

## Le macchine sincrone trifase - alternatore

Le macchine sincrone trifase sono generalmente di elevata potenza (dato che arrivano alle centinaia di MVA) di grandi dimensioni e funzionanti in media tensione a 10 20 kilovolt

Vengono impiegate come generatori nelle centrali di produzione dell'energia elettrica in modo da trasformare in elettrica la potenza meccanica che viene loro fornita dal motore primo (turbine idrauliche a vapore a gas)

Vi sono anche macchine di minore potenza e tensione 230 400 volt mosse da motori diesel e usate nei gruppi elettrogeni per avere disponibilità di energia nei luoghi non serviti da rete elettrica (per esempio cantieri in zona non elettrificate, navi) e per l'alimentazione dei servizi di emergenza nel caso di mancanza della tensione di rete.

Procedendo dal centro

**Albero meccanico**, a cui viene collegato quello del motore primo per trasmettere la potenza meccanica all'alternatore; è realizzato in acciaio e deve sopportare le sollecitazioni derivanti dal peso della parte mobile, dalla coppia trasmessa e dalla forza centrifuga che si manifesta durante la rotazione; le macchine sincrone a seconda del tipo possono essere montate sia con albero orizzontale che verticale.

**Circuito magnetico rotorico**, fissato all'albero e rotante con esso, interessato dalle linee di flusso del campo magnetico della macchina per il tratto relativo al rotore; i corpi sporgenti della corona rotorica costituiscono i poli della macchina.

**Avvolgimento rotorico**, avente la funzione di creare il campo magnetico che consente il funzionamento della macchina (avvolgimento induttore o di eccitazione); per la macchina l'avvolgimento rotorico è costituito dalle bobine avvolte attorno ai poli, nelle quali circola la corrente di eccitazione, avente forma d'onda continua, che crea il campo magnetico induttore, di valore costante nel tempo e direzione rotante nello spazio alla velocità del rotore.

**Circuito magnetico statorico**, fissato meccanicamente alla cassa statorica è separato da quello rotorico da uno strato d'aria detto **traferro**; esso è formato da lamierini ferromagnetici a forma di corona circolare, impaccati in modo da ottenere lo sviluppo assiale voluto e che presentano, lungo la circonferenza interna, delle cave per l'alloggiamento dei conduttori dell'avvolgimento statorico.

**Avvolgimento statorico**, formato da matasse con i lati posti nelle cave statoriche, diviso in tre fasi disposte con gli assi a 120°; a causa della rotazione del campo induttore l'avvolgimento statorico diventa sede di tensioni e correnti indotte (avvolgimento indotto); come verrà meglio evidenziato quando si esporrà il funzionamento della macchina, l'avvolgimento statorico crea un campo magnetico di tipo rotante trifase (reazione di indotto), per cui il regime di funzionamento della macchina è determinato dalla sovrapposizione dei due campi rotorico e statorico.

**Cassa statorica**, formata da lamiera d'acciaio e avente il compito di sostenere il nucleo magnetico statorico e di consentire il fissaggio della macchina al basamento; nelle macchine di grandi dimensioni viene divisa in due parti per ragioni costruttive. Il sistema di raffreddamento è particolarmente importante per queste macchine data la notevole entità della potenza persa proporzionale alla rilevante potenza elettrica resa; a seconda della potenza della macchina il raffreddamento può essere effettuato con aria, con liquido (acqua demineralizzata) e con gas, mediante la predisposizione di opportuni canali di ventilazione, sia nei circuiti magnetici che in quelli elettrici (uso di conduttori con sezione Cava)

La struttura è quella **con indotto fisso e induttore rotante**, dato che l'avvolgimento indotto è montato sullo statore è quello induttore sul rotore. Un fattore che influisce notevolmente sulla struttura dei generatori sincroni è il numero delle coppie polari  $p$ , da cui dipende il numero dei Poli  $2p$ . Il valore di  $p$  è legato alla frequenza delle tensioni prodotte negli avvolgimenti statorici e alla velocità  $n_0$  di rotazione del rotore dalla relazione:

$$n_0 = \frac{60f}{p}$$

analoga a quella ricavata per il campo rotante.

Per un alternatore collegato a una rete elettrica funzionante con una certa frequenza, il valore di  $f$  è fisso e deve mantenersi costante durante il funzionamento, il che implica costante anche la velocità di rotazione e che vi sia una relazione vincolante tra velocità e numero di coppie polari. Con  $f = 50\text{HZ}$

$$n_0 p = 3000$$

All'aumentare del numero delle coppie polari deve diminuire la velocità e viceversa. La velocità di rotazione dipende dal tipo di motore che muove la macchina.

Se azionati da turbine a vapore o gas avremo turboalternatori a velocità di 3000 giri al minuto o, più raramente, di 1500 giri al minuto; essi hanno quindi 2 o 4 Poli.

Gli alternatori per le centrali idroelettriche mossi da turbine idrauliche sono invece più lenti e hanno un maggior numero di poli. Per esempio con un motore primo avente velocità 600 giri al minuto bisogna usare macchine con 10 Poli dovendo essere  $p = 5$

### Sistemi di eccitazione

L'alimentazione del circuito induttore delle macchine sincrone richiede l'impiego di un opportuno sistema di eccitazione che, oltre a fornire la potenza elettrica richiesta, sia anche in grado di regolare l'intensità della corrente di eccitazione, da cui dipendono i valori del flusso magnetico e delle tensioni indotte.

La potenza Attiva necessaria per l'eccitazione diminuisce, in percentuale, all'aumentare di quella della macchina, con valori indicativi che vanno dal 5% per macchine con potenza dell'ordine delle decine di kVA allo 0,2% per macchine da centinaia di MVA e con tensioni di eccitazione dell'ordine delle centinaia di volt. Per esempio la potenza di eccitazione dello 0,2% per un alternatore da 370 MVA corrisponde a 740 kW, se la tensione è 500V è necessaria una corrente di eccitazione di 1480 A.

Vi sono anche delle macchine di piccola potenza in cui il campo magnetico viene creato da un rotore a magneti permanenti., in questo caso il circuito di eccitazione non è presente.

Nelle macchine moderne e di grande potenza si utilizza l'eccitazione statica che non prevede alcuna macchina elettrica di eccitazione. La tensione continua è ottenuta mediante un raddrizzatore statico che fornisce una tensione continua di valore regolabile, alimentato tramite un trasformatore trifase dalla rete dei servizi ausiliari in corrente alternata della centrale. Il collegamento tra l'uscita del raddrizzatore l'avvolgimento rotorico avviene tramite spazzole e anelli

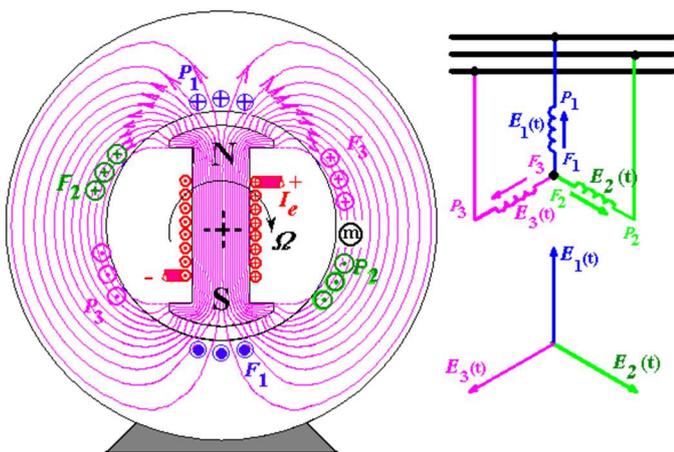
### Principio di funzionamento del generatore sincro

Il rotore della macchina sincrone, generatrice o motrice, possiede una velocità che si mantiene rigorosamente legata alla frequenza attraverso la nota relazione

$$n = 60 f/p \quad \text{in cui } p \text{ è il numero di coppie polari dell'induttore, } f \text{ sempre uguale a } 50\text{Hz in Europa.}$$

A differenza della macchina asincrona, il campo induttore e quello indotto ruotano sempre in sincronismo fra loro, quindi senza scorrimento alcuno.

Il rotore attraversato da corrente continua diventa un elettromagnete che viene posto in rotazione dalla coppia motrice che fornisce energia meccanica al nostro alternatore



Nello statore sono disposti tre avvolgimenti indotti uguali e distinti i quali vengono angolarmente spostati l'uno rispetto all'altro in modo che le rispettive f.e.m. , uguali in ampiezza e frequenza, risultino sfasate di 1/3 di periodo: tali f.e.m. risulteranno conseguentemente rappresentate da tre vettori uguali spostati fra loro di 120° come in figura.

La struttura magnetica del circuito di eccitazione, non sottoposta a variazioni di flusso, in genere non viene laminata, fatta eccezione per il profilo polare (e a volte

l'intero polo), sottoposto a variazioni di flusso dovute ai percorsi a riluttanza diversa causati dalle cave di statore. Lo statore delle macchine sincrone è laminato, perché interessato dal campo magnetico rotante.

### Funzionamento a vuoto

L'alternatore funziona a vuoto quando

- il motore primo MP fa ruotare il rotore con velocità costante commisurata alla frequenza della rete elettrica e al numero di coppie polari della macchina

- nel circuito induttore rotorico circola la corrente di eccitazione corrente che può essere variata agendo sugli apparati di regolazione del sistema di eccitazione
- le tre fasi dell'avvolgimento indotto statorico sono scollegate dalla rete elettrica costituente il carico dell'alternatore essendo aperto l'interruttore di macchina

considerando una fase dell'avvolgimento composta da N conduttori in serie la tensione totale sarà data dalla somma vettoriale delle singole tensioni indotte. In ogni fase statorica nascerà una tensione indotta a vuoto avente forma d'onda sinusoidale con frequenza f legata alla velocità di rotazione del rotore

$$E_0 = K_1 N f \varphi_0$$

$K_1$  fattore di Kapp che dipende dalle forme di statore e rotore (valori soliti 2,1 - 2,2)

Le tensioni indotte nelle tre fasi sono sfasate tra loro di 120 gradi elettrici data la disposizione simmetrica dell'avvolgimento indotto per cui esse costituiscono una Terna simmetrica di tensioni sinusoidali aventi la stessa frequenza lo stesso valore efficace e sfasamento reciproco di 120°

**Potenza meccanica a vuoto** potenza assorbita dall'alternatore

dato che la corrente nelle fasi statoriche nulla, saranno nulla anche la potenza elettrica resa al carico e le perdite nel rame statorico. Le uniche potenze in gioco saranno:

**Perdite di eccitazione**  $P_e$  corrispondenti alla potenza impiegata dal sistema di eccitazione e dipendenti dalla corrente  $I_e$ ; nel caso che tale potenza venisse fornita da un sistema esterno essa non va computata nel bilancio delle potenze della macchina

**Perdite meccaniche per attrito e ventilazione**  $P_{av}$  dipendono dalla velocità e quindi si possono ritenere costanti

**Perdite nel ferro**  $P_f$  imputabili quasi interamente allo statore e dovute al flusso presente anche a vuoto.

$$P_o = P_e + P_{av} + P_f$$

### Funzionamento a carico, reazione d'indotto

Il funzionamento a carico dell'alternatore trifase si ha quando:

- il motore primo fa ruotare il rotore con velocità costante  $n_0 = \frac{60f}{p}$
- nel circuito induttore rotorico circola la corrente di eccitazione  $I_e$
- Le tre fasi dell'avvolgimento indotto statorico sono collegate alla rete elettrica costituente il carico dell'alternatore ed erogano tre correnti alternate sinusoidali aventi frequenza costante f.

In merito al terzo punto si suppone che il carico elettrico dell'alternatore sia equilibrato, in modo da ritenere che le correnti indotte costituiscono una terna equilibrata, di valore efficace e angolo di sfasamento  $\phi$  uguale per le tre fasi. Le tre correnti indotte, circolando nelle fasi statoriche uguali e disposte a 120 gradi tra loro, produrranno un campo magnetico rotante trifase, detto campo indotto che, essendo originato da corrente di frequenza f, ruoterà con la stessa velocità  $n_0$  e nello stesso senso del rotore, il sincronismo che sia ha tra campo e rotore, in qualunque condizione di carico, spiega anche il nome della macchina.

Il campo risultante nel funzionamento a carico è dato dalla composizione di due forze magnetomotrici: quella di eccitazione rotorica e quella dovuta alle correnti indotte statoriche, che reagiscono al flusso induttore modificandolo, dipendentemente dall'intensità e dello sfasamento delle correnti stesse.

Si definisce **reazione di indotto** il complesso di tutti quei fenomeni di natura magnetica, elettrica e meccanica, che si verificano nel passaggio dal funzionamento a vuoto a quello a carico, a causa delle correnti statoriche.

La reazione di indotto che si verifica nel passaggio da vuoto a carico dell'alternatore ha diversi effetti, di tipo magnetico, elettrico e meccanico, così riassumibili.

Il flusso magnetico a carico  $\Phi$  è diverso da quello a vuoto  $\Phi_0$  a causa della sovrapposizione delle f.m.m. dovute alle correnti magnetizzanti rotoriche e a quelle di reazione. L'effetto dipende dal tipo di carico elettrico alimentato dall'alternatore: nel caso di carico puramente capacitivo la reazione di indotto ha effetto magnetizzante facendo aumentare il flusso a carico rispetto a quello a vuoto, mentre nel caso di carico puramente induttivo la reazione di indotto a effetto smagnetizzante e il flusso a carico risulterà inferiore a quella vuoto.

La tensione indotta E a carico è diversa da quella vuoto  $E_0$  in quanto è direttamente proporzionale al flusso. Si avrà pertanto  $E > E_0$  quando la reazione di indotto ha effetto magnetizzante,  $E < E_0$  in caso contrario.

Nel caso di carica con una componente resistiva l'alternatore deve erogare una potenza attiva per cui dovrà essere fornita dal motore primo una corrispondente Potenza meccanica, a cui sarà associata una corrispondente coppia motrice. Lo statore si oppone alla rotazione del rotore mediante una coppia resistente di tipo elettromagnetico dovuta l'azione frenante dei Poli magnetici statorici rispetto a quelli rotorici. In realtà il motore primo deve fornire una piccola potenza meccanica anche a vuoto per compensare le potenze perse nella macchina.

In conclusione la tensione varia nel passaggio dal funzionamento a vuoto a quello a carico che solitamente è ohmico induttivo

$$\Delta V\% = 100 \frac{V_0 - V_n}{V_n}$$

Con  $V_0$  tensione a vuoto e  $V_n$  tensione nominale a carico . Tale variazione può avere valori del 20 – 30%

### Bilancio delle potenze e rendimento

$P_{mecc}$  potenza assorbita, è la potenza meccanica che il motore primo fornisce al rotore della macchina

$P_u$  potenza d'uscita o potenza resa è quella elettrica attiva che lo statore della macchina eroga al carico elettrico e anche denominata potenza utile

$$P_u = \sqrt{3}VI\cos\varphi$$

La differenza tra le due è la **potenza persa**  $P_p$

$$P_{mecc} - P_u = P_p$$

**Rendimento effettivo**  $\eta = \frac{P_u}{P_{mecc}}$

**Perdite di eccitazione**  $P_e$  corrispondenti alla potenza impiegata dal sistema di eccitazione e dipendenti dalla corrente  $I_e$

**Perdite meccaniche per attrito e ventilazione**  $P_{av}$  dipendono dalla velocità e quindi si possono ritenere costanti

**Perdite nel ferro**  $P_f$  imputabili quasi interamente allo statore ; esse non sono costanti in quanto dipendono dal flusso, dalla reazione di indotto e quindi dalla corrente erogata.

**Perdite nel rame statorico**  $P_{j1}$  dipendenti da  $I^2$

**Perdite addizionali**  $P_{add}$  conglobate nelle precedenti

$$P_{mecc} = P_u + P_e + P_{av} + P_f + P_{j1} + P_{add}$$

Il rendimento varia in funzione della corrente erogata e del fattore di potenza. Supponendo di mantenere costante la tensione e il fattore di potenza è possibile rilevare sperimentalmente la caratteristica di rendimento in funzione della frazione di carico  $\alpha = \frac{I}{I_n}$  ossia del valore della corrente rapportato a quello nominale. Per ogni valore del fattore di potenza  $\cos\varphi$  si otterrà una curva e quindi una famiglia di caratteristiche.

Si nota che a parità di corrente il rendimento diminuisce con il  $\cos\varphi$  .

È importante che gli alternatori specialmente se di elevata potenza funzionino con carichi assai poco sfasati, il rendimento a pieno carico con  $\cos\varphi = 1$  di un alternatore di elevata potenza si aggira intorno al 99%, valori più piccoli si hanno per macchine di Potenza minore.

