

LA MACCHINA ASINCRONA

1_ Generalità

Le svariate, numerosissime applicazioni della macchina asincrona, sono conseguenti alla semplicità costruttiva, alla robustezza ed oggi anche all'attuale possibilità di regolazione di velocità e quindi relativo impiego in automazione (introduzione dell'inverter o avviatori elettronici).

La macchina asincrona deriva il nome dal fatto che la parte rotante (**ROTORE**) non riesce a raggiungere autonomamente la cosiddetta velocità di "sincronismo" data dalla relazione:

$$n_1 = \frac{60f}{p} \text{ [giri/min]}$$

in cui **60** sono i secondi in 1 minuto; (**f**) è il numero di pulsazioni al secondo, (**p**) è il numero di coppie di poli per fase presenti all'interno della macchina.

In una macchina composta da 1 coppia di poli che viene alimentato con una frequenza di rete di 50 Hz si ricava che il LA VELOCITÀ DEL CAMPO MAGNETICO ROTANTE (detta di sincronismo) vale:

$$n_1 = 60 \cdot f_1 / p = 60 \cdot 50 / 1 = 3.000 \text{ giri / minuto}$$

Se le coppie di poli per fase sono 2, la velocità di sincronismo del campo magnetico rotante si riduce a

$$n_1 = 60 \cdot 50 / 2 = 1.500 \text{ giri/minuto}$$

(si ricorda che la velocità angolare per gli elettrici si indica con ω e si esprime in **rad/sec** per i meccanici solitamente si esprime in numero di giri al minuto (**n**) ossia **giri/min**)

LA MACCHINA ASincrona SI BASA SUL PRINCIPIO DEL CAMPO MAGNETICO ROTANTE che del resto per certi versi, È LA STESSA NELLA PARTE STATORICA DELLA MACCHINA SINCRONA

La macchina asincrona dal punto di vista costruttivo è composta da DUE CILINDRI CONCENTRICI formati DA LAMIERINI IN FERROMAGNETICO di spessore 3-5 mm isolati tra loro da isolante (es carta o vernice)

Il cilindro esterno si chiama STATORE (perché è fermo) mentre il cilindro interno che può ruotare attorno al suo asse si chiama **ROTORE**
di fianco si sviluppa una sezione della MAT Motore Asincrono Trifase

Cave statoriche che contengono i lati attivi degli avvolgimenti di fase alloggiati nelle CAVE STATORICHE

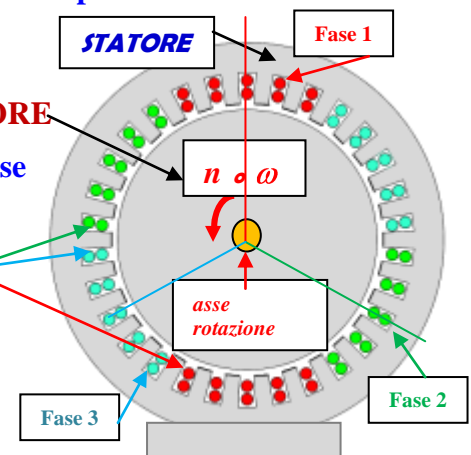


Figura 1

I tre avvolgimenti si nota che sono sfasati tra di loro in questo caso (con 1 solo polo per fase) ossia (rosso fase 1 – verde fase 2 – ciano fase 3) di UN ANGOLO MECCANICO di 120°

Il rotore ruota alla velocità del rotore e si indica con **n_r** Velocità rotorica, in molti casi si indica anche come **n₂**. Notoriamente come vedremo la velocità del campo magnetico rotante **n₁** > **n_r**, da cui il MITICO NOME DI **MACCHINA ASincrona** ossia con **a** privativa, che appunto vuol dire, che nega la velocità di sincronismo.

Per correttezza d'informazione il rotore ha sulla sua periferia esterna, la stessa situazione delle cave statori, solo che sono tre avvolgimenti in corto circuito, per motivi che saranno visti successivamente.

VEDIAMO ORA COME SI CREA IL CAMPO MAGNETICO ROTANTE (ricordo che lo **STATORE** sia della **Macchina Sincrona** e sia della **Macchina ASincrona** sono uguali, perché tutti e due creano il campo magnetico rotante **(che per ora faccio notare è solo TRIFASE)**

2 GENERAZIONE DEL CAMPO MAGNETICO ROTANTE

Per CREARE il CAMPO MAGNETICO ROTANTE (di seguito indicato con **l'acronimo CMR**) **SI DEVE DISPORRE di 2 CONDIZIONI** senza le quali **non si Può creare** il **CAMPO MAGNETICO ROTANTE**

1) SI DEVE AVERE 3 AVVOLGIMENTI STATORICI SFASATI TRA DI LORO DI 120 GRADI MECCANICI (vedere figura 1 pagina precedente);

2) ALIMENTIAMO I TRE AVVOLGIMENTI o TRE FASI, CON TRE TENSIONI SIMMETRICHE. RICORDIAMO CHE COSA S'INTENDE PER TERNA SIMMETRICA DI TENSIONE (tre tensioni sfasate di 120 gradi elettrici con stessa ampiezza del tipo seguente)

Ricordiamo cosa si definisce Sistema Simmetrico Trifase:

quando le tensioni fornite da ogni singola fase del generatore, hanno ugual modulo e sono sfasate di $360^\circ/3 = 120^\circ$.

esempio di TRE TENSIONI DI FASE SIMMETRICHE stessa E ma sfasate tra di loro di 120° elettrici

$$U_{10}(t) = E \cdot \sin(\omega T) - U_{20}(t) = E \cdot \sin(\omega T + 120) - U_{30}(t) = E \cdot \sin(\omega T + 240)$$

esempio di TRE TENSIONI DI CONCATENATE SIMMETRICHE stessa V ma sfasate tra di loro di 120° elettrici

$$u_{12}(t) = V \cdot \sin(\omega T) - u_{23}(t) = V \cdot \sin(\omega T + 120) - u_{31}(t) = V \cdot \sin(\omega T + 240)$$

In tal caso anche la terna delle tensioni concatenate è simmetrica. Si ricorda che $U_{12} = \sqrt{3} * U_{10}$. Sui testi normalmente troviamo anche indicata la **tensione concatenata** con la lettera **V** mentre la **tensione di fase** con la lettera **E**

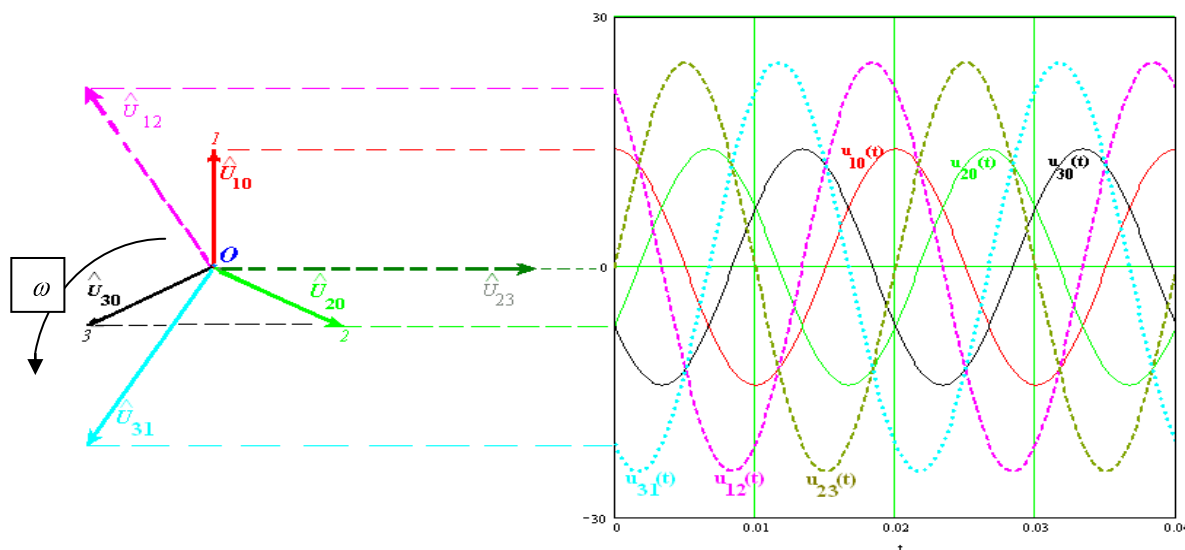


Figura 2) Come **associare le sinusoidi** ai **vettori** rappresentativi delle tensioni stellate e concatenate in un **sistema simmetrico**. Le terne di vettori ruotano in senso antiorario con velocità angolare costante ω (pulsazione) e riproducono, con la successione delle loro proiezioni, le rispettive funzioni temporali. In ogni istante la somma dei valori di ogni terna è sempre nulla. I vettori qui hanno una lunghezza pari al **valore massimo (ampiezza)**, mentre di solito, nelle applicazioni, le terne di vettori si rappresentano con i **valori efficaci**. L'associazione dei vettori alle sinusoidi è un **artificio** utilissimo per poter affrontare i calcoli, ma non si dimentichi che le tensioni e le correnti sono comunque grandezze scalari, come lo è ad esempio la temperatura.

I tre avvolgimenti, con lo stesso numero di spire, sono distribuiti uniformemente sulla parte fissa della macchina (lo statore) a 120° fra loro (per avere una coppia di poli), rispettandone il senso di avvolgimento. Notare che per nostra comodità ho disegnato solo 1 spira per polo o fase.

Ogni avvolgimento abbia un principio P e una fine F , la corrente che entra con il simbolo (+) dal P , mentre da dove esce il simbolo (\bullet). In figura 3 la **fase 1 (I_1) entra da P_1 ed esce da F_1 perché è creata dalla U_{10}** . Mentre, sempre nell'istante 1 le altre 2 tensioni U_{20} **negativa che crea una corrente (I_2) che quindi quanto negativa entrerà da F_2 ed esce da P_2** . Stessa cosa sarà per U_{30} **negativa che crea una corrente (I_3) che quindi quanto negativa entrerà da F_3 ed esce da P_3** . Se guardiamo le tre frecce e i tre puntini sembra quasi che si è creato un solo solenoide che da un campo magnetico risultante (**frecchia marrone** con una polarità magnetica Nord ed una Sud).

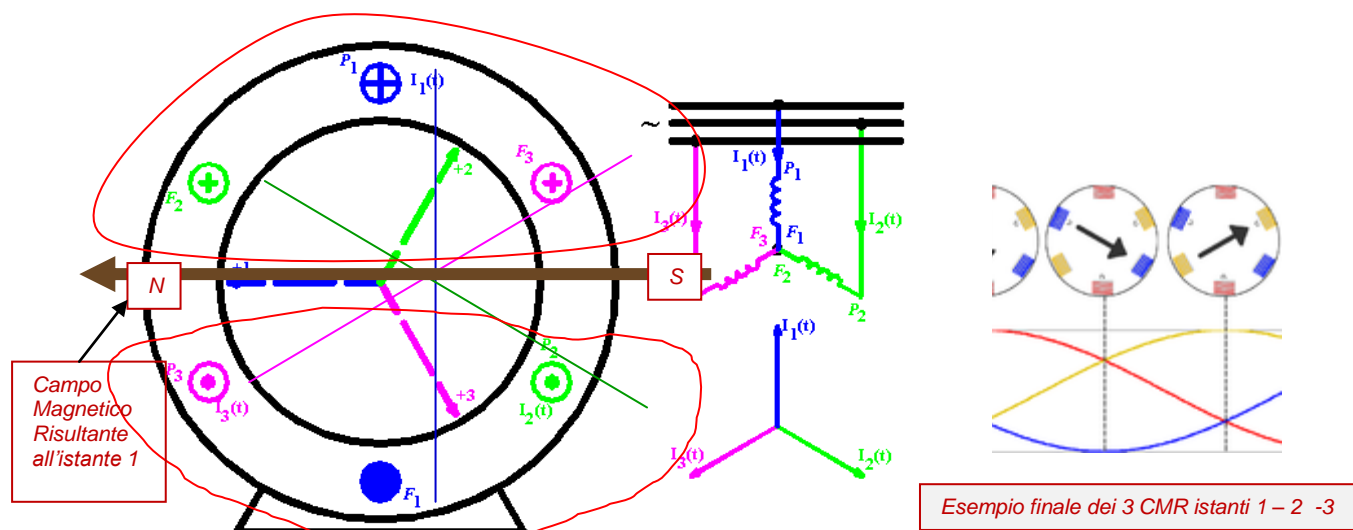
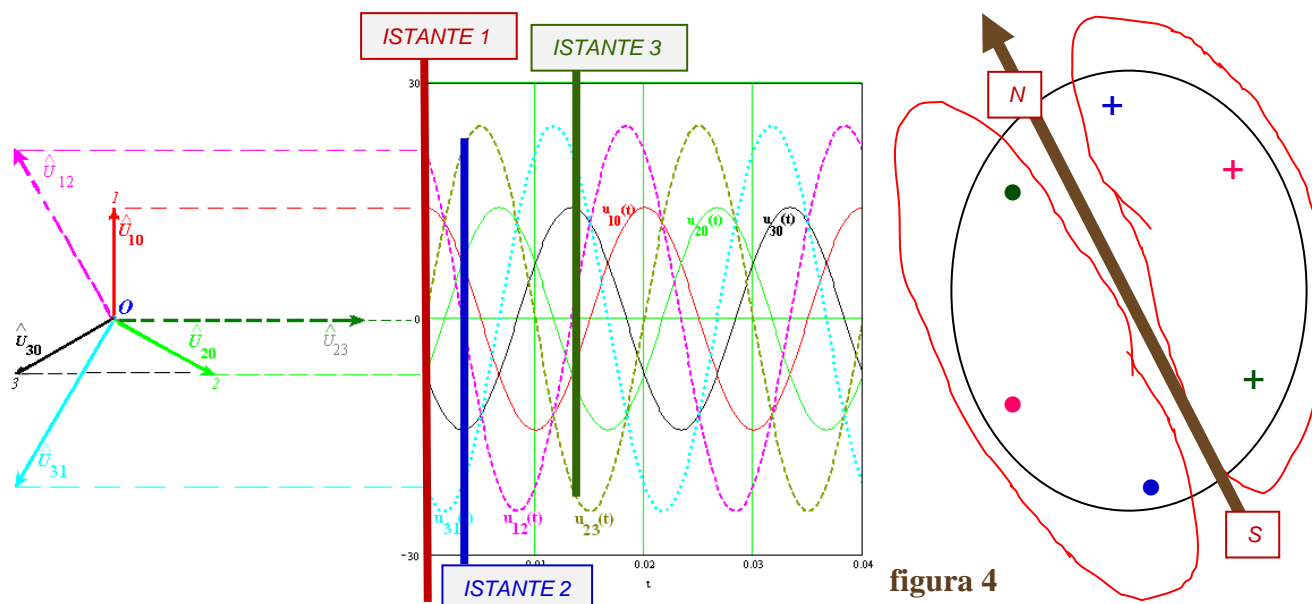


Figura 3) Statore della macchina, collocazione degli avvolgimenti e posizione iniziale della terna delle correnti. Nella fase 1 (semionda positiva verde) entra da P_1 ed esce da F_2 , nella fase 2 semionda negativa



Se ripetiamo la costruzione all'istante 2 (ora si ha sia U_{10} che U_{20} positive quindi le correnti I_1 ed I_2 positivi ossia entranti da P_1 e da P_2 , mentre U_{30} che da origine ad I_3 ossia entra da F_3 ed esce da P_3 resta ancora negativo come primasi ottiene lo stesso disegno ma il CMR risulterà ruotato stesa cosa se si ripete nell'istante 3 ma risulterà ancora ulteriormente ruotato (come si vedrà in seguito).

Provate a fare voi ora l'istante 3 (dove U_{30} è positiva mentre U_{20} e U_{10} sono negativi) dove va il CMR? Cerco ora solo di esprimere lo stesso concetto di prima:

Gli avvolgimenti sono disposti a 120° fra loro (angolo meccanico), sono ad esempio collegati a stella e sono alimentati da una linea trifase con una terna simmetrica di tensioni.

I tre avvolgimenti si comportano quindi come un carico trifase equilibrato che assorbe tre correnti uguali in modulo e sfasate fra loro di 120° (angolo elettrico).

Iniziando le considerazioni *dall'istante* in cui la terna delle correnti ha la posizione di riferimento indicata in fig. 1) si può dire che:

- la corrente I_1 è **massima** e per convenzione riteniamo che essa **entri** dal principio P_1 del primo avvolgimento (in figura è indicato con **+1** il verso positivo del campo magnetico prodotto dalla corrente sinusoidale I_1).
- La corrente I_2 ha valore istantaneo **negativo** e pari alla metà del valore massimo assunto dalle correnti.

(Si ricordi che ai vettori è associata una sinusoide, il cui valore istantaneo è la proiezione verticale del vettore in esame sull'asse delle ordinate).

Pertanto, in base alla convenzione stabilita, la corrente entra dalla fine F_2 ed esce dal principio P_2 . Con **+2** è rappresentato il verso positivo del campo creato dalla corrente I_2 (**+2** sarà il verso del campo quando la corrente entrerà dal principio del 2° avvolgimento).

□ La corrente I_3 ha un comportamento analogo alla I_2 , rispetto alla quale è però in ritardo di 120° . Entra dalla fine dell'avvolgimento con ampiezza pari alla metà del valor massimo. Con **+3** si intende il verso positivo del campo che sarà prodotto dalla corrente della bobina 3 quando entrerà dal principio ed uscirà dalla fine dell'avvolgimento.

Ogni corrente produrrà un campo magnetico di ampiezza proporzionale al proprio valore istantaneo e questo campo agirà nella direzione dell'asse della propria bobina, i cui versi positivi sono +1, +2, +3. Quando la corrente ha valore istantaneo massimo positivo il campo prodotto sarà H_{Max} , cioè massimo; quando la corrente sarà massima negativa anche il campo sarà massimo ed agirà con verso contrario al precedente.

Se la corrente ha valore istantaneo pari alla metà del valor massimo, anche in campo ha valore $H_{\text{Max}}/2$ e così analogamente per gli altri infiniti valori istantanei positivi o negativi assunti dalla corrente in un periodo.

Nell'animazione successiva si 'fotografano' posizioni tra loro spostate nel tempo di $1/12^\circ$ di periodo, che corrisponde in questo caso a una rotazione di 30° .

Si osservi che il senso ciclico delle fasi è quello diretto (i vettori associati alle sinusoidi delle correnti ruotano in senso positivo **antiorario** e si succedono in modo che a I_1 segua I_2 a 120° in ritardo e I_3 , a sua volta, in ritardo di 120° rispetto a I_2).

Sommando istante per istante i contributi di ogni singolo campo magnetico prodotto dalle bobine si ottiene un **campo magnetico risultante** che ha somma costante pari a

$$HR = 3 \frac{H_{\text{Max}}}{2} = 1,5 \cdot \hat{H}$$

Il campo risultante così ottenuto ha ampiezza costante $1,5 H_{\text{max}}$ e ruota in senso orario con **velocità ω costante**.

Nella fig. 2, nella parte alta a sinistra, si nota la successione delle posizioni temporali della terna delle correnti assorbite dai tre avvolgimenti statorici. I colori si riferiscono alle singole correnti di fase.

Nella parte centrale della figura sono disposti i vettori rappresentativi delle ampiezze dei tre campi prodotti dalle rispettive correnti, mentre il campo risultante dalle loro composizioni è il vettore rosso che ha ampiezza sempre costante.

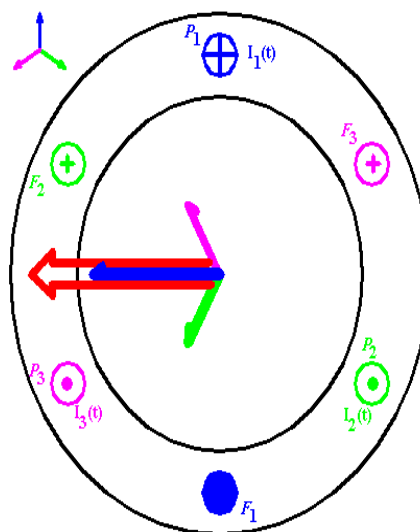
Figura 5) Generazione del campo magnetico rotante da parte di tre avvolgimenti distinti alimentati da un sistema simmetrico trifase.

Come evidenzia l'animazione, il campo magnetico risultante (vettore rosso) va a tagliare sia i conduttori degli avvolgimenti induttori, sia quelli posti sull'indotto, non rappresentati in fig. 3, ma visibili in fig.4.

Sul rotore trovano sistemazione i conduttori in rame (o in alluminio nel rotore presso-fuso) disposti nelle cave.

Due anelli frontali, anteriore e posteriore, collegano i suddetti conduttori rotorici in corto circuito, in modo da formare un circuito elettrico chiuso di resistenza molto bassa (per la forma che ne deriva il rotore è detto a [gabbia di scoiattolo](#)).

Nel caso in cui i conduttori dell'indotto costituiscano un vero e proprio avvolgimento, del tipo di quello statorico e per lo stesso numero di poli, il rotore è detto di tipo avvolto e sono presenti anche tre anelli con relative spazzole per il collegamento ad un reostato esterno, come si vedrà in seguito.



LA DIFFERENZA TRA MOTORE SINCRONO ED ASINCRONO STÀ NEL ROTORE.

Nel SINCRONO si ha che se il rotore è un magnete permanente o elettromagnete, questo si aggancia al CMR e girerà solo alla velocità che gira il CMR da cui DERIVA LA PAROLA SINCRONO ossia il CMR ed il magnete girano in sincronia sempre alla stessa velocità (NOTARE INCONVENIENTE è CHE Può GIRARE SOLO AD UNA VELOCITÀ OSSIA QUELLA DI SINCRONISMO).

NEL MOTORE ASINCRONO TRIFASE GLI AVVOLGIMENTI ROTORICI SARANNO INIZIALMENTE CONSIDERATI QUASI GEMELLI A QUELLI STATORICI (non devono essere perfettamente gemelli perché altrimenti avremo dei punti preferenziali dal punto di vista magnetico tra il dente statorico e quello rotorico).

RICORDIAMO CHE DOBBIAMO RIFARCI COME NEL CASO DEL TRASFORMATORE AL PRINCIPIO DELL'INDUZIONE ELETTROMAGNETICA OSSIA ALLE LEGGI DI Faraday - Neuman e Lenz, PER POI GIUSTIFICARE L'AZIONE ELETTRODINAMICA DELLA LEGGE DI LORENZ OSSIA DELLE AZIONI ELETTRODINAMICHE.

Nella terminologia anglosassone il MAT (MOTORE ASINCRONO TRIFASE) viene anche chiamato Motore ad Induzione o in certi casi addirittura TRASFORMATORE ROTANTE ma questa è più una bega storica tra il vero inventore del CMR Ing . GALILEO FERRARIS e il Sig. HENRI che ebbe la furbizia di brevettare ciò che Ferraris sbadatamente non ha fatto. Ma questo è più un problema legale – economico – storico (ma per noi Italiani fa bene ricordarlo in particolare se poi lo associamo anche al telefono di Meucci).

3_ PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL MOTORE ASINCRONO TRIFASE

Il campo magnetico rotante, ottenuto con i tre avvolgimenti di statore alimentati da una terna simmetrica di tensioni, potrebbe per esempio immaginarsi prodotto dalla rotazione in senso orario di una coppia di poli di un magnete permanente con poli N' e S' , la cui velocità n_1 sia costante.

Questo campo taglia anche i conduttori posti sull'indotto o rotore, i quali costituiscono un circuito chiuso che diventa sede di f.e.m.i. e di correnti indotte per la legge dell'induzione elettromagnetica

Ossia in ogni spira conduttrice si induce una $e = d\phi/dt$.

Per la legge di Lenz, il loro verso deve essere tale da creare opposizione alla causa che ha prodotto le correnti, e questa causa è il taglio delle linee di flusso. L'unico modo che il rotore ha per contrastare il taglio delle linee è di ruotare nello stesso senso del campo, rincorrendolo (se il rotore invece girasse in senso opposto a quello di rotazione del campo risultante, il taglio delle linee sarebbe ancora più violento e in contraddizione col principio esposto).

In prima battuta si può dire che a questo punto immaginando i tre avvolgimenti aperti si induce nelle 3 avvolgimenti rotorici 3 fem uguali tra loro ma siccome sono sfasati di 120° meccanici ogni fase vede la stessa cosa delle altre 2 fasi ma dopo un certo tempo in conclusione si può dire che nascono tre tensioni uguali in modulo ma sfasate tra loro di 120° elettrici (questa però è la definizione di terna simmetrica). Ma siccome i tre avvolgimenti in realtà sono chiusi in corto circuito tra loro ed essendo presente una tensione vuol dire che circoleranno tre correnti sfasate tra di loro di 120° ossia siamo di fronte ad un nuovo pseudo CMR che si aggancia all'altro e cerca di raggiungerlo (ricordarsi la corrente I_2 del trasformatore che richiama dal primario la I_1^1 che deve annullare il flusso 2 e lasciare solo il flusso principale) allo stesso modo anche qui si ha la stessa cosa ecco la similitudine del MAT col Trasformatore rotante. Come detto visto che circola negli avvolgimenti rotorici una corrente rotorica e ricordando la legge di Lorentz che dice che un conduttore percorso da corrente immerso in un campo magnetico riceve una forza e se può ruotare questa ruota ecco che nasce una COPPIA MOTRICE CHE METTE IN ROTAZIONE IL ROTORE.

Ma quando il rotore giunge a ruotare alla stessa velocità del CMR ecco che la fem non si ha più quindi la corrente rotorica scompare e di conseguenza anche la coppia motrice quindi il rotore non può che rallentare per l'effetto dell'attrito. Ma nel momento che rallenta rivede il CMR che taglia gli avvolgimenti rotorici e rinasce la corrente e relativa coppia. IN conclusione quindi il rotore non raggiunge la velocità del CMR ma girerà prossimo alla velocità del CMR ossia i due elementi Rotore e CMR non possono girare in SINCRONIA da cui la dizione di MOTORE ASINCRONO.

ALTRO MODO PER DIRE QUANTO DETTO è:

Quanto detto trova anche giustificazione e conferma applicando la regola empirica della "mano destra" al conduttore 1 e al conduttore 2 che fanno parte del circuito di rotore a gabbia di scoiattolo.

Il conduttore 1, investito dal campo rotante di cui sono disegnate per semplicità due sole linee prodotte dalla coppia di poli fittizia $N' - S'$, diventa sede di f.e.m.i. il cui verso è entrante, come entrante risulta anche il verso della corrente indotta.

(Si ricordi che

- il verso della f.e.m. è dato dal dito medio della mano destra,
- che l'indice va orientato come il campo,
- che il pollice va diretto nel senso in cui si sposta il conduttore: la regoletta impone che a muoversi sia il conduttore rispetto al campo ritenuto fermo, e non il campo rispetto al conduttore.
- Il conduttore, relativamente al campo, si sposta verso il basso)

Applicando ora al conduttore **1** percorso da corrente e immerso nel campo la regola della "mano sinistra"

(indice nel verso del campo che è diretto da N' verso S' , medio diretto entrante come la corrente indotta, il pollice dà il verso della forza perpendicolare al conduttore e al campo)

si determina la forza F_1 agente sul conduttore e diretta verso l'alto.

In modo analogo si determina la forza F_2 agente sul conduttore **2**, percorso da una corrente indotta uscente. La coppia di forze così ottenuta sui conduttori **1** e **2**, unita alle altre che agiscono sui conduttori restanti dà luogo a una coppia risultante che porta in rotazione l'indotto nello stesso senso di rotazione del campo magnetico induttore.

La coppia applicata al rotore deve vincere la coppia resistente e quando è raggiunta questa condizione si ha la velocità di regime.

Nell'istante di applicazione del campo rotante il motore è fermo e quindi i conduttori sono tagliati alla massima velocità dalle linee di flusso e pertanto

la corrente all'avviamento è molto alta.

Man mano che il rotore acquista velocità diminuisce la rapidità del taglio subito dai conduttori, si riducono le f.e.m.i., le correnti indotte e quindi anche la coppia motrice. Per poter vincere la pur debole coppia resistente del funzionamento a vuoto deve esserci un pur debole taglio del flusso da parte del rotore e quindi il rotore insegue sempre il campo rotante senza mai raggiungere la stessa velocità.

Si distinguono essenzialmente due condizioni di funzionamento.

□ Se il motore è a vuoto la coppia resistente applicata all'albero è minima e il motore può raggiungere una velocità n_2 prossima a quella del campo magnetico rotante, senza però mai diventare uguale a quella di sincronismo (alla velocità di sincronismo la velocità di variazione del flusso sarebbe nulla e quindi anche la coppia motrice si annullerebbe).

Il rotore può ruotare alla velocità di sincronismo solamente se riceve energia meccanica dall'esterno (ad esempio in una discesa a causa dell'inerzia, o da un motore coassiale ausiliario).

□ Se il motore è stato avviato e gira a vuoto, applicando un carico sull'albero il rotore è costretto a rallentare: solo così aumenta il taglio delle linee di flusso e cresce la corrente assorbita, con la possibilità di far crescere la coppia motrice e raggiungere la nuova condizione di equilibrio. Questa condizione si ottiene a una velocità inferiore a quella iniziale del funzionamento senza carico.

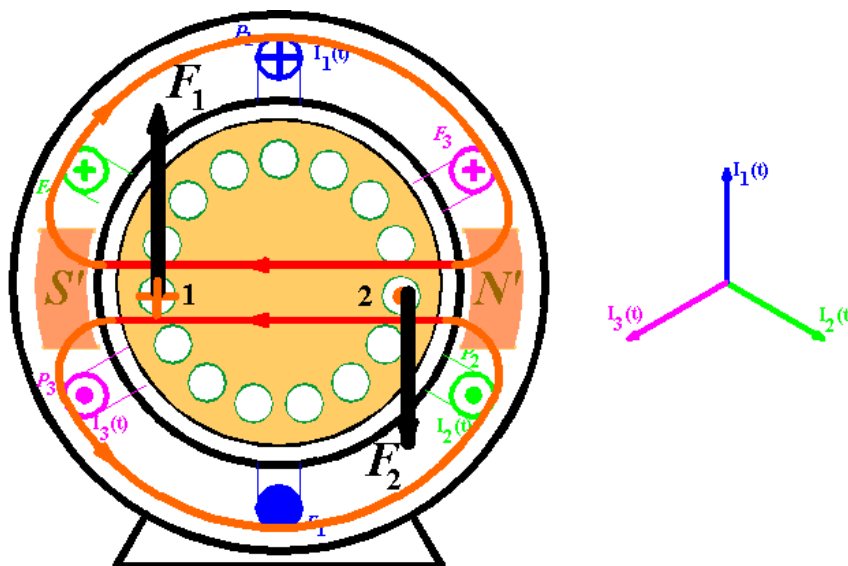


Figura 6) La coppia fittizia di poli rotanti dà origine a una rotazione dell'indotto nello stesso senso del campo, come si vede dai versi delle correnti e delle forze agenti sui conduttori 1 e 2 del rotore.

4_ Definizioni

Nelle figure precedenti l'avvolgimento di statore è stato disposto in modo da produrre un campo magnetico rotante con una sola coppia di poli ($p = 1$).

In tal caso, alla frequenza fissa f_1 della tensione di rete, corrisponde una velocità di sincronismo del campo induttore rotante pari a

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ [giri/min]} ; \quad \Omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} \text{ [rad/s]} \quad (1)$$

Per un avvolgimento trifase con 4 poli ($p = 2$) i principi (e le fini degli avvolgimenti) devono essere collocati non a 120° , ma ad un angolo meccanico di 60° . Infatti, in generale, per più paia poli, è valida la relazione:

$$\alpha_{mecc} = \frac{\alpha_{elett}}{p} = \frac{120}{p}$$

5_ Scorrimento

Se il rotore gira alla velocità n_2 si ha la velocità del rotore. In questo caso il rotore che già sta girando alla velocità n_2 vedrà il CMR che gira a n_1 detta di sincronismo con una velocità relativa **N(2)**

$$n_1 - n_2 = N(2)$$

si questa base si può anche ricavare la frequenza f_2 delle grandezze rotoriche I_2 ; E_2 e $X_{dr} = 2\pi f_2 \cdot L_r$

quindi come per n_1 si ha ricava la velocità del rotore n_2 con la relazione **N(2) = (60 f_2)/ p**

la N(2) viene chiamata velocità di scorrimento tra campo rotante e rotore (il numero di giri che il rotore perde ad ogni minuto primo rispetto al campo rotante, oppure la velocità di rotazione del rotore rispetto al campo rotante).

Si definisce ora scorrimento il la velocità di scorrimento relativa al CMR n_1

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} \quad (3)$$

$$\text{e che } n_1 - n_2 = \underline{n_1 \cdot s = N(2)} \quad (5)$$

e che quindi se voglio sapere la velocità del rotore noto lo scorrimento applico **$n_2 = (1-s) \cdot n_1$**

che rappresenta la parte di giro che il rotore perde per ogni giro del campo rotante.

Valori tipici dello scorrimento:

- **all'avviamento** (rotore ancora fermo con $n_2 = 0$) $\leftrightarrow s = 1$
- **a vuoto ideale** (rotore con $n_2 = n_1$) $\leftrightarrow s = 0$
- **a vuoto reale** ($n_2 \sim n_1$) $\leftrightarrow s \sim 0$

Allo scopo di evitare confusione fra le diverse velocità angolari si è convenuto, nel seguito, di indicare con

o ω la velocità angolare del **vettore elettrico**, detta **pulsazione**;

o Ω la velocità angolare di parti meccaniche in rotazione.

Fra le due grandezze vale la relazione

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

Si definisce scorrimento percentuale

$$s\% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100 = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} 100 = s \cdot 100 \quad (4)$$

Se un motore a 4 poli ($p=2$) è alimentato con frequenza $f=50\text{Hz}$ e ruota alla velocità di $n_2=1440$ giri/min, il suo campo rotante, in base alla (1), possiede la velocità di sincronismo $n_1 = 1500$ giri/min.

Nella attuale condizione di carico lo scorrimento è

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0,04 \quad \text{e} \quad s\% = 4$$

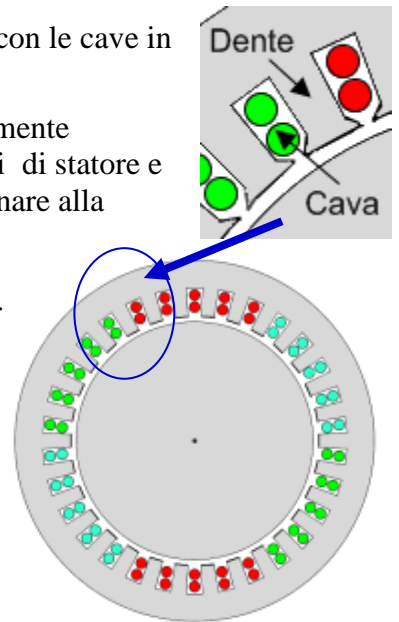
Figura 7 - Sezione dello statore di una macchina elettrica isotropa bipolare con le cave in cui sono sistemati i conduttori di fase.

Nonostante la costanza del traferro, la riluttanza dei circuiti non è rigorosamente costante poichè le linee di campo tendono a concentrarsi nella zona dei denti di statore e di rotore, ma conformando opportunamente le cave e i denti ci si può avvicinare alla condizione ideale.

La figura 5 rappresenta lo statore di una macchina isotropa bipolare.

L'avvolgimento di ogni fase occupa 10 cave, quindi abbiamo $q = 5$ cave per ogni polo e per ogni fase. Abbiamo qui introdotto il parametro q , numero di conduttori per polo e per fase. I colori evidenziano la disposizione dei conduttori rispetto alle fasi di appartenenza..

IL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MAT RIFERITO AD UN SOLO AVVOLGIMENTO È LO STESSO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRASFORMATORE SOLO CHE AL POSTO DEL PRIMARIO SI PARLA DI STATORE, AL POSTO DI SECONDARIO SI PARLA DI ROTORE.



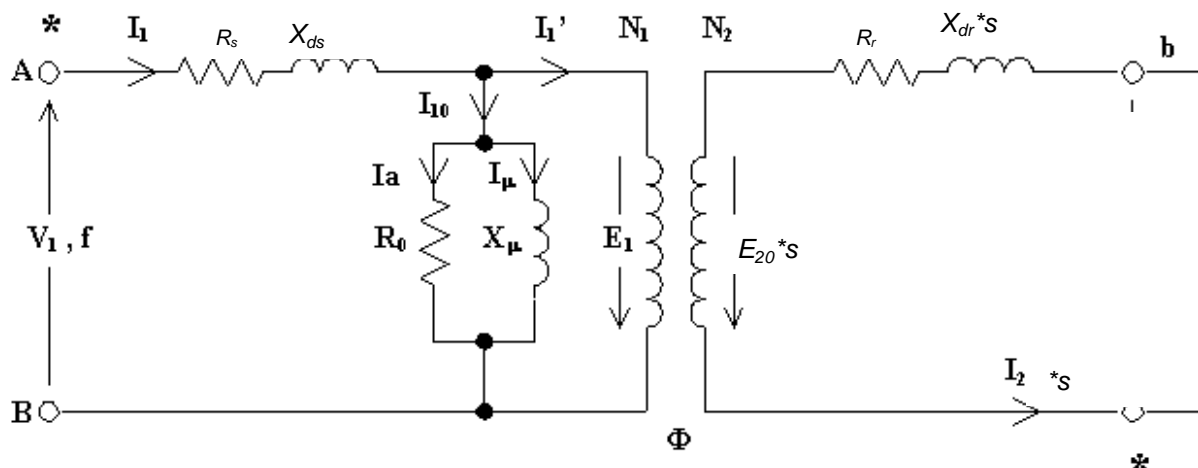
L'anomalia però a questo punto è che il Motore notoriamente da potenza meccanica e nel circuito equivalente manca un parametro che rappresenta appunto la potenza meccanica, inoltre le grandezze del secondario partendo dalla E_2 dipendono dalla frequenza del rotore che notoriamente cambia con lo scorrimento quindi va modificato il circuito equivalente del secondario .

Ricordiamo che dalla (5) $\underline{n_1} * s = N(2) = 60 * f_2 / p \leftrightarrow \underline{n_1} * s = 60 * f_2 / p$

posso ricavare $\underline{f_2} = p * \underline{n_1} * s / 60$ ma si è visto che $\underline{n_1} * p / 60 = f_1$ si può concludere che $\underline{f_2} = \underline{f_1} * s$

$E_2 = 2.22 K\phi * f_2$ siccome $f_2 = f_1 * s$ allora sia ha che $E_2 = 2.22 K\phi * f_1 s$ siccome a rotore bloccato ($s = 1$)

$E_{20} = 2.22 K\phi * f_1$ 1, si può dire che $E_2 = 2.22 K\phi * f_2 = E_{20} * s$



Circuito equivalente del MAT

Calcolo ora la $I_2 = (E_{20} * s) / (\sqrt{R_r^2 + X_{dr}^2 * s^2})$ porto la s del numeratore al denominatore e per portarlo sotto radice deve essere elevato al quadrato ottenendo così

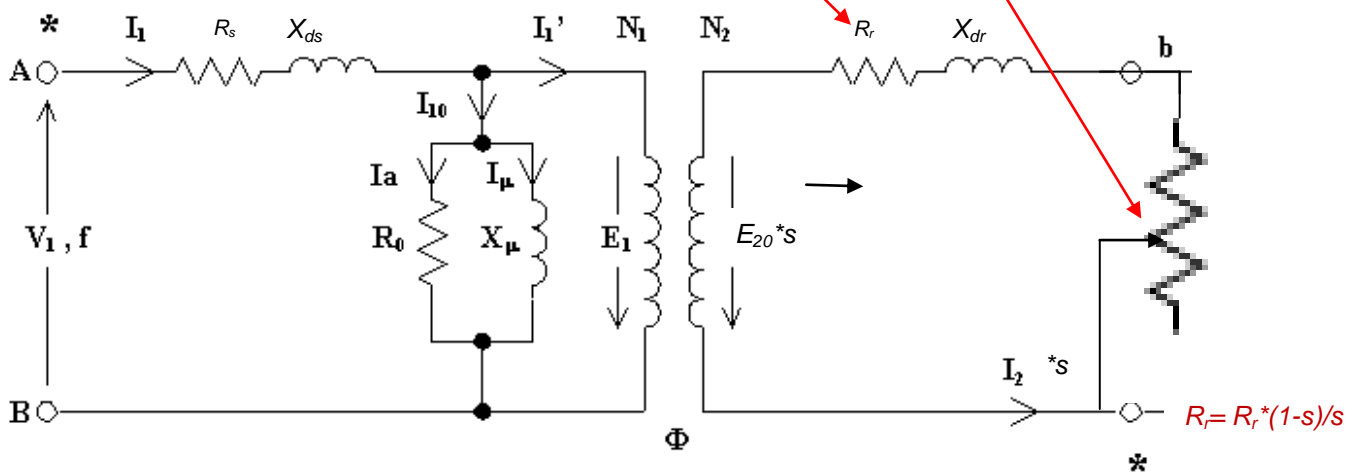
$I_2 = E_{20} / (\sqrt{(R_r^2/s^2 + X_{dr}^2 * s^2/s^2)})$ semplificando le s^2 della reattanza rotorica si ottiene

$$I_2 = E_{20} / (\sqrt{(R_r/s)^2 + X_{dr}^2 * s})$$

Si nota che l'unica grandezza che non deve variare R_r ora risulta variabile in funzione di s ossia R_r/s ossia la resistenza rotorica è l'unica che cambia inoltre manca la parte che indica una Potenza meccanica che per il concerto della trasformazione energetica di tipo dissipative ossia che da elettrica deve trasformarsi in altra energia dissipative (l'unica da noi conosciuta in elettrotecnica è la resistenza quindi si opera una trasformazione matematica sulla resistenza rotorica più per questioni filosofiche che per motivi elettrici).

Sappiamo che R_r/s se gli aggiungo e tolgo R_r la stessa cosa l'uguaglianza non cambia.

$$R_r/s = R_r/s + R_r - R_r = R_r + R_r/s - R_r = R_r + R_r((1/s)-1)) = R_r + R_r(1-s)/s$$

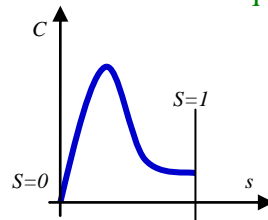


dove la $R_r = R_r * ((1-s)/s)$ rappresenta la potenza meccanica resa all'asse del rotore

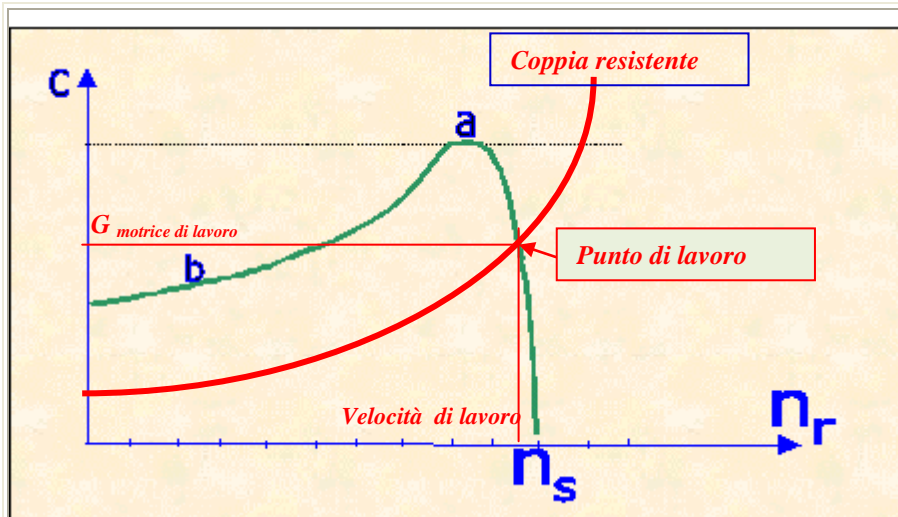
Caratteristica meccanica partendo dalla relazione

$$C \approx (3/2\pi) * (p/f_1) * (V_1/K_0)^2 * sR_r / (R_r^2 + s^2x_2^2)$$

Facendo lo studio di funzione come studiato in matematica con i massimi, i flessi, ed intersezione con gli assi (Y che per noi è la C di coppia e la x che per noi è lo scorrimento si ricava una curva simile a quella di sotto solo che è ribaltata ossia parte da $s=0$ ossia rotore libero ideale di ruotare alla velocità del CMR e per $s=1$ all'avviamento non è bello a vedersi quindi si preferisce la $C = f(n_r)$

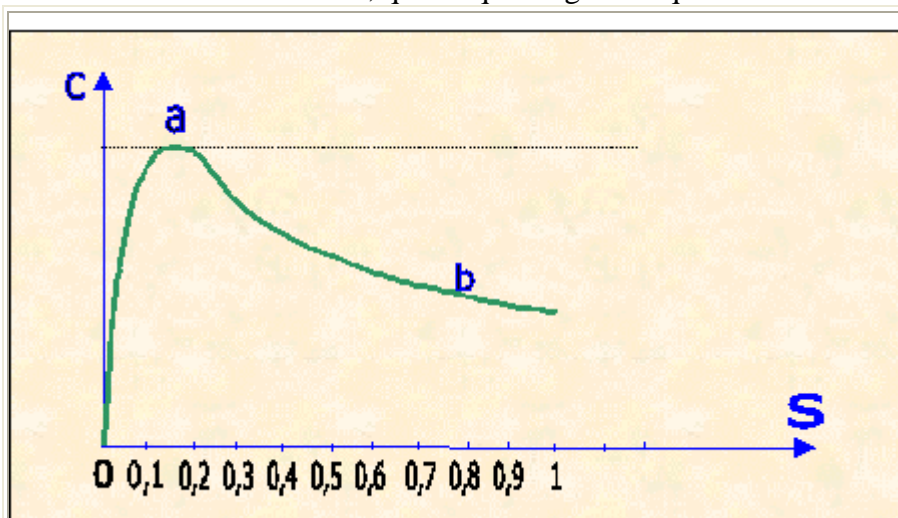


La caratteristica meccanica rappresenta l'andamento della coppia motrice C in funzione della velocità di rotazione del rotore n_r



caratteristica meccanica del motore asincrono

La caratteristica meccanica si può anche rappresentare come detto in funzione dello scorrimento s ; ricordiamo che scorrimento s uguale a 1 vuol dire motore fermo; scorrimento uguale a zero vuol dire che la velocità è la massima, quindi quasi uguale a quella di sincronismo.



caratteristica meccanica del motore asincrono

Questa caratteristica ci dice che quando il motore gira con velocità elevata, cioè prossima alla velocità di sincronismo n_s , la coppia è molto elevata; in tal caso lo scorrimento è quasi nullo.

Quando invece lo scorrimento aumenta e raggiunge il valore 1, la coppia motrice si riduce e il motore rallenta; per cui occorre evitare che il motore funzioni nel tratto **a-b**, che è un tratto instabile; infatti, in tale tratto se aumenta il carico meccanico il motore rallenta, cioè aumenta lo scorrimento rispetto alla velocità di sincronismo, ma si riduce anche la coppia motrice, per cui il motore non sarebbe in grado di aumentare la sua velocità ma si porta a fermarsi, in quanto la coppia motrice si riduce.

Invece il tratto **0-a** è un tratto stabile; infatti all'aumentare del carico nel tratto **0-a** è vero che aumenta lo scorrimento, e quindi il motore rallenta, ma aumenta pure la coppia motrice, per cui il motore asincrono è in grado di sopportare l'aumento di carico meccanico.

La velocità

La velocità del motore non è quella di sincronismo

$$n_s = 60 f/p$$

nel caso di motore con una sola coppia polare; la coppia polare è un avvolgimento disposto sullo statore in grado di generare un polo nord e un polo sud. Poiché il rotore non raggiunge mai la velocità di sincronismo n_s , e infatti si dice asincrono, il rotore gira con una velocità inferiore a n_s per cui la velocità del rotore diventa la seguente:

| |
|---|
| $n_r = 60 f (1-s) \text{ (formula utile per ricavare a che velocità gira il rotore)}$ |
|---|

dove il fattore $(1-s)$ è un fattore che riduce la velocità di sincronismo; infatti, poiché s varia da 0 a 1, anche la differenza:

$$(1-s)$$

varia da 0 a 1.

Lo scorrimento nei piccoli motori, a pieno carico, è intorno al 6%; mentre nei grandi motori a pieno carico scende al 2%.

RENDIMENTO

Il rendimento η del motore asincrono trifase lo possiamo calcolare con la solita formula:

$$\eta = \frac{P_r}{P_a}$$

dove η è il rendimento, P_r è la potenza meccanica utilizzata sul rotore, P_a è la potenza elettrica assorbita sullo statore.

La potenza sullo statore è di tipo elettrico e la si può misurare con dei wattmetri; essendo la potenza sul rotore di tipo meccanico la possiamo trasformare in potenza di tipo elettrico se ci calcoliamo le perdite, cioè la potenza perduta P_p .

Le perdite di potenza sono dovute sia al riscaldamento degli avvolgimenti di statore e di rotore, per effetto Joule, sia alle perdite nel ferro dovute ai flussi magnetici dispersi nello statore e nel rotore, e sia alle perdite dovute agli attriti meccanici e alle ventole di raffreddamento. Se indichiamo con P_p la somma di tutte le perdite, allora la potenza resa sul rotore sarà:

$$P_r = P_a - P_p$$

cioè sarà la differenza tra la potenza assorbita sullo statore P_a meno la potenza perduta P_p .

Di conseguenza il rendimento diventa:

$$\eta = \frac{P_a - P_p}{P_a}$$

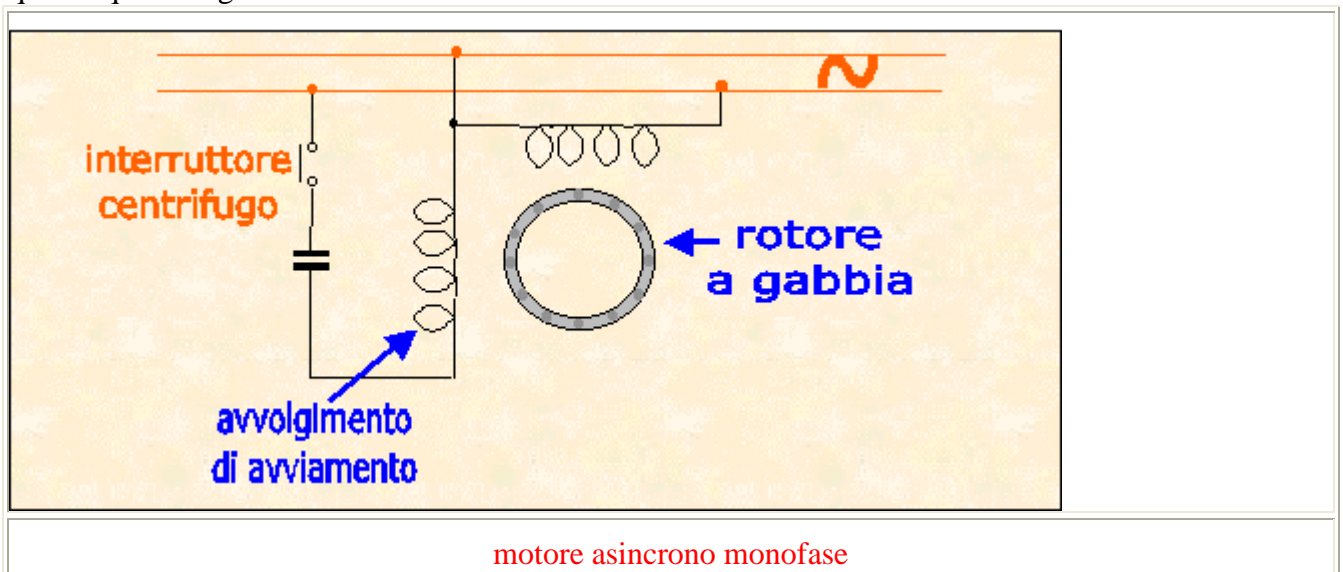
Il rendimento η è basso per i piccoli motori, intorno al 77%, mentre è elevato per i grandi motori e raggiunge il 94%.

MOTORE ASINCRONO MONOFASE

Per le piccole potenze si costruiscono dei motori asincroni monofasi, cioè quelli che utilizzano la comune tensione presente nelle abitazioni civili tra fase e neutro a 220 V e 50 Hz.

Per quanto visto nella generazione del CMR si deve disporre di 3 avvolgimenti sfasati di 120 elettrici alimentati da una terna di tensioni simmetriche. In corrente monofase e con 1 solo avvolgimento si ha che non si può creare il CMR ma solo un Campo Magnetico Pulsante, ma a sua volta un campo magnetico pulsante può essere isto come la combinazione di due campi magnetici Controrotanti di valore pari alla metà del CMPulsante, pertanto se noi favoriamo uno dei due ecco che il rotore girerà (anches e complessivamente si penalizza il rendimento) ma tanto basta per avere appunto il motore che gira.

Esistono una moltitudine di “trucchetti” per dare una spinta a favore di uno dei due CMR. Uno dei quali è quello seguente.



Vi sono due avvolgimenti; un primo avvolgimento principale è quello che funziona a regime e non è in grado di generare un campo magnetico rotante tale da far partire il motore; di conseguenza occorre un secondo avvolgimento detto di avviamento che ha lo scopo di far partire il motore sotto carico.

L'avvolgimento di avviamento ha in serie un condensatore, il quale ha la funzione di sfasare di 90° la corrente dell'avvolgimento di avviamento, rispetto a quella dell'avvolgimento principale. In tal modo si genera un campo magnetico rotante in grado di far partire il motore. Una volta partito l'avvolgimento di avviamento può essere staccato mediante un interruttore che si stacca non appena sia raggiunta la velocità di regime, a causa della forza centrifuga.

RICORDA CHE PER AVERE UN CAMPO MAGNETICO BIFASE BASTA AVERE 2 AVVOLGIMENTI SFASATI A 90° MECCANICI ED ALIMENTATI DA UNA COPPIA DI TENSIONI SFASATE ELETTRICAMENTE DI 90° ELETTRICI

INFORMAZIONI A CORREDO DI UN MOTORE ASINCRONO

Le specifiche di progetto o dati da dichiarare in sede di ordine per un motore asincrono sono:

- 1) numero di fasi m (es. monofase $m=1$ - Bifase $m=2$ - Trifase $m=3$)
- 2) potenza nominale P_n [W] potenza meccanica resa all'albero.
- 3) tensione nominale V_n [V] valore efficace della tensione di alimentazione, concatenata se polifase.
- 4) frequenza di statore f_I [Hz] frequenza di alimentazione
- 5) n° di poli p
- 6) velocità nominale n_n [giri/min] o scorrimento nominale s_n
- 7) collegamento delle fasi: spesso a triangolo, per avviare il motore col metodo stella - triangolo
- 8) tipo di servizio: continuo, di durata limitata, intermittente periodico, ininterrotto periodico con carico intermittente, ecc.
- 9) raffreddamento: per potenze medio-basse si hanno motori auto-ventilati, all'aumentare della potenza il raffreddamento può essere ad aria forzata da ventilatori esterni o ad acqua forzata nello statore.

Il metodo di raffreddamento è classificato con una sigla che inizia con le lettere IC a cui seguono due cifre: la prima indica la disposizione del circuito di raffreddamento, la seconda la modalità con cui è fornita la potenza necessaria alla circolazione del fluido di raffreddamento.

In funzione del raffreddamento, si stabilisce anche il grado di protezione, indicato con una sigla che inizia con le lettere IP a cui seguono due cifre: la prima definisce il grado di protezione delle persone contro i contatti con le parti in tensione o in movimento, la seconda il grado di protezione contro la penetrazione dannosa dell'acqua.

- 10) direzione dell'asse durante il funzionamento: orizzontale o verticale (influenza la scelta del metodo di raffreddamento e dei cuscinetti).

Sono specificati inoltre i seguenti parametri, da utilizzare come verifica del progetto:

- Rapporto tra coppia di spunto e coppia nominale T_{sp}/T_n
- Rapporto tra coppia massima e coppia nominale T_{MAX}/T_n
- Rendimento in condizioni nominali η_n
- Fattore di potenza in condizioni nominali $\cos\varphi$

Si ricorda che in genere la **COPPIA MOTRICE** si indica con la lettera **T** dall'inglese **TORQUE**

Valori tipici del rapporto tra coppia massima e coppia nominale sono: $\frac{T_{MAX}}{T_n} = 1,6 \div 2,5$

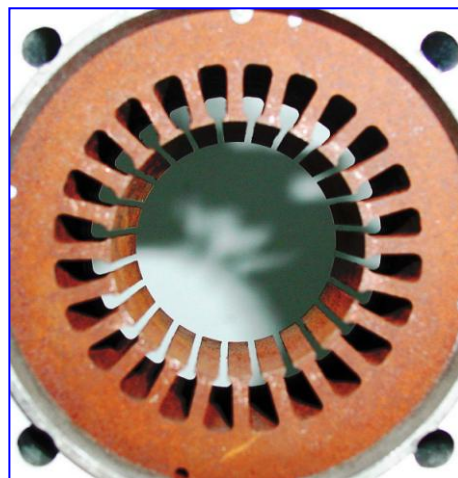
mentre il rapporto tra coppia di spunto e coppia nominale vale: $\frac{T_{sp}}{T_n} = 1 \div \frac{T_{MAX}}{T_n}$

Ricordiamo che la coppia nominale è definita come: $T_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{W}{\text{rad/s}} = \text{Nm}$

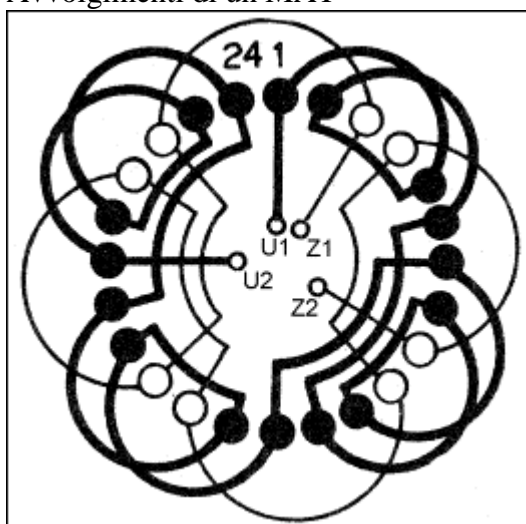
dove ω_n è la velocità angolare meccanica del rotore: $\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60}$

Valori tipici dello **scorrimento nominale** s_n sono (diminuisce all'aumentare della **potenza nominale** P_n):

| P_n [kW] | s_n |
|------------|-------------|
| 0,5 | 0,07÷0,10 |
| 1 | 0,06÷0,08 |
| 5 | 0,04÷0,05 |
| 25 | 0,03÷0,04 |
| 100 | 0,02÷0,03 |
| 500 | 0,015÷0,018 |

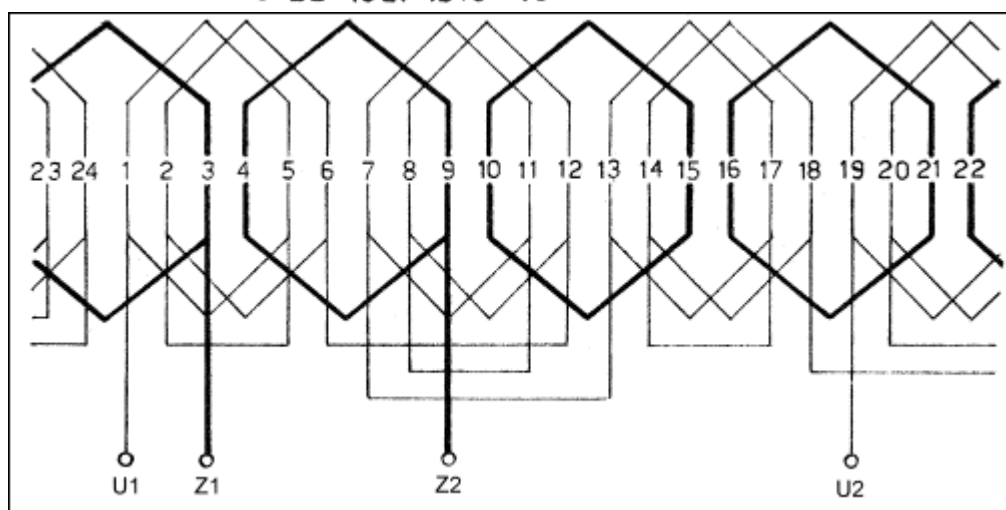


Esempio di come collegare i 3 Avvolgimenti di un MAT



U1 15-26-128-117-1317-1418-2420-2319 U2

Z1 322-1621-1510-49 Z2



Tipico esempio di avvolgimento (cilindro esterno statore) steso su un piano



Motore asincrono a gabbia di scoiattolo (notare che per far vedere la gabbia si è tolto la massa ferromagnetica dei lamierini che compongono la struttura del rotore).

