

GENERATORE ASINCRONO:

Se la velocità di rotazione del rotore è superiore alla velocità di sincronismo, S diventa negativa, la macchina immette potenza attiva in rete senza dover effettuare alcuna regolazione.

Aspetti negativi:

- Non possiamo effettuare nessuna regolazione sulla rete
- Deve essere collegato ad una rete dove è già imposta una tensione ed una frequenza dalle macchine sincrone, ovvero ha bisogno della rete per far stabilire al suo interno il CMR.

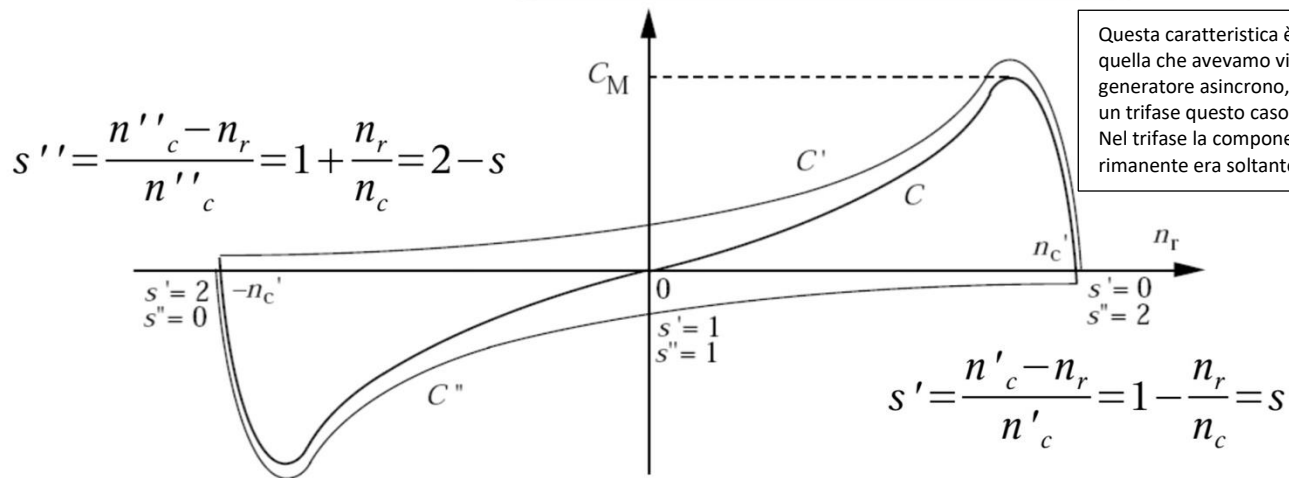
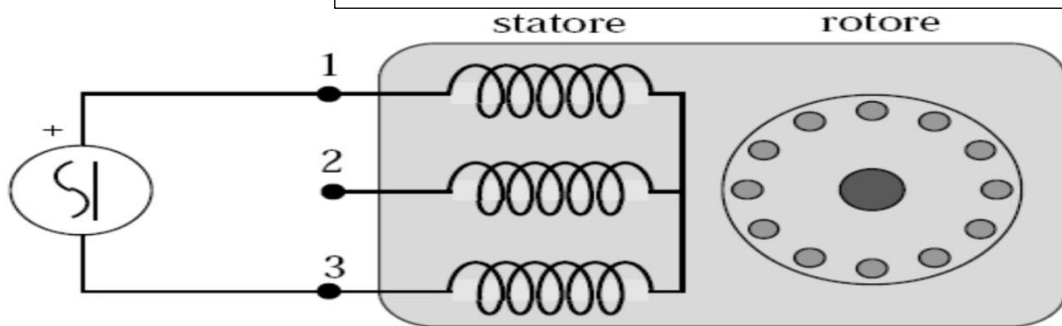
Aspetti positivi:

- Nel caso di un corto ai morsetti si azzerà l'eccitazione e la macchina non incorre in particolari problematiche.

Sono usati solo per basse potenze.

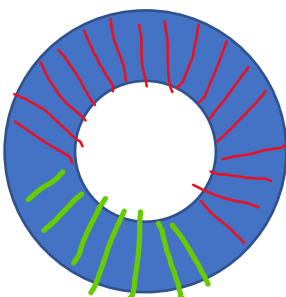
MOTORE ASINCRONO MONOFASE:

Questo è un motore trifase alimentato monofase, quindi di fatto è un monofase. Il cavo 2 può essere utilizzato in avviamento per collegare la macchina ad un condensatore ad esempio o a un reostato.



Per avvolgimenti monofase, abbiamo visto come al loro interno si generi un campo magnetico pulsante che avevamo decomposto in due campi magnetici controrotanti a ciascuno dei quali può essere associata una coppia elettromeccanica della macchina che sono qui rappresentate C' e C''; queste due coppie si compongono dando luogo alla coppia risultante C. Tale coppia risultante, notiamo come all'avviamento passi per lo 0 per cui non si avvierà mai spontaneamente si necessiterà quindi di un qualche sistema per avviare la macchina.

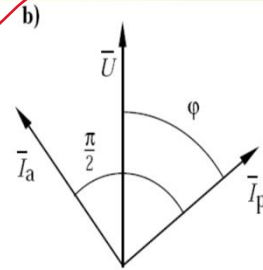
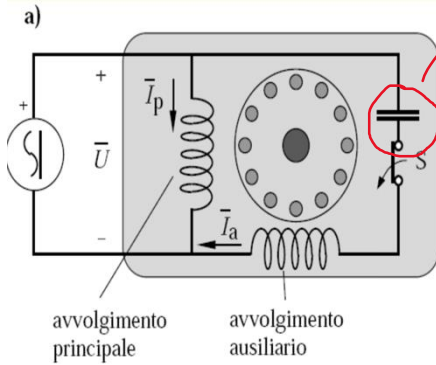
Potremmo disporre sullo statore della macchina due avvolgimenti, entrambi a passo diametrale, quello principale occuperà i 2/3 del pacco statorico, e quello ausiliario che occupa l' 1/3 restante:



Entrambi saranno alimentati dall'alimentazione di rete monofase, ma dobbiamo tramite questi due avvolgimenti riuscire a realizzare un avvolgimento bifase perché qualsiasi avvolgimento bifase è in grado di far stabilire all'interno della macchina un CMR.

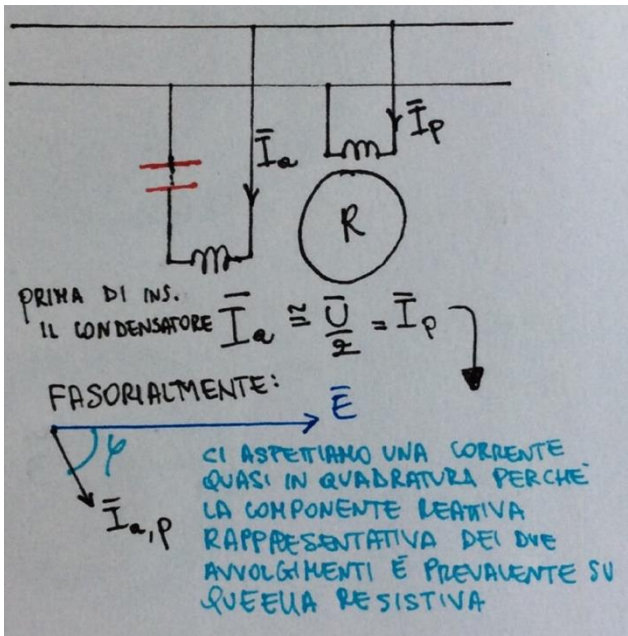
Questi due avvolgimenti sono a passo diametrale e tra loro i principi degli avvolgimenti formano un angolo di $\pi/2$ per cui la prima condizione di avvolgimento polifase è soddisfatta; la seconda è che le correnti devono essere sfasate di un angolo pari a $\pi/2$. (In realtà la cosa non è così rigorosa, ma è sufficiente che ci sia un adeguato sfasamento tra le due correnti per dar luogo al CMR quindi alla macchina di avviarsi spontaneamente.)

Avviamento con condensatore:



Mediante l'inserimento del condensatore, otteniamo lo sfasamento tra la corrente dell'avvolgimento principale e quello ausiliario necessari (e sufficiente) a creare un MCR.

Questi due avvolgimenti sono alimentati dalla stessa tensione in derivazione rispetto alla stessa linea (ovvero sono in parallelo)(prima di inserire il condensatore):



Se ora **inseriamo il condensatore**, cosa accade? L'angolo $\varphi(a) = \arctan(X/R)$ dopo l'inserimento del condensatore cambierà sull'avvolgimento secondario perché varierà certamente $X = X + X(c)$ così che $\varphi(b) = \arctan((X + X(c))/R)$ mentre resterà $\varphi(a)$ per l'avvolgimento primario. Variando $X(c)$ possiamo decidere l'angolo di sfasamento da imporre tra le due correnti.

Nota: si potrebbe ottenere la stessa cosa anche con un bipolo resistivo, in questo caso andremmo ad agire su R , tuttavia una scelta di questo tipo non è premiante perché si avrà solo una dissipazione che non produrrà nessun lavoro, ma da un punto di vista concettuale è la stessa cosa.

Stessa cosa potremmo fare con una reattanza di tipo induttivo. La scelta migliore resta però quella del condensatore perché questo collegato al nostro sistema ci consentirebbe anche di rifasare il carico.

Parametri costruttivi:

- **Tipo e modo di raffreddamento**
- **Livello di protezione**
- **Eventuali caratteristiche antideflagranti**
- **Numero delle fasi e collegamento**
- **Potenza nominale e tipo di servizio**
- **Tensione di alimentazione**
- **Perdite e rendimento**
- **Corrente nominale**
- **Fattore di potenza a corrente nominale**
- **Corrente a vuoto**

Lo smaltimento del calore è una cosa prioritaria in tutte le macchine.

No boom (esplosione)

Quello che varia sostanzialmente sono i parametri che caratterizzano (rispetto ai trasformatori!!) queste grandezze, e tramite questa tabella

| P_n [kW] | n_n [giri/min] | I_n [A] | $\frac{I_{avv}}{I_n}$ | $\cos\varphi_n$ | $P_{mecc} + P_{fe}$ % | i_0 % | P_{cu} % | V_{cc} % | C_n [Nm] | $\frac{C_{avv}}{C_n}$ | $\frac{C_{max}}{C_n}$ | % |
|---------------|---------------------|--------------|-----------------------|-----------------|--------------------------|------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------|-----------------------|----|
| 0,55 | 1400 | 1,5 | 5 | 0,8 | 20 | 75 | 20 | 20 | 3,7 | 2,3 | 1,7 | 71 |
| 1,1 | 1400 | 2,8 | 5 | 0,81 | 10 | 60 | 11 | 19 | 7,5 | 2 | 2,3 | 75 |
| 3 | 1410 | 7 | 6 | 0,83 | 7 | 50 | 15 | 18 | 20 | 2,3 | 2,5 | 80 |
| 11 | 2935 | 22,5 | 6,5 | 0,84 | 6 | 35 | 10 | 15 | 36 | 2 | 2,5 | 87 |
| 75 | 1480 | 142 | 6,3 | 0,86 | 2,6 | 28 | 4,3 | 17 | 485 | 2,4 | 2,4 | 93 |
| 200 | 1485 | 370 | 6,8 | 0,87 | 4 | 22 | 3,2 | 15 | 1300 | 2 | 2,5 | 93 |

Anche la tensione di cortocircuito è molto elevata, siamo passati dal 4/6% nei trasformatori al 15/20% del motore asincrono. Perché in questo caso bisogna far instaurare un CMR e non solo un flusso.

Notiamo anche come le perdite a vuoto si riducano sensibilmente solo per macchine molto potenti al contrario di quanto avevamo visto per il trasformatore, dove erano importanti ma non avevano questo peso.

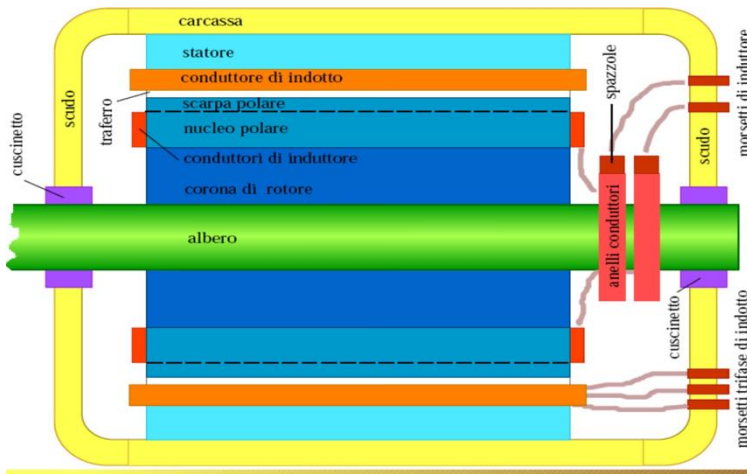
Anche la corrente percentuale a vuoto è molto elevata. Perché? Perché in queste macchine il traferro della macchina è molto più grande di quello di un trasformatore quindi per generare e mantenere il flusso di induzione magnetica occorre una corrente molto più elevata. Inoltre questa corrente oltre a bilanciare le perdite per isteresi e correnti parassite, serve anche a bilanciare anche le perdite meccaniche per attrito e ventilazione della macchina in rotazione.

Da questo parametro ci rendiamo conto come la corrente di avviamento sia molto più elevata di quella nominale. La protezione che andremo a collocare a monte della linea che deve alimentare questo motore, dovrà tener conto che allo spunto queste macchine assorbiranno una corrente molto più elevata. La protezione deve quindi essere scelta bene altrimenti un valore così alto di corrente potrebbe essere letto come un valore di guasto.

Da questi due parametri possiamo entro certi limiti prevedere l'andamento della curva coppia scorrimento. Il punto di funzionamento della macchina è molto spostato dalla coppia massima in particolare si trova molto più in basso nella curva.

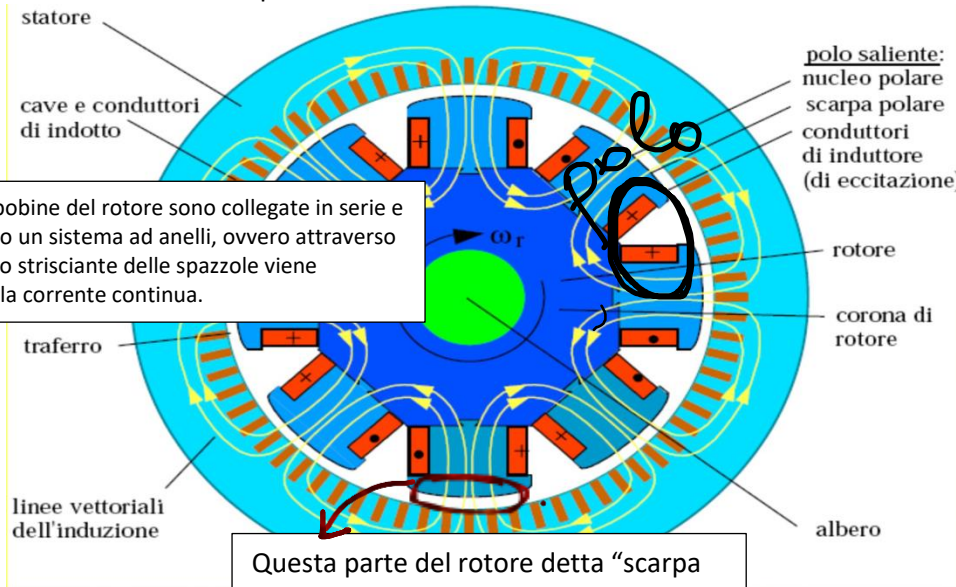
possiamo rendercene conto:

MACCHINE SINCRONE:



Da un punto di vista strutturale, lo statore, è molto simile a quello delle macchine asincrone. Il rotore al contrario può cambiare anche di molto. Le configurazioni più usate sono quelle del rotore a poli salienti e rotore liscio.

Vediamo un rotore a poli salienti:



Tutte le bobine del rotore sono collegate in serie e attraverso un sistema ad anelli, ovvero attraverso il contatto strisciante delle spazzole viene iniettata la corrente continua.

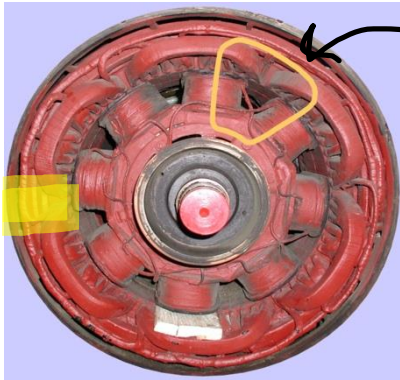
Il rotore invece cambia anche funzionalmente. Nelle macchine sincrone infatti questi è alimentato sempre in corrente continua, sia esso liscio o a poli salienti. Tale corrente serve a far stabilire a rotore fermo un campo di induzione magnetica quanto più sinusoidale possibile.

Questa parte del rotore detta "scarpa polare" è opportunamente sagomata per avere nel traferro un andamento quanto più possibile sinusoidale dell'induzione magnetica

In un rotore liscio, non essendo presente la scarpa polare, le cavità rotoriche non sono disposte equidistanti così da far istaurare comunque un CMR.

La macchina ha quindi bisogno della eccitatrice (dinamo) che serve a produrre la corrente continua necessaria all'eccitazione del circuito magnetico mediante il campo magnetico.

Stessa cosa potremmo vedere in un rotore di tipo liscio.



Questa immagine può essere interessante in quanto vi è rappresentata una linea di forza del campo di induzione magnetica.

Dati di targa di un motore sincrono
FUNZIONAMENTO ⊕ leggi dopo aver letto i quadratini.

Immaginiamo, una volta di aver prodotto l'eccitazione del l'avvolgimento rotorico mediante la

U(e) è la tensione con cui dobbiamo alimentare l'avvolgimento rotorico per far circolare la corrente di eccitazione I(e) che genera e sostiene il campo di induzione magnetica nel ferro della macchina

In questo caso il numero di giri è fissato una volta imposta la frequenza $n=60f/P$ e deve necessariamente essere così, infatti vedremo che se così non fosse non potrebbe avvenire la trasformazione energetica all'interno della macchina. Il numero di giri quando la macchina funziona come motore può essere regolato variando la frequenza mediante un inverter. Se funziona da generatore possiamo regolare il motore prima affinché ci dia un dato numero di giri per ottenere la frequenza desiderata.

Cosa si intende per corrente di indotto, la corrente dell'avvolgimento rotorico o statorico? "Indotto" sta per il luogo dove si ha la forza elettromotrice indotta; forza elettromotrice che viene indotta dal campo magnetico prodotto dall'avvolgimento rotorico eccitato in corrente continua. Per cui in questo caso l'avvolgimento rotorico è induttore, mentre quello statorico è l'avvolgimento indotto perché è in esso che si sviluppano le forze elettromotrici indotte.

Nota: potremmo quindi pensare che in un certo senso il funzionamento è il "contrario" di quello delle macchine asincrone, ma in realtà non è così. Potremmo infatti porre l'avvolgimento induttore sul pacco rotorico e quello indotto sul pacco statorico, non lo facciamo perché dovremmo scambiare una potenza molto elevata mediante un contatto strisciante. Al contrario, la corrente di eccitazione è abbastanza modesta quindi lo è anche la corrente da fornire in continua e possiamo permetterci di scambiarla con le spazzole. Le ragioni per cui non si fa questa inversione sono quindi "tecnologiche" concettualmente potremmo permetterci anche il contrario senza alterare il funzionamento

U_n Tensione nominale d'indotto [V]

I_n Corrente nominale d'indotto [A]

U_e Tensione di eccitazione [V]

I_e Corrente di eccitazione [A]

C_n Coppia nominale all'albero [N m]

n_n numero di giri [giri minuto]

f_n Frequenza nominale [Hz]

P_n Potenza nominale [VA o W]

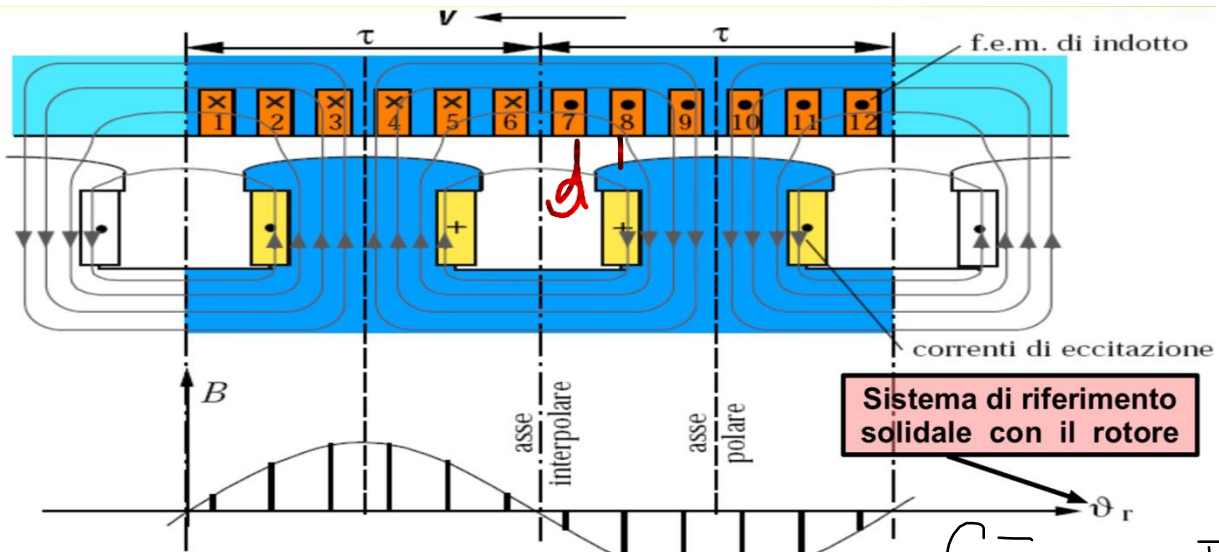
Generatori in VA $P_n = U_n I_n$
 $P_n = \sqrt{3} U_n I_n$

Motori in W $P_n = C_n 2 \frac{\pi}{60} n_n$

corrente I(e) che produce il campo di induzione magnetica, di mettere in rotazione attraverso l'azione di un motore primo il rotore che inizia a ruotare con una velocità angolare $\omega(r)$, cosa succede alla macchina?

Il campo magnetico prodotto dal rotore della macchina ruoterà in modo solidale con il rotore stesso.

Vediamo come varia l'induzione magnetica al traferro della macchina, ovvero cosa vede un osservatore solidale con una cava rotorica della macchina:



Facendo la circuitazione del campo magnetico intorno all'asse polare:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{ext}$$

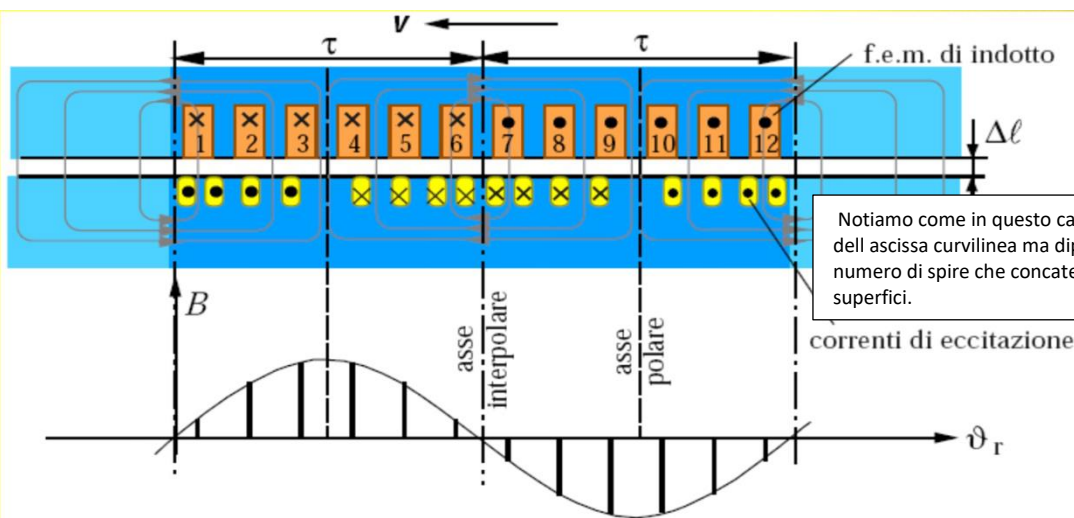
$2H$ viene dalla linea di andata e ritorno (della circuitazione), stessa cosa $2Ni$, il 2 viene dal fatto che abbiamo un conduttore di andata e uno di ritorno.

$$2Hd = 2 \frac{B}{\mu_0} d = 2N I_e \quad B(\vartheta_r) = \frac{\mu_0 N_e I_e}{d(\vartheta_r)}$$

Una oscillazione sinusoidale ogni 2τ ($=2\pi/p$) e p oscillazioni complete lungo il traferro (2π).

$N(e)$ è il numero delle spire che si concatenano con la linea chiusa che stiamo considerando. D è la distanza tra il rotore e lo statore che varia in funzione dell'ascissa curvilinea θ perché la coppia di formazione della scarpa rotorica non è regolare. (non è ricordiamo per riuscire ad ottenere un campo di induzione magnetica il più sinusoidale possibile)

Nel caso di



Rotore a poli lisci

Notiamo come in questo caso d non sia più funzione dell'ascissa curvilinea ma dipende comunque dal numero di spire che concateniamo aumentando le superfici.

simboli di f.e.m. e correnti : \times = entranti positive; \bullet = uscenti positive

$$2H \Delta l = 2 \frac{B}{\mu_0} \Delta l = 2N I_e \quad B(\vartheta_r) = \frac{\mu_0 N_e I_e}{\Delta l}$$

Una oscillazione sinusoidale ogni 2τ ($=2\pi/p$) e p oscillazioni complete lungo il traferro (2π).

Abbiamo verificato che l'andamento di tipo sinusoidale del campo di induzione magnetica al traferro della macchina:

$$B(\vartheta_r) = B_M \sin(p \vartheta_r)$$

Nell'espressione compare il P perché l'angolo elettrico è diverso da quello meccanico e dipende dal numero delle coppie poli della macchina.

Mettiamoci ora solidali su una cava statorica. Cosa vediamo quando mettiamo in rotazione il rotore? Il campo magnetico formato da un certo numero di alternanze nord sud, ovvero un certo numero di sinusoidi, inizierà a muoversi (sempre in maniera solidale al rotore) e ai nostri occhi passerà un campo di induzione magnetica che varierà con legge sinusoidale ed avrà "tante gobbe" quante sono le coppie polari della macchina. Come esprimiamo questo analiticamente? Sostituiamo all'angolo meccanico l'angolo elettrico e teniamo conto della rotazione del rotore; sullo statore alla generica ascissa curvilinea $\theta(S)$ in funzione del tempo vedremo un campo di induzione magnetica che vai con legge

Rispetto ad un sistema di riferimento solidale con lo statore, introdotta la ascissa curvilinea ϑ_s , e considerando la velocità angolare di rotazione del rotore, ω_r , si ha $\vartheta_s = \vartheta_r + \omega_r t$ da cui $\vartheta_r = \vartheta_s - \omega_r t$ e quindi

$$B(\vartheta_s, t) = B_M \sin(p(\vartheta_s - \omega_r t)) \quad \text{Indotta da C.M.}$$

La f.e.m. indotta nel conduttore posto nella posizione angolare ϑ_s è

$$E = l v \times B$$

$$e_c(\vartheta_s, t) = l v B_M \sin(p(\vartheta_s - \omega_r t)) = E_{cM} \sin(p(\vartheta_s - \omega_r t))$$

ponendo

Utilizzo questa formula e non la derivata del flusso rispetto al tempo perché la responsabile di variazione del flusso non è la rotazione del rotore ma il fatto che l'andamento del campo al traferro è sinusoidale

$$\vartheta = p \vartheta_s \quad (\text{angolo elettrico}) \quad \text{e} \quad \omega = p \omega_r \quad (\text{pulsazione elettrica})$$

si ottiene

$$e_c(\vartheta, t) = -E_{cM} \sin(\omega t - \vartheta) \quad \text{con} \quad E_c = 2k_f \Phi f \quad \text{e} \quad \Phi = \tau l B_m$$

$$f = \frac{pn}{60} \quad n = \frac{60f}{p}$$

| | | | | | |
|-------------|------|------|------|-----|-----|
| p = | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| a 50 Hz n = | 3000 | 1500 | 1000 | 750 | 600 |

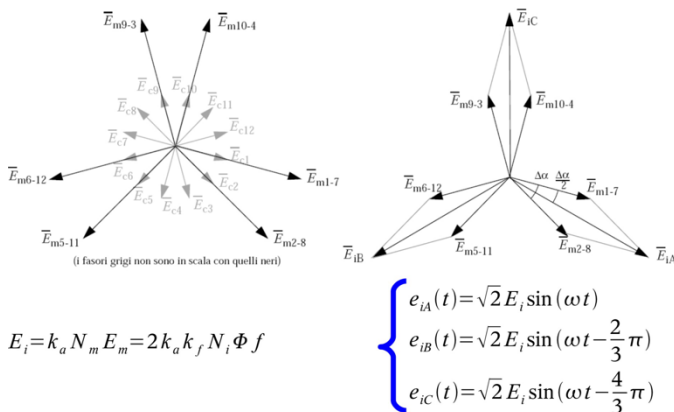
Notiamo quindi come nella macchina asincrona il CMR era ottenuto disponendo in maniera opportuna l'avvolgimento statorico (con l'opportuna alimentazione). Qui il CMR è ottenuto per rotazione fisica dell'avvolgimento che lo produce. Sul pacco statorico però l'effetto prodotto è lo stesso.

La velocità in questa espressione è quella con cui varia la sinusoidale che ricavo da $T=2\pi\omega$

Il conduttore statorico viene quindi spazzolato da un campo magnetico variabile che indurrà una forza elettromotrice anch'essa variabile con la stessa legge con cui varia l'induzione magnetica. In particolare le due grandezze saranno legate dalla legge $E = l v \times B$. Dove possiamo togliere il prodotto vettoriale essendo i due vettori perpendicolari (campo magnetico radiale, velocità tangenziale).

Variando il conduttore su cui "ci sediamo", avremo una certa forza elettromotrice che lungo l'ascissa curvilinea sarà leggermente sfasata rispetto la precedente e la successiva; collegando tutte le matasse avremo una forza elettromotrice risultante.

Se l'avvolgimento statorico fosse trifase, per come questo è disposto, sull'avvolgimento ci ritroveremo una terna di forze elettromotrici anch'esse rappresentative di un sistema trifase di tensioni. Tra i morsetti delle tre fasi dell'avvolgimento statorico ci troveremo queste tre forze elettromotrici:



Le tre tensioni saranno quindi uguali in modulo ma mutuamente sfasate di 120 gradi.

Caratteristica di funzionamento a vuoto della macchina:

Immaginiamo di chiudere l'avvolgimento trifase statorico su di un carico (elettrico):

Come abbiamo già detto ai morsetti dell'avvolgimento statorico arriverà una terna di forze elettromotrici

che costituisce un sistema trifase. Immaginiamo di collegarvi delle resistenze (collegiamo il carico):

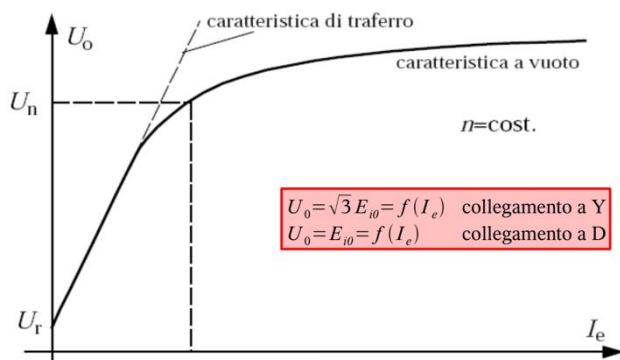
Sull'avvolgimento statorico comincerà a scorrere una corrente (richiamata dal carico collegato e dovuta alle forze elettromotrici indotte legate alla rotazione del campo magnetico all'interno della macchina):

Tale corrente introduce una "complicazione molto seria", infatti sullo statore scorrono delle correnti che costituiscono un sistema trifase e che produrranno un CMR (ricorda zio Galileo Ferraris) che si andrà a

combinare con quello prodotto dal rotore della macchina. Chiudendo sul carico ci troveremo

simultaneamente l'azione del CMR prodotto dal rotore (CMR induttore) e il CMR prodotto dallo statore che prende il nome di REAZIONE DI INDOTTO.

Quando alimentiamo un carico, possono presentarsi 4 situazioni limite relative all'angolo di sfasamento che



Rappresenta come varia la tensione ai morsetti statorici al variare della corrente di eccitazione. Infatti variano la corrente di eccitazione, varia l'induzione magnetica al traferro, quindi il valore della fem indotta negli avvolgimenti statorici. Man mano che aumenta la corrente di eccitazione, emerge il comportamento non lineare del materiale ferromagnetico e arriveremo alla saturazione quindi al ginocchio nella curva. Una condizione di funzionamento dopo il ginocchio ha poco senso perché i benefici di tensioni rispetto alla corrente spesa non sono assolutamente giustificati.

si forma tra la corrente e la tensione disponibile ai morsetti della macchina (casi limite che sono duali alla tipologia di carico che collegiamo, resistivo, generatore, condensatore, induttore.

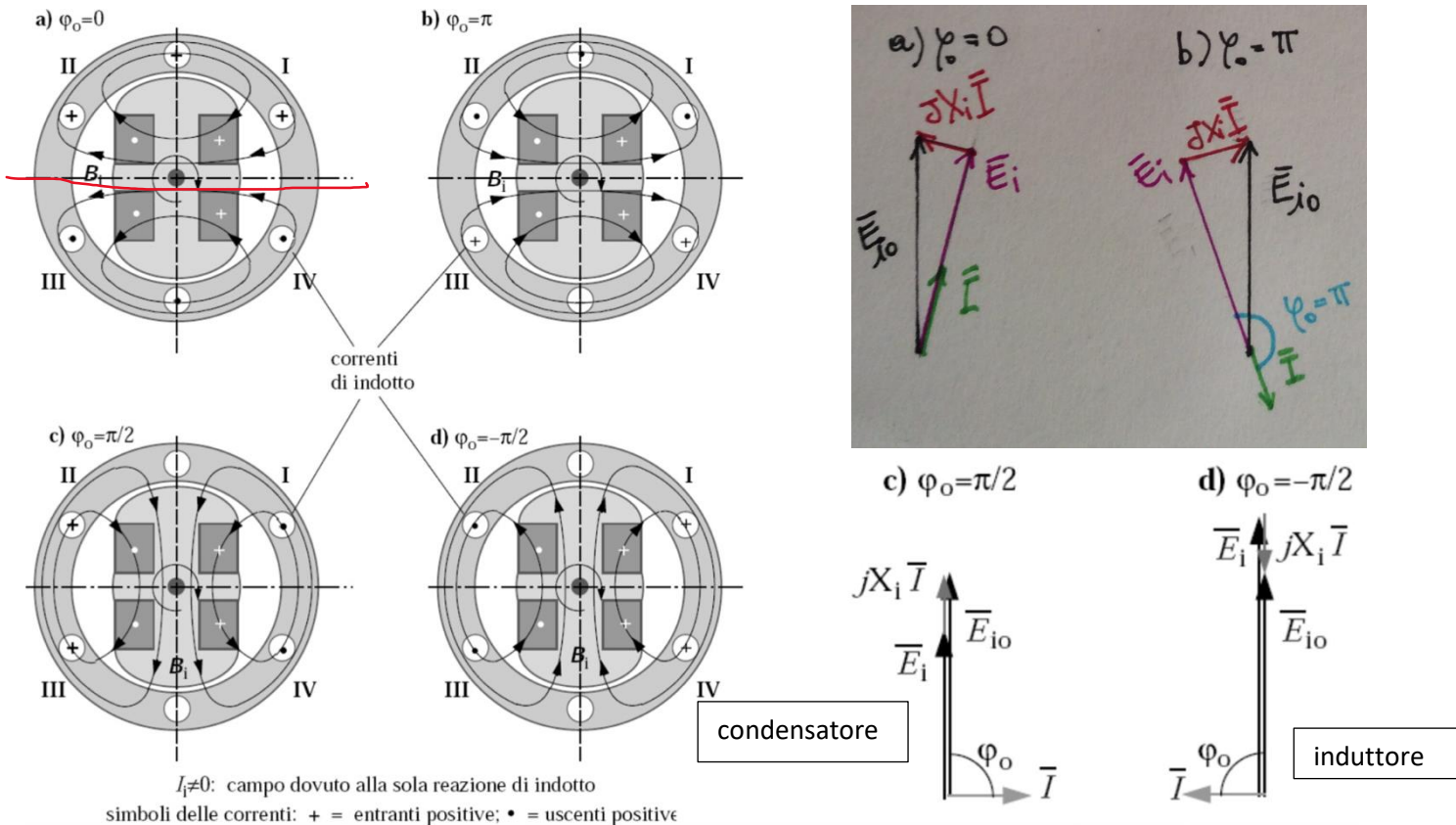
L'effetto del passaggio della corrente sul pacco statorico (quindi l'effetto della reazione di indotto) sul CMR prodotto dall'avvolgimento rotorico, si dimostra che può essere espresso proporzionalmente ad una reattanza $X(i)$ così da poter scrivere l'equazione che regola il comportamento dello statore ovvero possiamo calcolare la forza elettromotrice indotta nell'avvolgimento statorico per azione del campo induttore e della reazione di indotto, può essere espressa mediante questa equazione:

$$\bar{E}_i = \bar{E}_{i0} - j X_i \bar{I}$$

Questa relazione ci dice che la forza elettromotrice che tiene conto della reazione di indotto è uguale alla forza elettromotrice prodotta dal campo magnetico rotorico meno $jX(i)I$, dove I è la corrente che passa nell'avvolgimento statorico è $X(i)$ il coefficiente di proporzionalità rappresentabile come una reattanza che tiene conto dell'effetto della reazione di indotto.

Ei rappresenta la fem indotta quando chiudo sul carico, quindi quando comincia a scorrere corrente negli avvolgimenti trifase che generano la reazione di indotto. E_{i0} e la fem indotta sullo statore a vuoto.

Vista questa relazione possiamo rappresentare anche fasorialmente i casi limite di funzionamento a carico:



Nel caso a) $\varphi_0=0$, dal diagramma fasoriale riscontriamo un risultato fisico:

La forza elettromotrice risultante dovuta dal campo induttore e dalla reazione di indotto è leggermente più piccola della forza elettromotrice indotta a vuoto.

- a) Corrente in fase con $E(i)$, carico puramente resistivo, l'avvolgimento indotto (statorico) produce un campo il cui asse polare è questo ed è ortogonale all'asse polare del campo magnetico rotorico. Per costruire il diagramma, sappiamo che B, φ ed I sono proporzionali e in fase; se è vero questo B sarebbe in quadratura rispetto ad E_i perché $E = -d\phi/dt$ ovvero E è legata al flusso dell'induzione magnetica prodotta dal rotore; analogamente se. Sono in quadratura lo saranno anche i loro flussi per cui possiamo disporre la componente che rappresenta il flusso della reazione di indotto ortogonale ad E_i (nota quanto scritto sopra è scritto un po' male, comunque per disegnare i diagrammi fasoriali basta usare la relazione tra tensione a vuoto e a carico mediante la reazione di indotto che sta alla pagina sopra). La reazione in questo caso viene detta trasversa e sarà importante perché come vedremo associata alla conversione energetica.

- c), d) la corrente è in quadratura in anticipo/ritardo rispetto ad E_i . Se la corrente è in ritardo rispetto alla forza elettromotrice indotta, questa sarà minore della forza elettromotrice a vuoto, per cui l'effetto della reazione di indotto è smagnetizzante, ovvero abbassa il campo induzione magnetico. Nel caso opposto l'effetto è invece magnetizzante ovvero la reazione di indotto si somma al campo magnetico rotorico e produce un campo magnetico anche molto più intenso.

NOTA: non si crea uno slittamento tra i due campi magnetici, ovvero non deve variare la velocità di rotazione del rotore quando colleghiamo il carico ed agisce anche la reazione di indotto?

(Tra le nostre ipotesi c'era quella che la velocità del rotore fosse costante pari a $\omega(r)$. Per cui fatta questa ipotesi avremmo già risposto alla domanda) (il campo ruota grazie al motore primo).

Effettivamente, se chiudiamo su un carico, l'effetto sulla macchina sarà magnetizzante o smagnetizzante anche se la macchina è libera di ruotare la velocità non cambierà perché se la corrente è in quadratura con la tensione, stiamo scambiando solo potenza reattiva (scambio di potenza a valore medio nullo) e non attiva. Se però scambiamo potenza attiva, chi la fornirà? Il motore primo. Se la macchina fosse libera la macchina rallenterebbe perché dovrebbe usare parte della sua energia cinetica

per bilanciare l'incremento di potenza attiva richiesta; come conseguenza quindi varierebbe certamente anche la frequenza. Sui generatori sincroni nella pratica è però presente un regolatore di velocità che apre il motore primo per sopperire alle richieste; ci sarà sicuramente anche un breve transitorio, ma nelle due condizioni di funzionamento saremo sempre a frequenza costante e potremmo sempre rappresentare le grandezze di interesse.

PAG 227/30 liceto

Perché macchina SINCRONA? Immaginiamo che l'avvolgimento statorico sia alimentato da una certa frequenza diversa da quella che deriverebbe dall'avvolgimento rotorico, cosa accade?

Se le frequenze sono diverse significa che la velocità con cui si sposta la polarità nord sud statorico è diversa da quella con cui si sposta la polarità nord sud rotorica per cui in alcuni frangenti la forza tangenziale è oppositiva in altri favorevole, per cui si avranno continue accelerazioni e decelerazioni che dipendono dalla differenza di frequenza che porteranno comunque a rottura la macchina.