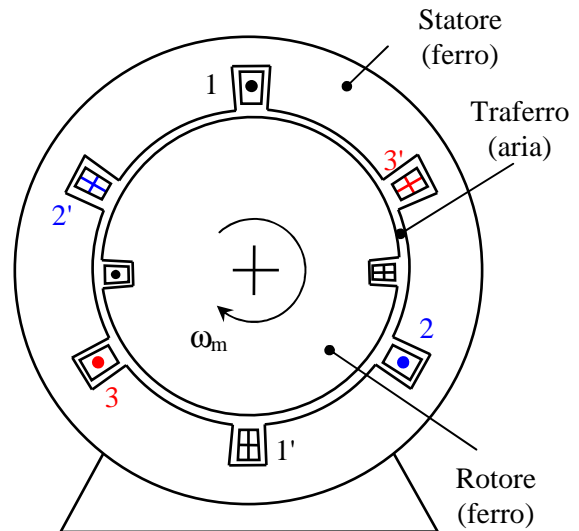


MACCHINA SINCRONA TRIFASE

1. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Lo statore è costituito come quello della macchina asincrona trifase: è di materiale ferromagnetico laminato e nelle cave ricavate sulla periferia del traferro è alloggiato un avvolgimento trifase (con fasi uguali ed equispaziate) percorso da correnti alternate. Per evitare la circolazione di correnti dovute a terne armoniche nelle tensioni indotte nelle fasi (f.e.m.), l'avvolgimento di statore è solitamente collegato a stella. Il rotore in generale è di materiale ferromagnetico massiccio ed è sede di un avvolgimento di eccitazione percorso da corrente continua (ossia, in regime stazionario). Per alimentare l'avvolgimento di eccitazione si utilizza un generatore esterno che viene collegato mediante contatti striscianti (spazzole) su anelli concentrici all'asse (come per la macchina asincrona a rotore avvolto).



Schema di una macchina Sincrona trifase
(2 poli, 1 cava/polo-fase)

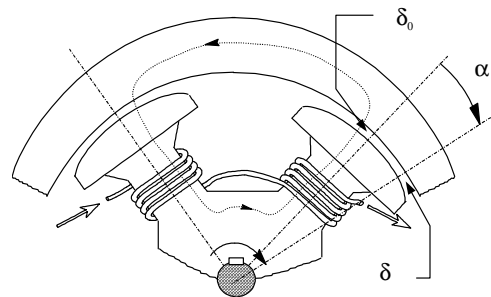
L'avvolgimento di eccitazione è disposto in cave distribuite lungo la periferia del rotore ed il traferro ha spessore costante e molto minore del raggio del rotore (o dello statore). Se si trascura il contributo delle testate e si considera $\mu_{Fe} \gg \mu_0$, l'analisi del campo magnetico rotante già effettuata per la macchina asincrona è applicabile: l'avvolgimento di eccitazione, percorso dalla corrente costante i_e , crea quindi un campo magnetico (di eccitazione) a poli alterni nel traferro. Nel sistema di riferimento solidale al rotore il campo di eccitazione è indipendente dal tempo e quindi varia solo spazialmente.

Se si pone in rotazione il rotore alla velocità angolare costante ω_m , il campo di eccitazione, solidale col rotore, ruota alla velocità $\omega_c = \omega_m$. Il campo rotante \vec{B}_r così prodotto induce nell'avvolgimento trifase di statore un sistema trifase simmetrico di tensioni sinusoidali nel tempo con pulsazione ω data da (essendo p il numero di coppie polari):

$$\omega = p \omega_m \quad (1.1)$$

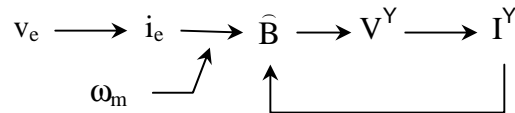
Per ottenere tensioni indotte sinusoidali sulle fasi di statore è necessario che l'andamento spaziale del campo di eccitazione lungo la periferia del traferro sia sinusoidale; ciò viene ottenuto distribuendo opportunamente le cave (o il numero di conduttori in cava) lungo la periferia del rotore.^(*)

^(*) Quello descritto è un rotore a poli lisci. In pratica è molto utilizzato anche il rotore a poli salienti in cui l'avvolgimento di eccitazione è costituito da bobine avvolte sui corpi dei poli. Il traferro in questo caso ha spessore variabile e l'andamento spazialmente sinusoidale del campo di eccitazione lungo la periferia del traferro è ottenuto sagomando opportunamente le espansioni polari (tipicamente è $\delta = \delta_0 / \cos(p\alpha)$, essendo p il numero di coppie polari). Al di fuori delle espansioni polari il traferro assume valori elevati, quindi l'analisi del campo magnetico rotante in questo tipo di macchina è decisamente più complicata.



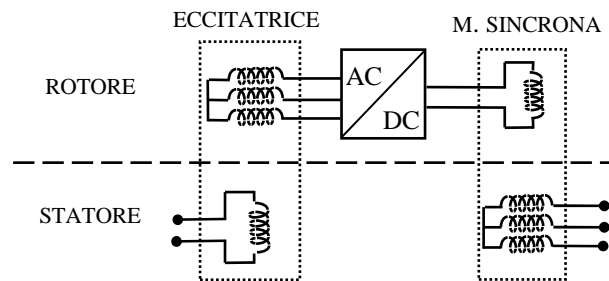
La stessa struttura dei poli si può ottenere anche utilizzando magneti permanenti a sezione arcuata e magnetizzati radialmente. Si ottiene un profilo di flusso circa sinusoidale utilizzando più magneti permanenti sullo stesso rotore. Questo tipo di macchine prende in nome di macchine sincrone a magneti permanenti o macchine "Brushless" (senza spazzole), in quanto non sono necessari contatti striscianti per l'alimentazione del circuito di eccitazione sul rotore. Questo rende impossibile variare l'intensità del campo di eccitazione, ma riduce notevolmente la necessità di manutenzione.

Se lo statore alimenta un carico equilibrato, esso diventa sede di tre correnti a pulsazione ω che producono un campo rotante statorico che ruota con velocità angolare $\omega_c = \omega/p = \omega_m$. Il campo rotante statorico \hat{B}_s è dunque immobile rispetto al campo rotante rotorico \hat{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. Il Principio di funzionamento della macchina sincrona si può illustrare con la seguente catena logica, dove Y indica un sistema simmetrico (di tensioni) o equilibrato (di correnti), \hat{B} indica il campo rotante e maiuscole e minuscole indicano grandezze di statore (AC) e di rotore (DC)^(*):



La potenza meccanica fornita all'albero della macchina per vincere la resistenza della coppia elettromagnetica, viene trasformata, a meno delle perdite, in potenza elettrica ceduta al carico collegato alle fasi di statore. La macchina funziona quindi da generatore e viene chiamata **alternatore**.

Per eliminare i contatti striscianti nelle macchine sincrone si può impiegare una macchina eccitatrice montata sullo stesso asse. L'eccitatrice è una macchina sincrona con il circuito di eccitazione montato sullo statore ed il circuito di indotto montato sul rotore. L'uscita trifase dell'eccitatrice viene raddrizzata tramite un convertitore AC/DC. La corrente continua così prodotta è inviata al circuito di eccitazione della macchina sincrona.



Schema di macchina sincrona con eccitatrice.

2. EQUAZIONI INTERNE E CIRCUITO EQUIVALENTE

Si consideri una macchina sincrona a poli lisci che funzioni a velocità di rotazione costante ω_m .

L'avvolgimento di eccitazione è in regime stazionario, alimentato con la tensione costante v_e e percorso dalla corrente costante i_e . $v_e = R_e i_e$ (2.1)
Pertanto, detta R_e la resistenza dell'avvolgimento, si ha:

L'avvolgimento di statore (indotto) è percorso da una terna equilibrata di correnti alternate con pulsazione ω , il cui valore è legato alla velocità di rotazione del rotore dalla relazione (1.1). 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 prima fase di statore varia quindi nel tempo con legge sinusoidale con pulsazione ω . Utilizzando i versi associati con convenzione del generatore, applicando la legge di Faraday ad una fase di statore, e trasformando secondo Steinmetz la relazione trovata, si ottiene la seguente equazione^(o):

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

^(*) Si noti l'analogia con il principio di funzionamento del trasformatore e della macchina asincrona. L'assenza della retroazione dovuta alla legge di Faraday tra il campo rotante e la tensione sull'avvolgimento di eccitazione è dovuta al fatto che a regime il campo è fermo relativamente al rotore.

^(o) Si noti che è identica (a meno del segno della tensione, dovuta alla convenzione da generatore) all'equazione di una fase statorica della macchina Asincrona.

dove \underline{V} è la tensione ai terminali della fase statorica, R è la resistenza della fase, L_d il coefficiente di autoinduzione di dispersione della fase (associato alle linee di campo che si concatenano solo con la fase considerata, richiudendosi nel traferro), \underline{I} la corrente nella fase, N il numero di conduttori attivi per polo e k_a il fattore di avvolgimento delle fasi statoriche.

Le relazioni tra flussi e correnti si ottengono dalla legge di Hopkinson. Essendo la macchina non satura vale il principio di sovrapposizione degli effetti e quindi $\underline{\Phi} = \underline{\Phi}_e + \underline{\Phi}_a$, dove $\underline{\Phi}_e$ è il flusso associato alla corrente di eccitazione i_e (DC) e $\underline{\Phi}_a$ è il flusso associato alle correnti nelle fasi di statore (AC):

$$Nk_a \underline{I} = \mathcal{R}_t \underline{\Phi}_a \quad (2.3.a)$$

$$N_e k_{ae} i_e = \mathcal{R} \underline{\Phi}_e \quad (2.3.b)$$

dove N_e è il numero di conduttori attivi dell'avvolgimento di eccitazione, k_{ae} il fattore di avvolgimento dell'avvolgimento di eccitazione, \mathcal{R}_t e \mathcal{R} indicano le riluttanze relative a una fase statorica ed al circuito di eccitazione. Si noti che la (2.3.b) fornisce soltanto il modulo del flusso di eccitazione.

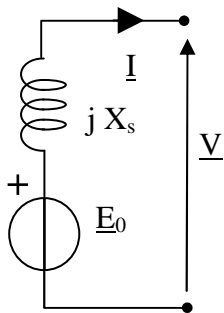
Le equazioni interne possono essere semplificate. Con le posizioni fatte l'equazione (2.2) diviene:

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

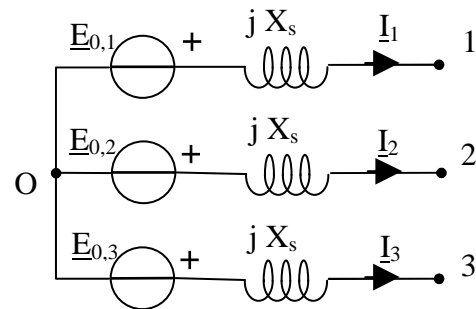
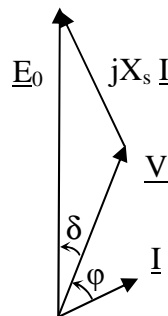
Trascurando la parte resistiva dell'impedenza sincrona (\underline{Z}_s) rispetto a quella reattiva, una macchina sincrona a poli lisci non satura a regime ha quindi la seguente caratteristica tensione-corrente sulla prima fase di statore (e analogamente per le altre):

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

dove la tensione a vuoto E_0 dipende dalla corrente di eccitazione^(**) e la reattanza sincrona X_s è una costante della macchina (misurabile tramite una prova in cortocircuito). Il circuito equivalente di una fase statorica e il diagramma dei fasori si ottengono immediatamente dalla (2.4). Definito il collegamento delle fasi statoriche (ad esempio a stella), è immediatamente ottenibile anche il circuito equivalente della macchina sincrona trifase. Grazie alla simmetria delle fasi statoriche (uguali ed equispaziate) le tensioni a vuoto sono uguali in modulo e sfasate di 120° una rispetto all'altra.



Circuito equivalente di una fase di statore.



Circuito equivalente trifase (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, l'avvolgimento di eccitazione è alimentato con la tensione v_0 e lo statore è chiuso su di una stella di impedenze uguali, di valore \underline{Z}_L , le equazioni esterne sono:

$$\begin{aligned} \omega_m &= \omega_{m0} \\ v &= v_0 \\ \underline{V}_{10} &= \underline{Z}_L \underline{I}_1 \\ \underline{V}_{20} &= \underline{Z}_L \underline{I}_2 \\ \underline{V}_{30} &= \underline{Z}_L \underline{I}_3 \end{aligned}$$

(**) Tale relazione è lineare fino alla saturazione del materiale ferromagnetico. Infatti dato che $E_0 = \omega(N/2) k_a \underline{\Phi}_e$, sostituendo la (2.3.b) si ha $E_0 = \omega(N/2) k_a (N_e k_{ae} / \mathcal{R}) i_e$. Si chiama caratteristica a vuoto la relazione sperimentale tra la tensione a vuoto E_0 e la corrente di eccitazione i_e . La prova a vuoto viene effettuata misurando a regime (con ω_m ed i_e costanti) la tensione ai terminali delle fasi statoriche in circuito aperto ($\underline{I} = 0$).

3. COPPIA ELETTROMAGNETICA

La coppia si ottiene dal bilancio di potenza deducibile (trascurando le perdite) dalla (2.4):

$$3\underline{E}_0\underline{I}^* = 3jX_s|\underline{I}|^2 + 3\underline{V}\underline{I}^* \quad (3.1)$$

Uguagliando le parti reali della (3.1) si ottiene un bilancio di potenza attiva chiaramente interpretabile: $3\Re(\underline{E}_0\underline{I}^*) = 3VI \cos\varphi$. Infatti, essendo $3VI \cos\varphi$ la potenza elettrica attiva erogata, $3\Re(\underline{E}_0\underline{I}^*)$ rappresenta la potenza meccanica assorbita dalla macchina. Dividendola per la velocità angolare del rotore (ω/p), si ottiene l'espressione della coppia elettromagnetica: $3(p/\omega)\Re(\underline{E}_0\underline{I}^*)$. Dalla (2.4), risulta:

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

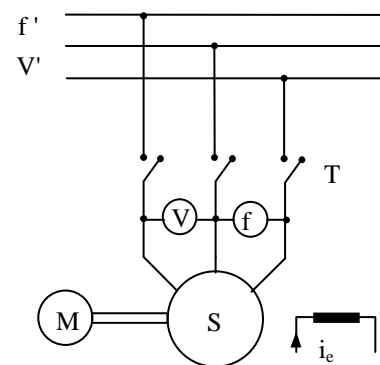
E quindi si ottiene:

$$C = 3\frac{p}{\omega} \frac{VE_0}{X_s} \sin(\delta) \quad (3.2)$$

Si noti che il segno della coppia è definito dall'angolo di carico ($\delta = \angle\underline{E}_0 - \angle\underline{V}$). Il valore assoluto della coppia massima ottenibile, fissata la corrente di eccitazione, è: $C_{\max} = (3p/\omega)(VE_0/X_s)$. Dato che ad ogni velocità diversa dal sincronismo la coppia media è nulla^(o), la caratteristica meccanica della macchina sincrona (cioè il legame fra coppia e numero di giri del rotore) è costituita nel piano C-n da un segmento verticale di altezza C_{\max} in corrispondenza all'ascissa $n = n_c$ (velocità di sincronismo pari a $n_c = 60f/p$).

4. PARALLELO CON LA RETE TRIFASE

Si supponga di collegare le fasi statoriche 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 terminali della macchina coincidano in valore efficace, frequenza e fase con quelle della rete. Se così non fosse infatti, alla chiusura dell'interruttore di collegamento con la rete si svilupperebbero nelle fasi statoriche della macchina sincrona delle correnti di valore elevato che potrebbero provocare il danneggiamento della macchina stessa.



Parallelo della macchina sincrona (S) con una rete di potenza infinita.

La sequenza delle operazioni da eseguire per effettuare il parallelo con la rete è la seguente:

1. La macchina viene portata in rotazione, a vuoto, alla velocità di sincronismo imposta dalla frequenza di rete ($n = 60f/p$) dal motore M che deve vincere solo gli attriti interni.
2. Viene alimentato l'avvolgimento di eccitazione fino ad ottenere ai terminali di statore un sistema di tensioni concatenate con un valore efficace coincidente con quello della rete ($V = V'$). La macchina opera ancora a vuoto e quindi ancora il motore M deve fornire solo la coppia necessaria per vincere gli attriti.

^(o) Infatti le forze agenti sui conduttori dell'avvolgimento di rotore, proporzionali alla corrente di eccitazione (costante) e al campo al traferro (sinusoidale), risulterebbero sinusoidali e quindi a media nulla.

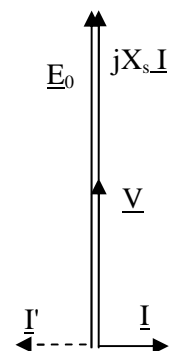
3. Si agisce sul motore M, con una regolazione fine della velocità, per portare tensioni concatenate di rete e di macchina a coincidere sia come frequenza che come fase, viene chiuso l'interruttore T ed il parallelo è concluso.

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 la tensione a vuoto su ogni fase si sfasa rispetto alla tensione di rete ($\delta > 0$). Il regime viene raggiunto quando la coppia elettromagnetica resistente uguaglia la coppia motrice fornita da M. La potenza meccanica assorbita all'albero dalla macchina viene trasformata in potenza elettrica attiva erogata alla rete. È quindi possibile variare la potenza elettrica reattiva erogata alla rete 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 accelerare e la tensione a vuoto su ogni fase si sfasa rispetto alla tensione di rete ($\delta < 0$). Il regime viene raggiunto quando la coppia elettromagnetica motrice uguaglia la coppia resistente fornita da M. La potenza elettrica assorbita dalla rete viene trasformata in potenza meccanica erogata all'albero della macchina^(o).

Funzionamento da compensatore sincrono: Se si aumenta la corrente di eccitazione, le tensioni a vuoto nelle fasi di statore, pur restando in fase con le tensioni imposte dalla rete di alimentazione, le superano in valore efficace. Con riferimento ad una fase statorica, si genera quindi una corrente \underline{I} che risulta in quadratura ritardo rispetto alla \underline{E}_0 ed alla tensione \underline{V} , infatti $\underline{I} = (\underline{E}_0 - \underline{V})/jX_s$. La potenza elettrica erogata è reattiva e positiva: tutto avviene come se la macchina sincrona fosse un condensatore la cui capacità può essere variata agendo sulla corrente di eccitazione. Infatti, se si utilizzano i riferimenti associati con convenzione da utilizzatore (basta porre $\underline{I}' = -\underline{I}$), la corrente \underline{I}' risulta in quadratura anticipo rispetto alla tensione \underline{V} , esattamente come per un condensatore e quindi si può porre: $\underline{I}' = j\omega C_{eq} \underline{V}$



dove C_{eq} è funzione della corrente di eccitazione tramite \underline{E}_0 . Il compensatore sincrono quindi non eroga potenza elettrica attiva ma è in grado di erogare alla rete la potenza reattiva richiesta per la regolazione del fattore di potenza: con un solo compensatore si possono rifasare più carichi trifase (anche variabili nel tempo), agendo soltanto sulla corrente di eccitazione. È tuttavia decisamente più costoso dei banchi di condensatori statici di pari capacità.

^(o) Il principale ostacolo nell'utilizzo del motore sincrono consiste nel valore nullo della coppia di spunto e quindi nella necessità di un motore di lancio. Una alternativa è il sistema di autoavviamento costituito da una gabbia di scoiattolo posta sul rotore (se la macchina è a poli salienti, le cave sono ricavate nelle espansioni polari). Il motore si avvia quindi come un motore asincrono. Giunti in prossimità del sincronismo si eccita il rotore, che viene accelerato dal campo statorico fino a raggiungere il sincronismo.