,02$

Calcoliamo la potenza meccanica trasferita all'albero dal campo rotante con il circuito equivalente di fig.12.7(b), cioè

$$P_m = 3 \cdot 0,144 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) |I|^2$$

avendo espresso la corrente con il suo valore efficace. Poiché risulta

$$I^2 = \frac{(122,3)^2}{(0,417 + 0,144 \cdot 45)^2 + (0,699)^2} = 266$$

si ha

$$P_m = 5630 \text{ watt}$$

$$L_s = L_1 + L ; \quad L_r = L_2 + L ; \quad M = L$$

$$R_s = R_1 ; \quad R_r = R_2$$

Quindi si ha

$$\omega L_s = \omega L_1 + \omega L = 13,75 ; \quad \omega L_r = \omega L_2 + \omega L = 13,46$$

$$\omega M = \omega L = 13,25 ; \quad R_s = 0,294 ; \quad R_r = 0,144$$

Dalla (12.18) otteniamo lo scorrimento corrispondente alla coppia massima, cioè

$$A_1 = 1 + \left(\frac{R_s}{\omega L_s} \right)^2 = 1 + 4,6 \cdot 10^{-4} \approx 1 ; \quad A_2 = 0,546 ;$$

$$A_3 = \omega^2 \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)^2 + \left(R_s \frac{L_r}{L_s} \right)^2 = 0,479 + 8,28 \cdot 10^{-2} = 0,561$$

$$s_{\max} = 0,144 \sqrt{\frac{1}{0,561}} = 0,192$$

(velocità massima = $(1 - s_{\max}) 1200 = 970$ giri/minuto)

Quindi la coppia massima si ottiene dalla (12.19)

$$\frac{3(127)^2 \left(\frac{13,25}{13,75} \right)^2}{125,6} \frac{1}{0,546 + 1,418} = 175 \text{ newton x metro}$$

sottraendo ad essa il termine corrispondente alle perdite

$$\frac{403}{(1 - s_{\max}) \omega_c} = \frac{403}{1,01} \approx 4$$

Perciò la coppia massima vale

$$C_{\max} = 175 - 4 = 171 \text{ newton x metro}$$

Calcolo della coppia di spunto

Poiché non si ha potenza meccanica in questa situazione, non possiamo usare il circuito di fig.12.7. Conviene allora ricorrere alla formula (12.16), ponendo $s=1$ (rotore fermo). Si ha

$$C_{\text{spunto}} = \frac{3|V_s|^2 \left(\frac{M}{L_s} \right)^2}{2\omega_c} \frac{R_2}{A_1 R_2^2 + A_2 R_2 + A_3} = 78 \text{ newton x metro}$$