

# Capitolo 3

## Motore asincrono

### **3.1 Introduzione**

### **3.2 Principio di funzionamento ed aspetti costruttivi**

### **3.3 Interpretazione fisica del circuito equivalente**

### **3.4 Funzioni e curve caratteristiche**

### **3.5 Avviamento, inversione di marcia e regolazione della velocità**

### **3.6 Motori a doppia gabbia**

### **3.7 Funzionamento come generatore e freno**

### **3.8 Dati di targa**

### **3.9 Motore asincrono monofase**

### **3.10 Motore lineare**

### **3.11 Funzionamento in condizioni di alimentazione anormale**

### **Appendice: diagramma circolare e sue caratteristiche**

### **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.

### 3.1 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.

### **3.2 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 elettromagneti e correnti. Come abbiamo già discusso nello studio della macchina sincrona, 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

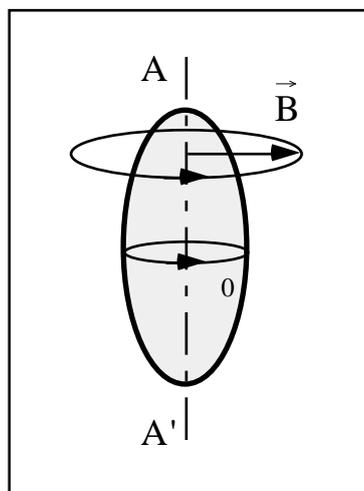
$$F = i L B ,$$

e si misura in newton se l'induzione magnetica  $B$  è in tesla, 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, che abbiamo già dettagliatamente descritto nel primo capitolo del testo dedicato alle macchine statiche.

Per rendere più concrete le idee, consideriamo la Figura 3.1 in cui una spira di materiale conduttore è immersa in un campo magnetico rotante; la spira è impernata 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 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  $\omega_0$ , variabile nel tempo con legge sinusoidale di pulsazione  $\omega_0$ . Questa variazione di flusso indurrà una f.e.m. nella spira chiusa con conseguente circolazione di una corrente, anch'essa sinusoidale di pulsazione  $\omega_0$ , 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.



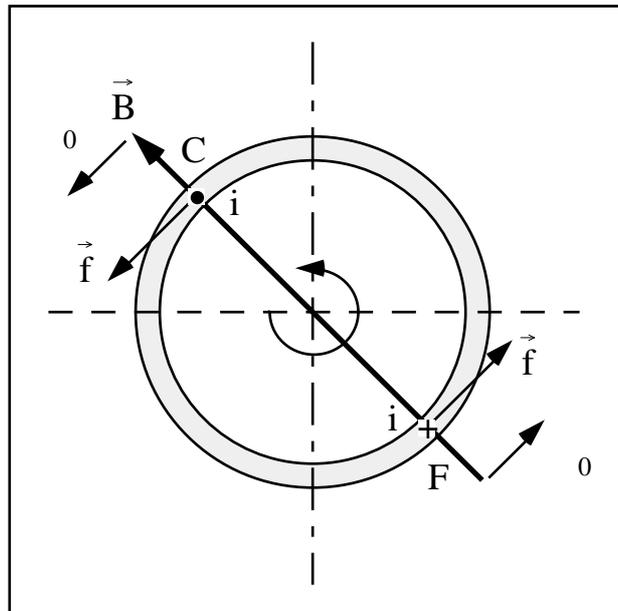
**Figura 3.1:** spira immersa in un campo magnetico rotante.

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 3.2.

Se però la spira ruotasse 'sincrona' con il campo rotante, cioè con la stessa velocità  $\omega_0$ , 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  $\omega_0$ ; 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 3.2:** 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  $\omega_0$  (con  $\omega_0 > 0$ ); indichiamo con  $\omega$ , diversa da  $\omega_0$ , 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

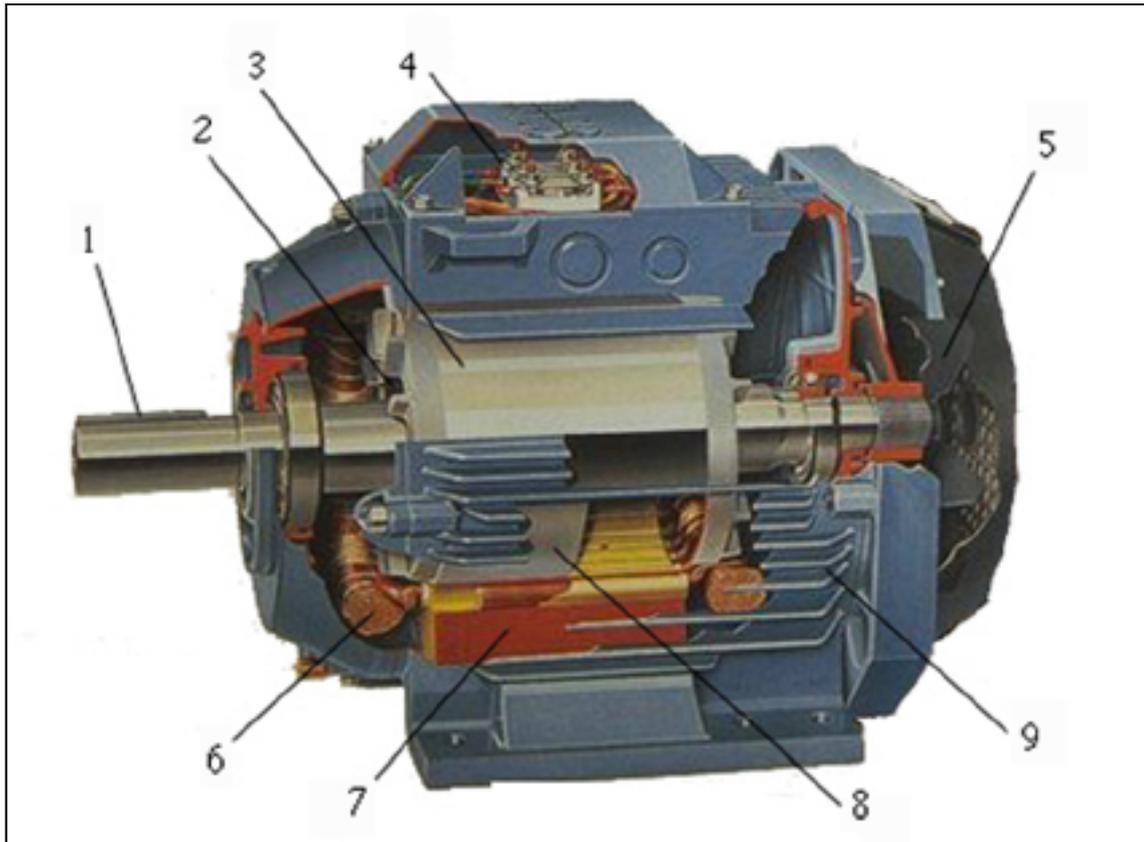
induttore e spira indotta ed in quest'ultima circolino correnti di intensità tale da sviluppare una coppia motrice capace di mantenere la spira in rotazione. Se la spira rallentasse per la presenza di una coppia frenante maggiore, aumenterebbe la velocità angolare con la quale il campo precede la spira, 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, proprio come abbiamo discusso per la macchina sincrona; 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**

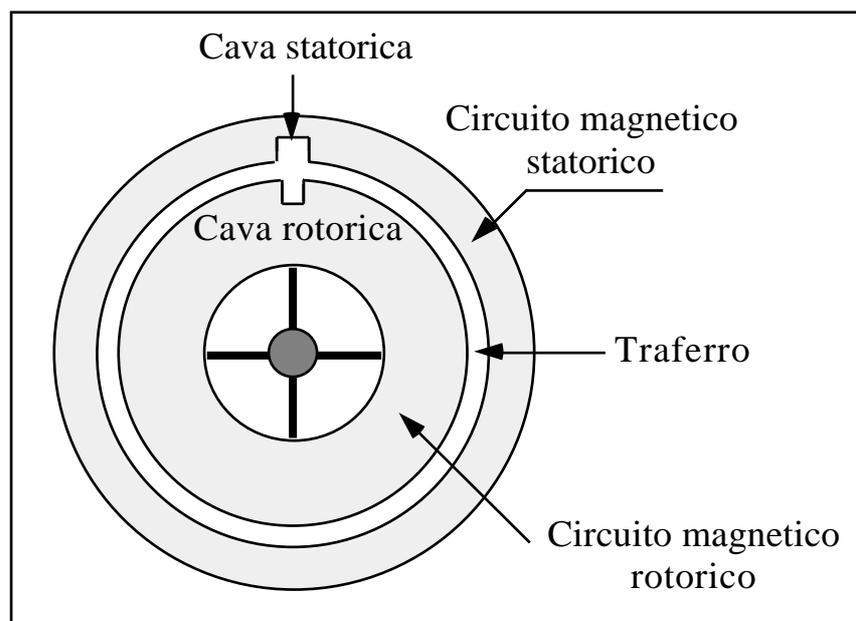
Il motore asincrono è costituito, come mostrato in Figura 3.3, da due parti fondamentali di forma cilindrica coassiali: una parte esterna, fissa, detta 'statore' ed una interna, coassiale, munita di albero, sostenuto da due supporti, libera di ruotare intorno all'asse della macchina, detta 'rotore'. 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 3.3:** vista esplosa delle varie parti di un motore asincrono a gabbia.

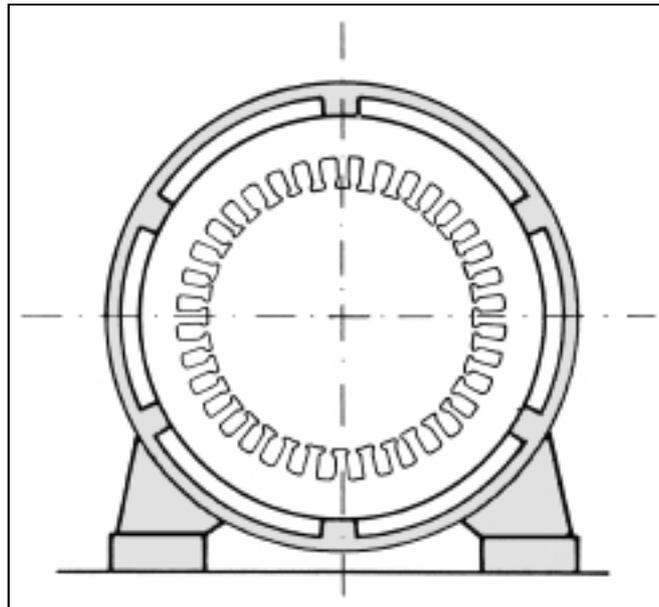
I circuiti magnetici di statore e di rotore sono mostrati in Figura 3.4.



**Figura 3.4:** circuiti magnetici di statore e di rotore.

Proprio come accadeva per la macchina sincrona, lo statore ed il rotore sono separati da una intercapedine in aria, di spessore uniforme, detto traferro (oppure

interfero), 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 3.5 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.



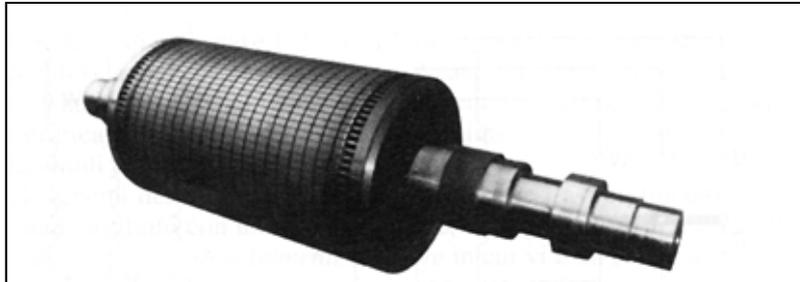
**Figura 3.5:** statore di una macchina asincrona.

Lo statore è sostenuto dalla carcassa, come mostrato in Figura 3.6, 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 3.6:** cassa statorica in metallo pressofuso.

Il rotore rappresentato in Figura 3.7 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 3.7:** 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.

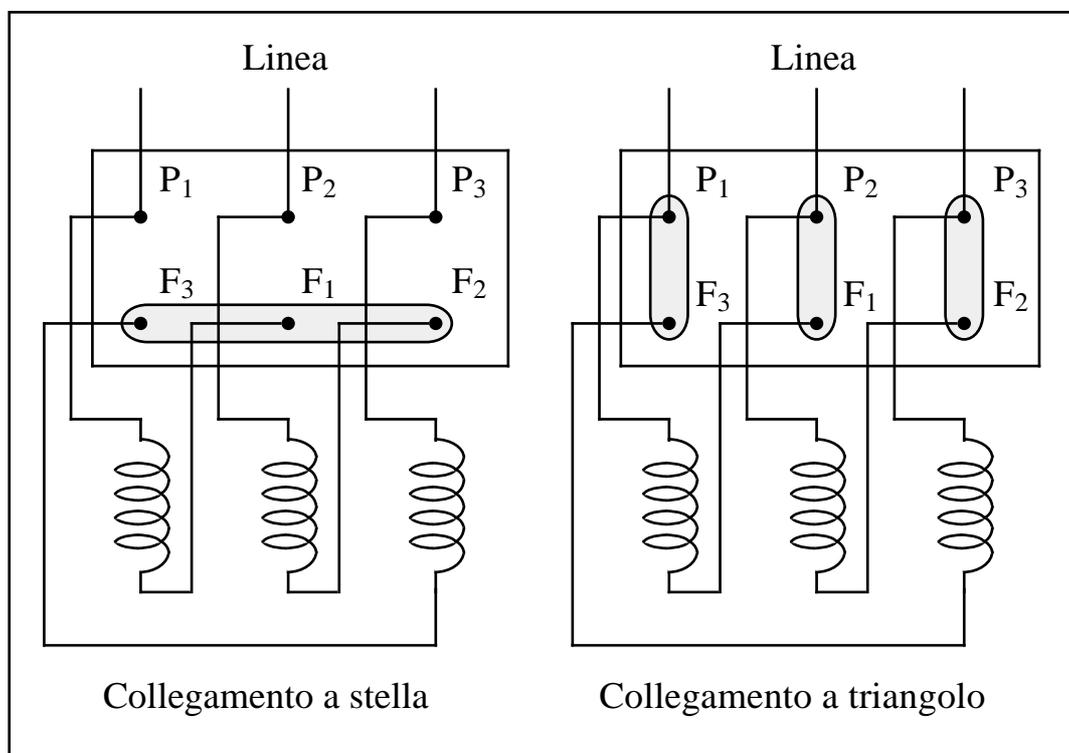
Bisogna anche ricordare che ogni materiale isolante ha una propria 'vita', che è il periodo di tempo durante il quale le sue caratteristiche risultano idonee alle funzioni alle quali è deputato e che è accertato che la vita dell'isolante è tanto più breve quanto più alta è la temperatura a cui lavora. 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 nel primo capitolo del testo dedicato alle macchine statiche).

### • **Statore**

La realizzazione dello statore, detto anche induttore, dei MAT, sia per struttura magnetica che per formazione degli avvolgimenti, è del tutto identica 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 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. Pertanto gli avvolgimenti statorici sono realizzati secondo i diversi schemi già visti per le macchine sincrone.

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 in Figura 3.8.



**Figura 3.8:** 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, del tutto simili a quelle che abbiamo mostrato per la macchina sincrona, come pure resta inalterata la relazione che lega frequenza e numero di coppie polari alla velocità o del campo magnetico rotante o dell'alternatore

$$n = \frac{60 f}{p} .$$

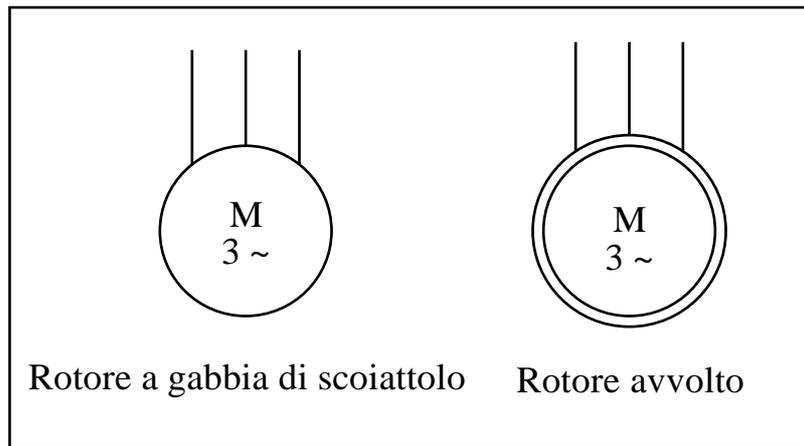
Ora, essendo la frequenza  $f$  costante e  $p$  un numero intero, il numero di giri al minuto  $n$  potrà assumere solamente certi valori (che abbiamo riportato in una tabella nel capitolo dedicato alla macchina sincrona) e, poiché la velocità effettiva di rotazione di un MAT è solo leggermente inferiore 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 3.9.



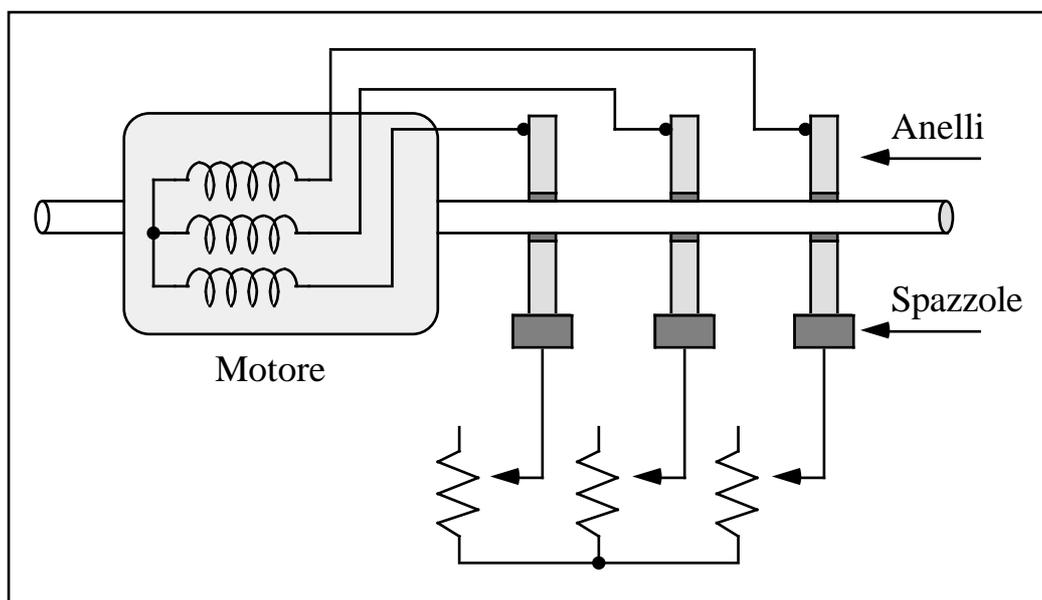
**Figura 3.9:** simboli grafici.

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 3.10 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.



**Figura 3.10:** 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'.

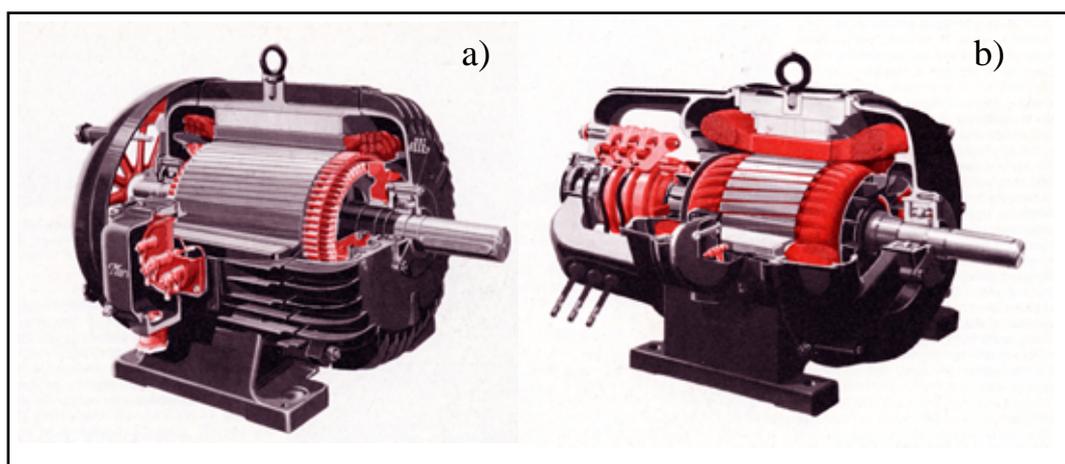


**Figura 3.11:** schema del motore con rotore avvolto e reostato di avviamento.

In questo tipo di macchine, nelle cave rotoriche vi è un normale avvolgimento, simile a quello statorico, di tipo trifase e collegato a stella, come mostrato in Figura 3.11. 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'aumento 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 3.12 abbiamo riportato due spaccati del MAT a gabbia di scoiattolo e a rotore avvolto.



**Figura 3.12:** 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.

#### • **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 3.11, 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  $I_{\mu}$ , necessarie per creare il campo magnetico rotante all'interno della macchina, mentre non circolerà alcuna corrente indotta nel rotore, essendo questo aperto. Il campo magnetico rotante, tramite il flusso per polo che si ha al traferro, indurrà negli avvolgimenti di statore e di rotore una f.e.m. indotta pari a

$$E_1 = K_1 f N_1 \quad , \quad E_{20} = K_2 f N_2 \quad ,$$

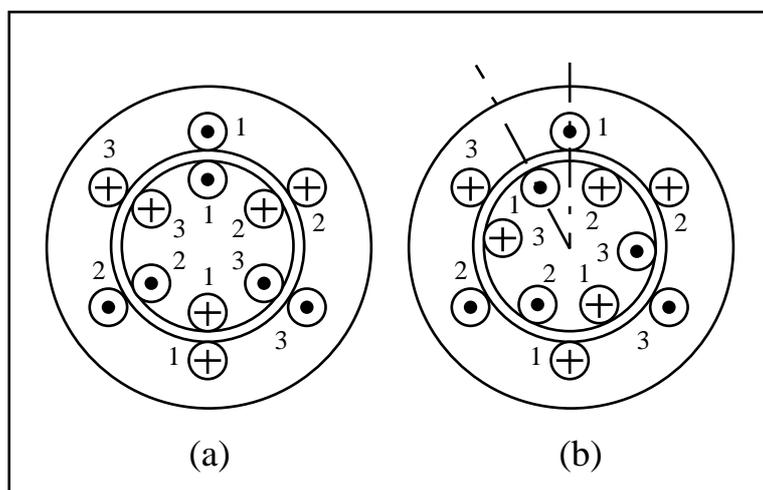
dove  $N_1$  e  $N_2$  sono il numero dei conduttori attivi in serie statorici e rotorici, le costanti  $K_1$  e  $K_2$ , dette fattori di Kapp, sono pari a  $2 k_F k_B$ , con  $k_F = 1.11$  fattore di forma dell'onda sinusoidale e  $k_B$ , fattore di riduzione, minore dell'unità, detto anche coefficiente di Blondel, che tiene conto degli sfasamenti delle tensioni indotte dovuti allo sfasamento tra una cava e l'altra. Si noti che, in generale,  $K_1$  può anche essere diverso da  $K_2$ . Come si può notare le formule riportate in precedenza sono del tutto eguali a quelle già viste per la macchina sincrona.

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  $E_2$  si dà il nome di rapporto di trasformazione del motore

$$t = \frac{E_1}{E_{20}} = \frac{K_1 N_1}{K_2 N_2} \quad (\text{relativo al funzionamento a rotore fermo}) .$$

Quando il numero delle fasi statoriche è diverso da quelle rotoriche, l'espressione sopra riportata deve essere moltiplicata anche per tale rapporto.

La possibilità di poter ruotare, magari con una vite senza fine e ruota dentata elicoidale, il rotore rispetto allo statore, è utilizzata per realizzare il **variato** **di fase ad induzione**.



**Figura 3.13:** funzionamento a rotore bloccato.

Si consideri la Figura 3.13a con gli avvolgimenti delle stesse fasi radialmente allineati e quindi con le f.e.m. indotte in coincidenza di fase come in un trasformatore. Se il rotore ruota dell'angolo  $\alpha$ , come indicato in Figura 3.13b, le f.e.m. indotte, per ogni singola fase degli avvolgimenti di rotore, saranno in ritardo, rispetto a quelle di statore, ritardo esprimibile con lo stesso angolo  $\alpha$ . Questa proprietà è sfruttata per ottenere tensioni aventi angolo di fase variabile con continuità rispetto a quelle di alimentazione.

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.

Un'altra particolarità è che l'avvolgimento rotorico deve sempre avere un numero di poli pari a quello dell'avvolgimento statorico, ma può avere un numero diverso di fasi, per cui è possibile alimentare lo statore con una terna di tensioni e prelevare dagli anelli rotorici, alla stessa frequenza di rete e con valore efficace espresso dalla relazione data in precedenza, un numero di fasi qualsiasi.

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.

#### • **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

$$n_0 = \frac{60 f}{p} \quad (\text{espresso in giri al minuto}),$$

con  $f$  frequenza delle correnti statoriche e  $p$  numero delle coppie dei poli della macchina. Allora, si definisce scorrimento il numero

$$s = \frac{n_0 - n_2}{n_0},$$

dove  $n_2$  è il numero di giri al minuto del rotore. Il numeratore di tale relazione  $n_0 - n_2$  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,  $n_2 = n_0$ , risulta  $s = 0$ ; quando il rotore fermo, cioè  $n_2 = 0$ , 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  $n_2 > n_0$ , risulta che  $s < 0$ ; se, invece, il rotore ruota in senso opposto a quello sincrono,  $n_2 < 0$ , 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

$$\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60}, \quad \omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60},$$

risulta immediatamente

$$s = \frac{\omega_0 - \omega_2}{\omega_0}.$$

Dato che, per definizione, risulta che

$$n_2 = n_0 (1 - s),$$

passando in termini di velocità angolari, otteniamo

$$\omega_2 = \omega_0 (1 - s) \quad \omega_2 = \frac{2\pi n_0}{60} (1 - s) = \frac{2\pi f}{p} (1 - s) = \omega_s (1 - s),$$

in cui abbiamo indicato con  $\omega_s = \frac{2\pi f}{p}$  la pulsazione di rete.

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

Supponiamo di alimentare l'avvolgimento statorico 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  $s \approx 0$ . 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, lo statore ed il rotore. Nei conduttori di statore si inducono f.e.m. di valore efficace (riferito, per semplicità, alla prima fase)

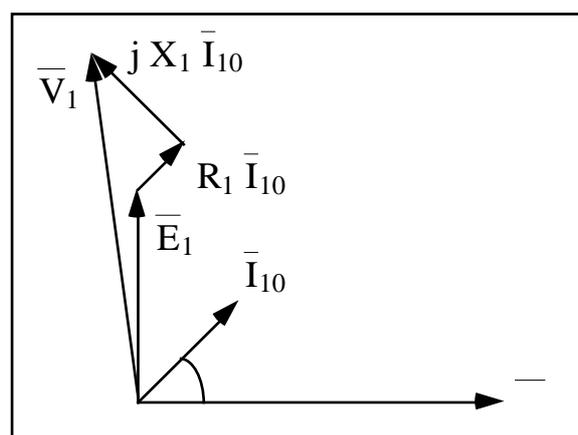
$$E_1 = k f N_1 \Phi$$

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 e le macchine sincrone, 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 tensione applicata in ogni fase statorica sarà pari a

$$\bar{V}_1 = \bar{E}_1 + R_1 \bar{I}_{10} + j X_1 \bar{I}_{10}$$

dove  $R_1$  e  $X_1$  sono, rispettivamente, la resistenza e la reattanza di dispersione della (prima) fase statorica, attraversate dalla corrente  $\bar{I}_{10}$ . Questa relazione fasoriale può essere rappresentata secondo il diagramma di Figura 3.14, dove  $\bar{E}_1$  è sfasato di  $90^\circ$  in ritardo rispetto al flusso principale ed  $\bar{I}_{10}$  è sfasato in anticipo, sempre rispetto al flusso, dell'angolo di perdita  $\delta$ .



**Figura 3.14:** diagramma fasoriale di una fase statorica nel funzionamento a vuoto di un MAT.

Come abbiamo già visto,  $\bar{I}_{10}$  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, allora, le due potenze

$$P_0 = 3 V I_0 \cos \varphi_0, \quad Q_0 = 3 V I_0 \sin \varphi_0.$$

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  $n_2$  giri al minuto, mentre il campo magnetico rotante ruota a  $n_0$  giri al minuto, le variazioni di flusso concatenato avvengono con frequenza

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

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

$$E_{2s} = k_2 f_2 N_2 = k_2 s f N_2 = s E_{20}.$$

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  $n_2 = n_0$ , 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  $n_2 = 0$ , 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

$$n = \frac{60}{p} f_2 = \frac{60}{p} f_1 s = \frac{60}{p} f_1 \frac{n_0 - n_2}{n_0} = n_0 \frac{n_0 - n_2}{n_0} = n_0 - n_2 .$$

Ora, poiché il rotore ruota con velocità  $n_2$ , il campo magnetico creato dal rotore ruota, rispetto allo statore, con velocità

$$n_0 - n_2 + n_2 = n_0 ,$$

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  $X_1 = \omega_1 L_1$  ed  $X_2(s) = \omega_2(s) L_2$ , solo che quest'ultima è variabile con la velocità del motore. Infatti,

$$X_2(s) = 2 \pi f_2 L_2 = 2 \pi s f L_2 = s X_{20} ,$$

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

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_{2s}}{R_2 + j X_2(s)} = \frac{\bar{E}_{2s}}{R_2 + j s X_{20}} = \frac{s \bar{E}_{20}}{R_2 + j s X_{20}} = \frac{\bar{E}_{20}}{\frac{R_2}{s} + j X_{20}} .$$

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

$$t = \frac{K_1 N_1}{K_2 N_2} .$$

Questo resistore variabile può essere scomposto in due parti

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_2 \frac{1-s}{s} ,$$

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 3.15. 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  $n_2 = n_0$ , ruotando il rotore alla velocità di sincronismo, la corrente  $\bar{I}_{2s}$  è nulla poiché

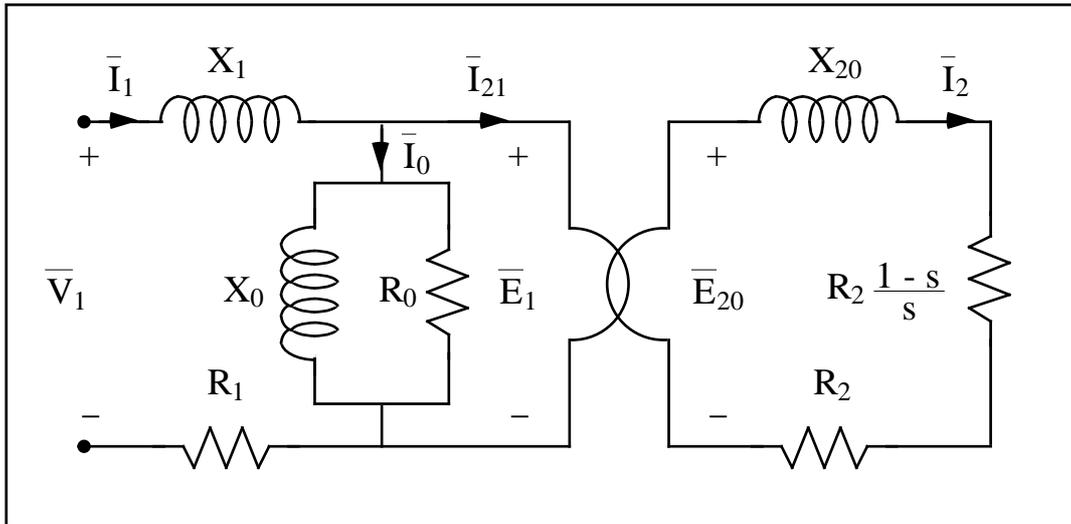
$$R_2 \frac{1-s}{s} ,$$

quindi è anche  $\bar{I}_1 = \bar{I}_{10}$ .

Inoltre, se  $s = 1$ , cioè  $n_2 = 0$  (rotore bloccato), risulta

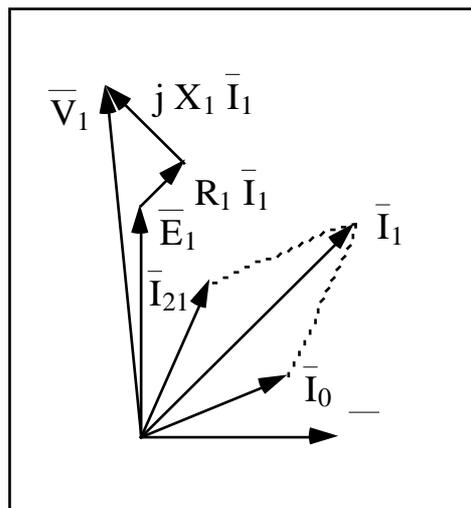
$$R_2 \frac{1-s}{s} = 0 ,$$

per cui ci troviamo nella condizione di funzionamento di cortocircuito.



**Figura 3.15:** circuito equivalente di un MAT, relativo ad una sola fase.

Proprio come per i trasformatori si può tracciare il diagramma, relativo ai fasori di una sola fase del MAT, rappresentato in Figura 3.16.



**Figura 3.16:** diagramma fasoriale di un MAT, relativo ad una sola fase.

Partendo dal flusso  $\bar{\Phi}$ , si traccia la f.e.m.  $\bar{E}_1 = j N_1 \bar{\Phi}$  indotta nello statore e sfasata di  $90^\circ$  in anticipo rispetto al flusso. La f.e.m.  $\bar{E}_{20}$  indotta nel rotore, essendo proporzionale ad  $\bar{E}_1 = t \bar{E}_{20}$ , non è stata riportata per non complicare inutilmente il disegno. La corrente rotorica

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_{20}}{R_2/s + j X_{20}} = \frac{s \bar{E}_{20}}{R_2 + j s X_{20}}$$

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

$$\varphi_2 = \arctan \frac{X_{20}}{R_2/s} = \arctan \frac{s X_{20}}{R_2} .$$

Ricavata, poi,

$$\bar{I}_{21} = \frac{1}{t} \bar{I}_{2s} ,$$

per risalire alla corrente assorbita dal motore  $\bar{I}_1$ , basta eseguire la somma (LKC)

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{21} + \bar{I}_0 = \bar{I}_{21} + \frac{\bar{E}_1}{R_0 \parallel (j X_0)} .$$

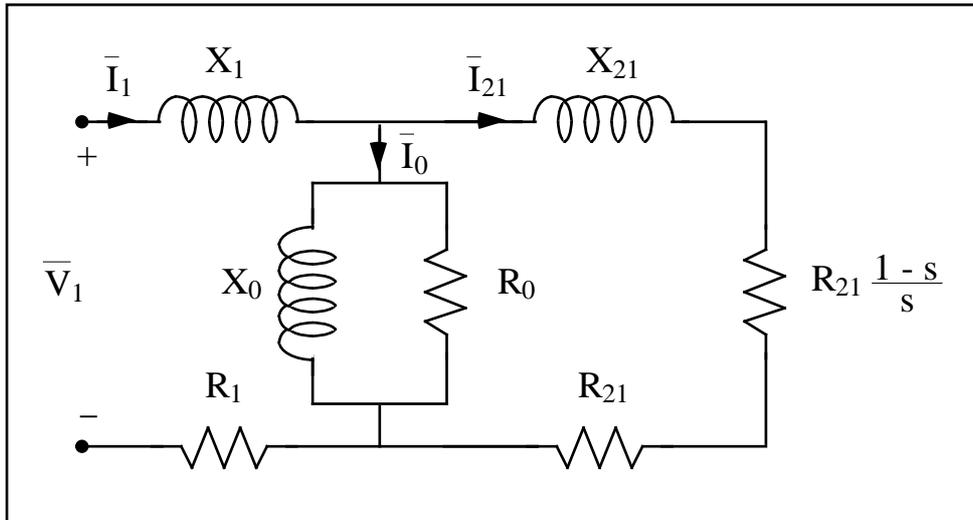
La tensione di alimentazione  $\bar{V}_1$ , infine, discende semplicemente dalla relazione (LKC)

$$\bar{V}_1 = (R_1 + j X_1) \bar{I}_1 + \bar{E}_1 .$$

Se si ritengono costanti, nel passaggio dalla condizione di funzionamento a vuoto a quella sotto carico, le cadute di tensione su  $R_1$  ed  $X_1$ , a parità di  $\bar{V}_1$ , sarà costante anche  $\bar{E}_1$  e, di conseguenza, il flusso  $\bar{\Phi}$ . 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.

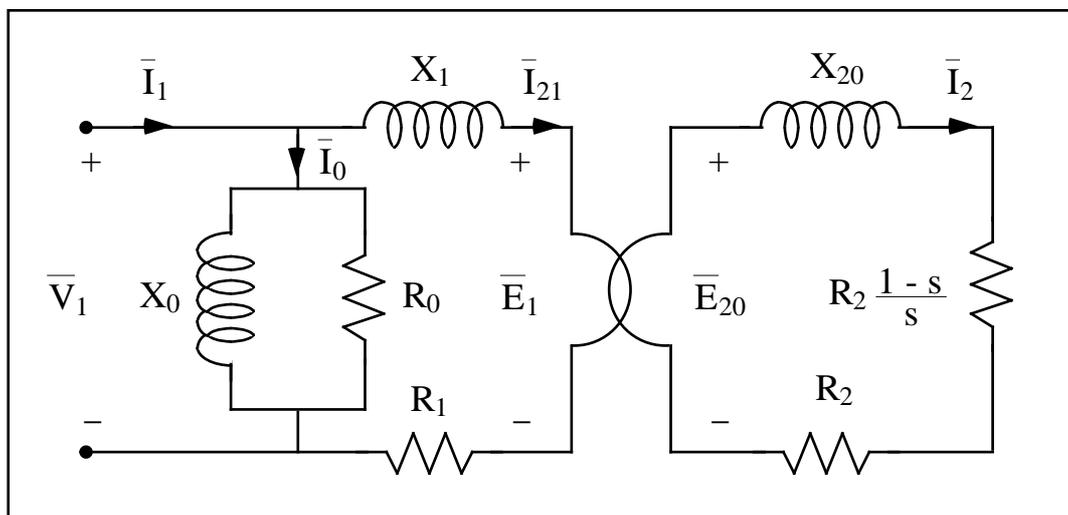
Inoltre, continuando l'analogia con i trasformatori, è possibile tracciare un circuito equivalente (Figura 3.17), dove i parametri del rotore sono riportati allo statore, e risulta

$$R_{21} = t^2 R_2 \quad e \quad X_{21} = t^2 X_{20} .$$



**Figura 3.17:** riporto delle grandezze statoriche al rotore.

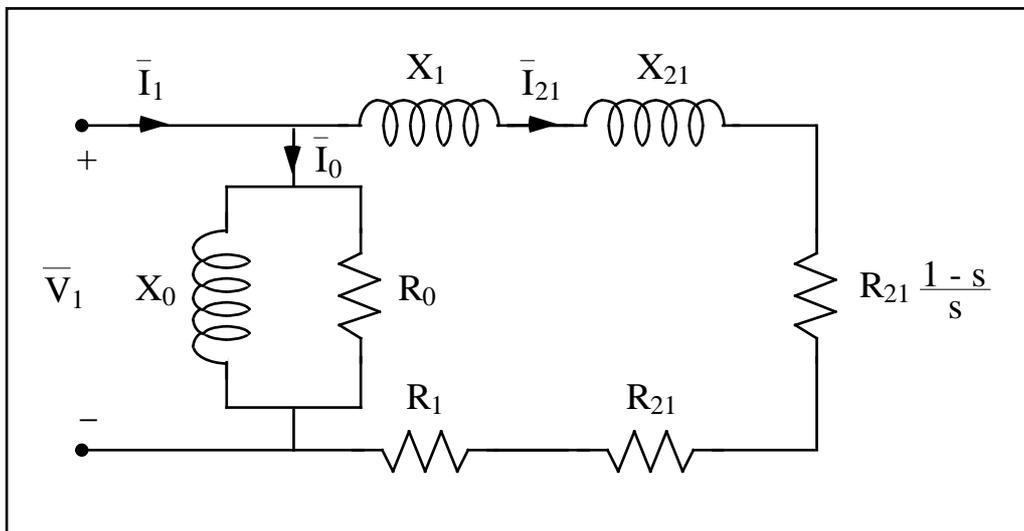
Il ramo derivato, costituito dal resistore  $R_0$  e dalla reattanza  $X_0$ , è attraversato dalla componente attiva e reattiva della corrente a vuoto, la prima necessaria per sopperire alle perdite a vuoto, nel ferro e negli avvolgimenti, la seconda utile a produrre il flusso.



**Figura 3.18:** circuito equivalente semplificato.

Tuttavia, come per i trasformatori, si può utilizzare il modello semplificato (a flusso bloccato) di Figura 3.18. In questo modello la corrente a vuoto non dipende dalle condizioni di carico, essendo determinabile direttamente dalla tensione alla porta primaria. 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  $\bar{I}_0$  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.



**Figura 3.19:** riporto al primario per il modello a flusso bloccato.

Per completezza riportiamo (Figura 3.19) anche il circuito equivalente semplificato con le grandezze statoriche riportate al primario (rotore).

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 3.18, si può scrivere che il valore efficace della corrente statorica vale

$$I_{2CC} = \frac{E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + X_{20}^2}},$$

che rappresenta un valore notevolmente più alto di quello che si ha nel funzionamento normale, mentre, trascurando la piccola  $I_0$ , si ha

$$I_{1CC} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_{21})^2 + (X_1 + X_{21})^2}},$$

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

$$\varphi_{1CC} = \arctan \frac{X_1 + X_{21}}{R_1 + R_{21}} .$$

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

$$P_{CC} = 3 R_1 I_{1CC}^2 + 3 R_2 I_{2CC}^2 .$$

Si hanno, inoltre, le perdite nel ferro di statore e di rotore, che pure sono massime perché  $s = 1$  e, quindi,  $f_2 = f_1$ .

Il funzionamento a rotore bloccato viene effettuato in laboratorio nella prova in cortocircuito o a rotore bloccato, 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.

### 3.3 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

$$A = P + j Q = 3 V_1 I_1 ,$$

mentre la potenza attiva è data da

$$P = 3 V_1 I_1 \cos \varphi_1 .$$

Per arrivare alla potenza utile, disponibile cioè sull'asse del motore, occorre sottrarre alla potenza attiva  $P$  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  $R_0$

$$P_{Fe} = 3 \frac{V_1^2}{R_0},$$

valutate in base al modello semplificato a flusso bloccato;

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

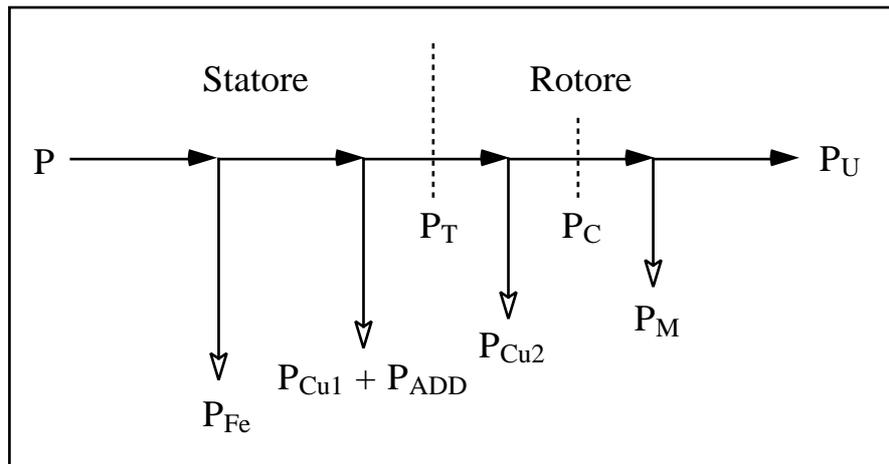
$$P_{Cu1} = 3 R_1 I_1^2;$$

- 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 utile del motore.

La differenza fra la potenza assorbita e le perdite nello statore

$$P_T = P - P_{Fe} - P_{Cu1}$$

dà la potenza che viene 'trasmessa' dal campo rotante al rotore. Infatti, con riferimento alla Figura 3.20, 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 3.20:** flusso di potenza in un MAT.

Essa viene tutta dissipata a valle del trasformatore ideale, cioè nell'unico elemento dissipativo di resistenza  $R_2/s$

$$P_T = 3 \frac{R_2}{s} I_2^2 .$$

Questa potenza, vista come in Figura 3.20, può essere scomposta in due parti

$$P_T = 3 \frac{R_2}{s} I_2^2 = 3 R_2 I_2^2 + 3 R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2 ,$$

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

$$P_{Cu2} = 3 R_2 I_2^2 .$$

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 degli attriti e della ventilazione, sull'albero del motore

$$P_C = 3 R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2 .$$

Per questo motivo abbiamo 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. Dal confronto tra le precedenti relazioni risulta immediatamente che

$$P_{Cu2} = s P_T ,$$

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

$$P_U = P_C - P_M ,$$

dove  $P_M$  rappresenta la piccola parte di perdite meccaniche dovute agli attriti ed alla ventilazione.

Alcune interessanti osservazioni si possono ricavare dalla relazione

$$P_C = 3 R_2 \frac{1-s}{s} I_{2s}^2 = (1-s) P_T ,$$

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  $I_{2s} = 0$  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  $s < 0$  ( $n_2 > n_0$ ) e  $s > 1$  ( $n_2 < 0$ ), la macchina funziona da generatore e da freno.

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

$$= \frac{P_U}{P} = \frac{P_U}{P_U + P_P} = \frac{P - P_P}{P} = 1 - \frac{P_P}{P} ,$$

in cui  $P_p$  è la somma di tutte le potenze perdute e vale

$$P_p = P_M + P_{Cu1} + P_{Fe} + P_{Cu2} + P_{ADD} .$$

Pertanto, il rendimento si può scrivere come

$$= \frac{P_U}{P_U + P_M + P_{Cu1} + P_{Fe} + P_{Cu2} + P_{ADD}}$$

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.

### • Coppie meccaniche

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

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

a seconda dei valori della potenza e della pulsazione, avremo

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

$$C = \frac{P_C}{\omega} ;$$

- una coppia trasmessa  $C_T$ , detta anche coppia elettromagnetica, data da

$$C_T = \frac{P_T}{\omega_0} ,$$

in quanto lo statore esercita sul rotore una coppia per mezzo del campo magnetico rotante a velocità angolare  $\omega_0$ .

Non è difficile verificare che queste due coppie assumono lo stesso valore

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

Definiamo ancora

- una coppia d'attrito, il rapporto tra  $P_M$ , le perdite meccaniche, ed

$$C_A = \frac{P_M}{\omega};$$

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

$$C_U = \frac{P_U}{\omega} \quad C_U = C - C_A.$$

### 3.4 Funzioni e curve caratteristiche

Il termine 'caratteristica', in senso lato, viene usato per indicare un grafico cartesiano che rappresenta l'andamento di una grandezza in relazione ad un'altra, supponendo che una di tali grandezze assuma il ruolo di variabile e l'altra quello di funzione di tale variabile. Nello studio del MAT si assume come variabile la velocità angolare del rotore, oppure lo scorrimento, ovvero il numero di giri al minuto, essendo legate tra loro da relazioni ben precise, e, come funzione, il valore efficace della corrente secondaria, eventualmente ridotta al primario e la coppia meccanica.

Pertanto verranno considerate due funzioni caratteristiche:

- quella elettromeccanica  $I_2(\omega)$  [oppure  $I_{21}(\omega)$ ];
- quella meccanica  $C(\omega)$  [ $C(s)$  oppure  $C(n)$ ].

#### • Caratteristica elettromeccanica

Essa verrà ricavata considerando il circuito equivalente di Figura 3.19, prima ricavando  $I_{21}(\omega)$  in funzione dello scorrimento, poi convertendo questo in velocità angolare. Risulta, allora,

$$I_{21} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_{21}}{s}\right)^2 + X_T^2}}.$$

Immaginiamo di mantenere costanti le grandezze  $V_1$ ,  $R_1$  ed  $X_T$  di questa formula e di considerare variabili lo scorrimento  $s$  ed il resistore  $R_{21}$ . Il grafico di Figura 3.21 mostra questa famiglia di curve al variare di  $R_{21}$ , che è pari a

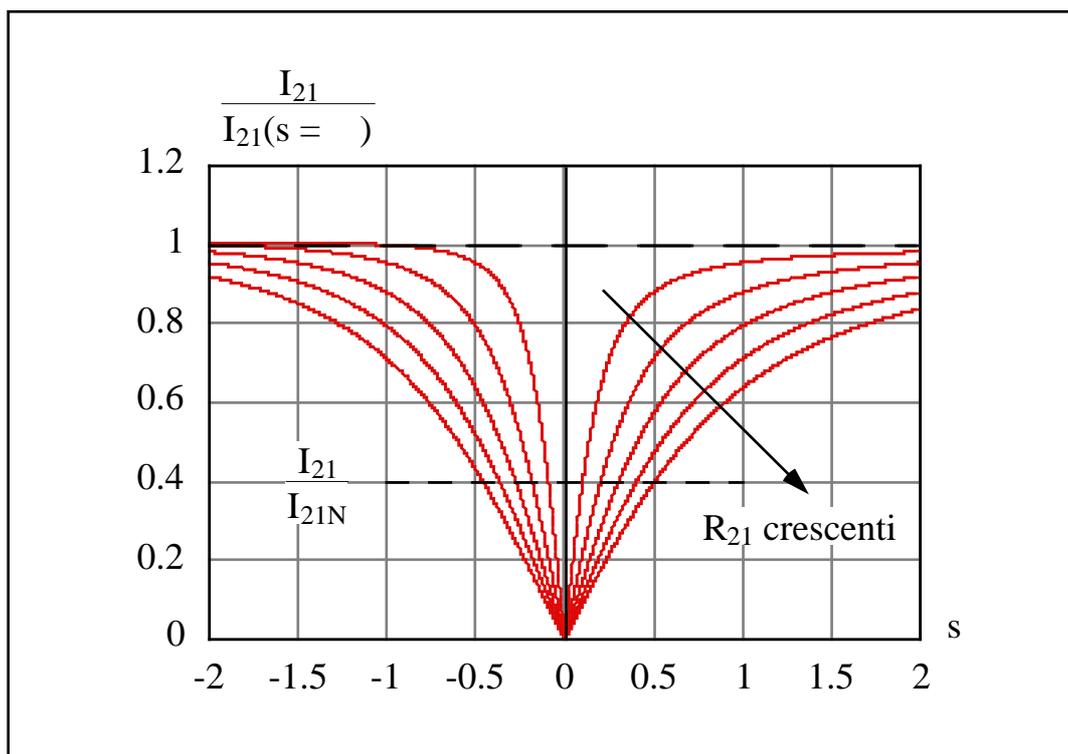
$$R_{21} = t^2 (R_2 + R_C),$$

essendo  $R_C$  un resistore di carico variabile. Vale la pena notare subito che la famiglia di curve riportata dà l'ingannevole impressione di essere simmetrica rispetto all'asse della corrente, quello delle ordinate; ciò è dovuto al piccolo valore della resistenza  $R_1$ , che rende pressoché simmetriche queste caratteristiche.

La curva più ripida si ha con  $R_C = 0$ , cioè  $R_{21} = t^2 R_2$ , rotore in corto circuito, mentre l'inclinazione delle altre decresce al crescere di  $R_{21}$ ; l'asintoto orizzontale si ha per  $s =$  ed è pari a

$$I_{21}(s = ) = \frac{V_1}{\sqrt{R_1^2 + X_T^2}},$$

indipendente, come si nota, da  $R_{21}$ .



**Figura 3.21:** caratteristica elettromeccanica di un MAT.

Al diminuire di  $s$  (aumento della velocità del motore),  $I_{21}$  diminuisce (riducendosi la f.e.m. indotta) e si annulla ad  $s = 0$  (velocità di sincronismo); inoltre, per le curve più elevate, con scorrimenti alti, le correnti variano di poco, mentre, quando la curva è a circa il 70% della corrente di corto circuito ( $s = 1$ ), le

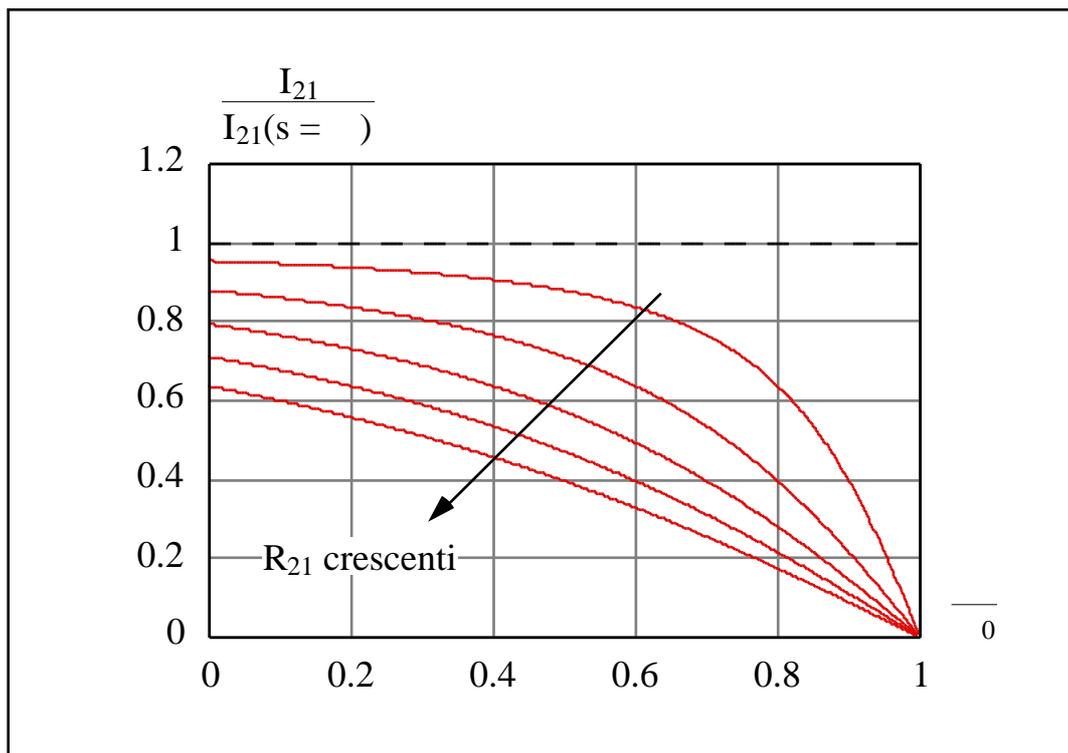
variazioni sono più ripide. Queste caratteristiche sono state tracciate tenendo conto che, generalmente, risulta

$$R_1 = (0.06 \div 0.2) X_T, \quad I_{21}(s = 0) = (4 \div 8) I_{21N}, \quad s_N = 0.01 \div 0.05 .$$

Il passaggio da  $I_{21}(s)$  a  $I_{21}(n)$  [ovvero  $I_{21}(n)$ ] è semplice perché  $s$  ed  $n$  sono legate dalla relazione lineare

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

e l'asse  $s$  può rappresentare anche l'asse  $n$ , seppur con diversa origine, scala e verso. In Figura 3.22 è rappresentato l'intervallo  $0 < n < n_0$  cui corrisponde l'intervallo  $0 < s < 1$ , l'intervallo più interessante in quanto è quello in cui la macchina funziona da motore.



**Figura 3.22:** altra forma della caratteristica elettromeccanica.

Come si osserva, all'avviamento quando  $n = 0$ , il motore assorbe la corrente massima che decresce man mano che il motore accelera, fino al valore minimo del funzionamento a vuoto.

- **Caratteristica meccanica**

La coppia meccanica, come definita in precedenza, che il motore fornisce al carico (coppia utile), è data dal rapporto

$$C = \frac{P_T}{\omega}$$

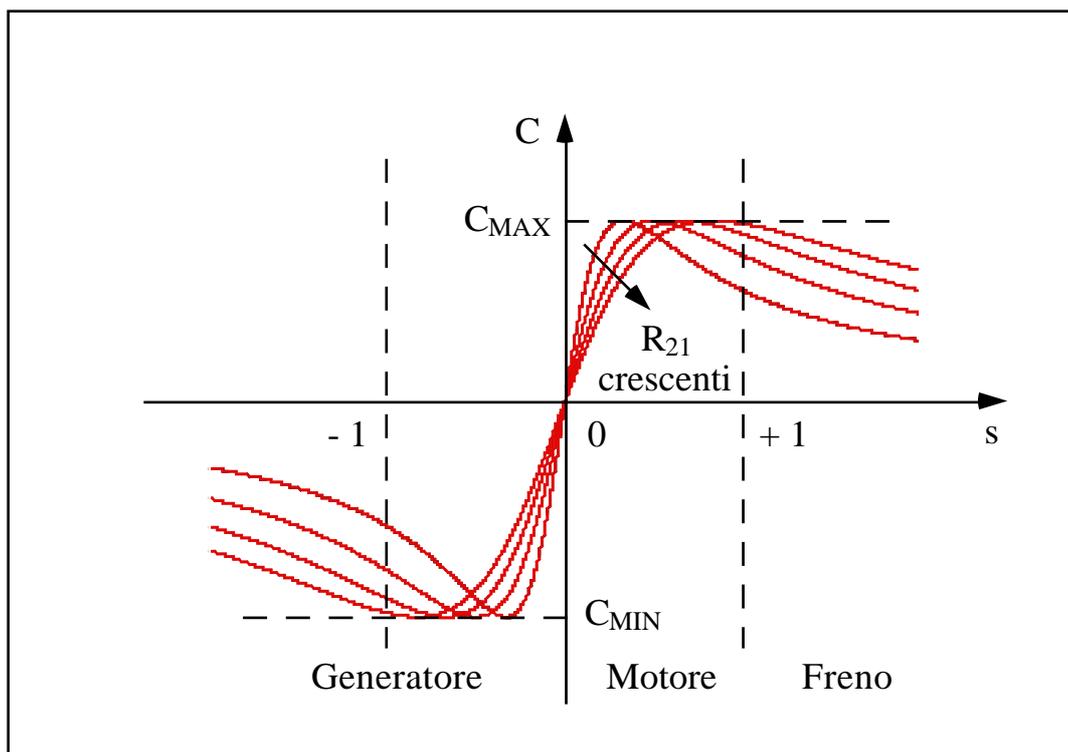
Ora, facendo riferimento alla definizione di  $P_T$  ed alla caratteristica elettromeccanica

$$P_T = 3 \frac{R_{21}}{s} I_{21}^2 = 3 \frac{R_{21}}{s} \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_{21}}{s}\right)^2 + X_T^2},$$

posto  $\omega = 2\pi n/p$ , si ottiene:

$$C = \frac{3 p}{2\pi n} V_1^2 \frac{\frac{R_{21}}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_{21}}{s}\right)^2 + X_T^2}.$$

Quest'ultima relazione rappresenta l'espressione matematica della caratteristica meccanica del motore, che lega la coppia allo scorrimento: in Figura 3.23 è stato tracciato anche l'andamento per  $s < 0$ .



**Figura 3.23:** caratteristica meccanica di un MAT.

Dallo studio dell'espressione della coppia si rileva in particolare che la coppia dipende dal quadrato di  $V_1$ , la coppia è nulla per  $s = 0$  (sincronismo), la coppia cresce all'aumentare di  $s$  fino a raggiungere il valore massimo

$$C_{MAX} = \frac{3 p}{1} V_1^2 \frac{\sqrt{R_1^2 + X_T^2}}{R_1^2 + X_T^2 + R_1 \sqrt{R_1^2 + X_T^2}},$$

che si ottiene in corrispondenza dello scorrimento

$$s^* = \frac{R_{21}}{\sqrt{R_1^2 + X_T^2}},$$

con  $s^*$  generalmente variabile nell'intervallo  $0.1 \leq s^* \leq 0.2$ . In molti casi  $R_1$  è trascurabile rispetto a  $X_T$ , per cui le formule sopra riportate si possono semplificare in

$$s^* \approx \frac{R_{21}}{X_T}, \quad C_{MAX} \approx \frac{3 p}{1} V_1^2 \frac{1}{X_T}, \quad \text{per piccoli valori di } R_1.$$

Come si vede la  $C_{MAX}$  è inversamente proporzionale alla reattanza di dispersione totale  $X_T$  e per questo motivo il traferro si fa il più piccolo possibile (compatibilmente con la libera rotazione del rotore in ogni condizione di funzionamento), mentre è indipendente dalla resistenza dei circuiti rotorici. La resistenza dei circuiti rotorici interviene solamente a determinare il valore di  $s^*$ , in corrispondenza del quale si realizza il valore massimo della coppia. Ciò vuol dire che aumentando  $R_{21}$ , la  $C_{MAX}$  rimane costante, ma ad una velocità inferiore, cioè con un aumento di  $s^*$  (Figura 3.24). Per  $s = 1$  si ha la coppia di spunto o di avviamento, pari a

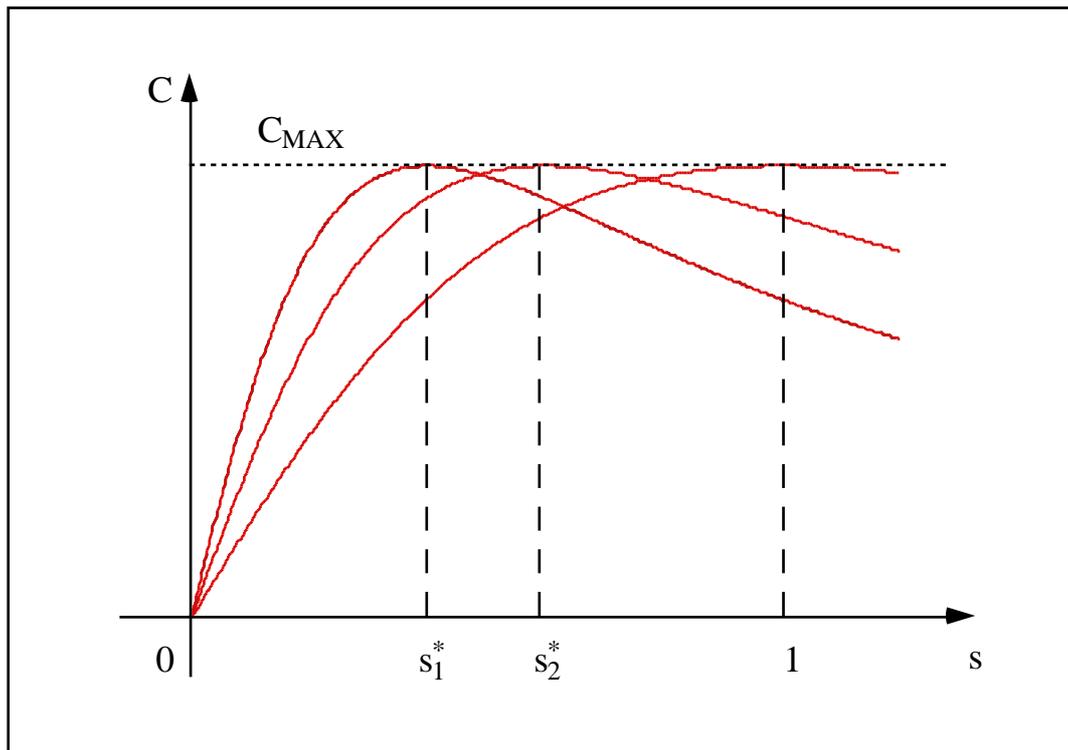
$$C_{AVV} = \frac{3 p}{1} V_1^2 \frac{R_{21}}{(R_1 + R_{21})^2 + X_T^2},$$

che è direttamente proporzionale ad  $R_{21}$ , potendo trascurare  $R_1 + R_{21}$  rispetto a  $X_T$ . La  $C_{AVV}$  cresce al crescere di  $R_{21}$ , fino a divenire uguale a  $C_{MAX}$  quando

$$C_{AVV} = C_{MAX} \quad R_1 + R_{21} = X_T.$$

Per ulteriori aumenti di  $R_{21}$  la coppia di avviamento diminuisce, in quanto  $C_{MAX}$  si sposta oltre il valore  $s = 1$ .

Dall'analisi della caratteristica meccanica si evince che il MAT presenta, all'avviamento, cioè per  $s = 1$ , una non elevata coppia di spunto compresa nell'intervallo  $0.2 C_{MAX} \leq C_{AVV} \leq 0.5 C_{MAX}$ ; inoltre, in queste condizioni, presenta il tipico funzionamento del trasformatore in corto circuito.

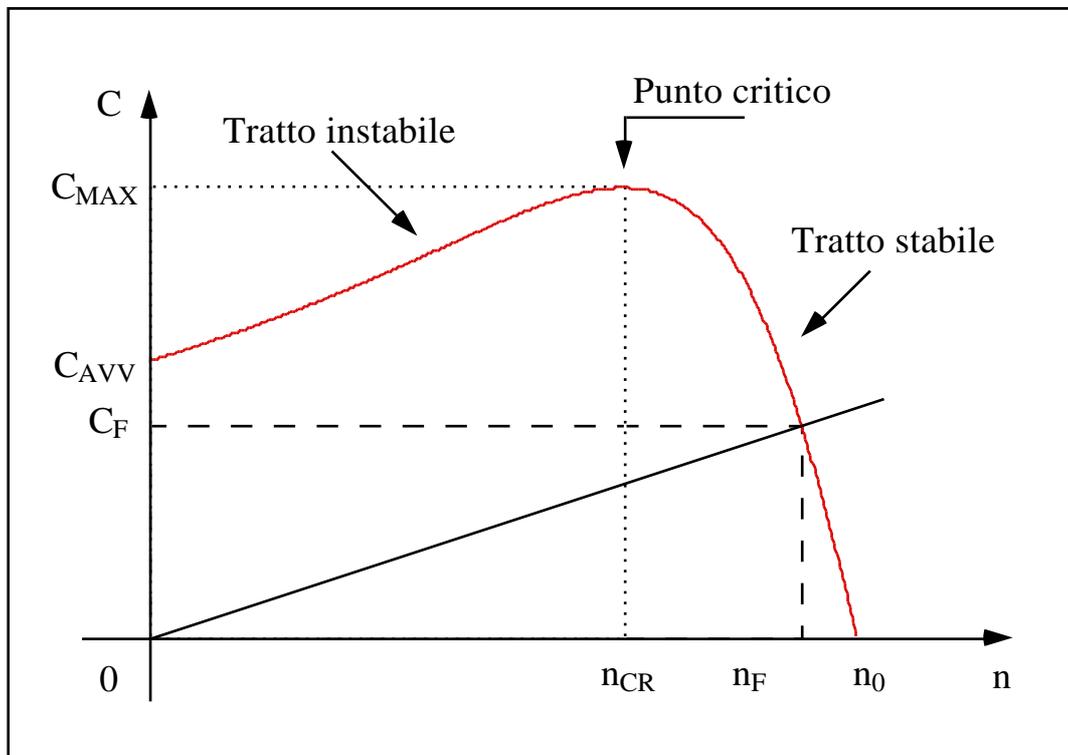


**Figura 3.24:** aumento della coppia di spunto al crescere della resistenza rotorica.

Esaminando la caratteristica di Figura 3.25 nell'intervallo  $0 \leq n \leq n_0$ , notiamo che essa si compone di due rami, il primo, quello ascendente, cui corrisponde un funzionamento instabile, l'altro discendente, cui corrisponde un funzionamento stabile: il punto di  $C_{MAX}$  segna il valore critico di confine tra queste due zone.

Il secondo tratto è stabile perché, ad ogni aumento della coppia resistente, il motore rallenta e si porta a funzionare stabilmente ad un nuovo scorrimento cui corrisponde una coppia motrice maggiore, di valore pari al nuovo valore della coppia resistente richiesta. Questa nuova condizione di equilibrio sarà raggiunta dopo una serie di oscillazioni intorno al punto di equilibrio, oscillazioni dipendenti dalla rapidità della variazione del carico, dall'inerzia delle masse ruotanti ed alla presenza di attriti e smorzamenti del moto. Nell'altro tratto, invece, ad ogni aumento della coppia resistente il motore rallenta, con conseguente diminuzione

della coppia motrice ed ulteriore rallentamento, sicché, dopo poco, smaltita l'energia cinetica delle masse rotanti, il motore si ferma.



**Figura 3.25:** caratteristica meccanica  $C(n)$  e punto di lavoro.

Il punto di normale funzionamento (anche detto punto di lavoro), caratterizzato dalla coppia  $n = n_F$  e  $C = C_F$ , si trova nel secondo tratto, quello stabile e come si può vedere dispone ancora di un buon margine di coppia perché di solito  $C_{MAX}/3 < C_F < C_{MAX}/2$ . Inoltre, poiché il secondo tratto della caratteristica è molto ripido, a regime la velocità è pressoché costante al variare del carico (0.03 s 0.1).

### 3.5 Avviamento, inversione di marcia e regolazione della velocità

L'applicazione pratica di tutte le conoscenze finora acquisite sul funzionamento del MAT si trova ogniqualvolta si tratta di portare il motore stesso da una ad un'altra condizione di funzionamento.

Uno dei comandi più consueti è l'avviamento, che consiste nel portare la velocità del motore da zero a quella nominale. Affinché il motore possa avviarsi ed accelerare, è necessario che la coppia di spunto sia superiore alla coppia resistente, sempre all'avviamento, del carico. Inizialmente il rotore è fermo e lo statore non alimentato; la tensione e la frequenza nominali del motore sono uguali a quelli della linea di alimentazione. Quando si chiude l'interruttore che collega la linea al

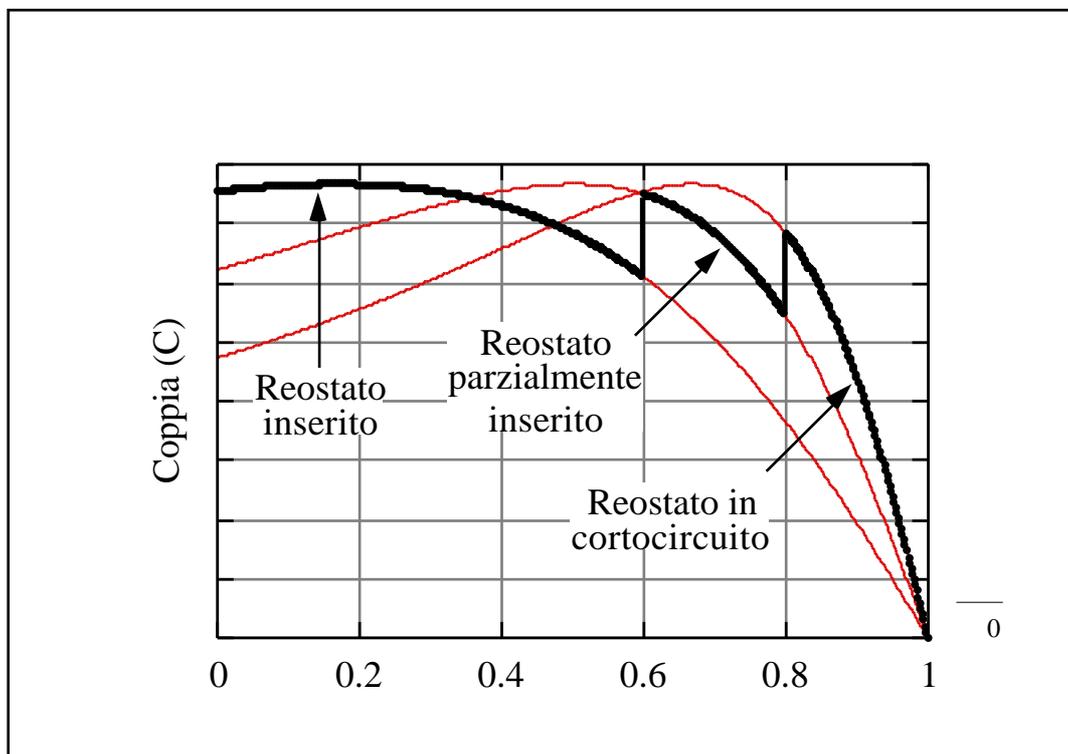
motore (rotore fermo,  $s = 1$ ) questo si comporta come un trasformatore chiuso in cortocircuito e nel primo istante di avviamento, come più volte ribadito, assorbe dalla linea la massima corrente, così elevata (4 ÷ 8 volte la corrente nominale) che può dar luogo a diversi inconvenienti, tra i quali un eccessivo riscaldamento degli avvolgimenti e della linea, se l'avviamento è lento, ad un'elevata caduta di tensione lungo la linea, con problemi agli utilizzatori se questi sono particolarmente sensibili alla tensione, e, se anche l'avviamento fosse rapido, un intempestivo intervento delle protezioni sulla linea.

Si accennerà ora agli accorgimenti usati per ovviare a questi inconvenienti.

• **Avviamento del motore con rotore avvolto**

Se il motore è a rotore avvolto, sarà dotato di anelli, spazzole e resistenze variabili sul circuito di rotore, Figura 3.11, questa terna di resistenze è chiamata reostato d'avviamento ed avviamento reostatico il tipo di avviamento per tali motori.

La presenza di una elevata resistenza rotorica all'atto dell'avviamento e con tensione di alimentazione costante, ha un duplice scopo: da un lato l'impedenza rotorica aumenta di modulo con una conseguente diminuzione della corrente assorbita dal motore all'avviamento; dall'altro l'aumento della resistenza comporta una diminuzione dello sfasamento delle correnti rotoriche con conseguente aumento del valore della coppia di avviamento e quindi dell'accelerazione.



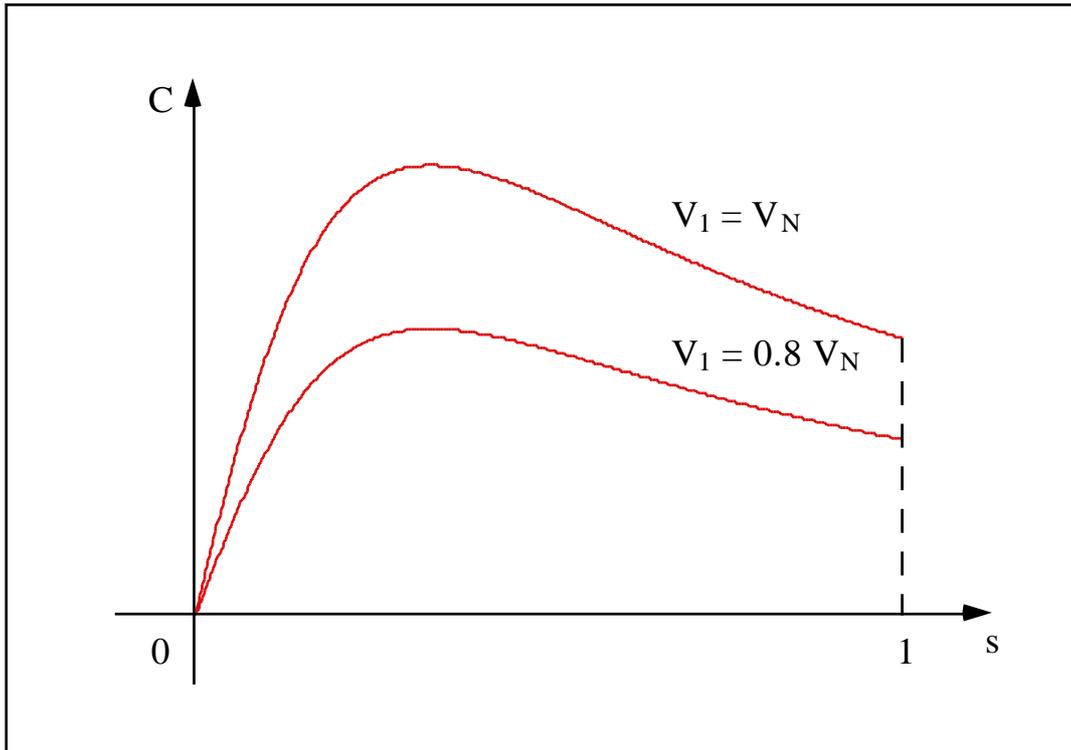
**Figura 3.26:** effetto sulla caratteristica del reostato di avviamento.

Il reostato, completamente inserito all'atto dell'avviamento, verrà gradualmente disinserito man mano che la velocità aumenta, Figura 3.26, verrà escluso completamente quando la velocità avrà raggiunto quasi il suo valore nominale (80% circa).

- **Avviamento del motore con rotore a gabbia**

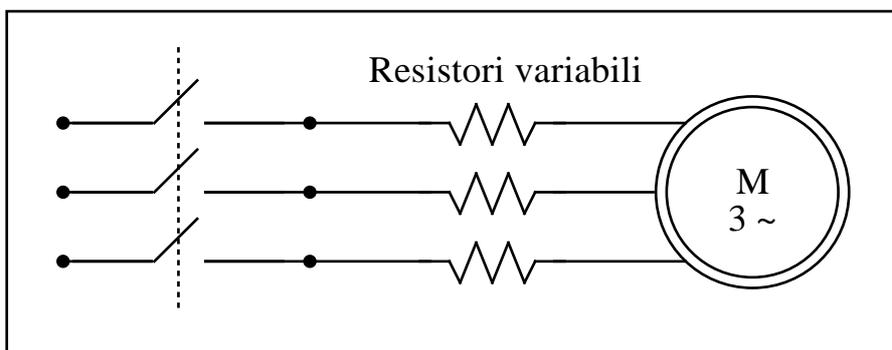
Per i motori con rotore a gabbia (o con rotore in cortocircuito) non è possibile inserire resistenze nei circuiti rotorici per cui, all'avviamento, le correnti di spunto sono elevate. Ora, essendo il circuito fortemente induttivo (la gabbia rotorica è immersa nel ferro), le correnti sono notevolmente sfasate rispetto alle f.e.m., cioè piccola è la potenza assorbita e tale risulta anche la coppia motrice. Di conseguenza, si possono avere due tipi fondamentali sistemi di avviamento.

Si ha **avviamento diretto** quando la potenza del motore è piccola (10 kW al massimo), per cui questi motori vengono avviati senza alcun accorgimento particolare perché la corrente di spunto risulta di piccola intensità,  $(3 \div 6) I_N$ , e, quindi, non crea problemi alla linea e la coppia di spunto è pressappoco uguale a quella nominale  $(0.5 \div 1) C_N$ . Si ha, invece, **avviamento a tensione ridotta** quando, non essendo possibile avere allo spunto correnti relativamente ridotte con coppie relativamente alte, si mira essenzialmente a limitare la corrente di spunto riducendo la tensione di alimentazione. In questo modo, però, si riduce anche la coppia di spunto che è proporzionale al quadrato della tensione applicata al motore, Figura 3.27, per cui questo metodo può essere usato solo quando la coppia resistente all'avviamento presenta piccoli valori, oppure quando il motore possiede una coppia di spunto tanto elevata per cui la riduzione di tensione non pregiudica l'avviamento.



**Figura 3.27:** coppia motrice per due diverse tensioni di alimentazione.

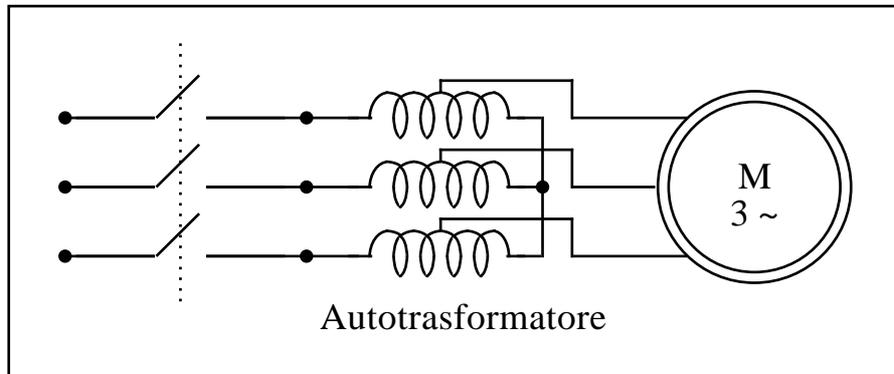
Vari possono essere i sistemi per ridurre la tensione di alimentazione all'avviamento. In particolare, abbiamo l'avviamento mediante l'inserzione di resistenze statoriche, mostrata in Figura 3.28: si tratta di resistori da inserire, all'avviamento, in serie ad ogni fase statorica. La tensione si riduce per effetto delle cadute di tensione sulle resistenze aggiunte, da escludere a regime, ed è evidente che si hanno notevoli perdite per effetto Joule.



**Figura 3.28:** avviamento mediante resistenze statoriche.

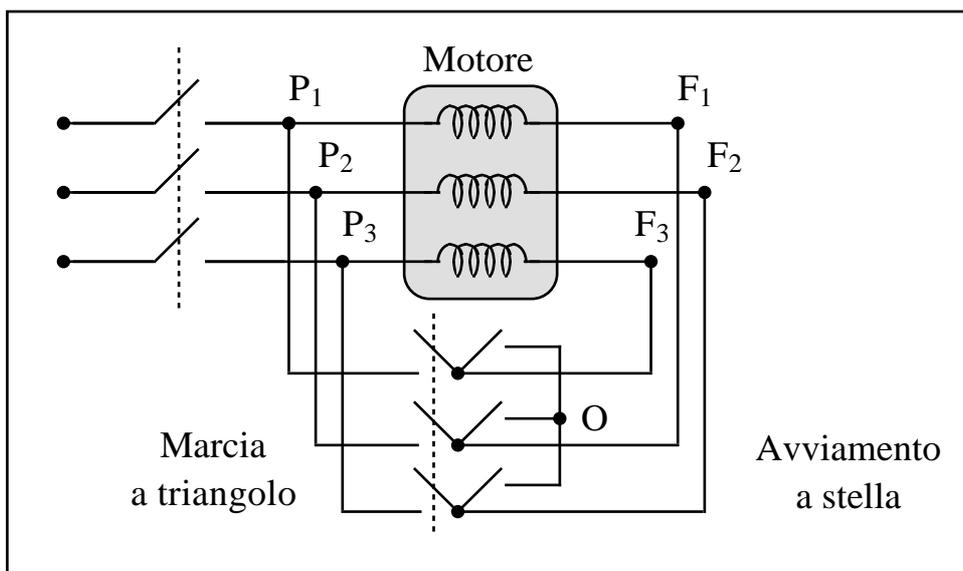
L'alimentazione tramite autotrasformatore, ad una o più prese intermedie, è schematizzata in Figura 3.29: lo svantaggio è dovuto alla necessità di avere un'altra macchina, l'autotrasformatore, costosa, impiegata per breve tempo, e con

perdita di potenza. Inoltre, non può essere usato per motori con frequenti avviamenti.



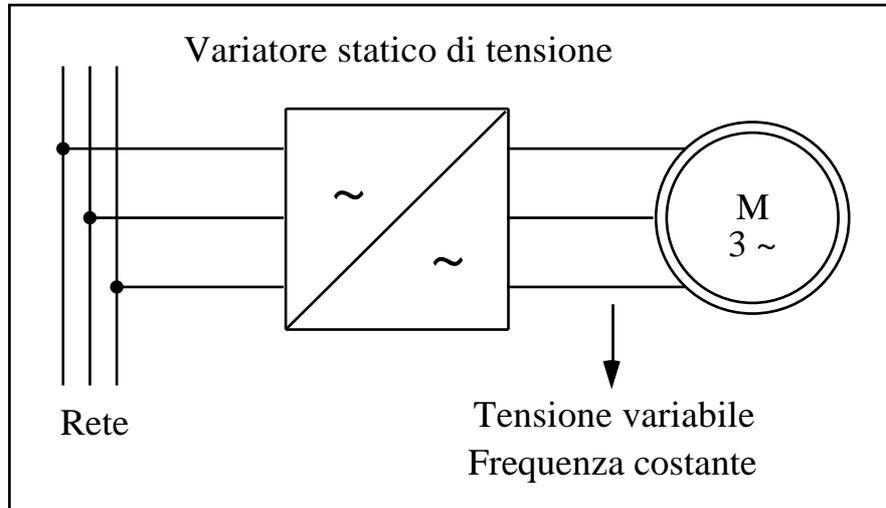
**Figura 3.29:** avviamento mediante autotrasformatore.

L'avviamento stella-triangolo, mostrato in Figura 3.30, viene utilizzato per quei motori la cui tensione nominale, per ciascuno dei suoi avvolgimenti statorici, sia uguale alla tensione concatenata della linea di alimentazione. All'avviamento le fasi del motore vengono collegate a stella, a triangolo durante la marcia normale. All'avviamento gli avvolgimenti statorici, collegati a stella, saranno soggetti ad una tensione ridotta  $\sqrt{3}$  volte, la corrente di linea assorbita dal motore si riduce di un terzo come pure la coppia di spunto, proporzionale al quadrato della tensione. Questo metodo, molto usato in passato, ha l'inconveniente di presentare un brusco aumento della corrente e della coppia nel passaggio da stella a triangolo.



**Figura 3.30:** avviamento mediante commutatore stella - triangolo.

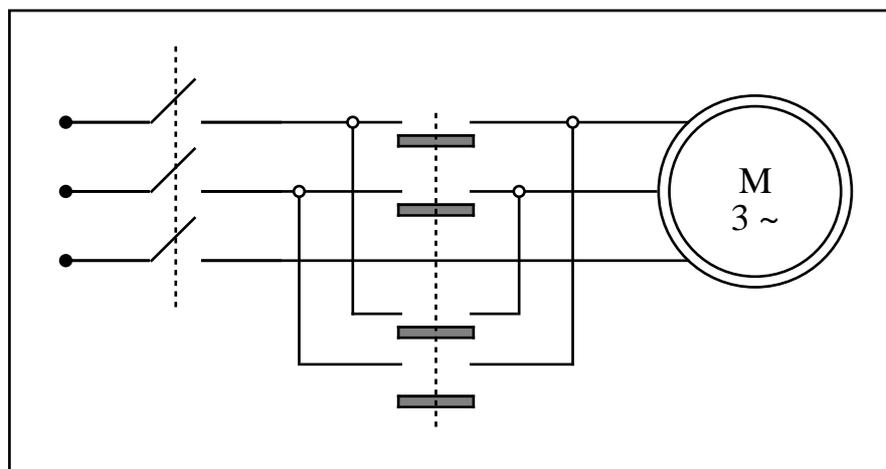
Infine, l'alimentazione mediante regolatori elettronici di tensione è attualmente il metodo più usato perché consente di fornire una tensione alternata sinusoidale trifase regolabile a frequenza costante, come suggerito dalla Figura 3.31.



**Figura 3.31:** alimentazione di un MAT con tensione variabile.

• **Inversione di marcia**

Per invertire il senso di rotazione di un MAT basta invertire il senso di rotazione del campo rotante e, per far ciò, basta scambiare fra loro le correnti che alimentano due dei tre avvolgimenti, come schematicamente mostrato in Figura 3.32.



**Figura 3.32:** inversione di marcia di un MAT.

Gli interruttori adoperati per la 'marcia avanti' e per la 'marcia indietro' devono però essere muniti di interblocco, sono utilizzabili sia per il collegamento a stella che per quello a triangolo e possono coesistere con quelli per la commutazione stella - triangolo.

Vale la pena ricordare che questa manovra va eseguita a rotore fermo per evitare un assorbimento di corrente anche maggiore di quella di spunto.

### • **Regolazione della velocità**

Come abbiamo avuto modo di sottolineare, il MAT presenta innegabili vantaggi; tuttavia presenta la caratteristica di conservare pressoché costante la velocità al variare del carico. In molti casi occorre variare la velocità del motore in un ampio campo con un determinato valore di momento motore (regolazione a coppia costante) oppure con una coppia inversamente proporzionale alla velocità (regolazione a potenza costante).

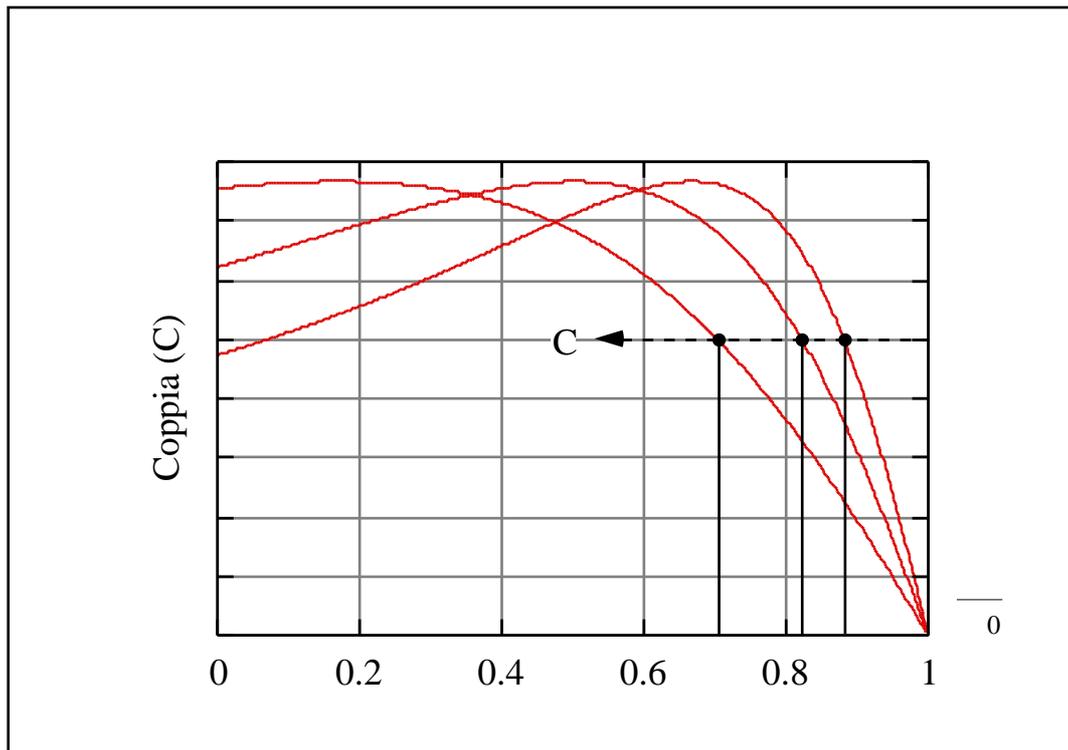
La velocità del motore asincrono è pari a

$$n = \frac{60 f}{p} (1 - s) ,$$

per cui, per variare la velocità di un MAT, occorrerà variare o lo scorrimento, o il numero delle coppie polari, o la frequenza della linea di alimentazione.

#### - Variazione dello scorrimento

Abbiamo già avuto modo di sottolineare l'effetto dell'inserzione di resistenze addizionali in serie a quelle rotoriche durante l'avviamento del motore. Le stesse resistenze possono essere efficacemente utilizzate per variare anche la velocità del motore. Infatti, l'aggiunta di resistenze in serie al rotore comporta un aumento dello scorrimento, cioè una diminuzione della velocità del motore, in quanto modifica la forma della caratteristica meccanica del motore, come indica la Figura 3.33.

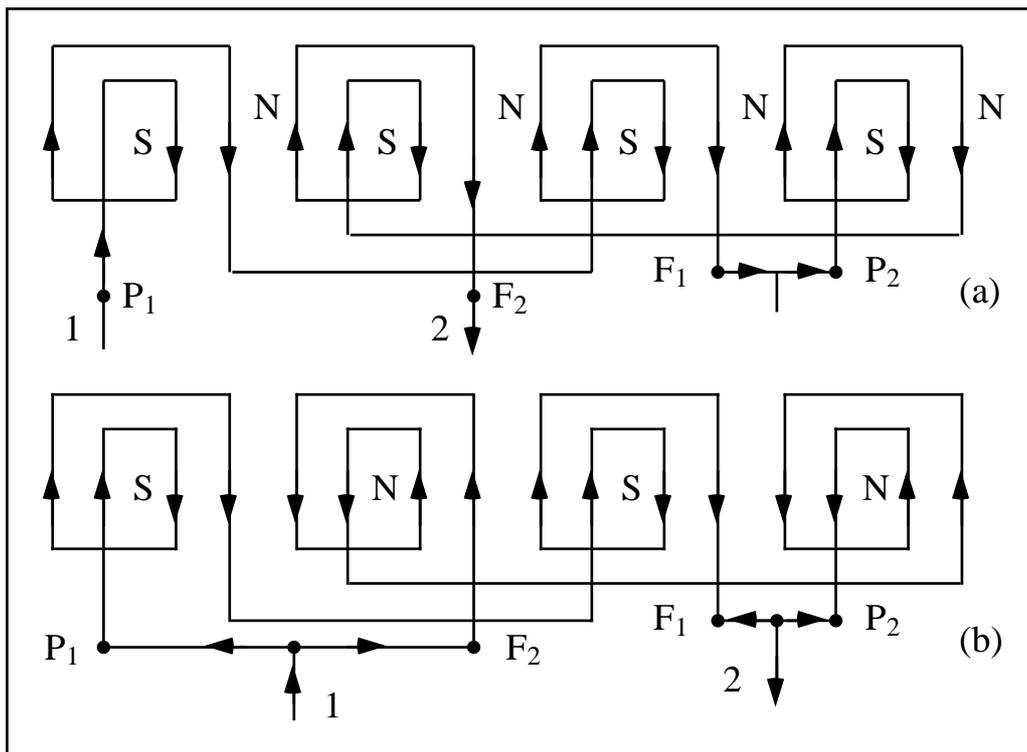


**Figura 3.33:** regolazione della velocità con resistenze in serie al rotore.

Si può notare che le variazioni di velocità, per una stessa resistenza, dipendono dal carico: esse sono alte a carichi elevati, trascurabili a bassi carichi. Inoltre, qualunque diminuzione di velocità si traduce in un corrispondente aumento delle perdite, in calore, nelle resistenze addizionali con abbassamento del rendimento.

- Variazione del numero delle coppie di poli

Viene realizzata costruendo l'avvolgimento statorico (avvolgimento Dalhandler) in modo da ottenere tale variazione, raddoppio, con il semplice scambio di poche connessioni sulla morsettiera delle bobine di uno stesso avvolgimento con conseguente dimezzamento della velocità, come mostrato in Figura 3.34.

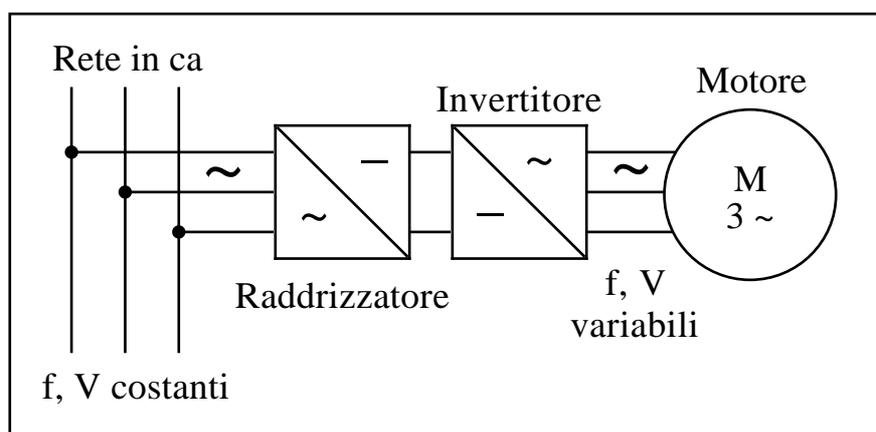


**Figura 3.34:** schema di avvolgimento commutabile (a) da otto a (b) quattro poli.

In questo caso è indispensabile che il rotore sia a gabbia, potendo funzionare sotto un qualsiasi numero di poli, senza nessuna costruzione particolare. Questo sistema consente però di avere solo poche velocità diverse, due, e a salti, inoltre è da ricordare che aumentando il numero di poli diminuiscono il fattore di potenza ed il rendimento.

#### - Variazione della frequenza

La rete di distribuzione è a frequenza fissa, per cui per avere una sorgente a frequenza variabile si ha la necessità di un convertitore di frequenza, come indicato in Figura 3.35.



**Figura 3.35:** alimentazione a frequenza e tensione variabili.

Le variazioni di frequenza di alimentazione comportano una corrispondente variazione di velocità del campo rotante

$$n_0 = \frac{60 f}{p}, \text{ ovvero } n = \frac{60 f}{p} (1 - s),$$

e, quindi, anche della velocità di rotazione del motore

$$n = n_0 (1 - s).$$

È da tener presente che frequenza, tensione e flusso sono legati dalla relazione approssimata

$$V \approx k f \Phi.$$

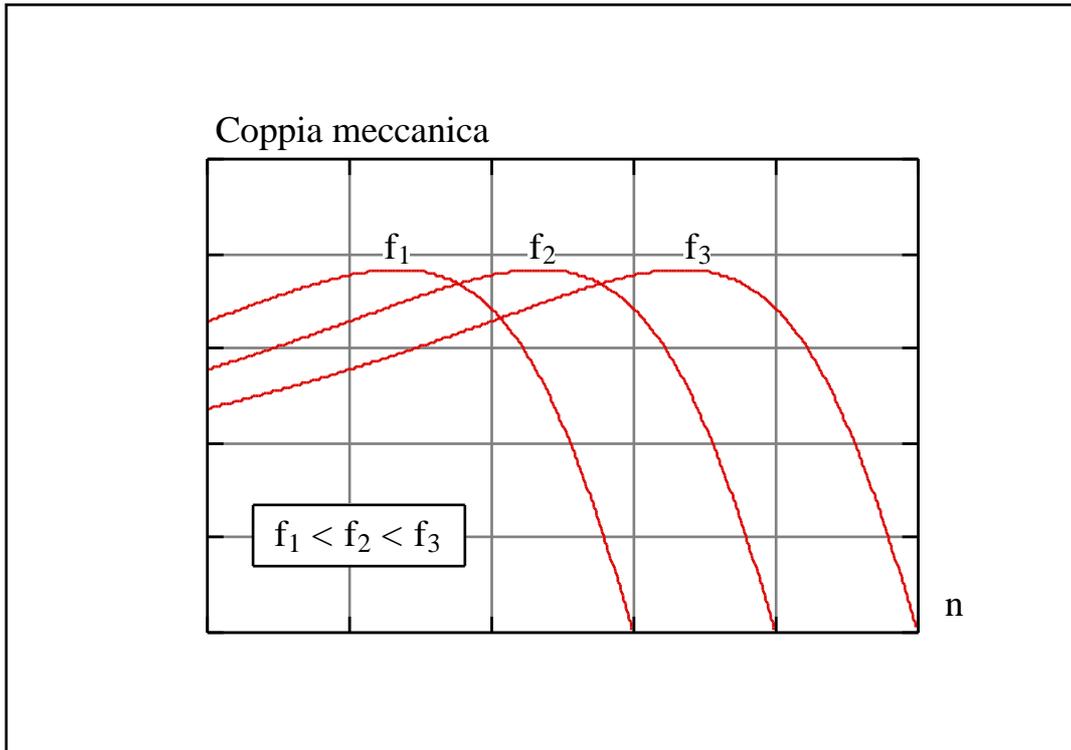
Da ciò segue che si potranno verificare due casi.

a) Diminuzione della frequenza nominale e della velocità

Questo comporta la contestuale diminuzione della tensione di alimentazione, in modo tale da far rimanere il flusso costante. Un suo aumento comporterebbe problemi di saturazione del nucleo, aumento della corrente magnetizzante e delle perdite nel ferro.

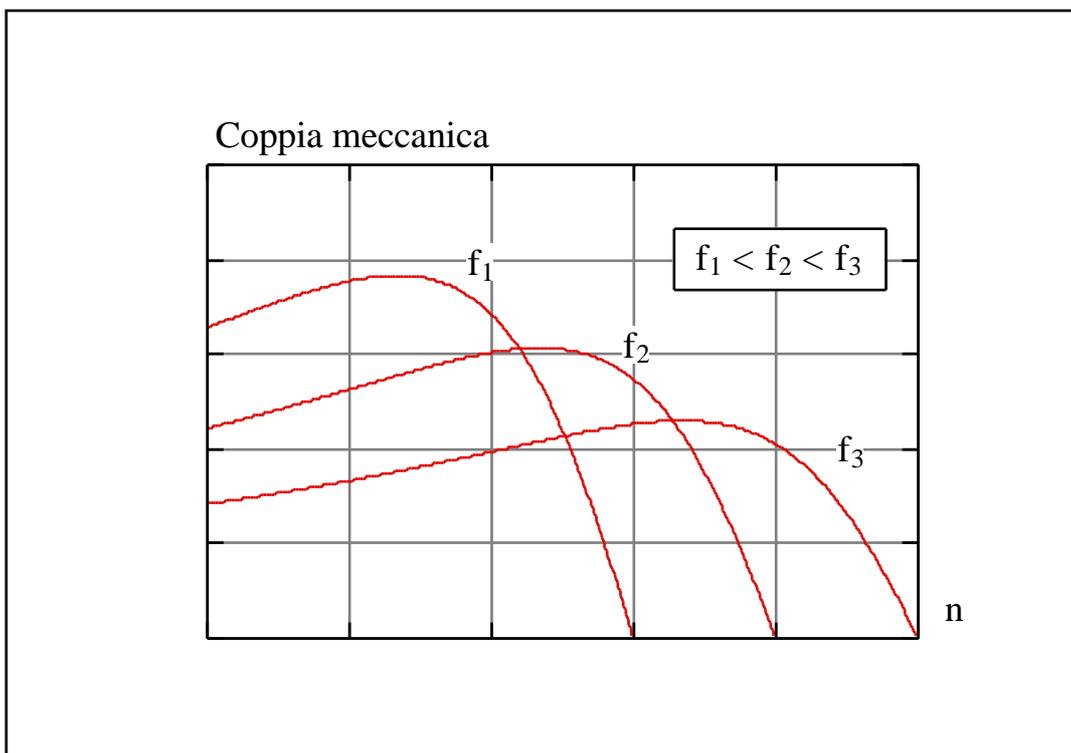
b) Aumento della frequenza nominale e della velocità

Si preferisce, in questo caso, mantenere costante la tensione di alimentazione, con conseguente diminuzione del flusso, questo per compensare l'aumento delle perdite nel ferro dovute all'aumento della frequenza (ricordate che le perdite per correnti parassite sono proporzionali al quadrato della frequenza, mentre quelle per isteresi sono direttamente proporzionali alla frequenza).



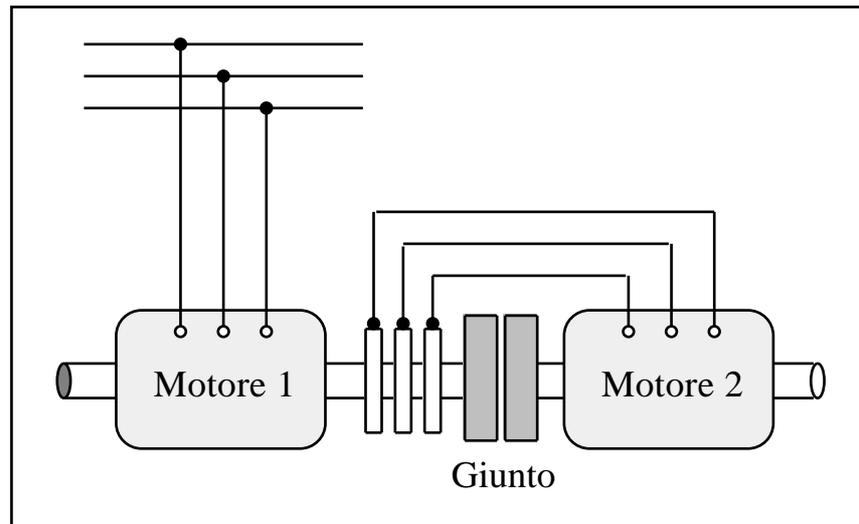
**Figura 3.36:** caratteristiche meccaniche a flusso costante.

Dalle Figura 3.36 e 3.37 si può vedere che nel primo caso (flusso costante) la coppia massima e quella di avviamento rimangono praticamente costanti, mentre nel secondo caso (tensione costante) invece diminuiscono.



**Figura 3.37:** caratteristiche meccaniche a tensione costante.

Infine, diamo un breve cenno ad un altro sistema di regolazione della velocità non più adoperato (Figura 3.38). Si tratta dell'accoppiamento in cascata di due MAT, dove i due motori, con diverso numero di poli, sono accoppiati meccanicamente e lo statore del secondo motore viene alimentato con le tensioni prelevate dagli anelli rotorici del primo motore.

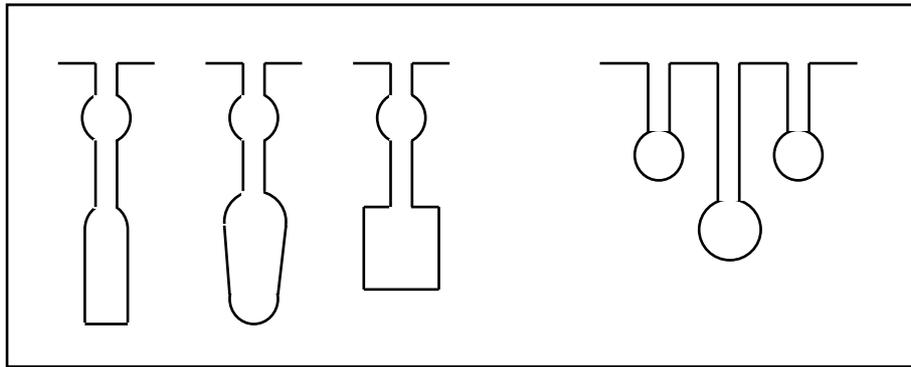


**Figura 3.38:** collegamento in cascata di due MAT.

Si dimostra che la velocità del gruppo è pari a quella di un unico motore avente un numero di poli pari alla somma del numero di poli dei due motori. Oltre a tale velocità se ne possono ottenere altre due alimentando direttamente dalla rete o solo il primo, o solo il secondo motore.

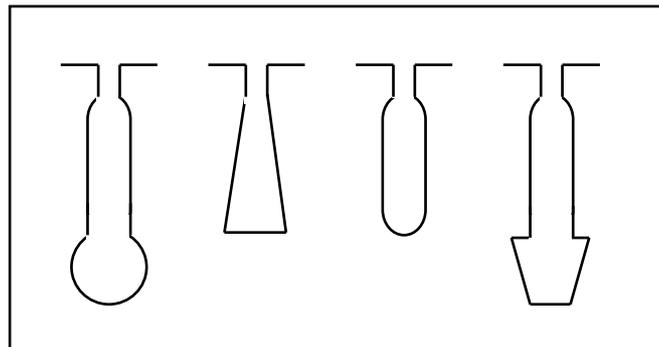
### 3.6 Motori a doppia gabbia

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.



**Figura 3.39:** sezioni di cava e di sbarra per rotori a doppia gabbia.

Per ovviare a questi inconvenienti sono stati realizzati (fin dal 1894 da Boucherot) motori con rotore a doppia gabbia (Figura 3.39), oppure con una gabbia a barre alte, dette anche profonde (Figura 3.40), che presentano i vantaggi del funzionamento propri dei motori a rotore avvolto insieme ai vantaggi di semplicità costruttiva propri dei motori a gabbia.

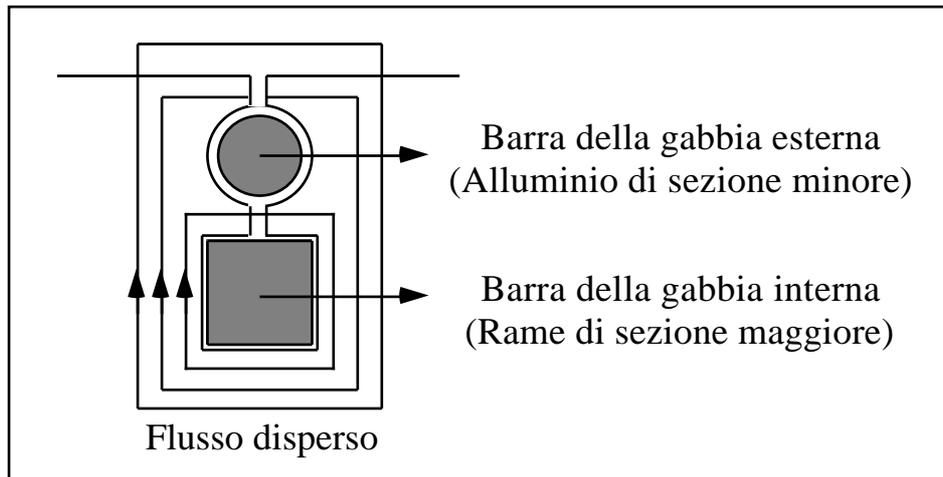


**Figura 3.40:** sezioni di cava e di sbarra per rotore a sbarre alte.

Questo tipo di 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, infatti, 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 3.41.

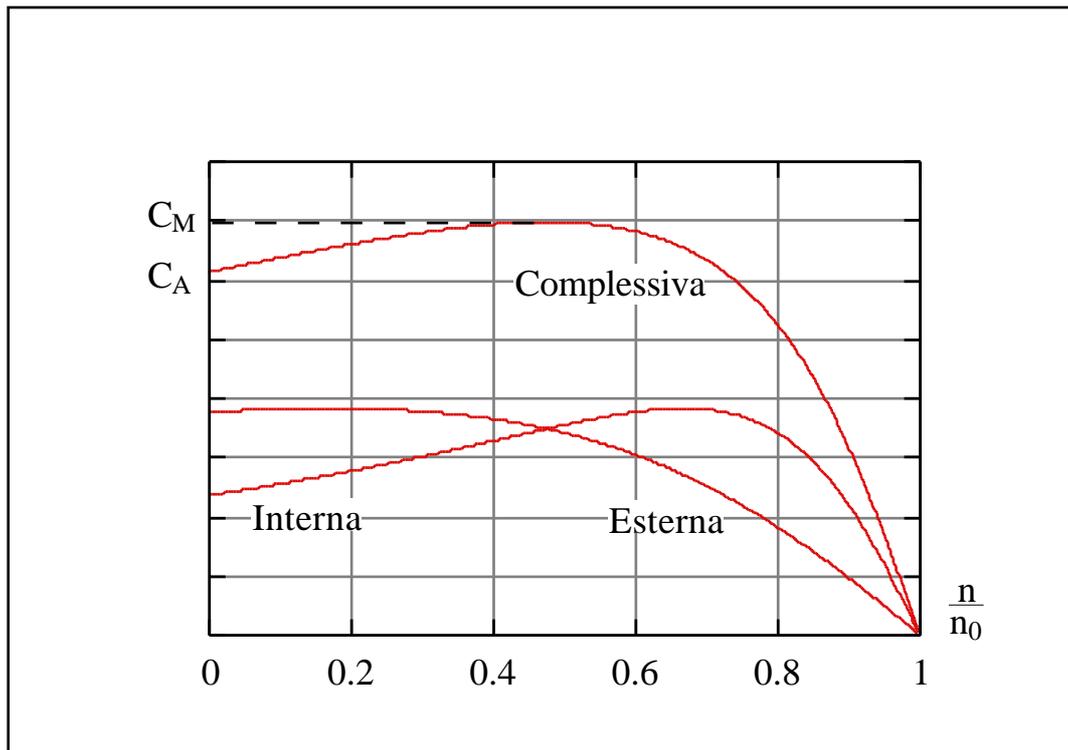


**Figura 3.41:** linee di flusso concatenate in un rotore a doppia gabbia.

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.

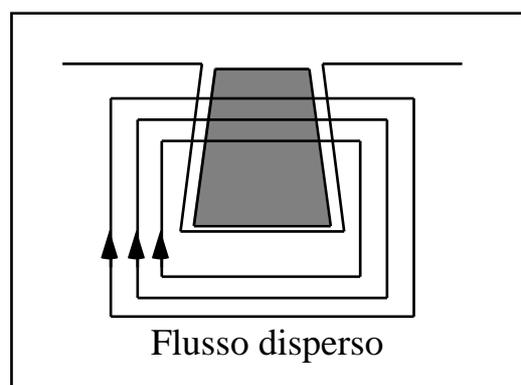
Nella marcia normale del motore, con frequenze rotoriche praticamente nulle, la corrente rotorica circolerà prevalentemente nella gabbia interna, dato che le reattanze sono diventate trascurabili, per cui, data la minor resistenza, la caratteristica meccanica avrà una velocità prossima a quella di sincronismo 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, come in Figura 3.42.



**Figura 3.42:** caratteristica meccanica di un motore a doppia gabbia.

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 3.43.



**Figura 3.43:** 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.

### 3.7 Funzionamento come generatore e freno

Le condizioni di funzionamento in cui la macchina si comporta da generatore si verificano allorché la velocità del rotore supera quella del campo magnetico rotante  $\omega > \omega_0$ , e quindi  $s < 0$ , velocità ipersincrona.

Poiché la velocità che può essere conferita al rotore, mediante un motore primo, rotante nello stesso verso del campo magnetico rotante, può raggiungere valori comunque alti, lo stato di funzionamento da generatore si estende per  $-1 < s < 0$ .

Lo studio della macchina come generatore deriva da quello già visto come motore con l'avvertenza di invertire il segno dello scorrimento. In particolare, restano perfettamente validi tutti i circuiti equivalenti studiati, a patto di notare che la resistenza posta sul lato verticale destro, che è responsabile della potenza convertita in meccanica, risulta negativa (Figura 3.15), quindi  $P_C < 0$  cioè la macchina eroga potenza elettrica alla linea alla quale è allacciata. Ora, affinché la macchina generi potenza attiva ai morsetti statorici, oltre che  $P_C < 0$ , bisogna pure che questa sia maggiore delle perdite interne della macchina dovute a  $R_1$ ,  $R_{21}$ ,  $R_0$ . Inoltre, alla macchina funzionante da generatore deve essere fornita potenza reattiva induttiva, cioè magnetizzante, che le reattanze  $X_1$ ,  $X_{21}$ ,  $X_0$  devono necessariamente assorbire, altrimenti il funzionamento da generatore non può aver luogo.

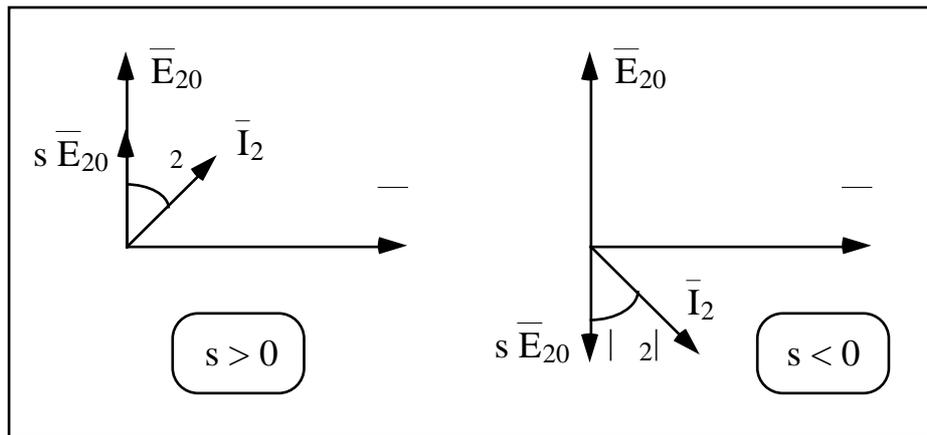
Infatti, partendo dall'espressione della corrente rotorica

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_{20}}{R_2/s + j X_{20}} = \frac{s \bar{E}_{20}}{R_2 + j s X_{20}},$$

la f.e.m. indotta nel rotore  $\bar{E}_2(s) = s \bar{E}_{20}$  diventa negativa (Figura 3.44), come pure negativo il rapporto tra  $s X_{20}$  ed  $R_2$ , per cui la tangente

$$\tan \varphi_2 = \frac{s X_{20}}{R_2}$$

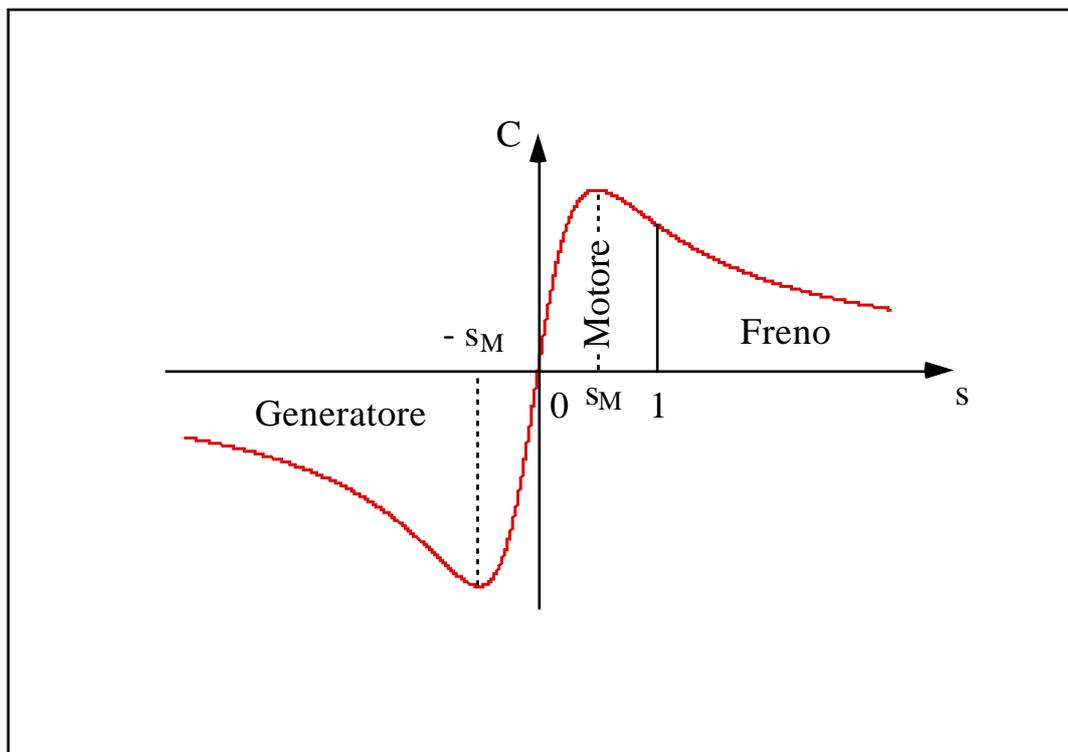
cambia segno, e la corrente  $\bar{I}_2$  è ora in anticipo rispetto ad  $\bar{E}_2(s)$ .



**Figura 3.44:** la macchina asincrona come motore e come generatore.

Inoltre, la corrente rotorica richiama nelle fasi primarie della macchina una corrente di reazione  $\bar{I}_{10}$  che sommata ad  $\bar{I}_0$  determina la corrente primaria totale  $\bar{I}_1$ . In sostanza, passando da motore a generatore, si inverte solamente la componente attiva della corrente rotorica e statorica, mentre, la componente reattiva non cambia.

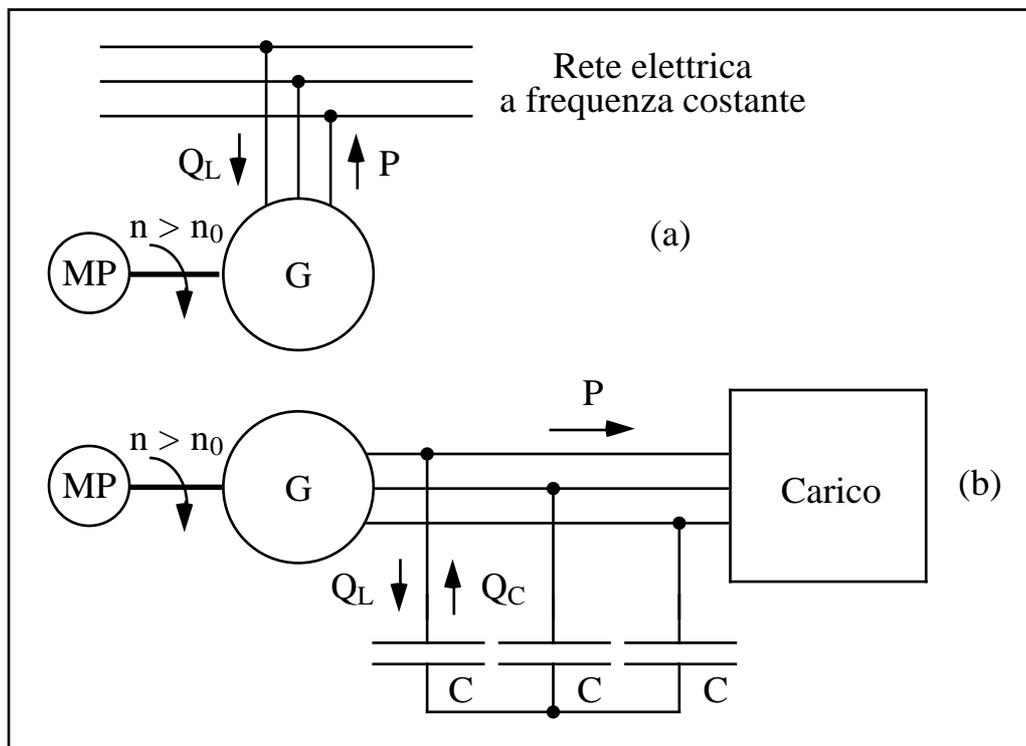
La caratteristica meccanica del generatore varia in funzione dello scorrimento, ora negativo, con legge analoga a quella stabilita per la macchina funzionante da motore. Il grafico di Figura 3.45 mostra l'andamento della caratteristica meccanica, sia nel funzionamento da motore che da generatore.



**Figura 3.45:** curva completa della coppia della macchina asincrona.

Si può dedurre che, per il funzionamento da generatore, il tratto stabile è quello compreso tra 0 e  $s_M$ ; oltre tale valore, ad ogni aumento della velocità corrisponde una diminuzione della coppia frenante e, quindi, un'ulteriore accelerazione.

Per quanto precedentemente detto, il generatore asincrono (G), collegato ad un motore primo (MP), può funzionare in due sole configurazioni, schematicamente rappresentate in Figura 3.47: allacciato ad una rete già a tensione e frequenza costanti per la presenza di altri generatori, però questa volta, sincroni (Figura 3.46a); funzionante autonomamente, collegato ad un carico isolato, con la presenza di una batteria di condensatori inserita (Figura 3.46b).



**Figura 3.46:** generatore asincrono (a) collegato alla rete e (b) funzionante autonomamente.

In entrambi i casi è, comunque, necessario che nella macchina sia presente il fenomeno del magnetismo residuo per fare in modo che si verifichi il fenomeno dell'autoeccitazione. La presenza dei condensatori può dar luogo a fenomeni di risonanza e quindi a sovratensioni che debbono essere limitate e smorzate.

I generatori asincroni trovano impiego nelle centrali ausiliarie, funzionanti in parallelo con le centrali base. Non richiedono, infatti, alcuna operazione di sincronismo con la rete, non richiedono personale, sono cioè automatiche, vengono avviati come semplici motori asincroni, sono robusti e non necessitano di eccitatrici. Inoltre erogano una potenza elettrica corrispondente a quella meccanica loro impressa. Non temono i cortocircuiti in linea, dato che un cortocircuito in

linea annullerebbe la tensione di rete, quindi il campo rotante e la potenza erogata dalla macchina. Annullandosi, però, la coppia resistente, il generatore tenderebbe ad assumere velocità eccessive e pericolose; ciò giustifica la presenza di regolatori tachimetrici.

Nella Figura 3.45 è riportato anche il terzo campo di funzionamento della macchina asincrona: quello come freno. Questo funzionamento si determina quando il motore è portato in rotazione con verso opposto a quello del campo rotante.

Quando la macchina funziona da freno sia la potenza elettrica che quella meccanica vengono dissipate in calore, per effetto Joule, negli avvolgimenti della macchina. Questo tipo di frenatura, piuttosto energica, viene utilizzato quando si vuol arrestare il moto di un motore già in funzione: basta invertire due delle fasi di alimentazione per ottenere l'inversione del senso di rotazione del campo magnetico, per cui il motore è sottoposto ad una coppia che tenderebbe a farlo ruotare all'indietro. Si tratta della cosiddetta frenatura in 'contro corrente', per la quale bisogna dotare la macchina di dispositivi tali da disinserire l'alimentazione non appena la macchina si ferma, altrimenti essa tenderebbe a ruotare nel verso opposto. Altro inconveniente è l'elevata intensità delle correnti, per cui alcune volte si rende necessario inserire delle resistenze rotoriche addizionali per limitarne l'intensità.

### **3.8 Dati di targa**

Ogni MAT, così come prescrivono le norme CEI, deve essere munito di una targa che indichi i valori nominali delle grandezze elettriche e meccaniche essenziali per la specificazione della macchina stessa. In tale targa vengono indicati tra l'altro:

- la tensione nominale che rappresenta la tensione concatenata di alimentazione statorica per la quale il motore è stato dimensionato;
- la frequenza nominale, che è la frequenza della rete di alimentazione;
- la velocità nominale, cioè la velocità di rotazione, in giri al minuto, del motore in condizioni nominali;
- la potenza nominale, ossia il valore della potenza meccanica, espresso in chilowatt, disponibile sull'asse del motore in condizioni nominali, cioè a tensione, frequenza e velocità nominali;
- la corrente nominale, cioè il valore della corrente assorbita dalla linea, per ogni fase statorica, in condizioni nominali;
- il fattore di potenza nominale, che rappresenta il coseno dell'angolo di sfasamento tra tensione e corrente, di ogni fase statorica, in condizioni nominali;

- il rendimento nominale, cioè il valore del rendimento in condizioni nominali;
- la coppia nominale, cioè il valore della coppia motrice, in newton metro, sull'albero motore in condizioni nominali;
- il numero dei poli del campo magnetico di statore.

Vengono inoltre riportate altre informazioni come l'indicazione della casa costruttrice, il tipo di motore, il collegamento delle fasi, la classe d'isolamento, il grado di protezione IP (che indica il grado di protezione contro l'ingresso di sostanze solide, liquide ed aeriformi) dell'involucro. Inoltre, se il rotore è avvolto, compaiono anche la tensione e la corrente di rotore che si hanno allo spunto con resistenza di avviamento avente valore tale che la corrente di statore sia uguale a quella nominale, mentre, se il rotore è a gabbia, non vengono riportati i dati relativi al rotore.

### **3.9 Motore asincrono monofase**

In alcuni casi l'indisponibilità di una linea trifase rende necessario l'utilizzo di motori asincroni monofasi, detti anche motori monofasi ad induzione, utilizzati per potenze modeste, fino ad alcuni chilowatt, come elettrodomestici, pompe, ventilatori. Questi motori sono costruttivamente simili a quelli trifasi, anche se a parità di dimensioni e di velocità, presentano una potenza ridotta della metà, con l'avvolgimento statorico monofase e quello rotorico generalmente a gabbia.

L'avvolgimento statorico, che generalmente occupa i due terzi della periferia statorica ed è alimentato con una tensione sinusoidale, è percorso da una corrente che dà luogo ad una f.m.m. anch'essa alternativa sinusoidale. Al traferro avremo, quindi, un campo magnetico alternativo, cioè fisso nello spazio e di ampiezza variabile sinusoidalmente come la corrente.

In forza del cosiddetto teorema di Leblanc, un campo alternativo può considerarsi ottenuto dalla sovrapposizione di due campi magnetici aventi ugual valore costante, pari alla metà di quello massimo del campo alternativo, e rotanti con velocità angolari uguali ed opposte, pari proprio alla pulsazione della corrente statorica (con una coppia di poli). Ciascuno di questi campi produce gli stessi effetti che abbiamo visto per il motore trifase e, pertanto, si può ripetere quanto già detto per tale motore, cioè che ciascuno dei due campi magnetici rotanti, considerato singolarmente, sostiene f.e.m. e correnti nella gabbia rotorica. Questi due campi rotanti, sommati con quelli originati dallo statore, danno luogo al campo magnetico rotante risultante nel traferro.

Dall'azione tra campi magnetici e correnti indotte si originano due coppie motrici, uguali ed opposte, per cui se il rotore è fermo, esse si equilibrano a vicenda ed il

motore non parte; se però avviamo il motore, anche con una spinta, in un verso qualsiasi, il motore continuerà a ruotare in tale verso, accelerando e raggiungendo una velocità prossima a quella di sincronismo. Ciò è dovuto al fatto che la coppia dovuta al campo che ruota nello stesso senso del rotore (campo diretto) diventa maggiore rispetto alla coppia dovuta all'altro (campo inverso) e nasce quindi una coppia risultante con un verso pari a quello del rotore. Ne deriva che il motore asincrono monofase non ha un suo senso di rotazione, ma assume quello che gli viene impresso.

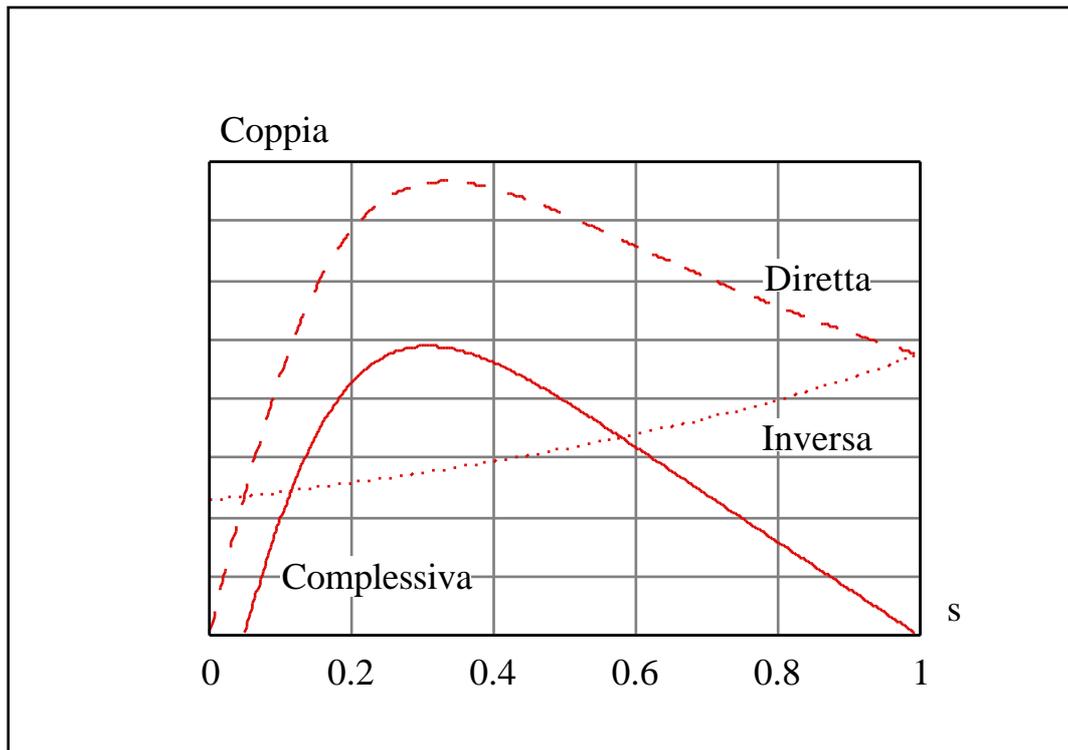
I diversi valori di coppia motrice che si hanno quando il motore ruota in un certo verso sono dovuti ai diversi valori dello scorrimento rispetto ai due campi rotanti, diretto ed inverso. Posto, con evidente significato dei simboli usati,

$$s_D = \frac{n_0 - n}{n_0} = 1 - \frac{n}{n_0}, \quad s_I = \frac{n_0 - (-n)}{n_0} = 1 + \frac{n}{n_0},$$

si ha immediatamente che

$$s_D + s_I = 2.$$

Allora, quando il rotore è fermo  $n = 0$ , risulta  $s_D = s_I = 1$ ; quando, invece, il rotore ruota a velocità di sincronismo nel verso diretto,  $n = n_0$ , si ha  $s_D = 0$  e  $s_I = 2$ . Possiamo quindi affermare che quando lo scorrimento del campo diretto varia da 1 a 0, quello del campo inverso passa da 1 a 2. Tracciata la caratteristica meccanica per valori dello scorrimento da 0 a 2 (Figura 3.45), si hanno i valori della coppia dovuti al campo diretto per  $0 < s < 1$  e quelli dovuti al campo inverso per  $1 < s < 2$ . Ribaltando i valori della coppia, per  $s$  variabile da 1 a 2, intorno al punto  $s = 1$  e sottraendo le due ordinate si avrà il diagramma risultante, mostrato in Figura 3.47, da cui risulta che la coppia è pari a zero non solo a velocità di sincronismo ma anche a rotore fermo,  $s = 1$ .



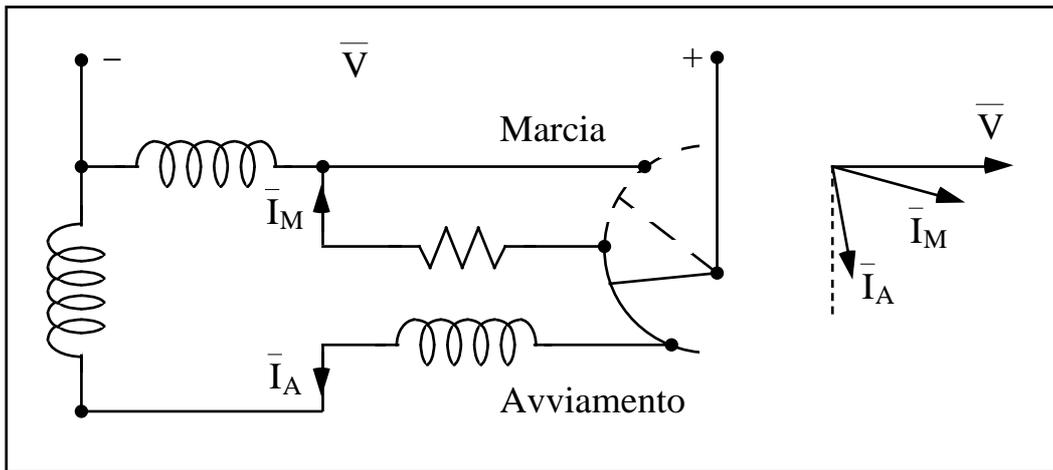
**Figura 3.47:** coppia del motore monofase ad induzione.

Dalla Figura 3.47 si può, inoltre, osservare che il motore asincrono monofase funziona, rispetto a quello trifase, con uno scorrimento maggiore, la prima parte della caratteristica è meno ripida, quindi con rendimento e fattore di potenza più bassi.

Per quanto detto, se non si adotta qualche accorgimento, il motore asincrono monofase non parte. Un accorgimento potrebbe essere quello di dotare lo statore di due avvolgimenti, sfasati di  $\pi/2$ , uno permanentemente inserito, detto avvolgimento principale o di lavoro, l'altro, detto avvolgimento ausiliario o di avviamento, che può rimanere oppure non rimanere inserito dopo l'avviamento e percorsi da correnti sfasate di  $\pi/2$  in modo da creare un campo rotante bifase. In generale, queste condizioni non vengono mai soddisfatte per cui nel motore asincrono monofase non si avrà quasi mai un campo magnetico rotante perfetto, circolare, ma un campo di ampiezza non costante, ellittico, in grado comunque di avviare il motore. Il disinserimento dell'avvolgimento ausiliario avviene tramite un interruttore centrifugo che interviene generalmente ai tre quarti della velocità di sincronismo. Inoltre, l'avvolgimento ausiliario può essere attraversato da notevoli correnti, dato il breve lasso di tempo di funzionamento, per avere coppie di spunto elevate.

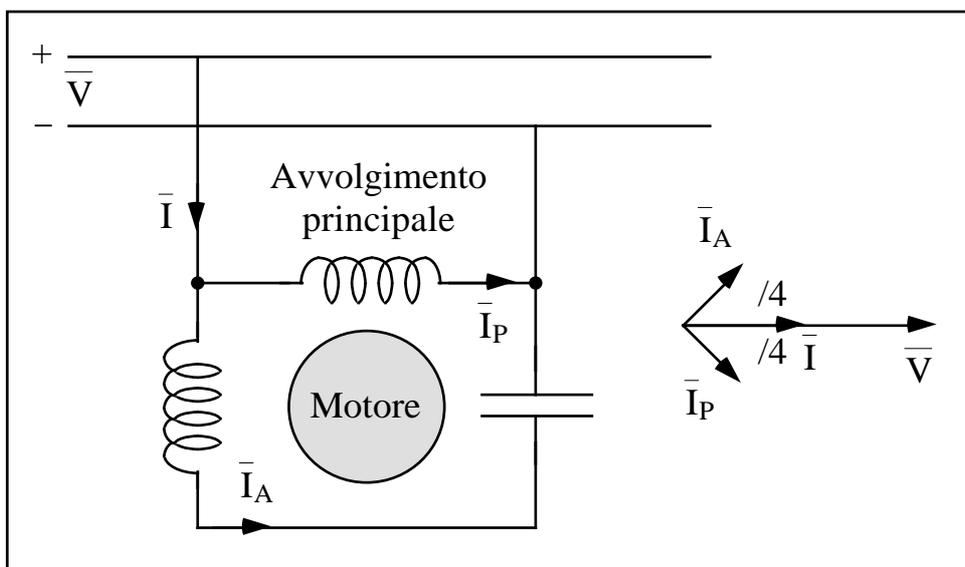
Descriviamo ora, in qualche dettaglio, alcuni dei vari tipi di avviamento per motori asincroni monofasi, sempre e solo di piccola potenza. I due avvolgimenti, dovendo essere alimentati alla stessa tensione per avere le due correnti sfasate tra

loro di circa  $\sqrt{2}$ , dovranno presentare impedenze diverse, per cui avremo il motore a flussi sfasati, il motore a condensatore e il motore a polo schermato. Nel **motore a flussi sfasati**, schematicamente mostrato in Figura 3.48, l'avvolgimento ausiliario, inserito solo in fase d'avviamento, presenta una resistenza elevata per cui le due correnti, assorbite dai due avvolgimenti, sono tra loro sfasate.



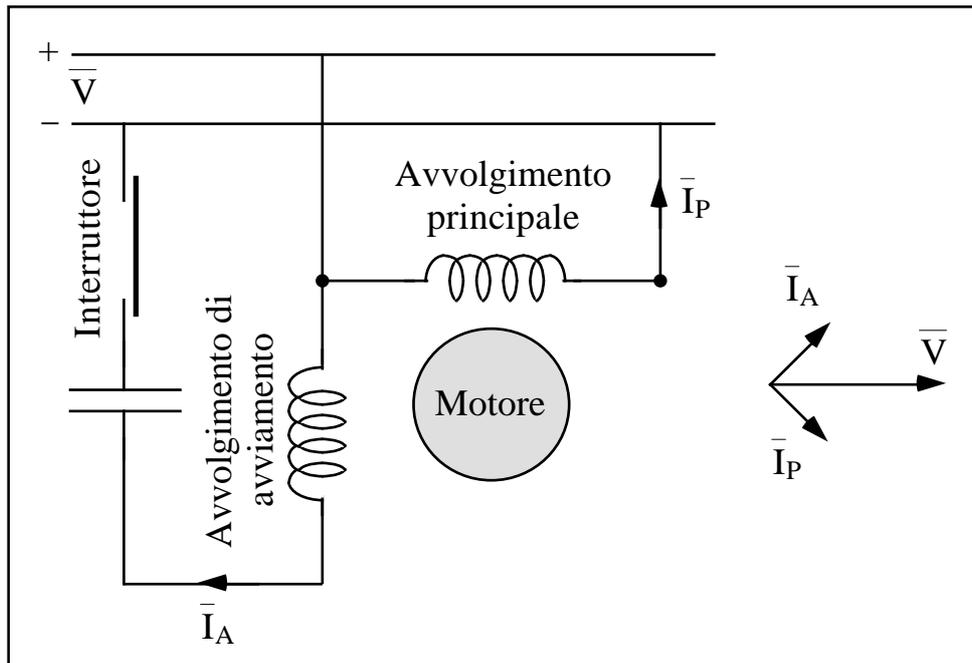
**Figura 3.48:** schema di avviamento di un motore a flussi schermati.

Il **motore a condensatore** può essere di due tipi. Il primo tipo è con condensatore permanentemente inserito ed è mostrato in Figura 3.49.



**Figura 3.49:** asincrono monofase con condensatore permanentemente inserito.

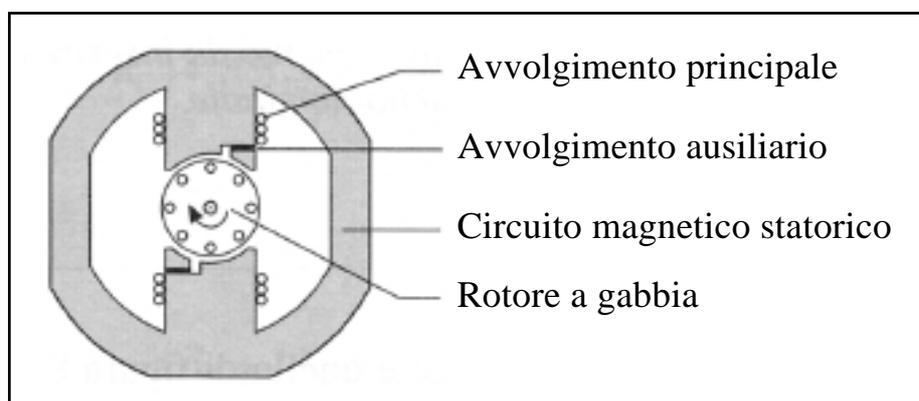
Il secondo tipo è quello in cui il condensatore può essere inserito e disinserito, come suggerito in Figura 3.50.



**Figura 3.50:** asincrono monofase con condensatore che può essere disinserito.

Questi motori presentano notevoli coppie di spunto ed un fattore di potenza particolarmente elevato. Inoltre, possono presentare anche un doppio condensatore, uno permanentemente inserito, quindi notevolmente robusto, e l'altro solo in avviamento, di tipo elettrolitico, più economico.

Il **motore a polo schermato**, anche detto motore con spira in cortocircuito, mostrato in Figura 3.51, presenta i poli statorici sporgenti e su ciascun polo viene praticata una scanalatura, fasciata con una sola o poche spire chiuse in cortocircuito che fungono da polo ausiliario. Le spire in cortocircuito sono attraversate da una corrente indotta dovuta al flusso variabile e, quindi, si viene a creare un rudimentale campo rotante che è in grado di avviare il motore. Questi motori sono però di limitata potenza (100 W al massimo) e rendimento, ma sono molto semplici e robusti.



**Figura 3.51:** motore monofase con spira in cortocircuito.

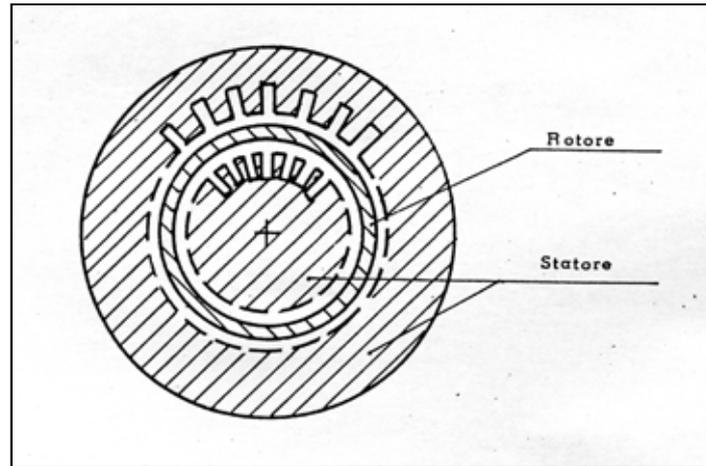
### 3.10 Motore lineare

Consideriamo un MAT e cerchiamo di rettificarlo, o meglio, di far tendere ad infinito tutti i raggi sia di rotore che di statore: in questa nuova situazione, il campo magnetico non è più rotante, ma traslante. In altre parole, questo tipo di motore non produce più una ‘coppia’ ma una ‘forza’, non abbiamo più moto rotatorio bensì un movimento rettilineo, abolendo così tutti gli ingranaggi che servono a trasformare il moto rotatorio in rettilineo. Stiamo parlando del motore lineare ad induzione (acronimo LIM), molto utilizzato laddove sono necessari azionamenti lineari ed oggi particolarmente diffuso nella trazione elettrica ad alta velocità.

Un motore asincrono potrebbe funzionare anche se il suo rotore fosse un cilindro pieno in ferro massiccio, senza alcun tipo di avvolgimento. Rispetto al più convenzionale motore a gabbia, risulterebbe aumentata la  $R_2$ , dato che la resistività del ferro è 10 volte maggiore di quella del rame, e le reattanze di dispersione  $L_{D1}$  e  $L_{D2}$ , mentre risulterebbe diminuita l’induttanza di magnetizzazione. Tutto ciò andrebbe completato con una lieve diminuzione del rendimento.

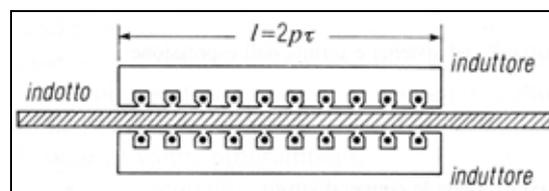
Ora, per quanto già visto, lo statore potrebbe avere un numero di poli comunque variabile in quanto, il rotore, questa volta senza avvolgimenti, si adeguerebbe automaticamente al numero di poli di statore. Intorno all’asse del rotore circolano le correnti indotte, ma quelle più vicine all’asse danno forze modeste, perché modesto è il campo magnetico, e coppie ancor più modeste per via del braccio ridotto: è questo l’accorgimento che si sfrutta con il motore a gabbia di scoiattolo, dove le barre sono poste alla periferia del rotore.

Esiste, tuttavia, un altro sistema. Rendere il cilindro non più piano ma cavo, ma questa soluzione comporterebbe la creazione di due traferri con conseguente aumento delle riluttanze. Il problema si può eliminare realizzando altri avvolgimenti, sempre statorici, nella parte interna, ora vuota, del rotore, avvolgimenti percorsi dalle stesse correnti che circolano nei conduttori dall’altra parte del cilindro cavo di rotore (Figura 3.52).



**Figura 3.52:** principio costruttivo del motore lineare.

Rettifichiamo ora le forme circolari delle sezioni dei cilindri, o meglio facciamo tendere all'infinito il loro raggio: otteniamo la struttura di Figura 3.53 con induttore doppio, che offre anche il vantaggio di annullare le forze di attrazione tra induttore ed indotto; nelle macchine rotanti, tali forze di attrazione magnetica, sono nulle per effetto della struttura radiale.



**Figura 3.53:** motore lineare a doppio induttore.

L'induttore del LIM è costituito da una struttura magnetica piana sulla quale è collocato un avvolgimento alimentato da un sistema trifase simmetrico di tensioni a  $p$  coppie di poli e passo polare  $\tau$ .

Si può dimostrare che la velocità di sincronismo del LIM è pari a  $v = 2 f \tau$ . Regolando opportunamente la frequenza ed il passo polare, si possono ottenere anche velocità dell'ordine dei 500 km/h.

L'induttore, nel suo movimento rettilineo, taglia i conduttori dell'indotto generando f.e.m. e correnti indotte. Queste correnti, immerse nello stesso campo magnetico che le produce, sono sede di forze elettromagnetiche che spingono l'indotto nella stessa direzione del campo magnetico, ciò che genera la **forza di spinta** ( $F$ ) del motore lineare. È ininfluente se è fisso l'indotto o l'induttore, ma nella pratica realizzazione, trazione elettrica, l'induttore è il locomotore stesso mentre l'indotto è una lastra metallica continua in acciaio massiccio della lunghezza dell'intera tratta ferroviaria.

Si può dimostrare che la caratteristica meccanica  $F(v)$  di questo tipo di motore, presenta andamento lineare, con valore massimo della spinta motrice all'avviamento, e valore man mano decrescente, all'aumentare della velocità, fino ad annullarsi alla velocità di sincronismo, e proporzionale al quadrato della tensione di alimentazione. Una variazione di frequenza comporta solo una variazione della velocità di sincronismo. È allora chiaro che questo tipo di motore si presta bene a poter essere regolato sia in velocità, per mezzo della frequenza, sia in spinta.

Questo motore viaggia a scorrimenti alti per avere spinte elevate e bassi fattori di potenza per la presenza dell'alto traferro. L'alto valore dello scorrimento, che comporta notevoli perdite per effetto Joule, non rappresenta un inconveniente per il rendimento totale della macchina, essendo state eliminate tutte le altre perdite dovute alla trasmissione meccanica del moto; inoltre, il riscaldamento dell'indotto è solo momentaneo, in quanto, col movimento dell'induttore, le parti riscaldate si rinnovano in continuazione.

### **3.11 Funzionamento in condizioni di alimentazione anormale**

Un MAT può trovarsi a funzionare a tensione e frequenza sensibilmente diversi da quelli nominali; studiamo l'effetto di una anormale variazione di uno di questi due parametri per volta

Cominciamo, allora, a considerare la sola variazione della tensione, in particolare immaginiamo che essa sia aumentata. Le formule finora studiate restano valide ed allora il flusso aumenterà proporzionalmente alla tensione, mentre la coppia aumenta con il quadrato (in realtà meno per effetto della saturazione dei circuiti magnetici), aumentano le perdite nel ferro e la corrente di cortocircuito. Quindi un aumento della tensione porta un miglioramento per le coppie, ma allo stesso tempo un peggioramento per quanto riguarda le perdite ed il riscaldamento. Il contrario accade nel caso di abbassamento della tensione di alimentazione.

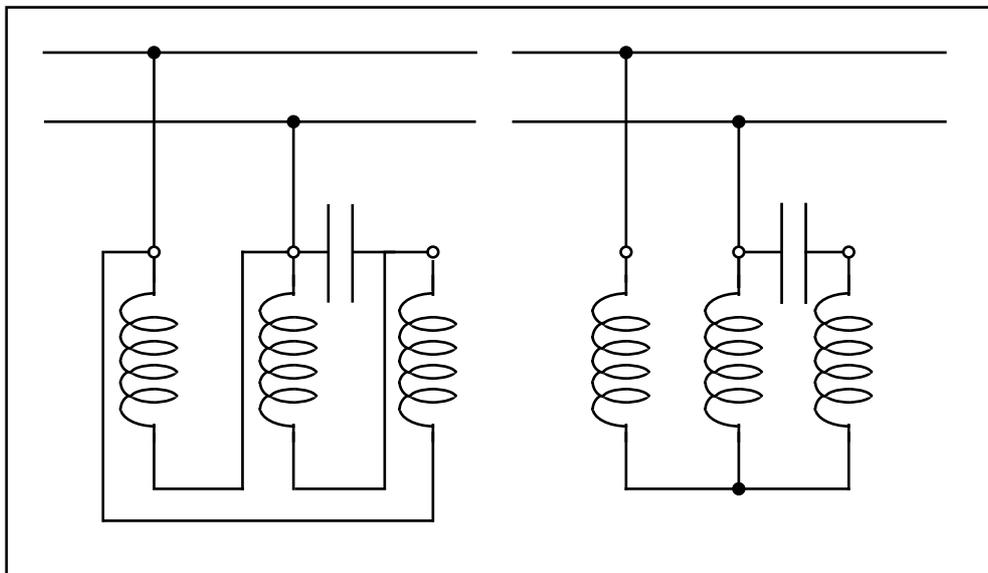
Nel caso, invece, di una variazione della sola frequenza  $f$ , ad esempio in aumento, si avrà una diminuzione del flusso per via della relazione  $V = k f$ , portando ad una riduzione della coppia che dipende dal quadrato del flusso. Avremo, inoltre, una diminuzione della corrente a vuoto, a causa del più piccolo flusso, della corrente di cortocircuito, essendo aumentata la reattanza di dispersione per effetto dell'aumento della frequenza, e delle perdite nel ferro, essendo direttamente proporzionali alla frequenza, e, variando la frequenza, aumenteranno le perdite meccaniche per attrito e ventilazione.

Si osservi che, variazioni dello stesso segno contemporanee di tensione e frequenza, non producono effetti apprezzabili sulla caratteristica del motore, salvo

che per la velocità, per la potenza nominale del motore e per le perdite nel ferro, con aumento di queste tre grandezze all'aumentare della frequenza.

Se durante il funzionamento di un MAT una delle fasi di alimentazione viene interrotta, il motore continua a funzionare se la coppia resistente non è molto elevata. Infatti, in questo caso la potenza scende del 50%; ciò comporta, a parità di coppia resistente, un valore di corrente molto più grande con possibile surriscaldamento del motore ed intervento delle protezioni. Se però il motore viene fermato, non è più in grado di avviarsi, essendosi trasformato in un motore monofase.

È d'altronde possibile far funzionare il MAT regolarmente, anche se a potenza ridotta, alimentandolo da una linea monofase e ricorrendo ad uno degli schemi di Figura 3.54.

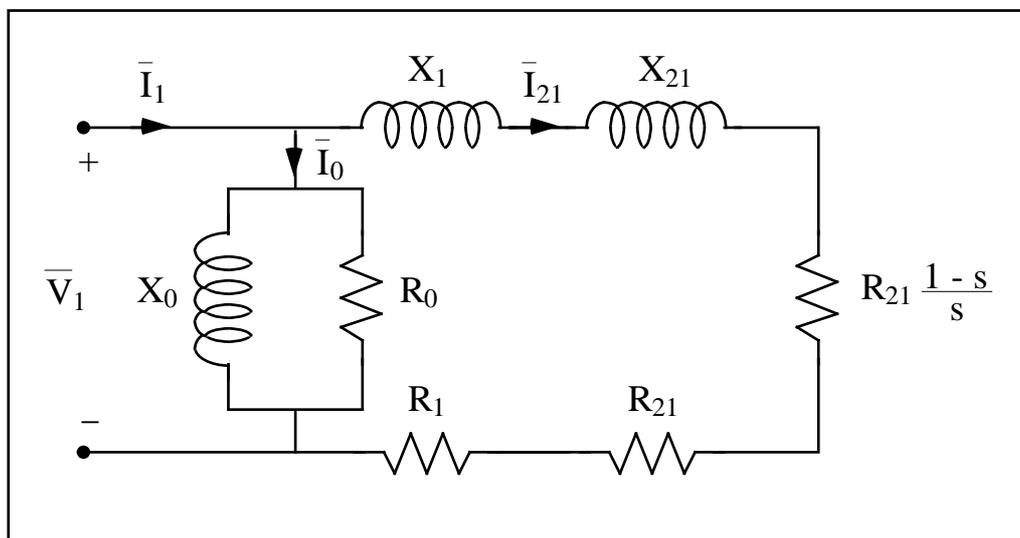


**Figura 3.54:** connessione del condensatore in un motore trifase, per ottenere il funzionamento monofase.

Il condensatore dovrà avere una capacità di alcuni micro-farad e determinerà uno sfasamento tra le correnti, che origineranno un campo magnetico bifase rotante.

## Appendice: diagramma circolare e sue caratteristiche

Il funzionamento del MAT, alimentato a frequenza e tensione costanti, può essere descritto in forma efficace, anche se oggi un po' desueta, per mezzo del diagramma circolare, anche detto di Heyland, che rappresenta il luogo dei punti descritto dagli estremi del vettore delle correnti assorbite dallo statore  $\bar{I}_1$  al variare, da - a + , dello scorrimento. Per comprendere come ciò si possa ottenere, si faccia riferimento al circuito equivalente semplificato, riportato in Figura A.1, per il quale è possibile stabilire come variano le correnti nel MAT al variare dello scorrimento e quindi del carico.



**Figura A.1:** circuito equivalente semplificato di un MAT.

Il luogo geometrico descritto dal fasore rappresentativo della corrente  $\bar{I}_{21}$  variazione è un cerchio. Infatti, questa corrente è data, in modulo, dalla relazione

$$I_{21} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_{21}}{s}\right)^2 + (X_1 + X_{21})^2}},$$

ed è sfasata, rispetto alla tensione di fase  $\bar{V}_1$ , considerata sull'asse delle ordinate di un sistema di coordinate cartesiane, dell'angolo

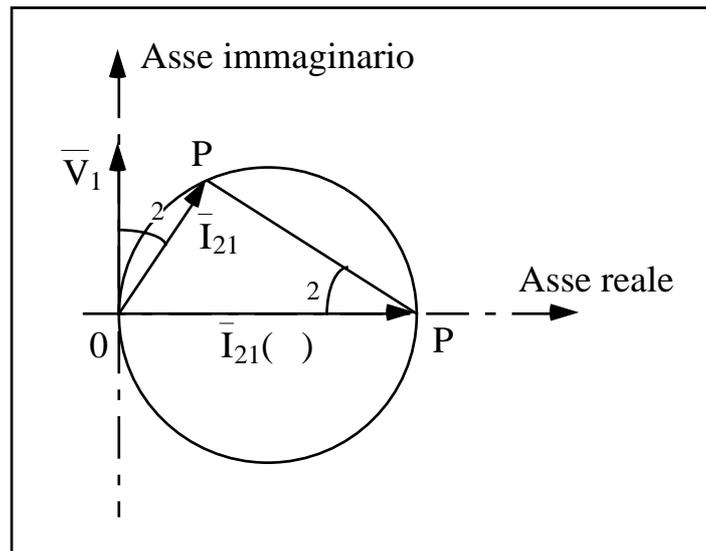
$$\varphi_2 = \arctan \frac{X_1 + X_{21}}{R_1 + \frac{R_{21}}{s}}.$$

Al variare dello scorrimento si avrà:

per  $s = 0$  risulta  $I_{21} = 0$  e questa corrente coincide con l'origine degli assi cartesiani;

per  $s = 1$ , il rotore gira con velocità infinita nel senso contrario al campo magnetico rotante, e, se trascuriamo la piccola resistenza  $R_1$ , possiamo scrivere

$$I_{21}(s) = \frac{V_1}{X_1 + X_{21}}, \quad \varphi_2(s) = \frac{\pi}{2} \text{ (carico puramente induttivo).}$$



**Figura A.2:** luogo dei punti descritto dalla corrente di rotore.

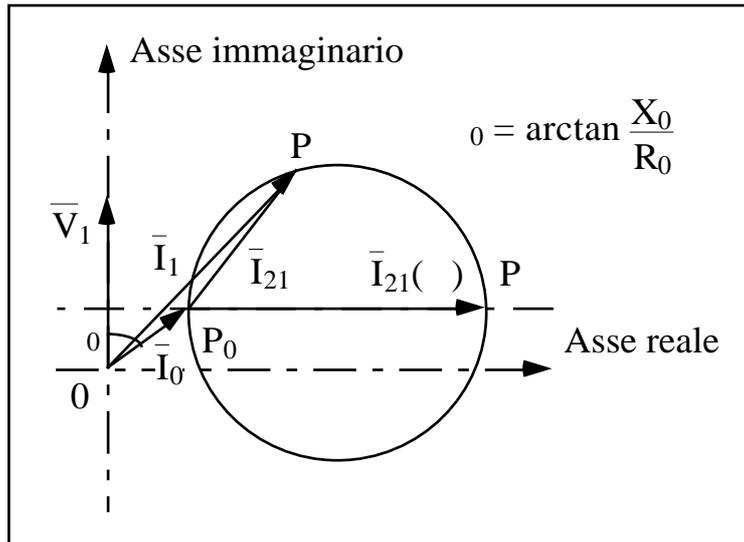
Per una qualsiasi altra condizione di funzionamento, ricordando che il rapporto tra la reattanza ed il modulo dell'impedenza coincide con il seno dell'angolo di fase, possiamo scrivere che

$$I_{21} = \frac{V_1}{X_1 + X_{21}} \frac{X_1 + X_{21}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_{21}}{s}\right)^2 + (X_1 + X_{21})^2}} = I_{21}(s) \sin \varphi_2(s).$$

Ciò vuol dire che il triangolo  $OPP$  è rettangolo in  $P$ , con ipotenusa coincidente proprio con il diametro  $I_{21}(s)$ , quindi inscritto in mezza circonferenza. Ricordando, poi, che la corrente assorbita dal motore è data da

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_{21},$$

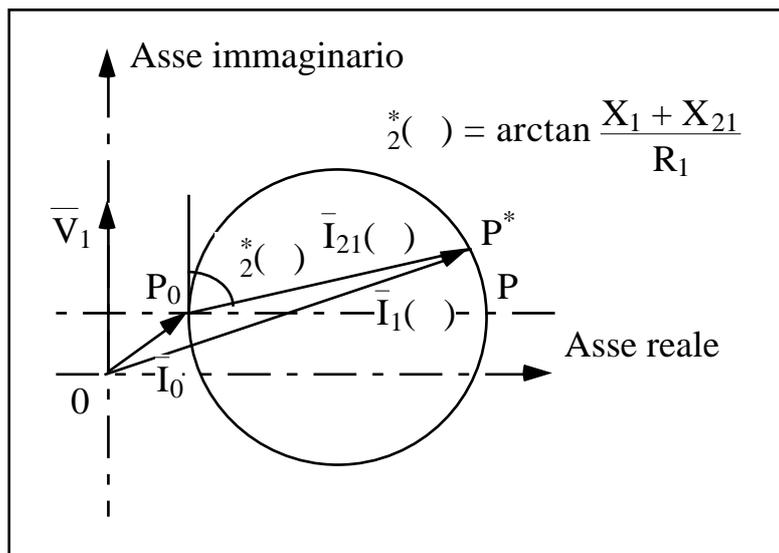
si ricava immediatamente che il diagramma circolare deve essere traslato del vettore  $\bar{I}_0$ .



**Figura A.3:** diagramma circolare approssimato.

La corrente  $\bar{I}_1$ , assorbita dal motore, è data dalla congiungente di un punto qualsiasi P sulla circonferenza con l'origine degli assi, mentre le  $\bar{I}_{21}$  sono rappresentate dalle corde congiungenti P con  $P_0$ .

Facciamo notare che, nel diagramma circolare di Figura A.3, la corrente  $\bar{I}_{21}(\ )$  è stata considerata in ritardo di  $\theta/2$  rispetto alla tensione di alimentazione, cioè sono state trascurate le cadute di tensione sugli avvolgimenti statorici: una tale omissione fa sì che il punto a  $s =$  non si trovi in P, ma in un punto più alto,  $P^*$ , inclinato dell'angolo  $\theta_2^*(\ )$ , indicato in Figura A.4.

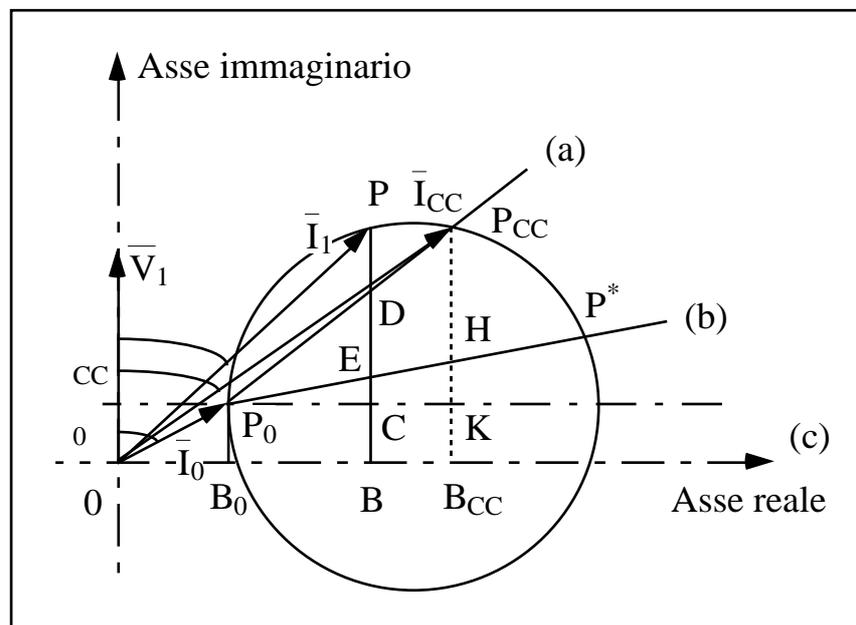


**Figura A.4:** spostamento del punto a  $s =$  .

Tutte le grandezze che caratterizzano il funzionamento del MAT trovano una efficace rappresentazione nel diagramma circolare, completato allo scopo con le rette di riferimento

- (a) la retta delle potenze utili (o rese),
- (b) la retta delle coppie,
- (c) la retta delle potenze assorbite,

mostrate in Figura A.5.



**Figura A.5:** le proprietà del diagramma circolare.

Per  $s = 0$ , si ha che  $\bar{I}_{21} = \bar{0}$  e, quindi,  $\bar{I}_1 = \bar{I}_0$ . Il punto P coincide con  $P_0$ ; la corrente a vuoto  $\bar{I}_0$  è sfasata rispetto a  $\bar{V}_1$  dell'angolo  $\theta_0$ , il cui coseno rappresenta il fattore di potenza a vuoto. Caricando gradualmente il motore, lo scorrimento aumenta e con esso la corrente  $\bar{I}_{21}$ ; il punto P descrive la porzione di semicerchio che parte da  $P_0$  ed arriva fino a  $P_{CC}$ .

Quando la macchina funziona da motore, il valore massimo che può raggiungere lo scorrimento è  $s = 1$ , che corrisponde alla situazione di rotore fermo, cioè siamo all'avviamento oppure il rotore è stato bloccato. In questo caso, trascurando la piccola corrente  $\bar{I}_0$ , è

$$I_{CC} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_{21})^2 + (X_1 + X_{21})^2}}, \quad \cos \theta = \arctan \frac{X_1 + X_{21}}{R_1 + R_{21}}.$$

In questa particolare condizione la corrente di cortocircuito statorica è definita dal punto  $P_{CC}$  e sfasata, rispetto a  $\bar{V}_1$ , dell'angolo  $\varphi_{CC}$  il cui coseno rappresenta il fattore di cortocircuito del motore.

Quindi il motore, con lo scorrimento che varia da 0 a 1, si muove sull'arco che va da  $P_0$  fino a  $P_{CC}$ ; il punto di funzionamento normale corrisponde, generalmente, alla posizione per cui la corrente  $\bar{I}_1$  è tangente al cerchio, laddove il fattore di potenza è massimo e pari a 0.8, circa.

Tracciando le due rette  $P_0P_{CC}$  e  $P_0P$ , il diagramma circolare risulta completato da tutte le rette di riferimento, in cui

$OB_{CC}$  è la retta delle potenze assorbite,

$P_0P_{CC}$  è la retta delle potenze utili (o rese),

$P_0P$  è la retta delle coppie, o retta delle potenze trasmesse al rotore, visto che la potenza trasmessa è proporzionale alla coppia, a meno della pulsazione. In particolare, si ricava che in  $P_0$  la coppia è nulla, ed in  $P_{CC}$ , cioè a rotore fermo,  $P_{CC}H$  rappresenta la coppia di avviamento o di spunto del motore.

Infine, il rendimento è dato dal rapporto  $PD/PB$ .

Per un punto  $P$  qualsiasi che appartenga al diagramma circolare, risulta:

il segmento  $OP$  rappresenta il modulo della corrente  $\bar{I}_1$  assorbita dal motore;

il segmento  $PB$ , pari a  $I_1 \cos \varphi$ , è proporzionale, a meno di  $3 V_1$ , alla potenza assorbita dal motore;

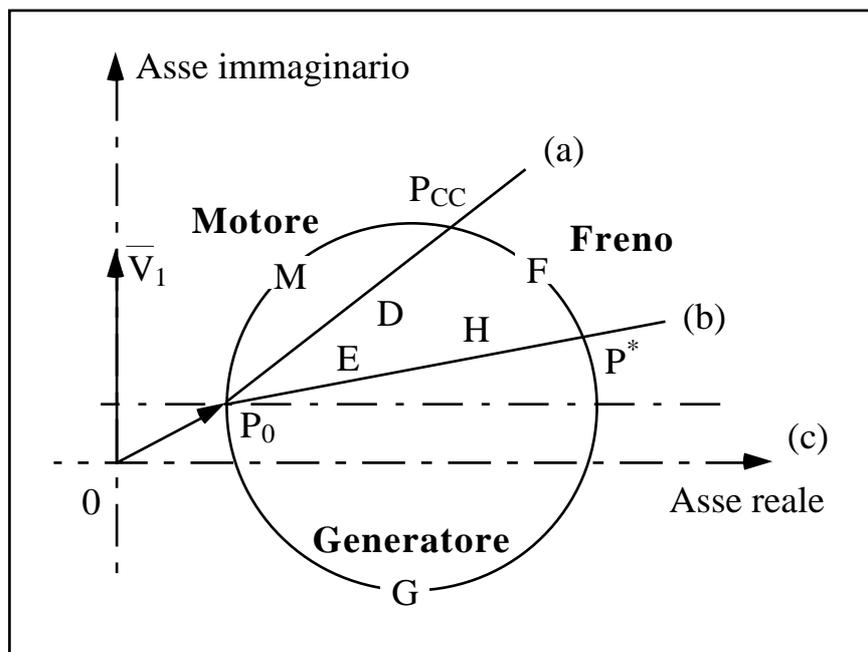
il segmento  $OB$  è proporzionale alla potenza reattiva assorbita dalla macchina.

Inoltre il segmento  $P_0B_0$ , pari a  $I_0 \cos \varphi_0$ , è proporzionale alla potenza assorbita a vuoto, somma della potenza perduta nel ferro, della potenza meccanica e delle perdite nel rame, mentre il segmento  $P_{CC}B_{CC}$ , uguale a  $I_{CC} \cos \varphi_{CC}$ , rappresenta la potenza assorbita a rotore bloccato e, poiché la potenza utile è nulla, a meno della potenza a vuoto, proporzionale al segmento  $KB_{CC}$ , rappresenta la somma delle perdite nel rame dovute alle correnti di cortocircuito dello statore e del rotore. La ripartizione fra queste due perdite si ottiene riportando sul segmento  $KP_{CC}$  il segmento  $KH$ , che individua le perdite di cortocircuito nel rame statorico, a rotore bloccato, per cui la rimanente parte corrisponde alle perdite nel rame rotorico.

Da quanto detto, si evince immediatamente che, per tracciare il diagramma circolare, sono necessarie tre prove:

- la misura a vuoto, con la determinazione di  $I_0$  e  $\cos \theta_0$ ;
- la misura in cortocircuito, con la determinazione di  $I_{CC}$  e  $\cos \theta_{CC}$ ;
- la misura della resistenza  $R_1$  di una fase statorica, per determinare il punto H.

Il funzionamento della macchina asincrona come generatore viene rappresentato, nel diagramma circolare, dal tratto di circonferenza  $P_0GP^*$ , posto al di sotto della retta delle coppie (Figura A.6). Per tutti i punti compresi in questo tratto, infatti, le potenze risultano negative, quindi sono erogate dalla macchina. Inoltre, l'arco  $P^*FP_{CC}$  rappresenta il funzionamento della macchina come freno, in cui si ha assorbimento di potenza elettrica e meccanica.



**Figura A.6:** diverse modalità di funzionamento di una macchina asincrona.

Un'ultima notazione prima di concludere: il centro ed il diametro del cerchio dipendono dai vari parametri del circuito equivalente. Si può dimostrare che, se si varia la resistenza esterna chiusa su ogni fase del rotore, il cerchio non cambia, mentre il punto  $P_{CC}$  si avvicina a  $P_0$ .