

MACCHINE SINCRONE TRIFASE

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Lo statore è costituito come quello della macchina asincrona trifase: è di materiale ferromagnetico laminato e nelle cave ricavate alla periferia del traferro è alloggiato un avvolgimento trifase percorso da correnti alternate. Per evitare la circolazione di correnti dovute a terne armoniche nelle f.e.m., l'avvolgimento di statore è solitamente collegato a stella. Il rotore in generale è di materiale ferromagnetico massiccio (eventualmente sono laminate le espansioni polari) ed è sede di un avvolgimento di eccitazione percorso da corrente continua. Si possono avere due diversi tipi di struttura di rotore: a poli lisci ed a poli salienti. La figura 1.1.a mostra il rotore di una macchina a poli lisci. L'avvolgimento di eccitazione (o di campo) è disposto nelle cave distribuite lungo la periferia del rotore. Il traferro ha spessore costante ed il circuito magnetico è isotropo. La figura 1.1.b mostra una macchina a poli salienti. L'avvolgimento di eccitazione è costituito da bobine avvolte sui corpi dei poli. Il traferro in questo caso ha spessore variabile ed il circuito magnetico è anisotropo; in particolare vengono evidenziati l'asse polare, in cui il traferro è minimo e l'asse interpolare, in cui il traferro è massimo.

L'avvolgimento di eccitazione, percorso dalla corrente continua i_e , crea un campo magnetico in modo tale che si possono distinguere successivamente un "polo nord" (flusso "uscente" dal polo) e un "polo sud" (flusso "entrante" nel polo). La distanza fra l'asse di un polo nord e di un polo sud misurata al traferro è pari al passo polare τ la cui espressione è la seguente, dove R è il raggio interno dello statore e p il numero di coppie di poli dell'avvolgimento:

$$\tau = \frac{\pi R}{p} \quad (1.1)$$

L'andamento spaziale del campo di eccitazione lungo la periferia del traferro risulta sinusoidale, a meno di armoniche superiori che è possibile trascurare in prima approssimazione. Nella macchina a poli lisci ciò viene ottenuto distribuendo opportunamente le cave o la corrente al traferro, nella macchina a poli salienti, sagomando le espansioni polari.

La figura 1.2 mostra parte del circuito magnetico di una macchina anisotropa, costituita da due poli e relativa corona d'indotto. Come si vede, il traferro lungo l'espansione polare non è costante passando dal valore minimo δ_0 , in mezz'ora dell'espansione polare, a quello di valore circa doppio agli estremi dell'espansione polare. La legge di variazione utilizzata è $\delta = \delta_0 / \cos(p\alpha)$, essendo p il

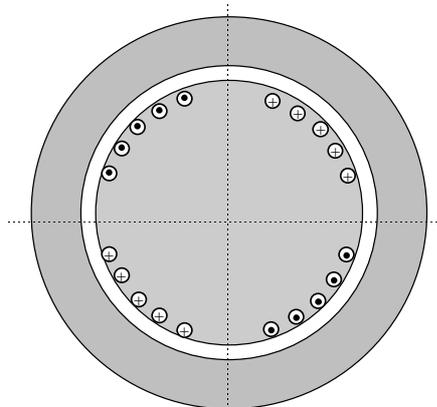


Fig. 1.1.a - Sezione di una macchina sincrona a poli lisci.

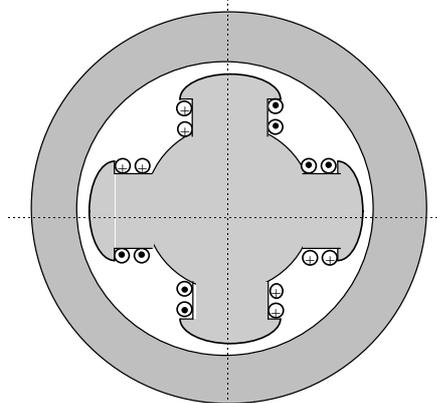


Fig. 1.1.b - Sezione di una macchina sincrona a poli salienti.

numero di coppie polari. Al di fuori delle espansioni polari il traferro assume valori estremamente elevati.

Quando si pone in rotazione il rotore alla velocità angolare costante ω_m , il campo di eccitazione, solidale col rotore, ruota al traferro alla velocità $\omega_c = \omega_m$. Il campo rotante così prodotto induce nell'avvolgimento trifase che è alloggiato nelle cave di statore un sistema trifase simmetrico di f.e.m., sinusoidali nel tempo con pulsazione ω data dalla seguente relazione:

$$\omega = p \omega_m \quad (1.2)$$

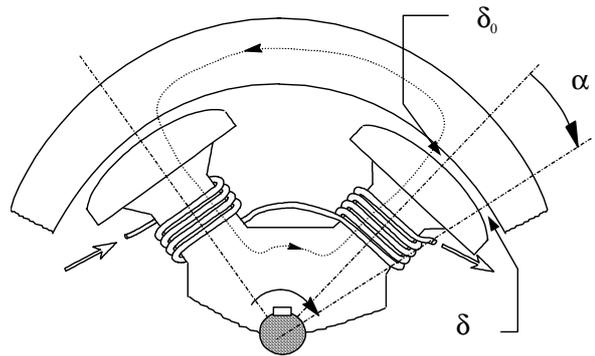


Figura 1.2

Se lo statore alimenta un carico equilibrato, esso diventa sede di tre correnti di pulsazione ω che producono un campo rotante statorico. Quindi (se il numero di coppie polari dello statore è uguale al numero di coppie polari del rotore) il campo rotante statorico ruota con velocità angolare $\omega_c = \omega/p = \omega_m$. **Il campo rotante statorico \widehat{B}_s risulta dunque immobile rispetto al campo rotante rotorico \widehat{B}_r e quindi il campo risultante è un campo che ruota al traferro con la velocità del rotore**, da cui il nome di macchina sincrona (\widehat{B}_s e \widehat{B}_r hanno la stessa velocità e si sommano)

Il funzionamento intuitivo della Macchina sincrona si può illustrare con la seguente “catena logica”:

$$i_r \rightarrow B_r \rightarrow \widehat{B}_r \rightarrow \hat{E}_s \rightarrow \hat{I}_s \rightarrow \widehat{B}_s \rightarrow \widehat{B} = \widehat{B}_s + \widehat{B}_r \quad (1.3)$$

$\omega_m (\equiv n')$ \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow

dove \wedge indica un sistema simmetrico (di tensioni) o equilibrato (di correnti), $\widehat{}$ indica il campo rotante ed i pedici s ed r indicano statore e rotore, rispettivamente.

La potenza meccanica fornita all'albero della macchina per vincere la resistenza della coppia elettromagnetica dovuta allo sfasamento fra campo statorico e campo rotorico, viene trasformata, a meno delle perdite interne della macchina, in potenza elettrica ceduta al carico collegato allo statore. La macchina funziona quindi da generatore e viene chiamata **alternatore**.

Si può dimostrare che per una macchina sincrona a poli lisci in rotazione a velocità costante (si suppongono valide le ipotesi di campo illustrate relativamente al campo rotante), la caratteristica tensione-corrente sulla prima fase di statore (e analogamente per le altre) ha la seguente forma (riferimenti associati con convenzione del generatore):

$$\underline{V} = -j X_s \underline{I} + \underline{E}_0$$

ove la reattanza sincrona X_s è una costante della macchina considerata e la tensione a vuoto E_0 dipende dalla corrente di eccitazione. La **curva di magnetizzazione (caratteristica a vuoto)** fornisce sperimentalmente la tensione ai morsetti di statore in funzione della corrente di eccitazione. A causa della saturazione del materiale ferromagnetico tale curva non è rettilinea.

Per alimentare l'avvolgimento viene utilizzata una sorgente esterna che viene collegata mediante un collettore ad anelli. Per potenze elevate vengono impiegate delle eccitatrici senza spazzole, costituite da una macchina sincrona con il circuito di eccitazione montato sullo statore ed il circuito d'armatura montato sull'albero del rotore (vedi figure). L'uscita trifase del generatore di eccitazione viene raddrizzata tramite un circuito raddrizzatore trifase pure montato sull'albero. La corrente continua così prodotta viene inviata al circuito di eccitazione principale. Quando il circuito di eccita-

zione è sostituito da magneti permanenti, si ottiene un sistema indipendente da qualsiasi sorgente di potenza elettrica esterna.

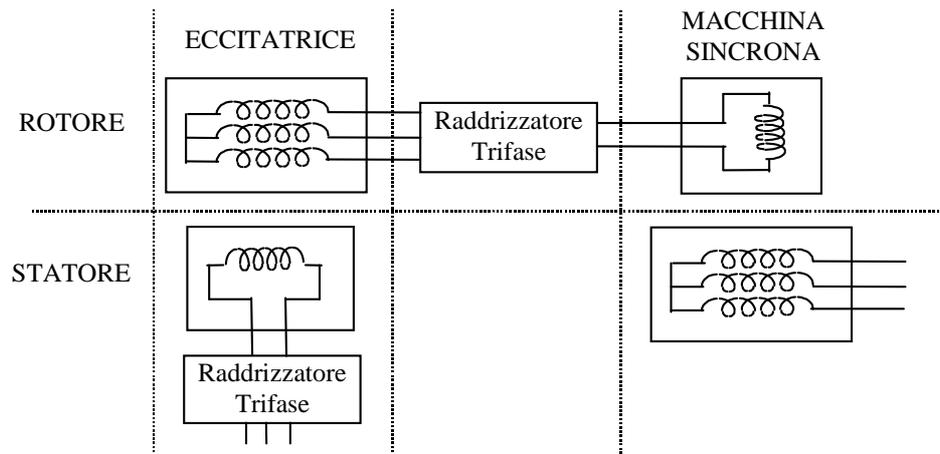


Figura 1.a. - Schema di macchina sincrona con eccitatrice

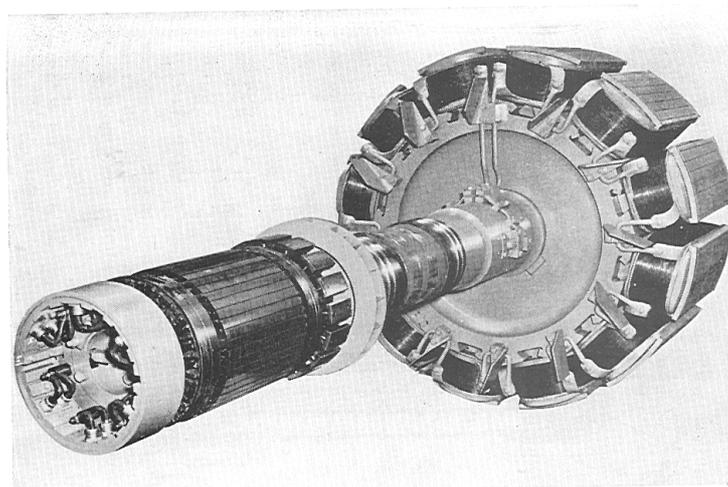


Figura 1.b - Rotore di macchina sincrona con eccitatrice coassiale.

PARALLELO CON UNA RETE TRIFASE DI POTENZA INFINITA

Si supponga di collegare l'avvolgimento statorico di una macchina sincrona ad una rete trifase, già alimentata da altri alternatori. Si supponga inoltre che la potenza di questi ultimi sia tale da poter considerare che il valore efficace e la frequenza della terna di tensioni concatenate della rete siano indipendenti dalle correnti assorbite dalla macchina sincrona che viene collegata (rete di potenza infinita). Per potere effettuare correttamente il parallelo con la rete di potenza infinita è necessario portare prima la macchina sincrona in un regime di funzionamento, a vuoto, in cui le tensioni concatenate presenti ai morsetti della macchina coincidano in valore efficace, frequenza e fase con quelle della rete. Se così non fosse infatti, alla chiusura dell'interruttore di collegamento della macchina con la rete si svilupperebbero nello statore della macchina sincrona delle correnti di valore elevato che potrebbero provocare la rottura della macchina stessa.

Con riferimento alla figura 2, la sequenza delle operazioni da eseguire per effettuare il parallelo è la seguente:

1. La macchina viene portata in rotazione, a vuoto, alla velocità di sincronismo imposta dalla frequenza di rete ($n = 60 f / p$) dal motore M che in questo caso deve fornire solo la coppia necessaria a vincere gli attriti interni della macchina.

2. Viene alimentato l'avvolgimento di eccitazione con una tensione tale da ottenere ai morsetti della macchina un sistema di tensioni concatenate avente una frequenza ed un valore efficace coincidenti con quelli della rete e misurati mediante i voltmetri V e V' ed i frequenzimetri f ed f'. La macchina opera ancora a vuoto e quindi ancora il motore M deve fornire solo la coppia necessaria per vincere gli attriti.

3. Si agisce sul motore M, con una regolazione fine della velocità, per portare tensioni concatenate di rete e di macchina a coincidere sia come frequenza che come fase, viene chiuso l'interruttore T ed il parallelo è concluso.

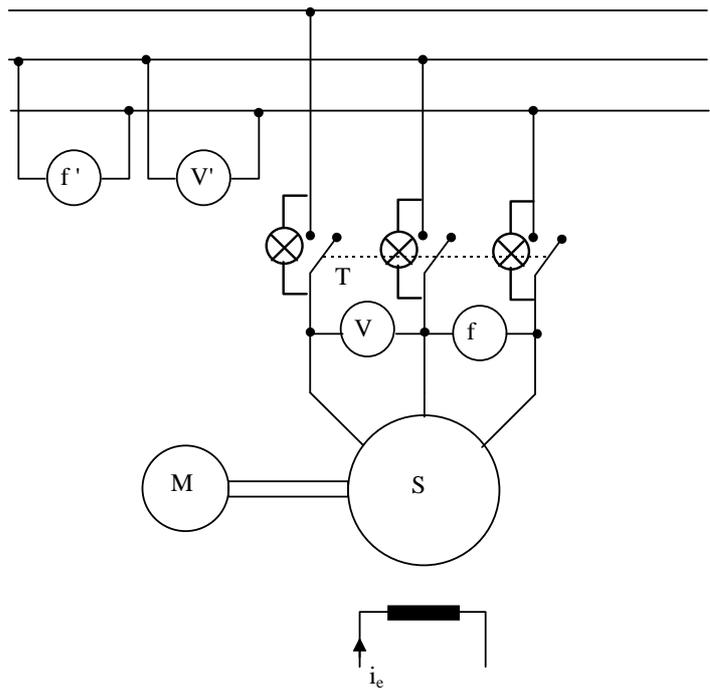


Figura 2 - Parallelo di una macchina sincrona (S) con una rete di potenza infinita.

Al termine delle operazioni di parallelo, la macchina sincrona è collegata alla rete, ma funziona ancora a vuoto, in quanto le f.e.m. indotte nelle fasi di statore uguagliano le tensioni concatenate e quindi le correnti nelle fasi di statore risultano nulle. A partire da questa condizione di funzionamento è possibile portare la macchina sincrona a funzionare come generatore, erogando potenza sia attiva che reattiva alla rete, oppure come motore, assorbendo potenza elettrica dalla rete, oppure come compensatore sincrono, erogando solo potenza reattiva alla rete.

Coppia elettromagnetica

È possibile ottenere una buona approssimazione della coppia elettromagnetica, considerando il bilancio energetico della macchina sincrona e trascurando le perdite nel ferro e nel rame di statore. In tal caso infatti, visto che la potenza elettrica assorbita dal rotore viene interamente dissipata per effetto Joule nell'avvolgimento di rotore, tutta l'energia elettrica assorbita in un periodo dall'avvolgimento di statore, viene trasformata in energia meccanica erogata all'albero. Si può dimostrare che la coppia elettromagnetica risulta:

$$C_e = -3 \frac{p}{\omega} \frac{VE_0}{X_s} \sin(\delta)$$

ove δ è lo sfasamento della tensione a vuoto E_0 rispetto alla tensione V . Esso viene chiamato “angolo di carico” corrispondente alla condizione di funzionamento considerata. Quando l'angolo di carico è positivo (E_0 in anticipo rispetto a V), la coppia risulta negativa, cioè la macchina assorbe potenza meccanica ed eroga potenza elettrica attiva alla rete trifase (**funzionamento da generatore**). Quando l'angolo di carico è negativo (E_0 in ritardo rispetto a V), la coppia è positiva, cioè la macchina eroga potenza meccanica ed assorbe potenza elettrica attiva dalla rete trifase (**funzionamento da motore**). Quando l'angolo di carico è nullo (E_0 in fase con V), la coppia è nulla, cioè la macchi-

na non scambia né potenza meccanica né potenza elettrica attiva, può però scambiare potenza elettrica reattiva con la rete trifase; si dice allora che la macchina funziona da compensatore sincrono.

Funzionamento da generatore

Se, tramite il motore M, viene fornita potenza meccanica al rotore; ha inizio un transitorio in cui il rotore tende ad accelerare e le f.e.m. indotte nelle fasi di statore si sfasano rispetto alle tensioni delle rete. Circola corrente nell'avvolgimento di statore e si crea una coppia elettromagnetica resistente. La condizione di regime viene raggiunta quando la coppia elettromagnetica resistente uguaglia la coppia meccanica fornita al rotore. La potenza meccanica assorbita all'albero dalla macchina viene trasformata in potenza elettrica ed erogata alla rete. È quindi possibile variare la potenza elettrica reattiva erogata alla rete, semplicemente variando la corrente di eccitazione della macchina.

Funzionamento da motore

Se il motore M viene sostituito col carico meccanico che si vuole trascinare, al rotore della macchina viene applicata una coppia resistente; ha inizio un transitorio in cui il rotore tende a rallentare e le f.e.m. indotte nelle fasi di statore si sfasano rispetto alle tensioni delle rete. Circola corrente nell'avvolgimento di statore e si crea una coppia elettromagnetica motrice. La condizione di regime viene raggiunta quando la coppia elettromagnetica motrice uguaglia la coppia meccanica resistente applicata al rotore. La potenza elettrica assorbita dalla rete viene trasformata in potenza meccanica erogata all'albero della macchina. Il principale ostacolo nella applicazione del motore sincrono consiste nel valore nullo della coppia di spunto e quindi nella necessità di avere comunque a disposizione un motore di lancio. L'alternativa al motore di lancio esterno consiste nel sistema di autoavviamento. Quest'ultimo consiste in una speciale gabbia di scoiattolo che si sistema sul rotore entro cave ricavate sulle espansioni polari. Il motore si avvia quindi, una volta chiuso l'interruttore di rete, come un motore asincrono. Giunti in prossimità della velocità di sincronismo, si eccita il rotore, che viene accelerato da parte dell'avvolgimento statorico fino a raggiungere il sincronismo.

Funzionamento da compensatore sincrono

Se, agendo sulla tensione di alimentazione dell'avvolgimento di eccitazione, si aumenta la corrente di eccitazione della macchina, ha inizio un transitorio in cui le f.e.m. indotte nelle fasi di statore, pur restando in fase con le tensioni imposte dalla rete di alimentazione, le superano in valore efficace. Si genera quindi una corrente di armatura \underline{I} che risulta in quadratura ritardo rispetto alla f.e.m. \underline{E}_0 ed alla tensione \underline{V} (vedi figura 4.3.a). La potenza elettrica erogata è una potenza reattiva puramente induttiva: tutto avviene come se la macchina sincrona fosse un condensatore (**condensatore rotante**) la cui capacità può essere variata a piacere semplicemente variando la corrente di eccitazione. Viceversa, se si diminuisce la corrente di eccitazione, la f.e.m. \underline{E}_0 risulta minore della tensione \underline{V} e la corrente di armatura \underline{I} risulta in quadratura anticipo rispetto ad \underline{E}_0 e \underline{V} (vedi figura 4.3.b). La potenza elettrica erogata è una potenza reattiva puramente capacitiva; tutto avviene come se la macchina sincrona fosse un induttore (**induttore rotante**) la cui induttanza può essere variata a piacere semplicemente variando la corrente di eccitazione.

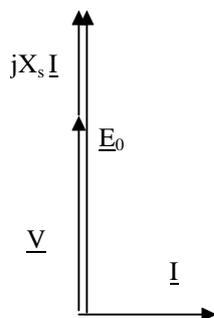


Figura 4.3.a - Diagramma fasoriale del condensatore sincrono

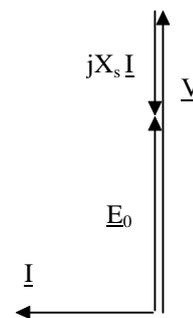


Figura 4.3.b - Diagramma fasoriale dell'induttore sincrono