I.T.I. «Basilio Focaccia» - via Monticelli 4 Salerno

Tecnologia Disegno e Progettazione

Classe V

LEZIONE 7

Motore asincrono

Prof. Ing. Ferdinando La Rocca

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.

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'.

I **vantaggi del MAT** sono: 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, 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.

Gli **svantaggi del MAT** sono: 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, è praticamente costante.

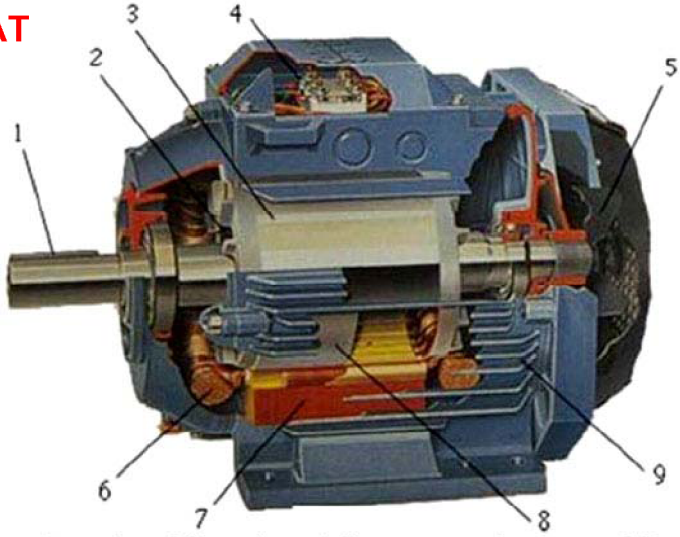
PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Il principio di funzionamento di qualsiasi motore elettrico si basa sulle applicazioni delle azioni meccaniche (forze) che si esercitano tra elettromagneti e correnti; 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 $\mathbf{F} = \mathbf{i} \cdot \mathbf{L} \cdot \mathbf{B}$, e si misura in newton se l'induzione magnetica B è in Wb/m^2, la lunghezza L dei conduttori in metri e la corrente i in ampere. Il funzionamento del MAT si basa, inoltre, sull'impiego di un campo magnetico del tutto speciale, il campo rotante.
Per lo studio approfondito del funzionamento di un MAT si rimanda al corso di elettrotecnica

STRUTTURA GENERALE DI UN MAT

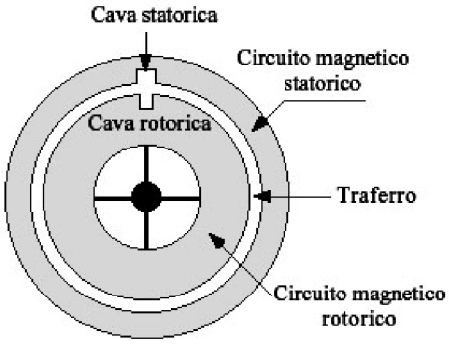
Il motore asincrono è costituito, come mostrato in figura, da due parti fondamentali di forma cilindrica coassiali: una parte esterna, fissa, detta '**statore**' ed una interna, coassiale, munita di albero, sostenuto da due supporti, libera di ruotare intorno all'asse della macchina, detta '**rotore**'. 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.



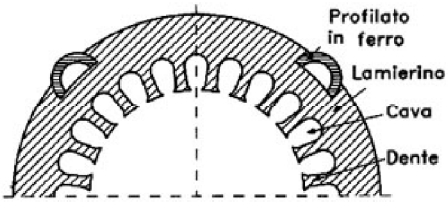
vista esplosa delle varie parti di un motore asincrono a gabbia

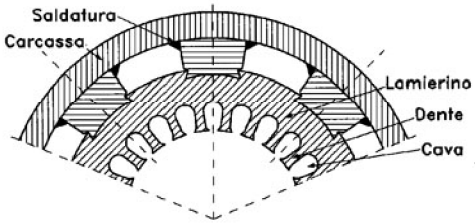
In figura sono mostrati i circuiti magnetici di statore e di rotore. Come per la macchina sincrona, anche nel motore asincrono lo statore ed il rotore sono separati da una intercapedine in aria, di spessore uniforme, detto traferro (oppure interferro), sempre realizzato del più piccolo valore possibile, che può variare da qualche decimo di millimetro per i piccoli motori, a qualche millimetro, per i motori più grossi.

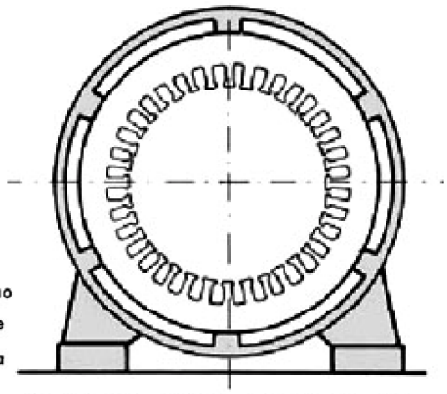


circuiti magnetici di statore e di rotore

Lo **statore** porta un avvolgimento polifase, di solito trifase, collegato alla rete di alimentazione a corrente alternata che genera all'interno del motore stesso un campo magnetico rotante. Esso è formato da un pacco di lamierini di spessore 0,5 mm a basso tenore di silicio a forma di corona circolare (figura), isolati tra loro, ed è munito al suo interno di cave in cui trovano posto i conduttori costituenti l'avvolgimento di statore. I lamierini a disco intero, utilizzati per macchine di piccola potenza, portano degli *intagli a coda di rondine* sulla superficie esterna. Una volta formato il pacco, negli intagli sono infilati dei profilati in ferro che vengono saldati con il pacco lamiere mantenuto in pressione così come rappresentato in figura sotto.

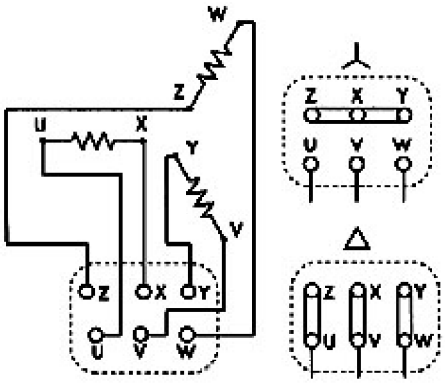




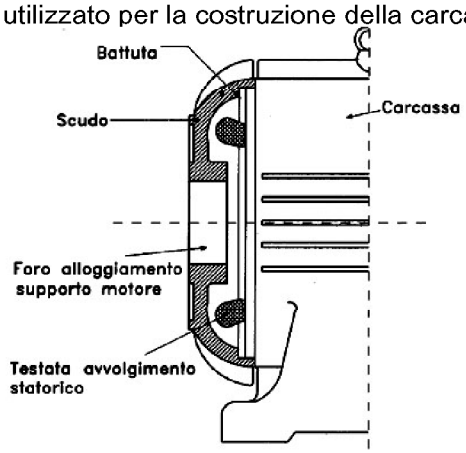

Statore di una macchina asincrona

Lo statore è sostenuto dalla **carcassa** (figura) 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. La carcassa è realizzata in lega leggera per motori la cui potenza non supera i 4÷5 KW, altrimenti viene costruita in ghisa per motori di media potenza, e in acciaio per motori di elevata potenza.
Per contenere i morsetti di alimentazione del motore si utilizza un contenitore metallico con coperchio asportabile che, a seconda del tipo di motore, può essere stagno o antideflagrante. In figura viene rappresentata una tipica **scatola coprimorsetti** a tenuta stagna. Alla morsettiera vengono collegati i principi e le fini delle tre fasi mettendo a disposizione sei morsetti. I collegamenti possibili sono ***a stella*** o ***a triangolo,*** come rappresentato in figura.

Carcassa statorica in metallo pressofuso

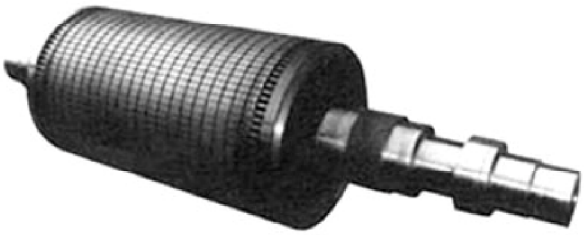


La carcassa è chiusa sui due lati dagli **scudi,** nei quali vengono alloggiati i supporti del rotore, normalmente dello stesso materiale utilizzato per la costruzione della carcassa. La forma degli scudi è rotonda e cava internamente allo scopo di contenere le testate dell'avvolgimento statorico. Il collegamento alla carcassa è ottenuto mediante una battuta o dei bulloni



Per ottenere una linearità del rotore e un traferro uniforme fra rotore e statore gli scudi devono essere centrati con perfezione. In figura viene rappresentata una sezione di scudo su carcassa.

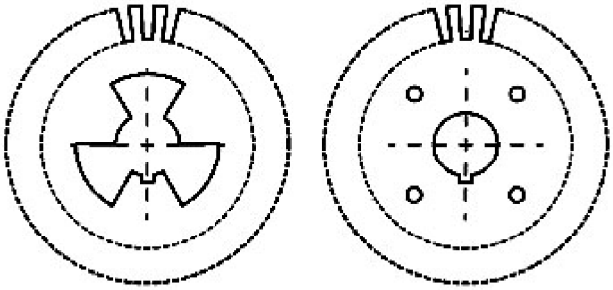
Il **rotore** porta un avvolgimento chiuso su se stesso (figura) e quando è investito dal campo rotante, diventa sede di correnti indotte che, reagendo col campo stesso, danno luogo a una coppia motrice. Tale coppia mette in rotazione il rotore che tende a inseguire il campo rotante. Se però il rotore riuscisse a raggiungere la velocità del campo rotante, verrebbe a cessare il moto relativo e quindi la generazione di grandezze indotte. Pertanto **la velocità del rotore risulterà sempre leggermente inferiore a quella del campo rotante** e da ciò deriva il nome di motore asincrono. La differenza relativa tra la velocità del campo rotante n_s, e la velocità effettiva del rotore n_v, viene detta ***scorrimento s*** che risulta espresso dalla relazione seguente:


Rotore di una macchina asincrona

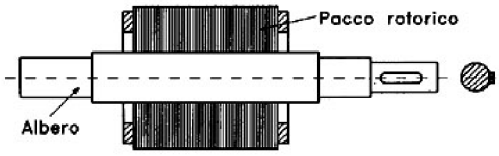
$$s = \frac{n_s - n_v}{n_s}$$

Il rotore 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. I lamierini che costituiscono il pacco rotorico possono anche non essere isolati tra loro in quanto le perdite nel ferro vengono ridotte a causa dei bassi valori della frequenza indotta; nell'avvolgimento rotorico, infatti, la frequenza delle correnti indotte è data da $f_r = s \cdot f$ in cui f_r = frequenza rotorica, f = frequenza statorica, s = scorrimento. Lo scorrimento a carico vale dal 2% al 5% e quindi, per frequenza statorica pari a 50 Hz, la frequenza rotorica vale da 1 a 2,5 Hz. Poiché le perdite nel ferro dipendono dal quadrato della frequenza, è chiaro che esse risultano molto limitate per i valori di frequenza rotorica bassi.

I lamierini del pacco rotorico vengono calettati direttamente sull'albero e tutto il pacco è mantenuto bloccato da flange o bussole trattenute da dadi o anelli di bloccaggio. In figura sono rappresentati due tipi di lamierini rotorici a disco per il montaggio sull'albero mediante chiavetta.



L'albero deve essere costruito in maniera tale da garantire una perfetta indeformabilità alla struttura meccanica del rotore. La flessione tollerata è pari a circa 1/10 dello spessore del traferro. Il materiale utilizzato per la costruzione degli alberi è l'acciaio e la loro forma può essere a diametro uniforme o variabile. In figura è rappresentata la sezione di un albero a diametro variabile.



Le *cave* sono di forma diversa e il loro profilo dipende dal dimensionamento elettrico dell'avvolgimento rotorico. Nel caso di **rotore avvolto** il numero delle cave è determinato in funzione del numero di cave statoriche e del numero di poli. Per evitare che a rotore fermo si abbia un allineamento di denti rotorici e statorici, con conseguente pericolo di **impuntamento** all'atto dell'avviamento, si realizzano rotori con un numero di cave di circa il 10% in più rispetto allo statore. Inoltre, per ridurre la rumorosità del motore e per favorirne l'avviamento, i lamierini del rotore vengono assemblati in maniera tale da presentare le proprie cave inclinate rispetto a quelle dello statore.

A seconda del tipo di avvolgimento rotorico esistono due diversi tipi di MAT:
a gabbia di scoiattolo,
a rotore avvolto.
Il primo dà luogo al più semplice e robusto dei MAT: in ognuno dei canali, di rotore si infila una sbarra di rame, le cui testate, ad entrambe le terminazioni, vengono chiuse da un anello di rame.

Il rotore ha così la forma di figura e viene chiamato rotore a '**gabbia di scoiattolo**' o 'in corto circuito'. È evidente che questo circuito presenta <u>resistenze bassissime</u> e <u>non ha un numero di poli propri</u>, 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**.

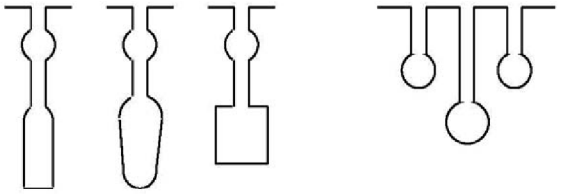
rotore a gabbia di scoiattolo.

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**.

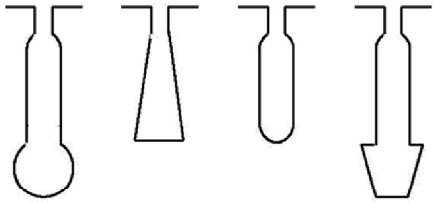
Motori a doppia gabbia

I motori asincroni più diffusi e più comuni non sono quelli a rotore avvolto ma quelli a gabbia di scoiattolo, con rotore in corto circuito, con inserzione diretta sulla rete. Questi motori presentano, tuttavia, l'inconveniente di richiedere all'avviamento una elevata corrente, fornendo contemporaneamente una coppia di spunto, o di avviamento, piuttosto modesta.

Per ovviare a questi inconvenienti sono stati realizzati motori con **rotore a doppia gabbia** (figura), oppure con una gabbia a barre alte, dette anche profonde (figura), che presentano i vantaggi del funzionamento propri dei motori a rotore avvolto insieme ai vantaggi di semplicità costruttiva propri dei motori a gabbia.



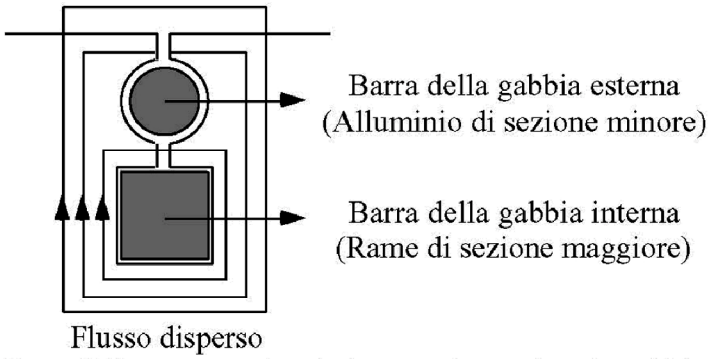
sezioni di cava e di sbarra per rotori a doppia gabbia



sezioni di cava e di sbarra per rotore a sbarre alte

Il motore a doppia gabbia è particolarmente usato quando si hanno frequenti avviamenti e fermate (ascensori), mentre i motori a rotore avvolto si rendono indispensabili solo quando le condizioni di avviamento sono particolarmente gravose, cioè quando si richiede una buona coppia di avviamento (una volta e mezza la coppia nominale), e ciò per ridurre l'intervallo di tempo durante il quale il motore rimane in regime transitorio, ed un piccolo valore di corrente di spunto (al massimo una volta e mezza la corrente nominale). Il motore a doppia gabbia è in grado di sviluppare all'avviamento una coppia 1.5÷1.8 volte superiore a quella nominale assorbendo una corrente pari al doppio al più al triplo, della corrente nominale. Nel rotore a doppia gabbia, in ogni cava, vi sono due barre, una esterna di sezione più piccola e talvolta realizzata in bronzo, ottone oppure alluminio, ed una interna, sempre di rame, ma di sezione maggiore.

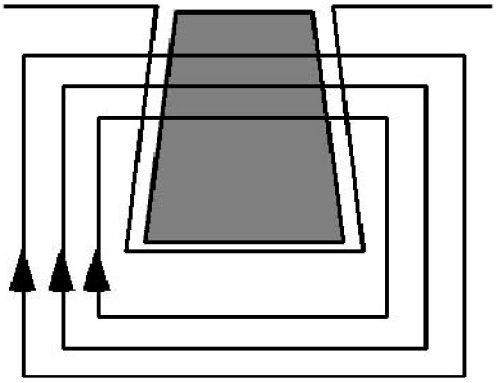
Le due gabbie sono chiuse in cortocircuito da due anelli frontali, isolati elettricamente l'uno dall'altro.
La gabbia esterna presenta, pertanto, una resistenza elettrica alta, anche dieci volte quella interna, con una reattanza di dispersione bassa; l'inverso accade per la gabbia interna. Inoltre, la reattanza di dispersione della gabbia interna è molto maggiore di quella esterna per la minore riluttanza del circuito del flusso disperso, come schematicamente mostrato in figura.



linee di flusso concatenato in un rotore a doppia gabbia

Ciò comporta che all'avviamento, a frequenza di rete, la gabbia interna presenta una impedenza più elevata e le correnti che l'attraversano sono ridotte; la gabbia esterna, invece, presenta una impedenza minore, pur avendo una resistenza maggiore, per cui la corrente rotorica circolerà prevalentemente nella gabbia esterna. Poiché questo circuito è fortemente ohmico svilupperà una elevata coppia di spunto. Nella marcia normale del motore, con frequenze rotoriche praticamente nulle, la corrente rotorica circolerà prevalentemente nella gabbia interna, dato che le reattanze sono diventate trascurabili, per cui, data la minore resistenza, la caratteristica meccanica avrà una velocità prossima a quella di sincronismo ed un rendimento relativamente elevato.
Possiamo quindi dire che **le due gabbie si ripartiscono il carico**, e quindi le coppie, in modo graduale ed **in base alla velocità**, in sostanza, **all'avviamento lavora la gabbia esterna**, **a regime quella interna**, e quindi ritenere la coppia motrice del motore uguale alla somma delle coppie sviluppate dalle singole gabbie.

Per potenze non eccessivamente grandi, invece della doppia gabbia, si impiega una sola gabbia, in rame, con barre alte, cioè alte e strette, o profonde, schematizzate in figura.



rotore a barre alte a sezione decrescente

Questo motore presenta un comportamento intermedio tra quello a gabbia semplice e quello a doppia gabbia potendosi considerare la barra divisa in due parti: quella verso il traferro, a maggior resistenza, si comporta come la gabbia esterna, mentre quella più profondamente incassata nel ferro, di maggior reattanza, funziona da gabbia interna.
All'avviamento, avremo un maggior addensamento della corrente sulla parte alte della barra che, interessando una parte relativamente piccola della sezione della barra stessa, presenta una resistenza rotorica piuttosto elevata, addensamento che si ridistribuirà poi, gradualmente, verso la parte bassa, man mano che la velocità cresce; a regime, tutta la sezione della barra viene uniformemente interessata dalla corrente con una conseguente progressiva diminuzione delle resistenze rotoriche.