



La macchina sincrona (3° parte): raffreddamento, eccitatrici, impedenza sincrona, curve di prestazione limite, motore sincro

Lucia FROSINI

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

1

L. Frosini

Raffreddamento degli idro-alternatori

Gli alternatori idraulici sono generalmente raffreddati in aria (almeno fino a una certa potenza): il rotore funge anche da ventilatore, perciò sono autoventilati.

Fanno eccezione gli alternatori idraulici delle centrali di pompaggio: poiché in questi casi si può avere l'inversione della velocità dell'alternatore, è necessaria una ventilazione assistita con elettroventilatori, per assicurare l'efficacia del raffreddamento in ogni condizione.

Al di sopra di 300 MVA, per macchine a pochi poli, può essere previsto in aggiunta il raffreddamento ad acqua demineralizzata negli avvolgimenti di statore (analogo a quello previsto per i turbo-alternatori oltre una certa potenza).

Per macchine a molti poli, essendo la superficie disperdente maggiore, generalmente è sufficiente un raffreddamento ad aria.

Infine, in alcuni casi è possibile estendere il raffreddamento ad acqua anche negli avvolgimenti di rotore (sempre per idro-alternatori).

2

L. Frosini

Raffreddamento dei turbo-alternatori

I turboalternatori, a seconda della loro potenza e di scelte progettuali, possono presentare il seguente tipo di raffreddamento:

- ☀ in aria (fino a 450÷500 MVA al massimo);
- ☀ in idrogeno (la pressione dell'idrogeno è generalmente a 3÷5 atmosfere);
- ☀ in idrogeno + acqua demineralizzata nell'avvolgimento di statore.

Per potenze fino a 450÷500 MVA, a parità di potenza, la macchina raffreddata in idrogeno risulta più piccola e più costosa rispetto a quella in aria.

Il raffreddamento in idrogeno presenta un rendimento più stabile al variare del carico.

L'idrogeno allo stato puro (98%) non è infiammabile, mentre diventa potenzialmente esplosivo quando la sua purezza è inferiore al 75%: per questo motivo è necessario un sistema di circolazione opportuno per mantenere l'idrogeno al di sopra di un certo limite di purezza e a determinati valori di pressione, umidità e temperatura. La CO₂ è utilizzata come gas pesante per rimuovere l'aria prima di introdurre idrogeno.

3

L. Frosini

Raffreddamento dei turboalternatori

I principali vantaggi del raffreddamento in **aria** sono rappresentati da:

- requisiti di sicurezza non condizionati dalla presenza dell'idrogeno;
- assenza di impianti per l'idrogeno, la CO₂ e le tenute d'olio;
- attività di gestione, controllo e manutenzione della macchina semplificate;
- tempi di montaggio e per le attività pre-operazionali e d'avviamento ridotti.

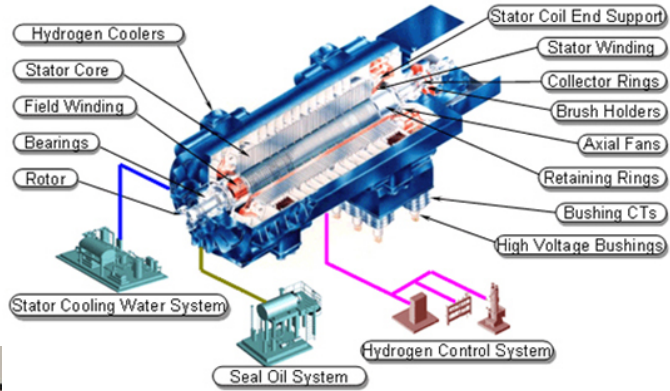
Il raffreddamento in **idrogeno** invece ha i seguenti vantaggi rispetto all'aria:

- Coefficiente di conducibilità termica 7 volte maggiore e coefficiente di convezione 1,35 maggiore, con conseguente capacità di trasferire il calore molto più efficace;
- Riduzione delle perdite per attrito e ventilazione, grazie alla densità pari circa a un decimo di quella dell'aria;
- Riduzione della contaminazione ambientale e riduzione del degrado elettrico degli isolanti per effluvi e scariche parziali, grazie all'assenza di ossigeno e umidità.

4

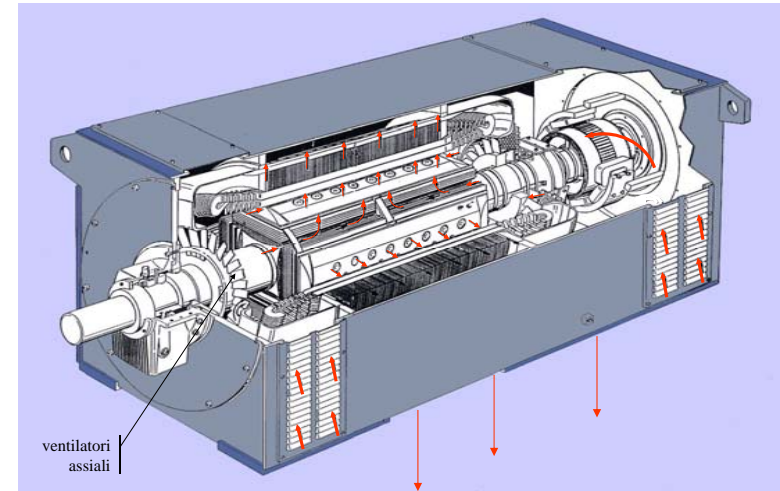
Raffreddamento dei turboalternatori

Diverse parti di un generatore con raffreddamento a idrogeno



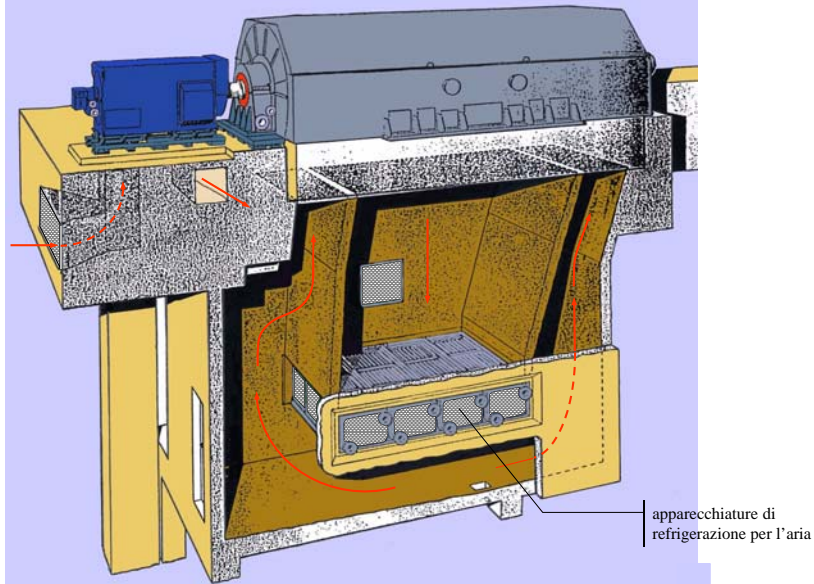
Esempi di sezioni di avvolgimento di statore

Raffreddamento dei turboalternatori



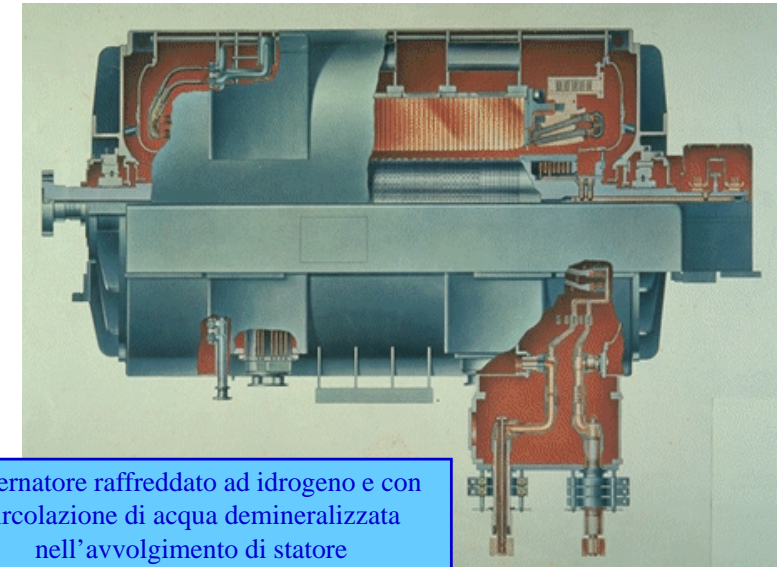
Generatore sincrono a 4 poli con ventilazione bilaterale ad aria (2 ventilatori assiali e canali radiali nel nucleo magnetico)

Raffreddamento dei turboalternatori



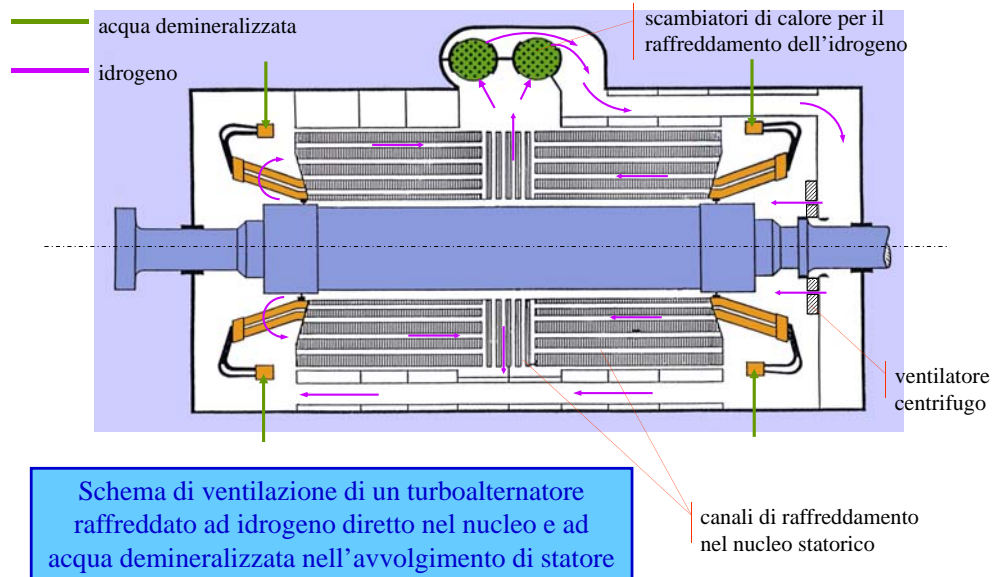
Schema di raffreddamento in aria di un turboalternatore
l'aria di raffreddamento circola nelle camere di fondazione della macchina

Raffreddamento dei turboalternatori



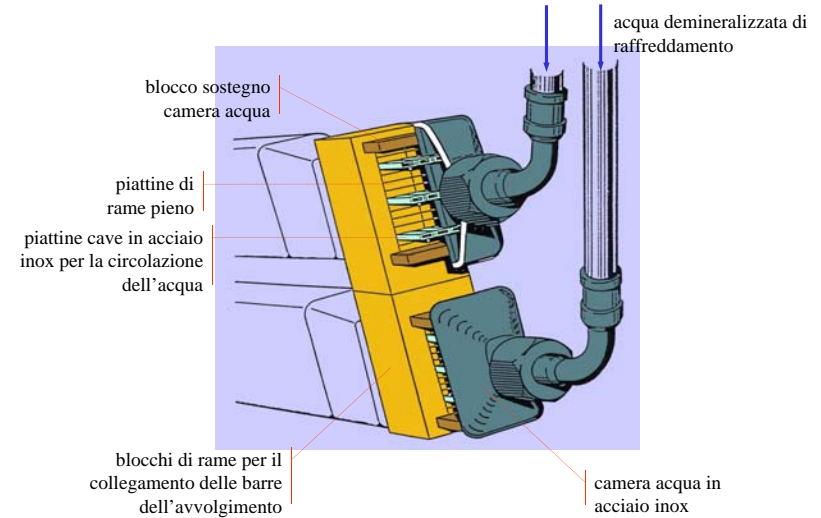
Alternatore raffreddato ad idrogeno e con circolazione di acqua demineralizzata nell'avvolgimento di statore

Raffreddamento dei turboalternatori



9

Raffreddamento dei turboalternatori



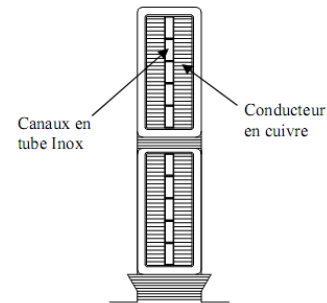
Avvolgimento statorico raffreddato ad acqua

10

Raffreddamento diretto a idrogeno

Negli alternatori con avvolgimenti di statore raffreddati direttamente a idrogeno, l'idrogeno circola assialmente al centro delle barre di statore dentro tubi in acciaio inox amagnetico.

Questi tubi sono in contatto termico con i conduttori di rame, ma sono isolati elettricamente da questi.



11

Raffreddamento diretto ad acqua

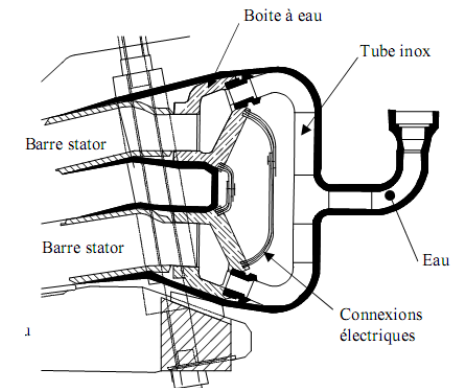
Il raffreddamento diretto ad acqua dell'avvolgimento di statore prevede circolazione d'acqua all'interno di un certo numero di conduttori cavi (che sono generalmente di rame, ma possono essere anche in acciaio inox) all'interno delle barre statoriche.

Con questo sistema, il punto più caldo dell'avvolgimento è mantenuto al di sotto degli 80°C, con densità di corrente da 6 a 10 A/mm².

Ogni barra di statore comprende conduttori pieni e conduttori cavi.

A ciascuna estremità delle barre, tutti i conduttori sono collegati insieme in un alloggiamento in rame o in acciaio inox.

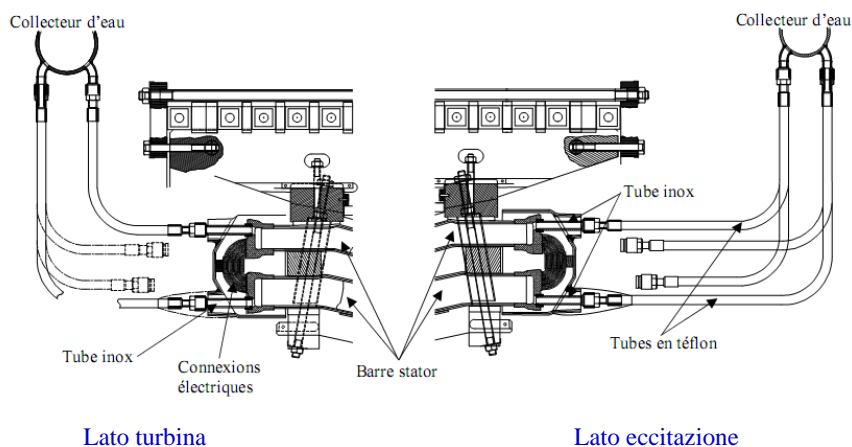
La conduttività dell'acqua deve essere mantenuta a un valore inferiore a 0,2 μS/cm.



12

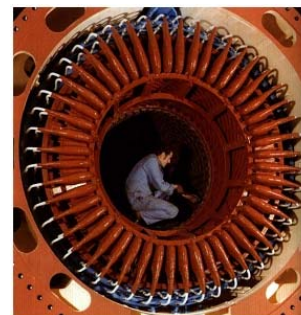
Raffreddamento diretto ad acqua

Particolari del sistema di raffreddamento diretto ad acqua sulle due testate di un alternatore da 1300 MVA:



13

Raffreddamento diretto ad acqua



Particolari di avvolgimenti di statore con raffreddamento diretto ad acqua.



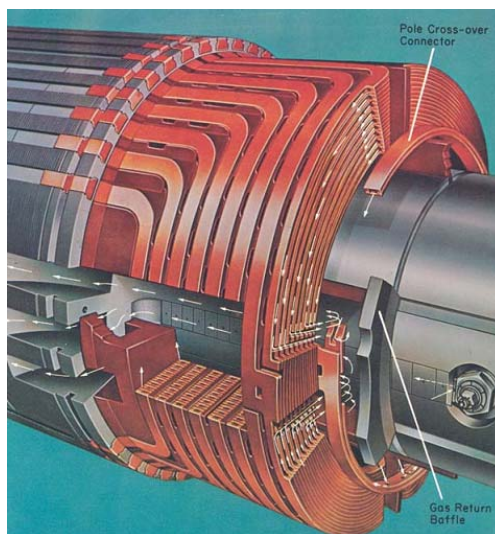
14

Sistemi di eccitazione

Esistono sostanzialmente tre tipi di sistemi di eccitazione:

- con dinamo (ormai in disuso),
- eccitazione statica,
- eccitazione brushless.

In un turboalternatore a due poli, l'avvolgimento di eccitazione è costituito da due semiavvolgimenti polari simmetrici e perfettamente identici (geometricamente e elettricamente). I due semiavvolgimenti sono collegati in serie da una connessione interpolare posta sotto la cappa di blindaggio, dal lato degli anelli collettori.



15

Sistemi di eccitazione

Gli estremi degli avvolgimenti di eccitazione fanno capo a due anelli collettori, isolati tra loro e rigidamente calettati sull'albero.

Le spazzole (che sono ferme) servono per il collegamento al sistema di eccitazione in corrente continua:



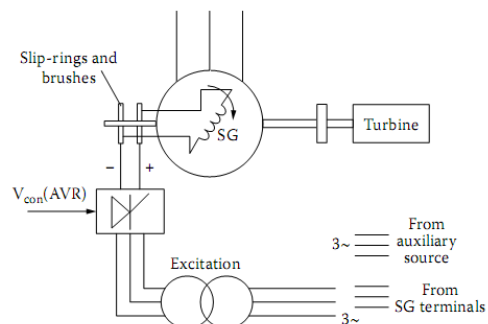
Questo vale per i sistemi di eccitazione con dinamo (ormai in disuso) e per quelli con eccitazione statica, mentre i sistemi di eccitazione brushless (come dice il nome) non fanno uso delle spazzole.

16

Eccitazione statica

Il sistema di eccitazione statico è costituito da un gruppo statico a tiristori, che converte in tensione continua la tensione alternata trifase dell'alternatore stesso o di una rete ausiliaria.

Il gruppo statico è alloggiato in uno o più armadi posti nelle immediate vicinanze dell'alternatore.



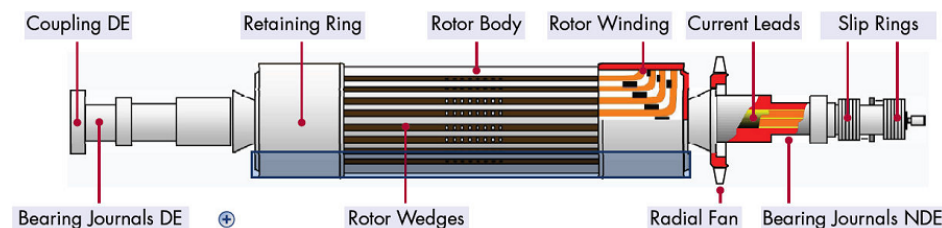
Questo tipo di eccitazione è solitamente utilizzato nei turboalternatori accoppiati a turbine a gas e negli idro-alternatori per centrali di pompaggio.

17

Eccitazione statica

Rispetto al metodo utilizzato in passato, costituito da una dinamo principale eccitata a sua volta da una dinamo ausiliaria, entrambi coassiali con l'alternatore, il gruppo statico offre diversi vantaggi:

- si riducono le dimensioni assiali della macchina;
- maggior grado di affidabilità;
- maggiore rendimento;
- migliore regolazione della corrente di eccitazione (tempi di risposta più veloci).



18

Eccitazione brushless

Un altro sistema di eccitazione, tuttora utilizzato, è il cosiddetto brushless, costituito da un generatore sincrono ausiliario, accoppiato coassialmente, senza spazzole, con l'alternatore.

Questo generatore ausiliario ha l'avvolgimento induttore fermo (sullo statore) e l'indotto trifase rotante, la cui corrente alternata viene raddrizzata tramite un ponte di diodi (a sua volta rotante) e quindi inviata agli avvolgimenti di eccitazione dell'alternatore principale, senza necessità di spazzole.

Nel sistema di eccitazione brushless, l'avvolgimento di indotto ruota insieme ai diodi e agli avvolgimenti di eccitazione dell'alternatore principale (sono tutti coassiali e solidali con l'albero).

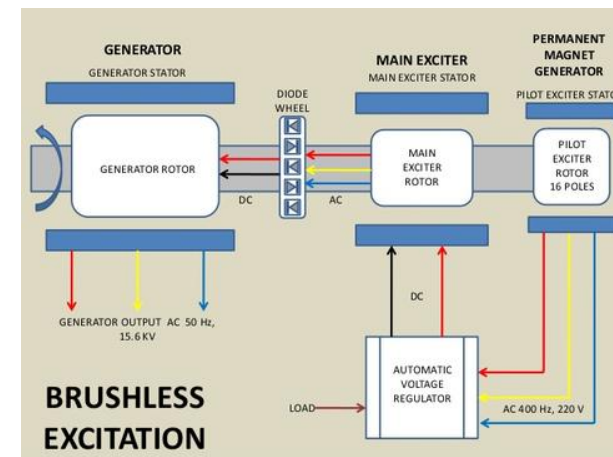
In questo modo il collegamento elettrico tra eccitatrice e avvolgimenti di eccitazione principale avviene senza l'impiego di spazzole striscianti.

19

Eccitazione brushless

La generazione del campo magnetico rotante parte dal **generatore pilota a magneti permanenti**, che è una macchina sincrona con magneti permanenti sul rotore.

Il rotore del generatore pilota ruota, perché è solidale all'albero del generatore principale e quindi della turbina, ed è dotato di magneti permanenti: esso genera un campo magnetico rotante, ad una frequenza f_1 data dal prodotto della velocità di rotazione del rotore in giri al minuto (n) per il numero di paia poli del rotore del generatore pilota (pp_1) diviso 60.



20

Eccitazione brushless

Quindi sugli avvolgimenti trifase di statore del **generatore pilota** si inducono delle **f.e.m. alternate alla frequenza f_1** .

Il regolatore automatico di tensione (Automatic Voltage Regulator, AVR) converte la tensione alternata in tensione continua e alimenta gli avvolgimenti di statore dell'**eccitatrice principale**, che ha un numero di poli pp_2 .

La corrente continua che scorre negli avvolgimenti di statore dell'eccitatrice principale genera un campo magnetico fisso.

Il **rotore dell'eccitatrice principale è dotato di avvolgimenti trifase**: esso ruota a una velocità n all'interno di un campo magnetico fisso, pertanto nei suoi avvolgimenti si induce una f.e.m. dovuta al fatto che c'è una velocità relativa tra il campo magnetico fisso e gli avvolgimenti rotanti.

21

Eccitazione brushless

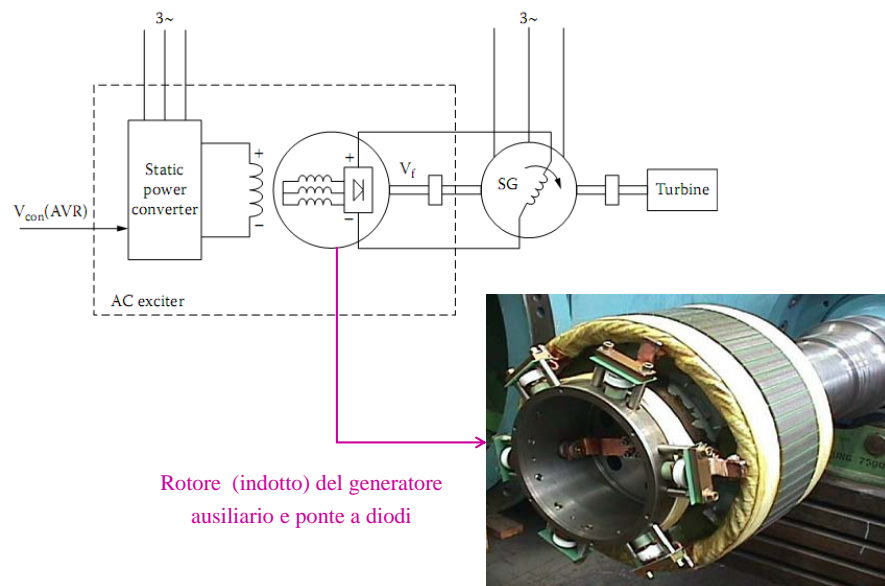
Questa **tensione è alternata con frequenza f_2** , proporzionale al numero di paia poli pp_2 : essa viene **convertita in tensione continua tramite un raddrizzatore a diodi**, che è collegato direttamente (senza spazzole, ossia brushless) agli avvolgimenti di rotore dell'eccitatrice principale e ruota a velocità n .

La tensione continua arriva agli avvolgimenti di rotore del generatore principale (sincrono), che ruota a velocità n , e di conseguenza produce un campo magnetico rotante che induce una tensione alternata nell'avvolgimento trifase del generatore principale, ad una frequenza f_3 che dipende dal numero di paia poli pp_3 del generatore principale.

In generale, il generatore pilota brushless non è sempre presente in questo tipo di eccitatrice, in quanto può essere sostituito da altri dispositivi, tuttavia questa configurazione è quella più frequentemente usata.

22

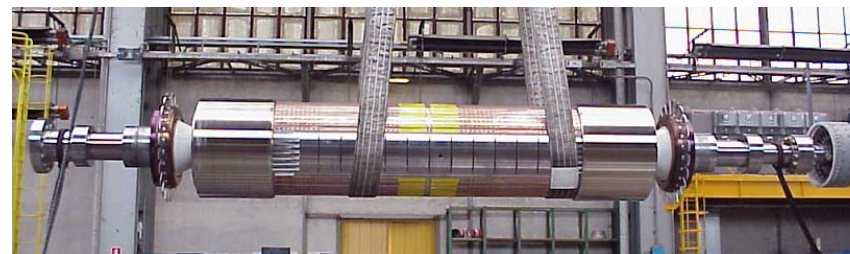
Eccitazione brushless



23

Eccitazione

Rotore a due poli con eccitatrice brushless:



In tutti i casi, l'eccitazione dell'alternatore deve far sì che la corrente possa variare entro limiti piuttosto ampi, sia per mantenere la tensione al valore voluto al variare del carico (si vedano le caratteristiche di regolazione, più avanti), sia per sopperire ai casi di funzionamento anomalo (ad es. è necessario agire con una rapida diseccitazione quando all'alternatore viene tolto bruscamente il carico).

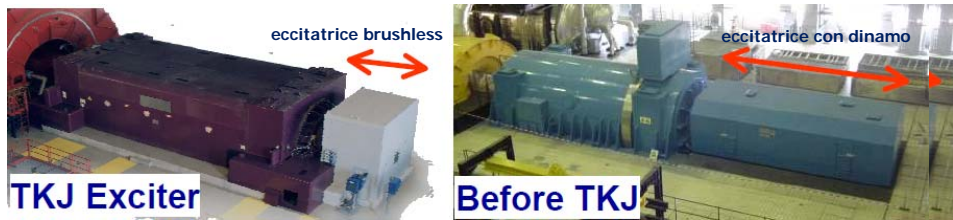
Per questo è sempre presente un regolatore di tensione automatico (AVR).

24

Eccitazione

L'eccitatrice statica è generalmente utilizzata nei paesi industrializzati in cui non ci sono problemi di rete ed ha il vantaggio di una velocità di risposta immediata, poiché la tensione è subito quella richiesta dall'AVR (costanti di tempo nulle). Richiede ovviamente una sostituzione periodica delle spazzole (sistema di eccitazione ad anelli, con contatti striscianti).

L'eccitazione brushless era preferita, in particolare attorno agli anni '80, perché non richiede la sostituzione periodica delle spazzole (non sono presenti). È stata molto utilizzata nelle situazioni in cui era preferibile installare la macchina senza avere vincoli di manutenzione, a causa della mancanza di personale specializzato.



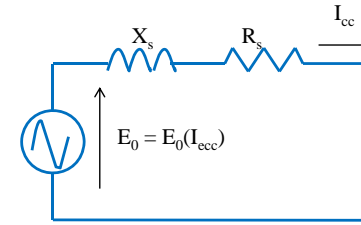
25

Determinazione dell'impedenza sincrona

La resistenza ohmica può essere determinata misurando direttamente la resistenza di una fase dell'alternatore.

Per determinare X_s si osserva che, se si fa funzionare l'alternatore con i morsetti chiusi in corto circuito, la tensione ai morsetti è necessariamente nulla.

Indicando con I_{cc} la corrente che circola nelle fasi dell'alternatore, si ha:



$$E_0 = R_s I_{cc} + jX_s I_{cc} = Z_s I_{cc}$$

Quindi l'impedenza sincrona può essere determinata tramite il seguente rapporto:

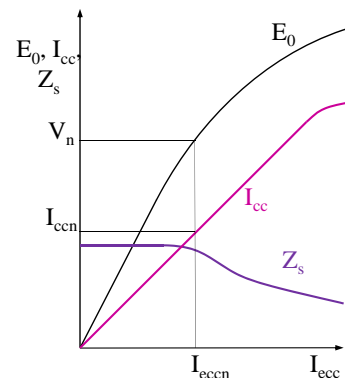
$$Z_s = \frac{E_0}{I_{cc}}$$

26

Determinazione dell'impedenza sincrona

Per determinare sperimentalmente l'impedenza sincrona, prima si fa funzionare l'alternatore a vuoto e si rileva l'intera caratteristica di magnetizzazione, misurando con un voltmetro la successione dei valori che la tensione a vuoto assume, facendo crescere gradualmente la corrente di eccitazione da zero fino al massimo valore che può raggiungere.

Dopodiché si chiudono i morsetti in corto circuito attraverso 3 amperometri di resistenza trascurabile e, facendo ancora crescere per gradi la corrente di eccitazione, si rilevano i valori che vengono assunti corrispondentemente dalla corrente di corto circuito I_{cc} : così si ottiene la caratteristica di corto circuito dell'alternatore, che presenta un andamento quasi sempre rettilineo.



27

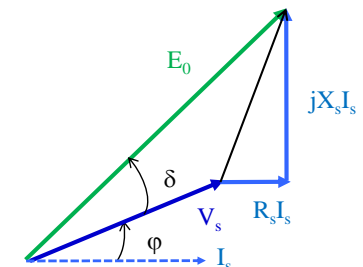
Determinazione dell'impedenza sincrona

Facendo il rapporto tra le ordinate corrispondenti delle due caratteristiche trovate, si ottengono i valori dell'impedenza sincrona Z_s , da attribuire a ciascuna fase dell'alternatore, per ciascun valore di I_{ecc} .

L'impedenza sincrona assume un andamento costante per tutto l'intervallo lineare della caratteristica a vuoto, per poi decrescere (a causa della saturazione del ferro).

Nota la resistenza R_s , si determina X_s e si hanno quindi tutti gli elementi che definiscono il triangolo fondamentale dell'alternatore.

Nota: la caratteristica di corto circuito è lineare fino a correnti di statore pari a diverse volte quella nominale, ovvero fino a che il circuito magnetico non incomincia a saturare.



28

Osservazioni sull'impedenza sincrona

La reattanza sincrona X_s qui considerata è quella non satura secondo l'asse diretto (X_d non satura).

Si definisce anche una reattanza sincrona secondo l'asse in quadratura (X_q), che, nei turboalternatori, è di poco inferiore alla X_d (spesso, in prima approssimazione, considerata uguale).

La differenza tra la X_d e la X_q è data dalla diversa riluttanza che il flusso incontra lungo l'asse polare e lungo l'asse interpolare: nei turboalternatori, nella zona interpolare, c'è una piccola anisotropia dovuta alle cave di rotore.

Al contrario, negli idro-generatori la differenza tra X_d e X_q è molto marcata ($X_q = 0,5 \div 0,75 X_d$).

29

Caratteristiche di regolazione

Quando l'alternatore funziona collegato a una rete a tensione costante, la corrente di eccitazione non può rimanere costante, ma deve essere variata in modo che, per ogni valore di I_s e φ , la tensione indotta sia tale da mantenere costante la tensione V_s ai morsetti della macchina.

La caratteristica di regolazione è la curva che indica come deve essere variata la corrente di eccitazione I_{ecc} in funzione della corrente erogata I_s e per un certo valore del fattore di potenza $\cos\varphi$, per avere tensione costante ai morsetti V_s .

Esisterà una caratteristica per ogni valore del fattore di potenza $\cos\varphi$ e, con apposite prove, si potrà rilevare una famiglia di caratteristiche, tutte relative allo stesso valore di tensione ai morsetti V_s e aventi l'andamento qualitativo illustrato nella figura seguente. Tutte le caratteristiche partono dallo stesso punto a vuoto, la cui ordinata I_{e0} rappresenta il valore della corrente di eccitazione necessaria per avere, a vuoto, la tensione ai morsetti V_s fissata.

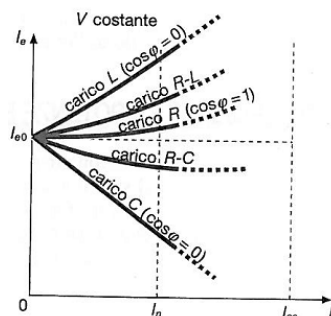
30

Caratteristiche di regolazione

Si osserva in particolare che:

➤ per carichi induttivi, ohmico-induttivi e ohmici, la corrente di eccitazione deve aumentare all'aumentare della corrente di carico, in quanto la reazione di indotto smagnetizzante tende a diminuire la tensione: occorre aumentare l'eccitazione per contrastare la diminuzione di flusso;

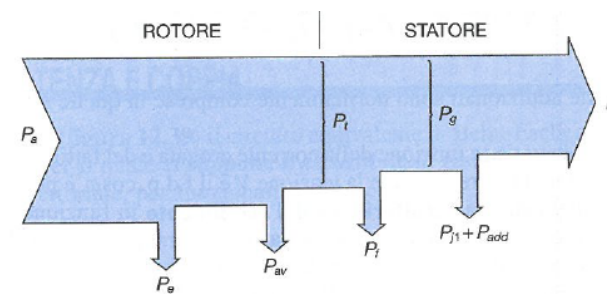
➤ per carichi capacitivi e ohmico-capacitivi, la corrente di eccitazione deve diminuire all'aumentare della corrente di carico, in quanto la reazione di indotto magnetizzante tende ad aumentare la tensione: occorre ridurre l'eccitazione per contrastare l'aumento di flusso magnetico.



31

Perdite nel generatore sincrono

Nota: per potenza nominale di un alternatore si intende la sua potenza apparente.



Le perdite di potenza in un alternatore sono date da:

- ☀ P_{ecc} = potenza assorbita dall'eccitatrice, nel caso di eccitazione coassiale: sono dipendenti dalla corrente di eccitazione. Nel caso di eccitazione statica, la potenza di eccitazione è comunque una potenza perduta, sebbene non sia prelevata all'asse della macchina.
- ☀ P_{av} = perdite meccaniche per attrito e ventilazione: si possono ritenere costanti, in quanto dipendenti dalla velocità. Queste perdite sono minori nel caso di raffreddamento in idrogeno piuttosto che in aria.

32

Perdite nel generatore sincrono

- ☀ P_{fe} = perdite nel ferro per isteresi e correnti parassite, imputabili quasi interamente allo statore: non sono costanti in quanto dependono dal flusso e quindi sono influenzate dalla reazione di indotto, dalla corrente erogata e dal fattore di potenza (sono maggiori quando il carico è induttivo).
- ☀ P_{jl} = perdite nel rame statorico, dependenti dalla corrente erogata al quadrato;
- ☀ P_{add} = perdite addizionali, normalmente inglobate in quelle per effetto Joule oppure espresse come una percentuale di esse. Sono dovute alla non uniforme distribuzione della corrente nei conduttori di statore e a perdite per correnti parassite nelle parti metalliche vicine agli avvolgimenti. Non sono facilmente calcolabili, ma possono essere determinate con appositi programmi di calcolo.

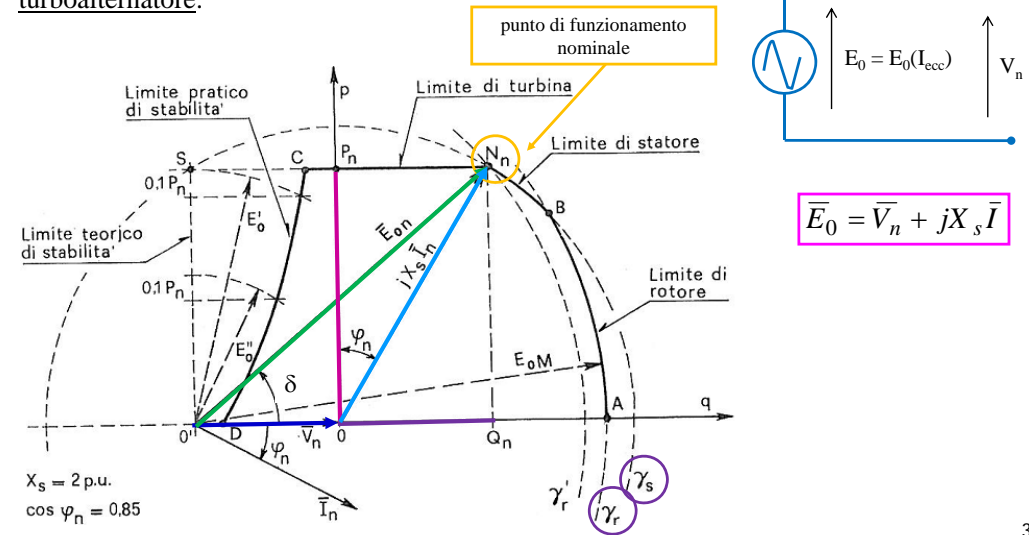
P_t è la potenza trasmessa da rotore a statore, P_g è la potenza generata.

La potenza assorbita a vuoto è data da: $P_0 = P_{av} + P_{fe} + P_{ecc}$

33

Curve delle prestazioni limite dei generatori

Vogliamo capire il seguente diagramma, relativo a un turboalternatore:



34

Curve delle prestazioni limite dei generatori

Il punto N_n rappresenta il funzionamento nominale, a potenza, fattore di potenza e tensione nominali:

$$O'O = \bar{V}_n \quad \text{tensione nominale di rete (= ai morsetti di macchina)}$$

$$O'N_n = \bar{V}_n + jX_s \bar{I}_n = \bar{E}_{0n} \quad \text{f.e.m. a vuoto a carico nominale}$$

$$OP_n = X_s I_n \cos \varphi_n \quad \text{segmento proporzionale alla potenza attiva erogata } P_n$$

$$OQ_n = X_s I_n \sin \varphi_n \quad \text{segmento proporzionale alla potenza reattiva erogata } Q_n$$

Dato qualunque punto N, le coordinate di N secondo gli assi p e q forniscono in opportuna scala la potenza attiva e reattiva della macchina sincrona, mentre il segmento ON, nella stessa scala, fornisce la potenza apparente.

35

Curve delle prestazioni limite dei generatori

La circonferenza γ_s con centro in O e raggio:

$$ON_n = X_s I_n$$

rappresenta il luogo dei punti di funzionamento a corrente nominale e quindi a potenza nominale.

Poiché la corrente I_n è la massima ammessa in servizio continuo, la circonferenza γ_s rappresenta la curva di funzionamento al limite termico degli avvolgimenti di statore (limite di statore).

Trascurando la saturazione, la f.e.m. a vuoto E_0 risulta proporzionale alla corrente di eccitazione: le circonferenze con centro in O' sono dunque i luoghi geometrici dei punti di funzionamento a corrente di eccitazione costante.

La circonferenza γ_r di raggio E_{0M} ($> E_{0n}$), che corrisponde alla massima corrente di eccitazione ammessa in servizio continuo, rappresenta la curva di funzionamento al limite termico dell'avvolgimento rotorico (limite di rotore).

36

Curve delle prestazioni limite dei generatori

Si è supposto che esista un margine di eccitazione rispetto alla condizione nominale di funzionamento ($E_{0M} > E_{0n}$).

Se tale margine non è previsto nel funzionamento del turboalternatore ($E_{0M} = E_{0n}$), allora la curva di funzionamento al limite di rotore è la circonferenza γ'_r che passa per N_n ; il segmento curvilineo N_nB si riduce al punto N_n .

Il limite superiore della potenza attiva erogabile è la massima potenza della turbina P_n , che è minore della potenza nominale dell'alternatore.

Nel diagramma, la retta N_nC di ordinata P_n , parallela all'asse q , rappresenta quindi il **limite di turbina**.

Nel funzionamento in sovraeccitazione (corrente I in ritardo rispetto alla tensione V_n : $Q > 0$, primo quadrante), si nota che la macchina è in grado di erogare potenza reattiva anche $> Q_n$, corrispondente alle condizioni nominali di funzionamento, a condizione che venga ridotta la potenza attiva.

37

Curve delle prestazioni limite dei generatori

Nella tratta AB è più condizionante il sovrariscaldamento rotorico, nella tratta BN_n è più condizionante il sovrariscaldamento statorico.

Per stabilire le possibili condizioni di funzionamento in sottoeccitazione (corrente I in anticipo rispetto alla tensione V_n : $Q < 0$, secondo quadrante), occorre determinare qual è la massima potenza reattiva capacitiva che la macchina è in grado di assorbire dalla rete, erogando contemporaneamente potenza attiva.

Queste condizioni limite sono dettate da esigenze di stabilità.

La potenza attiva erogata è data da:
$$P = 3 \frac{E_0 V_n}{X_s} \sin \delta$$

Assegnate le tensioni E_0 e V_n , la massima potenza attiva teoricamente erogabile dal generatore si ha per $\delta = \pi/2$:

$$P_{\max} = 3 \frac{E_0 V_n}{X_s}$$

38

Curve delle prestazioni limite dei generatori

Per $\delta > \pi/2$ il sistema diventa instabile.

Quindi la condizione di funzionamento limite teorica per il massimo assorbimento di potenza capacitiva si realizza per $\delta = \pi/2$.

Nel diagramma, il luogo geometrico degli estremi del vettore E_0 per cui $\delta = \pi/2$ è la retta $O'S$: per tutti questi punti, la potenza reattiva capacitiva è proporzionale al segmento OO' e pari a:

$$Q_{c,l} = 3 \frac{V_n^2}{X_s}$$

Ricordiamo che il fattore di proporzionalità, con cui moltiplicare i segmenti di questo diagramma, è: $3V_n/X_s$

La potenza attiva massima erogabile con $\delta = \pi/2$ è fornita dalla f.e.m. E_0 letta nella scala delle potenze:
$$P_{\max} = E_0 \cdot 3 \frac{V_n}{X_s}$$

39

Curve delle prestazioni limite dei generatori

Così, se ad esempio $E_0 = E'_0 = O'S$, la potenza attiva erogabile è pari alla potenza nominale di turbina P_n .

In pratica, sappiamo che il funzionamento stabile è possibile solo con angoli δ un po' inferiori a $\pi/2$, per consentire sovraccarichi improvvisi senza l'uscita di passo.

Con questo criterio viene costruita la curva **limite di stabilità pratica CD**.

La curva limite di stabilità pratica CD evidenzia che la potenza reattiva assorbibile in sottoeccitazione decresce al crescere della potenza attiva erogata.

Nel caso di turboalternatori, a cui questo diagramma si riferisce, essa si riduce a un piccolo valore nel funzionamento con la massima potenza attiva.

Ciò giustifica la regola seguita da molti esercenti di centrali di NON far funzionare in sottoeccitazione i turboalternatori.

40

Curve delle prestazioni limite dei generatori

Quando la potenza attiva è nulla (marcia a vuoto o come compensatore sincrono), la potenza reattiva assorbibile diviene più elevata: tuttavia, essa va tenuta un po' inferiore al valore teorico, anche per cautelarsi contro il rischio di autoeccitazione (fenomeno potenzialmente pericoloso per cui la macchina, in assenza di eccitazione, può presentare ai morsetti un valore di tensione anche molto elevato, in caso di elevata impedenza capacitiva del carico, ad es. se la linea trifase è aperta per lavori).

Molti progettisti prescrivono che la corrente di eccitazione non deve ridursi al di sotto del 10% del valore nominale.

Inoltre, il funzionamento prolungato in sottoeccitazione dei turboalternatori è sconsigliato perché in queste condizioni il ferro di rotore non è saturato e perciò si modifica l'andamento di dispersione alle estremità dello statore: può avvenire che intensi flussi dispersi investano le testate degli avvolgimenti e le piastre di estremità di statore, provocando eccessivi riscaldamenti localizzati.

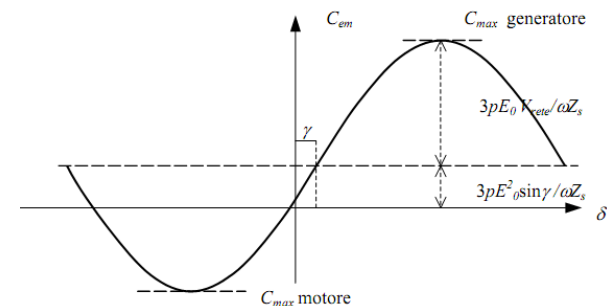
Nota: negli idro-generatori, la curva di stabilità è in generale diversa da quella dei turbo-alternatori, essendo le reattanze lungo l'asse diretto e lungo l'asse in quadratura di valore diverso.

41

Funzionamento del motore sincrono

Abbiamo visto che per angoli di carico $\delta < 0$ (E_0 in ritardo rispetto al vettore V_s), il segno della coppia si inverte e la macchina funziona da motore:

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



Questo accade quando la macchina sincrona, allacciata a una rete elettrica, è sottoposta a una coppia resistente (frenante).

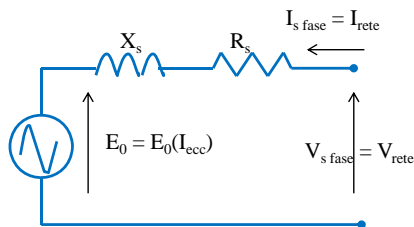
Tale coppia tenderà momentaneamente a far rallentare il rotore, per cui **la f.e.m. indotta E_0 si porterà in ritardo rispetto alla tensione di fase della rete V_s .**

Il rotore terminerà di rallentare quando la coppia motrice da esso sviluppata uguaglierà quella resistente del carico più le perdite.

42

Funzionamento del motore sincrono

Il diagramma vettoriale viene impostato in modo diverso, ossia con l'idea di rappresentare una potenza elettrica assorbita positiva, anziché una potenza erogata negativa (convenzione degli utilizzatori):



Con questa interpretazione (convenzione degli utilizzatori), la tensione applicata V_s deve vincere la forza controelettromotrice E_0 e la caduta di tensione interna, pari a circa $X_s I_s$ (trascurando la resistenza R_s):

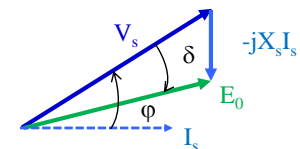
$$\bar{E}_0 \approx \bar{V}_s - jX_s \bar{I}_s$$

43

Funzionamento del motore sincrono

In queste condizioni, oltre ad assorbire potenza attiva dalla rete, il motore sincrono assorbe o genera potenza reattiva induttiva, a seconda del valore assunto dall'angolo di sfasamento φ della corrente I_s rispetto alla tensione V_s : questo sfasamento dipende dalla corrente di eccitazione e quindi dal valore della tensione indotta E_0 .

Se la macchina è **sottoeccitata** ($E_0 < V_s$), essa **assorbe potenza reattiva induttiva** dalla rete, perché la corrente I_s ritarda sulla tensione di fase V_s .

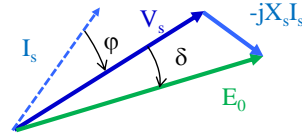


Infatti, supposto che V_s rimanga sempre costante (imposta dalla rete), se il motore sincrono è sottoeccitato, significa che il flusso magnetico di eccitazione è insufficiente, perciò occorrerà che esso assorba dalla rete potenza magnetizzante: di conseguenza la corrente risulterà in ritardo sulla tensione.

44

Funzionamento del motore sincrono

Se la macchina è **sovraeccitata** ($E_0 > V_s$), essa **assorbe potenza reattiva capacitiva** dalla rete, perché la corrente I_s è in anticipo sulla tensione di fase V_s .



Infatti, se il motore sincrono risulta sovraeccitato (flusso magnetico di eccitazione eccedente), occorrerà che esso assorba dalla rete della potenza smagnetizzante, ossia di segno opposto alla magnetizzante, ossia capacitiva: di conseguenza la corrente di indotto risulterà in anticipo sulla tensione.

45

Funzionamento del motore sincrono

Abbiamo visto che, fissata la tensione di rete, la potenza ELETTRICA attiva (assorbita dalla rete) è proporzionale al segmento $I_s \cos \varphi$:

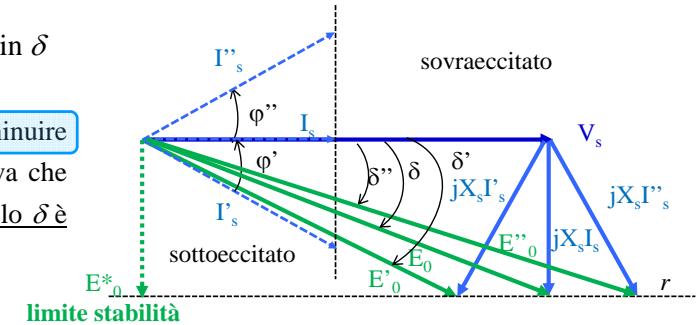
$$P = 3 \cdot V_s \cdot I_s \cos \varphi$$

Perciò il diagramma seguente è disegnato per un valore di $P = \text{costante}$.

Dalla formula della potenza MECCANICA si ha invece che, a parità di altre condizioni e fissato un valore di P , deve rimanere costante il prodotto $E_0 \sin \delta$:

$$P \approx 3 \cdot p_p \frac{E_0 \cdot V_s}{Z_s} \cdot \sin \delta$$

Quindi **il $\sin \delta$ deve diminuire** **se aumenta E_0** . Si osserva che la diminuzione dell'angolo δ è favorevole alla stabilità.



46

Funzionamento del motore sincrono

Trascurando le perdite, la potenza meccanica sviluppata dal motore uguaglia la potenza elettrica attiva assorbita dal motore.

Quindi, se rimane costante la coppia resistente applicata all'albero, nel diagramma vettoriale dovrà rimanere costante il segmento rappresentativo della potenza attiva $I_s \cos \varphi$.

Di conseguenza, se si fa variare la corrente di eccitazione in modo che vari l'ampiezza di E_0 , varierà anche il suo angolo di carico δ in modo tale che il vettore che rappresenta E_0 conservi costantemente il suo estremo sulla retta parallela a V_s .

La corrente assorbita dal motore risulta necessariamente diversa nelle tre condizioni illustrate nel grafico precedente, sia in modulo che in fase: essa è infatti determinata dalla caduta interna di tensione ($X_s I_s$) che deve verificarsi nella macchina per colmare la differenza vettoriale tra la tensione applicata V_s e la f.e.m. E_0 .

47

Funzionamento del motore sincrono

Quindi, al variare della corrente di eccitazione, varia E_0 e varia anche I_s , perché deve variare opportunamente l'ampiezza del vettore $jX_s I_s$.

Così, aumentando semplicemente l'eccitazione del motore, la corrente assorbita, che inizialmente era sfasata in ritardo di un angolo φ' rispetto alla tensione, si porta in fase con questa.

Rimane cioè invariata la sua componente attiva (perché rimane costante la potenza attiva assorbita), mentre si riduce a zero la componente reattiva.

Il valore di I_s per $\varphi = 0$ è il valore minimo che può assumere la corrente assorbita dal motore per far fronte alla potenza costante fissata P , che viene prelevata dalla rete con un fattore di potenza unitario.

In queste condizioni sono ridotte al minimo anche le perdite per effetto Joule e perciò il motore lavora nelle condizioni di massimo rendimento elettrico.

48

Funzionamento del motore sincrono

Per tutte le eccitazioni inferiori a questa, il motore lavora in regime sottoeccitato e la corrente assorbita aumenta, mentre il fattore di potenza diminuisce, perché la corrente si sfasa in ritardo rispetto alla tensione.

Il fatto contrario accade invece, per quanto riguarda lo sfasamento della corrente, se l'eccitazione del motore viene aumentata portando il motore a lavorare in regime sovraeccitato: la corrente aumenta in modulo e il fattore di potenza diminuisce, ma la corrente passa in anticipo rispetto alla tensione. Quindi:

- per valori di eccitazione inferiori (rispetto a $\varphi = 0$), il motore assorbe dalla rete corrente magnetizzante, comportandosi come un carico ohmico-induttivo (regime sottoeccitato);
- per valori di eccitazione superiori (rispetto a $\varphi = 0$), il motore eroga in rete corrente magnetizzante, comportandosi come un carico ohmico-capacitivo (regime sovraeccitato): questa è una caratteristica peculiare del motore SINCRONO.

49

Curve a V del motore sincrono

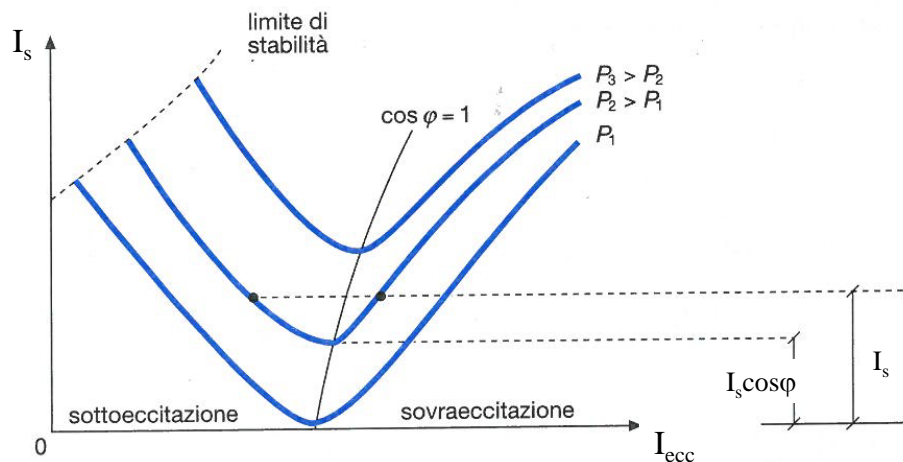
Per un fissato valore di potenza attiva P, si può disegnare l'andamento della corrente assorbita dal motore sincrono in funzione della corrente di eccitazione I_{ecc} (o della f.e.m. E_0): l'andamento della curva assume la forma caratteristica, detta a "V", del motore sincrono.

Per potenza attiva nulla, ossia nel funzionamento a vuoto, si ha una curva a "V" il cui vertice tocca l'asse delle ascisse (corrente assorbita nulla, $I_s = 0$): questa condizione corrisponde al diagramma vettoriale che si riduce ai due vettori V_s e E_0 uguali e sovrapposti, che si verifica nel momento in cui si fa il parallelo con la rete e la macchina non assorbe né eroga alcuna corrente.

Disegnando le curve per diversi valori di potenza attiva P, si osserva che il valore minimo di ciascuna curva si ottiene per $\cos\varphi = 1$.

50

Curve a V del motore sincrono



51

Funzionamento del motore sincrono

Collegando i vertici delle curve a "V", si ottiene la linea di funzionamento a $\cos\varphi = 1$, che determina i valori dell'eccitazione che si deve fornire alla macchina per realizzare un funzionamento con fattore di potenza unitario (e perciò col valore minimo della corrente assorbita) per le diverse potenze di carico P.

Ogni curva a "V" è limitata nel regime sottoeccitato da un valore minimo della E_0 , il quale corrisponde sui diagrammi vettoriali alla distanza della retta r dal vettore V_s ; questo valore di E_0^* definisce l'estremo limite di sottoeccitazione che si può raggiungere per una data potenza di carico P, senza far uscire la macchina dal limite di stabilità ($\delta = 90^\circ$).

Riprendendo il funzionamento della macchina come generatore, si può osservare che, se viene mantenuta costante la potenza attiva P erogata (cioè se viene mantenuta costante la coppia del motore primo che lo trascina), la corrente da esso erogata varia al variare di I_{ecc} secondo una curva a "V".

52

Funzionamento del motore sincrono

Tornando al funzionamento come motore, si osserva che, analogamente al funzionamento come generatore, questo si mantiene stabile per angoli di ritardo δ di E_0 rispetto alla V_s inferiori al valore limite di 90° (all'atto pratico, occorre tenersi sufficientemente lontani da questo limite, per evitare che un aumento accidentale di carico non faccia uscire il motore dal sincronismo).

Analizzando i tre casi considerati, si osserva che il regime di funzionamento del motore sincrono si mantiene tanto più lontano dal limite di stabilità quanto maggiore è l'eccitazione.

Infatti, per motore sovraeccitato (E''_0) l'angolo di carico δ è inferiore rispetto agli altri due casi, perciò in questo caso rimane ancora disponibile un margine di stabilità più ampio.

53

Funzionamento del motore sincrono

In generale, non è prudente diminuire l'eccitazione di un motore sincrono senza conoscere il margine di stabilità che rimane ancora disponibile, perché si corre il rischio di farlo uscire dal sincronismo.

Una semplice indicazione in proposito può essere fornita dal valore della corrente assorbita: se l'eccitazione è scarsa, anche una sua lieve diminuzione determina un forte aumento della corrente assorbita (curva a "V"), mentre un aumento dell'eccitazione produce una sensibile riduzione della corrente; se il motore è sovraeccitato, accade il fatto contrario.

Dalla relazione:

$$P \approx 3 \cdot p_p \frac{E_0 \cdot V_s}{Z_s} \cdot \sin \delta$$

si può anche osservare che un motore sincrono che lavora con un determinato carico P, presenta un margine di stabilità tanto più ampio quanto minore è la reattanza sincrona X_s .

54

Funzionamento del motore sincrono

Infatti, al diminuire di X_s , diminuisce l'angolo di carico δ che si richiede affinché il motore sviluppi la potenza P.

Inoltre, se la reattanza è piccola, diviene più grande la potenza massima al limite della stabilità:

$$P_{MAX} \approx 3 \cdot p_p \frac{E_0 \cdot V_s}{Z_s}$$

D'altra parte, se la reattanza X_s è troppo piccola, il motore diviene eccessivamente sensibile alle variazioni dell'eccitazione, ovvero le curve a "V" del motore risultano eccessivamente acute.

Il motore sincrono deve essere perciò costruito in modo che la reattanza interna abbia il giusto valore per conseguire un margine di stabilità sufficientemente elevato e avere nel contempo un campo di regolazione sufficientemente ampio.

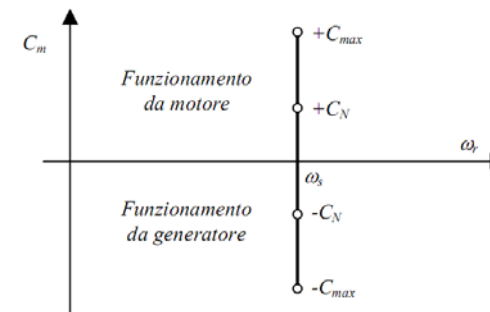
55

Funzionamento del motore sincrono

Proprietà fondamentale del motore sincrono è di ruotare a velocità assolutamente costante (velocità di sincronismo, che dipende esclusivamente dal valore della frequenza e dal numero di paia poli), a meno che il motore sia accoppiato ad un inverter.

La caratteristica meccanica è perciò costituita da un segmento verticale di valore C_{max} , al di sopra del quale il motore uscirebbe dal sincronismo.

Naturalmente la coppia nominale C_N è inferiore a quella massima ($C_N = 0,4 \div 0,6 C_{max}$).



Caratteristica coppia-velocità della macchina sincrona

I motori sincroni possono ruotare anche a velocità molto basse, in quanto il numero di poli può essere anche molto elevato.

56

Pregi e difetti del motore sincrono

Pregio principale del motore sincrono è di poter funzionare con **qualsiasi fattore di potenza**, poiché esso dipende esclusivamente dalla corrente di eccitazione.

Difetto principale è invece quello di **richiedere dei dispositivi particolari per il suo avviamento**, che rende l'operazione di avviamento molto più complessa rispetto ai motori asincroni. Questi dispositivi di avviamento possono essere costituiti da:

- motore asincrono di lancio (*pony motor*) della potenza di circa 5÷10% di quella del motore principale: porta il sincrono alla velocità di sincronismo, quindi l'asincrono viene scollegato dalla rete, mentre il sincrono viene collegato alla tensione di alimentazione e, successivamente, viene inserito il carico meccanico;
- avvolgimento a gabbia sul rotore (in pratica, il circuito smorzatore), per avviare il motore come se fosse un asincrono (motori autosincroni). In questo caso, la coppia di spunto può essere molto bassa, tale da consentire l'avviamento del motore sincrono solo a vuoto (l'avviamento asincrono di un motore sincrono è, in generale, un'operazione molto impegnativa);

57

Pregi e difetti del motore sincrono

- avviamento del motore sincrono tramite azionamento a frequenza variabile (a frequenza crescente): il motore parte da fermo (frequenza zero) e raggiunge gradualmente la velocità finale e quindi la piena frequenza.

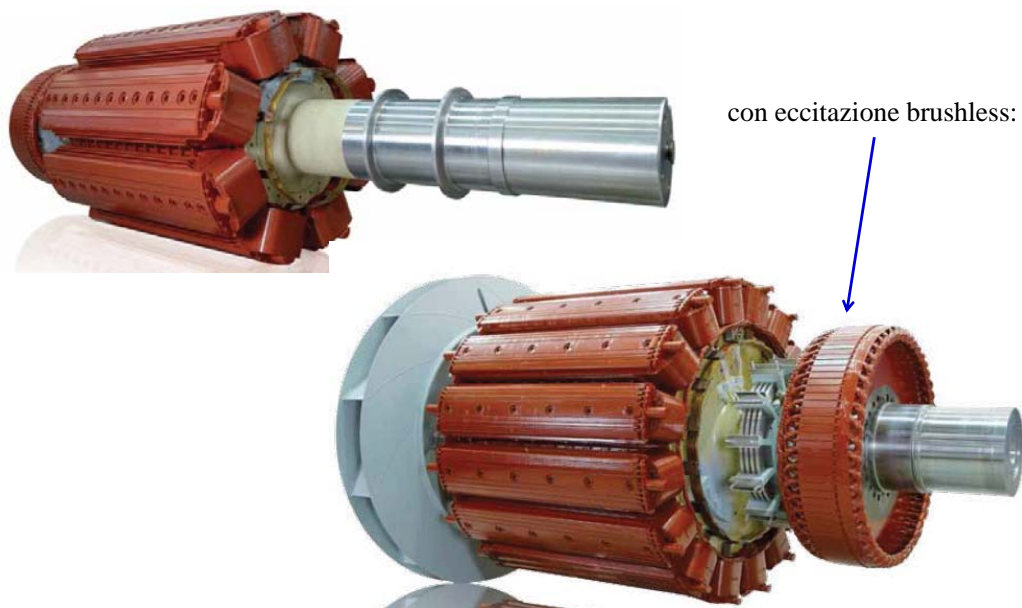
Il motore sincrono, a causa della difficoltà di avviamento e della sua costruzione, trova convenienza di impiego solo dove occorrono **grandi potenze (nell'ordine dei MW)** in funzionamento continuo, sia a velocità elevate (da 4 a 6 poli) sia a basse velocità di rotazione (da 8 poli in su).

Per grandi potenze, il rendimento del sincrono può superare quello dell'asincrono (circa dell'1%) e inoltre l'assorbimento di potenza a cosfi elevato (anche 99%) permette ad un impianto di assorbire maggiore potenza attiva a pari capacità delle linee elettriche.

Applicazioni di questi motori si possono trovare nelle industrie minerarie, petrolifere, metallurgiche, raffinerie, ecc. per azionare compressori, ventilatori, pompe, ecc.

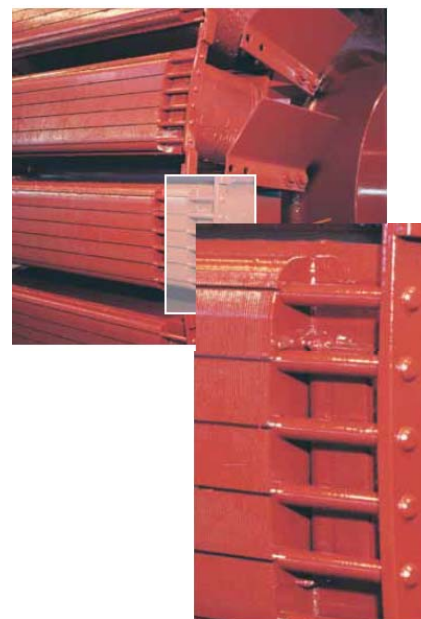
58

Esempi di rotori di motori sincroni



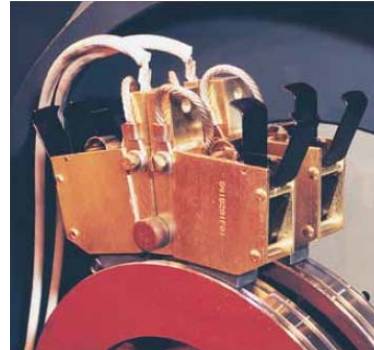
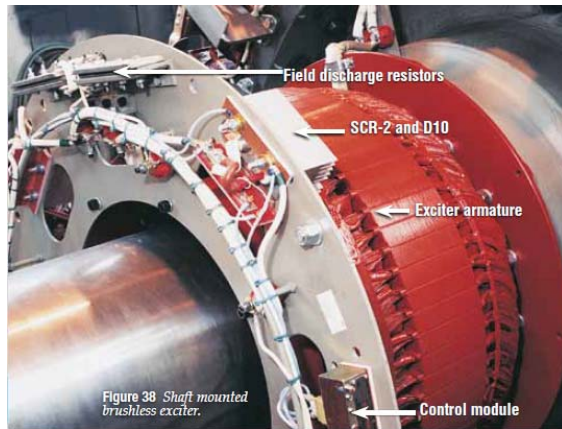
59

Avvolgimenti smorzatori



60

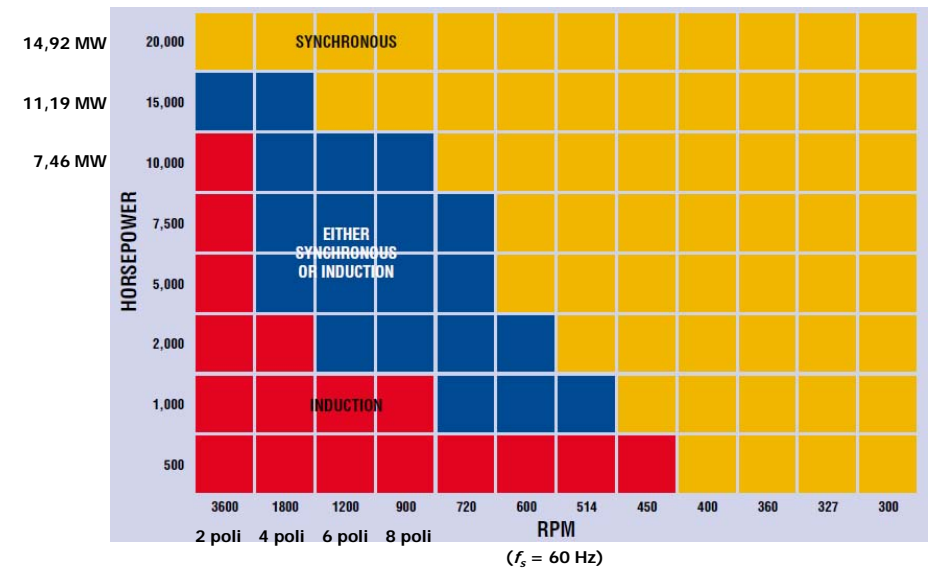
Eccitazione di motori sincroni



Collector rings and brushes are not required or used with brushless excitation.

51

Campo di applicazione dei motori sincroni



62

Osservazioni sulla stabilità e sulla X_s

Come già osservato, per migliorare la stabilità a regime di una macchina sincrona, si richiede una reattanza X_s bassa.

Un basso valore della reattanza X_s si può ottenere agendo sugli aspetti costruttivi, in particolare aumentando il traferro: in questo modo aumenta il valore della corrente di eccitazione necessaria per l'ottenimento della stessa tensione nominale a vuoto (aumentano le amperspire di rotore), diminuisce l'effetto della reazione smagnetizzante d'armatura e aumenta la corrente di corto circuito permanente.

Aumentando il traferro occorre quindi caricare di più il rotore (più rame, più perdite). In generale, al diminuire della X_s , corrisponde un aumento del costo della macchina.

Nota: per la stabilità dinamica, è invece decisiva la reattanza transitoria, che però non tratteremo in questo corso.

63