

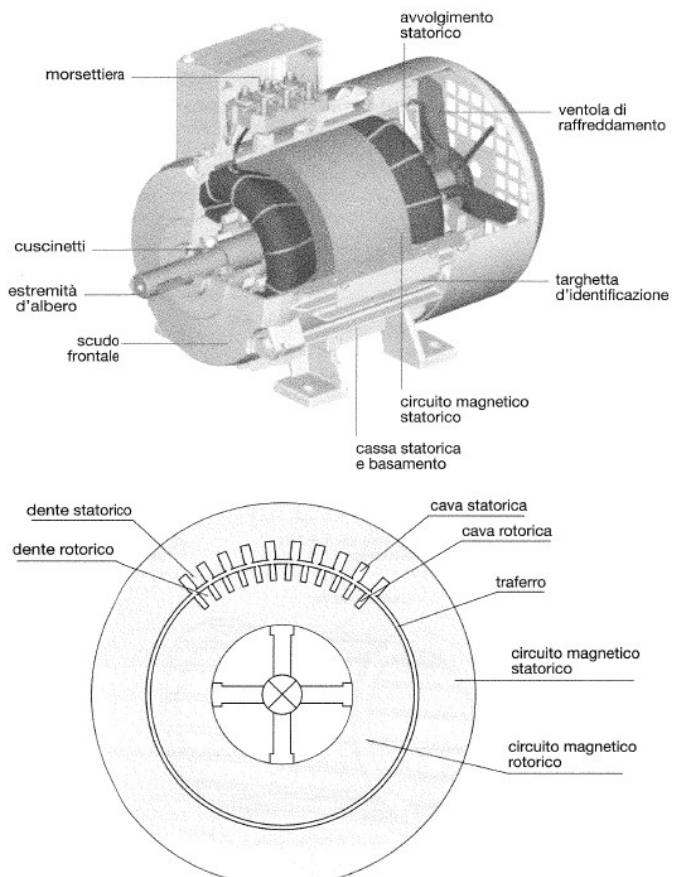
Macchina asincrona trifase

Struttura

La struttura di una macchina asincrona dipende da numerosi fattori, di cui i principali sono la potenza della macchina e, di conseguenza, le sue dimensioni, la tensione di funzionamento, il sistema di raffreddamento, il collegamento meccanico con il carico (con asse verticale, orizzontale ecc.), il grado di protezione nei riguardi degli agenti esterni, solidi e liquidi.

La struttura generale di una macchina asincrona trifase è mostrata nella figura che segue, nella quale si distinguono le seguenti parti:

- cassa statorica, avente la funzione di contenere le parti interne della macchina, proteggere tali parti dagli agenti esterni, permettere il fissaggio della macchina al piano di supporto, resistere alle sollecitazioni meccaniche trasmesse dalle parti interne (peso, vibrazioni ecc.); nella figura la cassa è divisa in due parti, essendovi anche uno scudo frontale;
- morsettieria per il collegamento al circuito esterno, comprendente, nel caso della figura, sei morsetti a cui fanno capo i terminali delle tre fasi dell'avvolgimento statorico;
- targhetta d'identificazione, sulla quale vengono riportati i dati di targa della macchina;
- circuito magnetico statorico, in cui si sviluppa il campo magnetico di statore;
- avvolgimento statorico con il relativo isolamento, formato da tre fasi e avente il compito di creare il campo magnetico che consente il funzionamento della macchina (*campo induttore*);
- circuito magnetico rotorico (non molto visibile in figura, essendo posto all'interno di quello statorico), collegato meccanicamente all'albero rotante e separato dallo statore da uno strato d'aria detto *traferro*; in esso si sviluppa il campo magnetico di rotore (*campo indotto*);
- avvolgimento rotorico, di cui in figura si vedono solo i terminali di alcuni conduttori: costituisce l'avvolgimento indotto su cui si sviluppa la coppia motrice della macchina;
- albero meccanico per il collegamento al carico, montato su *cuscinetti* che gli consentono di ruotare ma non di muoversi in senso assiale o perpendicolare all'asse;
- ventola di raffreddamento, avente la funzione di attivare la circolazione dell'aria sulle parti in cui si sviluppa calore (circuiti magnetici ed elettrici): la sua presenza e posizione dipendono dal tipo di raffreddamento adottato.



I circuiti magnetici dello statore e del rotore presentano delle cave in cui sono posti gli avvolgimenti

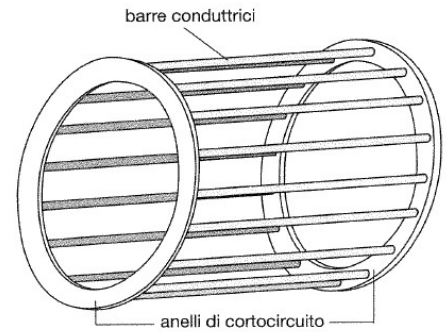
Mentre l'avvolgimento statorico è sempre formato da matasse di filo conduttore variamente collegate tra loro, per quanto riguarda il rotore esistono due tipi fondamentali di avvolgimenti rotorici, da cui discendono due diversi tipi di macchine:

macchine con rotore avvolto

macchine con rotore a gabbia, distinte, a loro volta, in *gabbia semplice* (detta anche *gabbia di scoiattolo*), *doppia gabbia* e *gabbia semplice con barre alte*

Nelle macchine con rotore avvolto sulla parte rotante vi è un normale avvolgimento posto nelle cave rotoriche, simile a quello statorico, generalmente di tipo trifase collegato a stella

Nei motori con rotore a gabbia semplice, soluzione molto diffusa per le macchine di piccola e media potenza senza particolari problemi all'avviamento, l'avvolgimento rotorico è costituito da un insieme di *barre conduttrici* in rame o in alluminio poste una per cava, collegate tra loro alle estremità mediante due *anelli di cortocircuito* (figura a lato), in modo da formare dei circuiti chiusi percorsi dalle correnti indotte. Nel rotore a doppia gabbia, usato per motori con elevata coppia di avviamento, vi sono invece, due gabbie, una esterna (verso il traferro) e una interna, chiuse ancora da anelli di cortocircuito.

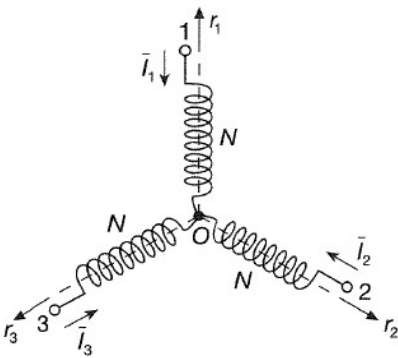


Ma ora cerchiamo di capire come funziona.

Il Campo magnetico rotante fu scoperto da Galileo Ferraris intorno al 1884, ma nel frattempo Tesla faceva studi simili e forse copiando un po' nel 1887 brevettò la macchina che cambiò l'industria del mondo intero.

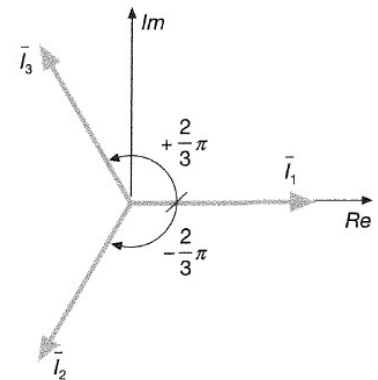
Per ottenere un campo magnetico rotante trifase è necessario che siano soddisfatte le due seguenti condizioni:

- vi siano tre avvolgimenti fissi nello spazio, uguali tra loro, con lo stesso numero di spire e disposti con gli assi ordinatamente a 120° ;
- negli avvolgimenti circolino tre correnti magnetizzanti alternate sinusoidali, aventi la stessa frequenza, lo stesso valore efficace e sfasate tra loro di 120° nel tempo, costituenti, quindi, una terna equilibrata di correnti.



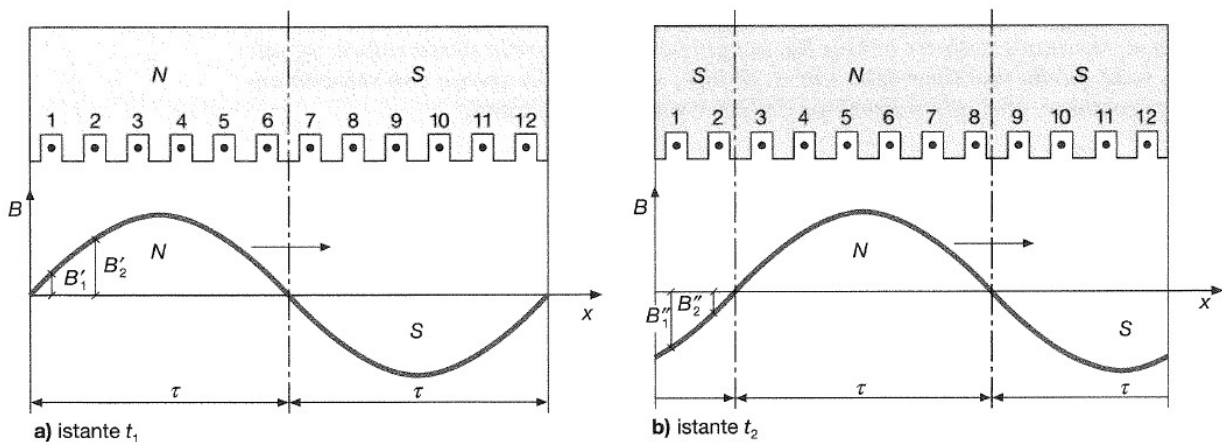
Si considerino tre bobine di N spire, disposte a 120° tra loro e interessate da una terna equilibrata di correnti. Le bobine sono rappresentate, in questa prima fase, in modo schematico e del tutto generale, prescindendo dalla loro pratica realizzazione.

Le tre correnti sono uguali in modulo e sfasate di 120°
Le tre forze magnetomotrici (NI) sono uguali in modulo e sfasate di 120°

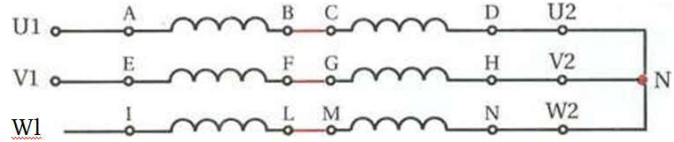
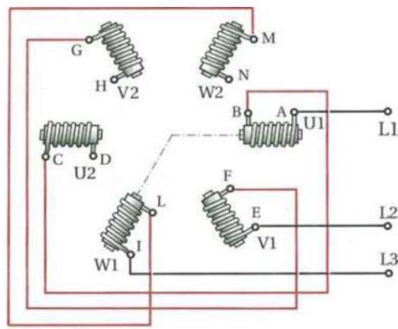


Nella macchina asincrona trifase il campo magnetico rotante è creato dall'avvolgimento statorico che, collegato alla rete elettrica di alimentazione, assorbe una terna equilibrata di correnti magnetizzanti.

Il campo magnetico che si crea lungo il traferro della macchina ha alcune importanti caratteristiche, che si possono evidenziare rappresentando la superficie interna del circuito magnetico statorico, di tipo cilindrico, come se fosse piana, immaginando di "tagliare" la superficie stessa e di distenderla su un piano, come indicato nelle figure relative a uno statore con 12 cave

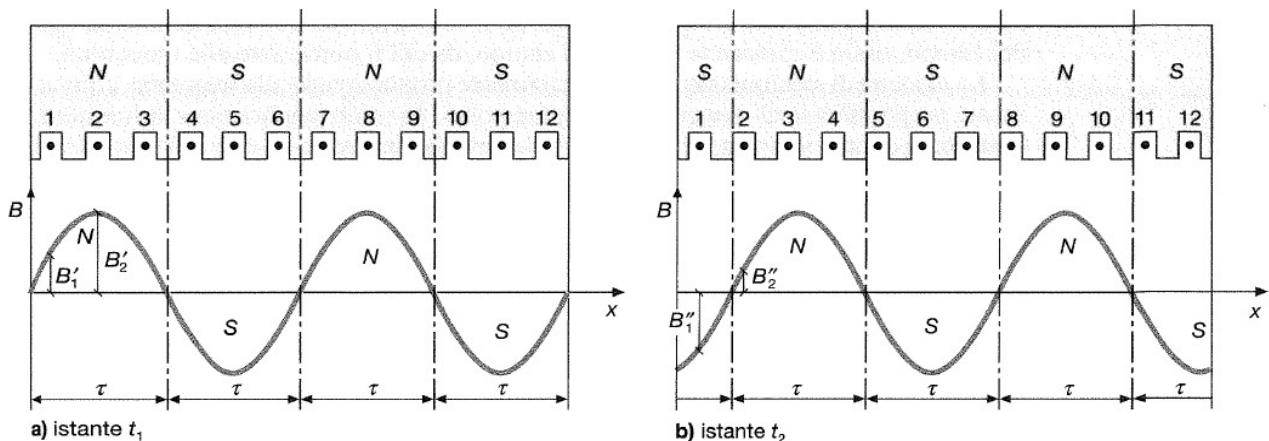


Si possono realizzare gli avvolgimenti in modo diverso. La differenza tra le due distribuzioni sta nel numero dei poli creato dalle correnti magnetizzanti e che dipende dai collegamenti effettuati tra i conduttori statorici: nel primo caso il campo magnetico presenta due poli (N ed S), mentre nel secondo vi sono quattro polarità



In generale si indica con p il numero delle coppie polari, con $2p$ il numero dei poli .

Le particolarità del campo magnetico riguardano sia la sua *distribuzione nello spazio* sia la *variabilità nel tempo* del valore dell'induzione in un determinato punto della macchina e sono le seguenti:



- la distribuzione nello spazio dell'induzione anche se con una certa approssimazione, di tipo sinusoidale; questo significa che in un determinato istante i conduttori posti nelle varie cave sono soggetti a valori dell'induzione diversi tra loro;
- a causa della rotazione del campo magnetico la curva dell'induzione si sposta nel tempo, cosicché ogni singolo conduttore, posto in una determinata cava, è soggetto a un valore di induzione che cambia nel tempo, come si può vedere dalle figure considerando, per esempio, i conduttori nelle cave 1 e 2;
- a seconda del tipo di avvolgimento realizzato, il campo magnetico può avere 2, 4, 6 ecc. poli; per esempio un campo con 4 poli ha una curva di distribuzione dell'induzione nello spazio che presenta, in ogni istante, due polarità N e due polarità S che si spostano nel tempo a causa della rotazione del campo.

È importante ribadire che la variabilità nel tempo dell'induzione magnetica che interessa i conduttori posti nelle varie cave discende proprio dalla distribuzione sinusoidale del campo magnetico nello spazio e dalla rotazione del campo stesso.

La **velocità angolare del campo magnetico rotante**, detta **velocità di sincronismo**, espressa in radianti al secondo, è data, quindi, da:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p} \text{ in rad/s}$$

$$n_0 = \frac{60f}{p} \text{ in giri / min}$$

Nella macchina sincrona, il rotore si muove alla stessa velocità del campo e, quindi, in sincronismo con esso.

Nel caso del motore asincrono, come si vedrà nel seguito, il rotore ha una velocità minore di quella del campo, ossia è *asincrono* rispetto al campo, da cui il nome dato alla macchina.

La velocità di sincronismo risulta direttamente proporzionale alla frequenza e inversamente proporzionale al numero delle coppie polari. In molte applicazioni la frequenza è costante in quanto imposta dalla rete di alimentazione; in questo caso *la velocità diminuisce all'aumentare del numero delle coppie polari*.

Coppie polari	Numero poli	Giri/min
1	2	3000
2	4	1500
3	6	1000
4	8	750
5	10	600
6	12	500

Valori tipici per $f = 50$ Hz

Nel funzionamento normale del motore le fasi rotoriche sono chiuse tra loro in cortocircuito e il rotore non è bloccato, ma libero di muoversi e di porre in rotazione il carico meccanico. Queste circostanze danno luogo a una sequenza di fenomeni, così riassumibile:

1. alla chiusura dell'interruttore che collega il motore alla rete di alimentazione nelle fasi statoriche circolano le correnti magnetizzanti che producono il campo magnetico rotante;
2. nelle fasi rotoriche si sviluppano delle tensioni indotte che, essendo il circuito rotorico chiuso, fanno circolare delle correnti rotoriche, di tipo sinusoidale; tali tensioni indotte si comportano come *forze elettromotrici*, in quanto favoriscono la circolazione delle correnti;
3. sui conduttori rotorici, percorsi da corrente e posti in un campo magnetico, si sviluppano delle forze meccaniche (secondo la legge generale $F = BIl$), aventi direzione tangenziale e si creano delle coppie di forze che, complessivamente, costituiscono la coppia motrice del motore; anche sui conduttori statorici agiscono delle forze, ma la coppia sviluppata, opposta a quella motrice, non produce movimento in quanto contrastata dagli elementi di fissaggio della cassa;
4. sotto l'azione della coppia motrice e di quella resistente del carico il rotore si mette in rotazione *nello stesso verso del campo rotante*; questo è conseguente al principio di azione e reazione: per opporsi alla causa che ha prodotto il movimento il rotore deve ridurre la sua velocità relativa rispetto al campo e questo è possibile solo ruotando nello stesso senso;
5. la riduzione della velocità relativa comporta la riduzione delle tensioni rotoriche indotte (in generale $E = Blv$), delle correnti e della coppia motrice; il moto si stabilizza a una velocità n tale da sviluppare una coppia motrice che assicuri l'equilibrio meccanico del complesso motore-carico;
6. in condizioni reali, nel funzionamento da motore non può mai aversi $n = n_0$ perché questo significherebbe velocità relativa nulla, tensioni e correnti rotoriche indotte nulle, coppia motrice nulla; il movimento a velocità costante con $C_m = 0$ lo si può avere solo nel caso teorico in cui non vi è alcuna resistenza al moto.
7. La caratteristica del motore asincrono è, quindi, quella di *ruotare a una velocità n sempre inferiore a quella di sincronismo n_0* .

Si definisce **scorrimento** il rapporto $s = \frac{n_0 - n}{n_0}$ $s\% = 100s$

Il valore dello scorrimento, nel funzionamento da motore, è compreso tra i limiti 0 e 1 (100%), precisamente:

$s = 0$ per $n = n_0$ condizione teorica di sincronismo tra rotore e campo
 $s = 1$ per $n = 0$ nel primo istante di avviamento o a rotore bloccato

Nel funzionamento normale lo scorrimento è dell'ordine di qualche percento

Conoscendo il valore dello scorrimento si può calcolare la velocità di rotazione con le seguenti formule, ricavabili con

semplici passaggi $n = n_0(1 - s) = n_0 \left(1 - \frac{s\%}{100}\right) = n_0 \left(\frac{100 - s\%}{100}\right)$

$f_r = sf$ frequenza rotorica $E = sE_0$ tensioni indotte rotoriche

Funzionamento a carico bilancio delle potenze

Il motore asincrono trifase funziona a carico quando gli avvolgimenti statorici sono collegati alla rete di alimentazione, quelli rotorici sono chiusi in cortocircuito e all'albero è collegato il carico meccanico, che viene posto in rotazione con velocità n . Il motore assorbe dalla rete potenza elettrica ed eroga al carico potenza meccanica.

Facendo riferimento alle sole potenze attive e considerando il contributo delle tre fasi, la potenza assorbita dal motore è data da:

$$P_a = \sqrt{3}V_1 I_1 \cos \varphi_1$$

Con I_1 corrente su fase statorica e V_1 tensione concatenata ai morsetti statorici
Potenza assorbita è la somma di perdite e potenza resa all'albero motore

Perdite nel ferro (soprattutto statoriche, quelle rotoriche sono trascurabili)

Perdite nel rame statoriche

Perdite addizionali statoriche

Perdite nel rame rotoriche

Perdite meccaniche per attrito e ventilazione

Potenza resa meccanica fornita all'albero motore

Perdite Meccaniche

Per le macchine rotanti, come i motori asincroni, i generatori sincroni e le macchine in corrente continua, bisogna considerare anche le perdite meccaniche che si manifestano per i seguenti motivi:

- perdite per attrito nei cuscinetti di supporto dell'albero motore, dipendenti dal tipo di cuscinetto, dal peso della parte rotante e direttamente proporzionali alla velocità di rotazione
- perdite per ventilazione, ossia per attrito tra il rotore e l'aria circostante; esse costituiscono la parte maggiore delle perdite meccaniche e risultano proporzionali al cubo della velocità di rotazione
- perdite per attrito tra spazzole e collettore: si verificano nelle macchine, come quelle a corrente continua, dove su un particolare organo rotante, detto collettore, vengono appoggiate delle spazzole conduttrici fisse, aventi lo scopo di stabilire il contatto tra due circuiti elettrici, uno fisso e l'altro rotante; queste perdite sono direttamente proporzionali alla superficie delle spazzole, alla pressione sulla superficie di appoggio e alla velocità del collettore

L'entità delle perdite meccaniche è assai difficile da determinare analiticamente, anche a causa della diversa natura delle stesse e viene, di solito, ricavata sperimentalmente

Perdite nel ferro (nei nuclei magnetici)

Isteresi magnetica e correnti parassite

per ridurre le perdite per correnti parassite occorre aumentare la resistività del materiale magnetico; questo si ottiene aggiungendo silicio alla normale lega ferro-carbonio con la quale vengono costruiti i nuclei magnetici, in misura non superiore al 4% - 4,5%, per non avere un materiale troppo fragile e poco lavorabile; per alcune applicazioni particolari si usano materiali, come le *ferriti*, aventi elevatissimi valori di resistività.

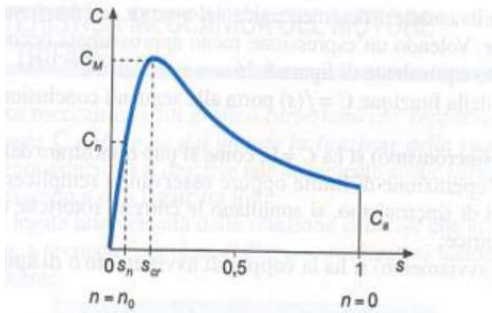
poiché la potenza P è direttamente proporzionale al quadrato dello spessore della lamiera, una drastica limitazione alle correnti parassite e alla relativa perdita si ottiene *laminando* il nucleo in senso parallelo alla direzione di magnetizzazione ossia costituendo il nucleo con lamiere sottili, isolate tra loro mediante vernici o semplicemente dall'ossido che si forma tra i lamierini; poiché le correnti parassite si sviluppano su piani perpendicolari alla direzione di magnetizzazione, la laminazione interrompe le linee di corrente, permettendone lo sviluppo solo lungo lo spessore del lamierino.

Perdite nel rame e addizionali

La perdita in un conduttore in corrente continua è quella legata all'effetto joule.

Nel *funzionamento in corrente alternata sinusoidale* il fenomeno delle perdite nel rame diventa più complesso, a causa dei flussi magnetici di dispersione che investono i conduttori e che, essendo variabili nel tempo, creano all'interno dei conduttori stessi delle f. e. m. indotte. Senza entrare in dimostrazioni che esulano dai limiti del testo, si può dire che *l'effetto di tali f. e. m. è quello di determinare una disuniforme distribuzione della corrente all'interno del conduttore e tra i conduttori accostati*, per cui le linee di corrente non risultano distribuite in modo regolare lungo la sezione del conduttore, ma si presentano più addensate da una parte e più rade dall'altra. In pratica è *come se vi fosse una riduzione di sezione e quindi un aumento della resistenza del conduttore stesso*

L'aumento della potenza persa rispetto al funzionamento in corrente continua costituisce la perdita addizionale nell'elemento conduttore.



l'andamento della caratteristica meccanica è rappresentata in funzione dello scorrimento o in funzione del numero di giri:

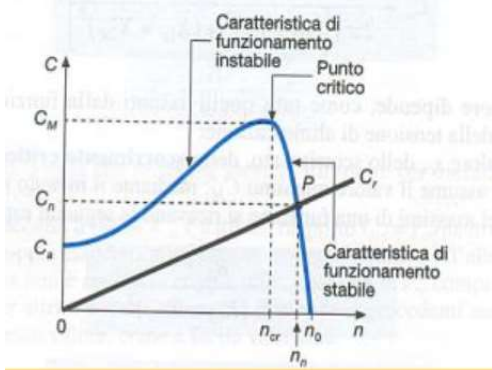
Il motore asincrono in assenza di opportuni sistemi di regolazione, ha un funzionamento rigido, poco flessibile. Al variare della coppia resistente la velocità del motore può assumere valori compresi soltanto tra n_{cr} ed n_0 con una variazione assai limitata.

Se $n < n_{cr}$ il funzionamento è instabile.

E può assumere valori di scorrimento compresi soltanto tra s_{cr} ed $s=0$ con una variazione assai limitata.

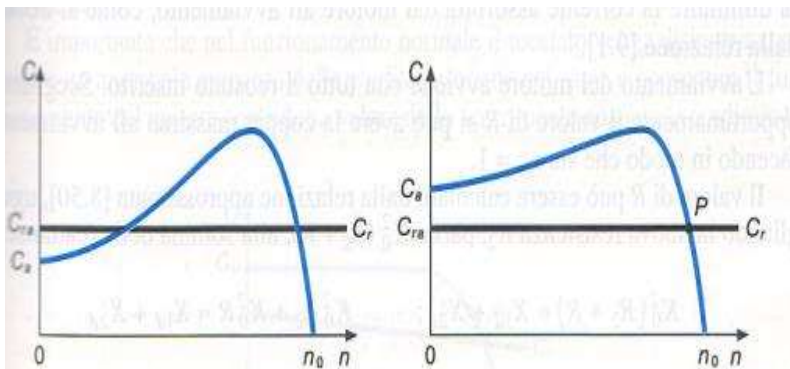
Se $s > s_{cr}$ il funzionamento è instabile, infatti:

- 1) Nella zona di stabilità se ad un certo istante la coppia applicata all'albero cresce, il motore, con coppia resistente superiore a quella motrice, deve rallentare. Ma al diminuire della velocità la coppia motrice prodotta cresce, come si vede dal grafico, e quando raggiunge il valore di quella resistente si ha la nuova condizione di equilibrio.
- 2) nella zona di instabilità, partendo da una situazione di equilibrio tra coppia motrice e resistente, nel caso in cui crescesse la coppia resistente il rotore rallenterebbe. Al diminuire della velocità, però, in quel tratto della curva, anche la coppia motrice diminuirebbe e sarebbe sempre di più inferiore a quella resistente, con allontanamento dall'equilibrio, fino al bloccaggio del rotore.



Avviamento e regolazione della velocità

Il motore asincrono trifase presenta alcuni problemi relativi all'avviamento e alla regolazione della velocità che ne hanno limitato l'impiego, in passato, in alcuni campi come quello della trazione elettrica.



a) $C_a < C_{ra}$: il motore non si avvia

b) $C_a > C_{ra}$: il motore si avvia e il funzionamento si stabilizza nel punto P

- C coppia
- C_s coppia di spunto
- C_R coppia resistente
- n numero giri al minuto
- n_0 num. giri del campo magnetico rotante $s=1$

Aspetti generali

La corrente assorbita allo spunto equivale, nel primo istante, alla corrente I_{1cc} che si ha a rotore bloccato.

All'aumentare della velocità lo scorrimento si riduce, la resistenza equivalente del rotore aumenta e la corrente assorbita dal motore diminuisce.

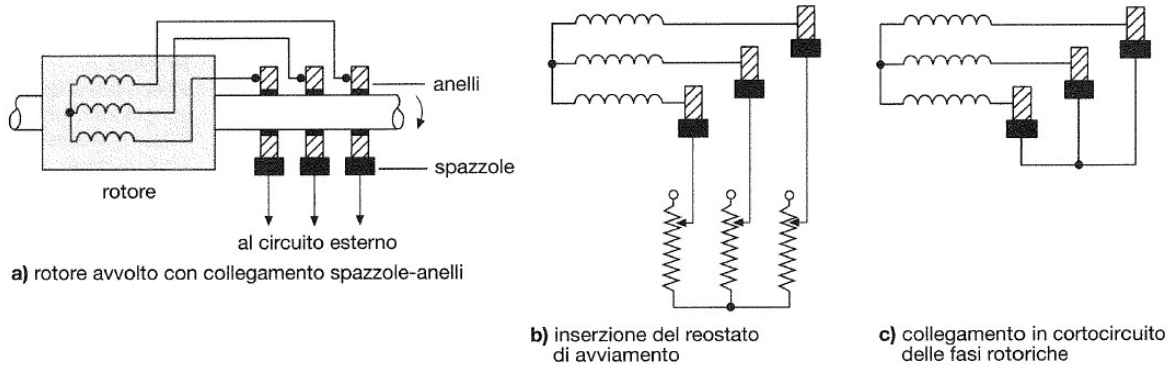
Affinché un motore possa avviarsi e sviluppare una certa accelerazione angolare iniziale la coppia di avviamento del motore deve essere maggiore della coppia di avviamento del carico meccanico.

Motore con rotore avvolto e reostato di avviamento

Per il loro funzionamento questi motori necessitano di un *reostato di avviamento* da disinserire man mano che aumenta la velocità di rotazione. A regime il reostato deve essere completamente disinserito e le fasi dell'avvolgimento rotorico devono essere chiuse in cortocircuito.

Si ottiene così il duplice vantaggio di ridurre la corrente di avviamento e di aumentare la coppia di spunto.

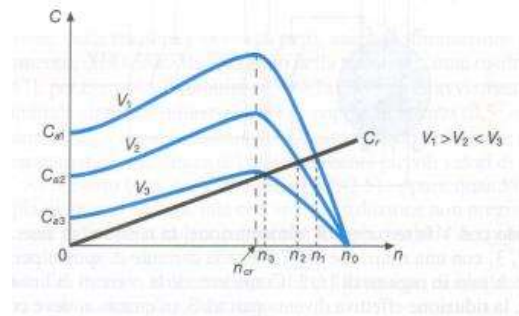
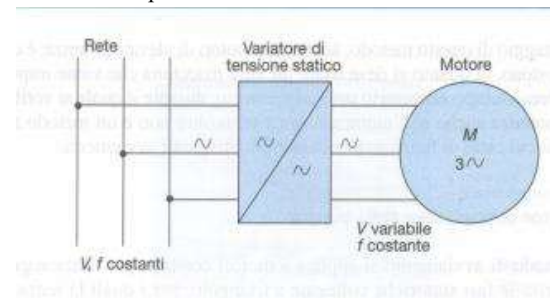
Per consentire il collegamento tra le fasi dell'avvolgimento, mobili in quanto solidali con il rotore, e il reostato esterno fisso vengono utilizzati tre *anelli* rotanti, calettati sull'albero ma da questi isolati, su cui poggiano delle *spazzole* fisse



di materiale conduttore, collegate al reostato esterno oppure in cortocircuito, secondo la disposizione schematica in figura

Alimentazione mediante regolatori elettronici di tensione

Oltre ai reostati inseriti all'avvio il metodo più attuale è quello di avviare con una tensione regolabile fornita da un alimentatore elettronico a frequenza costante: in questo modo oltre a regolare la corrente di spunto si può anche regolare la velocità. Il limite di questo metodo è quello di lavorare a velocità alquanto diverse da quella di sincronismo e quindi con valori più alti di scorrimento ed aumento delle perdite rotoriche.

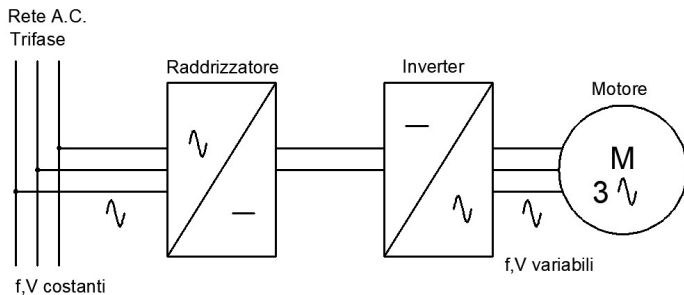


Regolazione della velocità al variare di frequenza e tensione

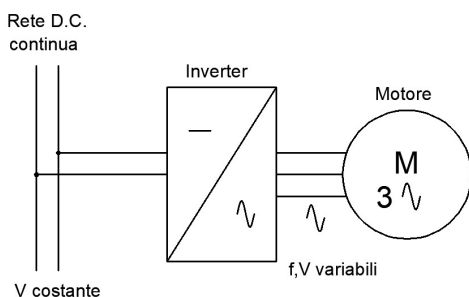
Dalla relazione $n_0 = 60 f / p$ si deduce che modificando la frequenza varia proporzionalmente il numero di giri. Ma la frequenza di alimentazione è legata anche alla tensione e al flusso magnetico.

Quindi si può regolare coppia e velocità di rotazione agendo su tensione e/o frequenza.

L'alimentazione a tensione e frequenza variabile viene effettuata con dispositivi statici che impiegano sia apparati di potenza che apparati di controllo:



Nel caso in cui la potenza elettrica è presa dalla rete trifase



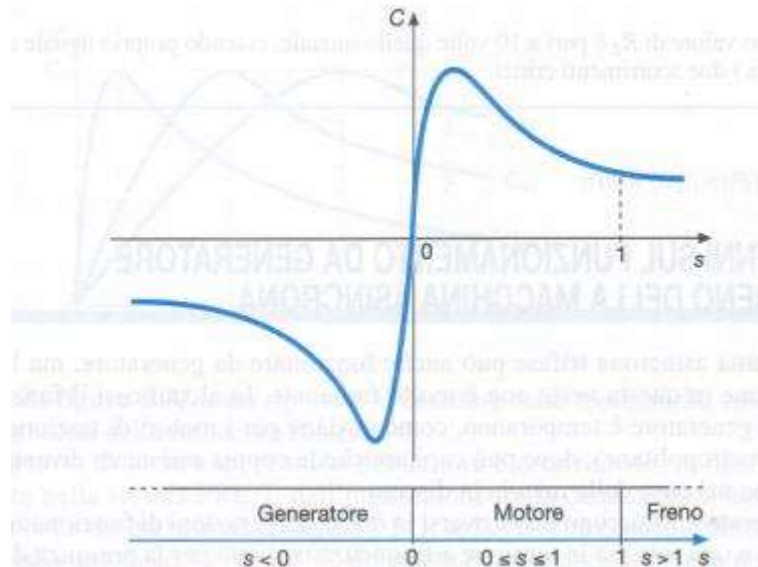
Nel caso in cui la potenza elettrica è presa da alimentazione in continua trifase

Cenni sul funzionamento da generatore e da freno

La macchina asincrona può anche funzionare da generatore ma la sua utilizzazione in questa veste non è molto frequente. Affinché una macchina funzioni da generatore occorre che:

- un motore primo deve portare il rotore in rotazione nello stesso verso e con velocità maggiore del campo magnetico rotante in modo da avere uno scorrimento negativo
- le fasi statoriche devono essere collegate alla rete o al carico a cui forniscono potenza attiva in uscita

In ogni caso, per avere il campo magnetico rotante, alla macchina deve essere fornita potenza reattiva altrimenti non succede nulla. Nel caso di macchina collegata alla rete, la potenza Q è fornita dalla rete stessa.



Se la macchina ruota in senso opposto al campo magnetico rotante si ha il funzionamento da freno con la coppia che si oppone al movimento (frenatura controcorrente).

Dati di targa del motore asincrono trifase

I principali sono:

tensione nominale: la tensione di alimentazione statorico

frequenza nominale: è la frequenza delle grandezze statoriche per la quale la macchina è stata dimensionata

velocità nominale n_n : valore della velocità a cui il motore ruota nel funzionamento nominale legata allo scorrimento s_n

potenza nominale: potenza meccanica resa sull'asse

corrente nominale: corrente assorbita da ogni fase statorico nel funzionamento nominale

f.d.p. nominale: è il coseno dell'angolo tra la tensione e la corrente statorico

rendimento nominale: valore del rendimento nel funzionamento nominale

coppia nominale: valore di coppia motrice sviluppata nel funzionamento nominale

numero di poli: numero di polarità del campo magnetico della macchina