



La macchina elettrica sincrona (1° parte): aspetti costruttivi del rotore e reazione di indotto

Lucia FROSINI

Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione,
Università di Pavia
E-mail: lucia@unipv.it

1

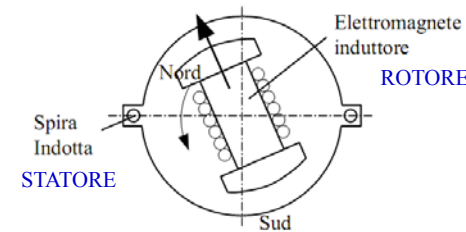
L. Frosini

Macchina elettrica sincrona

I principi alla base del funzionamento della macchina sincrona sono quelli del campo magnetico rotante e dell'induzione magnetica: se il flusso concatenato con un avvolgimento è variabile, in esso viene indotta una forza elettromotrice.

Nella macchina sincrona questa variazione di flusso è realizzata facendo ruotare, internamente all'avvolgimento di indotto (statore), un elettromagnete eccitato in corrente continua.

Lo schema per una macchina a due poli è, in linea di principio*, il seguente:



*ricordiamo infatti che, in realtà, il rotore di un alternatore a due poli è sempre di tipo isotropo e non a poli salienti.

2

L. Frosini

Macchina elettrica sincrona

In generale, se il rotore è dotato di p_p paia poli, ad un giro completo del rotore corrispondono p_p alternanze complete del flusso concatenato con una bobina e, corrispondentemente, p_p alternanze complete della f.e.m. indotta negli avvolgimenti di statore.

Quindi, la frequenza della f.e.m. indotta di statore è strettamente legata alla velocità di rotazione e al numero di coppie polari dell'elettromagnete induttore (rotore).

La relazione tra la pulsazione ω della f.e.m. indotta di statore, la velocità di rotazione ω_r del rotore e il numero di paia poli p_p è:

$$\omega = p_p \omega_r$$

A parità di frequenza generata, la velocità di rotazione con cui trascinare il rotore della macchina è tanto minore quanto più elevato è il numero di coppie polari p_p .

3

L. Frosini

Macchina elettrica sincrona

Nelle macchine sincrone, lo statore è dotato di un avvolgimento trifase analogo a quello dei motori asincroni, ossia in grado di generare un campo magnetico rotante.

La f.e.m. indotta in ciascuna delle tre fasi dell'avvolgimento di statore contiene sempre armoniche dispari, perché l'induzione al traferro non è mai perfettamente sinusoidale.

Nei sistemi trifase, la terza armonica (e le armoniche di ordine multiplo dispari di tre) sono in fase tra loro: dalla differenza vettoriale di due tensioni di fase risulta una differenza tra le armoniche di questi ordini, che quindi vengono eliminate nella tensione concatenata.

Pertanto, generalmente per un generatore sincrono risulta più utile il collegamento a stella, perché la tensione concatenata risulta priva della 3° e 9° armonica.

Le altre armoniche possono essere attenuate con gli avvolgimenti (di statore) a passo raccorciato.

4

Macchina elettrica sincrona

Col collegamento a stella, ciascuna fase dovrà avere un numero di spire tale da generare una tensione pari a quella concatenata divisa per $\sqrt{3}$, mentre la sezione dei conduttori dovrà essere proporzionata alla corrente di linea nominale.

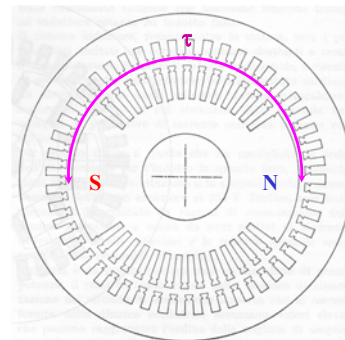
Mentre l'avvolgimento di statore di una macchina sincrona è analogo a quello di una macchina asincrona, molto diverso è invece quello di rotore, che è alimentato in corrente continua. Nell'applicazione della macchina sincrona come generatore, l'avvolgimento di rotore può presentarsi sotto forma di:

- ➡ distribuito "concentrato" nelle cave ➔ rotore liscio (isotropo);
- ➡ concentrato attorno ai poli salienti ➔ rotore a poli salienti.

In entrambi i casi, la disposizione del circuito di rotore è tale da ottenere una distribuzione spaziale approssimativamente sinusoidale al traferro della f.m.m. e quindi del flusso.

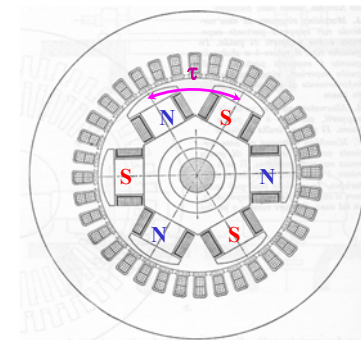
Esempi di rotore della macchina sincrona

Macchina sincrona con avvolgimento di induttore (rotore) **distribuito** "concentrato" nelle cave ($p_p = 1$ o 2):



$p_p = 1 \Rightarrow n^\circ \text{ poli } p = 2$
 $n^\circ \text{ cave di statore } Q = 48$
 $n^\circ \text{ fasi } m = 3$
 $n^\circ \text{ cave di statore per polo per fase } q = 8$

Macchina sincrona con avvolgimento di induttore (rotore) **concentrato** attorno ai poli salienti ($p_p \geq 2$):

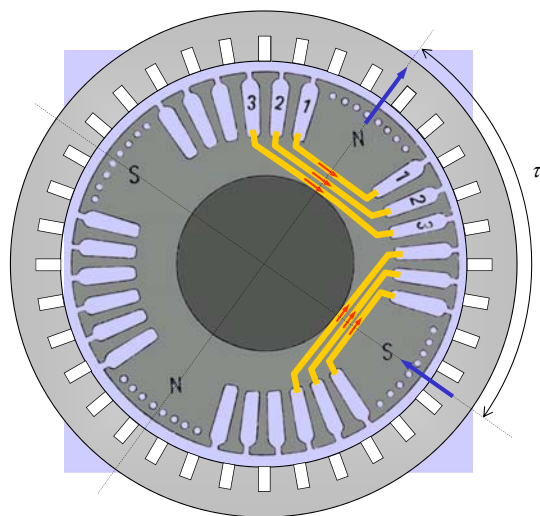


$p_p = 3 \Rightarrow n^\circ \text{ poli } p = 6$
 $n^\circ \text{ cave di statore } Q = 36$
 $n^\circ \text{ fasi } m = 3$
 $n^\circ \text{ cave di statore per polo per fase } q = 2$

Rotore liscio (isotropo)

Nel rotore isotropo gli avvolgimenti sono ripartiti in cave radiali e realizzati in bobine concentriche collegate in serie sotto ciascun polo.

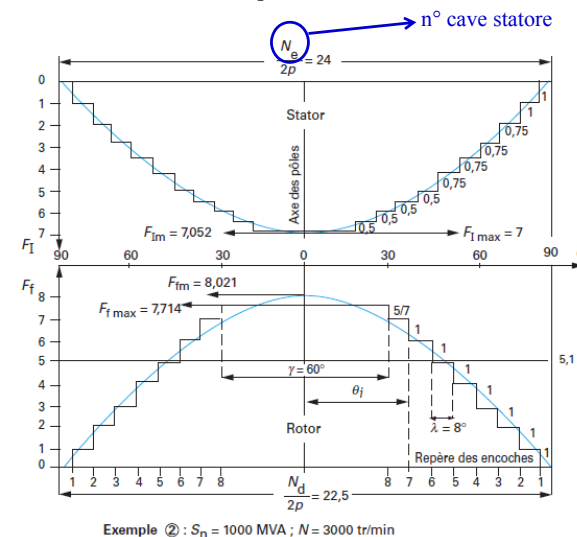
Per ottenere al traferro una distribuzione spaziale dell'induzione più sinusoidale possibile, la ripartizione delle cave è simmetrica rispetto all'asse polare e la parte centrale di ciascun polo non presenta cave. Inoltre, la profondità delle cave vicine all'asse polare può essere ridotta rispetto alle altre.



Rotore liscio (isotropo)

La f.m.m. prodotta dal rotore isotropo ha una forma a scalini, simmetrica rispetto all'asse di ciascun polo, e comprende solo armoniche dispari.

In figura sono rappresentate le distribuzioni spaziali sotto un polo delle f.m.m. di statore e di rotore (e le loro componenti fondamentali in azzurro) per una macchina a due poli.

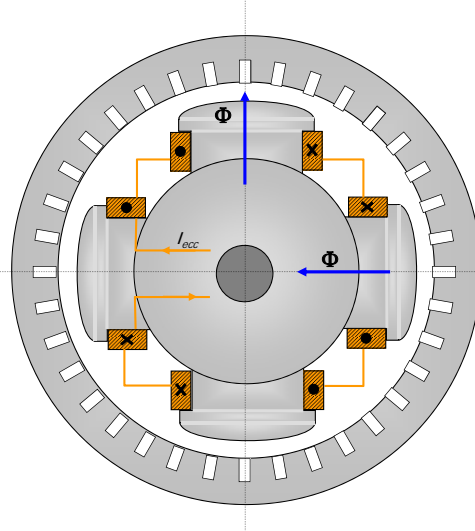


Exemple ② : $S_n = 1000 \text{ MVA}$; $N = 3000 \text{ tr/min}$

N_d è il n° di divisioni di rotore, ossia il n° di cave di rotore che si avrebbero se le cave occupassero tutta la circonferenza ($N_d = 2\pi/\text{passo cava effettivo}$).

Rotore a poli salienti

Nel rotore a poli salienti, è la forma sagomata dell'espansione polare che produce la distribuzione sinusoidale dell'induzione al traferro (la f.m.m. prodotta dagli avvolgimenti di eccitazione di rotore è circa rettangolare).



Sebbene la forma d'onda dell'induzione al traferro contenga diverse armoniche, è possibile ottenere una forma d'onda di f.e.m. di statore prossima alla sinusoidale grazie alla particolare disposizione dell'avvolgimento di statore (ad es. col passo racciato, più comune, o con le cave frazionarie, più raro).

Rotore a poli salienti

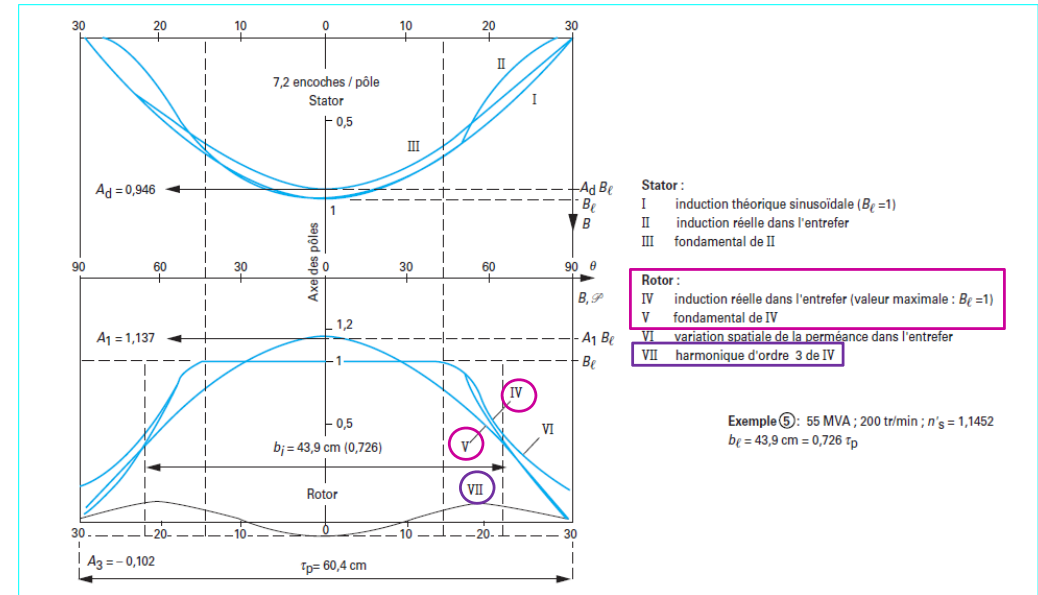


Figure 10 - Machine à pôles saillants : représentation spatiale sous un pôle des fmm stator et rotor.

F.e.m. indotta

Il passo polare τ è la lunghezza della circonferenza al traferro sotto cui è compreso un polo. Detto D il diametro della circonferenza al traferro, p il numero di poli e p_p il numero di paia poli, si ha:

$$\tau = \frac{\pi D}{p} = \frac{\pi D}{2 p_p}$$

Di conseguenza, si può definire la velocità periferica del rotore v come:

$$v = \omega_r \cdot \frac{D}{2} = \frac{\omega}{p_p} \cdot \frac{D}{2} = \frac{2\pi f}{p_p} \cdot \frac{D}{2} = \frac{\pi D}{p_p} \cdot f \quad \Rightarrow \quad v = 2\tau f$$

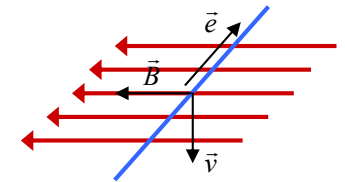
Iniziamo col considerare, per semplicità, il rotore a poli salienti e vediamo come si inducono le tensioni negli avvolgimenti di statore.

F.e.m. indotta

Il principio è dato dalla legge di Faraday, ossia in un conduttore che si muove in un campo magnetico si induce una f.e.m:

$$\vec{e} = \vec{v} \wedge \vec{B} \cdot l$$

$$e = B \cdot l \cdot v$$



dove l è la lunghezza della “parte attiva” del conduttore di statore (all’interno della cava), v è la velocità periferica del rotore e B l’induzione magnetica al traferro prodotta dal rotore. Si noti che v è anche la velocità relativa del conduttore di statore rispetto al flusso magnetico prodotto dal rotore.

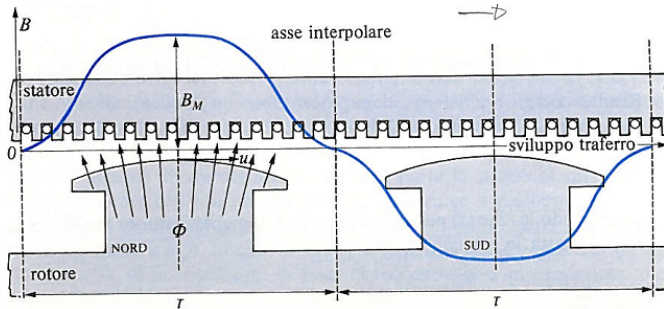
Essendo l e v grandezze costanti, la tensione indotta in ciascun conduttore varierà nel tempo con la stessa legge con cui varia B .

L’induzione B in un punto qualsiasi del traferro varia nel tempo con la stessa legge con cui l’induzione risulta distribuita lungo il traferro stesso.

F.e.m. indotta

Questa distribuzione è di tipo sinusoidale, più o meno distorta, ma in ogni caso è sempre alternata, nulla in corrispondenza degli assi interpolarari e massima in corrispondenza degli assi dei poli.

La distribuzione di B è influenzata dalla forma e dall'ampiezza delle espansioni polari, ma anche dall'ampiezza del traferro e dal grado di saturazione dei denti di statore.



13

F.e.m. indotta

Quindi ci aspettiamo che anche l'andamento nel tempo della tensione indotta in ciascun conduttore sia di tipo sinusoidale.

Il valore medio in un semiperiodo della tensione indotta in un conduttore sarà dato da:

$$e_m = B_m \cdot l \cdot v$$

dove B_m indica il valore medio dell'induzione all'interno di un passo polare τ .

Il valore di B_m può essere ricavato dalla relazione che esprime il flusso magnetico Φ uscente da (o entrante in) un polo come valore medio dell'induzione moltiplicato per la superficie attraversata (che ha larghezza τ e lunghezza l):

$$\Phi = B_m \cdot l \cdot \tau \quad \Rightarrow \quad B_m = \frac{\Phi}{l \cdot \tau}$$

14

F.e.m. indotta

Sostituendo le espressioni trovate per v e B_m nella relazione che fornisce il valore medio della tensione indotta in un conduttore, si ottiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} v = 2\tau f \\ B_m = \frac{\Phi}{l \cdot \tau} \end{array} \right. \Rightarrow e_m = \frac{\Phi}{l \cdot \tau} \cdot l \cdot 2\tau f = 2\Phi f$$

Il valore efficace della tensione indotta in un conduttore, se questa si può ritenere sinusoidale, sarà:

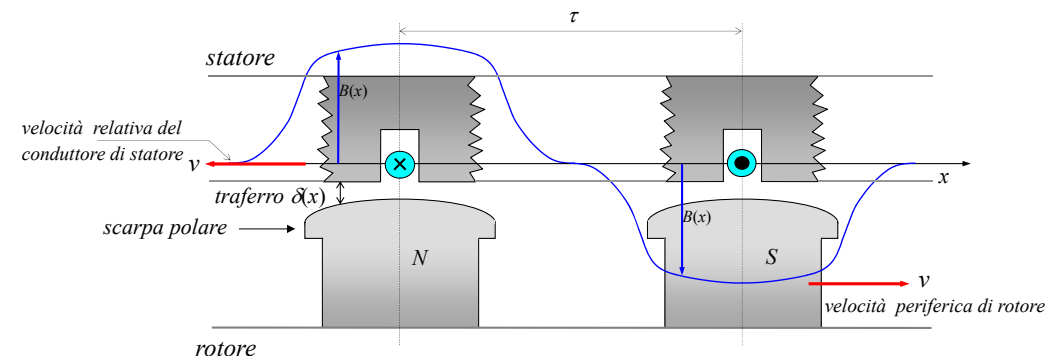
$$E = k_f \cdot e_m = 2k_f \Phi f = 2 \cdot 1,11 \cdot \Phi f \quad k_f = \text{fattore di forma} = 1,11 \text{ se sinusoidale}$$

Pertanto, in ciascuna fase di statore, costituita da N_1 conduttori, sarà indotta la seguente f.e.m. (valore efficace) a vuoto: $E_0 = K_1 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_{ecc}$

dove: $K_1 = 2k_f f_{d1} f_{p1}$, come già visto per l'avvolgimento di un asincrono.

15

F.e.m. indotta

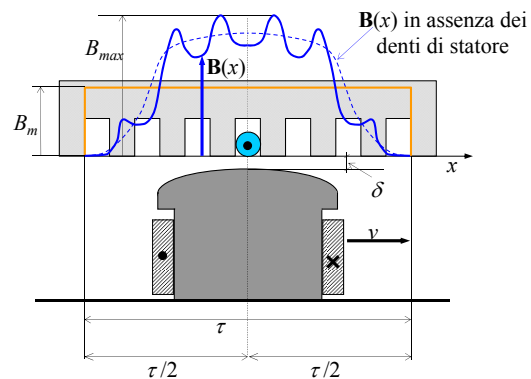


$$e(t) = B(x)lv$$

Nota: nel caso di rotore a poli salienti, l'andamento dell'induzione al traferro $B(x)$ dipende essenzialmente dall'andamento del traferro $\delta(x)$.

16

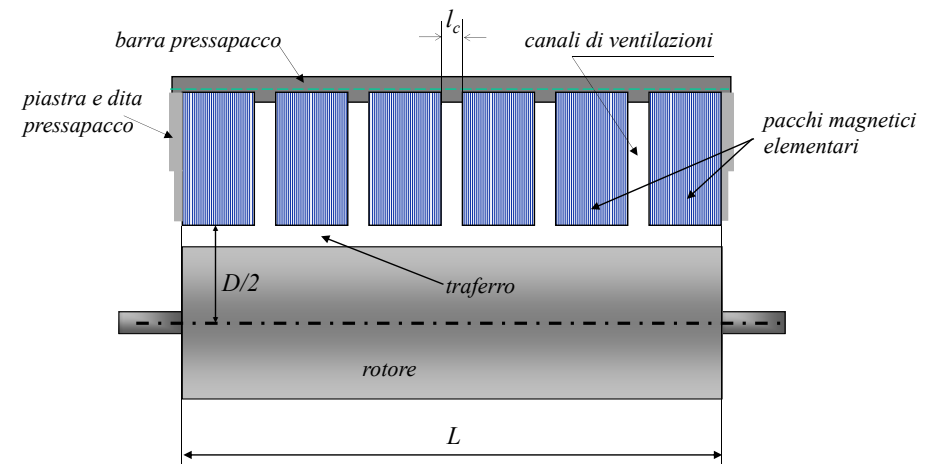
Distorsioni del campo magnetico



17

Distorsioni del campo magnetico

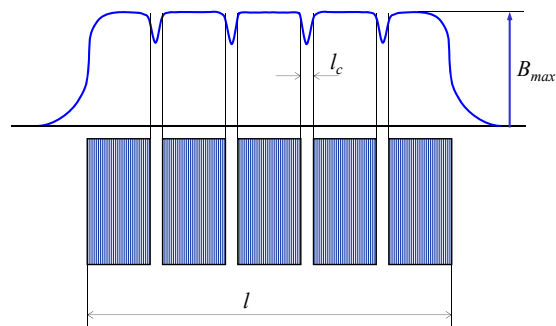
Canali di ventilazione nel pacco statorico



18

Distorsioni del campo magnetico

Per la presenza dei canali di ventilazione e della distorsione del campo da essi prodotta:



19

Rotore della macchina sincrona

Sia nella versione isotropa che in quella anisotropa, generalmente il rotore è costruito in forma massiccia, in quanto il campo magnetico nel rotore è costante nel tempo e non sono presenti fenomeni di correnti parassite.

Nelle macchine a poli salienti, possono essere laminate le espansioni polari, che sono sottoposte a perturbazioni del campo magnetico dovute alla presenza delle cave di statore. In questo caso, i lamierini hanno uno spessore compreso tra 1 e 2,5 mm e non sono isolati tra loro, se non attraverso l'ossidazione naturale dei lamierini stessi.

Inoltre, nelle macchine a poli salienti con elevato numero di poli, è possibile avere anche giogo e poli formati da lamierini magnetici.

20

Rotore liscio (isotropo)

Nelle macchine a rotore liscio, il rotore presenta sezione circolare e il traferro è praticamente costante in tutte le direzioni.

In questa configurazione il numero di polarità realizzabile è molto basso ($p_p = 1$ o 2) e la velocità di rotazione necessaria a produrre f.e.m. a 50 Hz è di conseguenza elevata (3000 rpm e 1500 rpm). A 60 Hz naturalmente si hanno velocità maggiori: 3600 rpm e 1800 rpm.

Questi generatori sono destinati ad essere alimentati attraverso motori primi veloci, come turbine a vapore/gas, da cui il loro nome di turbo-alternatori, e permettono di ottenere le potenze più elevate, fino a 1500-2000 MVA (le potenze maggiori si raggiungono solo con i 4 poli, altrimenti sarebbe troppo elevata la velocità periferica).

Data l'alta velocità di rotazione, i rotori dei turbo-alternatori assumono forma allungata e relativamente poco sviluppata nel senso radiale per contenere le forze centrifughe che si esercitano sui conduttori del circuito di eccitazione.

21

Rotore liscio (isotropo)

Il diametro di rotore è solitamente limitato a:

- 1,2 m per gli alternatori a 3000 rpm (0,8÷0,9 m per potenze fino a 100 MVA);
- 1,95 per gli alternatori a 1500 rpm (per centrali nucleari).

La lunghezza di un alternatore da 400 MVA è di circa 5,5 m.

Per i turbo-alternatori, il traferro assume valori attorno a 30÷40 mm nelle macchine da 40÷80 MVA, 60 mm circa per potenze da 200÷300 MVA, per salire a 90÷100 mm per potenze più elevate. L'induzione al traferro è intorno a 1 T.

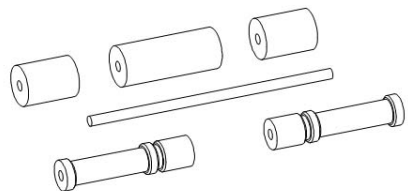
Fino a potenze almeno di 600 MVA, il rotore è un pezzo monoblocco (“fucinato”) in acciaio, forgiato al cromo, con una leggera percentuale di nickel e molibdeno.

Per potenze da 900 a 1300 MVA (centrali nucleari), è possibile conservare la forma di fucinato monoblocco, malgrado il numero limitato di aziende al mondo in grado di produrre pezzi interi di più di 180 t.

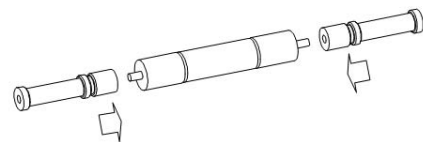
22

Rotore liscio (isotropo)

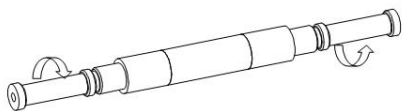
Esiste anche la soluzione poli-blocco (raramente usata):



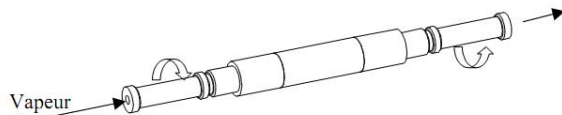
Etape 1 : vue d'ensemble des pièces du rotor Polybloc



Etape 2 : assemblage des pièces



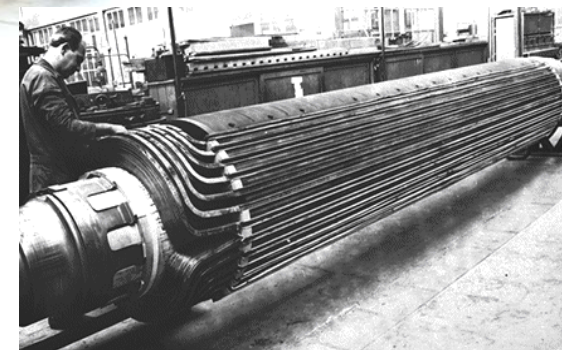
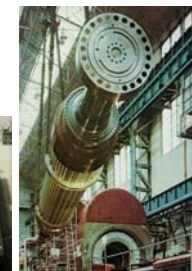
Etape 3 : serrage à froid



Etape 4 : réchauffement à la vapeur et resserrage final

23

Rotore liscio (isotropo)

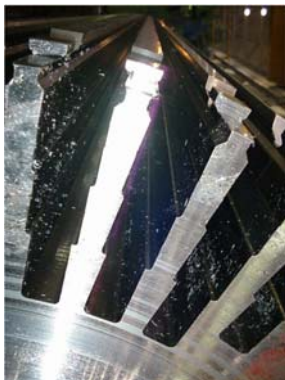


24

Rotore liscio (isotropo)

Il corpo rotore è quindi ricavato lavorando un forgiato unico ad alta permeabilità magnetica, trattato a caldo, di acciaio legato (con caratteristiche meccaniche molto elevate), con flangia di accoppiamento integralmente forgiata con l'albero.

Le cave assiali sono fresate radialmente nel corpo rotore allo scopo di alloggiare le spire che formano l'avvolgimento rotore; nel caso di rotore a 2 poli, le cave trasversali praticate sulle superfici polari uniformano la rigidità flessionale sui due assi principali del rotore (polare e interpolare).



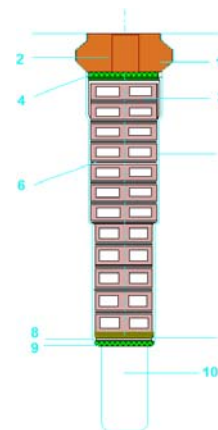
25

Rotore liscio (isotropo)

Per l'intera lunghezza, sotto ogni cava, sono presenti delle sottocave a sezione differenziata per assicurare la corretta distribuzione della portata d'aria di raffreddamento. Le barre di rame non sono direttamente isolate come nello statore, bensì sono le cave di alloggiamento ad essere dotate di un sistema proprio di protezione isolamento (fogli in Nomex o in vetroresina).



- 1 Chiavetta
- 2 Fori di scarico aria in uscita
- 3 Conduttore in rame tubolare
- 4 Isolamento cima cava
- 5 Isolamento contro massa
- 6 Isolamento di spira
- 7 Isolamento fondo cava
- 8 Molla
- 9 Striscia di fondo cava
- 10 Sottocava



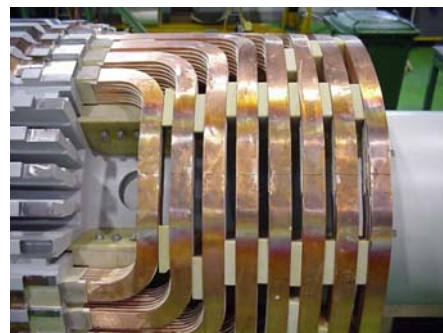
26

Avvolgimento di rotore liscio

L'avvolgimento di rotore è generalmente costituito da conduttori cavi di rame all'argento, raffreddati direttamente con flusso d'aria (per i turbo-alternatori in aria, altrimenti in idrogeno) che scorre assialmente: è realizzato con spire disposte concentricamente nelle cave radiali, sagomate, attorno al polo; ogni spira è costruita con due conduttori a forma di C brasati insieme in corrispondenza della linea centrale degli archi frontali.



Regione dell'asse interpolare



Regione dell'asse polare

27

Avvolgimento di rotore liscio

La ventilazione di tipo assiale garantisce una uniformità di temperatura in senso radiale, minimizzando gli spostamenti tra le spire.

L'espansione termica di una spira ha luogo senza produzione di sforzi eccessivi e pertanto senza che si provochino deformazioni permanenti.

Questo assicura un ottimo comportamento dal punto di vista termico anche in conseguenza delle rapide variazioni di carico.

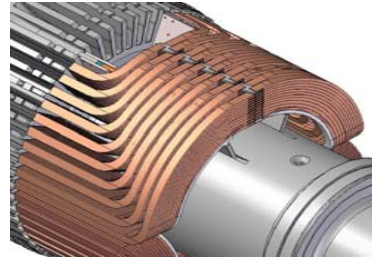
Nella zona attiva, le cave sono isolate con fogli di Nomex e i conduttori sono isolati tra loro con un rivestimento in filato di vetro impregnato con resina epossidica e nelle testate con Nomex.

Delle chiavette su tutta la lunghezza, in lega Cu-Ni di alta qualità, bloccano l'avvolgimento in cava e chiudono la cava stessa, andando a costituire l'avvolgimento smorzatore (si noti che questo è generalmente presente, ma non sempre).

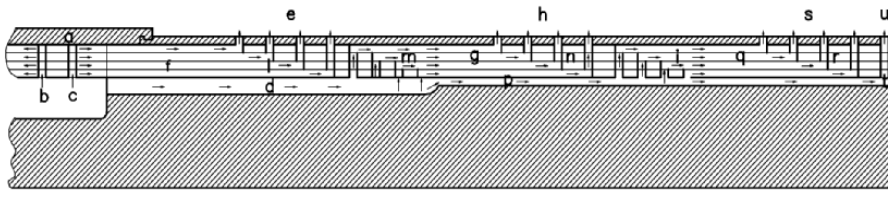
28

Avvolgimento di rotore di turboalternatori

In testata dei blocchetti distanziatori in fibra di vetro rinforzato tengono in posizione i conduttori e delimitano al contempo i passaggi del flusso dell'aria di raffreddamento alle testate.



Un esempio di percorsi dell'aria di raffreddamento attraverso il rotore è indicato in figura:

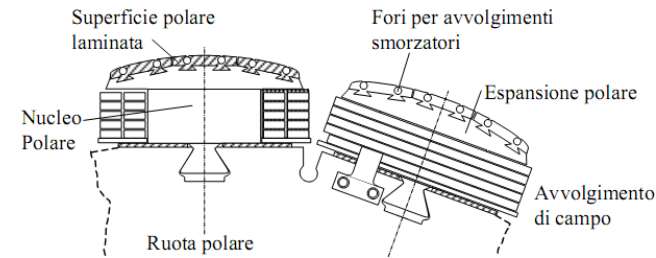


29

Rotore a poli salienti (anisotropo)

Nel caso di motori primi più lenti (ad es. turbine idrauliche), caratterizzati da regimi di rotazione di alcune decine o centinaia di giri al minuto, il numero di poli dell'alternatore deve necessariamente crescere per generare tensioni indotte sempre a 50 Hz. Si possono avere generatori con numero di poli > 100.

Il diametro del rotore aumenta per creare lo spazio necessario ad ospitare i numerosi poli: questi vengono ottenuti attraverso nuclei magnetici, eccitati ciascuno da un proprio avvolgimento, che sporgono dalla cosiddetta "ruota polare":



30

Rotore a poli salienti (anisotropo)

Il traferro della macchina risulta variabile a seconda della direzione considerata: esso risulta minimo sotto l'asse polare mentre è massimo in corrispondenza al vano interpolare.

L'ordine di grandezza del traferro negli idro-alternatori è 10-15 mm, ma può essere maggiore, per motivi meccanici, quando il numero di poli (e di conseguenza il diametro) è molto elevato.



Con il rotore a poli salienti si possono avere potenze al massimo fino a 800 MVA.

31

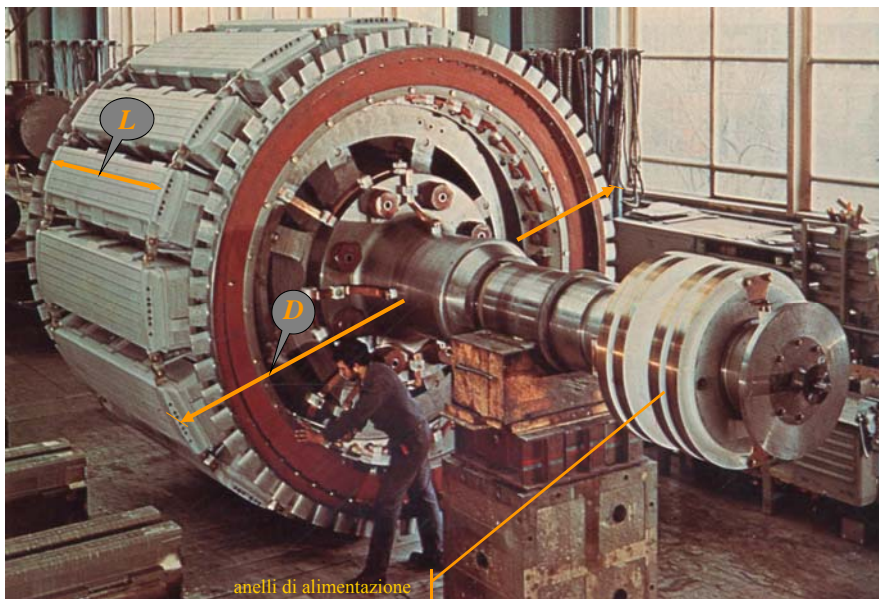
Rotore a poli salienti



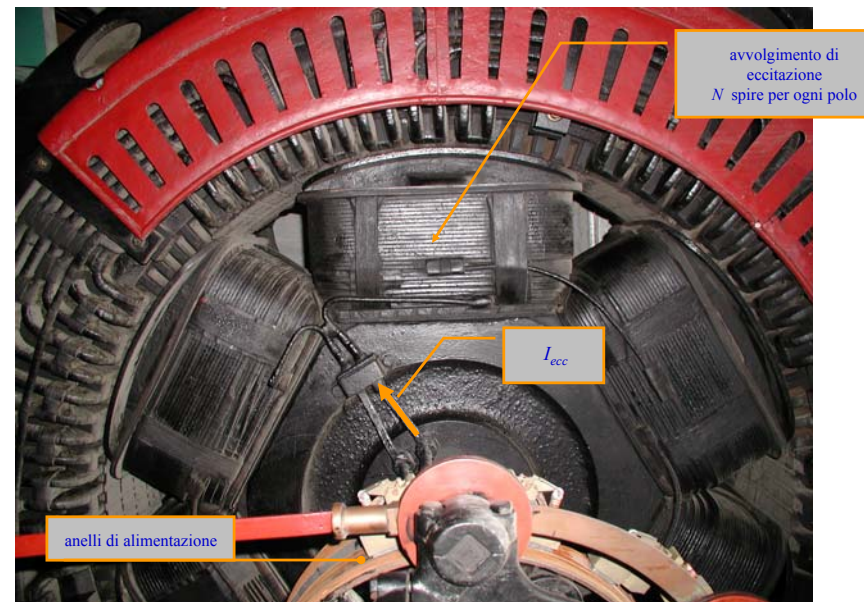
Macchina sincrona 34 kVA – asse orizzontale

32

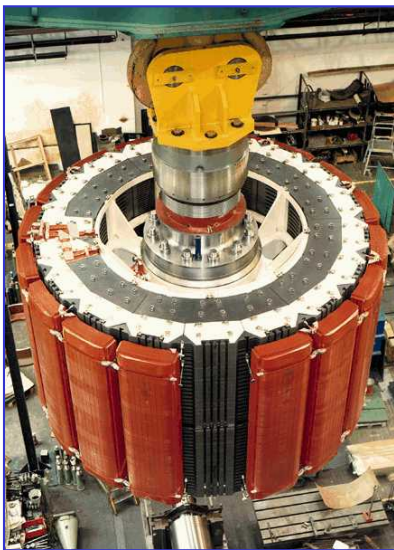
Rotore a poli salienti



Rotore a poli salienti



Rotore a poli salienti



300 MVA
 400 rpm (60 Hz, 18 poli)
 16,5 kV



Rotore a poli salienti

Lamierini



Avvolgimenti



Tiranti e barre ammortizzatrici



Polo finito

Macchina elettrica sincrona

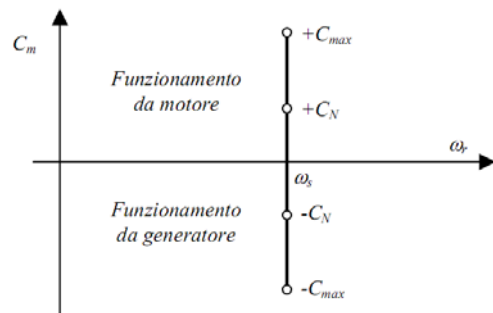
Le macchine sincrone sono macchine elettriche in corrente alternata in grado di generare coppia solo alla velocità di sincronismo.

Tale velocità è legata alla frequenza e al numero di paia poli p_p della macchina secondo la seguente relazione:

$$\omega_r = \frac{\omega}{p_p} = \frac{2\pi f}{p_p} \Rightarrow n_r = \frac{60 f}{p_p}$$

dove ω è la pulsazione elettrica delle grandezze di statore.

La figura illustra la caratteristica coppia-velocità per una macchina sincrona.



Caratteristica coppia-velocità della macchina sincrona

37

Funzionamento del generatore sincrono

Di seguito analizzeremo le caratteristiche dell'alternatore come generatore connesso in parallelo ad una rete con tensione e frequenza fissate, facendo le seguenti ipotesi:

- macchina sincrona isotropa (a traferro costante) a due poli;
- linearità dei fenomeni magnetici che avvengono all'interno della macchina: verrà pertanto trascurata l'influenza del ferro con le sue caratteristiche di saturazione e di isteresi;
- per tutte le distribuzioni di campo, di f.m.m. e di induzione presenti nel traferro, si prenderà in considerazione esclusivamente la componente sinusoidale fondamentale, trascurando in tal modo gli effetti della distribuzione degli avvolgimenti e della presenza di cave.

Questo approccio consente di utilizzare i vettori spaziali per la rappresentazione delle diverse grandezze.

38

Funzionamento del generatore sincrono a vuoto

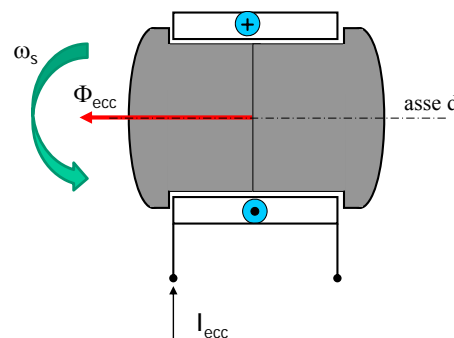
Schematizziamo grossolanamente il rotore a due poli come nel disegno.

La corrente continua di eccitazione, scorrendo nell'avvolgimento di rotore, crea un flusso (di eccitazione) a distribuzione sinusoidale lungo il traferro, di tipo unidirezionale, rigidamente fissato alla struttura di rotore.

La direzione del vettore spaziale del flusso di eccitazione coincide con l'asse magnetico dell'avvolgimento che lo ha creato, denominato asse diretto (asse d).

In condizioni di linearità, è possibile definire il seguente legame tra la fondamentale del flusso di eccitazione e la corrente di eccitazione:

$$\Phi_{ecc} = K_{ecc} I_{ecc}$$



39

Funzionamento del generatore sincrono a vuoto

Quando il motore primo trascina in rotazione il rotore alla velocità di sincronismo ω_s , nelle tre fasi dell'avvolgimento di statore si induce una terna di forze elettromotrici sinusoidali, sfasate nel tempo di 120° .

Ricordando che i concatenamenti di flusso dipendono dagli angoli elettrici e non da quelli meccanici, la f.e.m. indotta a vuoto nelle fasi di statore si può scrivere nel seguente modo:

$$f.e.m. \text{ indotta in ciascuna fase dello statore, a vuoto: } E_0 = K_1 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_{ecc}$$

Si osserva che **la pulsazione elettrica ω del fasore E_0 è pari a p_p volte la pulsazione di sincronismo ω_s** e che esso si trova in quadratura rispetto al flusso che lo ha prodotto (è dato dalla sua derivata rispetto al tempo).

Trascuriamo il segno della E_0 , ma ricordiamo che in questo caso si utilizza la convezione dei generatori elettrici.

40

Funzionamento del generatore sincrono a vuoto

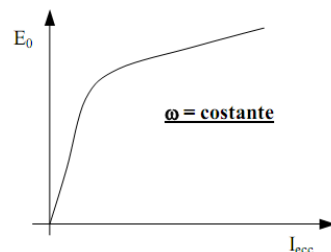
Si può quindi mettere in relazione l'ampiezza (valore efficace) della f.e.m. a vuoto E_0 con la corrente di eccitazione I_{ecc} :

f.e.m. indotta in ciascuna fase dello **statore**, a vuoto:

$$E_0 = K \cdot \omega \cdot I_{ecc}$$

La caratteristica di magnetizzazione della macchina al variare della corrente di eccitazione ha l'andamento illustrato in figura.

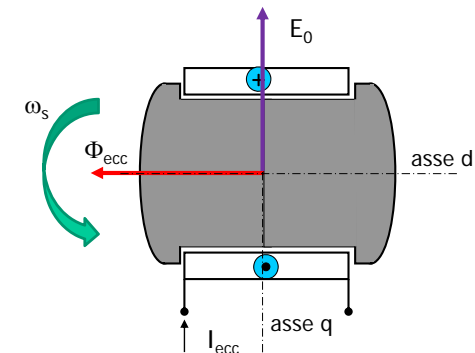
Tale caratteristica risulta in genere non lineare, a causa dei fenomeni di saturazione del ferro che si osservano per correnti di eccitazione elevate.



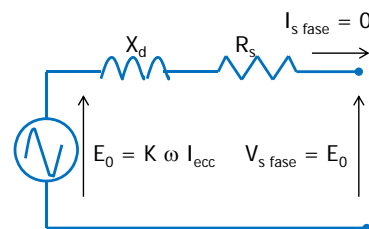
41

Funzionamento del generatore sincrono a vuoto

Durante il funzionamento a vuoto si può quindi disegnare il seguente diagramma vettoriale:



Il circuito equivalente monofase, per il funzionamento a vuoto, può essere il seguente:



La reattanza di dispersione di statore X_d tiene conto dei flussi dispersi (in cava, in testata) mentre la resistenza R_s tiene conto delle perdite Joule. Per i grandi alternatori, R_s è un parametro trascurabile per la valutazione del funzionamento (si utilizza per il rendimento).

42

Funzionamento del generatore in parallelo

Al fine di utilizzare l'alternatore come generatore di potenza (attiva e reattiva) su una rete elettrica, occorre collegare i suoi morsetti di statore con quelli della rete.

Si ipotizza ragionevolmente che la frequenza e la tensione della rete non siano influenzate dalla manovra di parallelo dell'alternatore sulla rete (la rete sia di potenza prevalente rispetto alla potenza dell'alternatore).

Questa manovra prevede una successione di interventi da eseguire sul motore primo e sull'eccitazione della macchina, allo scopo di evitare transitori violenti nel momento della chiusura degli interruttori di connessione.

Per i grossi alternatori, la sequenza di questi interventi viene gestita da un sistema di controllo automatico.

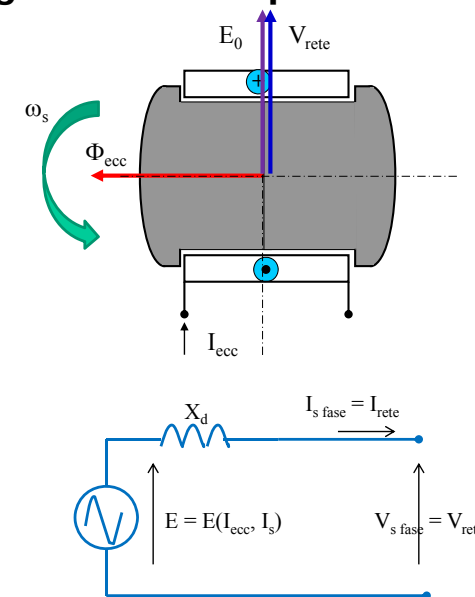
43

Funzionamento del generatore in parallelo

Dopo la chiusura degli interruttori, nella condizione ideale rappresentata in figura, l'alternatore continua a ruotare a velocità ω_s e continua a non essere presente scambio di corrente con la rete:

$$E_0 = V_{rete}$$

Trascuriamo l'influenza della R_s e consideriamo PER IL MOMENTO il circuito equivalente seguente, dove la f.e.m. E è indotta dal flusso complessivo di macchina, a sua volta generato dalla I_{ecc} di rotore e dalla I_s di statore.



44

Regolazione della potenza reattiva

Partendo dalla condizione di funzionamento a vuoto del generatore in parallelo alla rete, si ipotizzi di aumentare la corrente di eccitazione: $I'_{ecc} > I_{ecc}$

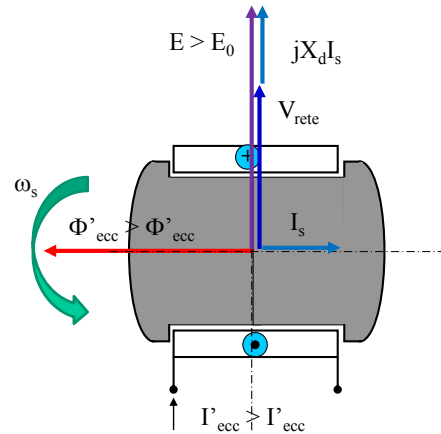
Di conseguenza, aumenteranno il flusso Φ'_{ecc} e la f.e.m. $E > E_0$.

Lo squilibrio tra la f.e.m. E e la tensione di rete V_{rete} genera una corrente I_s :

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{E} - \bar{V}_{rete}}{jX_d}$$

in quadratura con i vettori E e V_{rete} .

In queste condizioni si dice che l'alternatore è sovra-eccitato: non c'è scambio di potenza elettrica attiva tra alternatore e rete, ma esclusivamente scambio di potenza reattiva.



45

Regolazione della potenza reattiva

In condizioni di “sovraccitazione”, il comportamento del generatore è quindi assimilabile a quello di un condensatore (condensatore sincrono): l'alternatore immette potenza reattiva alla rete.

Caratteristiche diametralmente opposte presenta il funzionamento del generatore in condizioni di “sotto-eccitazione”: se si riduce la corrente di eccitazione sotto il valore per cui la f.e.m. indotta fa equilibrio alla tensione di rete, la caduta di tensione sulla reattanza di dispersione si inverte e anche la corrente scambiata ruota la sua fase di 180°.

In questo caso l'alternatore si comporta come un induttore (induttore sincrono).



La potenza reattiva scambiata può quindi essere regolata attraverso la corrente di eccitazione.

46

Regolazione della potenza reattiva

In queste due modalità di funzionamento, non è necessaria la presenza di un motore primo per il trascinamento della macchina, ovvero non si deve fornire coppia all'asse dell'alternatore (infatti, non si ha produzione di potenza attiva).

L'alternatore può essere mantenuto in sincronismo dalla stessa rete di alimentazione, che provvede automaticamente a sopprimere la piccola quota di potenza attiva necessaria per compensare le perdite nel ferro e le perdite Joule connesse con il passaggio della corrente I_s , oltre che le perdite meccaniche conseguenti alla rotazione.

47

Regolazione della potenza attiva

Per comprendere come un alternatore scambia potenza elettrica attiva con la rete a cui è connesso, partiamo nuovamente dalla condizione ideale di funzionamento a vuoto: in questa condizione, i due vettori V_{rete} ed E_0 ruotano sincroni nel senso antiorario convenzionalmente positivo.

Tuttavia, mentre il vettore V_{rete} ha una velocità di rotazione imposta dalla frequenza della rete elettrica, il vettore E_0 è solidale alla posizione spaziale del rotore e ruota alla velocità di quest'ultimo.

Se si aumenta la coppia prodotta dal motore primo e, quindi, la potenza meccanica trasmessa all'albero, il rotore dell'alternatore tende ad accelerare e il vettore E , ad esso collegato, tende ad anticipare rispetto alla tensione di rete.

Il diagramma vettoriale si modifica, nell'ipotesi di regolare la corrente di eccitazione in modo da garantire l'uguaglianza $E = V_{rete}$.

48

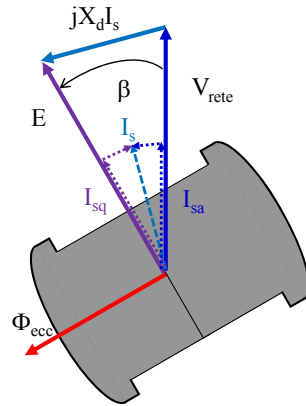
Regolazione della potenza attiva

Lo sfasamento tra il vettore E e il vettore V_{rete} dà luogo al passaggio di una corrente tra alternatore e rete:

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{E} - \bar{V}_{rete}}{jX_d}$$

Questa corrente può essere vista come somma di due componenti in quadratura tra loro, di cui una (I_{sq}) in fase con la f.e.m. E , che giustifica la nascita di una coppia elettromagnetica per contrastare la coppia motrice applicata all'albero.

Poiché questa componente aumenta al crescere dell'angolo β di anticipo del vettore E , prima o poi la coppia elettromagnetica sviluppata uguaglierà esattamente la coppia motrice applicata all'albero, consentendo una nuova posizione sincrona di equilibrio dei diversi vettori del diagramma.



49

Regolazione della potenza attiva

Dal punto di vista meccanico, la macchina si comporta come se esistesse un "collegamento elastico" tra gli estremi del vettore V_{rete} e del vettore E .

La corrente I_s , prodotta dal generatore e scambiata con la rete, può essere anche vista come somma di due componenti in quadratura, di cui una (I_{sa} , componente attiva) in fase con la tensione V_{rete} : questa componente giustifica la potenza elettrica, ottenuta a partire dalla potenza meccanica, a sua volta fornita dal motore primo all'albero, secondo il funzionamento da generatore.

Sulla base delle ipotesi fatte e del diagramma vettoriale si possono scrivere le seguenti relazioni:

$$P_{meccanica} = C_{em} \cdot \omega_s = 3 \cdot E \cdot I_s \cos(\beta/2)$$

$$P_{elettrica} = 3 \cdot V_s \cdot I_s \cos \varphi = 3 \cdot E \cdot I_s \cos(\beta/2)$$

50

Regolazione della potenza attiva

In questa situazione, lo scambio di potenza con la rete è principalmente di potenza attiva (data dalla componente di I_s in fase con V_{rete}).

Tuttavia, è presente anche una componente di I_s in quadratura con V_{rete} e quindi una potenza reattiva (anche se, in questa condizione limite, è molto piccola).

Nel caso più generale, lo scambio di potenza con la rete sarà di potenza attiva e reattiva:

- la potenza attiva è data dalla componente di I_s in fase con V_{rete} ;
- la potenza reattiva è data dalla componente di I_s in quadratura con V_{rete} .

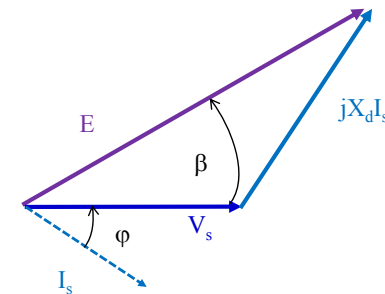
Considereremo di seguito $V_{rete} = V_s =$ tensione di una fase di statore.

Risulta a questo punto necessario riprendere il circuito equivalente per trovare un metodo che consenta di determinare E in funzione della reazione d'indotto.

51

Analisi del funzionamento dell'alternatore

In generale è possibile analizzare il funzionamento dell'alternatore a partire dalle condizioni di carico ai suoi morsetti, cioè dalla conoscenza della corrente erogata (I_s) e del fattore di carico ($\cos\varphi$), come indicato in figura:



Per farlo, occorre utilizzare un circuito equivalente più corretto, che tenga conto della reazione di indotto, attraverso la cosiddetta **reattanza sincrona**.

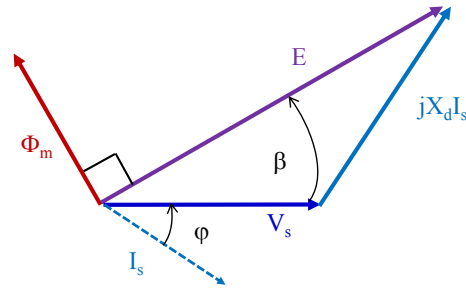
52

Fenomeno della reazione di indotto

Durante il funzionamento a carico dell'alternatore, il sistema trifase delle correnti di statore, fluendo nei rispettivi avvolgimenti di fase, crea un campo magnetico rotante sincrono con il rotore.

A tale campo magnetico rotante si può associare una distribuzione di flusso al traferro, denominato **flusso di reazione di indotto** Φ_r .

La f.e.m. E che si induce negli avvolgimenti di statore è prodotta dal **flusso complessivo** Φ_m , risultante del **flusso di eccitazione** Φ_{ecc} e del flusso di reazione Φ_r , e quindi è perpendicolare ad esso.



53

Fenomeno della reazione di indotto

In termini di vettori spaziali, equivalenti alle distribuzioni fondamentali di flusso al traferro, si può scrivere:

$$\vec{\Phi}_m = \vec{\Phi}_{ecc} + \vec{\Phi}_r$$

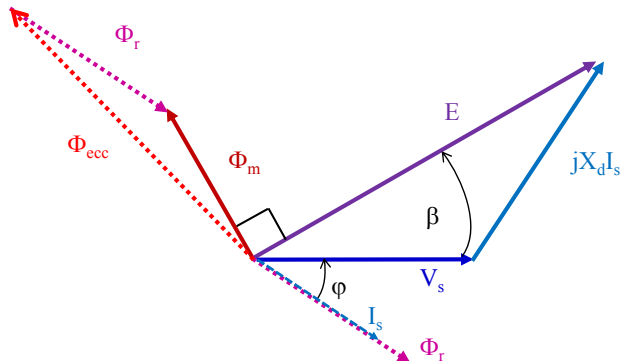
Questa relazione è corretta solo nell'ipotesi di linearità magnetica del ferro.

Altrimenti, è sempre valida la composizione dei vettori rappresentativi delle distribuzioni di f.m.m. creati dalle correnti (e pertanto diretti in fase con i vettori che rappresentano le rispettive correnti).

Quindi, nell'ipotesi di linearità magnetica, si può disegnare il seguente diagramma vettoriale, dove il **flusso di reazione di indotto** Φ_r è in fase con la corrente I_s che lo produce e il **flusso di eccitazione** Φ_{ecc} necessario è dato dalla differenza tra il **flusso complessivo** Φ_m e quello di reazione.

54

Fenomeno della reazione di indotto



Questo diagramma mostra che il fenomeno di reazione di indotto produce una pesante variazione del flusso complessivo nel passaggio da vuoto a carico.

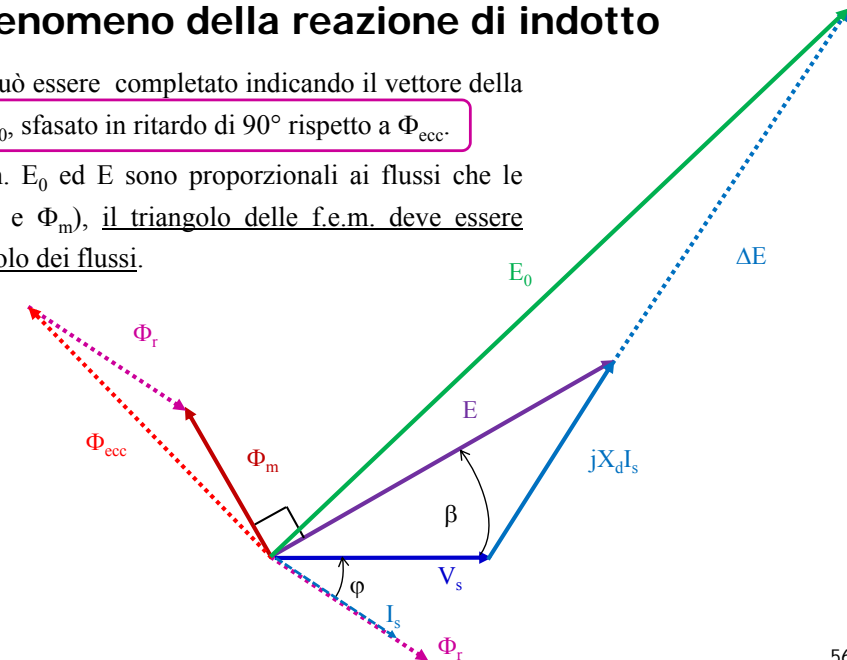
In particolare, con carichi ohmico-induttivi il fenomeno comporta una pesante smagnetizzazione dell'alternatore rispetto alla condizione di funzionamento a vuoto (corrente di statore nulla e flusso pari al flusso di eccitazione).

55

Fenomeno della reazione di indotto

Il diagramma può essere completato indicando il vettore della f.e.m. a vuoto E_0 , sfasato in ritardo di 90° rispetto a Φ_{ecc} .

Poiché le f.e.m. E_0 ed E sono proporzionali ai flussi che le generano (Φ_{ecc} e Φ_m), il triangolo delle f.e.m. deve essere simile al triangolo dei flussi.



56

Fenomeno della reazione di indotto

Sulla base di questa osservazione si può concludere che il vettore ΔE deve necessariamente avere la stessa direzione della caduta di tensione sulla reattanza di dispersione, ovvero del vettore $jX_d I_s$.

Quindi, indipendentemente dalla situazione di carico (I_s e $\cos\varphi$), il vettore ΔE risulta in anticipo di 90° rispetto al vettore I_s e la sua ampiezza risulta proporzionale alla corrente erogata dalla macchina.

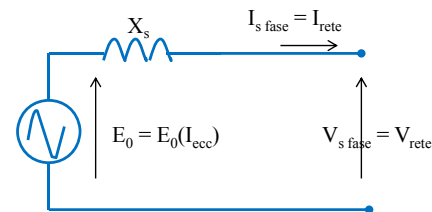
Queste considerazioni permettono di interpretare il vettore ΔE come una caduta di tensione su una reattanza induttiva.

Tale reattanza, denominata reattanza di reazione di indotto, può essere inserita nel circuito equivalente in serie alla reattanza di dispersione.

La serie di queste due reattanze viene denominata reattanza sincrona X_s della macchina.

57

Fenomeno della reazione di indotto



Pregio del circuito equivalente trovato e della definizione di reattanza sincrona è la dipendenza della tensione indotta E_0 dalla sola corrente di eccitazione.

I fenomeni di smagnetizzazione della macchina a causa della reazione di indotto sono estremamente pesanti ($\Delta E \approx 100-150\% V_s$).

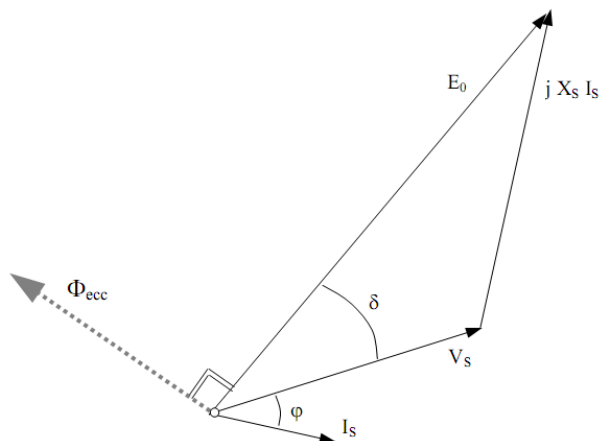
Questo significa che la caduta di tensione sulla reattanza di dispersione è molto minore di quella sulla reattanza di reazione ($X_d \ll X_r \approx X_s$).

58

Fenomeno della reazione di indotto

In figura è rappresentato il diagramma vettoriale a carico dell'alternatore.

L'angolo δ di sfasamento tra il vettore E_0 e il vettore V_s è chiamato angolo di carico e rappresenta una grandezza di fondamentale importanza per lo studio della macchina sincrona.



59