



La macchina sincrona (2° parte): espressione della coppia, aspetti costruttivi dello statore

Lucia FROSINI

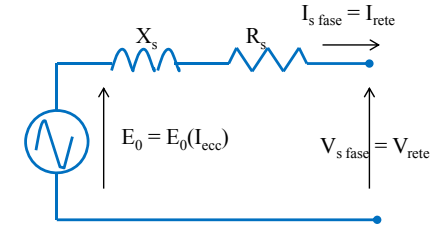
Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione,
Università di Pavia
E-mail: lucia@unipv.it

1

L. Frosini

Espressione della coppia elettromagnetica

Riprendiamo il circuito equivalente monofase trovato per una macchina sincrona, in cui inseriamo ora anche il parametro resistivo, che tiene conto delle perdite per effetto Joule di statore.

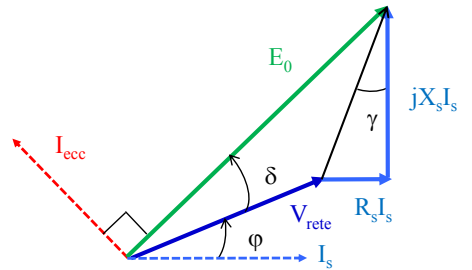


L'impedenza sincrona è definita come:

$$\bar{Z}_s = R_s + jX_s$$

$$\tan \gamma = \frac{R_s}{X_s}$$

Sia δ l'angolo di carico con cui il vettore E_0 anticipa il vettore V_{rete} nel funzionamento da generatore.



2

L. Frosini

Espressione della coppia elettromagnetica

La corrente scambiata tra generatore e rete è data da:

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{E}_0 - \bar{V}_{rete}}{R_s + jX_s} = \frac{\bar{E}_0 - \bar{V}_{rete}}{Z_s^2} \cdot (R_s - jX_s)$$

Trascurando le perdite di rotore, possiamo esprimere la potenza elettromagnetica trasmessa da rotore a statore come:

$$P_{em} = C_{em} \cdot \omega_s = 3 \cdot \bar{E}_0 \times \bar{I}_s$$

E quindi la coppia elettromagnetica come rapporto tra la potenza elettromagnetica e la velocità di sincronismo:

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_s} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \bar{E}_0 \times \bar{I}_s = \frac{3 \cdot p_p}{\omega} \cdot \bar{E}_0 \times \bar{I}_s$$

dove ω è la pulsazione delle grandezze elettriche e \times il prodotto scalare.

3

L. Frosini

Espressione della coppia elettromagnetica

Sviluppiamo il prodotto, sostituendo l'espressione della corrente:

$$C_{em} = \frac{3 \cdot p_p}{\omega} \cdot \bar{E}_0 \times \left(\frac{\bar{E}_0 - \bar{V}_{rete}}{Z_s^2} \cdot (R_s - jX_s) \right)$$

$$C_{em} = \frac{3 \cdot p_p}{\omega} \cdot \bar{E}_0 \times \left(R_s \frac{\bar{E}_0 - \bar{V}_{rete}}{Z_s^2} - jX_s \frac{\bar{E}_0 - \bar{V}_{rete}}{Z_s^2} \right)$$

questo prodotto scalare è = 0

$$C_{em} = \frac{3 \cdot p_p}{\omega} \left(\frac{E_0^2 \cdot R_s}{Z_s^2} - E_0 \cdot V_{rete} \frac{R_s}{Z_s^2} \cos \delta + E_0 \cdot V_{rete} \frac{X_s}{Z_s^2} \sin \delta \right)$$

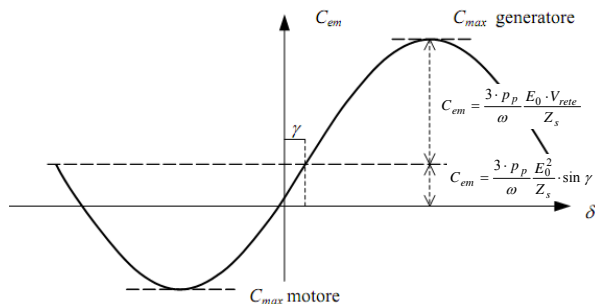
$$C_{em} = \frac{3 \cdot p_p}{\omega} \left(\frac{E_0^2 \cdot Z_s \sin \gamma}{Z_s^2} - E_0 \cdot V_{rete} \frac{Z_s \sin \gamma}{Z_s^2} \cos \delta + E_0 \cdot V_{rete} \frac{Z_s \cos \gamma}{Z_s^2} \sin \delta \right)$$

4

Espressione della coppia elettromagnetica

$$C_{em} = \frac{3 \cdot p_p}{\omega} \left(\frac{E_0^2}{Z_s} \cdot \sin \gamma + \frac{E_0 \cdot V_{rete}}{Z_s} \cdot (\cos \gamma \sin \delta - \sin \gamma \cos \delta) \right)$$

$$C_{em} = \frac{3 \cdot p_p}{\omega} \left(\frac{E_0^2}{Z_s} \cdot \sin \gamma + \frac{E_0 \cdot V_{rete}}{Z_s} \cdot \sin(\delta - \gamma) \right)$$



5

Espressione della coppia elettromagnetica

L'andamento della coppia elettromagnetica in funzione dell'angolo δ mostra che il segno della coppia è positivo nel funzionamento da generatore.

Se si trascura la resistenza di fase di statore ($\gamma = 0$) si ottiene l'espressione approssimata della coppia elettromagnetica di un alternatore:

$$C_{em} \approx \frac{3 \cdot p_p}{\omega} \frac{E_0 \cdot V_{rete}}{Z_s} \cdot \sin \delta$$

Secondo questa espressione, ad angoli di carico $\delta > 0$ (E_0 in anticipo rispetto al vettore V_{rete}) corrispondono coppie positive e quindi il funzionamento della macchina è effettivamente da generatore.

Per angoli di carico $\delta < 0$ (E_0 in ritardo rispetto al vettore V_{rete}), il segno della coppia si inverte e la macchina funziona da motore.

6

Espressione della coppia elettromagnetica

Sia la coppia che la potenza elettromagnetica trasferibili da rotore a statore hanno un valore massimo in corrispondenza di un angolo di carico $\delta = 90^\circ$:

$$C_{emMAX} \approx \frac{3 \cdot p_p}{\omega} \frac{E_0 \cdot V_{rete}}{Z_s} \quad P_{emMAX} \approx 3 \cdot \frac{E_0 \cdot V_{rete}}{Z_s}$$

Oltre questi valori di coppia e di potenza, l'alternatore non è più in grado di equilibrare il motore primo e, pertanto, il sistema motore primo-alternatore tenderebbe ad accelerare perdendo il sincronismo con la rete elettrica e dando luogo ad un funzionamento inaccettabile.

Si parla di fenomeno della perdita del passo: la macchina viene percorsa da una corrente di intensità molto elevata, che determina l'intervento delle sue protezioni, scollegandolo dalla rete; se non intervengono le protezioni, si può avere un danneggiamento della macchina.

7

Espressione della coppia elettromagnetica

A causa di problemi di instabilità, la macchina viene regolata in modo da lavorare con angoli di carico δ intorno a 45° .

Si noti che il valore massimo possibile di trasferimento di potenza meccanica all'albero (e conseguentemente di potenza elettrica verso la rete), dipende, tra l'altro, dalla f.e.m. a vuoto E_0 e quindi dalla massima corrente di eccitazione sopportabile dalla macchina.

Avendo definito il concetto di reattanza sincrona e il circuito equivalente relativo, è ora possibile analizzare, in termini di diagrammi vettoriali e in modo più rigoroso rispetto a quanto visto in precedenza, la regolazione della potenza attiva e reattiva prodotta dall'alternatore.

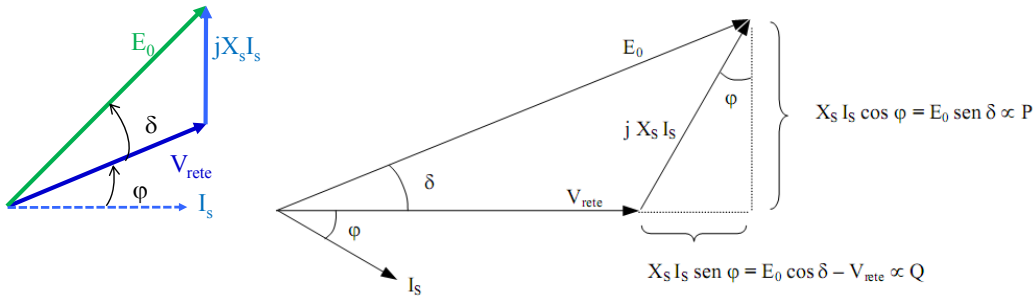
8

Regolazione della potenza attiva e reattiva

Vogliamo dimostrare i seguenti principi di regolazione dell'alternatore :

- per regolare la potenza attiva generata si deve agire sulla coppia applicata all'asse;
- per regolare la potenza reattiva erogata si deve agire sulla corrente di eccitazione.

Si consideri il diagramma vettoriale seguente (in cui di nuovo trascuriamo R_s), relativo ad una certa situazione di carico dell'alternatore, in cui poniamo per semplicità la fase della tensione di rete pari a zero:



9

Regolazione della potenza attiva e reattiva

La potenza elettrica attiva P e la potenza reattiva Q inviate in rete dall'alternatore sono date da:

$$\begin{cases} P = P_{elettrica} = 3 \cdot \bar{V}_{rete} \times \bar{I}_s = 3 \cdot V_{rete} \cdot I_s \cos \varphi \\ Q = 3 \cdot V_{rete} \cdot I_s \sin \varphi \end{cases}$$

In figura sono evidenziati due segmenti proporzionali alle potenze attiva P e reattiva Q (cioè rispettivamente a $I_s \cos \varphi$ e $I_s \sin \varphi$).

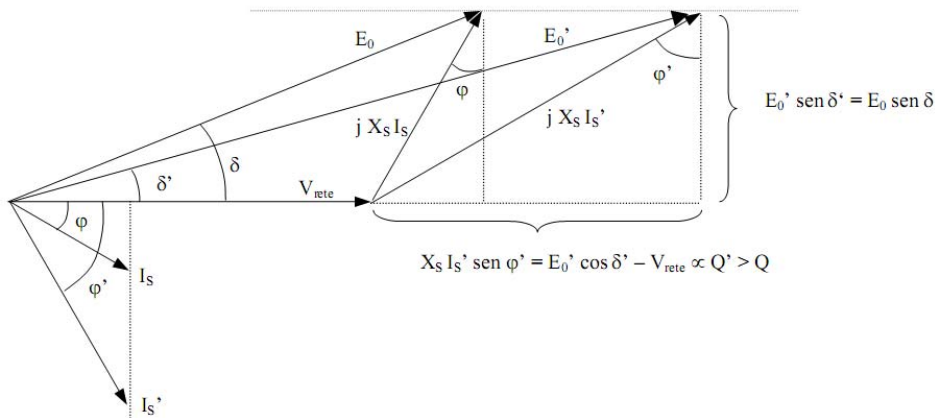
Si noti che il valore della tensione di rete è fisso.

Quindi, se si vuole regolare la potenza reattiva Q erogata in rete mantenendo costante la quota di potenza attiva, si deve regolare la corrente di eccitazione, e quindi l'ampiezza della tensione E_0 , in modo che la punta del vettore E_0 si muova su una retta orizzontale.

10

Regolazione della potenza reattiva

Nella figura seguente è rappresentato il caso di un aumento della potenza reattiva generata ($Q' > Q$). Si noti come la regolazione della potenza reattiva, ottenuta secondo il procedimento indicato, non richieda la regolazione della coppia fornita dal motore primo (cioè, rimane costante la potenza attiva).



11

Regolazione della potenza attiva

Si riparta ora dalla condizione di carico assunta inizialmente e si ipotizzi di variare la potenza attiva erogata (ad es. aumentarla: $P'' > P$), mantenendo costante la corrente di eccitazione.

Per far ciò si deve aumentare l'ampiezza del segmento $E_0 \sin \delta$ e quindi la coppia, dato che:

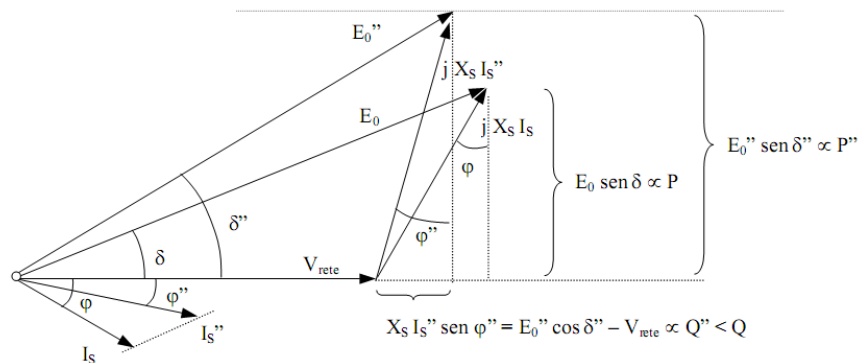
$$C_{em} \approx \frac{3 \cdot P_p}{\omega} \frac{E_0 \cdot V_{rete}}{Z_s} \cdot \sin \delta$$

Poiché la corrente di eccitazione viene mantenuta costante, rimane costante anche l'ampiezza del vettore E_0 .

Quindi, il vettore E_0 deve ruotare in senso antiorario per realizzare il nuovo angolo di carico δ'' .

12

Regolazione della potenza **attiva e reattiva**



La figura illustra che l'aumento della coppia e della potenza attiva si accompagna a una diminuzione della potenza reattiva ($Q'' < Q$), perché si riduce il fattore di potenza. Per riportarsi nelle stesse condizioni di potenza reattiva di partenza, occorre aumentare la corrente di eccitazione, secondo il procedimento precedente.

13

Osservazione sul traferro

Poiché in una macchina sincrona l'eccitazione è ottenuta attraverso un circuito in corrente continua, non si ha consumo di potenza reattiva dalla rete per produrre il flusso magnetico a vuoto, al contrario di quel che accade invece nella macchina asincrona.

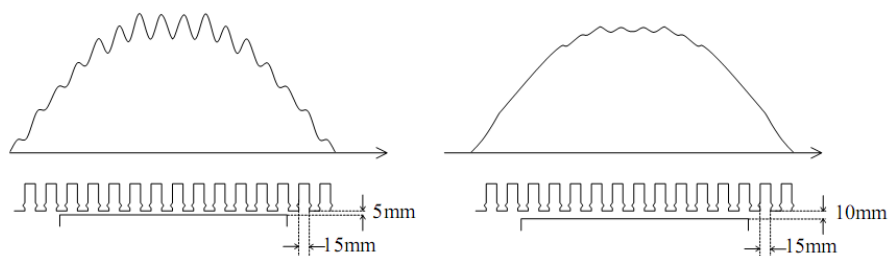
In queste condizioni le ampiezze di traferro possono essere tenute più alte e, a fronte di traferri massimi di pochi millimetri caratteristici dei grandi motori asincroni, nei grandi turboalternatori i traferri possono raggiungere il centinaio di millimetri.

La necessità di tenere alto lo spessore di traferro è particolarmente sentita nelle grandi macchine, dove l'esecuzione in piattina degli avvolgimenti di statore richiede l'adozione di cave di tipo aperto.

In questo caso, se il traferro è modesto, le perturbazioni, prodotte dalle aperture di cava sulla distribuzione del campo, possono provocare ondulazioni eccessive della forma d'onda della f.e.m. indotta.

14

Osservazione sul traferro



Forme d'onda di f.e.m. di fase nel caso di cave aperte.

Si osserva che il traferro è molto più ridotto nel caso di alternatori idraulici (da 0,5 a 3 cm), che presentano potenze al massimo di 800 MVA.

Nei turboalternatori, che possono arrivare a potenze fino a 1200 MVA per i due poli e fino a 1700 MVA per i quattro poli, il traferro va da 4 a 10 cm.

15

Avvolgimenti smorzatori

Abbiamo visto che il generatore è in grado di erogare una potenza attiva il cui valore cresce al crescere di δ , fino a $\delta = 90^\circ$.

Durante un transitorio conseguente a una brusca variazione della coppia (motrice o quella resistente dovuta al carico elettrico), si ha funzionamento dinamico del generatore: si passa da un certo angolo δ_1 e si raggiunge il nuovo angolo δ_2 , mediante una serie di oscillazioni pendolari.

Queste oscillazioni sono sempre nocive, pertanto si cerca di smorzarle.

Durante queste oscillazioni, i poli induttori (di rotore) si spostano in avanti e indietro rispetto ai poli indotti (di statore).

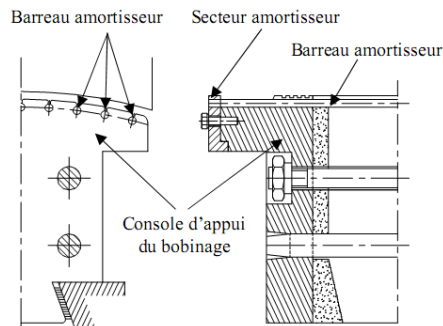
Questa pendolazione ha l'effetto di una perturbazione del campo magnetico, che induce f.e.m. e quindi correnti parassite nelle masse metalliche del rotore investite dal campo (poli salienti, avvolgimenti di eccitazione e avvolgimenti smorzatori, se esistenti).

16

Avvolgimenti smorzatori nei poli salienti

Per attutire adeguatamente questo fenomeno, vengono disposte sulla superficie esterna del rotore delle spire in cortocircuito; esse sono, in genere, assimilabili alla gabbia di scoiattolo di una macchina asincrona e prendono il nome di avvolgimenti smorzatori.

Tali avvolgimenti sono inerti quando la macchina lavora sincrona con la frequenza di rete, ma intervengono, nel caso di oscillazioni di velocità attorno alla velocità di sincronismo, mettendo in gioco una coppia asincrona con effetto smorzante.



Essi sono di solito in rame e con notevole sezione: l'azione frenante è infatti determinata dalla dissipazione di energia dovuta alle correnti indotte in questi avvolgimenti, le quali devono risultare di notevole intensità.

17

Avvolgimenti smorzatori nei turboalternatori

Anche nei turboalternatori, per smorzare le oscillazioni del rotore che seguono un'improvvisa variazione di carico, evitare un eccessivo surriscaldamento della superficie di rotore in condizione di carico non simmetrico e assicurare un buon comportamento durante l'avviamento tramite avviatore statico, è generalmente previsto l'avvolgimento smorzatore (ma non è sempre presente).

Questo avvolgimento è formato da conduttori, della stessa lunghezza di tutta la cava, disposti sotto le chiavette che chiudono le cave di rotore e/o dalle stesse chiavette (che sono realizzate con materiale ad alta conducibilità); questi conduttori, o chiavette, sono cortocircuitati tra loro tramite due anelli alle due estremità del rotore.

Pertanto, questo avvolgimento è costituito da una gabbia ad alta conducibilità, che interessa le cave occupate dall'avvolgimento.

18

Avvolgimenti smorzatori nei turboalternatori

Anche le chiavette di chiusura delle cave di rotore presentano dei fori radiali per completare il sistema di raffreddamento dell'avvolgimento rotore, convogliando l'aria in canali radiali dalle sottocave fino allo scarico dell'aria al traferro.

Gli anelli di rame di cortocircuito sono alloggiati sotto le cappe di blindaggio.

Le cappe di blindaggio sono montate a caldo sulle estremità delle parti attive del rotore e bloccate assialmente per mezzo di un sistema a baionetta.

Il materiale delle cappe di blindaggio è amagnetico.



19

Nucleo di statore

Il nucleo o pacco di statore è costituito da lamierini ferromagnetici al silicio, con bassa cifra di perdita, generalmente di spessore 0,55 mm: i singoli lamierini sono punzonati, sbavati e rivestiti su entrambi i lati con vernice isolante e resistente al calore, di classe opportuna.

Il pacco viene pressato progressivamente durante l'impaccatura in modo da creare un nucleo ben compresso, al fine di ridurre le vibrazioni durante il funzionamento e limitare al minimo eventuali spazi in aria che causerebbero un aumento di riluttanza del circuito magnetico.

L'impaccatura verticale è una tecnica degli ultimi 15-20 anni: prima si impaccava in orizzontale dentro la carcassa.



20

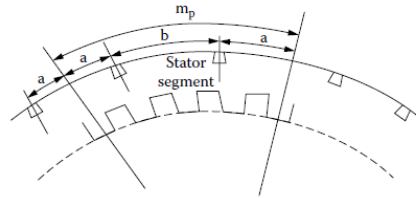
Nucleo di statore

Fino a 1 m di diametro è possibile utilizzare lamierini in forma di corona circolare.

I turboalternatori di elevata potenza e la maggior parte degli idro-generatori hanno diametro esterno di statore maggiore di 1 m (fino a 18 m, nel caso di idro con un centinaio di poli): in questi casi, le corone circolari che compongono i nuclei di statore sono formate da segmenti (da 6 a 42). Ogni segmento è fissato alla carcassa tramite due tiranti (*key-bar*), che sono uniformemente distribuiti lungo la periferia.

Tutti i segmenti sono identici: in due strati successivi, i segmenti sono sfalsati di mezzo segmento per dare maggior compattezza meccanica alla struttura ed evitare di avere un traferro aggiuntivo.

Per evitare danni agli avvolgimenti dovuti alle vibrazioni, ogni segmento dovrebbe iniziare e finire a metà di un dente.



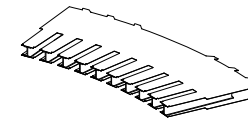
21

Nucleo di statore

I lamierini sono verniciati ed essiccati prima di essere impaccati.



Per permettere un opportuno raffreddamento radiale, i singoli pacchi di lamierini vengono distanziati con opportuni distanziatori.



22

Nucleo di statore

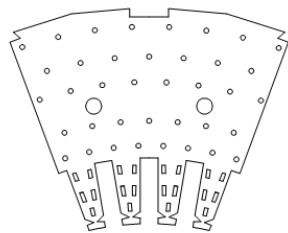
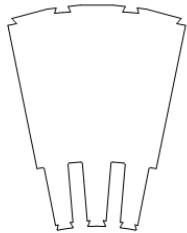
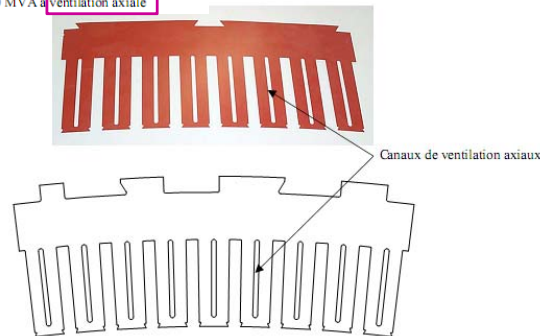


Fig. 32 - Segment de tôle stator pour turbo-alternateur 660 MVA à ventilation radiale

Fig. 33 - Segment de tôle magnétique pour turbo-ALSTOM alternateur CEM de 290 MVA à ventilation axiale

La forma dei lamierini è diversa a seconda che la ventilazione sia radiale o assiale.

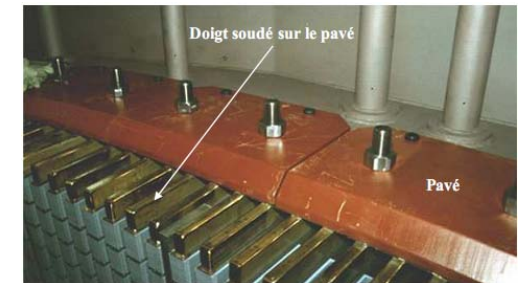
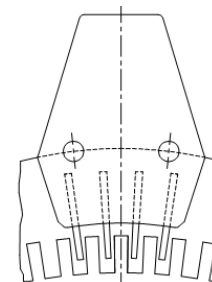


23

Nucleo di statore

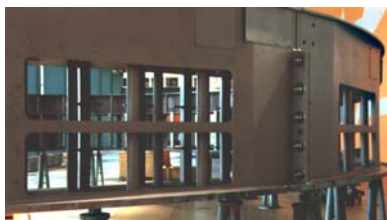
Il pacco è sottoposto a una pressione costante da parte delle dita pressa-pacco, le piastre pressa-pacco e i tiranti-chiavetta posizionati sulla circonferenza esterna dello stesso.

Le piastre pressa-pacco possono essere in alluminio fuso temperato: agiscono come schermi ed evitano surriscaldamenti delle parti terminali del pacco causati dai flussi di dispersione assiale.



24

Nucleo di statore e carcassa



25

Carcassa

Il pacco assemblato, con i diversi anelli saldati ai tiranti-chiavetta, viene alloggiato all'interno della carcassa, realizzando un sistema di sospensione elastica, con il risultato di disaccoppiare, dal punto di vista delle vibrazioni, il pacco dalla carcassa e quindi dalle fondazioni: discorso analogo vale per le espansioni termiche.

Se il raffreddamento è in idrogeno, il nucleo viene impaccato direttamente dentro la carcassa e questa dev'essere a prova di esplosione.

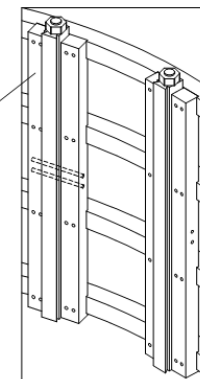
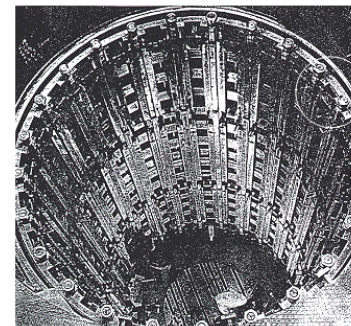
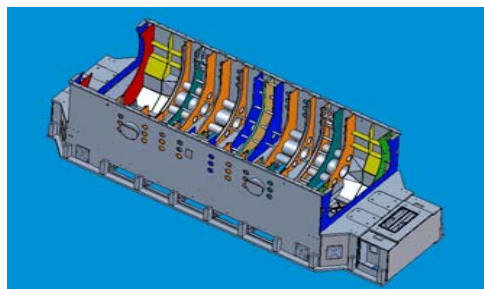


Fig. 38 - Dispositif de suspension élastique axial du circuit magnétique pour alternateur ALSTOM 250-600 MW 3000 tr/min (barreau-clavette fixé entre deux ressorts)

26

Carcassa

La carcassa è una struttura costituita da piastre di acciaio saldate tra loro, divisa orizzontalmente in due metà e con costolature interne, progettata per resistere alle sollecitazioni interne. La sezione inferiore, con struttura a sella, permette di inserire il pacco statore completamente avvolto, dando così l'opportunità di costruire indipendentemente la carcassa e il pacco ed accorciare di conseguenza il processo di costruzione (questo vale per il raffreddamento in aria). La parte superiore della struttura completa la carcassa come una sorta di coperchio con parte dei cammini di ventilazione.



27

Carcassa di un alternatore della centrale di Itaipu



28

Avvolgimenti di statore

Un discorso a parte merita la costruzione delle bobine degli avvolgimenti di statore in “alta tensione” ($> 2\div 3$ kV) di macchine sincrone e asincrone.

Questi avvolgimenti sono detti “form wound”, diversamente dai “random wound” delle macchine a tensioni inferiori, in quanto la loro costruzione prevede che i singoli conduttori (piattine di rame) occupino una posizione ben definita all’interno della bobina.

L’aspetto esterno di ciascuna bobina è quello di una barra rigida, preformata, con un consistente isolamento esterno, necessario a causa delle elevate tensioni in gioco.



Costruzione della bobina con trasposizione



Semi-bobine isolate

29

Avvolgimenti di statore

I conduttori che costituiscono la bobina sono isolati tra loro (isolamento di conduttore) con un composto di un filato misto di fibre di vetro e poliestere termoplastico.

La trasposizione delle piattine nel tratto in cava (tratto rettilineo all’interno dello statore) è generalmente eseguita con il sistema Röebel, che prevede la variazione della posizione della piattina nella lunghezza della barra in modo che ogni piattina sia sottoposta complessivamente alla stessa tensione indotta.



La bobina viene quindi isolata verso massa con un isolamento costituito da: **mica**, che è la parte fondamentale dell’isolamento e funge da barriera resistente alle scariche parziali; **vetro**, che è un materiale di supporto che occorre per avere una buona resistenza meccanica; **resina**, che funge da legante e riempie tutti i vuoti.

30

Avvolgimenti di statore

L’applicazione di questo isolamento può essere realizzata con uno dei seguenti processi tecnologici:

- 1) Resin Rich,
- 2) Vacuum Pressure Impregnation (VPI).

Il primo metodo prevede la nastratura delle semi-bobine con un nastro pre-impregnato costituito da un tessuto di vetro, un foglio di mica e un film di Dacron, il tutto impregnato con una resina epossidica.

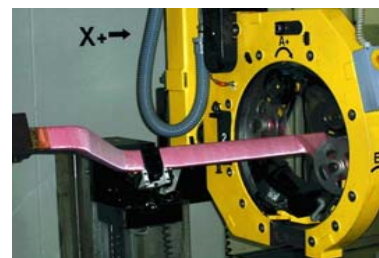
Il VPI è ottenuto avvolgendo le semi-bobine con un nastro asciutto composto in vetro-mica e impregnando successivamente il tutto con resina.

Sulle semi-bobine così nastrate vengono applicati nastri di sacrificio distaccanti e termorestringenti e un sistema di angolari metallici per dare la geometria finale.

31

Avvolgimenti di statore

Le semi-bobine vengono introdotte in autoclave e sottoposte ad un ciclo di condizionamento sottovuoto in temperatura per evacuare i gas presenti. Il processo prevede poi un ciclo termico sottopressione. Al termine, vengono rimossi i nastri di sacrificio e gli angolari metallici di pressatura, prima delle operazioni finali di montaggio.



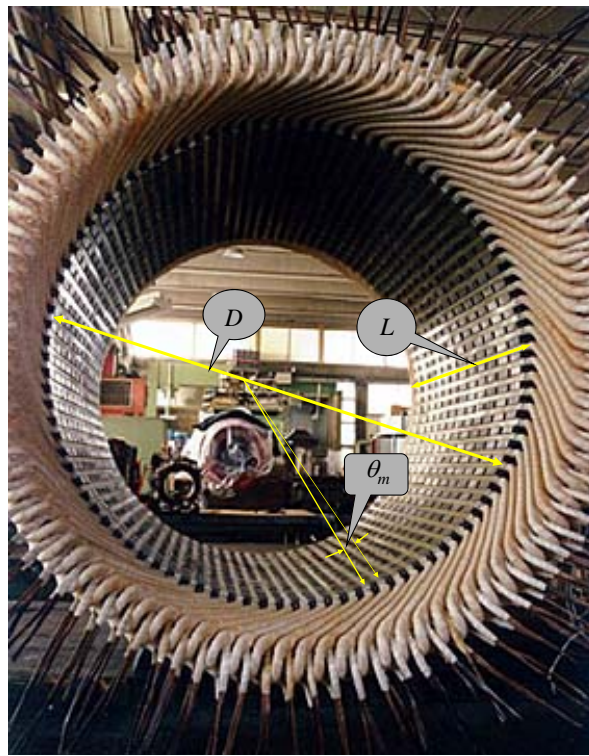
32

Avvolgimenti di statore

Le bobine vengono quindi inserite nelle cave come indicato in figura.

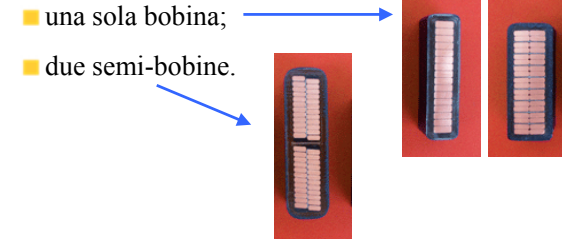
Si osserva l'angolo meccanico, dato da 360° divisi per il numero totale di cave Q :

$$\theta_m = \frac{2\pi}{Q}$$



Avvolgimenti di statore

All'interno di ciascuna cava di statore possono essere presenti:



I conduttori possono essere pieni (raffreddamento indiretto) o forati (raffreddamento diretto).

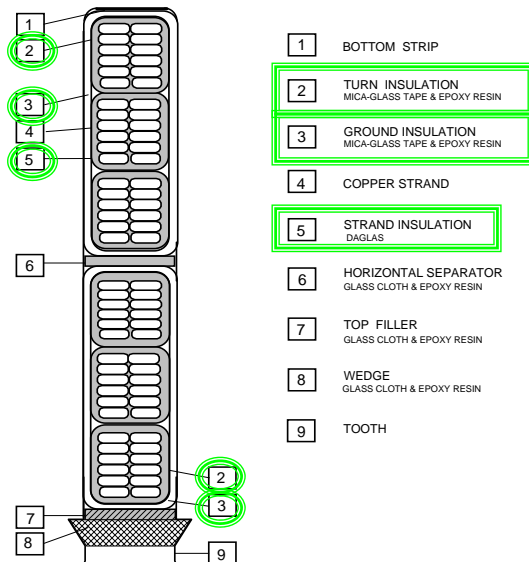
In alcuni casi si possono avere bobine (o semi-bobine) a più spire.



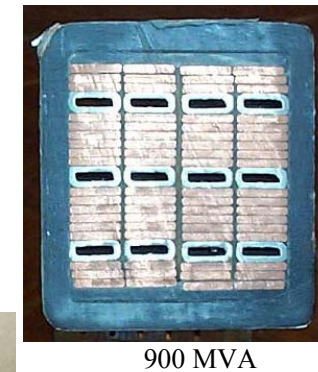
Avvolgimenti di statore

Nel caso di bobina a più spire, si hanno tutti e tre i tipi di isolamento:

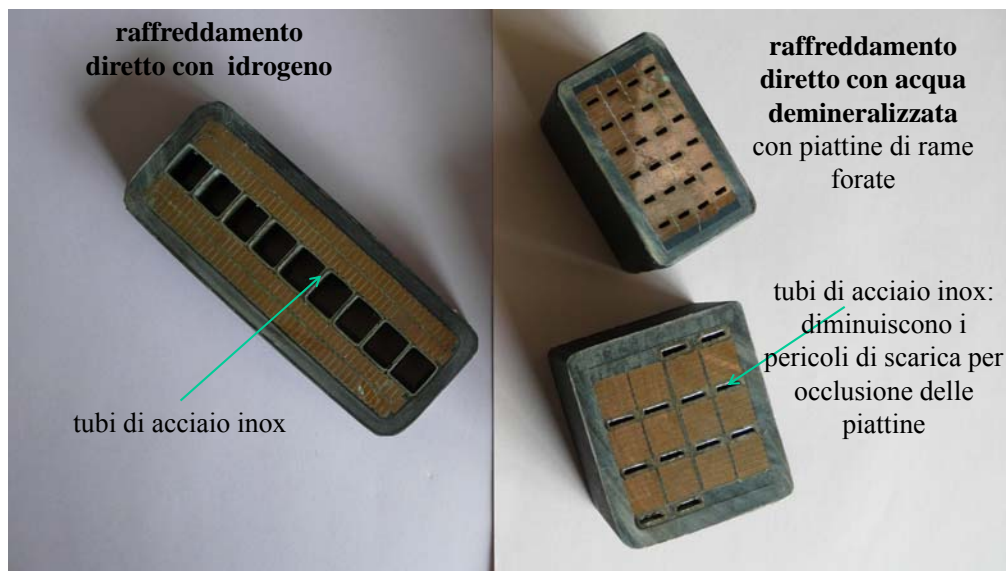
- 1) isolamento di conduttore ("strand"): pochi Volt,
- 2) isolamento di spira ("turn"): centinaia-migliaia di Volt,
- 3) isolamento verso massa ("ground"): migliaia di Volt, generalmente 15-20 kV per i generatori sincroni di elevata potenza, sia turbo che idro.



Esempi di sezione di avvolgimenti di statore



Esempi di sezione di avvolgimenti di statore

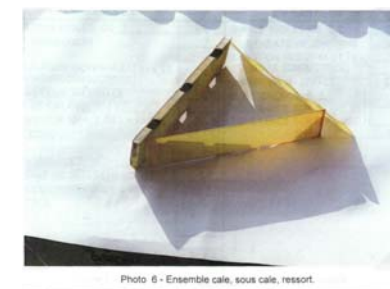
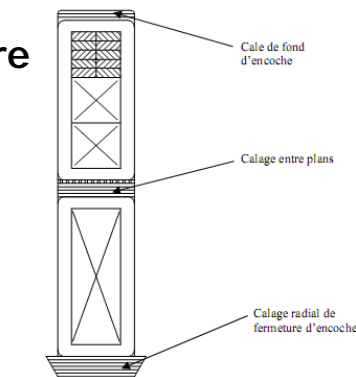
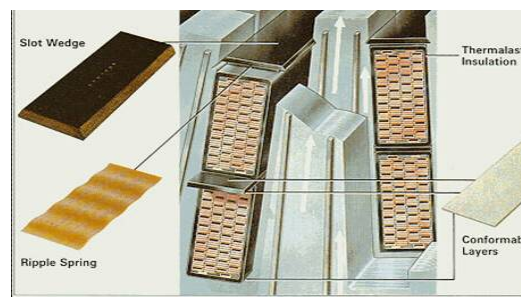


37

Biette per avvolgimenti di statore

Le biette sono utilizzate per limitare gli effetti dovuti alle forze radiali che si sviluppano tra le barre di statore all'interno di una cava, tra barra interna e nucleo e sulla barra esterna.

Possono essere in materiali diversi (isolanti o magnetici); spesso sono utilizzate le fibre di vetro.

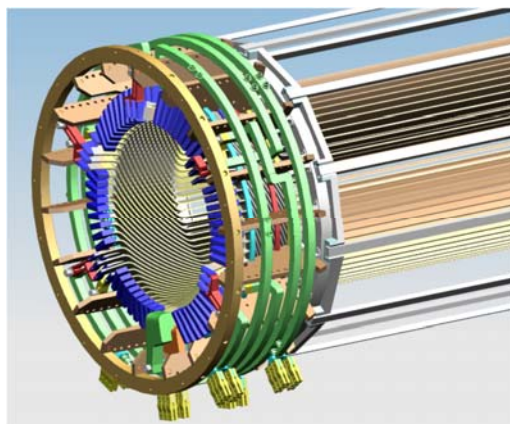


38

Sistema di bloccaggio delle testate statore

Le testate degli avvolgimenti statore sono supportate, nei confronti degli sforzi elettrodinamici che hanno luogo durante il funzionamento normale e/o in caso di guasto, da una opportuna struttura di supporto.

Questo sistema di supporto comprende diverse mensole fatte di lastre di vetroresina e collegate tra loro per mezzo di anelli in fibre di vetro per formare una struttura compatta.



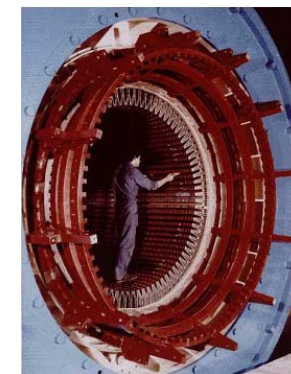
39

Sistema di bloccaggio delle testate statore

Le testate dell'avvolgimento statore sono fissate a questa struttura per mezzo di legature in filato di fibra di vetro, intrecciate tra le barre dell'avvolgimento e gli anelli di supporto; le legature sono impregnate con resina epossidica.

La grande robustezza e l'eccezionale flessibilità della struttura risultante evita il successivo allentamento in servizio, sia in caso di funzionamento normale sia in caso di guasto.

Questa struttura di ancoraggio rende possibile, grazie alla sua concezione, una espansione differenziale assiale tra pacco e avvolgimento, mentre impedisce ogni altro tipo di movimento delle testate (si dice che l'avvolgimento può respirare longitudinalmente, ma non radialmente).



40

Alternatore da 350 MVA in aria

Alcune delle informazioni precedentemente riportate sono relative a un alternatore a 2 poli da 350 MVA raffreddato in aria.

Le parti attive di questo generatore sincrono sono caratterizzate da:

- Avvolgimento statore raffreddato indirettamente.
- Nucleo statore raffreddato direttamente in senso radiale.
- Avvolgimento rotore raffreddato direttamente in senso assiale.
- Isolamento avvolgimento statore di classe F con temperature di classe B.
- Sistema di eccitazione completamente statico (con una ridondanza del 100% sia per la parte di potenza sia per il controllo).
- Possibilità di accoppiamento sia a turbine a gas sia a turbine a vapore con le conseguenti caratteristiche costruttive (basamento nel caso di turbine a gas, supporti a cavalletto nel caso di turbine a vapore).

