

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.

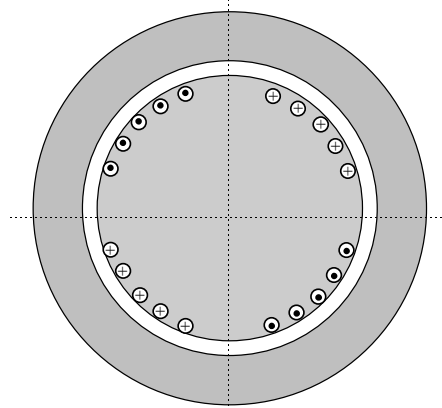


Fig. 1.1.a - Macchina sincrona a poli lisci.

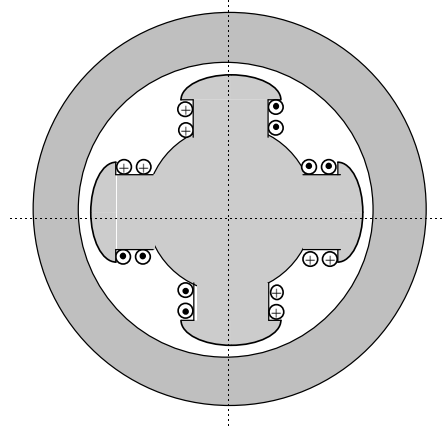


Fig. 1.1.b - Macchina sincrona a poli salienti.

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 isotropa, 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'era 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.

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:

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

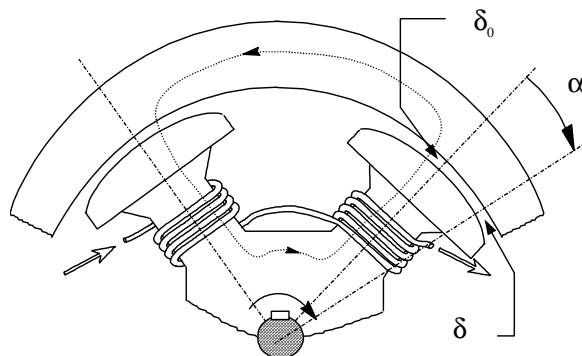


Figura 1.2

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”:

$$i_r \rightarrow B_r \rightarrow \widehat{B}_r \rightarrow \widehat{E}_s \rightarrow \widehat{I}_s \rightarrow \widehat{B}_s \xrightarrow{\omega_m (\equiv n')} \widehat{B} = \widehat{B}_s + \widehat{B}_r \quad (1.3)$$

dove $\wedge$ indica un sistema simmetrico (di tensioni) o equilibrato (di correnti), $\curvearrowright$ 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**. 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 (convertitore AC/DC). La corrente continua così prodotta viene inviata al circuito di eccitazione principale. Se invece il circuito di eccitazione è sostituito da magneti permanenti, si ottiene un sistema indipendente da qualsiasi sorgente di potenza elettrica esterna, ma non regolabile.

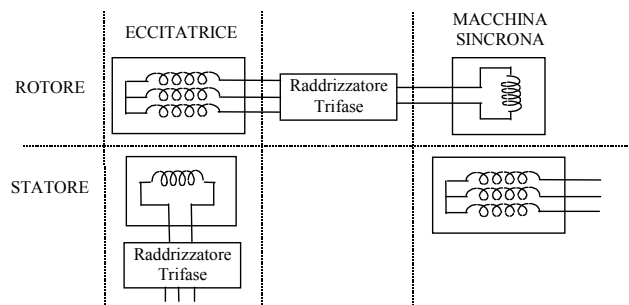


Figura 1.a. - Schema di macchina sincrona con eccitatrice.

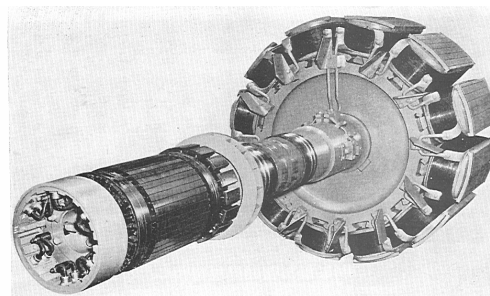


Figura 1.b - Rotore di macchina sincrona con eccitatrice.

2. 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 relative 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 . Pertanto, detta R_e è la resistenza elettrica dell'avvolgimento di eccitazione si ha:

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

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 . Utilizzando i riferimenti associati con convenzione del generatore, 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.

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

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, $\underline{I}$ la corrente nella fase. 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 ($\underline{\Phi}_a$), cioè al campo rotante prodotto dalle fasi di statore. Con le posizioni fatte l'equazione (2.2) diviene:

$$\underline{V} = -(R + j\omega L_d) \underline{I} - j\omega \frac{N}{2} k_a (\underline{\Phi}_a + \underline{\Phi}_e) = -(R + jX_s) \underline{I} - j\omega \frac{N}{2} k_a \underline{\Phi}_e = -\underline{Z}_s \underline{I} + \underline{E}_0 \quad (2.3)$$

Trascurando la parte resistiva dell'impedenza sincrona ($\underline{Z}_s$) rispetto a quella reattiva, una macchina sincrona a poli lisci non satura in rotazione a velocità di costante ha la seguente caratteristica tensione-corrente sulla prima fase di statore (e analogamente per le altre):

$$\underline{V} = -j X_s \underline{I} + \underline{E}_0 \quad (2.4)$$

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 a vuoto E_0 ai morsetti di statore in funzione della corrente di eccitazione i_e . A causa della saturazione del materiale ferromagnetico tale curva devia dalla linearità al crescere della corrente di eccitazione.

Circuito equivalente

La figura 2.1 mostra il circuito equivalente di ciascuna fase di statore, ottenibile dalla (2.4). Si notino i riferimenti associati con convenzione del generatore. Per individuare il circuito equivalente della macchina sincrona trifase è necessario conoscere inoltre come sono collegate le tre fasi di statore. La figura 2.2 mostra il circuito equivalente se le fasi sono collegate a stella.

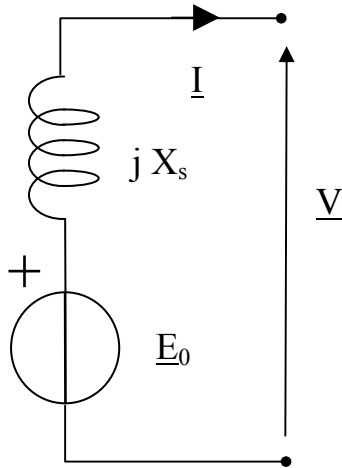


Figura 2.1. - Circuito equivalente di ciascuna fase di statore.

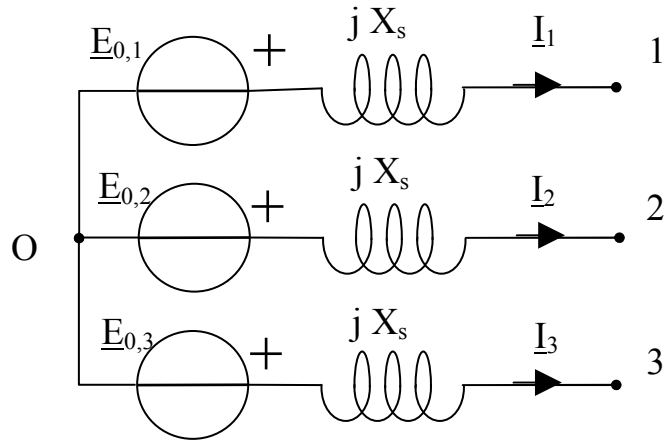


Figura 2.1. - Circuito equivalente della macchina sincrona trifase con le fasi di statore collegate a stella.

Equazioni esterne

Per individuare univocamente il funzionamento della macchina sincrona è necessario conoscere come la stessa è collegata con l'esterno. Ad esempio, se la macchina è 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 uguali, di valore $\underline{Z}_L$, le equazioni di collegamento con l'esterno sono le seguenti:

$$\begin{aligned}\omega_m &= \omega_{m0} \\ v_e &= v_{e0} \\ \underline{V}_{10} &= \underline{Z}_L \underline{I}_1 \\ \underline{V}_{20} &= \underline{Z}_L \underline{I}_2 \\ \underline{V}_{30} &= \underline{Z}_L \underline{I}_3\end{aligned}\quad (2.5)$$

3. 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. Moltiplicando ambo i membri per il coniugato della corrente si ottiene un bilancio di potenza:

$$\underline{E}_0 \underline{I}^* = jX_s |\underline{I}|^2 + \underline{V} \underline{I}^* \quad (3.1)$$

Dalla (3.1), uguagliando le parti reali dei due membri, si deduce un bilancio di potenza attiva chiaramente interpretabile dal punto di vista fisico

$$\Re(\underline{E}_0 \underline{I}^*) = VI \cos \varphi$$

Infatti, essendo $VI \cos \varphi$ la potenza elettrica attiva erogata, $\Re(\underline{E}_0 \underline{I}^*)$ rappresenta la potenza meccanica assorbita dalla macchina per ogni fase. Moltiplicando tale potenza per il numero di fasi (3 nel caso trifase) e dividendola per la velocità angolare del rotore (ω/p), si ottiene l'espressione della coppia elettromagnetica C_e :

$$C_e = -3 \frac{p}{\omega} \Re(\underline{E}_0 \underline{I}^*) \quad (3.2)$$

Dalla (2.4), risulta:

$$\underline{E}_0 = jX_s \underline{I} + \underline{V} \Rightarrow \underline{I} = \frac{\underline{E}_0 - \underline{V}}{jX_s} \Rightarrow \underline{E}_0 \underline{I}^* = j \frac{E_0^2}{X_s} - j \frac{\underline{E}_0 \underline{V}^*}{X_s} \Rightarrow \Re(\underline{E}_0 \underline{I}^*) = \frac{\Im(\underline{E}_0 \underline{V}^*)}{X_s}$$

Definendo infine lo sfasamento δ (“angolo di carico”) della tensione a vuoto $\underline{E}_0$ rispetto alla tensione $\underline{V}$, si ottiene:

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

Quando l’angolo di carico è positivo ($\underline{E}_0$ in anticipo rispetto a $\underline{V}$), 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 ($\underline{E}_0$ in ritardo rispetto a $\underline{V}$), 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 ($\underline{E}_0$ in fase con $\underline{V}$), la coppia è nulla, cioè la macchina 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.

4. 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.

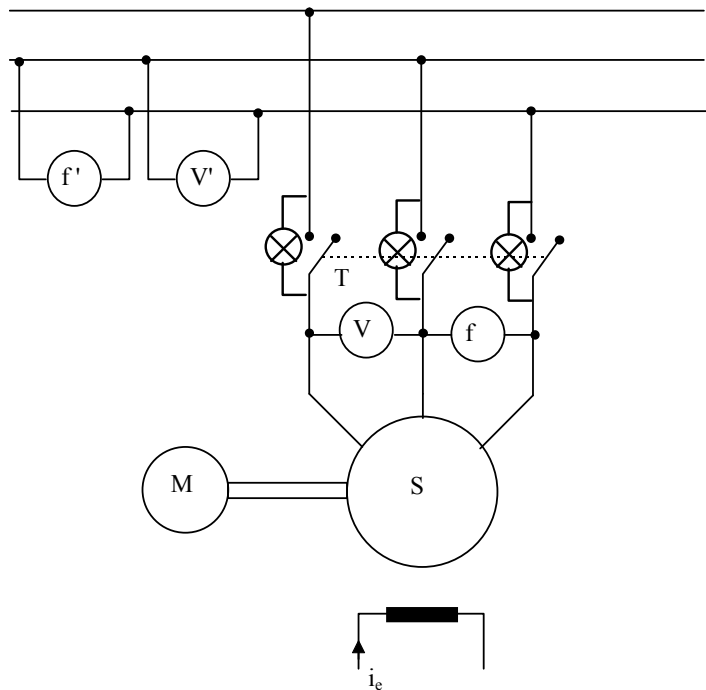


Figura 4.1 - Parallelo di una macchina sincrona (S) con una rete di potenza infinita.

Con riferimento alla figura 4.1, 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 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.

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.

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 I che risulta in quadratura ritardo rispetto alla f.e.m. E_0 ed alla tensione V (vedi figura 4.2.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. E_0 risulta minore della tensione V e la corrente di armatura I risulta in quadratura anticipo rispetto ad E_0 e V (vedi figura 4.2.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.

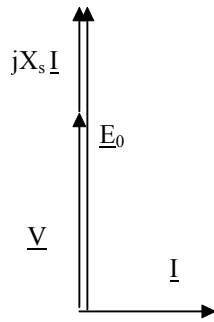


Figura 4.2.a - Diagramma fasoriale del condensatore sincrono

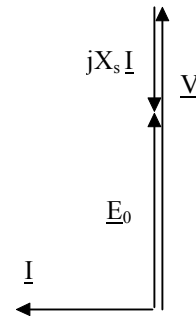


Figura 4.2.b - Diagramma fasoriale dell'induttore sincrono