

MACCHINA SINCRONA TRIFASE

La macchina sincrona (MS) è una macchina elettrica rotante, chiamata sincrona perché la velocità di rotazione è la stessa del campo rotante.

STRUTTURA. Lo statore è identico a quello di una macchina asincrona trifase: un cilindro ferromagnetico cavo, sulla cui superficie sono ricavate delle cave per alloggiare un avvolgimento trifase (tre avvolgimenti uguali, spostati di 120°).

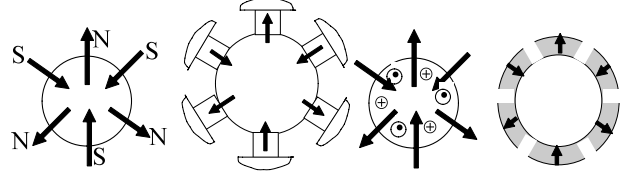
Il rotore è conformato in modo da realizzare p polarità

magnetiche alternate; p è sempre pari, ed è uguale al numero di poli dell'avvolgimento di statore (in fig. $p = 6$).

Le polarità magnetiche possono essere realizzate in diversi modi: 1) poli salienti con avvolgimenti concentrati, 2) poli lisci con avvolgimenti distribuiti, 3) magneti permanenti.

Gli avvolgimenti rotorici sono alimentati in CC \Rightarrow creano un campo costante e solidale col rotore; ovviamente, anche i magneti generano un campo dello stesso tipo.

Il traferro fra statore e rotore è superiore rispetto a quello di una macchina asincrona.



PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO da GENERATORE.

Il cosiddetto motore primo esercita una coppia motrice sul rotore, ponendolo in rotazione \Rightarrow il campo di rotore inizia a ruotare \Rightarrow le spire dell'avvolgimento di statore (che sono ferme) vedono un flusso che varia nel tempo \Rightarrow in esse è indotta una fem $e = d\phi/dt \Rightarrow$ ai morsetti di statore si presenta una fem pari alla somma delle fem indotte nelle varie spire.

Tramite opportuni accorgimenti (sagomatura delle espansioni polari nei rotori a poli salienti, distribuzione sinusoidale dei conduttori di rotore nei rotori a poli lisci, sagomatura dei magneti nei rotori a magneti), si può ottenere un campo a distribuzione spaziale sinusoidale, che dà origine ad una fem sinusoidale nel tempo. Di conseguenza, le fem ai morsetti statorici sarà esprimibile come un fasore \bar{E}_o . Inoltre, dato che i tre avvolgimenti statorici sono sfasati di 120° meccanici, si ha che le fem in essi indotte sono sfasate di 120° elettrici, e costituiscono un sistema trifase di fem (in realtà, lo sfasamento fra gli avvolgimenti è 120° meccanici se la macchina è a 2 poli; in una macchina a p poli, lo sfasamento fra gli avvolgimenti è $120/(p/2)$ gradi meccanici).

Se l'avvolgimento di statore è aperto, non può circolare corrente \Rightarrow la corrente di statore \bar{I}_s è nulla \Rightarrow la potenza $\bar{E}_o \bar{I}_s$ è nulla, cioè lo statore non ha scambi energetici: il motore primo sta fornendo solo una piccola potenza necessaria a compensare le perdite meccaniche (attrito e ventilazione).

Si supponga ora di chiudere lo statore su un carico elettrico, cioè su un sistema trifase di impedenze di carico \bar{Z}_c : le fem \bar{E}_o fanno allora circolare un sistema trifase di correnti $\bar{I}_s \Rightarrow$ la macchina inizia a funzionare da generatore, perché sta erogando una corrente \bar{I}_s e quindi una potenza $3\bar{E}_o \bar{I}_s$. Ma per la conservazione dell'energia, se la macchina eroga una potenza attiva $3\text{Re}(\bar{E}_o \bar{I}_s)$, la macchina deve anche assorbire la stessa potenza; non può che assorbirla sotto forma di potenza meccanica $C\Omega$, per cui il motore primo sta ora erogando molta più potenza rispetto a prima. Quindi, dal punto di vista energetico, il campo magnetico effettua una conversione di potenza da meccanica $C\Omega$ ad elettrica $3\text{Re}(\bar{E}_o \bar{I}_s)$. Dal punto di vista delle coppie, il sistema trifase di correnti statoriche genera un campo rotante statorico, che esercita una coppia frenante sul campo rotante di rotore, e tale coppia frenante è equilibrata dalla coppia motrice del motore primo.

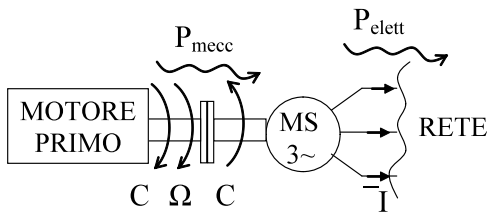
Una tale macchina si chiama alternatore trifase. La generazione di potenza elettrica è effettuata per la maggior parte da alternatori trifase.

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO da MOTORE.

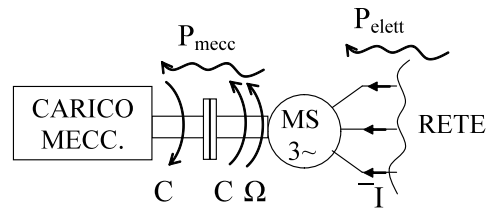
Se lo statore di una MS trifase è collegato alla rete di alimentazione trifase, la rete fa circolare nello statore un sistema trifase di correnti \Rightarrow nel traferro si origina un campo rotante. Se il rotore è alimentato (in corrente continua), ed è quindi presente nel rotore un campo magnetico, il campo statorico "aggancia" il campo rotorico, e lo trascina in rotazione. Ma il campo rotorico è solidale con il rotore stesso \Rightarrow anche il rotore sta ruotando; si vede quindi che campo e rotore ruotano alla stessa velocità da cui il nome di MS. Se al rotore è applicata una coppia resistente C , la macchina sta erogando una potenza meccanica $C\Omega$; per la conservazione dell'energia, la stessa potenza deve entrare: entra dalla rete sotto forma di potenza elettrica. Infatti, l'avvolgimento statorico si trova ora nelle stesse condizioni in cui si trova nel funzionamento da generatore: le spire dell'avvolgimento di statore (che sono ferme) vedono un flusso che varia nel tempo \Rightarrow in esse è indotta una fem $e = d\phi/dt \Rightarrow$ ai morsetti di statore si presenta una fem \bar{E}_o . Analizzando i versi delle grandezze, si può verificare che tale fem è opposta alla corrente, per cui la macchina sta effettivamente funzionando da carico elettrico, perché sta assorbendo una corrente \bar{I}_s ed una potenza $3\text{Re}(\bar{E}_o \bar{I}_s)$. Dal punto di vista energetico, il campo magnetico effettua una conversione da potenza elettrica $3\text{Re}(\bar{E}_o \bar{I}_s)$ a potenza meccanica $C\Omega$. Dal punto di vista delle coppie, il campo rotante statorico esercita sul rotore una coppia motrice, che viene equilibrata dalla coppia resistente del carico meccanico.

Tale macchina, se il rotore è eccitato con magneti, viene chiamata “brushless sinusoidale”, ed è molto utilizzata per realizzare servomotori (cioè motori in cui si può regolare coppia e velocità).

FUNZIONAMENTO DA GENERATORE



FUNZIONAMENTO DA MOTORE



CIRCUITO EQUIVALENTE.

Si è visto che in entrambi i funzionamenti, il rotore induce una fem nello statore \Rightarrow in entrambi i funzionamenti lo statore può essere rappresentato da una fem \bar{E}_o . Si aggiunge poi l'impedenza dello statore $\bar{Z}_s = R_s + j X_s \Rightarrow$ il circuito equivalente di fase è costituito da una fem \bar{E}_o con in serie l'impedenza statorica \bar{Z}_s .

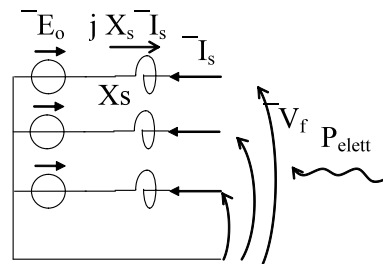
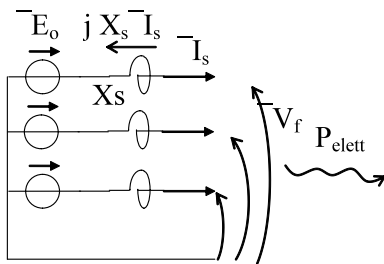
Per le macchine di grossa potenza si ha $R_s \ll X_s \Rightarrow R_s$ si trascura; X_s è detta reattanza sincrona.

Essendo la macchina trifase, il circuito di 1 fase è replicato per le altre 2 (si ricorda che le grandezze delle 3 fasi sono sfasate fra loro di 120° elettrici). Le 3 fasi sono poi collegate a stella o a triangolo, a seconda di come sono collegati fra loro i 3 avvolgimenti della macchina.

Il circuito equivalente è lo stesso per i funzionamenti da generatore e motore; cambia solo il verso della corrente, e quindi della potenza, e la scrittura della legge alla maglia.

GENERATORE: $\bar{E}_o = \bar{V}_f + j X_s \bar{I}_s$

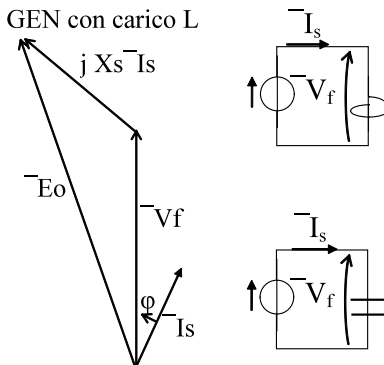
MOTORE: $\bar{V}_f = \bar{E}_o + j X_s \bar{I}_s$



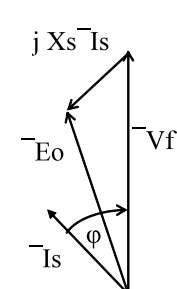
DIAGRAMMI VETTORIALI.

I diagrammi vettoriali sono la rappresentazione della legge alla maglia. Considerato che la corrente \bar{I}_s può essere in anticipo o in ritardo rispetto alla tensione \bar{V}_f , si hanno 2 possibilità per ciascuno dei due funzionamenti (motore e generatore). [NOTA: le possibilità sono solo 2, perché lo sfasamento φ fra \bar{I}_s e \bar{V}_f è sempre inferiore a 90°] Per un generatore (con le convenzioni dei generatori), corrente in ritardo significa che il generatore vede un carico L, e corrente in anticipo significa che il generatore vede un carico C; per un motore (con le convenzioni dei motori), corrente in ritardo significa che il motore si comporta da carico L, e corrente in anticipo significa che il motore si comporta da carico C. Considerato che la c.d.t. $j X_s \bar{I}_s$ è in quadratura in anticipo sulla corrente \bar{I}_s , e tenuto conto della legge alla maglia, i diagrammi vettoriali sono quelli mostrati in figura. In particolare: un generatore con carico L ha \bar{E}_o in anticipo rispetto a \bar{V}_f , con $|\bar{E}_o| > |\bar{V}_f|$ (si dice che la macchina lavora in sovraccitazione); un generatore con carico C ha \bar{E}_o in anticipo rispetto a \bar{V}_f , con $|\bar{E}_o| < |\bar{V}_f|$ (si dice che la macchina lavora in sottoeccitazione); un motore che si comporta da L ha \bar{E}_o in ritardo rispetto a \bar{V}_f , con $|\bar{E}_o| < |\bar{V}_f|$ (sottoeccitazione); un motore che si comporta da C ha \bar{E}_o in ritardo rispetto a \bar{V}_f , con $|\bar{E}_o| > |\bar{V}_f|$ (sovraccitazione).

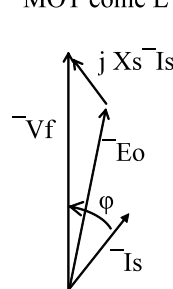
GEN con carico L



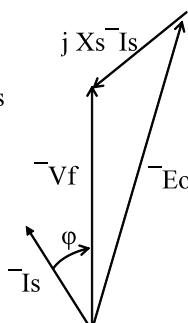
GEN con carico C



MOT come L



MOT come C

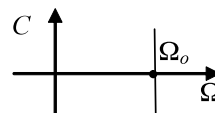


Nel funzionamento da generatore, quasi sempre si pone $|\bar{E}_o| > |\bar{V}_f|$, perché, come si vede dai diagrammi, ciò comporta che \bar{I}_s è in ritardo rispetto a \bar{V}_f , cioè il generatore vede un carico induttivo, ed effettivamente la quasi totalità dei carichi elettrici sono di natura induttiva (linee di trasmissione, motori elettrici).

Nel funzionamento da motore, se la macchina ruota a velocità costante, si preferisce porre $|\bar{E}_o| > |\bar{V}_f|$, perché, come si vede dai diagrammi, ciò comporta che \bar{I}_s è in anticipo rispetto a \bar{V}_f , cioè il motore si comporta da carico capacitivo, ed in tal modo può svolgere anche le funzioni di condensatore di rifasamento. Se invece la macchina è chiamata ad operare a velocità variabile, le esigenze del controllo non consentono di avere \bar{I}_s in anticipo rispetto a \bar{V}_f , per cui si pone $|\bar{E}_o| < |\bar{V}_f|$.

CARATTERISTICA MECCANICA

Il rotore può ruotare solo alla velocità del campo rotante $\Omega_o \Rightarrow$ la caratteristica meccanica $C(\Omega)$ è una retta parallela all'asse delle coppie, passante per il punto $\Omega = \Omega_o$.



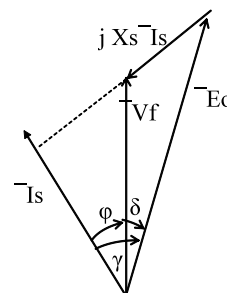
ESPRESSIONI di potenza attiva P, potenza reattiva Q, coppia C.

Le espressioni si ricavano dal diagramma vettoriale.

L'angolo φ fra la corrente \bar{I}_s e la tensione \bar{V}_f è il solito angolo del fattore di potenza;

l'angolo δ fra la tensione \bar{V}_f e la fem \bar{E}_o è detto angolo di carico;

l'angolo γ fra la corrente \bar{I}_s e la fem \bar{E}_o è detto angolo di coppia, e risulta $\gamma = \varphi + \delta$.



$$P = 3 V_f I_s \cos \varphi = 3 I_s E_o \cos \gamma$$

$$C = P / \Omega_o = 3 I_s E_o \cos \gamma / \Omega_o$$

$$Q = 3 V_f I_s \sin \varphi = 3 I_s (E_o \sin \gamma - X_s I_s) = 3 I_s E_o \sin \gamma - 3 X_s I_s^2$$

METODI DI REGOLAZIONE

GENERATORE IN PARALLELO ALLA RETE ELETTRICA. Tensione V_f e frequenza f sono imposte dalla rete stessa ($V_f = 230$ V, $f = 50$ Hz). Frequenza costante comporta velocità del campo costante ($\Omega_o = 120 f / p$). Bisogna regolare la potenza attiva P e la reattiva Q erogate dal generatore, in modo che siano sempre uguali alla P e Q richieste dal carico elettrico. La potenza elettrica attiva P è pari alla potenza meccanica P_m del motore primo, per cui per regolare P si regola P_m . La Q dipende da E_o , quindi per regolare Q si varia E_o , agendo sulla tensione di alimentazione del circuito di rotore.

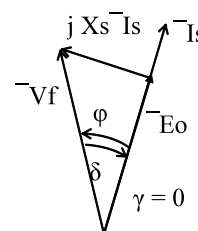
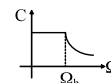
MOTORE. Si vogliono ottenere dei valori desiderati di C ed Ω_o . Per far ciò, si regolano l'ampiezza V_f e la frequenza f della tensione di alimentazione, tramite un convertitore elettronico CA/CA. In particolare: regolando f si regola Ω_o ($\Omega_o = \omega / 2\pi = 2\pi f / 2\pi$); regolando V_f si fa variare la corrente I_s , in modo da ottenere la coppia C voluta.

ESEMPIO DI REGOLAZIONE DI MOTORE, per ottenere una caratteristica meccanica con coppia costante fino alla velocità base Ω_b , poi con coppia calante come $1/\Omega$ (potenza costante)

Come sempre, si definisce velocità base Ω_b quella per cui la tensione di alimentazione (variabile) V_f è pari alla tensione nominale V_n . Per $0 < \Omega_o < \Omega_b$, si pone $\gamma = 0$, in modo che la corrente \bar{I}_s e la fem \bar{E}_o siano in fase. La cdt $j X_s \bar{I}_s$ risulta allora in quadratura rispetto ad \bar{E}_o , per cui $X_s I_s = \sqrt{(V_f^2 - E_o^2)}$.

Mantenendo costante la tensione di alimentazione del circuito di rotore, si fa in modo che il flusso ϕ del campo di rotore sia costante, così la fem E_o risulta proporzionale alla velocità Ω_o ($\bar{E}_o = j \omega \bar{\phi} \Rightarrow E_o \propto \omega \phi$; $\omega \propto \Omega_o$, $\phi = \text{cost} \Rightarrow E_o \propto \Omega_o$). Se si regola la tensione di alimentazione in modo che sia proporzionale alla velocità Ω_o , per la relazione $X_s I_s = \sqrt{(V_f^2 - E_o^2)}$, si ha che anche la cdt $X_s I_s$ è proporzionale alla velocità Ω_o . D'altra parte, $X_s = \omega L_s$, ed essendo L_s costante e $\omega \propto \Omega_o$, si ha $X_s \propto \Omega_o$. Ne segue che la corrente statorica I_s è costante. Ricordando l'espressione della coppia $C = 3 I_s E_o \cos \gamma / \Omega_o$, dato che $E_o \propto \Omega_o$ e che $\gamma = 0$, la coppia risulta proporzionale alla corrente, e quindi costante.

Quando si supera Ω_b , si fa in modo che il flusso di rotore sia inversamente proporzionale alla velocità ($\phi \propto 1 / \Omega_o$), e si mantiene $V_f = V_n = \text{cost}$. Ne segue che la fem E_o ora è costante ($E_o \propto \omega \phi$; $\omega \propto \Omega_o$, $\phi \propto 1 / \Omega_o \Rightarrow E_o = \text{cost}$). Inoltre, si variano I_s e $\cos \gamma$ in modo che il prodotto $I_s \cos \gamma$ sia costante. In tal modo la coppia risulta inversamente proporzionale alla velocità e la potenza $P = C \Omega$ risulta costante.



AVVIAMENTO DI UN MOTORE SINCRONO.

A causa dell'inerzia, solitamente il rotore non riesce ad avviarsi. Se è presente un sistema di regolazione elettronica, è possibile alimentare lo statore con una frequenza crescente, partendo da una frequenza molto bassa, in modo da riuscire a vincere l'inerzia. Se invece non è presente tale sistema di regolazione, si può fare un "avviamento asincrono": si chiudono in corto circuito i morsetti di rotore, in modo che la macchina si avvii come un MA trifase; inoltre, per ora non si collega il carico meccanico, in modo che lo scorrimento a regime sia quasi nullo. Quando si è raggiunta la velocità di regime, si apre il circuito rotorico e si inietta una corrente continua. La presenza della corrente continua genera delle coppie sincronizzanti che consentono alla macchina di accelerare e di annullare lo scorrimento: si ha così

il funzionamento da motore sincrono. A questo punto, si innesta il carico meccanico tramite un sistema di frizioni (che consentono un innesto graduale).

Qualcosa sulla perdita di passo? Regolazione di tensione di frequenza?