

RIPASSIAMO LE BASI DELL'ELETTROTECNICA

L'articolo offre un quadro completo ed aggiornato delle leggi che regolano l'elettrotecnica, leggi che anche un tecnico pratico, quale può essere un installatore, non può esimersi dal conoscere per svolgere razionalmente il proprio lavoro.

Parte sei: CARATTERISTICHE FUNZIONALI DEL MOTORE ASINCRONO TRIFASE

A cura della Redazione

6.1 - Generalità

Il motore asincrono trifase trasforma energia elettrica in energia meccanica che viene resa disponibile su un albero rotante. Esso sfrutta gli effetti dei campi magnetici rotanti prodotti da sistemi di correnti trifasi.

Un motore asincrono trifase è schematicamente costituito da una parte fissa di materiale magnetico sulla quale sono montati gli avvolgimenti di induttore (statore) e da una parte rotante, pure di materiale magnetico, con gli avvolgimenti di indotto (rotore).

Il rotore, che è di forma cilindrica, è separato dallo statore da una piccola intercapedine di aria di spessore costante, detta traferro (Figura 6.1).

Gli avvolgimenti di induttore sono suddivisi in tre gruppi di conduttori separati, montati in modo rigorosamente simmetrico lungo la periferia statorica.

Gli avvolgimenti di indotto sono pure montati in modo simmetrico sulla periferia del rotore e sono normalmente chiusi su se stessi.

Quando si alimenta l'induttore con un sistema equilibrato di correnti sinusoidali trifasi, le correnti che si stabiliscono negli avvolgimenti tendono a creare un campo magnetico rotante di ampiezza costante che assume nel tempo tutte le posizioni possibili radiali lungo il traferro. Questo campo induce delle f.e.m. nell'avvolgimento di rotore e quindi delle correnti che generano a loro volta un campo magnetico che reagisce con quello induttore dando origine a coppie meccaniche e alla rotazione del le parti mobili. Con una opportuna scelta della distribuzione dei conduttori

che costituiscono ciascuna fase dell'avvolgimento di induttore, è possibile realizzare motori che ruotano a velocità diverse.

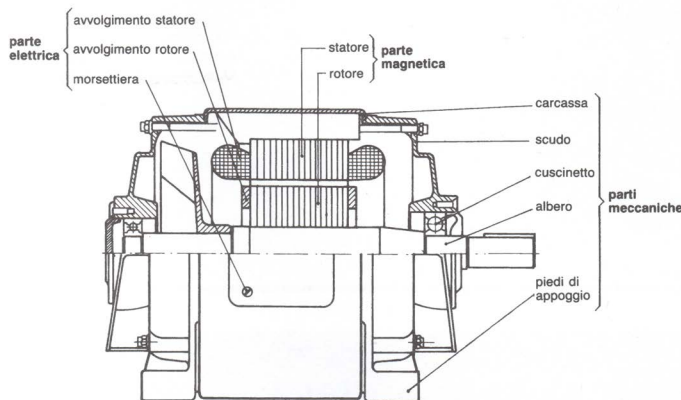


Figura 6.1 - Parti fondamentali di un motore asincrono trifase.

La semplicità, la robustezza e il basso costo hanno consentito una grandissima diffusione dei motori asincroni trifasi la cui potenza può variare da 1 a qualche migliaio di kilowatt. Costruttivamente i motori si differenziano per la posizione dell'asse di rotazione (verticale o orizzontale), per il tipo di fissaggio, per il grado di protezione contro gli agenti atmosferici, ecc..

6.2 - Generazione del campo magnetico rotante

Un campo magnetico rotante può essere generato da un sistema di correnti trifasi applicato a tre gruppi di spire disposti simmetricamente sulla periferia dello statore.

Per semplificare la trattazione, è opportuno considerare inizialmente i conduttori di una sola fase di statore ed immaginarli concentrati in due gruppi di cave disposte a 180° tra loro. Con opportuni collegamenti frontali, è possibile realizzare delle spire, così come è schematizzato nella figura 6.2a.

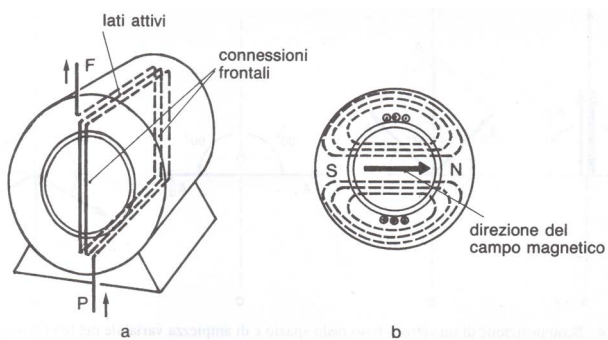


Figura 6.2 - Un gruppo di spire percorse da corrente (a) produce un campo magnetico. Il senso del campo si determina con la regola della mano destra (b).

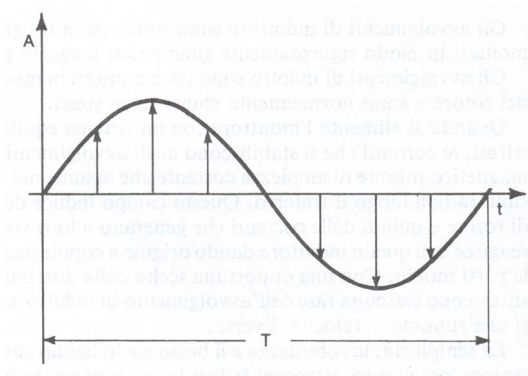


Figura 6.3 - Vettore di ampiezza variabile nel tempo e direzione fissa nello spazio che assume tutti i valori istantanei di una grandezza sinusoidale.

Si supponga ora di iniettare nel circuito una corrente sinusoidale di valore efficace costante e di frequenza pure costante.

Il sistema così concepito altro non è che un elettromagnete che produce un flusso alternato di ampiezza variabile nel tempo come la corrente. Il percorso del flusso è quello indicato della figura 6.2b che si riferisce ad uno degli istanti in cui la corrente assume valori concordi con i segni indicati nella figura stessa. Quando il senso della corrente alternata si inverte, cambia anche il senso del flusso. Si può dire che in queste condizioni il flusso è fisso nello spazio.

Per comprendere quanto verrà successivamente esposto è però opportuno interpretare il fenomeno in modo diverso.

Si può intanto dire che il flusso può essere rappresentato con un particolare tipo di vettore che ha direzione fissa e ampiezza variabile. Nella figura 6.3 tale vettore è considerato in vari istanti di un periodo della corrente.

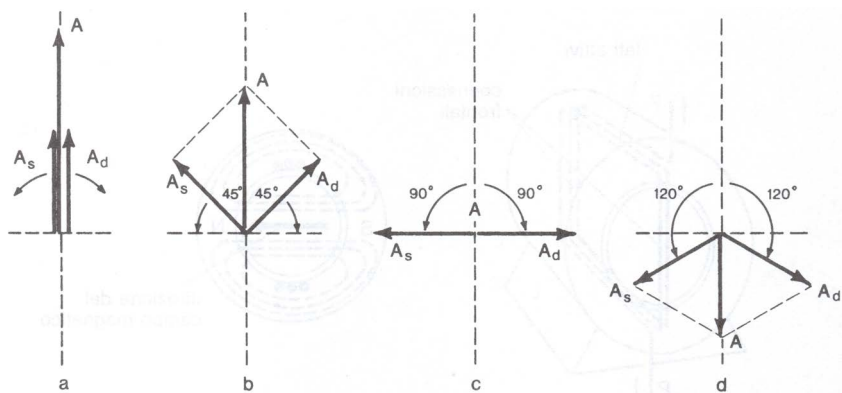


Figura 6.4 - Scomposizione di un vettore fisso nello spazio e di ampiezza variabile nel tempo in due vettori di ampiezza costante e rotanti. Le varie figure si riferiscono ad istanti diversi in cui i due vettori rotanti formano con l'asse della spira angoli di: 0° ; 45° ; 90° ; 120° .

Tabella 5.1 - Anomalie di funzionamento dei trasformatori: cause e azioni correttive.

Evento	Possibili cause	Azioni correttive
Temperatura dell'olio elevata	Sovraccarico	Sostituire il trasformatore con altro di potenza adeguata e prevedere il controllo dei carichi
	Temperatura ambiente elevata per insufficiente ricambio dell'aria	Attivare la circolazione dell'aria nella cabina
	Trasformatore non correttamente dimensionato	Contestare la macchina al fornitore
	Aumento delle perdite	Misurare le perdite a vuoto e dovute al carico per eventuale sostituzione
	Circolazione di corrente tra macchine in parallelo	Rivedere le caratteristiche dei trasformatori e posizione dei commutatori
	Errata indicazione del termometro	Verificare l'indicazione del termometro con altro strumento
Rumorosità	Induzione magnetica di progetto troppo elevata	Contestare il fatto al costruttore
	Tensione di alimentazione troppo elevata	Cambiare la posizione del commutatore di prese
	Insufficiente serraggio del nucleo	Contestare il fatto al costruttore
	Risonanze con pareti o pavimento	Coibentare le pareti e isolare il trasformatore con supporti elastici
Intervento del relè Buchholz	Scariche nell'isolamento con eventuale corto circuito tra spire o tra avvolgimenti	Riparazione
	Riscaldamento con eventuale corto circuito tra spire o tra avvolgimenti	Riparazione
	Entrata di aria all'interno della cassa per difetto di installazione	Ritirare l'olio e riempire la macchina sotto vuoto
	Presenza di umidità nell'olio e avvolgimenti	Ritirare avvolgimenti

Segue tabella 5.1

Segue tabella 5.1

Evento	Possibili cause	Azioni correttive
Intervento della protezione di massima corrente sul primario	Corto circuito esterno e difettoso coordinamento con protezioni di bassa tensione	Rivedere coordinamento delle protezioni
	Corto circuito interno sugli avvolgimenti	Riparazione
	Parallelo non corretto	Rivedere le caratteristiche del trasformatore la posizione dei commutatori
	Intervento intempestivo delle protezioni	Controllare la taratura delle protezioni
Tensioni secondarie di linea o di fase, non simmetriche	Errore nei collegamenti	Rivedere i collegamenti
	Mancanza di una fase di alimentazione	Verificare l'impianto di alimentazione
	Carico squilibrato (solo per trasformatori Δ/Δ^0)	Riequilibrare i carichi o sostituire il trasformatore con altro collegato. Δ/Δ^0
	Difetto nel commutatore	Verificare i rapporti di trasformazione e il funzionamento meccanico
Perdite di olio	Guarnizioni difettose	Sostituire guarnizioni
	Perdite nella cassa (saldature, corrosione, ecc.)	Saldare dopo svuotamento della cassa
Livello dell'olio basso	Perdite di olio	Eliminare le perdite
	Temperatura bassa	Rabboccare il conservatore
Commutatore bloccato	Ossidazione o deformazione comandi -Contatti saldati per sovracorrenti	Effettuare la manutenzione ed eventualmente sostituire il commutatore
Scarica esterna sugli isolatori	Sovratensioni atmosferiche	Assicurarsi dell'efficienza degli scaricatori
	Isolatori sporchi	Effettuare la pulizia
Rigonfiamento della cassa	Arco interno di potenza	Riparazione
Tracce di corrosione su cassa, radiatori e conservatori	Rivestimento protettivo inadeguato, danneggiamenti meccanici	Provvedere al ripristino del rivestimento protettivo

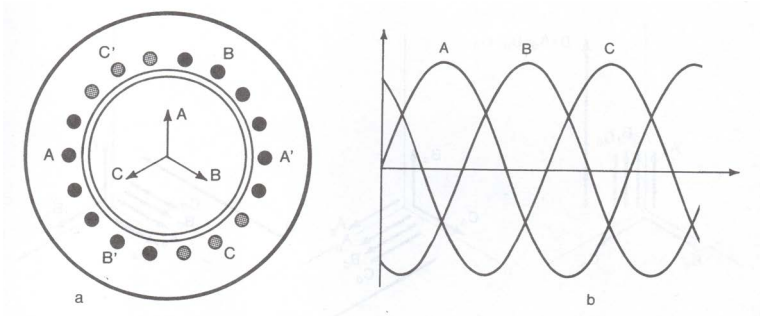


Figura 6.5 - Rappresentazione di tre gruppi di spire simmetricamente disposti e attraversati dalle correnti di un sistema trifase equilibrato e dei campi magnetici da essi prodotti.

Un vettore del tipo descritto può essere idealmente considerato la somma di due vettori di uguale ampiezza, pari alla metà del valore massimo del vettore dato, rotanti uno in senso destrorso e l'altro in senso sinistrorso.

La rotazione completa di un giro di questi vettori corrisponde al periodo.

Nella figura 6.4 sono rappresentate le condizioni che si verificano in vari istanti del periodo T e le composizioni vettoriali che permettono di determinare, istante per istante, il valore del flusso.

Si immagini ora di completare il sistema delle spire disponendo sullo statore anche quelle relative alle altre due fasi, così come indicato nella figura 6.5 a e si immagini poi che i tre gruppi di spire siano percorsi dalle correnti di un sistema trifase equilibrato.

Si possono allora fare considerazioni analoghe a quelle precedenti tenendo però presente che le tre correnti assumono il loro valore massimo con uno sfasamento nel tempo di $1/3$ di periodo ossia 120° (Figura 6.5b). Si supponga che la successione nel tempo delle fasi sia A, B, C e si fissi l'attenzione su uno degli istanti possibili, ad esempio quello in cui la corrente nella spira A è massima (Figura 6.6).

Si può notare che nell'istante considerato, i tre vettori A_d, B_d e C_d sono in fase per cui il loro effetto è pari a 3 volte quello di ciascuno di essi, mentre i tre vettori A_s, B_s e C_s sono disposti secondo una stella simmetrica per cui la loro somma vettoriale è nulla (Figura 6.7a).

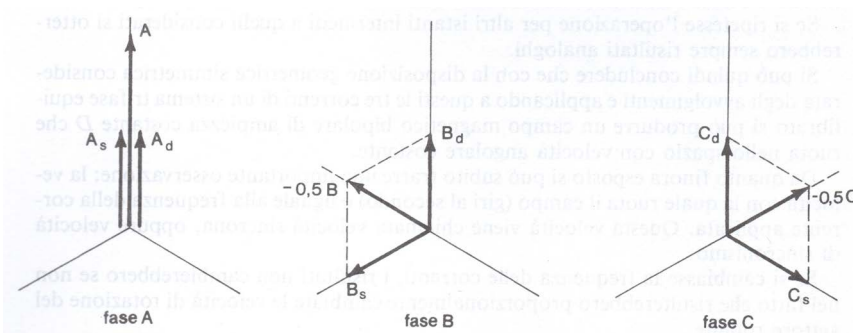


Figura 6.6 - Rappresentazione della posizione e intensità assunta dai vettori A, B e C e dai rispettivi vettori rotanti nell'istante in cui il vettore A è al suo valore massimo.

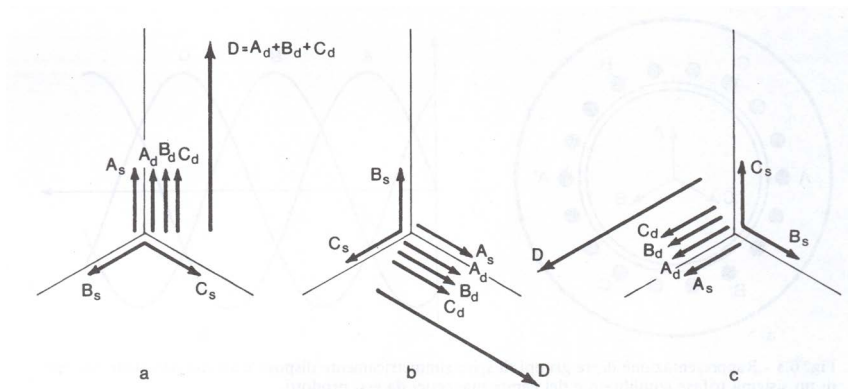


Figura 6.7 - Sistema di tre vettori fissi nello spazio e di ampiezza variabile nel tempo che si succedono nell'ordine A , B e C , scomposti nei vettori rotanti corrispondenti.

I vettori rotanti sono visti in tre istanti diversi, quando sono massimi successivamente A , B e C .

D rappresenta il vettore corrispondente al campo rotante.

Si ripeta la stessa operazione in un altro istante, ad esempio quando è massima la corrente nella spira B il cui asse geometrico è spostato di 120° rispetto alla spira A . Nella figura 6.7b è rappresentata la nuova situazione.

Si nota che i vettori A_d , B_d e C_d sono ancora tra loro in fase, ma la loro posizione è ruotata spazialmente di 120° rispetto alla situazione precedente. I vettori A_s , B_s e C_s sono ancora disposti secondo una stella simmetrica con somma vettoriale nulla.

Facendo infine la stessa costruzione per l'istante in cui è massima la corrente nella spira C , si ottengono i vettori indicati nella figura 6.7c. Si può notare che i tre vettori A_d , B_d e C_d sono ancora in fase e che la loro posizione è ruotata nello spazio di altri 120° . Nulla è una volta ancora la somma dei tre vettori A_s , B_s e C_s .

Se si ripetesse l'operazione per altri istanti intermedi a quelli considerati si otterrebbero sempre risultati analoghi.

Si può quindi concludere che con la disposizione geometrica simmetrica considerata degli avvolgimenti e applicando a questi le tre correnti di un sistema trifase equilibrato si può produrre un campo magnetico bipolare di ampiezza costante D che ruota nello spazio con velocità angolare costante.

Da quanto finora esposto si può subito trarre una importante osservazione: la velocità con la quale ruota il campo (giri al secondo) è uguale alla frequenza della corrente applicata. Questa velocità viene chiamata velocità sincrona oppure velocità di sincronismo.

Se si cambiasse la frequenza delle correnti, i risultati non cambierebbero se non nel fatto che risulterebbero proporzionalmente cambiate le velocità di rotazione del vettore rotante.

Nel caso esaminato la velocità di rotazione è di f giri al secondo, cioè di $60 f$ giri/minuto, avendo indicato con f la frequenza delle correnti applicate.

6.3 - Velocità e senso di rotazione del campo

La velocità del campo rotante è direttamente proporzionale alla frequenza e inversamente proporzionale al numero dei poli.

Il senso di rotazione del campo può essere invertito facendo in modo che la successione temporale delle fasi delle correnti avvenga in senso contrario.

Un'ulteriore estensione delle considerazioni svolte può essere fatta considerando non più tre gruppi di spire ma sei gruppi di spire disposti sempre simmetricamente lungo la periferia dello statore, come è indicato nella figura 6.8.

Effettuando un ragionamento analogo al precedente si può dimostrare che il campo magnetico rotante è in questo caso quadripolare e la sua posizione viene indicata in figura 6.8b, con riferimento all'istante in cui il campo rotante è sull'asse dei gruppi di spire della A, mentre la sua velocità di rotazione è ridotta alla metà della precedente. Il campo magnetico così creato non ha più due ma quattro poli. Considerazioni simili possono essere fatte usando 9 gruppi di spire (6 poli), 12 gruppi di spire (8 poli), ecc..

Si può quindi affermare che la velocità del campo rotante è inversamente proporzionale al numero dei poli del sistema.

In generale detta f la frequenza e p il numero dei poli, la velocità di rotazione è:

$$n_s = \frac{f}{p/2} = 2 \frac{f}{p}$$

se è espressa in giri/secondo oppure:

$$n_m = \frac{2 \cdot 60 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot f}{p}$$

se è espressa in giri/minuto.

Ad esempio, con alimentazione a 50 Hz, la velocità di rotazione (velocità) sincrona di un campo a 2 poli è di 3 000 giri al minuto, quella di un campo a 4 poli è di 1 500 giri, quella di un campo a 6 poli è di 1 000 giri e così via.

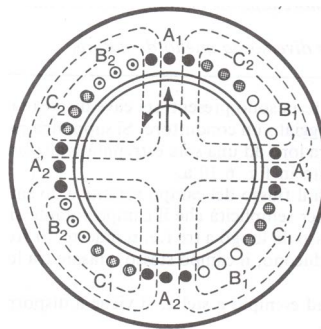


Figura 6.8 - Rappresentazione del campo magnetico rotante quando sono presenti sei gruppi di spire.

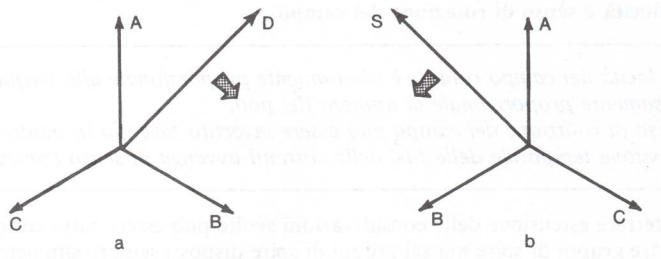


Figura 6.9 - Il senso di rotazione del campo dipende dalla successione temporale delle correnti applicate ai gruppi di spire:

a - successione in senso orario;

b - successione in senso antiorario.

Il senso di rotazione del campo rotante dipende dalla successione temporale delle correnti applicate ai vari gruppi di spire.

La figura 6.9 dà conto di questo fatto in quanto nel caso *a* le correnti si susseguono in senso destrorso e il campo ruota in senso destrorso, mentre nel caso *b* si ha la successione sinistrorsa e quindi la rotazione sinistrorsa.

Si può osservare che il senso di rotazione del campo può essere facilmente invertito scambiando tra loro due conduttori della linea trifase di alimentazione.

Si può dedurre subito la seguente nota di carattere pratico: per invertire il senso di rotazione dei motori asincroni trifasi è sufficiente scambiare tra loro due conduttori in arrivo alla morsettiara.

6.4 - I fenomeni indotti nel rotore

Avvolgimento di rotore aperto

Il campo magnetico rotante prodotto dalle correnti di statore induce nei conduttori di rotore delle f.e.m.

Il rapporto tra le tensioni di statore e di rotore dipende dal rapporto tra i numeri conduttori.

Il numero delle fasi del rotore può essere diverso da quello di statore.

Si consideri ora un rotore lungo la cui periferia sono presenti sei cave disposte in modo simmetrico, in ognuna delle quali è alloggiato un conduttore. Si supponga per il momento che i conduttori siano collegati tra loro ad una sola estremità realizzando tre spire aperte, così come è schematizzato in figura 6.10a.

Se il rotore è fermo, ogni conduttore taglia il flusso del campo rotante e diventa quindi sede di f.e.m. indotta. Se si suppone per semplicità che il campo rotante sia bipolare, si deduce subito che il taglio del flusso dà luogo a tre f.e.m. indotte, di frequenza uguale a quella delle correnti che producono, il campo stesso, sfasate tra loro di 120° elettrici.

Collegando tra loro i tre gruppi di spire, ad esempio a stella, si viene a disporre di un sistema trifase simmetrico di tensioni.

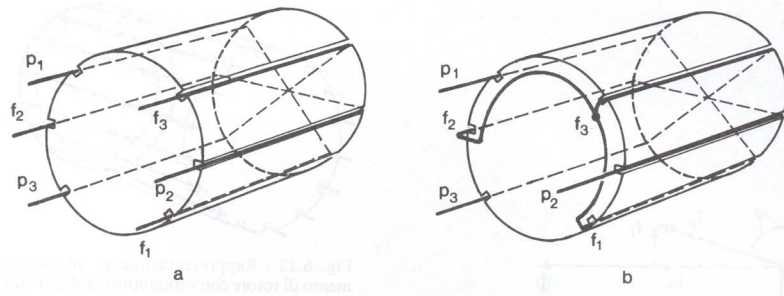


Figura 6.10 - Rappresentazione delle spire dell'avvolgimento di rotore collegato a stella. Ogni spira è tagliata dal flusso e diventa sede di forza elettromotrice indotta.

La macchina asincrona si comporta in questo caso come un trasformatore e si possono applicare le stesse regole illustrate nel Capitolo 1.

Se si considera anche qui la trasformazione ideale e che in ogni cava il conduttore può essere fatto passare più volte realizzando così più spire collegate in serie, si può dire che la tensione di fase (U_1) applicata al primario (statore) risulta uguale e contraria alla f.e.m. di autoinduzione E_1 che risulta:

$$E_1 = 4,44 \cdot N'_1 \cdot f \cdot \phi$$

dove:

N'_1 = numero delle spire per ciascuna fase;

f = frequenza;

ϕ = valore massimo del flusso del campo rotante.

Se si osserva che ogni spira può essere considerata formata da due conduttori diametralmente opposti, la formula sopra riportata può essere scritta:

$$E_1 = 2,22 \cdot N_1 \cdot f \cdot \phi$$

nella quale $N_1 = 2 N'_1$.

Nel seguito si farà sempre riferimento a questa seconda relazione che è di uso più comune.

Per quanto riguarda il secondario (rotore), per la f.e.m. indotta di fase (E_2) si può scrivere analogamente:

$$E_2 = 2,22 \cdot N_2 \cdot f \cdot \phi$$

dove:

N_2 = numero di conduttore di ciascuna fase.

Per cui risulta:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Anche in questo caso, per eccitare il campo magnetico l'alimentazione dovrà fornire la corrente magnetizzante per cui si può tracciare il diagramma vettoriale della figura 6.11 del tutto analogo a quello indicato per i trasformatori.

Si deve considerare che la presenza del traferro tra rotore e statore aumenta la riluttanza del circuito magnetico e pertanto l'entità della corrente a vuoto risulta percentualmente più elevata per la macchina asincrona (anche fino al 30% della corrente nominale per macchine di piccola potenza) rispetto al trasformatore.

Nell'esame dei fenomeni che si verificano nel motore asincrono si è considerato l'avvolgimento rotorico disposto e avvolto come quello statorico. Questa condizione non è indispensabile per il funzionamento della macchina.

Si consideri infatti una diversa disposizione dei conduttori rotorici. Si immagini, ad esempio, che il rotore sia realizzato con un numero qualsiasi di cave uniformemente distribuite, in ciascuna delle quali è disposto un conduttore. Si supponga anche che tali conduttori siano collegati tra loro ad una sola delle estremità mediante un anello saldato, così come è schematizzato nella figura 6.12 (questa soluzione è detta a gabbia di scoiattolo).

Si è in questo modo realizzato un collegamento a stella, ma con numero di fasi uguale al numero dei conduttori.

In ogni conduttore viene indotta la f.e.m:

$$E_2 = 2,22 \cdot f \cdot \Phi = \frac{E_1}{N_1} \quad (N_2 = 1)$$

In questo modo la macchina si comporta ancora come un trasformatore funzionante a vuoto, ma essa è in grado di modificare il numero delle fasi del sistema secondario.

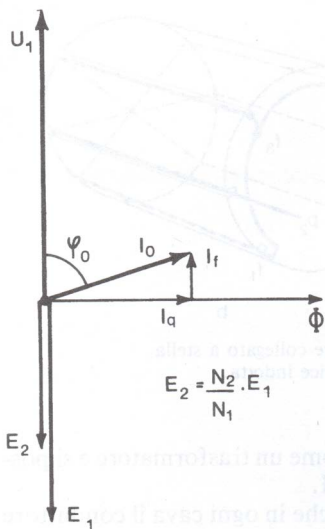


Figura 6.11 - Diagramma vettoriale delle grandezze relative ad una macchina asincrona alimentata con rotore bloccato e avvolgimento di rotore aperto.

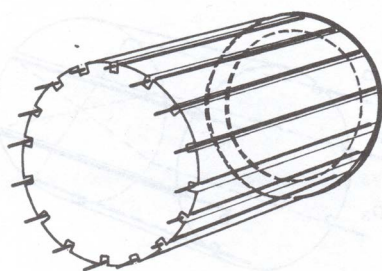


Figura 6.12 - Rappresentazione di un avvolgimento di rotore con i conduttori saldati ad una estremità ad anello metallico. Ogni conduttore può essere considerato la fase di un sistema.

Si conclude quindi che in una macchina asincrona il numero delle fasi rotoriche è indipendente dal numero delle fasi statoriche.

Avvolgimento di rotore in corto circuito

Se l'avvolgimento di rotore è chiuso in corto circuito, in esso si inducono correnti che a loro volta richiamano una corrente di reazione sullo statore.

Le correnti di rotore reagiscono con il campo rotante producendo una coppia motrice che fa ruotare il rotore nello stesso senso di detto campo.

Si supponga ora che il circuito di rotore (tanto nella soluzione avvolta che in quella a gabbia di scoiattolo) sia chiuso in corto circuito e che il rotore sia inizialmente fermo.

Se si applica tensione all'avvolgimento di statore, le correnti che circolano in esso generano un campo rotante che induce f.e.m. nell'avvolgimento di rotore. Essendo l'avvolgimento chiuso in corto circuito, queste ultime, danno origine a delle correnti che a loro volta creano, come le correnti nello statore, un campo rotante denominato campo indotto il quale presenta lo stesso numero di poli del campo induttore e ruota con la stessa velocità. Le correnti circolanti nel circuito rotorico interagiscono con il campo rotante di statore dando luogo a coppie meccaniche che tendono a fare muovere il rotore. Per la legge di Lenz le correnti indotte tendono ad opporsi alle cause che le hanno provocate e quindi a ridurre la f.e.m. indotta.

Poiché la variazione di flusso è provocata dalla rotazione del campo rispetto ai conduttori stessi, inizialmente fermi, l'azione tenderà a mettere in moto i conduttori (e quindi l'intero rotore), in modo che essi seguendo nella rotazione il campo non siano più soggetti a variazioni di flusso (Figura 6.13).

Da quanto esposto emerge la conclusione fondamentale che il motore asincrono trifase è autoavviante, ossia a differenza di altri tipi di motori si avvia da sè, senza bisogno di essere posto preventivamente in velocità con mezzi esterni.

Risulta anche chiaro il motivo per cui il motore asincrono trifase si chiama anche motore a campo rotante (come abbiamo visto lo statore produce un campo magnetico rotante) o motore a induzione (il funzionamento avviene per reazione della corrente generata per induzione nel rotore).

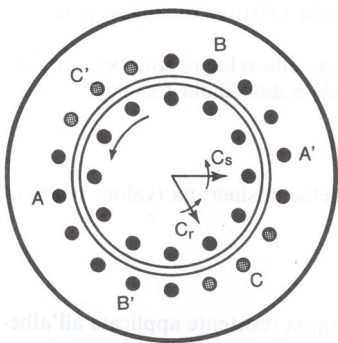


Figura 6.13 - Rappresentazione dei sistemi statorico e rotorico con indicazione del senso di rotazione dei campi magnetici rotanti prodotti dall'induttore C_s e dall'indotto C_r .

Cotina sul prossimo numero