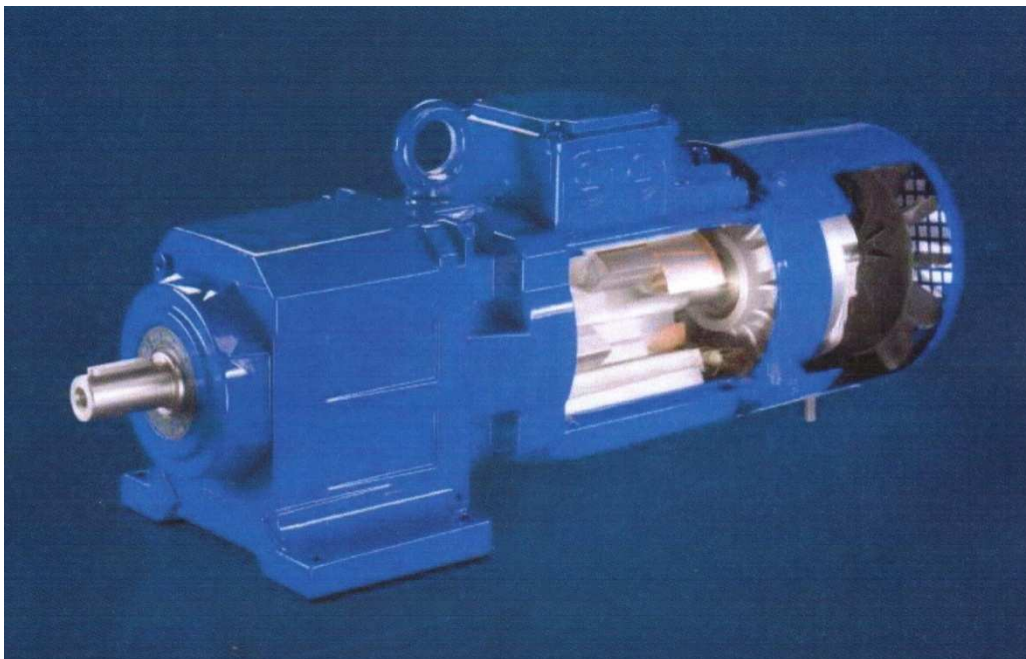


# *MACCHINE ELETTRICHE*

*– Macchine Sincrone –*

Stefano Pastore



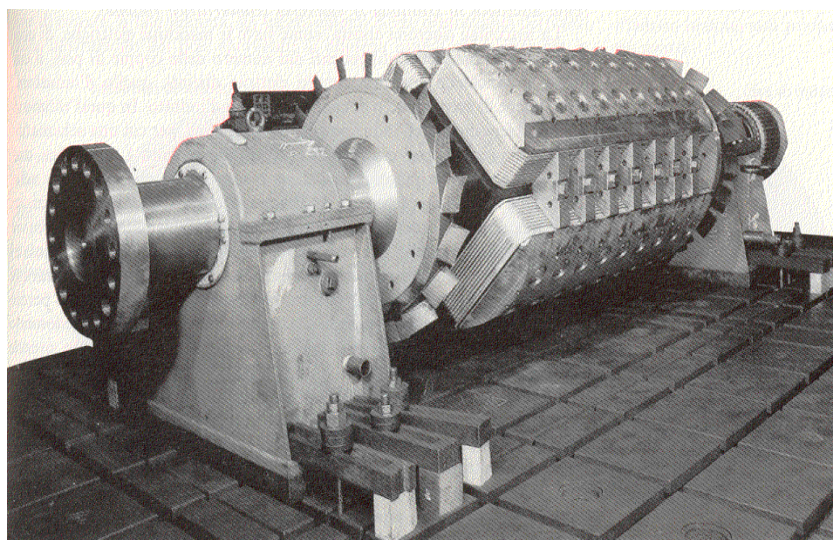
Dipartimento di Ingegneria e Architettura

Corso di Elettrotecnica (IN 043)

a.a. 2012-13

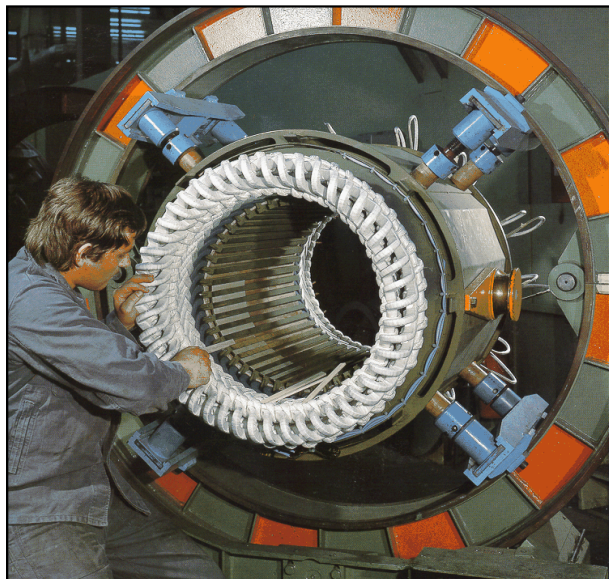
## *Introduzione*

- I generatori e i motori sincroni sono formati da due parti:
  - Induttore (parte rotante) il cui scopo è creare il flusso di induzione
  - Indotto (parte fissa) contenenti i conduttori sede delle f.e.m. indotte



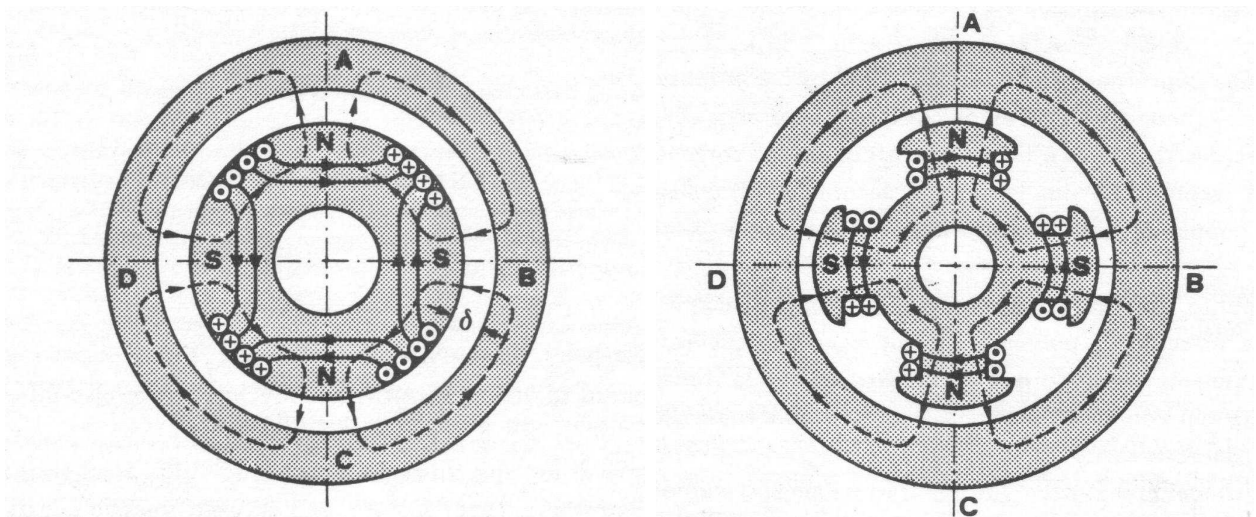
## *Indotto*

- 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.



# Induttore

- 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. E' in pratica un elettromagnete eccitato in continua. Si possono usare anche magneti permanenti.



## *Avvolgimento di eccitazione*

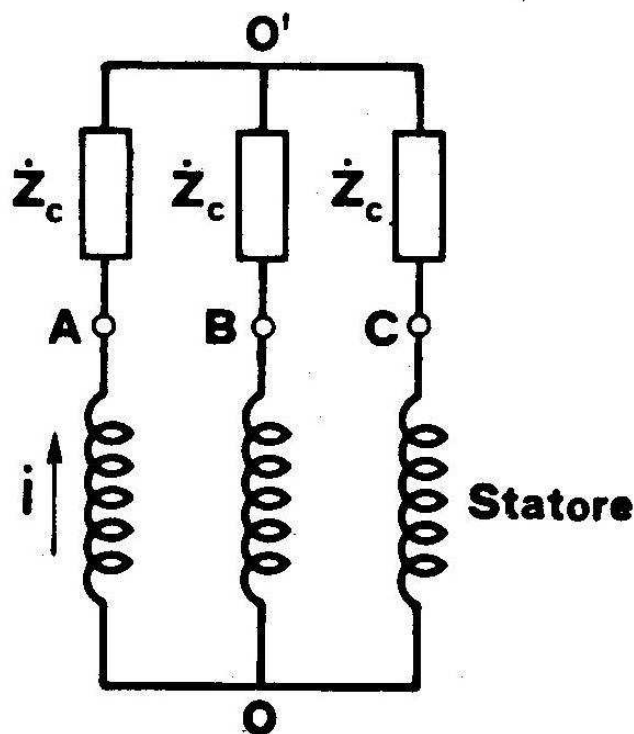
- L'avvolgimento di eccitazione, percorso dalla corrente continua  $i_e$ , crea una f.m.m. al traferro e quindi un campo magnetico in modo tale che si possono distinguere successivamente un “polo nord” (flusso “uscente” dal polo) e un “polo sud” (flusso “entrante” nel polo). La distanza fra l'asse di un polo nord e di un polo sud misurata al traferro è pari al passo polare  $\tau$  la cui espressione è la seguente, dove  $D$  è il diametro di alesatura ( $2R$ ), e  $p$  il numero di coppie di poli dell'avvolgimento:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi R}{p}$$

- 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.

## Funzionamento intuitivo

- Il rotore viene fatto girare da una coppia esterna a velocità angolare costante  $\omega_m$  ed è alimentato da una corrente continua  $i_r$  detta di eccitazione. Lo statore è chiuso su una carico a stella equilibrato  $\mathbf{z}_c$ . Si suppone che la macchina funzioni in assenza di saturazione del ferro (macchina non satura)



## *Funzionamento intuitivo (2)*

- 1) Si produce nel traferro un campo  $B_r$  rotante con velocità angolare  $\omega_m$
- 2) Mentre un polo induttore, per esempio il nord (N) si sposta di un passo polare  $\tau$ , un conduttore fisso nello statore viene tagliato da tutte le linee di forza corrispondenti al flusso totale  $\Phi_e$  di eccitazione uscente dal polo. Nei conduttori dello statore si genera un sistema simmetrico di f.e.m. indotte  $E_s$  a pulsazione:  
 $\omega = p \omega_m$  (nel rotore non ci sono tensioni indotte:  $E_r = 0$ )
- 3) sistema  $E_s$  genera correnti equilibrate  $I_s$  con pulsazione  $\omega$

### *Funzionamento intuitivo (3)*

- 4) Correnti  $I_s$  producono un campo rotante  $B_s$  con velocità di rotazione  $\omega_c = \omega/p = \omega_m$
- 5)  $B_s$  e  $B_r$  ruotano alla stessa velocità (così come  $B_s$  e  $\omega_r$  – da cui il nome di macchina sincrona) e quindi si compongono in  $B$  che genera le tensioni simmetriche complessive  $E_{Ts}$  nello statore ( $E_{Tr} = 0$ )
- 6) Nel funzionamento descritto, 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



## *Equazioni interne*

- Riferendosi alla figura precedente (corrente  $\mathbf{I}$  è uscente dai morsetti della macchina):

$$\mathbf{V}_0 - \mathbf{V}_A - j \frac{\omega}{2} k_a N \Phi_e - j \frac{\omega}{2} k_a N \Phi_s = (R + jX_d) \mathbf{I}$$

- I flussi si possono sommare solo in regime lineare, senza saturazione del ferro.  
Considerando la f.e.m. dovuta alle correnti di statore come una caduta induttiva dovuta a una reattanza di reazione  $X_r$ , si ottiene la reattanza sincrona  $X_s$  come:

$$X_s = X_r + X_d$$

- Poiché  $\mathbf{V}_0 = \mathbf{V}_{0'}$ , ponendo  $\mathbf{V} = \mathbf{V}_A - \mathbf{V}_{0'}$ , ne segue la prima equazione interna:

$$1) \quad -j \frac{\omega}{2} k_a N \Phi_e = (R + jX_s) \mathbf{I} + \mathbf{V}$$

- Con  $\mathbf{z}_s = R + jX_s$  e  $\mathbf{E}_e = -j \frac{\omega}{2} k_a N \Phi_e$

## Equazioni interne (2)

- L'avvolgimento di eccitazione (rotore) è alimentato da una tensione continua  $v_e$ :
- 2)
- $$v_e = R_e i_e$$
- La f.m.m. di eccitazione  $\mathbf{A} \mathbf{s}_e$  ruota alla velocità del rotore. In ogni punto del traferro è una funzione sinusoidale del tempo con pulsazione  $\omega$ ; sia  $\beta$  l'angolo di fase di tale
  - grandezza. Indicando con  $k_{ae}$  il fattore di avvolgimento dell'avvolgimento di eccitazione e con  $N_e$  il numero totale di conduttori attivi risulta, in valore efficace:

3)

$$\mathbf{A} \mathbf{s}_e = \frac{\sqrt{2}}{\pi} k_{ae} \frac{N_e}{2p} i_e e^{j\beta} = \mathfrak{R}_t \Phi_e$$

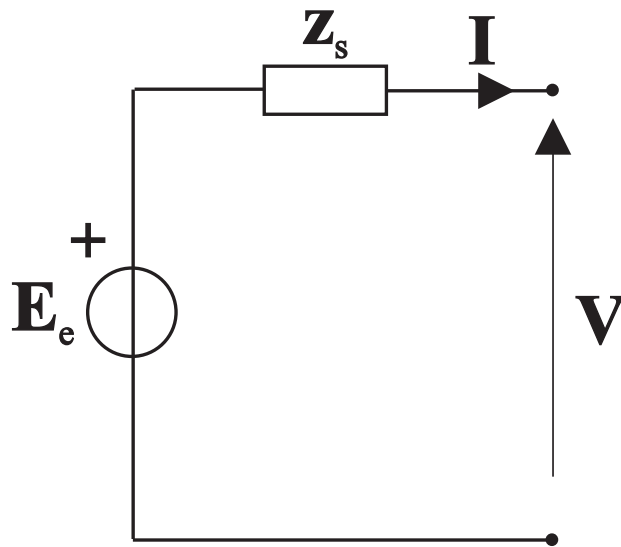
- dove  $\mathfrak{R}_t = \frac{\pi \delta}{2\mu_0 l \tau}$

4) Infine:

$$\omega = p \omega_m$$

## *Equazioni interne (3)*

- Quindi il modello circuitale che ne deriva è



Dove la frequenza  $\omega$  è determinata dalla velocità di rotazione meccanica del rotore e la f.e.m. è determinata dalla corrente di eccitazione  $i_e$

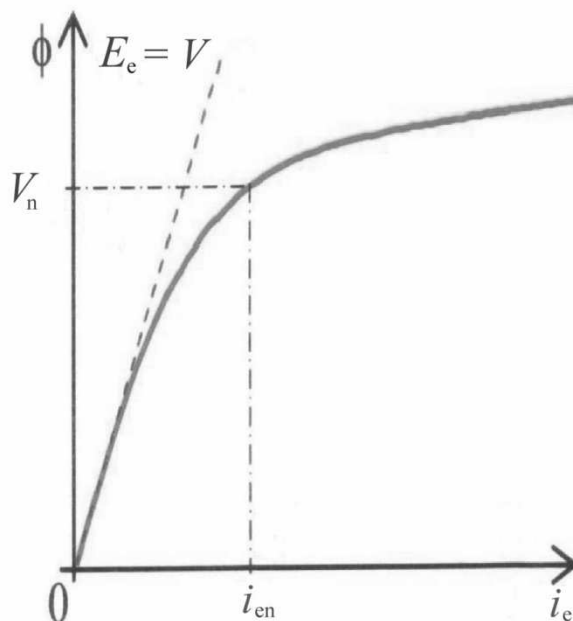
## *Equazioni esterne*

- Variabili:  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{I}$ ,  $\Phi_e$ ,  $v_e$ ,  $i_e$ ,  $\beta$ ,  $\omega$ ,  $\omega_r$   
(10 variabili reali in 6 equazioni reali)
- Servono ancora 4 condizioni esterne:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_m = \text{cost} \\ i_e = \text{cost} \\ \mathbf{V} = \mathbf{z}_c \mathbf{I} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega_m = \text{cost} \\ V = \text{cost} \\ \mathbf{I} = \text{cost} \end{array} \right.$$

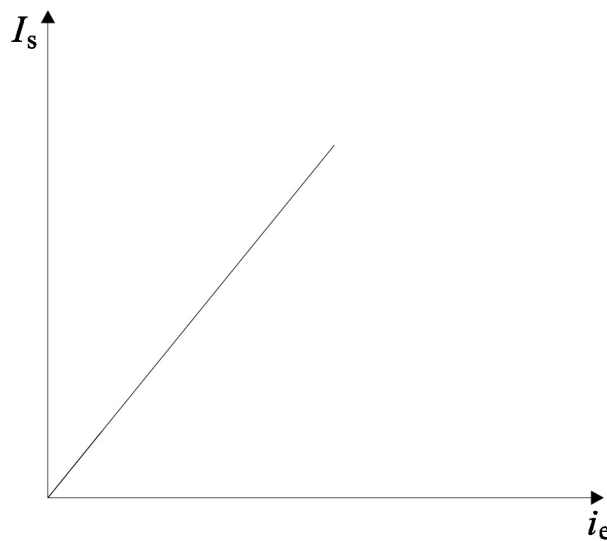
## *Prova a vuoto*

- La prova a vuoto di una macchina sincrona consiste nel fare ruotare la macchina alla velocità di regime, lasciando i morsetti di indotto aperti. Viene quindi misurata la tensione concatenata di statore in corrispondenza a diversi valori della corrente di eccitazione. Viene quindi tracciata la curva (caratteristica) di magnetizzazione a vuoto che fornisce la tensione ai morsetti di statore in funzione della corrente di eccitazione. A causa della saturazione del materiale ferromagnetico la curva non è rettilinea.



## *Prova in corto circuito*

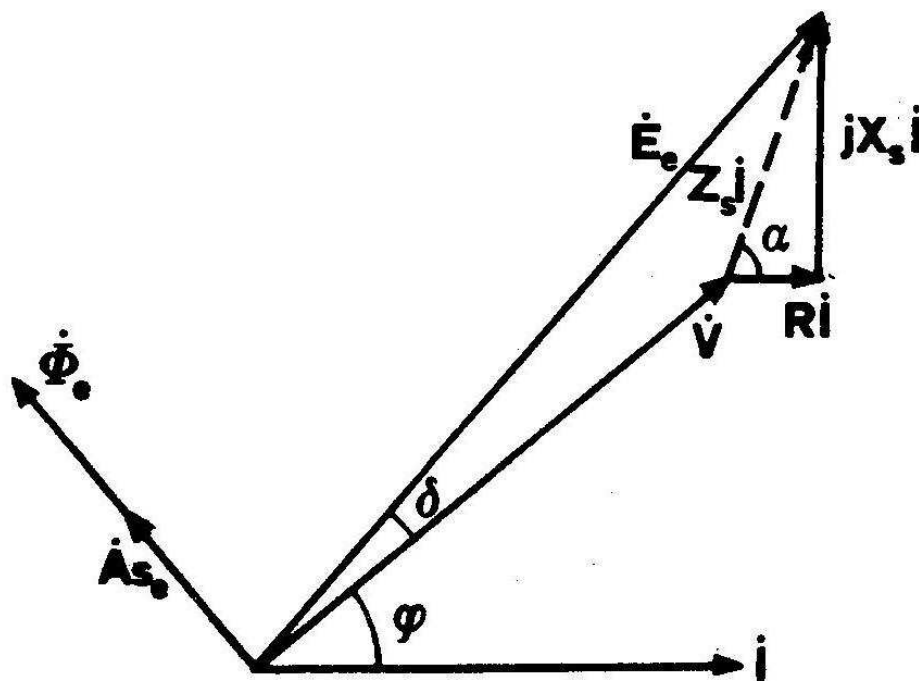
- La prova in cortocircuito di una macchina sincrona consiste nel fare ruotare la macchina alla velocità di regime, con i morsetti di indotto in cortocircuito. Viene quindi misurata la corrente in ciascuna fase di statore in corrispondenza a diversi valori della corrente di eccitazione. Viene quindi tracciata la caratteristica in cortocircuito



- Si ricava  $\mathbf{z}_s = \frac{\mathbf{E}_e}{\mathbf{I}_s}$

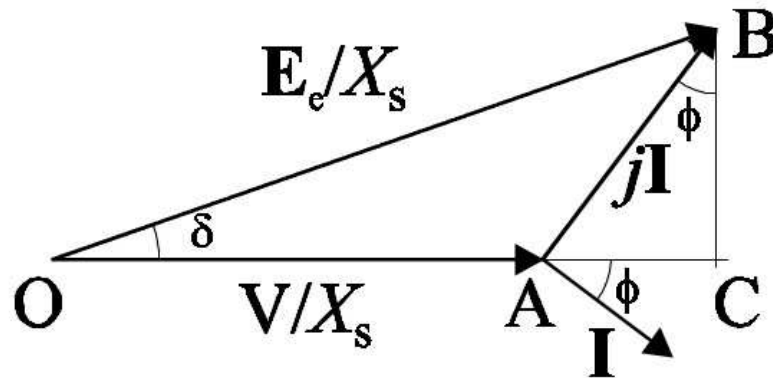
## Diagramma di Behn Eschenburg

- Il diagramma vettoriale (rotore liscio) relativo alle equazioni interne è



- Dove 
$$\mathbf{E}_e = -j \frac{\omega}{2} k_a N \Phi_e,$$
- Dal momento che si ha:  $R \ll X_s$ , il diagramma vettoriale può essere disegnato nel seguente modo

## *Potenza complessa di una macchina sincrona*



- La potenza complessa  $P_c$  è (funzionamento da generatore,  $\mathbf{I}$  uscente dai morsetti, quindi convenzione non-normale)

$$\begin{aligned}
 P_c &= 3\mathbf{V}\mathbf{I}^* = 3\mathbf{V}\left[\frac{\mathbf{E}_e^* - \mathbf{V}^*}{-jX_s}\right] = 3j\frac{\mathbf{V}\mathbf{E}_e^*}{X_s} - 3j\frac{V^2}{X_s} = \\
 &= 3j\frac{VE_e e^{-j\delta}}{X_s} - 3j\frac{V^2}{X_s} = \\
 &= 3\frac{VE_e \sin \delta}{X_s} + j\left(3\frac{VE_e \cos \delta}{X_s} - 3\frac{V^2}{X_s}\right)
 \end{aligned}$$



## *Potenze attive e reattive di una macchina sincrona*

- Le potenze attive e reattive sono

$$P = 3 \frac{VE_e \sin \delta}{X_s}$$

$$Q = 3 \frac{V}{X_s} (E_e \cos \delta - V)$$

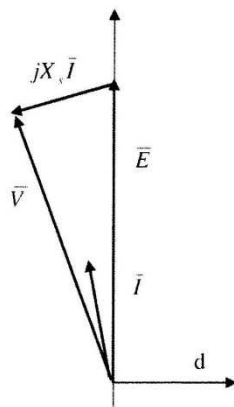
- L'espressione della potenza attiva  $P$  mostra che se l'angolo di carico  $\delta$  cambia segno (cioè se il fasore  $\mathbf{E}_e$  si sposta in ritardo rispetto a  $\mathbf{V}$ ) anche la potenza attiva  $P$ , misurata come erogata, cambia segno: dunque la macchina passa da funzionamento come generatore a funzionamento come motore sincrono (questa reversibilità può effettivamente verificarsi, ad esempio nelle centrali idroelettriche di generazione e pompaggio, con sistemi turbina-pompa, cfr. centrale di Edolo)

## *Potenze attive e reattive di una macchina sincrona (2)*

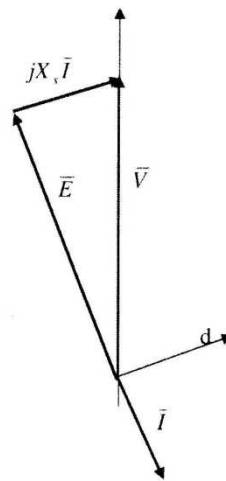
- Nel funzionamento senza scambio di potenza attiva con la rete ( $\delta = 0$ ), la macchina scambia solamente potenza reattiva  $Q$
- Comunque, in caso di sovra-eccitazione ( $E_e \cos \delta > V$ ), la potenza reattiva  $Q$  è erogata dalla macchina, che si comporta dunque come un condensatore
- in caso di sotto-eccitazione ( $E_e \cos \delta < V$ ), la macchina assorbe potenza reattiva dalla rete e quindi si comporta come un induttore
- Le macchine sincrone sono usate anche per lo scambio di potenza reattiva per il rifasamento nei nodi delle reti di trasmissione dell'energia, e in tal caso sono chiamate compensatori sincroni.

## Potenze attive e reattive di una macchina sincrona (3)

- Funzionamento da motore (a) e da generatore (b)

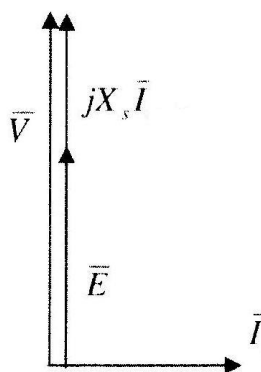


a)

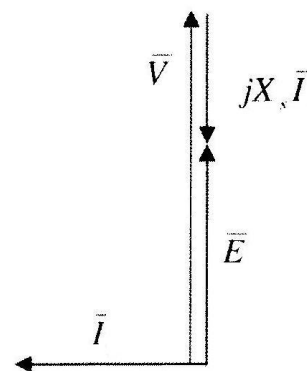


b)

- Funzionamento come induttore (a) e condensatore (b)



a)



b)

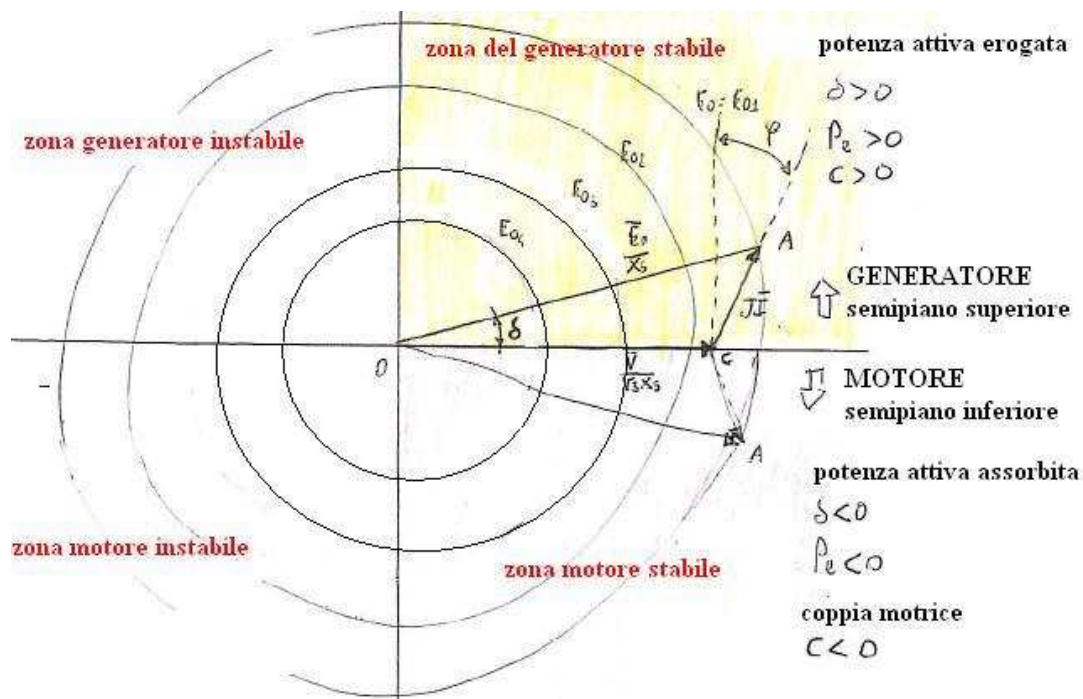
## *Coppia di una macchina sincrona*

- La coppia assume il valore (funzionamento da generatore - coppia positiva se esercitata da un motore esterno sulla macchina sincrona)

$$C = \frac{P}{\omega_m} = \frac{P}{\frac{\omega}{p}} = 3p \frac{VE_e}{\omega X_s} \sin \delta$$

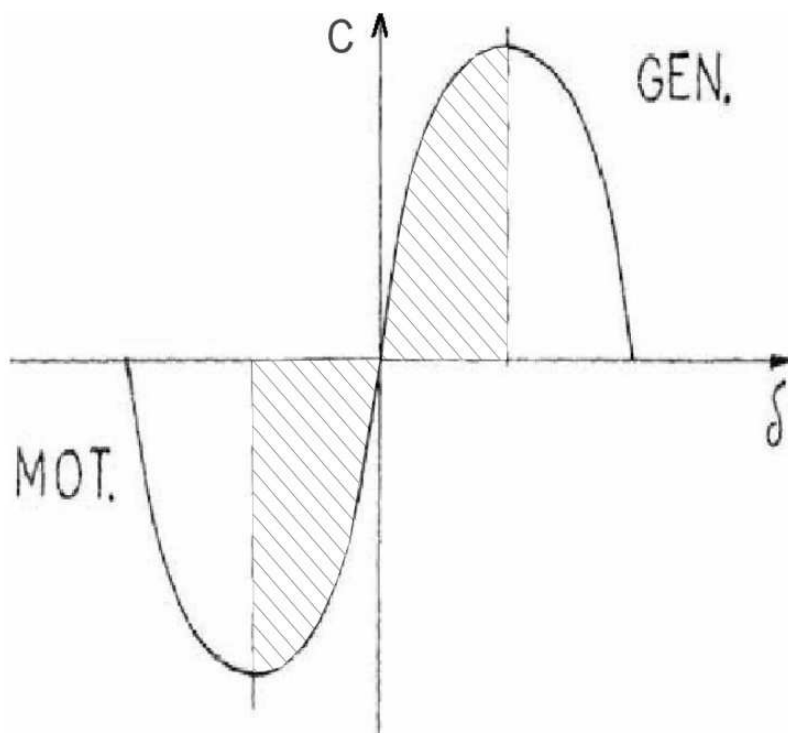
# Diagramma polare

- Il diagramma polare nasce per il fatto che la f.e.m.  $E_e$  dipende solo dalla corrente di eccitazione  $i_e$  e quindi rimane costante al variare del carico



## *Stabilità della macchina sincrona*

- Condizioni di funzionamento stabili: si hanno solo nella parte tratteggiata (quadranti di destra del diagramma polare) perché solo in essi a un aumento di  $\delta$ , provocato dall'interventi di coppie frenanti o motrici, corrispondono coppie di segno contrario che crescono con l'aumentare di  $\delta$ .



## Motore sincrono

- Data una certa frequenza della tensione di alimentazione, la sua velocità è rigorosamente costante in qualsiasi condizione di carico compresa entro i limiti della potenza di targa. Per mantenere la coppia, il motore deve sempre girare in sincronismo con il campo di eccitazione. Il motore sincrono non è auto-avviante, se non con l'utilizzo di appositi azionamenti che variano gradualmente la frequenza di alimentazione da zero al valore voluto.

