

MACCHINE SINCRONE TRIFASE

1. 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.

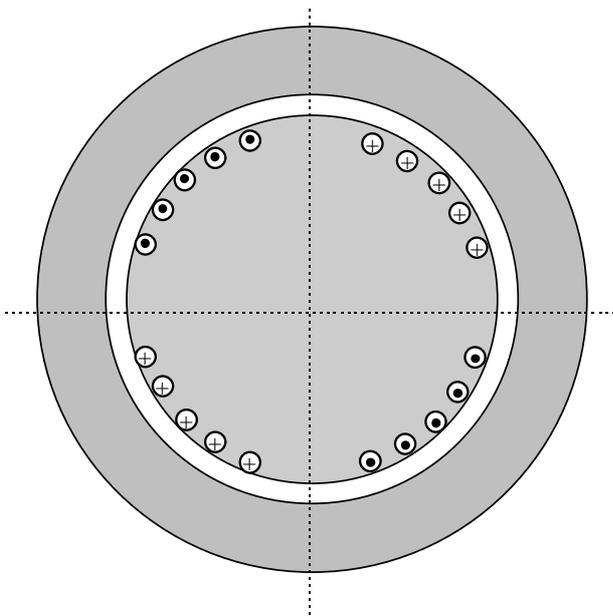


Figura 1.1.a
Macchina sincrona a poli lisci

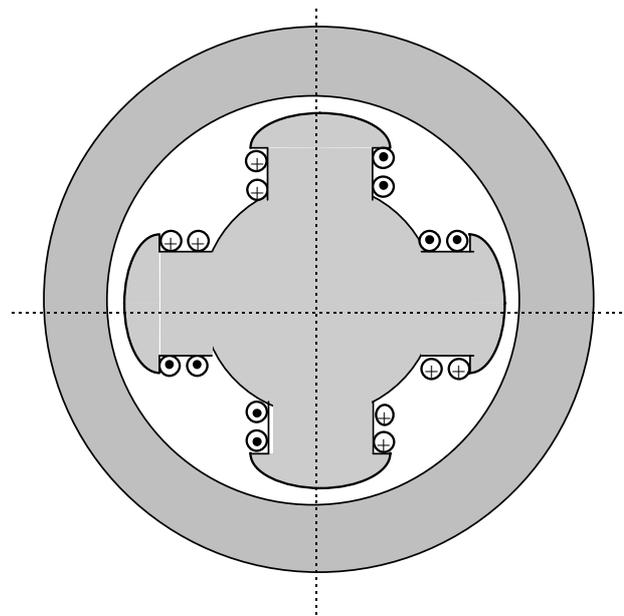


Figura 1.1.b
Macchina sincrona a poli salienti

L'avvolgimento di eccitazione, percorso dalla corrente continua i_e , crea una f.m.m. al traferro e quindi 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 mezzeria 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 numero di coppie polari. Al di fuori delle espansioni polari il traferro assume valori estremamente elevati.

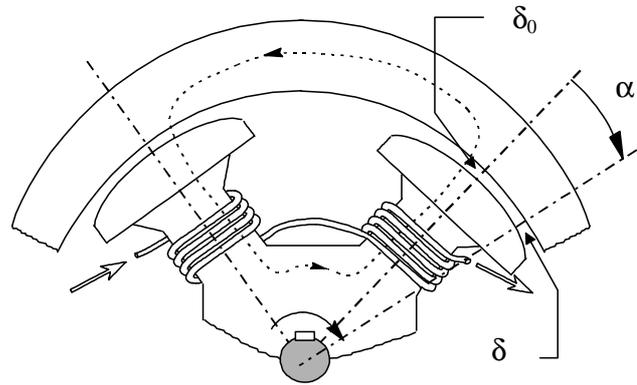


Figura 1.2

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:

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

Se lo statore alimenta un carico equilibrato, esso diventa sede di tre correnti di pulsazione ω che producono un campo rotante statorico. Inoltre, 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 risulta dunque immobile rispetto al campo rotante rotorico e quindi il campo risultante è un campo che ruota al traferro con la velocità del rotore**, da cui il nome di macchina sincrona. Nel funzionamento descritto, 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**.

Per alimentare l'avvolgimento viene utilizzata una sorgente esterna che viene collegata mediante un collettore ad anelli. Quando il circuito di eccitazione è sostituito da magneti permanenti, si ottiene un sistema indipendente da qualsiasi sorgente di potenza elettrica esterna.

2. MACCHINA A POLI LISCI

EQUAZIONI INTERNE

Si consideri una macchina sincrona a poli lisci (**macchina isotropa**) che funzioni con una velocità di rotazione costante ω_m e si suppongano valide le ipotesi di campo illustrate nel capitolo relativo al campo rotante. In particolare quindi si suppone che la macchina funzioni in assenza di saturazione del materiale ferromagnetico (**macchina non satura**). L'avvolgimento di eccitazione, alimentato con la tensione costante v_e è percorso dalla corrente costante i_e . Seguendo un procedimento già illustrato per il trasformatore e la macchina asincrona, l'applicazione della legge della induzione elettromagnetica all'avvolgimento di eccitazione porta a scrivere la seguente equazione dove R_e è la resistenza elettrica dell'avvolgimento.

$$v_e = R_e i_e \quad (2.1)$$

L'avvolgimento di statore è percorso da una terna equilibrata di correnti con pulsazione ω , il cui valore è legato alla velocità di rotazione del rotore dalla relazione (1.2). Il campo magnetico principale (quello associato alle linee di campo che attraversano il traferro e si concatenano quindi sia con l'avvolgimento di rotore che con quello di statore) varia sinusoidalmente lungo la periferia del traferro e ruota alla stessa velocità del rotore. Il flusso Φ della induzione magnetica che si concatena con la spira centrale della prima fase di statore varia quindi nel tempo con legge sinusoidale con pulsazione ω . Con riferimento alla figura 2.1 per i versi positivi delle grandezze, applicando la legge della induzione elettromagnetica ad una fase di statore, e trasformando secondo Steinmetz la relazione trovata (in cui compaiono solo grandezze sinusoidali isofrequenziali), si ottiene la seguente equazione per i fasori rappresentativi di tali grandezze.

$$\underline{V} = - (R + j\omega L_d) \underline{I} - j\omega \frac{N}{2} k_a \underline{\Phi} \quad (2.2)$$

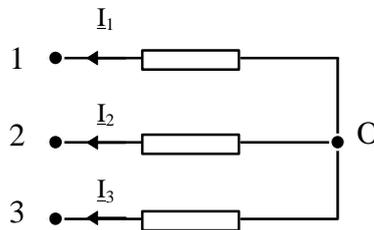


Figura 2.1 - Avvolgimento di statore.

Nella (2.1) R è la resistenza elettrica della fase, L_d il coefficiente di autoinduzione di dispersione della fase stessa (associato alle linee di campo che si concatenano solo con la fase considerata, non attraversando il traferro, bensì richiudendosi nel traferro stesso), N il numero totale di conduttori attivi per polo, k_a il fattore di avvolgimento, \underline{V} la tensione ai capi della fase (con riferimento alla figura 2.1, tensione del terminale accessibile rispetto al centro O), \underline{I} la corrente nella fase.

La relazione tra correnti di statore e di rotore e flusso principale, si ottiene ricordando che in ogni punto del traferro il prodotto del valore del campo magnetico e dello spessore del traferro, nelle ipotesi di campo adottate, risulta pari alla f.m.m. risultante. Quest'ultima è la somma della f.m.m. di statore (o di armatura, indicata con \underline{F}_a) e della f.m.m. di rotore (o di eccitazione, indicata con \underline{F}_e). Pertanto, l'espressione dell'equazione di accoppiamento magnetico delle fasi di statore e di rotore, avendo preso l'origine del sistema di riferimento nell'osservatore centrale della fase di statore, risulta:

$$\underline{F}_a + \underline{F}_e = R_t \underline{\Phi} \quad (2.3.a)$$

Dove R_t è la riluttanza al traferro che ha la seguente espressione (avendo indicato con δ lo spessore del traferro, con l la lunghezza assiale della macchina e con τ il passo polare):

$$R_t = \frac{\pi\delta}{2\tau\mu_0 l}$$

L'espressione della f.m.m. di armatura \underline{F}_a in funzione della corrente di una fase di statore, supponendo che l'avvolgimento di statore sia trifase, è la seguente (vedi Teoria del Campo Rotante):

$$\underline{F}_a = \frac{3Nk_a}{2p\pi} \underline{I}$$

dove k_a è il fattore di avvolgimento ed N è il numero totale di conduttori attivi (si ricordi che $N = 2pqn$, dove p è il numero di coppie polari, q il numero di conduttori per polo e fase ed n il numero di conduttori per cava).

La f.m.m. di eccitazione F_e ruota alla velocità del rotore, come la f.m.m. di statore. In ogni punto del traferro è una funzione sinusoidale del tempo con pulsazione ω ; sia β l'angolo di fase di tale grandezza. Indicando con k_{ae} il fattore di avvolgimento dell'avvolgimento di eccitazione e con N_e il numero totale di conduttori attivi risulta, in valore efficace:

$$\underline{F}_e = \frac{\sqrt{2}N_e k_{ae} i_e}{2p\pi} e^{j\beta}$$

Sostituendo le relazioni trovate nella (2.3.a), l'espressione dell'equazione di accoppiamento magnetico delle fasi di statore e di rotore risulta:

$$\frac{3Nk_a}{2p\pi} \underline{I} + \frac{\sqrt{2}N_e k_{ae} i_e}{2p\pi} e^{j\beta} = \frac{\pi\delta}{2\mu_0 l\tau} \underline{\Phi} \quad (2.3.b)$$

Essendo la macchina non satura vale il principio di sovrapposizione degli effetti ed è quindi possibile separare la parte del flusso principale associata alla corrente di eccitazione ($\underline{\Phi}_e$) da quella associata alla reazione di armatura ($\underline{\Phi}_a$).

$$\underline{\Phi} = \underline{\Phi}_e + \underline{\Phi}_a \quad (2.4)$$

Risulta:

$$\frac{3Nk_a}{2p\pi} \underline{I} = \frac{\pi\delta}{2\mu_0 l\tau} \underline{\Phi}_a \Rightarrow \underline{\Phi}_a = \frac{3Nk_a \mu_0 l\tau}{p\delta\pi^2} \underline{I} \quad (2.5)$$

La (2.5) mette in evidenza come la reazione di armatura sia descrivibile semplicemente mediante un coefficiente di autoinduzione fittizio della fase di statore considerata. Vengono perciò definite la reattanza di reazione X_r , la reattanza sincrona X_s e la impedenza sincrona \underline{Z}_s della macchina a poli lisci non satura, tramite le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} X_r &= \omega \frac{3N^2 k_a^2 \mu_0 l\tau}{2p\delta\pi^2} \\ X_s &= \omega L_d + X_r \\ \underline{Z}_s &= R + jX_s \end{aligned} \quad (2.6)$$

Con le posizioni fatte l'equazione (2.2) diviene:

$$\begin{aligned} \underline{V} &= -(R + j\omega L_d) \underline{I} - j\omega \frac{N}{2} k_a \underline{\Phi} = -(R + j\omega L_d) \underline{I} - j\omega \frac{N}{2} k_a (\underline{\Phi}_a + \underline{\Phi}_e) = \\ &= -(R + j(\omega L_d + X_r)) \underline{I} - j\omega \frac{N}{2} k_a \underline{\Phi}_e = -(R + jX_s) \underline{I} - j\omega \frac{N}{2} k_a \underline{\Phi}_e \\ &= -\underline{Z}_s \underline{I} - j\omega \frac{N}{2} k_a \underline{\Phi}_e = -\underline{Z}_s \underline{I} + \underline{E}_0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

Per il flusso di eccitazione vale la seguente equazione:

$$\frac{\sqrt{2}N_e k_{ac} i_e e^{j\beta}}{2p\pi} = \frac{\pi\delta}{2\mu_0 l\tau} \Phi_e \Rightarrow N_e k_{ac} i_e e^{j\beta} = R_t \Phi_e \quad (2.8)$$

Le equazioni interne della macchina sincrona a poli lisci non saturata sono quindi le (2.1), (2.7) e (2.8), a cui va aggiunta la (1.2) che fornisce la relazione tra pulsazione di statore e velocità di rotazione del rotore. E' da notare che l'impedenza sincrona della macchina può essere misurata sperimentalmente mediante una prova a vuoto ed una in corto circuito.

La prova a vuoto di una macchina sincrona consiste nel fare ruotare la macchina alla velocità di regime, lasciando i morsetti di indotto aperti. Viene quindi misurata la tensione concatenata di statore in corrispondenza a diversi valori della corrente di eccitazione. Viene quindi tracciata **la curva di magnetizzazione (caratteristica a vuoto)** (vedi figura 2.2.a) che fornisce la tensione ai morsetti di statore in funzione della corrente di eccitazione. A causa della saturazione del materiale ferromagnetico la curva non è rettilinea.

La prova in cortocircuito di una macchina sincrona consiste nel fare ruotare la macchina alla velocità di regime, con i morsetti di indotto in cortocircuito. Viene quindi misurata la corrente in ciascuna fase di statore in corrispondenza a diversi valori della corrente di eccitazione. Viene quindi tracciata **la caratteristica di cortocircuito** (vedi figura 2.2.b).

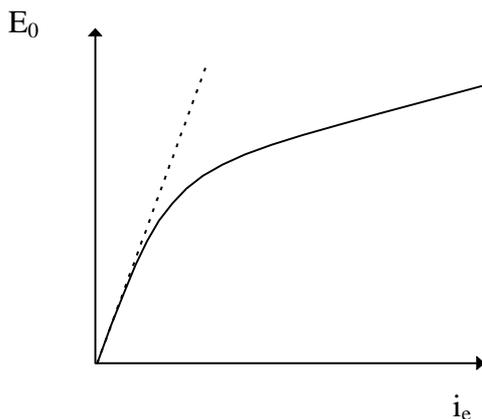


Figura 2.2.a
Caratteristica a vuoto

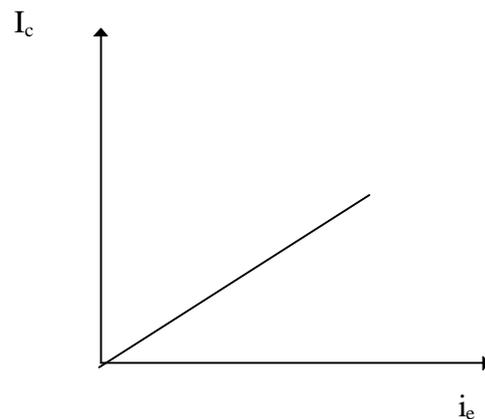


Figura 2.2.b
Caratteristica di cortocircuito

Dalla conoscenza della caratteristica a vuoto (il tratto lineare) ed in cortocircuito si ottiene l'impedenza sincrona, mediante la seguente relazione:

$$\underline{Z}_s = \frac{E_0}{I_c} \quad (2.9)$$

EQUAZIONI ESTERNE

Nelle equazioni interne compaiono le seguenti grandezze incognite: v_e , i_e , \underline{V} , \underline{I} , β , Φ_e , ω , ω_m . La fase di una delle variabili complesse \underline{V} ed \underline{I} è arbitraria e quindi può essere presa nulla. Per individuare univocamente il funzionamento della macchina sincrona è necessario conoscere come la stessa è collegata con l'esterno. Ad esempio, se la macchina viene portata in rotazione ad una velocità ω_{m0} da un motore primo con l'avvolgimento di eccitazione alimentato con la tensione v_{e0} e lo statore è chiuso su di una stella di impedenze, ciascuna di valore \underline{Z}_L , le equazioni di collegamento con l'esterno sono le seguenti:

$$\begin{aligned}\omega_m &= \omega_{m0} \\ v_e &= v_{e0} \\ \underline{V} &= \underline{Z}_L \underline{I}\end{aligned}\tag{2.10}$$

Le equazioni esterne (3.1), unitamente alle equazioni interne (1.2), (2.1), (2.7) e (2.8), costituiscono un sistema di 10 equazioni in 10 incognite (avendo ad esempio posto nulla la fase della corrente \underline{I}) la cui soluzione individua il regime di funzionamento della macchina.

CIRCUITO EQUIVALENTE

La figura (2.3) mostra il circuito equivalente di ciascuna fase di statore. La legge di Kirchhoff delle tensioni per tale circuito risulta infatti coincidente con l'equazione interna (2.7). Nella figura 2.3 sono state indicate sia la reattanza di reazione che la reattanza di dispersione. La reattanza sincrona è data dalla loro serie. E' da notare che la f.e.m. \underline{E}_0 è regolabile a piacere variando la corrente di eccitazione oppure variando la velocità angolare del rotore. L'espressione della costante \underline{K} che individua il fasore della tensione impressa del generatore di tensione si ottiene dalle (1.2), (2.7) e (2.8) e risulta la seguente:

$$\underline{K} = - \frac{p N N_e k_a k_{ae}}{2 R_t} j e^{j\beta}\tag{2.11}$$

E' da notare che variando la velocità di rotazione del rotore viene modificato anche il valore della pulsazione delle grandezze di statore e quindi anche il valore della reattanza sincrona e della reattanza di reazione.

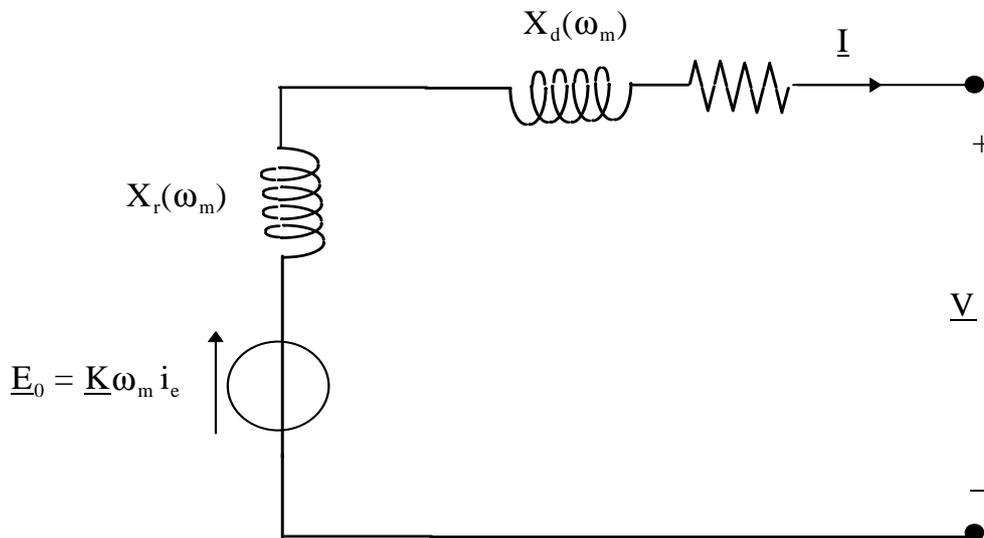


Figura 2.3 - Circuito equivalente per fase della macchina sincrona a poli lisci non satura

3. 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 3.1, 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 della rete ($n = 60 f / p$) dal motore primo M che in questo caso deve fornire solo la coppia necessaria a vincere gli attriti interni della macchina, essendo nulle sia la corrente di eccitazione che quella di armatura.
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. A tale scopo si utilizzano tre lampade (che assorbono una corrente trascurabile, per cui la macchina si può a tutti gli effetti considerare funzionante a vuoto) che si spengono solo quando le due terne di tensioni concatenate coincidono in valore efficace e fase. Quando le tre lampade sono spente (in realtà le tre lampade si illumineranno e si spegneranno con una frequenza tanto più bassa quanto più la frequenza della macchina è prossima a quella della rete), viene chiuso l'interruttore T ed il parallelo è concluso.

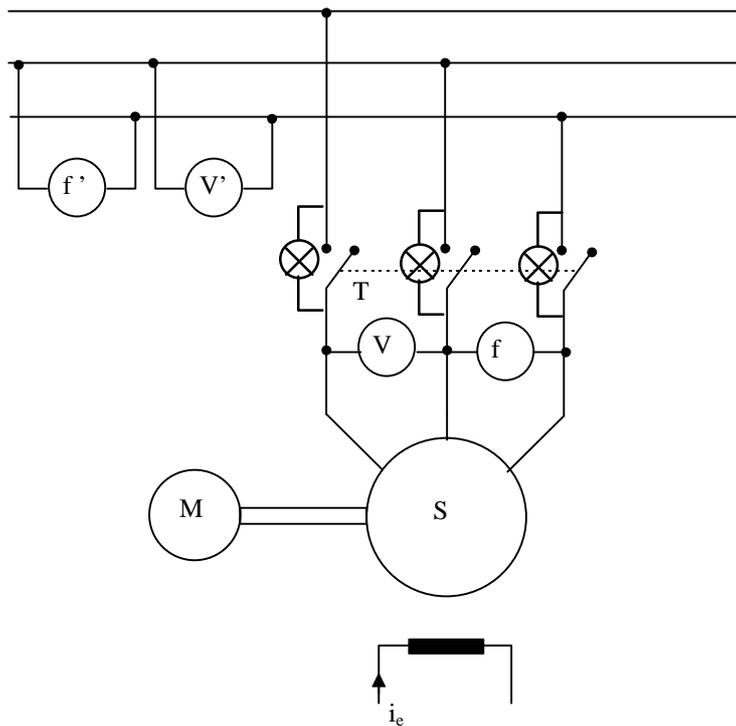


Figura 3.1 - Parallelo di una macchina sincrona (S) con una rete di potenza infinita

Al termine delle operazioni di parallelo, la macchina sincrona è sì 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.

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. E' quindi possibile variare la potenza elettrica reattiva erogata alla rete, semplicemente variando la corrente di eccitazione della macchina (vedi nel seguito il funzionamento da compensatore sincrono).

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 con-

siste 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 (l'avvolgimento di eccitazione è chiuso in corto circuito su una resistenza esterna). 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. Facendo per semplicità riferimento ad una macchina con poli lisci e trascurando la resistenza statorica, si genera 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 3.3.a). La potenza elettrica erogata ha solo 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} (sempre facendo riferimento ad una macchina con poli lisci e trascurando la resistenza statorica) risulta in quadratura anticipo rispetto ad \underline{E}_0 e \underline{V} (vedi figura 3.3.b). La potenza elettrica erogata ha solo 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.

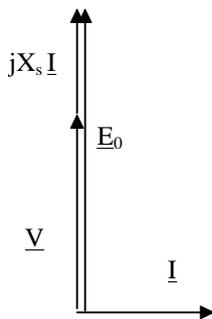


Figura 3.3.a

Diagramma fasoriale del condensatore sincrono

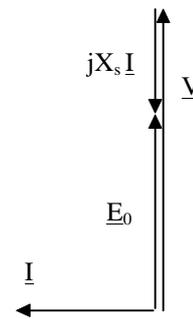


Figura 3.3.b

Diagramma fasoriale dell'induttore sincrono