

Capitolo 4

IL MOTORE ASINCRONO TRIFASE

4) IL MOTORE ASINCRONO TRIFASE : Sommario

Il motore asincrono trifase assolve il fondamentale compito di convertire l'energia elettrica in energia meccanica. Oggi, circa il 70% dei motori elettrici in esercizio è di questo tipo che, insieme al trasformatore, è stato assolutamente determinante nella diffusione dell'energia elettrica nel mondo sostituendo, in larghissima misura, tutti gli altri mezzi di produzione o trasmissione di forza motrice, sia nell'industria che nelle applicazioni domestiche.

4.1 Introduzione

Il **Motore Asincrono Trifase**, che nel seguito indicheremo più semplicemente con la sigla **MAT**, venne per la prima volta realizzato da Galileo Ferraris nel 1885. Esso viene alimentato direttamente dalla rete di distribuzione, a tensione e frequenza costanti, e rappresenta il motore elettrico più semplice, economico, robusto ed affidabile che la tecnica conosca. È ad elevato rendimento, non richiede lubrificazione, né manutenzione, non presenta alcuna difficoltà o particolarità per l'avviamento e, pertanto, è il dispositivo più diffuso nell'utilizzazione dell'energia elettrica come "*forza motrice*".

Il suo principio di funzionamento si basa sulla creazione di un campo rotante, realizzabile per mezzo di circuiti fissi nello spazio e percorsi da correnti polifasi, in particolare da correnti trifasi. Tuttavia, per piccole potenze, oppure per limitate applicazioni speciali, questo motore può anche essere di tipo monofase, come vedremo più in dettaglio nel seguito.

Rispetto agli altri tipi di motori elettrici, il MAT presenta diversi vantaggi: peso ed ingombro ridotti a parità di potenza; mancanza di particolari dispositivi di eccitazione prelevando, direttamente dalla rete, la potenza magnetizzante necessaria per creare il flusso induttore della macchina; è autoavviante; sviluppa, spontaneamente ed automaticamente, variando la propria velocità, una coppia motrice atta a controbilanciare la coppia resistente applicata all'albero motore, determinando un funzionamento stabile (all'aumentare del carico rallenta); sovraccaricabilità, anche il 100% della sua potenza nominale; esigenze di manutenzione molto ridotte, semplicità di esercizio ed alto rendimento.

D'altro canto, presenta alcuni aspetti vincolanti, tra i quali: all'avviamento, con inserzione diretta sulla rete, la corrente di spunto può risultare anche 4 - 10 volte maggiore della corrente assorbita a pieno carico, con problemi alla rete di distribuzione (cadute di tensione) ed agli interruttori (intervento); questa corrente risulta, inoltre, essere tanto sfasata rispetto alla tensione (come nei trasformatori in corto circuito) che la coppia motrice sviluppata dal motore all'avviamento, detta coppia di spunto, è piccola nonostante l'elevato valore della corrente assorbita; la velocità di rotazione del MAT, nel campo di funzionamento normale, praticamente costante, perché strettamente legata alla frequenza della corrente di alimentazione; la coppia massima (proporzionale al quadrato del rapporto tra il valor efficace della tensione di alimentazione e la frequenza) costante ed ad una ben precisa velocità.

Segue da quanto detto che, laddove un dispositivo meccanico deve essere azionato senza particolari esigenze di regolazione di velocità o di coppia, ivi è il regno incontrastato di applicazione del MAT: montacarichi, gru, ascensori, macchine utensili tradizionali, pompe, ventilatori sono da decenni azionati in maniera soddisfacente da questo tipo di motore.

L'unico ostacolo che si oppone ad una diffusione praticamente universale del MAT è l'impossibilità di regolare velocità e coppia in ampi intervalli, a costi contenuti.

È per questo motivo che, in Italia, dal 1925 al 1980, nella trazione ferroviaria si ebbe il progressivo disuso dei locomotori elettrici con motori trifasi, a tensione e frequenza fisse, a favore del motore a corrente continua a 3 kV che presentava la possibilità di modulare coppia e velocità con una flessibilità maggiore (si tenga presente che, all'epoca, i locomotori azionati da MAT potevano avere non più di 4 velocità obbligate di marcia: 25 km/h, 37.7 km/h, 75 km/h e 100 km/h!).

Questo ostacolo è stato superato ai nostri giorni con l'elettronica di potenza (un locomotore pesa anche 100 tonnellate ed ha 2 MW di potenza installata) che, grazie alla rivoluzionaria capacità dei diodi e dei tiristori di potenza di rendere indipendenti la tensione e la frequenza della linea di alimentazione da quelle che alimentano i motori, ha reso possibile montare MAT su locomotori circolanti sotto catenarie a corrente continua, alimentandoli non più a tensioni e frequenze fisse ma variabili finemente in modo tale da regolare con precisione coppia e velocità.

Il MAT è, generalmente, sotto l'aspetto elettrico, un utilizzatore trifase che provvede a convertire energia elettrica in meccanica per azionare meccanismi semplici ed economici, viene alimentato direttamente dalla rete, a tensione e frequenza costanti, e la sua velocità di rotazione è praticamente costante in quanto lo scarto di velocità, da vuoto a pieno carico, non supera, generalmente, il 4%.

Il tipo di motore che andremo a studiare è un motore trifase costruito in grande serie, usato su vasta scala e con potenze che vanno dai centesimi a qualche decina di migliaia di chilowatt.

Vale la pena osservare che i motori asincroni possono essere alimentati con un sistema polifase simmetrico qualunque di tensioni, ma, poiché la distribuzione dell'energia elettrica viene fatta esclusivamente con sistemi trifasi, nella pratica vengono realizzati solo MAT.

Il MAT avendo un funzionamento reversibile, come tutte le macchine elettriche, può funzionare anche da generatore, ma la sua utilizzazione in questa veste non è molto frequente.

Infatti il funzionamento come generatore è subordinato alla possibilità di assorbire dalla rete, sotto tensione a frequenza f , la potenza reattiva necessaria a creare il campo magnetico induttore: senza di esso la macchina non potrebbe funzionare in nessun caso.

In alcuni casi il funzionamento da generatore è temporaneo, come avviene per i motori di trazione elettrica (locomotori) nel caso di marcia in discesa (frenatura in recupero). Il funzionamento da generatore è tuttavia così poco frequente che si parla quasi sempre di motore asincrono.

In questo capitolo esamineremo il principio di funzionamento, le particolarità costruttive, i parametri del circuito equivalente, le caratteristiche di funzionamento, l'avviamento e la regolazione della velocità, il significato dei principali dati di targa di un MAT.

4.2 Principio di funzionamento ed aspetti costruttivi

Lo scopo di questo paragrafo è illustrare il principio di funzionamento e la struttura generale del MAT, visto, prevalentemente, nel funzionamento come motore ed esaminarne i principali aspetti costruttivi e le scelte tecniche poste alla loro base, molte delle quali risulteranno più chiare nel corso della trattazione della macchina.

• Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento di qualsiasi motore elettrico si basa sulle applicazioni delle azioni meccaniche (forze) che si esercitano tra campi magneti e correnti. Come abbiamo già vista nella parte introduttiva di queste lezioni, queste forze sollecitano i conduttori quando, immersi in un campo magnetico, sono percorsi da corrente. Nel caso particolare in cui il campo e la corrente siano perpendicolari tra loro, l'intensità di questa forza è data da:

$$F = B \cdot \ell \cdot i$$

e si misura in Newton [N] se l'induzione magnetica B è in Tesla [T], la lunghezza L dei conduttori in metri [m] e la corrente i in ampere [A]. Il funzionamento del MAT si basa, inoltre, sull'impiego di un campo magnetico del tutto speciale, il campo rotante, che abbiamo già dettagliatamente descritto nella parte introduttiva generale del testo dedicato alle macchine statiche.

Per rendere più concrete le idee, consideriamo la Figura 4.2.1 in cui una spira di materiale conduttore è immersa in un campo magnetico rotante; la spira è imperniata e libera di ruotare intorno ad un asse, parallelo o coincidente con l'asse di rotazione del campo rotante. Supponiamo che il campo magnetico del vettore induzione $\vec{B}$ sia uniforme e che tutte le linee di flusso costituiscano un complesso solidale rotante con velocità angolare ω intorno all'asse $A - A'$, in verso antiorario per chi guarda da A .

Da quanto detto in precedenza, la spira sarà sede di fenomeni di induzione elettromagnetica, tranne nel caso in cui essa ruoti con la stessa velocità del campo.

Nel caso in cui questa spira fosse ferma avremo che il flusso magnetico concatenato con essa risulterà essere, essendo il campo del vettore $\vec{B}$ uniforme e rotante con velocità ω_0 , variabile nel tempo con legge sinusoidale di pulsazione ω_0 . Questa variazione di flusso indurrà una f.e.m. nella spira chiusa con conseguente circolazione di una corrente, anch'essa sinusoidale di pulsazione ω_0 , che, per la legge di Lenz, avrà un verso tale da opporsi alla causa che l'ha generata, cioè al moto relativo (rotatorio) fra campo magnetico e spira.

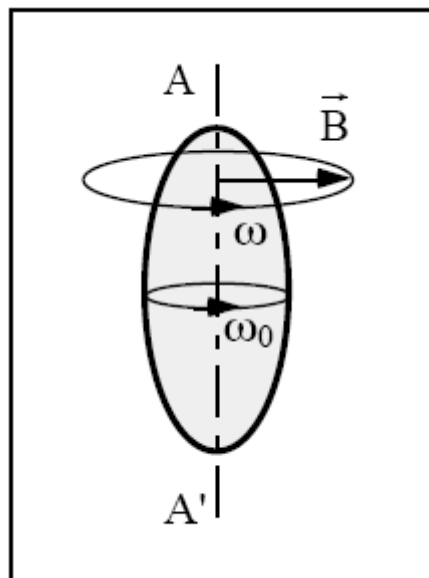


Figura 4.2.1: spira immersa in un campo magnetico rotante.

La corrente indotta tenderà ad annullare, o, comunque, a ridurre l'entità di questo moto relativo, cioè, per effetto delle forze elettromagnetiche cui è soggetta la spira, tenderà a far ruotare la spira nello stesso verso del campo rotante: ecco dunque l'effetto motore, illustrato in Figura 4.2.2.

Se però la spira ruotasse "*sincrona*" con il campo rotante, cioè con la stessa velocità ω_0 , il moto relativo tra spira e campo si annullerebbe e si ridurrebbe a zero sia la f.e.m. indotta che la corrente nella spira, con la conseguente scomparsa delle forze elettromagnetiche.

I ben noti fenomeni elettromagnetici che danno luogo a forze, e quindi a momenti di forze (o, se volete, a coppie meccaniche), allorché una corrente elettrica scorre in una spira immersa in un campo magnetico, hanno luogo, nel sistema considerato, solo se nella spira circola corrente.

Questa corrente non può esistere che per "*induzione*", la quale può sostenersi solo se la spira ruota in maniera "*asincrona*" rispetto al campo rotante, cioè ruota con una velocità angolare diversa da ω_0 ; da ciò nasce l'aggettivo "*asincrono*" adoperato per definire questo tipo di motore, che viene chiamato anche motore "*a campo rotante*", perché è la più importante applicazione della scoperta di Ferraris; o ancora motore ad "*induzione*" non tanto perché il fenomeno dell'induzione elettromagnetica sia fondamentale, come del resto è per tutte le macchine che sfruttano tale fenomeno, ma perché la parte rotante è sede esclusivamente di correnti indotte, indispensabili per il suo funzionamento.

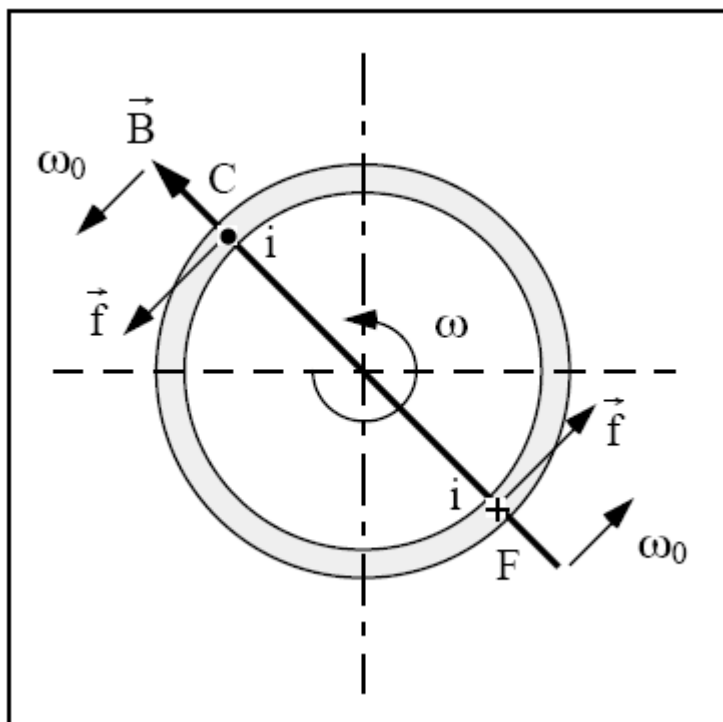


Figura 4.2.2: generazione della coppia motrice nel motore asincrono.

Dunque, affinché esista coppia meccanica, la spira deve ruotare attorno all'asse A - A' con una velocità angolare diversa da ω_0 (con $\omega_0 > 0$); indichiamo con ω , diversa da ω_0 , questa velocità angolare della spira. Risulta che, se $0 < \omega < \omega_0$, la coppia esercitata dalla spira è concorde con il verso di rotazione del campo magnetico e la macchina funziona da motore; se, invece, $\omega > \omega_0$ la coppia esercitata è di segno discorde con il verso di rotazione del campo magnetico e la macchina funziona da generatore.

Nel caso in cui $\omega < 0$, ossia quando la macchina ruota forzatamente in senso opposto al campo, si ha il funzionamento da freno, con la coppia elettromagnetica che si oppone al movimento. In realtà anche il funzionamento da generatore può essere considerato come un freno, per la presenza di una coppia resistente; in questo caso, però, gran parte dell'energia meccanica fornita alla macchina viene trasformata in energia elettrica ed inviata in rete, mentre, nel funzionamento da freno, sia la potenza elettrica che la potenza meccanica, assorbite dalla macchina, sono dissipate in calore, per effetto Joule, negli avvolgimenti della macchina stessa. Ma di questo torneremo a parlare, in maniera più approfondita, nel seguito.

La spira segue, pertanto, la rotazione del campo magnetico ad una velocità minore in modo tale che scaturisca un moto relativo di scorrimento tra campo magnetico induttore e spira indotta ed in quest'ultima circolino correnti di intensità tale da sviluppare una coppia motrice capace di mantenere la spira in rotazione. Se la spira rallentasse per la presenza di una coppia frenante maggiore, aumenterebbe la velocità angolare con la quale il campo precede la spira, cioè aumenterebbero la differenza tra le due velocità e la f.e.m. indotta e, di conseguenza, le correnti e la coppia motrice assumerebbero un valore tale da vincere la nuova coppia resistente ad una diversa velocità. Ciò vuol dire che, in questo tipo di motore, una diminuzione della velocità comporta un automatico aumento della coppia motrice.

In teoria, è del tutto equivalente mantenere fisso l'indotto o l'induttore, tuttavia, poiché il sistema induttore, cioè quello che crea il campo magnetico rotante, deve essere collegato alla linea trifase di alimentazione, si preferisce mantenerlo fisso per evidenti motivi di pratica convenienza.

Andiamo ora ad illustrare la struttura generale del MAT, esaminandone i principali aspetti costruttivi.

• **Struttura generale**

Il motore asincrono è costituito, come mostrato in Figura 4.2.3, da due parti fondamentali di forma cilindrica coassiali: una parte esterna, fissa, detta "**statore**" ed una interna, coassiale, munita di albero, sostenuto da due supporti, libera di ruotare intorno all'asse della macchina, detta "**rotore**". In particolare, nella figura si notano i seguenti dettagli:

1. albero con chiavetta;
2. anello della gabbia;
3. sbarra di rame;
4. morsettiera;
5. ventola di raffreddamento;
6. spaccato delle matasse degli avvolgimenti di statore;
7. spaccato del circuito magnetico statorico;
8. pacco del circuito magnetico rotorico;
9. alette di raffreddamento della carcassa esterna.

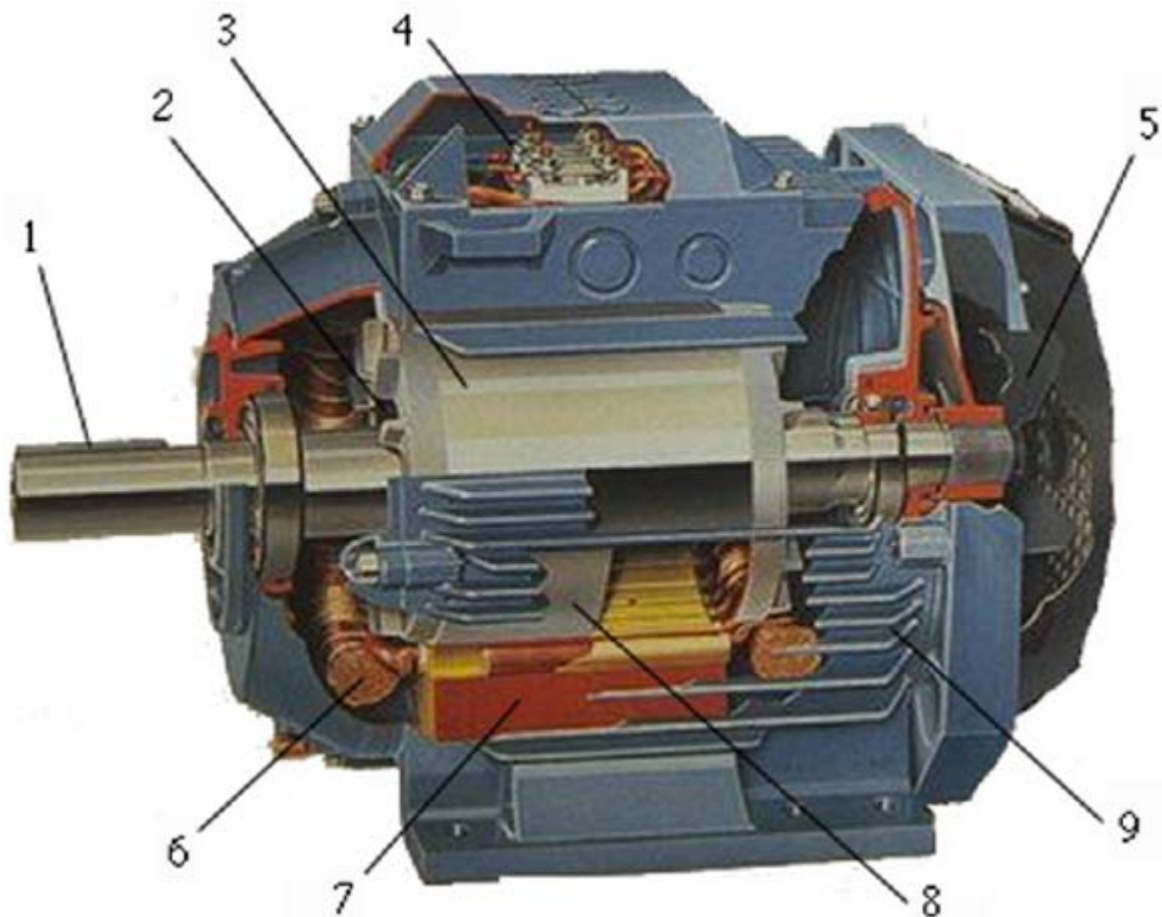


Figura 4.2.3 - vista esplosa delle varie parti di un motore asincrono a gabbia.

I circuiti magnetici di statore e di rotore sono mostrati in Figura 4.2.4.

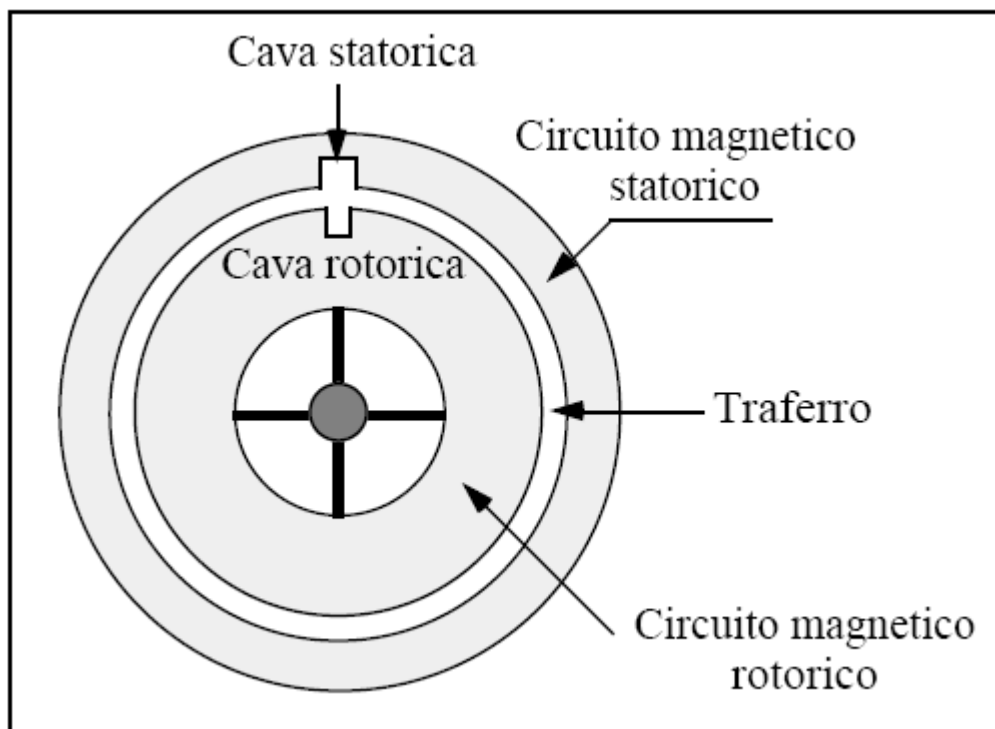


Figura 4.2.4 – circuiti magnetici di statore e di rotore

Come si può notare, lo statore ed il rotore sono separati da una intercapedine in aria, di spessore uniforme, detto traferro (oppure interferro), sempre realizzato del più piccolo valore possibile, che può variare da qualche decimo di millimetro per i piccoli motori, a qualche millimetro, per i motori più grossi. Lo statore di Figura 4.2.5 è formato da un pacco di lamierini costituiti di ferro e silicio a forma di corona circolare, isolati tra loro, ed è munito al suo interno di cave in cui trovano posto i conduttori costituenti l'avvolgimento di statore, sempre di tipo polifase.

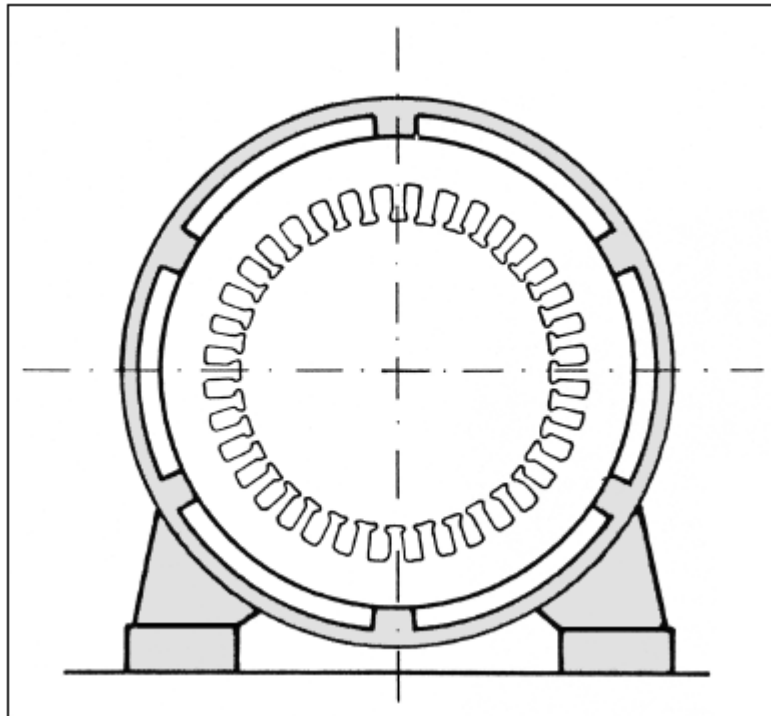


Figura 4.2.5 – statore di una macchina asincrona

Lo statore è sostenuto dalla carcassa, come mostrato in Figura 4.2.6, che costituisce la struttura portante del MAT e che deve permettere il fissaggio del motore al piano di supporto e resistere alle sollecitazioni meccaniche trasmesse dalle diverse parti in rotazione.



Figura 4.2.6: carcassa statorica in metallo pressofuso.

Il rotore rappresentato in Figura 4.2.7 è costituito anch'esso da un pacco di lamierini di ferro arricchiti di silicio, all'interno del quale passa l'albero di rotazione e nella cui parte esterna sono disposte un certo numero di cave in cui sono allocati i conduttori che costituiscono l'avvolgimento di rotore.

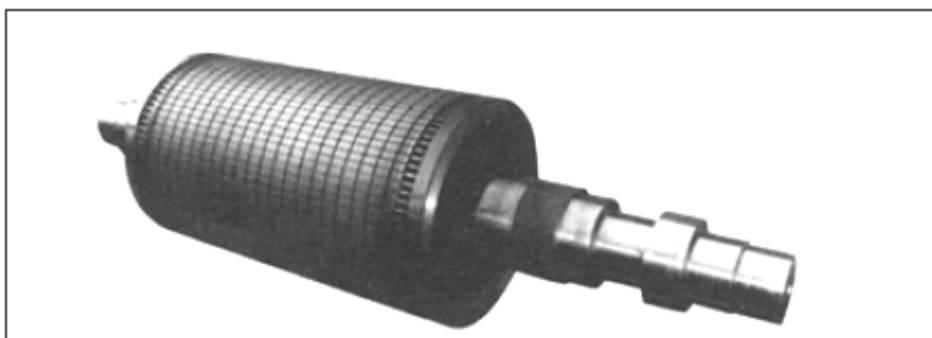


Figura 4.2.7: rotore di una macchina asincrona.

Sia lo statore che il rotore sono laminati in senso normale all'asse della macchina per ridurre le perdite per correnti parassite, essendo la macchina sede di un flusso magnetico variabile. Il tenore di silicio, contenuto nel materiale ferromagnetico, è basso, meno dell'1%, per ridurre la fragilità e la durezza; la carcassa è invece in ghisa, talvolta anche in alluminio.

Per evitare l'impuntamento del motore all'avviamento, si fanno primi tra loro il numero delle cave per polo e per fase del rotore e dello statore. Inoltre, il rapporto tra il numero delle cave di statore e quello di rotore non deve mai essere un numero intero per evitare vibrazioni del motore dovute a variazioni ritmiche del flusso magnetico al traferro (effetto sirena); generalmente, il numero delle cave di rotore è maggiore di quello di statore.

Un altro aspetto da non trascurare è il problema del raffreddamento del MAT, raffreddamento che, a seconda della potenza della macchina, può essere naturale, forzata o con scambiatori di calore (aria - aria oppure aria - acqua).

All'aumentare della potenza crescono le perdite e, quindi, il riscaldamento, ma la superficie disperdente della macchina non cresce secondo la stessa legge, per cui si avrà un aumento della temperatura; ne deriva un limite superiore a questa potenza, in rapporto alle caratteristiche costruttive e al dimensionamento del MAT, non dovendosi mai raggiungere temperature eccessive tali da portare al degradamento delle parti isolanti. È per questo motivo che, nelle macchine di elevata potenza, vengono lasciati degli spazi vuoti (canali di raffreddamento) lungo lo sviluppo assiale dello statore.

Bisogna anche ricordare che ogni materiale isolante ha una propria "*vita*", che è il periodo di tempo durante il quale le sue caratteristiche risultano idonee alle funzioni alle quali è deputato e che è accertato che la vita dell'isolante è tanto più breve quanto più alta è la temperatura a cui lavora. considerato Da ciò segue che, considerato che le comuni macchine elettriche sono destinate a funzionare alcune decine di anni, le temperature del MAT non devono superare determinati valori che dipendono dalla "classe d'isolamento" dei materiali isolanti utilizzati (di cui abbiamo parlato nella prima parte).

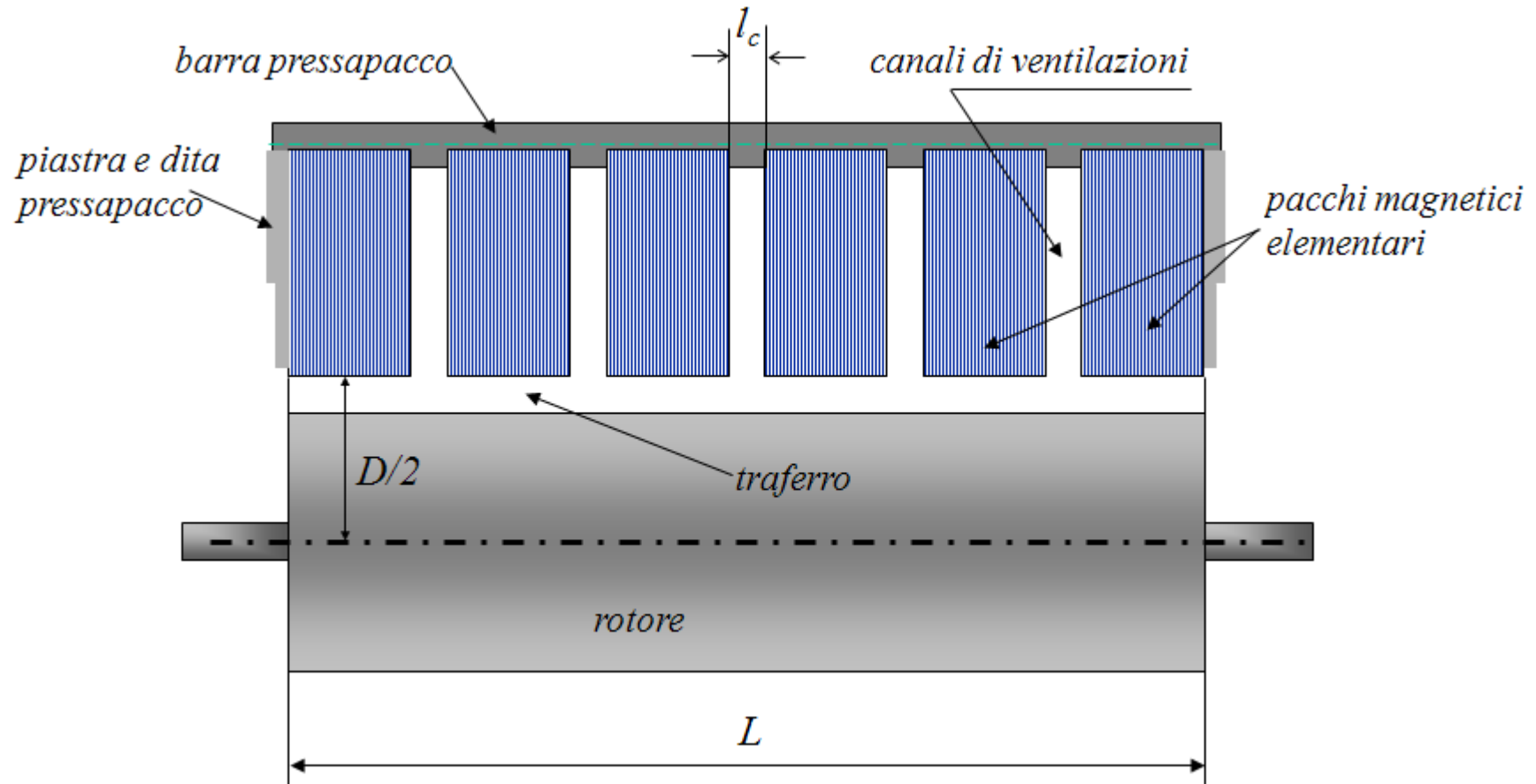
Nella figura che segue viene riportato il disegno di uno spaccato di un MAT con evidenziati i canali di raffreddamento.

Canali di ventilazione nel pacco statorico

$$L_{eff} = (L - \gamma_c \cdot n_{can} \cdot \ell_c)$$

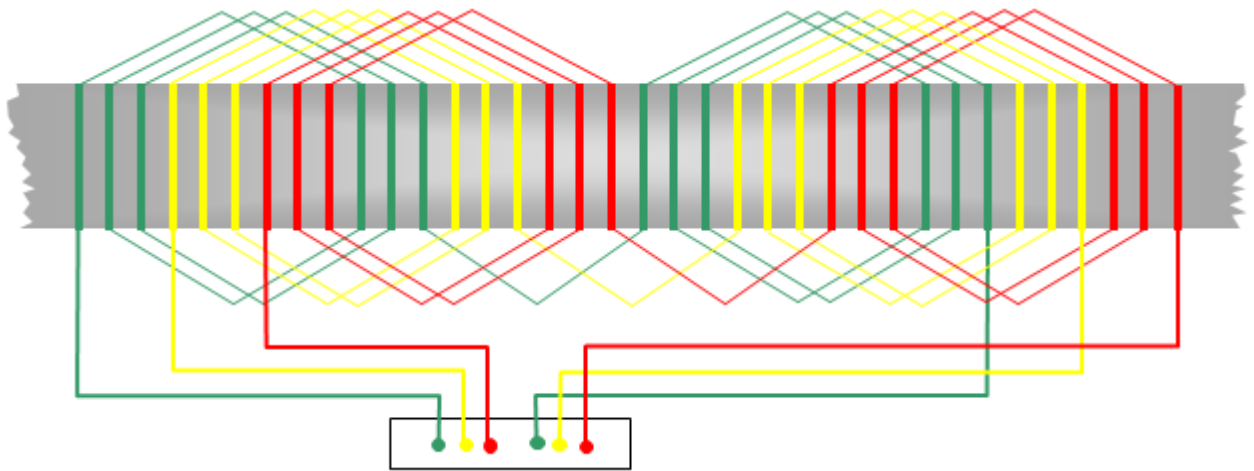
con:

- n_{can} = numero dei canali di ventilazione
- γ_c = Fattore empirico di riduzione

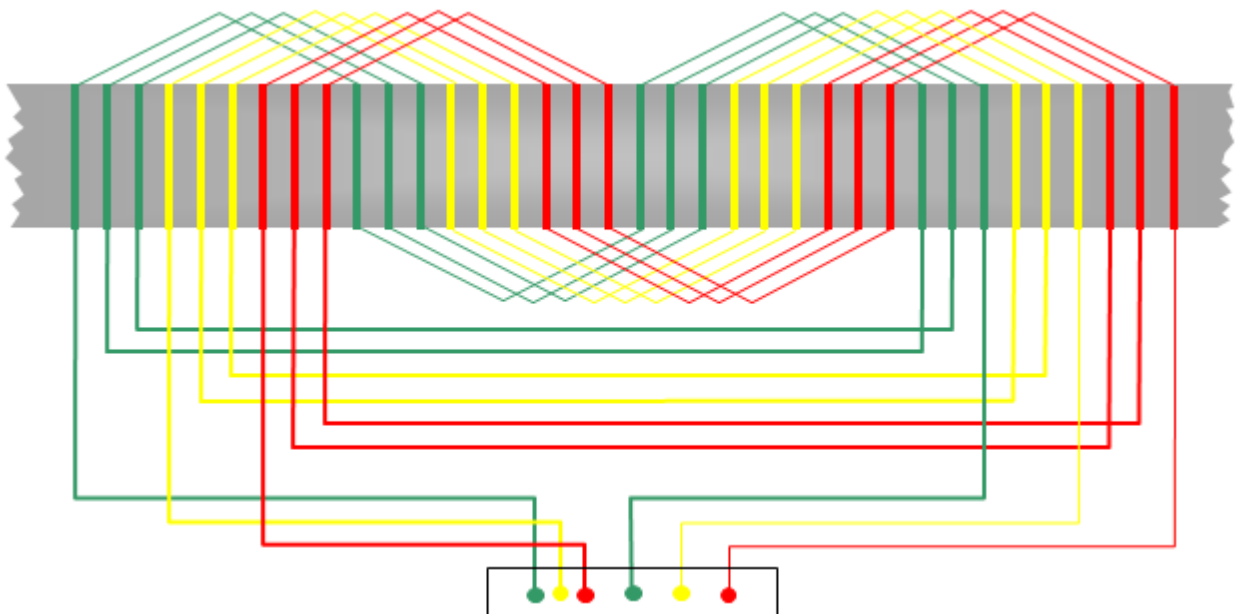


• Statore

La realizzazione dello statore dei MAT, detto anche induttore, sia per struttura magnetica che per formazione degli avvolgimenti, è del tutto identica, come si vedrà in seguito, a quella dello statore della macchina sincrona. Avremo quindi uno statore provvisto di avvolgimento trifase, eseguito con un certo numero " p " di coppie di poli, alimentato sempre da una linea trifase. Anzi, potremmo dire che un alternatore (o macchina sincrona) può essere trasformato in un MAT cambiando esclusivamente il rotore che, in questo caso, avrà gli avvolgimenti chiusi in corto circuito per consentire la libera circolazione delle correnti e che il campo rotante, generato dallo statore, trascina in rotazione asincrona. Gli avvolgimenti statorici sono realizzati secondo gli schemi di seguito riportati e che saranno gli stessi che vedremo per le macchine sincrone.



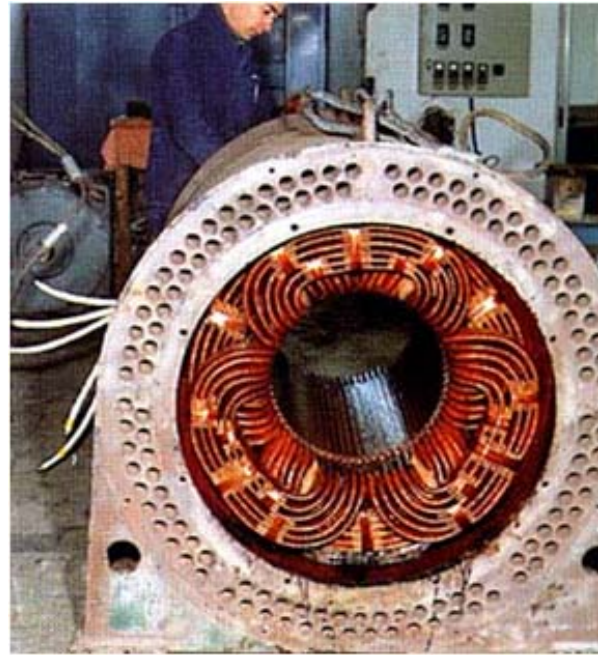
Avvolgimento di statore di tipo embricato, 4 poli, 3 cave per polo e per fase



Avvolgimento di statore di tipo ondulato, 4 poli, 3 cave per polo e per fase.

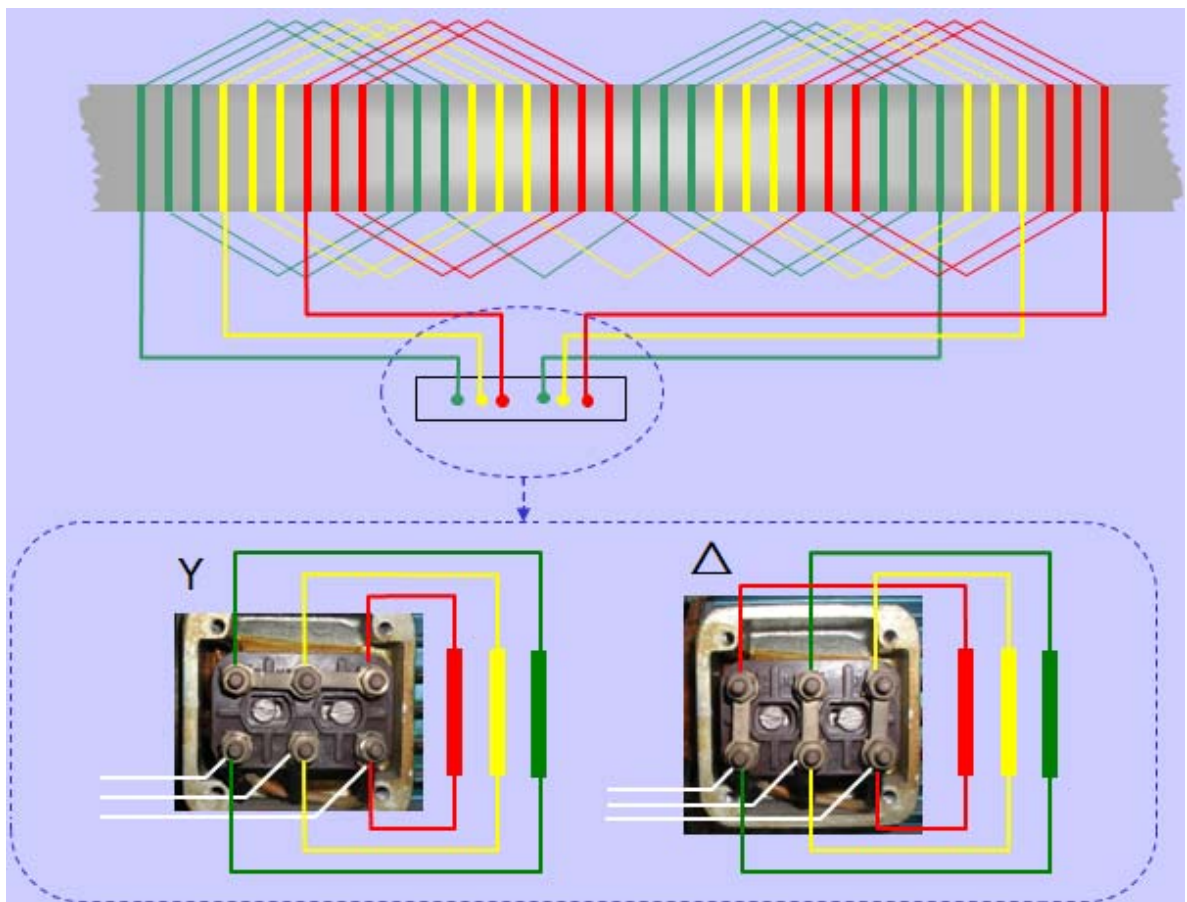


Statore di motore da 6 MW, 6 kV con avvolgimento embricato 4 poli.



Avvolgimento di statore di tipo ondulato 6 kV, 4 poli, 6 cave per polo e per fase

I capi delle tre fasi, per poter collegare le fasi ultimate a stella o a triangolo, vengono riportati a sei morsetti situati sulla carcassa, risulta così comodo modificare le connessioni tra i morsetti, come illustrato nella figura seguente e in Figura 4.2.8.



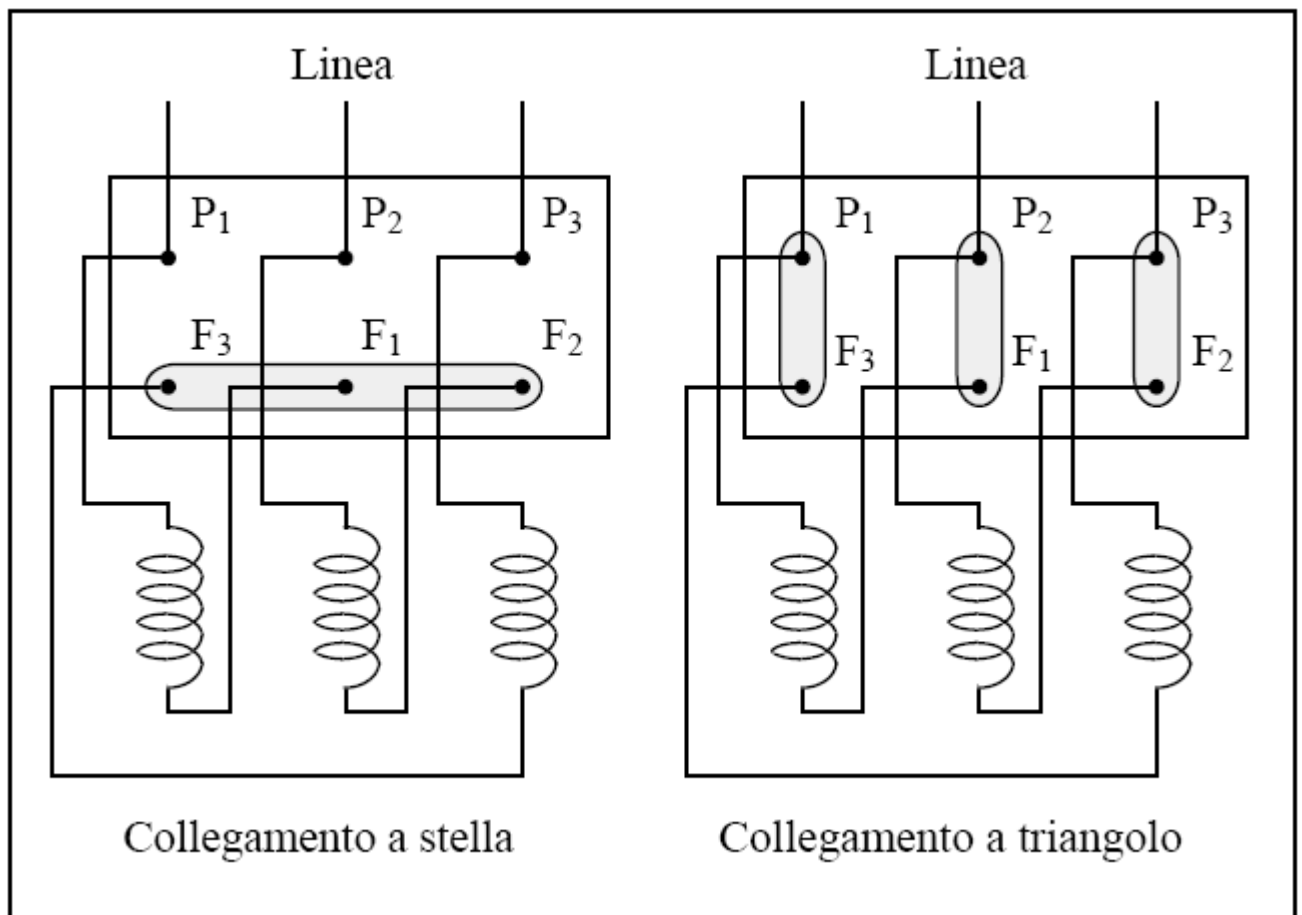
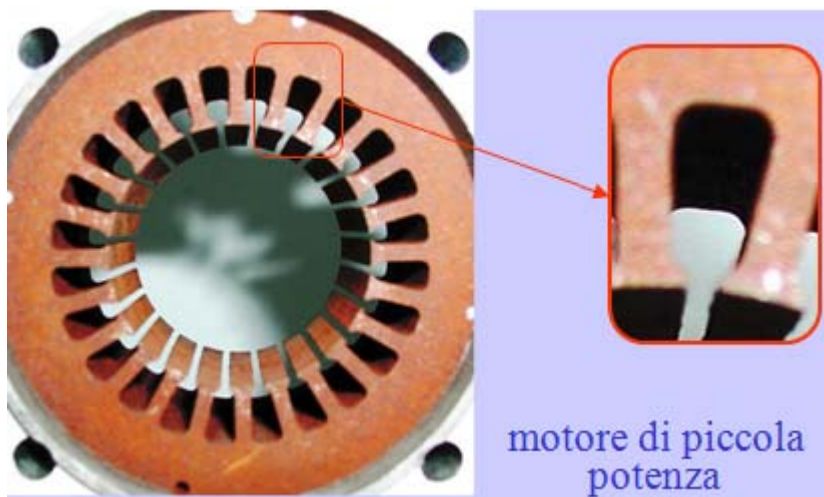
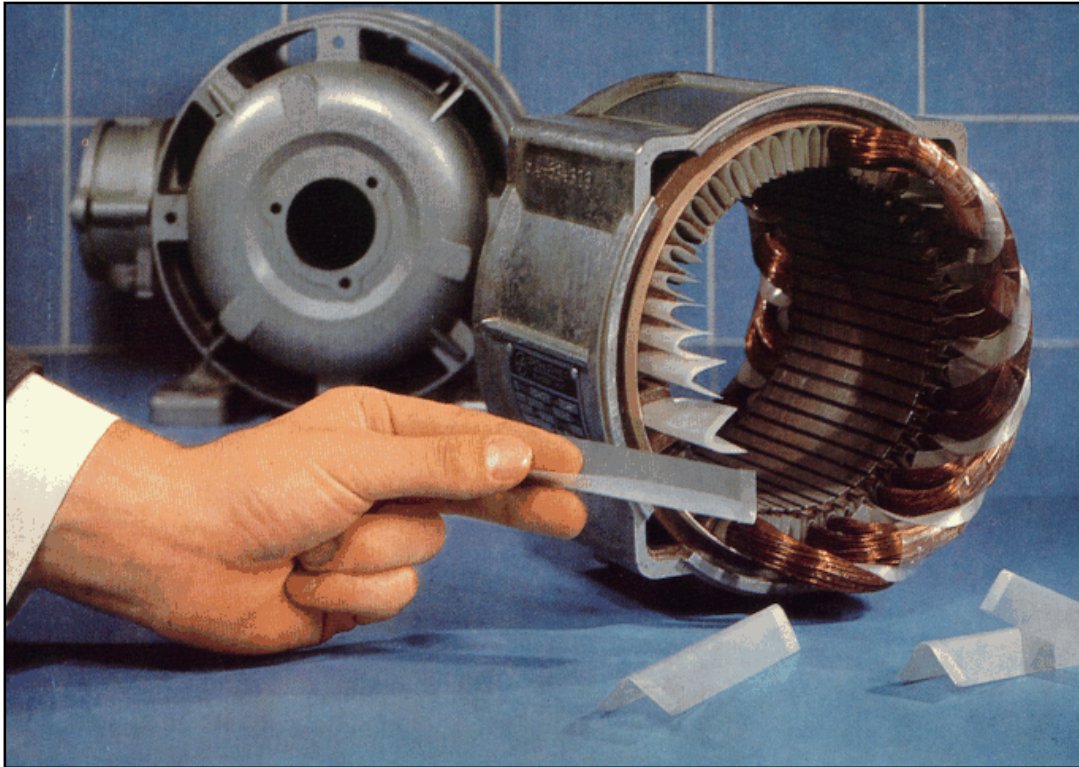


Figura 4.2.8: collegamento delle fasi ai morsetti dello statore di un asincrono

Per la perfetta centratura del rotore, dato il piccolo traferro, la parte interna dello statore e quella esterna del rotore sono passati al tornio, per correggere eventuali imperfezioni. Lo spessore del traferro deve tener conto, in special modo, delle oscillazioni del rotore o degli spostamenti dell'asse di rotazione a causa dell'usura dei cuscinetti: mai rotore e statore devono venire a contatto, pena l'irreparabile danneggiamento del motore stesso. Le cave (o canali) in cui vengono inseriti gli avvolgimenti induttori sono del tipo aperto o semichiuso (vedi figura),





*Particolare dell'isolamento verso massa di una matassa nello statore di una macchina di piccola potenza
Motore da 5 kW, 380 V*

mentre la relazione che determina la velocità del campo magnetico rotante è espressa da:

$$\omega_0 = \frac{\omega}{p} \quad (4.2.1)$$

avendo indicato con:

- $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ la pulsazione della tensione di rete
- p il numero di coppie di poli.

Difatti, consideriamo una macchina a 2 poli ($p = 1$) con 4 cave per polo e per fase alimentata da un sistema simmetrico di tensioni concatenate. Le tre bobine di statore, identiche per costruzione, costituiscono un carico perfettamente equilibrato, per cui le correnti che in esse circoleranno saranno perfettamente sinusoidali ed avranno lo stesso valore massimo, la stessa pulsazione ω ma sfasate tra di loro di un terzo di periodo, con $i_1(t)$ in anticipo su $i_2(t)$ ed in ritardo su $i_3(t)$, così come mostrato in figura 4.2.9.

Prendiamo in considerazione l'istante di tempo in cui la corrente nella fase n° 1 sia massima; nello stesso istante di tempo le correnti nelle fasi n° 2 e n° 3 saranno la metà del valore massimo e negative (si veda sempre la figura 3.2.9).

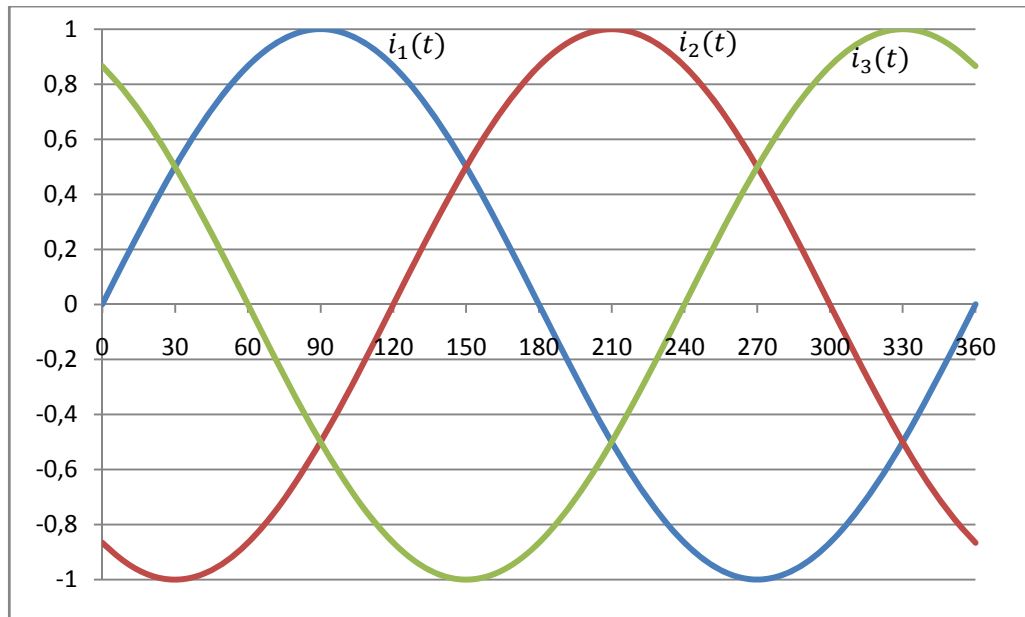


Figura 4.2.9

Pertanto la distribuzione delle correnti nelle tre fasi e i corrispondenti poli magnetici saranno quelli di figura 4.2.10.

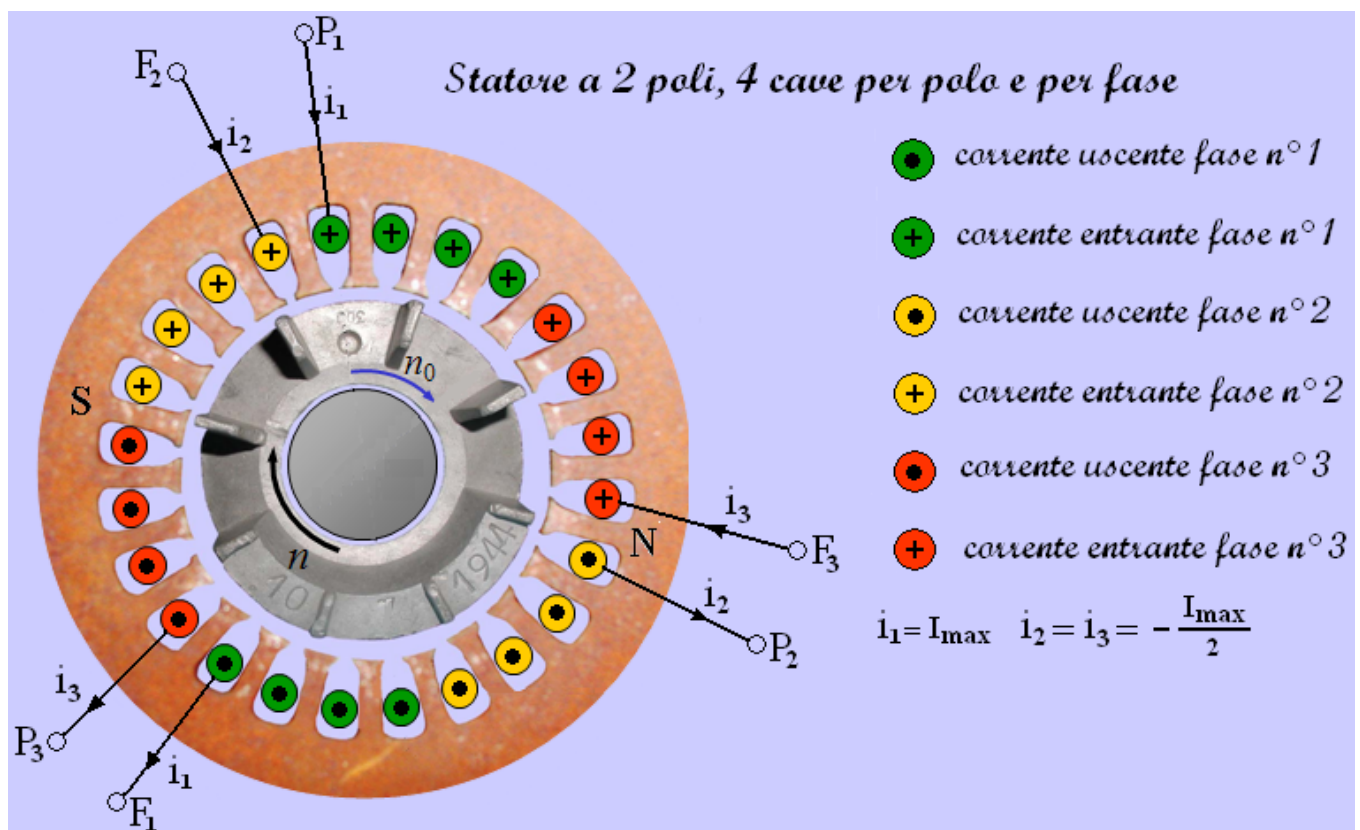


Figura 4.2.10

Dopo mezzo periodo la corrente nella fase n° 1 diviene massima negativa, mentre le correnti nelle fasi n° 2 e n° 3 divengono positive e pari alla metà del valore massimo; la situazione si inverte e diviene quella di figura 4.2.11

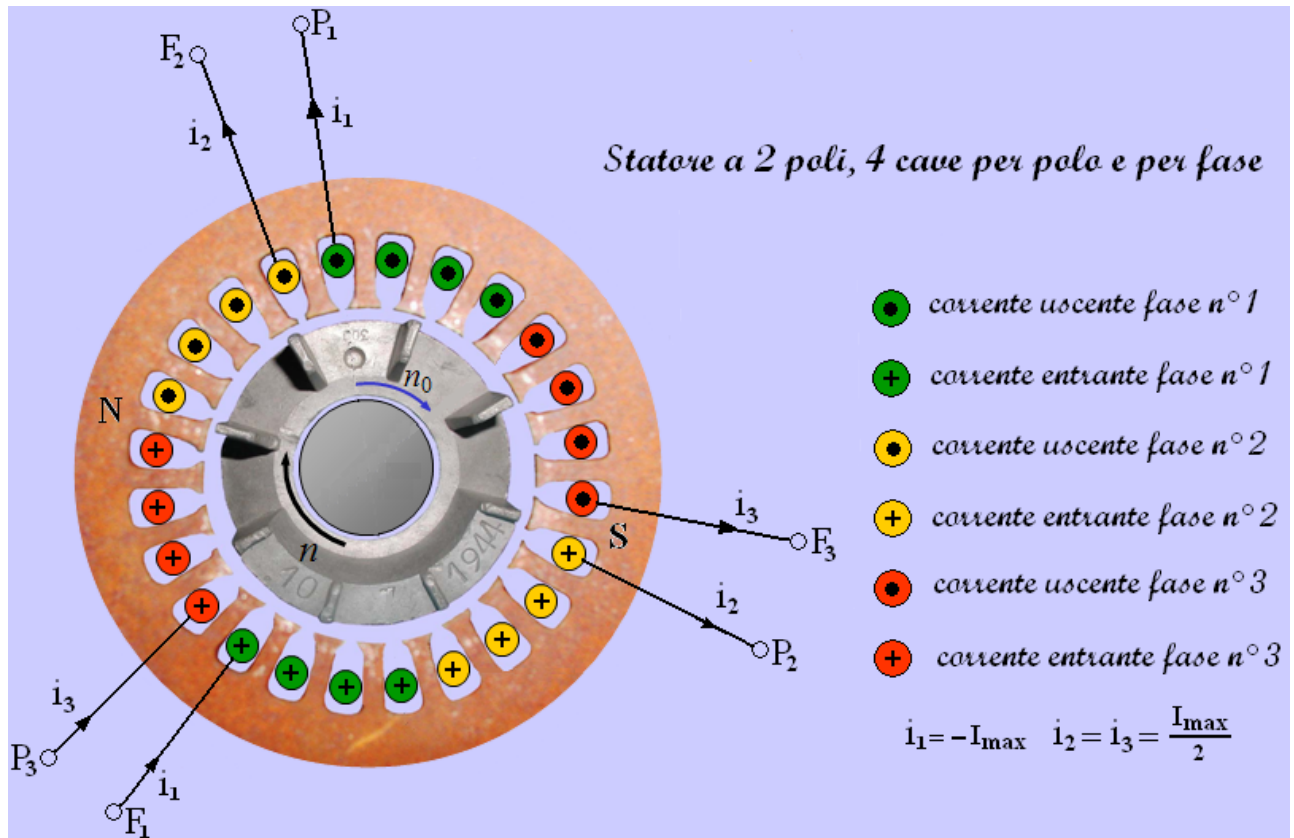


Figura 4.2.11

Come conseguenza di ciò, la coppia di poli è ruotata di mezzo giro. Dopo un altro mezzo periodo la situazione ancora si inverte e si ritorna a quella della figura 4.2.10. Se indichiamo con T il periodo delle grandezze elettriche correnti e con T_ω il periodo del campo rotante si ha la seguente corrispondenza:

- $p = 1$ (una coppia di poli), $T_\omega = 1 T$

Supponiamo adesso di avere una macchina con quattro poli ($p = 2$) (due cave per polo e per fase) e rifacciamo lo stesso ragionamento. Nell'istante in cui la corrente nella fase n° 1 è massima, le correnti nelle fasi n° 2 e n° 3 sono negative e pari alla metà del valore massimo. La distribuzione dei poli magnetici lungo il traferro è quella di figura 4.2.12.

Dopo mezzo periodo la corrente nella fase n° 1 diviene massima negativa, mentre le correnti nelle fasi n° 2 e n° 3 divengono positive e pari alla metà del valore massimo; la situazione si modifica e diviene quella di figura 4.2.13

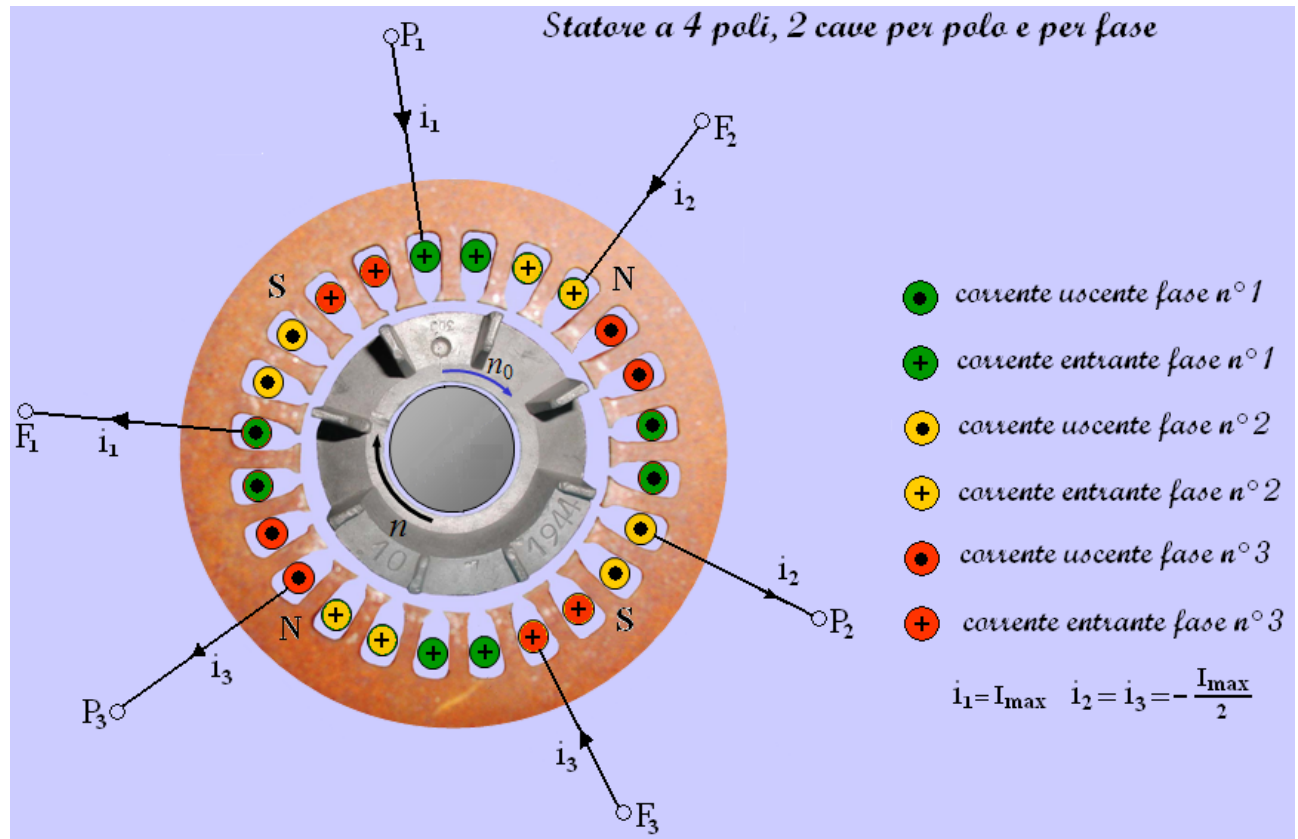


Figura 4.2.12

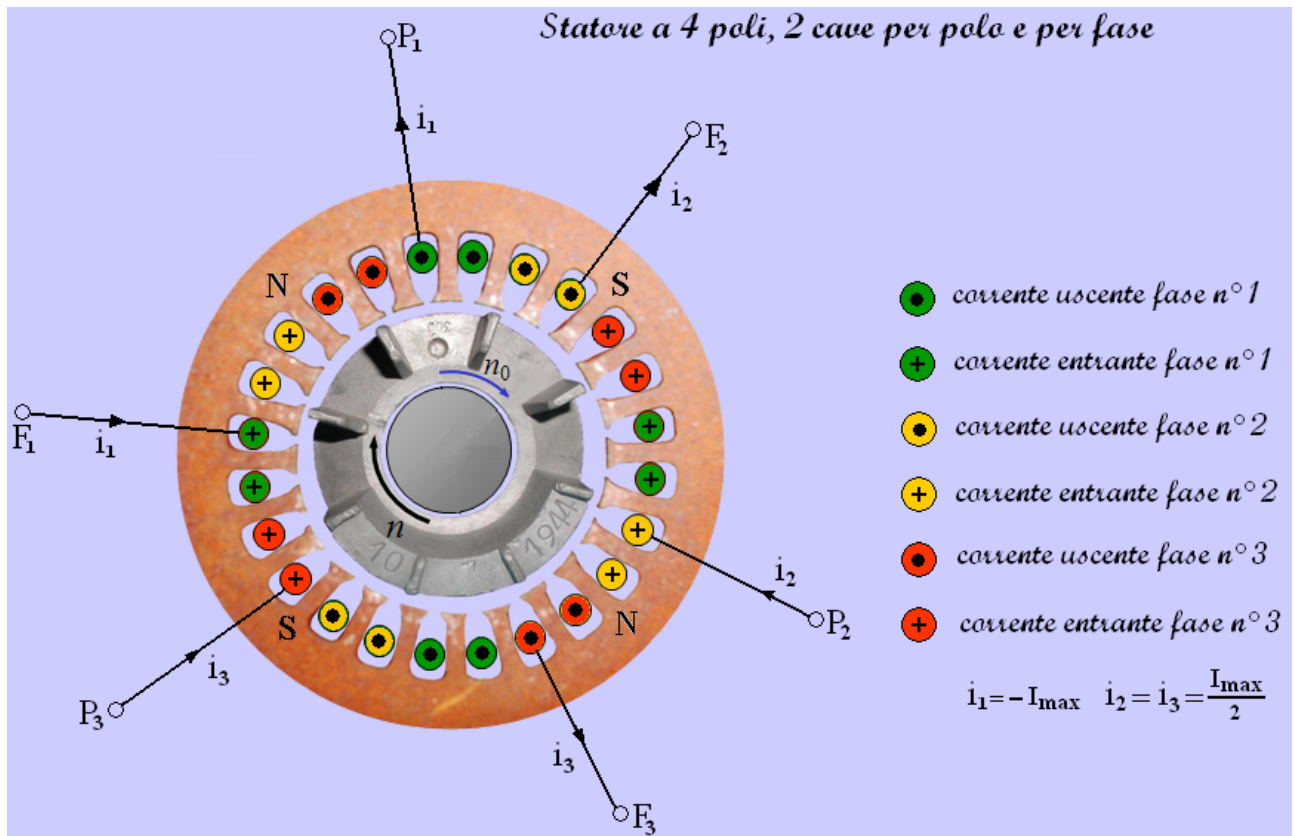


Figura 4.2.13

Come conseguenza di ciò, i poli sono ruotati di un quarto di giro. Dopo un altro mezzo periodo la situazione diviene come quella della figura 4.2.12, ossia si ha ancora una rotazione di un altro quarto di giro. Occorrono due periodi delle grandezze elettriche per ottenere un giro del campo magnetico. Se, come in precedenza, indichiamo con T il periodo delle grandezze elettriche correnti e con T_ω il periodo del campo rotante si ha la seguente corrispondenza:

- $p = 2$ (due coppie di poli), $T_\omega = 2 T$

Se il ragionamento lo ripetiamo per sei poli magnetici ($p = 3$), otteniamo che:

- $p = 3$ (tre coppie di poli), $T_\omega = 3 T$

Generalizzando. È evidente che risulta:

$$T_\omega = p \cdot T \quad (4.2.2)$$

La velocità del campo magnetico rotante è espressa da:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi}{T_\omega} = \frac{2 \cdot \pi}{p \cdot T} = \frac{\omega}{p}$$

cioè la (3.2.1). Esprimendo la ω_0 in funzione del numero di giri n_0 , e la pulsazione ω in funzione della frequenza f si ha:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}$$

da cui si trae:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (4.2.3)$$

La ω_0 prende il nome di **velocità angolare di sincronismo** del campo magnetico rotante, mentre n_0 prende il nome di **numero di giri di sincronismo** del campo magnetico rotante.

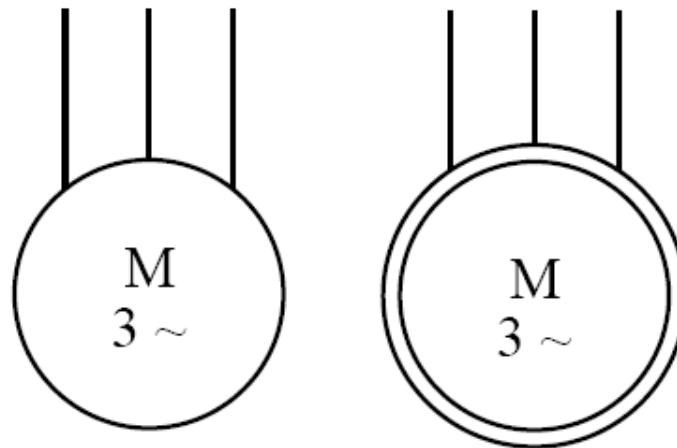
Ora, essendo la frequenza f costante e p un numero intero, il numero di giri al minuto n_0 potrà assumere solamente certi valori e, poiché la velocità effettiva di rotazione di un MAT è solo leggermente inferiore a quella di sincronismo, queste saranno le sole velocità possibili per un MAT. Se un motore ha $p = 4$ coppie di poli, alla frequenza $f = 50$ Hz, la velocità di rotazione dell'albero è molto prossima a $n = 750$ giri/min.

• Rotore

A seconda del tipo di avvolgimento rotorico esistono due diversi tipi di MAT:

- a gabbia di scoiattolo,
- a rotore avvolto.

I segni grafici secondo le norme CEI, usati per individuare questi due tipi di motore, sono mostrati in Figura 4.2.14.

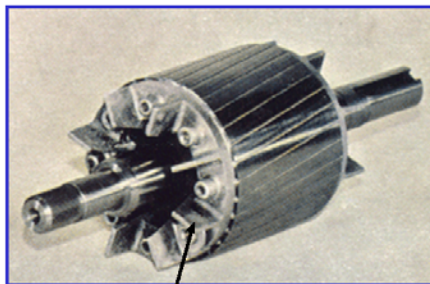


Rotore a gabbia di scoiattolo Rotore avvolto

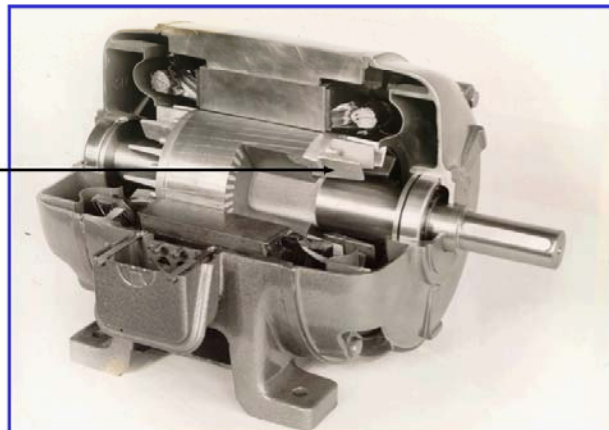
Figura 4.2.14

Il primo dà luogo al più semplice e robusto dei MAT: in ognuno dei canali, di rotore si infila una sbarra di rame (o di alluminio), le cui testate, ad entrambe le terminazioni, vengono chiuse da un anello di rame. Il rotore ha così la forma di Figura 4.2.15 e viene chiamato rotore a “***gabbia di scoiattolo***” o “***in corto circuito***”. È evidente che questo circuito presenta resistenze bassissime e non ha un numero di poli propri, adeguandosi, in maniera naturale, al numero dei poli di statore, che può essere un numero qualsiasi. Le tensioni in gioco per ogni barra sono molto basse, dell'ordine di qualche volt, mentre le correnti, data la bassa resistenza, sono piuttosto elevate.

Queste bassissime resistenze sono causa di inconvenienti all'atto dell'avviamento: in queste condizioni il MAT si comporta come un trasformatore, in cui lo statore è il primario ed il rotore, fermo all'avviamento, rappresenta il secondario, chiuso in corto circuito. Pertanto, le correnti in gioco, sia statoriche che rotoriche, sono paragonabili a quelle di un trasformatore in corto circuito alimentato a tensione nominale. Le correnti assorbite dallo statore in queste condizioni possono raggiungere 4 - 10 volte la corrente nominale, a seconda del tipo di rotore; questa corrente, tuttavia, è così sfasata, che la coppia di spunto, cioè la coppia necessaria ad avviare il motore, risulta essere particolarmente bassa.



anelli di cortocircuito con
alette di raffreddamento



Per motori di potenza elevata e che debbono partire sotto carico, risulta necessario limitare la corrente di spunto e ridurre lo sfasamento tra tensione e corrente. Per far ciò occorre aumentare la resistenza rotorica, anche se un aumento della resistenza rotorica comporta un aumento delle perdite che, a regime, significherebbe una sicura diminuzione del rendimento. Per conciliare queste due esigenze contrastanti, cioè elevate resistenze all'avviamento e basse resistenze a regime, si è abbandonato, per potenze elevate, il motore a gabbia di scoiattolo per sostituirlo con quello **"a rotore avvolto"**, o con quello a doppia gabbia anche per motori di potenza (centinaia di kW) come mostra la seguente figura:

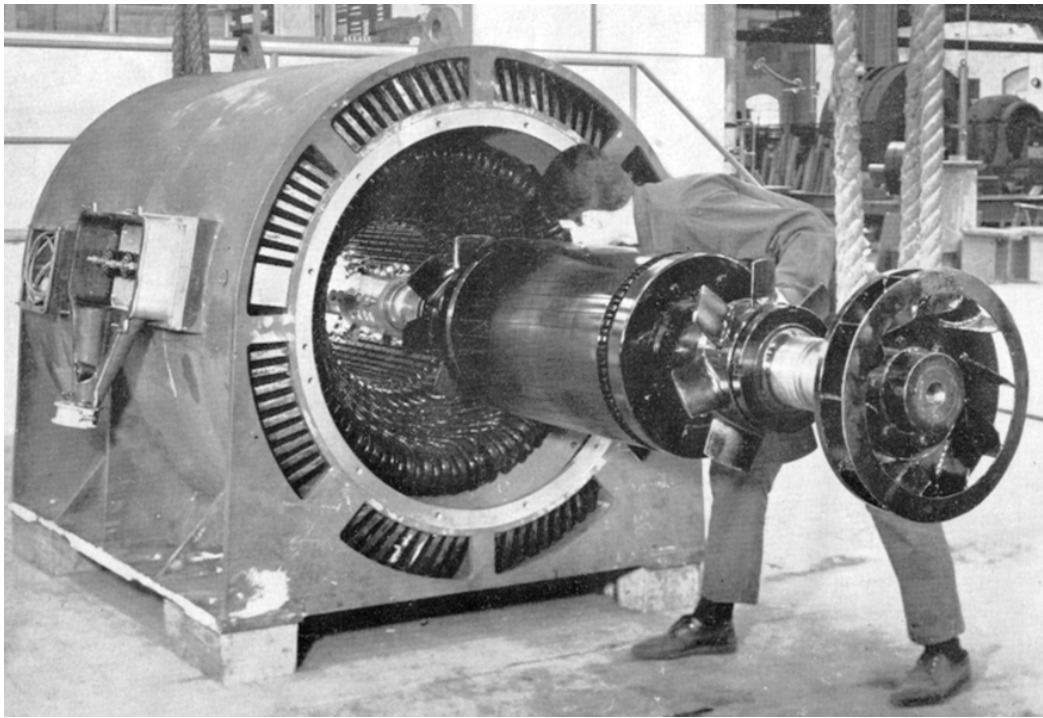


Figura 4.2.15

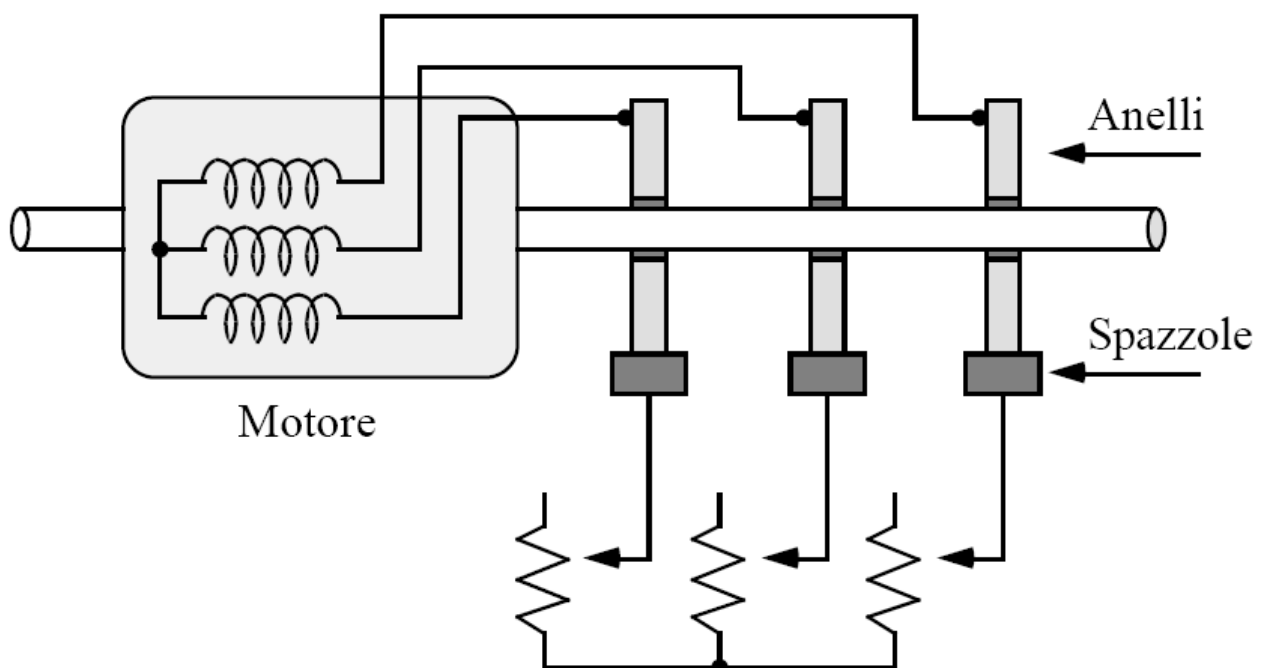


Figura 4.2.16: schema del motore con rotore avvolto e reostato di avviamento.

Nelle macchine con rotore avvolto, nelle cave rotoriche vi è un normale avvolgimento, simile a quello statorico, di tipo trifase e collegato a stella, come mostrato in Figura 4.2.16. I capi di queste fasi vengono collegati a degli anelli conduttori, calettati sull'albero del motore ma isolati da questo, sui quali poggiano delle spazzole collegate ad un reostato esterno di avviamento, completamente inserito all'atto di chiusura dell'interruttore sulla linea, ma che va disinserito, gradualmente, all'aumentare della velocità di rotazione e completamente escluso, cortocircuitato, in condizioni di normale funzionamento.

Vale la pena di precisare che il numero delle fasi del rotore può essere diverso da quello di statore, ma è indispensabile che il numero di poli sia eguale per i due avvolgimenti.

Per mostrarvi due concrete realizzazioni dei due tipi di motori discussi, nella Figura 4.2.17 abbiamo riportato due spaccati del MAT a gabbia di scoiattolo e a rotore avvolto.

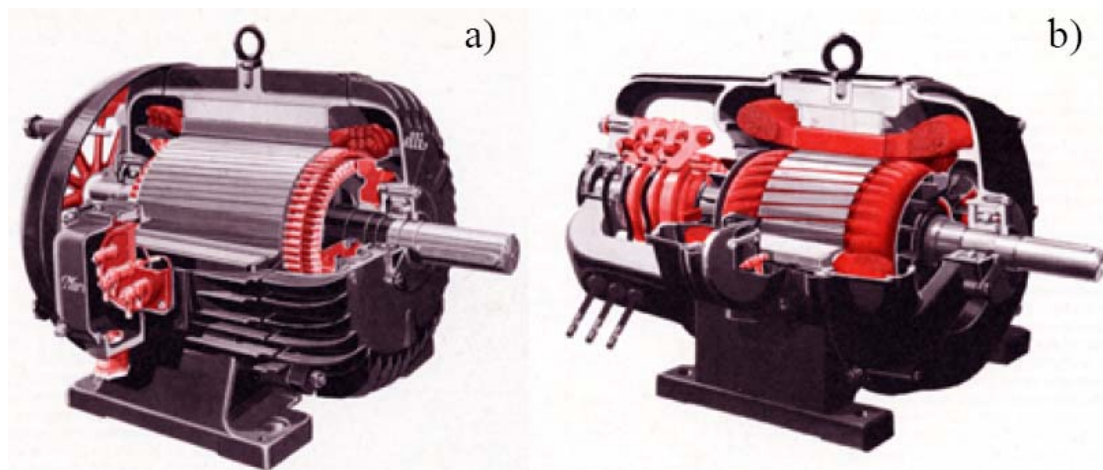


Figura 4.2.17: motore asincrono (a) con avvolgimenti rotorici in cortocircuito e (b) con avvolgimenti rotorici collegati ad anello.

Passiamo ora ad esaminare i fenomeni elettrici che avvengono negli avvolgimenti che creano il campo magnetico rotante.

4.3 Funzionamento con rotore fermo

Sotto l'aspetto elettrico un MAT con rotore fermo si comporta sostanzialmente come un trasformatore trifase, in cui lo statore assume il ruolo di primario ed il rotore quello di secondario. Il MAT può essere schematizzato come in Figura 4.2.16, dove si è supposto che tanto l'avvolgimento di statore che quello di rotore siano connessi a stella, con il circuito rotorico, però, aperto.

In questo caso il MAT assorbirà dalla linea che lo alimenta soltanto le correnti magnetizzanti I_μ , necessarie per creare il campo magnetico rotante all'interno della macchina, mentre non circolerà alcuna corrente indotta nel rotore, essendo questo aperto.

La figura 4.3.1 rappresenta, attraverso un disegno panoramico, due poli successivi del campo rotante, un Nord ed un Sud, raffigurati attraverso il profilo sinusoidale che i valori locali di induzione assumono. B_i è un valore generico dell'induzione, B_{MAX} il suo valore massimo, B_m il valore medio per polo. È inoltre raffigurata la porzione di statore interessata dai due poli, ipotizzando di avere due cave per polo e per fase e quindi sei cave sotto l'effetto del medesimo polo.

In ciascuna cava è inserito l'avvolgimento induttore ed i lati attivi di tale avvolgimento sono visti in sezione. Se il campo rotante taglia i lati attivi viaggiando con velocità lineare V [m/s] da sinistra verso destra, in ciascun lato attivo si svilupperà una forza elettromotrice indotta avente verso entrante nei conduttori tagliati dal polo Nord e verso uscente nei conduttori tagliati dal polo Sud.

I lati attivi appartenenti alla stessa fase (1, 1', 2, 2' per la prima, 3, 3', 4, 4' per la terza, 5, 5', 6, 6' per la seconda) sono collegati in serie tra di loro. La figura rappresenta lo schema panoramico dell'intero motore se i suoi poli sono due, metà dell'intero se i suoi poli sono quattro, un terzo dell'intero se i suoi poli sono sei, eccetera.

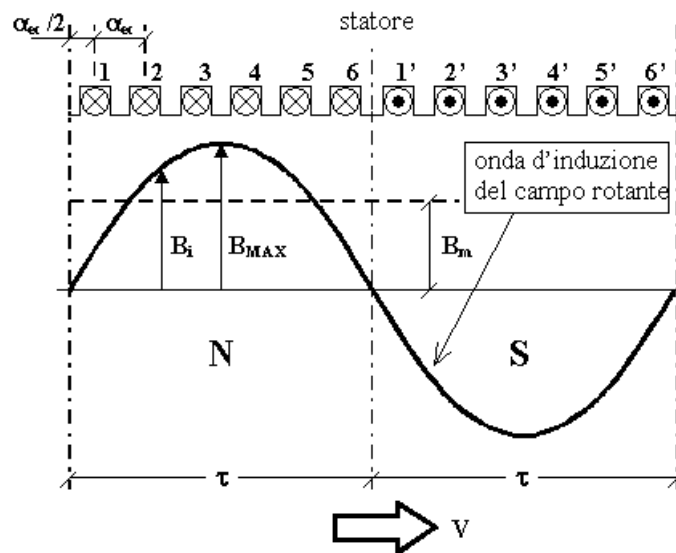


Figura 4.3.1

Si supponga che il campo rotante (di velocità n_0) abbia, nel traferro, una distribuzione d'induzione di tipo sinusoidale e che si muova con una velocità lineare costante V [m/s] rispetto agli avvolgimenti di statore. In ciascun conduttore attivo posto nelle cave di statore si indurrà una f.e.m. di valore istantaneo

$$e_i(t) = b_i(t) \cdot \ell \cdot v \quad (4.3.1)$$

in cui $b_i(t)$ è il valore istantaneo della componente d'induzione normale al conduttore ed ℓ [m] è la lunghezza attiva del conduttore.

Poiché l'induzione è, nello spazio, sinusoidale e scorre con velocità costante, in ogni conduttore si induce, nel tempo, una f.e.m. sinusoidale. Si deduce che il tempo T [s] che impiega l'intera onda di induzione (che occupa il doppio di un passo polare τ) a tagliare il conduttore corrisponde al periodo della f.e.m. indotta nel conduttore medesimo. Pertanto la frequenza delle grandezze elettriche indotte statoriche vale:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v}{2 \cdot \tau} \quad (4.3.2)$$

da cui si ricava che la velocità v può essere espressa da:

$$v = 2 \cdot f \cdot \tau \quad (4.3.3)$$

Il valore medio della f.e.m. indotta in un conduttore di statore si può esprimere con la relazione:

$$E_{i,m} = B_m \cdot \ell \cdot v \quad (4.3.4)$$

essendo B_m il valore medio dell'induzione per polo. Moltiplicando ambo i membri per il fattore di forma K_f si ottiene il valore efficace della f.e.m. indotta in ciascun conduttore di statore:

$$E_i = K_f \cdot B_m \cdot \ell \cdot v \quad (4.3.5)$$

Indicando con Φ_p il flusso per polo e con S_p la sezione trasversale relativa ad un polo, si ha:

$$B_m = \frac{\Phi_p}{S_p} = \frac{\Phi_p}{\ell \cdot \tau} \quad (4.3.6)$$

che, sostituita insieme con la (4.3.3) nella (4.3.5), fornisce:

$$E_i = K_f \cdot B_m \cdot \ell \cdot v = K_f \frac{\Phi_p}{\ell \cdot \tau} \ell \cdot 2 \cdot \tau \cdot f = 2 \cdot K_f \cdot f \cdot \Phi_p \quad (4.3.7)$$

Infine, considerando che per comporre una fase statorica si collegano N_1 conduttori in serie e che l'avvolgimento sarà caratterizzato da un coefficiente di Blondel K_{b1} e da un eventuale coefficiente di accorciamento di passo K_{p1} , il valore efficace che assume la f.e.m. indotta in ciascuna fase statorica diviene:

$$E_i = 2 \cdot K_f \cdot K_{b1} \cdot K_{p1} \cdot N_1 \cdot f \cdot \Phi_p \quad (4.3.8)$$

che, riassumendo tutte le costanti, si riduce a:

$$E_1 = K_1 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_p \quad (4.3.9)$$

Un analogo ragionamento condotto per il rotore porta ad una f.e.m. indotta per fase rotorica espressa da:

$$E_{20} = K_2 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_p \quad (4.3.10)$$

dove le costanti K_1 e K_2 , dette fattori di Kapp, sono pari a $2 \cdot K_f \cdot K_b \cdot K_p$, con $K_f \cong 1.11$ fattore di forma dell'onda sinusoidale, K_b , fattore di riduzione, minore dell'unità, detto anche coefficiente di Blondel, che tiene conto del fatto che non tutti i conduttori per fase sono allocati nella stessa cava, ma, a gruppi, in cave contigue e che quindi le f.e.m. indotte in tali conduttori sono leggermente sfasate tra di loro, causa lo sfasamento tra una cava e l'altra e K_p coefficiente di raccorciamento del passo per rendere la forma d'onda più assimilabile ad una di tipo sinusoidale. Si noti che, in generale, K_1 è diverso da K_2 .

Le (4.3.9) e (4.3.10), tenendo conto del fatto che dipendono dalla variazione di velocità tra campo rotante e statore e campo rotante e rotore (che in questa ipotesi è fermo), possono essere anche scritte nel seguente modo:

$$E_1 = A \cdot \Phi \cdot n_0 ; E_{20} = B \cdot \Phi \cdot n_0 \quad (4.3.11)$$

Con A e B costanti opportune. A rotore fermo la frequenza delle f.e.m. rotoriche indotte sono quelle di alimentazione, inoltre come già visto per il trasformatore, al rapporto tra E_1 ed E_{20} si dà il nome di rapporto di trasformazione del motore

$$K = \frac{E_1}{E_{20}} = \frac{K_1 \cdot N_1}{K_2 \cdot N_2} \quad (4.3.12)$$

Si tenga presente che, esistendo ora un traferro, la riluttanza del circuito magnetico del MAT sarà più alta che nel trasformatore e, conseguentemente, l'induttanza di magnetizzazione, ovvero la relativa reattanza, dei circuiti equivalenti semplificati, risultano relativamente più piccole che nei trasformatori, mentre le reattanze di dispersione sono più grandi.

Finora abbiamo considerato il caso di rotore fermo e aperto, tralasciando il caso del rotore fermo ma chiuso. Questa particolare condizione verrà trattata più avanti, e viene definita **“funzionamento in corto circuito”**, dicitura non esatta, in quanto, anche durante il funzionamento normale, le fasi rotoriche sono sempre chiuse in corto circuito.

4.4 Funzionamento con rotore in movimento

Prima di addentrarci nello studio del MAT introduciamo una variabile tipica di questo motore, lo **scorrimento**, che lega il numero di giri del rotore a quello di sincronismo del campo magnetico rotante, che, come già sappiamo, è pari a

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}$$

(espresso in giri al minuto primo), con f “frequenza delle correnti statoriche” e p “numero delle coppie dei poli della macchina. Allora, si definisce **scorrimento assoluto** la quantità:

$$S = n_0 - n \quad (4.4.1)$$

e **scorrimento relativo** la quantità:

$$s = \frac{S}{n_0} = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (4.4.2)$$

avendo indicato con n il numero di giri al minuto primo del rotore.

Il numeratore di tale relazione, $n_0 - n$, è la velocità relativa tra campo magnetico rotante e rotore. Lo scorrimento, quindi, esprime la frazione di giri, o il numero di giri, persi dal rotore rispetto al campo magnetico rotante, per ogni giro di questo. Per convenzione, è positiva la velocità del rotore se questo ruota nello stesso verso del campo rotante. Ora, poiché la velocità del rotore può assumere qualsiasi valore, lo scorrimento potrà variare da più a meno infinito. In particolare, quando il rotore ruota alla velocità di sincronismo (praticamente nel funzionamento a vuoto), $n = n_0$, risulta $s = 0$; quando il rotore è fermo, cioè $n = 0$ (ossia all’avviamento), si avrà, invece, $s = 1$.

Per valori decrescenti della velocità del rotore da quella di sincronismo a zero, lo scorrimento passa da 0 a 1. Se la velocità del rotore è superiore a quella di sincronismo $n > n_0$, risulta che $s < 0$; se, invece, il rotore ruota in senso opposto a quello sincrono, $n < 0$, risulterà, quindi, $s > 1$.

Oltre che in relazione al numero di giri, lo scorrimento si può esprimere anche direttamente in funzione delle velocità angolari. Essendo:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60}; \quad \Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

la velocità angolare di sincronismo e la velocità angolare del rotore, risulta:

$$s = \frac{\omega_0 - \Omega}{\omega_0} \quad (4.4.3)$$

Dalla (3.4.2) e dalla (3.4.3) si ricavano immediatamente le seguenti relazioni:

$$n = n_0 \cdot (1 - s); \quad \Omega = \omega_0 \cdot (1 - s) \quad (4.4.4)$$

e, ricordando che:

$$\omega_0 = \frac{\omega}{p}$$

la seconda delle (3.4.4) può anche scriversi:

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \cdot (1 - s) \quad (4.4.5)$$

Introdotta il concetto di scorrimento, passiamo ora ad esaminare i fenomeni connessi con le tensioni e le correnti statoriche e rotoriche.

Supponiamo di alimentare l'avvolgimento statorico (per ipotesi con le fasi connesse a stella) con un sistema trifase simmetrico di tensioni con valore efficace e frequenza nominali, e di avere l'avvolgimento rotorico chiuso e senza alcun carico resistente sull'albero del MAT. In queste condizioni il rotore comincia a girare ed accelera fino a portarsi ad una velocità molto prossima a quella di sincronismo per cui lo scorrimento $s \cong 0$. È questa la condizione di funzionamento a vuoto del motore, in cui il MAT assorbe dalla rete una terna di correnti, di valore efficace compreso tra il 20% ed il 40% della corrente nominale, che danno luogo ad un campo rotante, cioè un'induzione magnetica rotante, a velocità di sincronismo, praticamente sinusoidale, lungo il traferro, tra lo statore ed il rotore.

Nei conduttori di statore si inducono, come abbiamo visto in precedenza, f.e.m. di valore efficace (riferito, per semplicità, alla prima fase) espresse dalla prima delle (4.3.9), che qui riportiamo:

$$E_1 = K_1 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_p$$

mentre nel rotore non si induce alcuna f.e.m. in quanto non si ha movimento relativo tra campo magnetico e conduttori rotorici che ruotano, praticamente, alla velocità di sincronismo.

Come per il trasformatore, oltre il flusso principale che si concatena con le spire degli avvolgimenti statorici e rotorici, è presente un flusso disperso, che si chiude in aria, per cui la l'equazione relativa ad una fase statorica sarà espressa da:

$$\bar{V}_1 = -\bar{E}_1 + (R_1 + jX_{1d}) \cdot \bar{I}_{10} \quad (4.4.6)$$

dove R_1 e X_{1d} sono, rispettivamente, la resistenza e la reattanza di dispersione della (prima) fase statorica, attraversate dalla corrente $\bar{I}_{10}$. Questa relazione tra fasori può essere rappresentata secondo il diagramma di Figura 4.4.1, dove $-\bar{E}_1$ è sfasato di 90° in anticipo rispetto al flusso principale ed $\bar{I}_{10}$ è sfasato in anticipo, sempre rispetto al flusso, dell'angolo di perdita α .

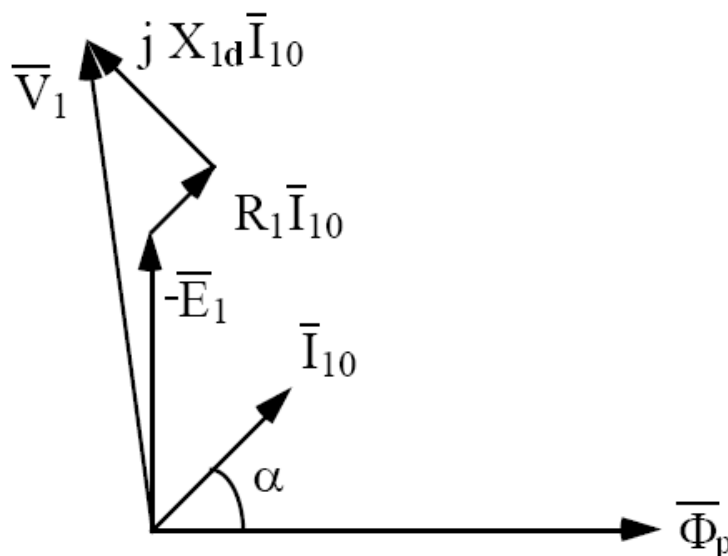


Figura 4.4.1 diagramma fasoriale di una fase statorica nel funzionamento a vuoto di un MAT.

La corrente a vuoto I_{10} risulta, percentualmente, molto più grande di quella di un trasformatore a vuoto per due motivi: la componente magnetizzante aumenta per effetto del notevole traferro e la componente attiva, per la presenza di perdite meccaniche, dovute all'attrito ed alla ventilazione, risulta più consistente. In queste condizioni il MAT assorbe le due potenze

$$P_0 = 3 \cdot V_1 \cdot I_{10} \cdot \cos \varphi_0 ; Q_0 = 3 \cdot V_1 \cdot I_{10} \cdot \sin \varphi_0 \quad (4.4.7)$$

La potenza attiva è dovuta, per la quasi totalità, alle perdite nel ferro statorico, per isteresi e correnti parassite, alle perdite meccaniche per attrito nei cuscinetti e ventilazione, alle perdite nel rame negli avvolgimenti statorici.

Le perdite nel rame nei circuiti rotorici si considerano trascurabili perché tali sono le correnti rotoriche, come pure le perdite nel ferro rotorico visto che questi viaggia praticamente a velocità di sincronismo. Essendo, poi, il fattore di potenza a vuoto molto piccolo, pari circa a 0.1 (0.2 al massimo), la potenza reattiva Q_0 è notevole.

Le grandezze caratteristiche del funzionamento a vuoto vengono ricavate, così come per il trasformatore, con una prova a vuoto.

Un MAT funziona sotto carico se si applica all'albero motore una coppia resistente che lo rallenta, per cui le correnti rotoriche assumeranno un valore tale da sviluppare una coppia motrice pari a quella resistente e questo equilibrio si stabilisce ad una velocità inferiore a quella di sincronismo, in corrispondenza di uno scorrimento tanto maggiore, quanto maggiore è il momento resistente.

Non solo, ma le f.e.m. rotoriche avranno ampiezza e frequenza variabili al variare della velocità del rotore: se il rotore ruota con velocità pari a n_0 giri al minuto, mentre il campo magnetico rotante ruota a n_0 giri al minuto, le variazioni di flusso concatenato avvengono con frequenza:

$$f_2 = p \cdot \frac{n_0 - n}{60} = \frac{n_0 - n}{n_0} \cdot \frac{p \cdot n_0}{60} = s \cdot f \quad (4.4.8)$$

La f.e.m. indotta in ogni fase dell'avvolgimento rotorico assumerà il valore efficace dato da:

$$E_2(s) = E_{2s} = K_2 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \Phi_p = K_2 \cdot s \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_p = s \cdot E_{20} \quad (4.4.9)$$

Come si può ben vedere sia la f.e.m. indotta E_{2s} che la frequenza f_2 sono direttamente proporzionali allo scorrimento "s".

Se $s = 0$, cioè $n = n_0$, sia E_{2s} che f_2 sono uguali a zero, il che equivale a dire che alla velocità di sincronismo non c'è variazione di flusso.

Se $s = 1$, si ha $n = 0$, cioè il rotore è bloccato, per cui $E_{2s} = E_{20}$ ed $f_2 = f$ e la macchina si comporta come un trasformatore.

Durante il normale funzionamento, con le fasi rotoriche chiuse in cortocircuito, le f.e.m. indotte faranno circolare correnti a frequenza f_2 , che, costituendo un sistema polifase simmetrico, creeranno un campo magnetico rotante con velocità:

$$n_2 = \frac{60 \cdot f_2}{p} = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot s = n_0 \cdot \frac{n_0 - n}{n_0} = n_0 - n$$

Ora, poiché il rotore ruota con velocità n , il campo magnetico creato dal rotore ruota, rispetto allo statore, con velocità:

$$n_2 = (n_0 - n) + n = n_0 \quad (4.4.10)$$

vale a dire alla stessa velocità del campo magnetico statorico. I due campi magnetici viaggiano alla stessa velocità, sono immobili l'uno rispetto all'altro e dalla loro risultante ha origine il flusso al traferro.

Come ogni macchina trifase, costruita simmetricamente nelle sue fasi e sottoposta a tensioni simmetriche, per procedere nel suo studio, possiamo considerare una sola fase e, dunque, per ogni fase due circuiti elettrici ed uno magnetico. Ogni fase rotorica e statorica è caratterizzata dalla presenza delle resistenze ohmiche R_1 ed R_2 degli avvolgimenti di statore e di rotore; in serie a queste resistenze, vi sono le reattanze di dispersione statorica e rotorica:

$$X_1 = \omega \cdot L_{1d} \text{ e } X_2(s) = \omega_2(s) \cdot L_{2d}$$

solo che quest'ultima è variabile con la velocità del motore. Infatti risulta:

$$X_2(s) = 2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot L_{2d} = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot f \cdot L_{2d} = s \cdot X_{20} \quad (4.4.11)$$

dove X_{20} è la reattanza di dispersione di ciascuna fase rotorica, considerata, come ci ricorda il pedice "0", a rotore fermo.

Se il rotore è chiuso in corto circuito in esso circolerà la corrente

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_{2s}}{R_2 + jX_2(s)} = \frac{s \cdot \bar{E}_{20}}{R_2 + j \cdot s \cdot X_{20}} = \frac{\bar{E}_{20}}{\frac{R_2}{s} + jX_{20}} \quad (4.4.12)$$

In altri termini, ogni fase dell'avvolgimento rotorico si comporta come se tensione e corrente avessero frequenza fissa, pari a quella di rete, ed un resistore variabile con lo scorrimento. La tensione, inoltre, è quella ricavabile da un trasformatore ideale con rapporto fisso, indipendente da s , e pari al rapporto di trasformazione a rotore bloccato dato dalla (4.3.12):

$$K = \frac{E_1}{E_{20}} = \frac{K_1 \cdot N_1}{K_2 \cdot N_2}$$

Questo resistore variabile può essere scomposto in due parti:

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + \frac{1-s}{s} \cdot R_2 \quad (4.4.13)$$

per cui si può dire che in ogni fase rotorica, oltre alla R_2 propria della fase, è presente una resistenza fittizia, pari a $R_2(1-s)/s$ con la funzione di rappresentare il carico meccanico del motore; pertanto, nei confronti della rete, il carico si comporta come un utilizzatore puramente resistivo e variabile con lo scorrimento.

Da quanto detto in precedenza si deduce agevolmente una certa analogia tra MAT e trasformatore per cui si ha la possibilità di rappresentare il MAT con un circuito equivalente simile a quello del trasformatore, mostrato in Figura 4.4.2. Questo circuito è costituito dagli avvolgimenti di statore (primario), da un trasformatore ideale che rappresenta l'accoppiamento magnetico tra statore e rotore, e dagli avvolgimenti rotorici (secondario). Esso ben rappresenta il MAT, dal momento che se $s = 0$, cioè $n = n_0$, ruotando il rotore alla velocità di sincronismo, la corrente $\bar{I}_{2s}$ è nulla in quanto:

$$R_2 \cdot \frac{1-s}{s} \rightarrow \infty$$

ed il secondario è come se fosse a circuito aperto.

Quindi risulta: $\bar{I}_1 = \bar{I}_{10}$. Inoltre, se $s = 1$, cioè $n = 0$ (rotore bloccato), risulta

$$R_2 \cdot \frac{1-s}{s} = 0$$

per cui ci troviamo nella condizione di funzionamento di cortocircuito.

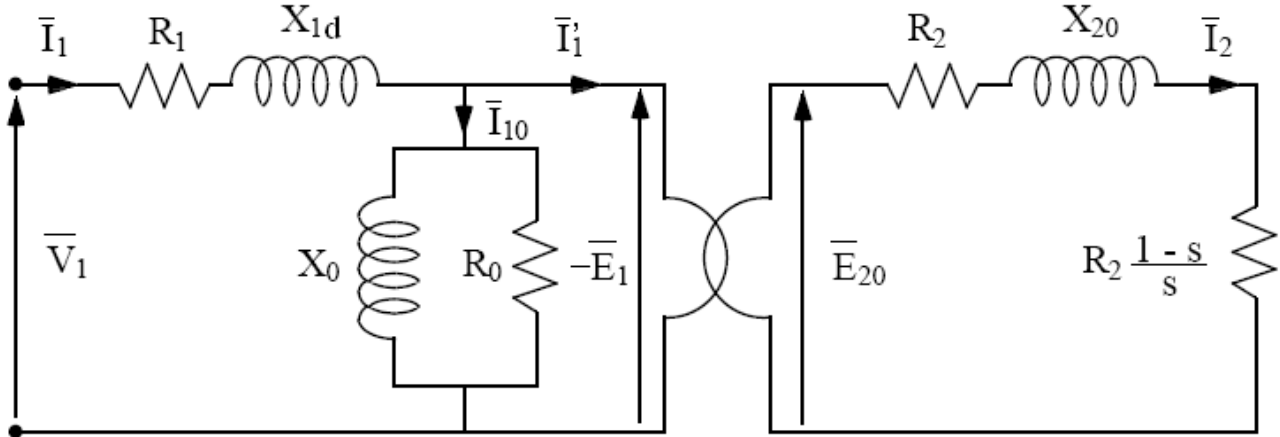


Figura 4.4.2 Circuito equivalente riferito ad una fase

Proprio come per i trasformatori si può tracciare il diagramma, relativo ai fasori di una sola fase del MAT, rappresentato in Figura 4.4.3. Partendo dal flusso Φ_p , si traccia la f.e.m. $\bar{E}_1$ indotta nello statore che, come trasformatori, è sfasata di 90° in ritardo rispetto al flusso, quindi si traccia la f.e.m. $\bar{E}_{20}$ indotta nel rotore, anch'essa in ritardo di 90° rispetto al flusso e quindi in fase con $\bar{E}_1$.

La corrente rotorica:

$$\bar{I}_2 = \frac{s \cdot \bar{E}_{20}}{R_2 + js \cdot X_{20}} = \frac{\bar{E}_{20}}{\frac{R_2}{s} + jX_{20}}$$

è sfasata in ritardo, rispetto alla f.e.m. $\bar{E}_{20}$, dell'angolo

$$\psi_2 = \tan^{-1} \frac{X_{20}}{\frac{R_2}{s}} = \tan^{-1} \frac{s \cdot X_{20}}{R_2} \quad (4.4.14)$$

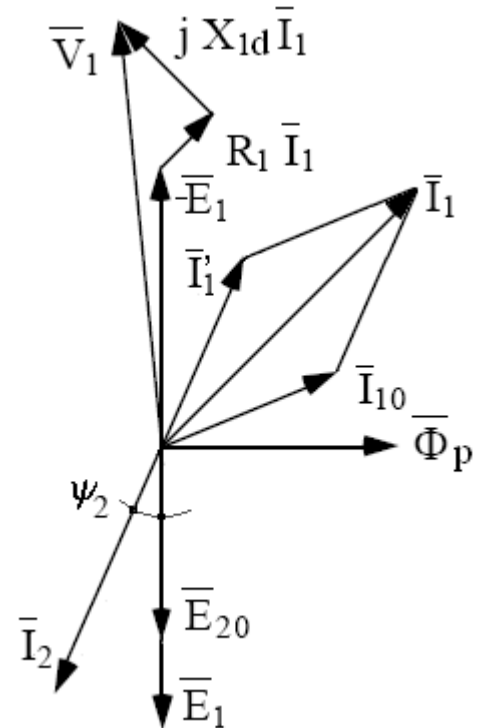


Figura 4.4.3

Ricavata, poi, la corrente di reazione

$$\bar{I}'_1 = -\frac{\bar{I}_2}{k}$$

per risalire alla corrente assorbita dal motore $\bar{I}_1$, basta eseguire la somma (primo principio di Kirchhoff) come appresso indicato:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{10} + \bar{I}'_1$$

essendo $\bar{I}_{10}$ la corrente assorbita a vuoto sempre da una fase del motore ed espressa dalla relazione:

$$\bar{I}_{10} = \frac{\bar{E}_1}{\bar{Z}_0}$$

con $\bar{Z}_0$ che rappresenta l'impedenza del cappio parallelo. La tensione di alimentazione $\bar{V}_1$, infine, discende semplicemente dalla relazione:

$$\bar{V}_1 = -\bar{E}_1 + (R_1 + jX_{1d}) \cdot \bar{I}_1$$

Se si ritengono costanti, nel passaggio dalla condizione di funzionamento a vuoto a quella sotto carico, le cadute di tensione su R_1 ed X_{1d} , a parità di V_1 , sarà costante anche E_1 e, di conseguenza, il flusso Φ_p . L'approssimazione che ne consegue è dell'ordine di qualche per cento, accettabile per il pratico impiego del motore, ed offre una notevole semplificazione della trattazione. L'impedenza secondaria è data da:

$$\bar{Z}_2(s) = R_2 + js \cdot X_{20}$$

il cui modulo vale:

$$Z_2(s) = \sqrt{R_2^2 + s^2 \cdot X_{20}^2}$$

Essendo :

$$X_{20} = (5 \div 10)R_2$$

risulta:

$$X_{20}^2 = (25 \div 100)R_2^2$$

quindi:

$$R_2^2 \ll X_{20}^2$$

Inoltre, continuando l'analogia con i trasformatori, è possibile tracciare un circuito equivalente, dove i parametri del rotore sono riportati allo statore figura 4.4.4 e risulta:

$$R_{2,1} = K^2 \cdot R_2 ; \quad X_{2,1} = K^2 \cdot X_{20} \quad (4.4.15)$$

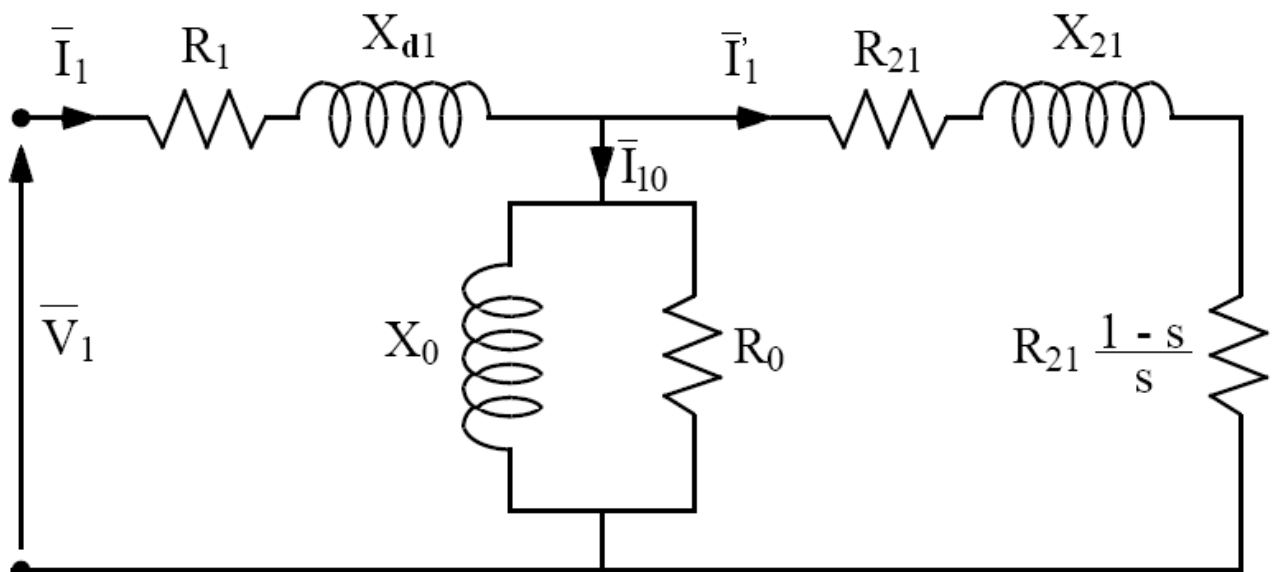


Figura 3.4.4 Circuito equivalente primario

Il ramo derivato, costituito dal resistore R_0 e dalla reattanza X_0 , è attraversato dalla componente attiva e reattiva della corrente a vuoto, la prima necessaria per sopperire alle perdite a vuoto, nel ferro e negli avvolgimenti, la seconda utile a produrre il flusso. Tuttavia, come per i trasformatori, si può utilizzare il modello semplificato (a flusso bloccato) di Figura 4.4.5.

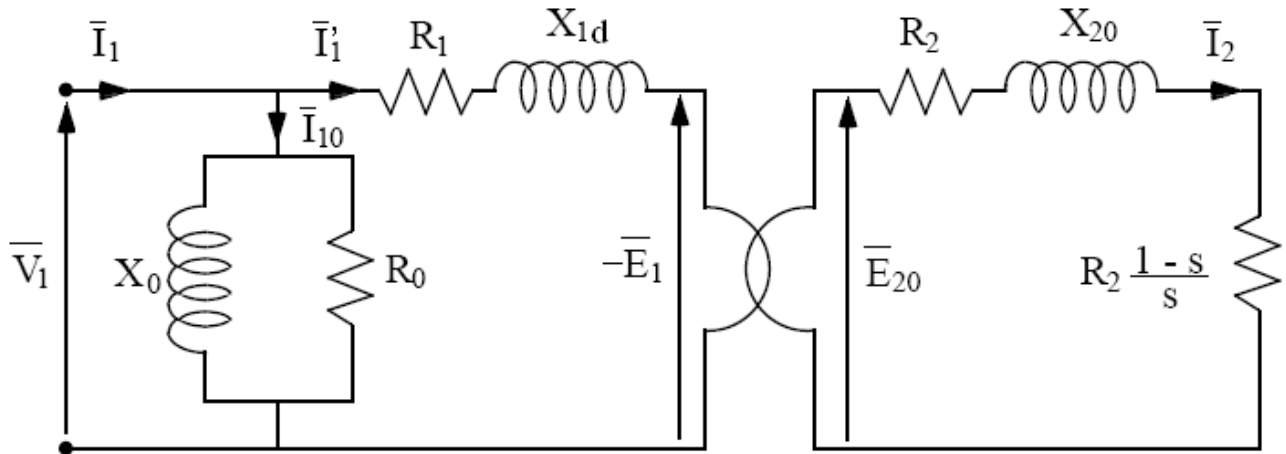


Figura 4.4.5

In questo modello la corrente a vuoto non dipende dalle condizioni di carico, essendo determinabile direttamente dalla tensione allo statore. Questa approssimazione, tuttavia, è meno sostenibile rispetto al trasformatore, a causa del maggior valore della reattanza di dispersione. Il circuito equivalente così ottenuto, comunque, è un circuito semplificato in cui la corrente $\bar{I}_{10}$ rimane costante al variare del carico ed è nullo il suo contributo alle cadute di tensione statoriche. Per le applicazioni pratiche, ogni qual volta questa semplificazione possa ritenersi lecita, va fatta dato i notevoli vantaggi di semplificazione offerti. È chiaro che se i parametri primari vengono riportati al secondario, vanno divisi per il quadrato del rapporto di trasformazione.

Studiamo, infine, il **funzionamento in corto circuito** del MAT, che si ottiene a rotore fermo, cioè per $s = 1$: tale condizione si verifica tutte le volte che si avvia il motore o che, per un motivo qualsiasi, si blocca il rotore. In questo caso, facendo, ad esempio, riferimento alla Figura 4.4.2, si può scrivere che il valore efficace della corrente rotorica vale:

$$I_{2cc} = \frac{E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + X_{20}^2}} \quad (4.4.16)$$

che rappresenta un valore notevolmente più alto di quello che si ha nel funzionamento normale, mentre, trascurando la piccola $\bar{I}_{10}$, si ha:

$$I_{1cc} \cong \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_{21})^2 + (X_{1d} + X_{21})^2}} \quad (4.4.17)$$

cioè il valore efficace della corrente di spunto, corrente assorbita all'atto dell'avviamento dalla rete, che risulta essere fino a 10 volte la corrente nominale. La corrente $\bar{I}_{1cc}$, è sfasata, rispetto alla tensione $\bar{V}_1$ dell'angolo:

$$\varphi_{1cc} \cong \tan^{-1} \frac{X_{1d} + X_{21}}{R_1 + R_{21}} \quad (4.4.18)$$

In queste condizioni la potenza resa, quindi il rendimento, e le perdite meccaniche sono nulle perché il rotore è bloccato, mentre le perdite nel rame sono massime perché proporzionali al quadrato della corrente:

$$P_{cc} = 3 \cdot R_1 \cdot I_{1cc}^2 + 3 \cdot R_2 \cdot I_{2cc}^2 \quad (4.4.19)$$

Si hanno, inoltre, le perdite nel ferro di statore e di rotore, che pure sono massime perché $s = 1$ e, quindi, $f_2 = f$.

Il funzionamento a rotore bloccato viene effettuato in laboratorio nella prova in cortocircuito, alimentando però il motore a tensione ridotta (20% tipicamente, al massimo 30% del valore nominale), in modo tale da far circolare negli avvolgimenti la corrente nominale, proprio come per il trasformatore. La tensione di cortocircuito, però, è percentualmente più alta che nel trasformatore per la presenza di un traferro più grande. In queste condizioni si possono trascurare le perdite nel ferro, per cui la potenza assorbita dal motore in corto circuito è pari alle sole perdite nel rame statorico e rotorico.

4.5 Interpretazione fisica del circuito equivalente

Gli schemi circuitali equivalenti, discussi nel paragrafo precedente, riproducono correttamente le grandezze del MAT, ma sarebbero di ben poca utilità se non ci consentissero di interpretare anche altri fenomeni energetici e meccanici ed, in particolare, non ci dessero utili informazioni quantitative nella valutazione della potenza assorbita, dissipata e convertita.

• Potenze e rendimento

Ciascun MAT assorbe dalla linea la potenza apparente:

$$S = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \quad (4.5.1)$$

mentre la potenza attiva è data da:

$$P_1 = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (4.5.2)$$

Per arrivare alla potenza utile, disponibile cioè sull'asse del motore, occorre sottrarre alla potenza attiva P_1 tutte le perdite che si verificano sia nello statore che nel rotore. In particolare, si hanno:

- le perdite P_{Fe} nel ferro, considerate relativamente al solo statore, che nel circuito equivalente sono rappresentate dalla potenza attiva assorbita da R_0 :

$$P_{Fe} = 3 \cdot \frac{V_1^2}{R_0} \quad (4.5.3)$$

valutate in base al modello semplificato a flusso bloccato;

- le perdite per effetto Joule negli avvolgimenti di statore, pari a:

$$P_{Cu1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (4.5.4)$$

- le perdite addizionali, imputate anche allo statore, anche se distribuite su tutta la macchina, perdite non facilmente calcolabili e che tengono conto della non uniforme distribuzione della corrente nei conduttori d'indotto e delle perdite per correnti parassite nelle parti metalliche vicine agli avvolgimenti e che vengono convenzionalmente poste pari allo 0.5% della potenza assorbita dal motore:

$$P_{add} = 0,5\% \cdot P_1 \quad (4.5.5)$$

La potenza assorbita dal motore P_1 , depurata delle perdite nel rame, delle perdite nel ferro di statore e delle perdite addizionali, si trasmette dallo statore al rotore attraverso il traferro. Questa potenza viene chiamata **potenza al traferro**, o **potenza trasmessa** da statore a rotore, o **potenza sincrona**, poiché il suo trasferimento avviene alla velocità del campo magnetico rotante:

$$P_T = P_1 - P_{Fe} - P_{Cu1} - P_{add} \quad (4.5.6)$$

Infatti, con riferimento alla Figura 4.5.1, essa è la potenza entrante nel primario del trasformatore ideale e, quindi, eguale a quella uscente dal suo secondario; per questo motivo è chiamata potenza trasmessa, o potenza al traferro, perché è il traferro la zona di confine tra statore e rotore attraverso cui passa questa potenza sotto forma elettromagnetica.

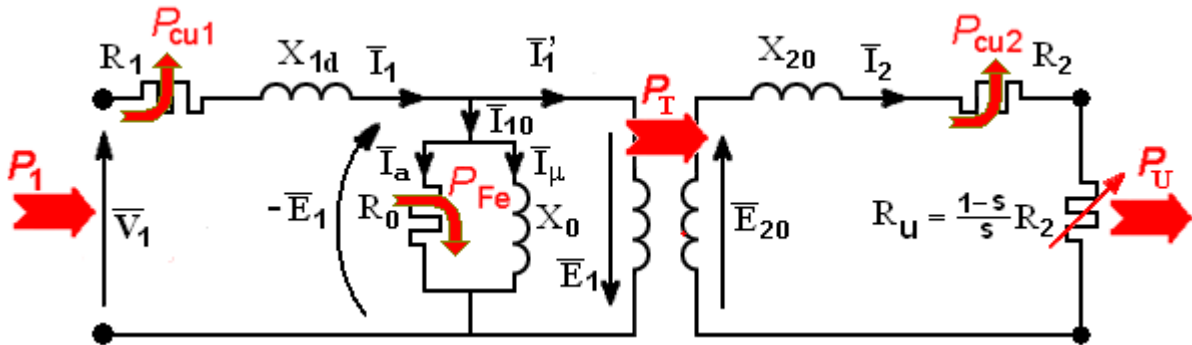


Figura 3.5.1: Bilancio delle potenze reali

Nel circuito di figura 4.5.1 non sono evidenziate le sole perdite addizionali da attribuire, convenzionalmente come già detto in precedenza, allo statore.

Tale potenza trasmessa viene tutta dissipata a valle del trasformatore ideale, cioè nell'unico elemento dissipativo di resistenza R_2/s :

$$P_T = 3 \cdot \frac{R_2}{s} \cdot I_2^2 \quad (3.5.7)$$

Questa potenza, vista come in Figura 4.5.1, può essere scomposta in due parti:

$$P_T = 3 \cdot R_2 \cdot I_2^2 + 3 \cdot R_2 \cdot \frac{1-s}{s} \cdot I_2^2 \quad (3.5.8)$$

in cui il primo termine rappresenta la potenza persa per effetto Joule negli avvolgimenti rotorici e nelle eventuali resistenze esterne collegate al rotore

$$P_{Cu2} = 3 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (4.5.9)$$

Per il principio di conservazione dell'energia, la parte di potenza P_T , trasferita al rotore e che non viene dissipata per effetto Joule, rappresenta la potenza **convertita in meccanica utilizzabile**, a meno delle perdite per attrito e per ventilazione, sull'**albero del motore**:

$$P_C = 3 \cdot R_2 \cdot \frac{1-s}{s} \cdot I_2^2 \quad (4.5.10)$$

Per questo motivo si è separato l'ultima resistenza a destra nel tracciare i vari circuiti equivalenti: tale resistenza equivale al carico meccanico e la potenza elettrica (attiva) in essa dissipata coincide con la potenza convertita in meccanica. Dalla (3.5.7) risulta immediatamente che:

$$P_{cu2} = s \cdot P_T \quad (4.5.11)$$

espressione che consente di definire lo scorrimento in maniera diversa da quella in precedenza data.

Il resistore R_2 rappresenta la resistenza di una fase rotorica per un motore a rotore avvolto, mentre, per un motore a gabbia, R_2 rappresenta la resistenza equivalente di una fase.

Come abbiamo già accennato prima, la vera potenza attiva utile o potenza resa all'albero, è pari a

$$P_U = P_C - P_M \quad (4.5.12)$$

dove P_M rappresenta la piccola parte di perdite meccaniche dovute agli attriti ed alla ventilazione pari a:

$$P_M = (0.7 \div 0.8) \cdot P_n \cdot \sqrt{n}$$

con P_n potenza nominale ed n numero di giri del rotore.

Alcune interessanti osservazioni si possono ricavare dalla relazione:

$$P_C = 3 \cdot R_2 \cdot \frac{1-s}{s} \cdot I_2^2 = (1-s) \cdot P_T \quad (4.5.13)$$

secondo cui la potenza convertita in meccanica, a parità di P_T , è tanto maggiore quanto minore è lo scorrimento, da cui discende la necessità che i MAT funzionino a velocità molto prossime a quelle di sincronismo. Inoltre, risulta che:

- $P_C = 0$, per $s = 1$, cioè a rotore fermo, e per $s = 0$ in quanto $I_2 = 0$ perché la velocità è quella di sincronismo;
- $P_C > 0$, per $0 < s < 1$, cioè per velocità comprese tra quella di sincronismo e quella nulla (rotore bloccato), il segno positivo di P_C indica che la potenza elettrica assorbita dalla linea si è trasformata in meccanica e, quindi, la macchina funziona da motore;
- $P_C < 0$, per $s < 0$ ($n > n_0$) e $s > 1$ ($n < 0$), la macchina funziona da generatore e da freno.

Il rendimento è, come al solito, il rapporto tra la potenza resa e quella assorbita:

$$\eta = \frac{P_U}{P_1} = \frac{P_U}{P_U + P_P} = \frac{P_1 - P_P}{P_1} = 1 - \frac{P_P}{P_1} \quad (4.5.14)$$

in cui P_P è la somma di tutte le potenze perdute e vale:

$$P_P = P_{Cu1} + P_{Fe} + P_{add} + P_{Cu2} + P_M \quad (4.5.15)$$

Pertanto, il rendimento si può scrivere come:

$$\eta = \frac{P_U}{P_U + P_{Cu1} + P_{Fe} + P_{add} + P_{Cu2} + P_M} \quad (4.5.16)$$

ed aumenta all'aumentare della potenza e diminuisce all'aumentare del numero di poli; in condizioni normali varia da 0.67 a 0.97 da piccoli a grandi motori.

Un altro modo di rappresentare il flusso delle potenze attive in un motore asincrono trifase è quello di fig. 4.5.1.

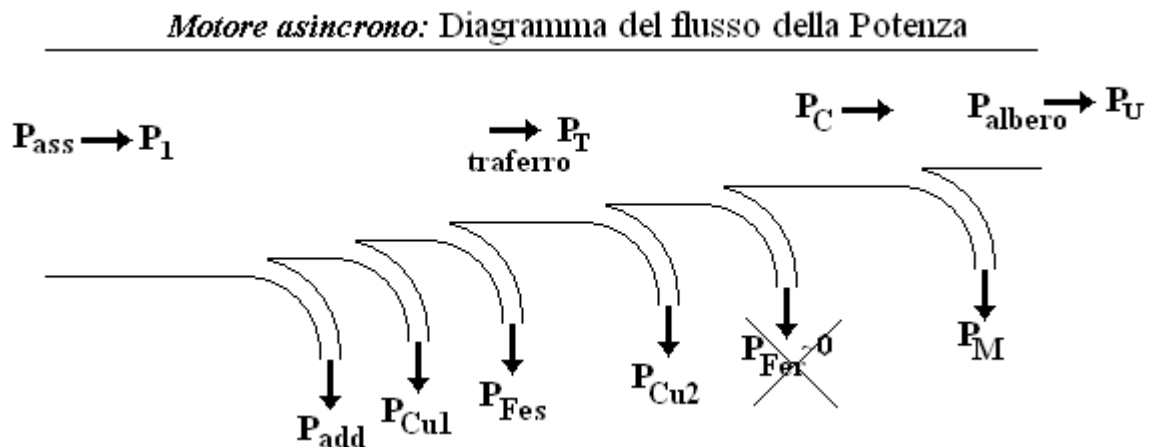


Figura 4.5.2 Flusso delle potenze attive nel motore asincrono trifase

4.6_Espressioni delle varie coppie

• Coppie meccaniche

Poiché in un sistema meccanico rotante la coppia e la potenza sono legate alla velocità angolare dalla relazione generale:

$$coppia = \frac{potenza}{velocità\ angolare}$$

a seconda dei valori della potenza e della pulsazione, avremo:

- **una coppia meccanica C** , definita come il rapporto tra la potenza convertita in meccanica P_C e la velocità angolare del rotore ω (indicata, per comodità, senza pedice)

$$C = \frac{P_C}{\omega} \quad (4.6.1)$$

- **una coppia trasmessa C_T** , detta anche coppia elettromagnetica, data da:

$$C_T = \frac{P_T}{\omega_0} \quad (4.6.2)$$

in quanto lo statore esercita sul rotore una coppia per mezzo del campo magnetico rotante a velocità angolare ω_0 . Non è difficile verificare che queste due coppie assumono lo stesso valore, infatti:

$$C = \frac{P_C}{\omega} = \frac{(1-s) \cdot P_T}{\omega_0 \cdot (1-s)} = \frac{P_T}{\omega_0} = C_T$$

Definiamo ancora:

- **una coppia d'attrito C_A** , il rapporto tra P_M , le perdite meccaniche, ed ω

$$C_A = \frac{P_M}{\omega} \quad (4.6.3)$$

- **una coppia utile C_U** , come quella che il motore fornisce all'albero motore:

$$C_U = \frac{P_U}{\omega} = C - C_A \quad (4.6.4)$$

Vediamo di determinare un'espressione della coppia meccanica C (o della coppia trasmessa C_T visto che sono uguali) in funzione dei parametri della macchina.

Partiamo dal fatto che la potenza elettrica trasmessa dallo statore al rotore ed espressa anche dalla relazione:

$$P_e = 3 \cdot E_{20} \cdot I_2 \cdot \cos \psi_2$$

e la potenza meccanica trasmessa dallo statore al rotore ed espressa dalla relazione:

$$P_T = C_T \cdot \omega_0 = C \cdot \omega_0 \quad (\text{visto che } C_T = C)$$

rappresentano praticamente la stessa entità, possiamo scrivere:

$$3 \cdot E_{20} \cdot I_2 \cos \psi_2 = C \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60}$$

essendo:

$$E_{20} = K_2 \cdot \Phi \cdot n_0$$

si ha:

$$n_0 = \frac{E_{20}}{K_2 \cdot \Phi}$$

che, sostituito nella relazione precedente, fornisce:

$$C = 3 \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi} \cdot K_2 \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \psi_2 = K \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \psi_2$$

essendo:

$$I_2 = \frac{s \cdot E_{20}}{Z_2} = \frac{s \cdot K_2 \cdot \Phi \cdot n_0}{Z_2} \quad e \quad \cos \psi_2 = \frac{R_2}{Z_2}$$

si ha:

$$C = K \cdot K_2 \cdot \Phi^2 \cdot n_0 \cdot \frac{s \cdot R_2}{Z_2^2}$$

In definitiva, si ha:

$$C = K_r \cdot \Phi^2 \cdot n_0 \cdot \frac{s \cdot R_2}{R_2^2 + s^2 \cdot X_{20}^2} \quad (4.6.5)$$

Quindi la coppia è una funzione del quadrato del flusso e dipende anche dallo scorrimento:

$$C = f(\Phi^2, s)$$

Nell'ipotesi che il flusso rimanga costante (in realtà diminuisce all'aumentare del carico per effetto della reazione d'indotto del rotore, e quindi varia con lo scorrimento), posto:

$$K_M = K_r \cdot \Phi^2 \cdot n_0$$

si ha:

$$C = K_M \cdot \frac{s \cdot R_2}{R_2^2 + s^2 \cdot X_{20}^2} \quad (4.6.6)$$

La rappresentazione grafica di questa funzione si ottiene tenendo presente che per:

$$s < \approx 0.05 \quad ; \quad s^2 \cdot X_{20}^2 \ll R_2^2$$

per cui risulta:

$$C = K_M \frac{s}{R_2}$$

ossia, praticamente, presenta un andamento lineare, mentre per:

$$s > \approx 0.2 \quad ; \quad s^2 \cdot X_{20}^2 \gg R_2^2$$

per cui risulta:

$$C = K_M \cdot \frac{R_2}{s \cdot X_{20}^2}$$

praticamente inversamente proporzionale con lo scorrimento. Il grafico che risulta è quello di figura 4.6.1 limitatamente alla variabilità dello scorrimento tra 0 e 1, intervallo in cui la macchina funziona da motore, che costituisce la prevalente applicazione della MAT.

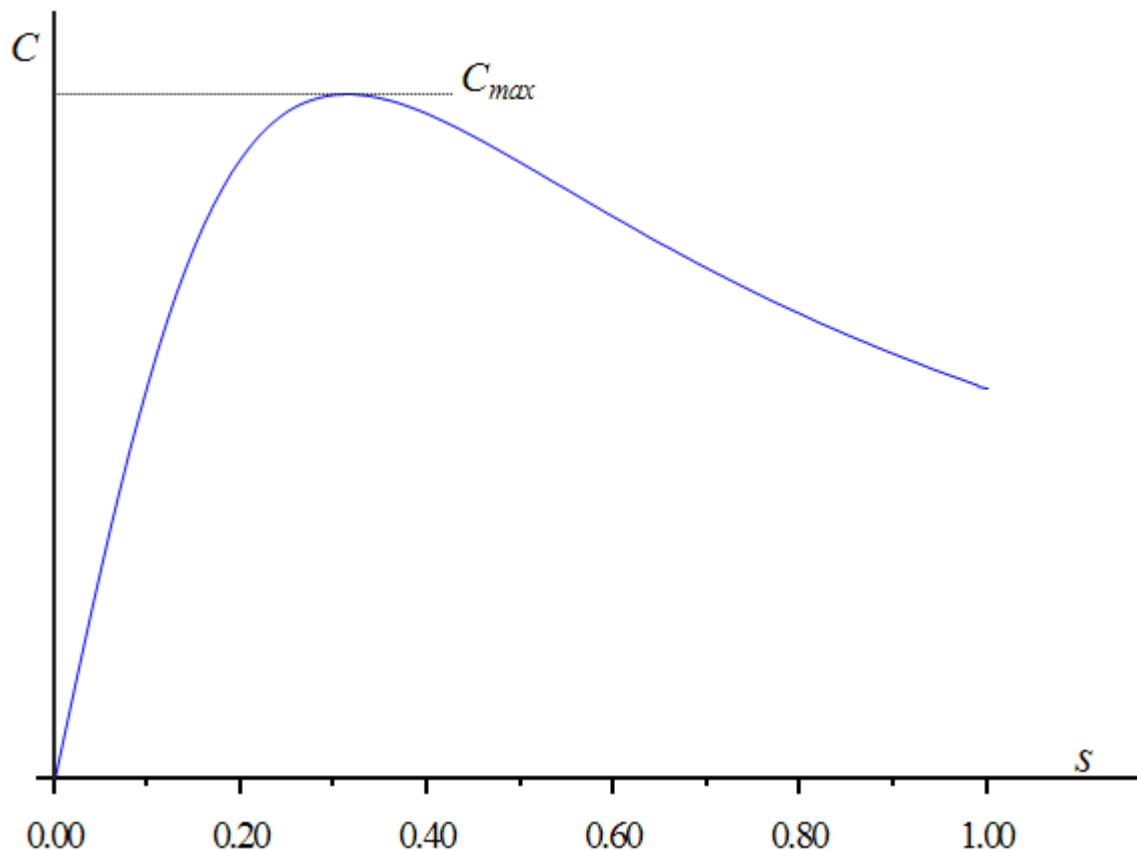


Figura 4.6.1 Caratteristica meccanica di un motore asincrono

In realtà lo scorrimento può andare da $-\infty$ a $+\infty$ avendosi un grafico come quello di figura 4.6.2 in cui si evince come per s compreso fra 0 e 1 la macchina funziona da motore, per s maggiore di 1 funziona da freno, mentre per s negativo la macchina funziona da generatore.

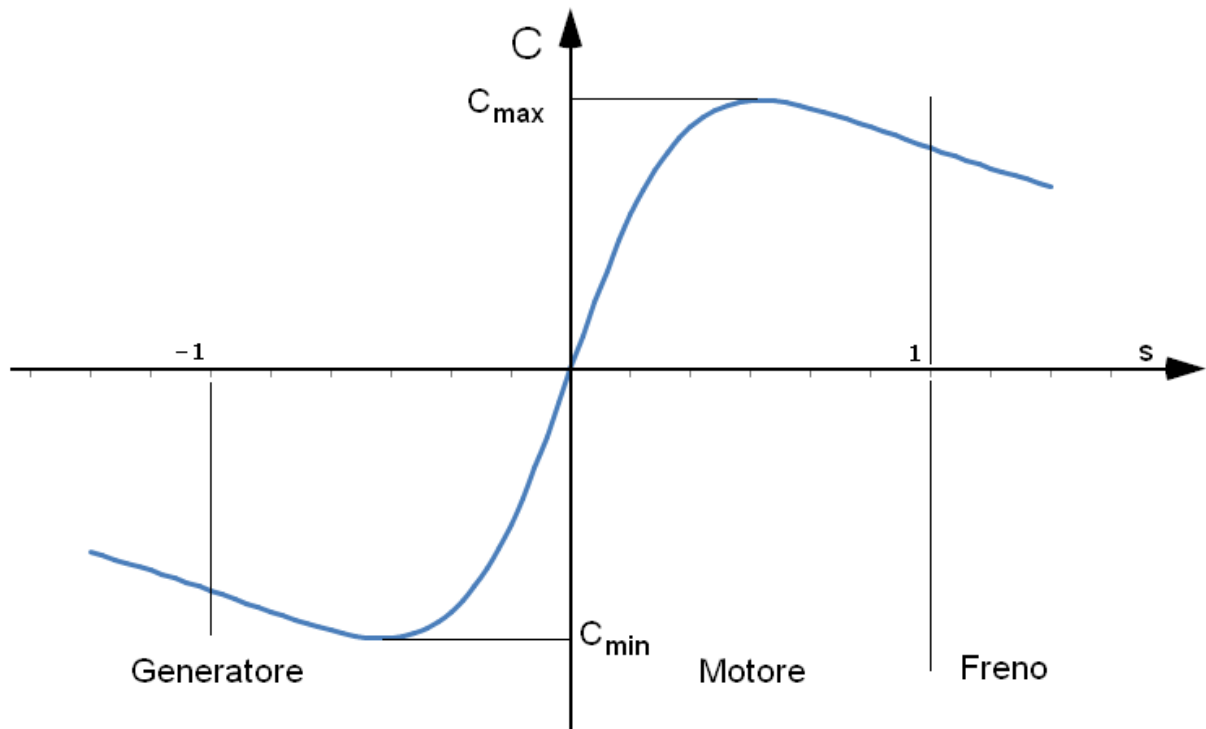


Figura 4.6.2

Riconsideriamo l'andamento di figura 3.6.1, e determiniamo lo scorrimento in corrispondenza del quale la coppia è massima e quanto vale tale coppia massima. Per fare ciò riscriviamo la (3.6.6) dopo aver diviso il numeratore ed il denominatore del secondo membro per s :

$$C = K_M \cdot \frac{R_2}{\frac{R_2^2}{s} + s \cdot X_{20}^2} \quad (4.6.7)$$

Nell'ipotesi che il flusso rimanga costante, e quindi è costante K_M , la coppia C è massima per quel valore di s che rende minimo il denominatore. Pertanto, derivando il solo denominatore rispetto ad s , ed uguagliando tale derivata a zero, troviamo il valore di s che rende massima la coppia. Si ha:

$$-\frac{R_2^2}{s_m^2} + X_{20}^2 = 0$$

da cui, per il solo funzionamento da motore, si ottiene:

$$s_m = \frac{R_2}{X_{20}} \quad (4.6.8)$$

La coppia massima vale:

$$C_{max} = K_M \cdot \frac{1}{2 \cdot X_{20}} = K_r \cdot \frac{\Phi^2 \cdot n_0}{2 \cdot X_{20}} \quad (4.6.9)$$