

# MACCHINA SINCRONA

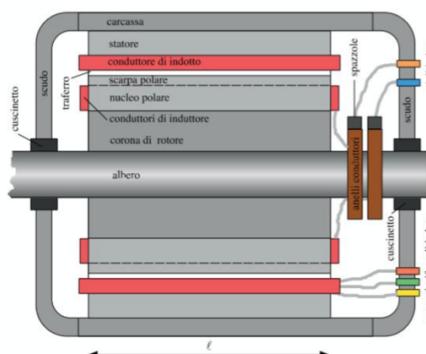
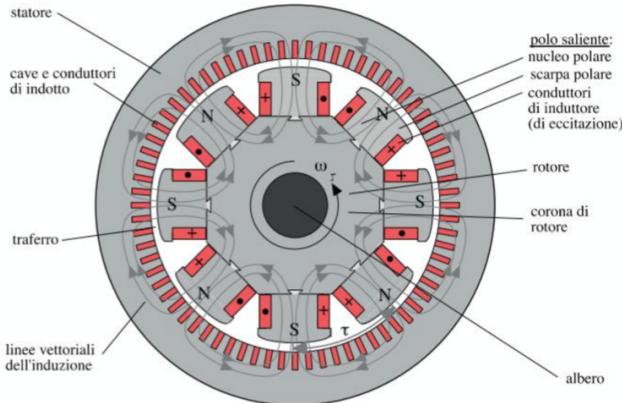
E' una macchina rotante caratterizzata dal fatto che la "velocità di rotazione del rotore e' uguale alla frequenza elettrica delle grandezze dello statore".

E' usata essenzialmente da **generatore** e in tal caso e' detta **ALTERNATORE**.

## CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE

### ROTORE

Il rotore e' l'induttore, costituito da  $P$  paia di poli. Il campo generato e' stazionario, ma ruota grazie alla potenza meccanica fornita dall'albero. E' composto da ferro massiccio (non si insinano correnti parassite) e l'alimentazione DC al rotore arriva tramite i contatti strisciante delle spazzole.



▼ SPAZZOLE: Trasmettono la corrente dal generatore al rotore tramite un **CONTATTO STRISCIANTE** (un filo si attorciglierebbe intorno al rotore)

### STATORE

Lo statore e' l'indotto ed e' costituito da un **cilindro cavo laminato**, cui superficie ospita le care per gli avvolgimenti (ossia i conduttori).

I terminali degli avvolgimenti sono collegati a  $*$  o  $\Delta$ ; la macchina dall'esterno e' accessibile tramite 3 terminali.

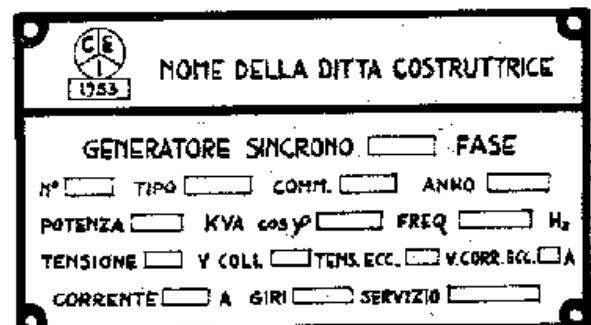
### DATI DI TARGA

- N° FASI
- POTENZA NOMINALE ( $S_n$  [kVA])
- FATTORE DI POTENZA ( $\cos\phi$ , in funzionamento ottimale)
- FREQUENZA DELLA RETE
- TIPO DI COLLEGAMENTO ( $\Delta, *$ )
- TENSIONE NOMINALE ( $V_n$ )
- CORRENTE NOMINALE ( $I_n$ )
- NUMERO DI GIRI (o PAIA DI POLI)
- TENSIONE DI ECCITAZIONE ( $V_e$ )
- CORRENTE DI ECCITAZIONE ( $I_e$ )

$$\omega_R = \frac{V}{P} = \frac{60}{P} f$$

### ESEMPIO

A 50 Hz la velocità del rotore e' pari a 3000 GIRI/min



## PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Consideriamo un rotore a poli salienti in sezione, tagliato e messo in linea retta. Specifichiamo che le espansioni sono intagliate in modo che il vettore  $\vec{B}$  sia radiale e sinusoidale nel traferro ( $\vec{B}(w_r) = B_M \sin(Pw_r)$ ); analogamente se consideriamo rotore liscio e conduttori incavati.

Il campo rotante induce una f.e.m su ciascun conduttore, le polarità sono assegnate nel grafico.

### CONFIGURAZIONE DEGLI AVVOLGIMENTI SULLO STATORE

In ciascuna delle cave passano tre avvolgimenti, in modo che ogni gruppo di avvolgimenti ricopra un semipasso polare ( $\tau$ ) per una lunghezza  $l$ .

Il flusso concatenato a ciascuna spira è quindi una funzione sinusoidale con modulo max  $\Phi_{0M}$ ;

$$\Phi_{0M} = \tau l B_{max} = \tau l \cdot B_M \cdot 2/\pi$$

Tuttavia le spire in una situazione reale non sono concentriche, ma sfasate quindi si tiene conto con un COEFFICIENTE  $K_s$ . A questo punto:

$$e(t) = -K_s \cdot N_s \frac{d\Phi_0(t)}{dt} = \omega K_s N_s \Phi_{0M} \sin(\omega t + \alpha)$$

$$e(t) = \omega K_s N_s \Phi_{0M} \sin(\omega t + \alpha)$$

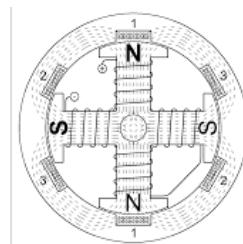
▼  $N_s$  = n° CONDUTTORI IN SERIE

A questo punto è possibile esprimere  $e(t)$  in forma fasoriale per ciascuno degli avvolgimenti:

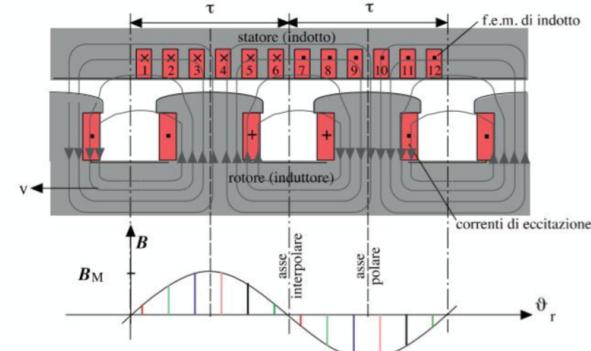
$$\bar{E}_{io} = -j\omega K_s N_s \bar{\Phi}_0$$

Considerando lo statore come un sistema trifase a  $120^\circ$  le tensioni nei 3 avvolgimenti saranno:

$$\begin{cases} \bar{E}_A = -j\omega K_s N_s \bar{\Phi}_0 e^{j0^\circ} = \bar{E}_{io} e^{j0^\circ} \\ \bar{E}_B = -j\omega K_s N_s \bar{\Phi}_0 e^{-j\frac{2}{3}\pi} = \bar{E}_{io} e^{-j\frac{2}{3}\pi} \\ \bar{E}_C = -j\omega K_s N_s \bar{\Phi}_0 e^{-j\frac{4}{3}\pi} = \bar{E}_{io} e^{-j\frac{4}{3}\pi} \end{cases}$$

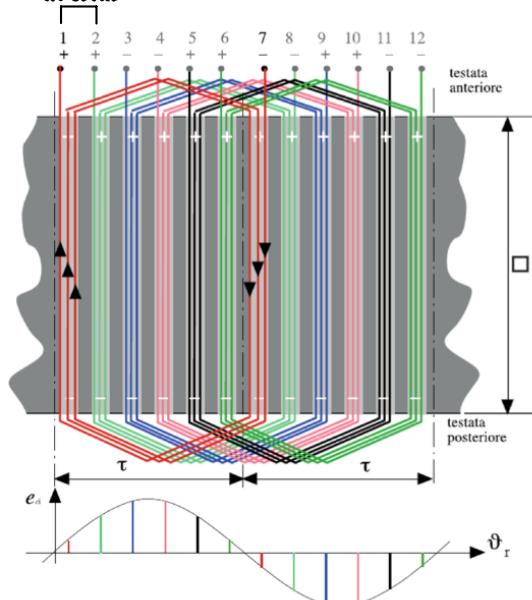


▼ A sinistra un altenatore trifase a 4 POLI, in cui:  
 $\omega = Pw_r = 4w_r$



simboli di f.e.m. e correnti : x = entranti positive; \* = uscenti positive

### IN SERIE

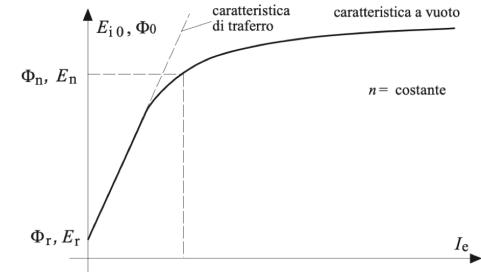


## FUNZIONAMENTO A VUOTO

Si realizza quando la macchina è eccitata ( $I_e \neq 0$ ) e sono nulle le correnti di indotto; il rotore viene fatto ruotare con  $w_r$ , tale che  $\omega = w_r \cdot P$  (Pulsazione f.e.m. indotta).

Viene quindi fatta variare  $I_e$  a cui corrispondono valori diversi di  $\Phi_0$  e di  $E_{io}$ ; in particolare si osserva che fino a un certo valore di  $I_e$  la f.e.m. cresce linearmente per poi incurvarsi (SATURAZIONE).

▼ La caratteristica non parte dall'origine, poiché nel ferro rimangono correnti residue (anche se  $I_e$  cessa di scorrere) che generano  $E_r$  e  $\Phi_r$



## FUNZIONAMENTO A CARICO

Si ottiene connettendo i terminali di statore a una rete in regime sinusoidale trifase, che è quindi sede di una terna simmetrica di correnti.

La terna produce nell'indotto un campo magnetico di reazione, che è rotante (Galileo Ferraris, la terna è a  $120^\circ$ ). Abbiamo quindi un flusso di reazione, per cui in ogni avvolgimento si induce una fem:

$$\bar{E}_i = \bar{E}_{io} + \bar{E}_R$$

$\bar{E}_{io}$  =  $E_{io}$ , a vuoto

$\bar{E}_R$  = DI REAZIONE

La  $\bar{E}_R$  corrisponde a una tensione in ritardo di  $\pi/2$  rispetto alla corrente di indotto, per cui si può esprimere come **REATTANZA DI INDOTTO EQUIVALENTE**

$$\bar{E}_i = \bar{E}_{io} - j X_s \bar{I}$$

A questa sarà opportuno sommare la resistenza degli avvolgimenti e la reattanza dovuta al **flusso di dispersione**, ossia la quantità di  $\Phi$  che non si concatena all'indotto.

Chiamiamo  $X_s$  come la somma  $X_s = X + X_i$  si ha che:

$$\bar{E} = \bar{E}_{io} - (R + j X_s) \bar{I}$$

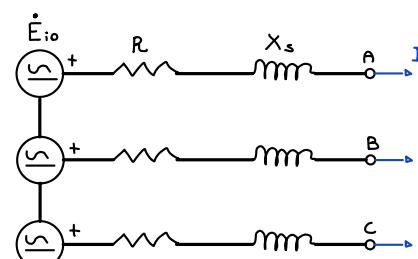
ma  $X_s \gg R$ , quindi:

$$\bar{E}_i = \bar{E}_{io} - j X_s \bar{I}$$

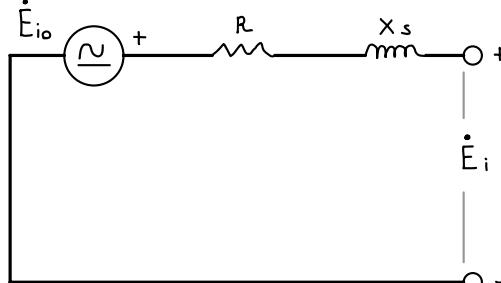
TENSIONE SULLO STATORE  
(FUNZIONAMENTO A CARICO)

## CIRCUITO EQUIVALENTE

Il risultato precedente mostra che il sistema è semplificato a un normale generatore trifase composto da generatori che impongono la tensione a vuoto. Scriviamo il **MONOFASE EQUIVALENTE**.



CIRCUITO TRIFASE



EQUIVALENTE MONOFASE

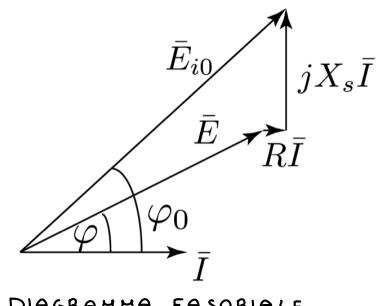


DIAGRAMMA FASORIALE

La tensione erogata dal sincrono è quindi:

$$\dot{E}_{io} = \dot{E}_i + j X_s \dot{I}$$

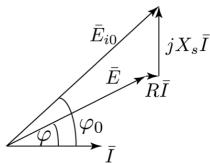
## FUNZIONAMENTO DA GENERATORE (COLLEGANDO UN CARICO)

A seconda del carico ai suoi terminali, a parità di  $E_{io}$  si hanno valori diversi di  $E$  ed  $I$  (comportamento da generatore non ideale); a lato tre esempi:

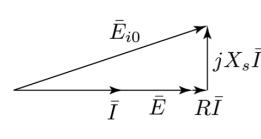
POTENZA A CARICO

La potenza generata dalla macchina è uguale alla  $P_{mecc}$  in ingresso, mentre  $P_{carico} = P_{gen} - P_{loss}$

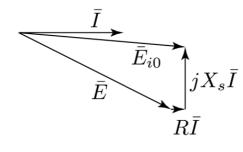
$$P_{gen} = 3 E_{io} I \cos \varphi = C_{WR}$$



CARICO RL



CARICO RESISTIVO



CARICO RC

$$P_{carico} = 3 E_i I \cos \varphi$$

$$\Downarrow E_i < E_{io}$$

## PARALLELO A UNA RETE

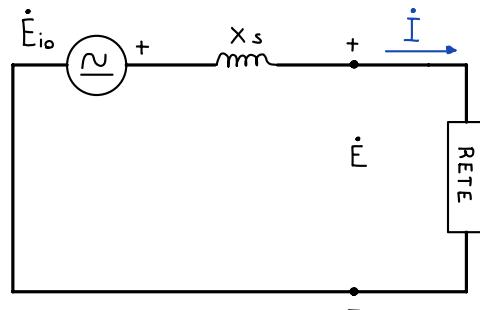
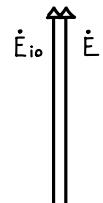
Consideriamo l'equivalente monofase (trascuro  $R$ ), connesso all'equivalente di una rete trifase, osserviamo che la corrente vale:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_{io} - \dot{E}}{jX_s} = -\frac{\Delta\dot{E}}{jX_s}$$

### FUNZIONAMENTO A VUOTO

Chiaramente si impone  $I = 0$ , ma ciò accade solo se la tensione a vuoto egualia quella della rete:  $\dot{E} = \dot{E}_{io}$

In questa condizione l'eccitazione produce una terna di fem a vuoto pari alle tensioni della rete:



**Rete:** distribuisce la tensione in uscita dall'alternatore ai carichi, per cui richiede che la tensione in uscita ( $E$ ) sia mantenuta costante.

Adesso ci si rende conto che a seconda del carico e della coppia, la macchina funziona da generatore o da motore.

### FUNZIONAMENTO DA GENERATORE

Se il generatore alimenta un carico resistivo, la  $\dot{I}$  è in fase con  $\dot{E}$ , mentre la fem indotta  $E_{io}$  anticipa  $E$  di un angolo  $\delta > 0$ . In questo modo  $P > 0$  e la macchina funziona da generatore. In particolare:

#### CARICO RESISTIVO

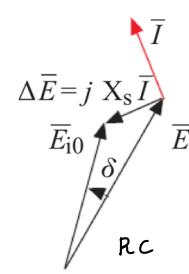
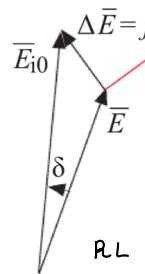
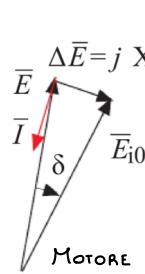
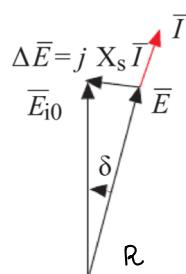
- Valori efficaci delle tensioni uguali ( $E_{io} \approx E$ ) e  $\delta > 0$ , ossia  $E_{io}$  in ritardo rispetto a  $E$ , allora  $I > 0$  e la potenza  $P > 0$  (**GENERATORE**) → collego un motore che fornisca  $P_{mec}$
- Valori  $E_{io} \approx E$  e  $\delta < 0$ , ossia  $E_{io}$  in anticipo rispetto a  $E$ , allora  $I < 0$  e  $P < 0$ , la macchina funziona da (**MOTORE**) → Collego un carico che assorba  $P_{mec}$

#### CARICO OHMICO - INDUTTIVO (RL)

Per mantenere  $\delta > 0$  e quindi la funzione da generatore, occorre che  $E_{io}$  sia **SOPRAECCITATO** rispetto ad  $E$  (aumento  $I_e$ )

#### CARICO OHMICO - CAPACITIVO

Al contrario necessita che  $E_{io}$  sia **SOTTOECCITATA** rispetto ad  $E$



**$\delta$  = ANGOLO DI COPPIA**

⚠ E' evidente che un aumento o diminuzione della  $I_{ecc}$  rispetto al valore nominale è strettamente legato al consumo di potenza reattiva. La regolazione della  $I_{ecc}$  consente di fornire alla rete la tensione che richiede e mantenerla costante rispetto alle variazioni di carico.  
Una mancata regolazione della tensione in uscita ovviamente causa danni

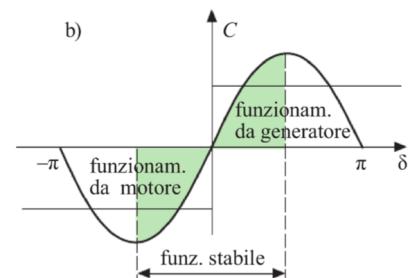
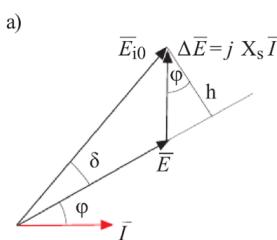
## EQUILIBRIO MECCANICO

Serve a mantenere il corretto funzionamento della macchina, ossia mantenere  $\delta$  costante variando la coppia, notiamo infatti che: (dal diagramma)

$$h = X_s I \cos \varphi = E_{i0} \sin \delta$$

$$C_{\omega_R} = 3EI \cos \varphi$$

$$C = \frac{3E_{i0}E}{\omega_R X_s} \sin \delta$$



Considerando  $E_{i0}$  ed  $E$  fissati, la coppia dipende solo da  $\delta$ . Notiamo inoltre che l'equilibrio dell'angolo di coppia è garantito solo nell'intervallo di equilibrio:  $\delta \in [-\pi/2, \pi/2]$  con estremi punti di equilibrio stabile.

Se infatti ad esempio andassimo oltre  $\pi/2$  nel funzionamento da generatore, la funzione va a decrescere ( $\partial C / \partial \delta < 0$ )  $\rightarrow$  motore (equilibrio rotto).

- Nell'intervallo  $\delta \in [-\pi/2, \pi/2]$ , se  $C$  motrice aumenta ( $\partial C / \partial \delta > 0$ )  $\rightarrow$  GENERATORE
- Nell'intervallo  $\delta \in [-\pi/2, \pi/2]$ , se  $C$  frenante aumenta ( $\partial C / \partial \delta < 0$ )  $\rightarrow$  MOTORE

## SVANTAGGI SUL FUNZIONAMENTO DA MOTORE

- La macchina ruota sempre alla stessa velocità imposta dalla rete esterna:  $\omega_R = \omega$  quindi ad esempio se volessi che il motore giri più veloce, avrei bisogno di aumentare anche la frequenza della rete.
- Affinché la macchina funzioni da motore, deve essere collegata alla rete esterna facendo in modo che le due velocità (rotazione della sincrona e pulsazione della rete) coincidano, quindi ad esempio bisogna aspettare che ciò accada prima che il motore funzioni. In pratica bisogna aspettare che  $E$  ed  $E_{i0}$  siano allineati prima che il motore si avvii.
- La macchina sincrona non è autoavviante, senza dispositivi elettronici di potenza che ne regolano l'alimentazione (sempre per il discorso della regolazione dell'angolo delta).

## FUNZIONAMENTO DA CONDENSATORE ROTANTE

Quando un generatore sincrono è sovraeccitato senza fornire  $\omega_R$ , eroga potenza reattiva e di fatto si comporta da condensatore.

E' usato talvolta nel rifasamento di reti trifase

## DETERMINAZIONE DEL CIRCUITO EQUIVALENTE (MODELLO DI BEHN - ESCHEMBURG)

- Si determina  $E_{i0}$  con la prova a vuoto ( $E_{i0} = E$ )
- Con la prova in corto-circuito, si chiudono i terminali dello statore in modo che  $I$  sia limitata solo dalla  $X_s$ . Importante abbassare  $I_{cc}$  in modo tale che  $I_{cc} < I_n$ ; si ha quindi:

$$I_{cc} = E_{cc} / X_s \quad (\text{per una specifica } I_e)$$

