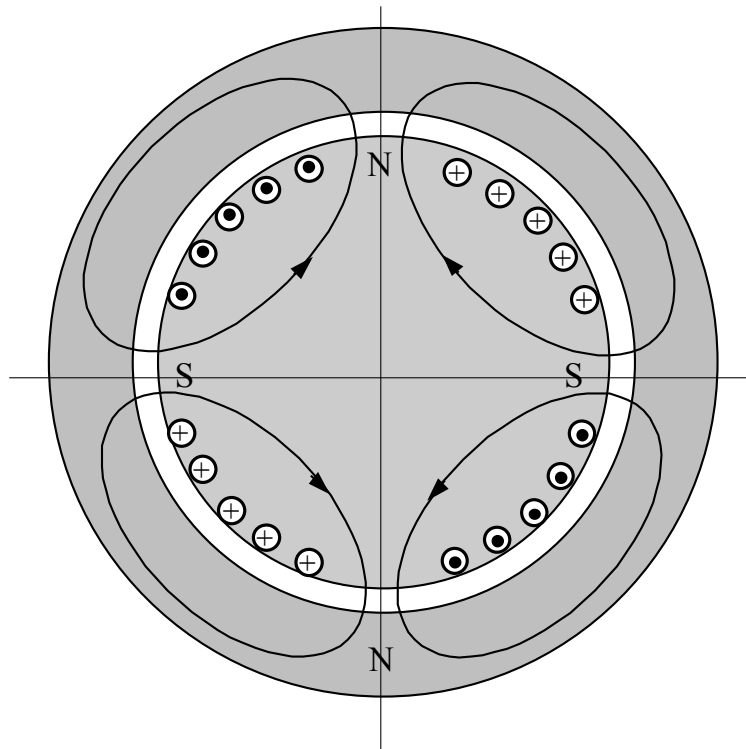
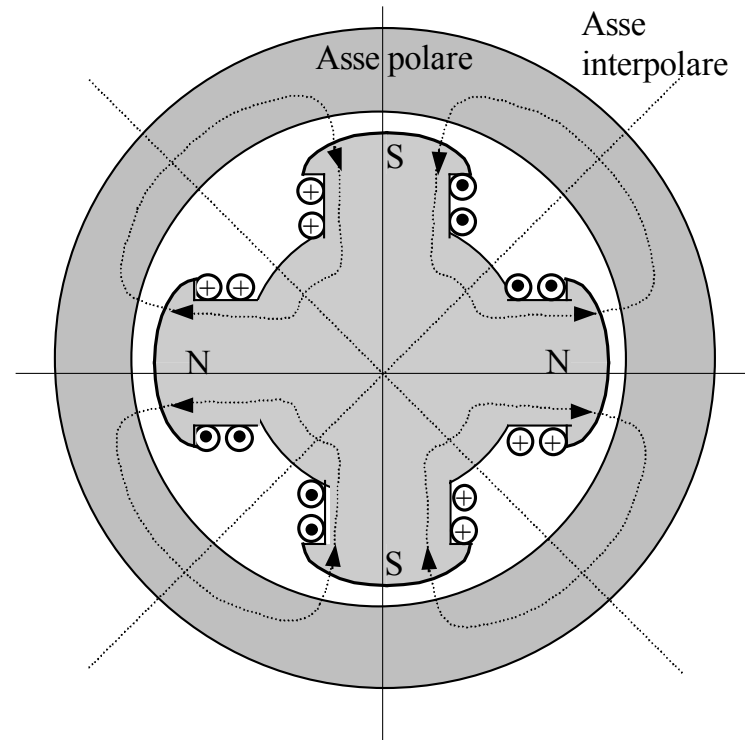


# Macchina sincrona

Macchina a poli lisci

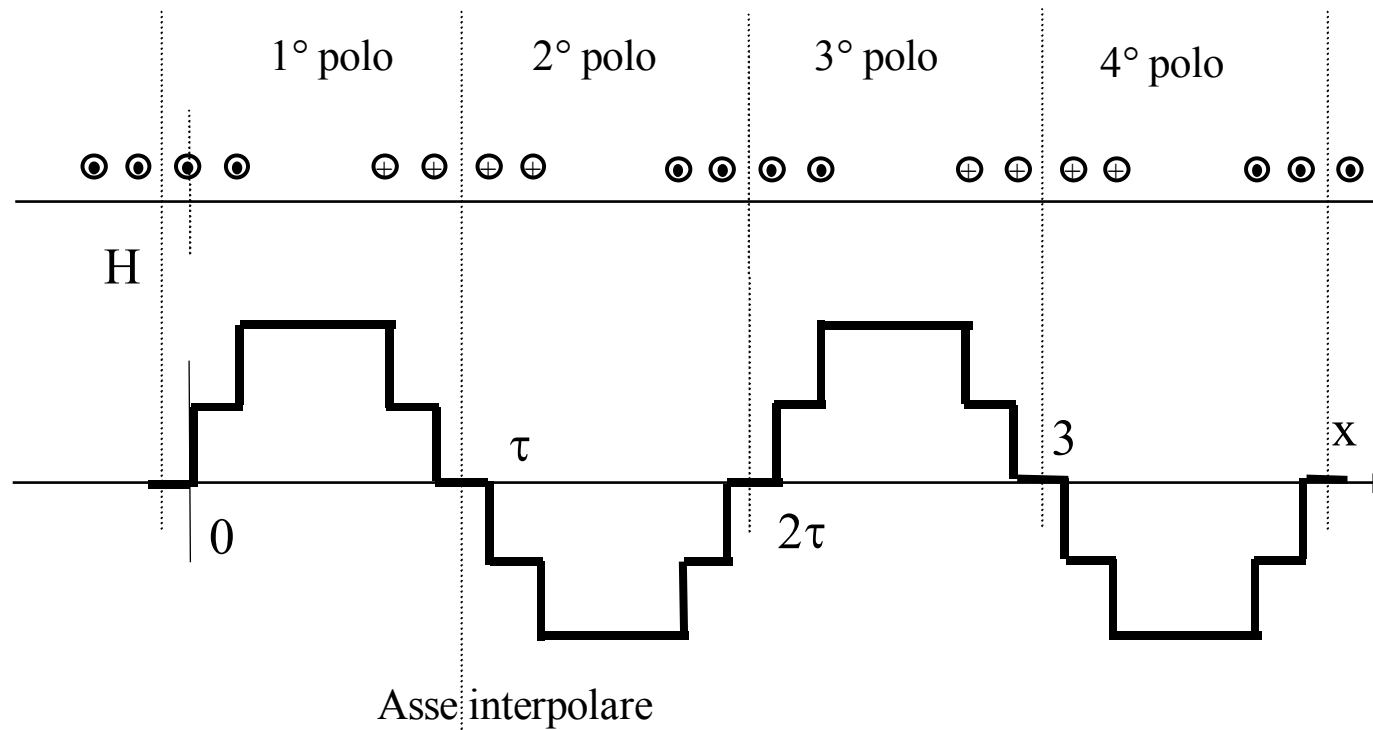


Macchina a poli salienti



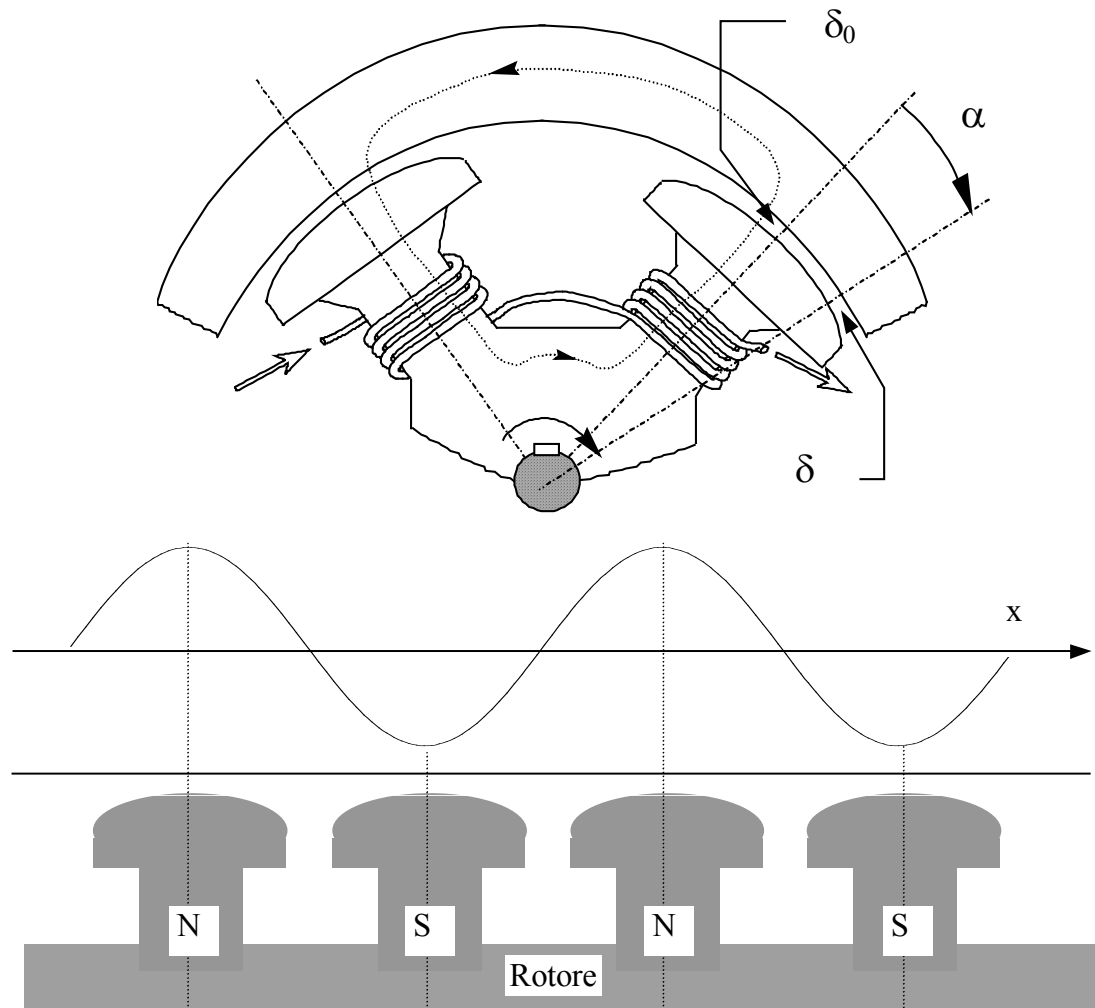
# Macchina sincrona

Campo al traferro per una macchina a poli lisci



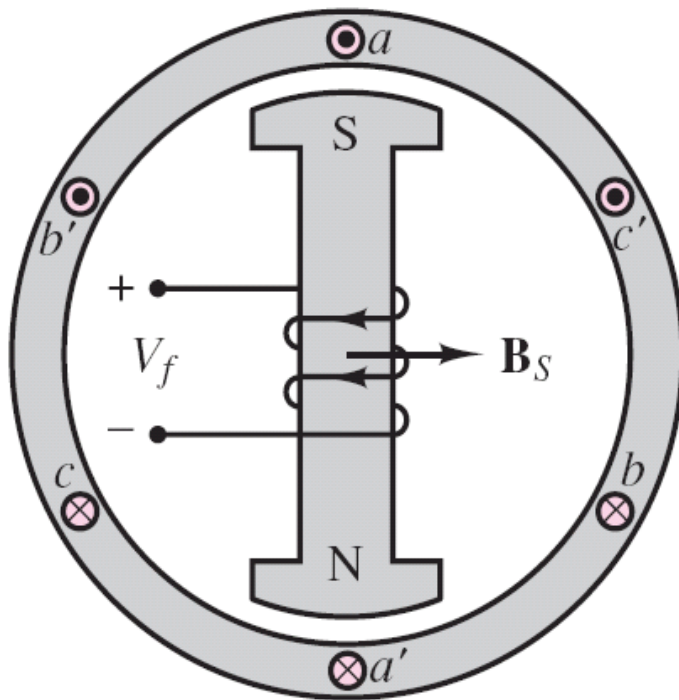
# Macchina sincrona

## Campo al traferro per una macchina a poli salienti

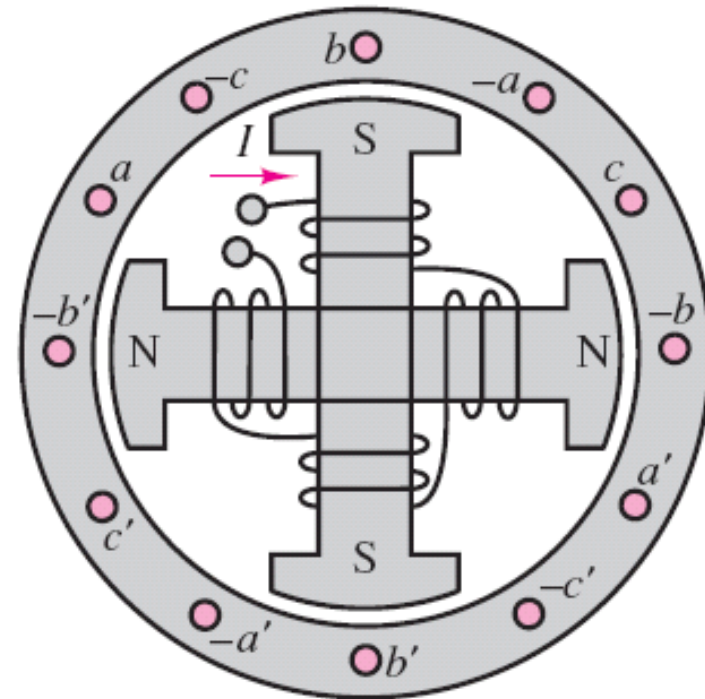


# Macchina sincrona

Rotore a due poli



Rotore a quattro poli



# Generatore sincrono (alternatore)

L'impiego precipuo delle macchine sincrone e quello da generatore ("alternatore") nelle centrali di produzione dell'energia elettrica, ove convertono potenza meccanica fornita da un motore primo (es. una turbina) in potenza elettrica (ceduta dallo statore alla rete trifase). Il rotore produce un campo al traferro ad andamento sinusoidale.

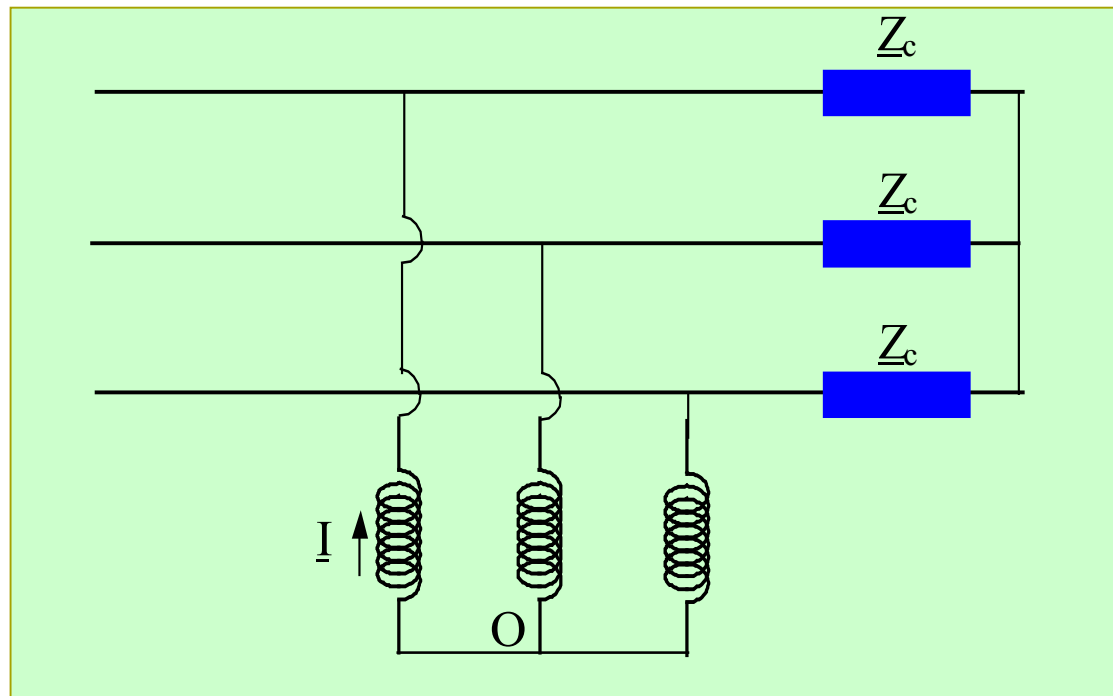
Quando si pone in rotazione il rotore alla velocità angolare costante  $\omega_m$ , il campo di eccitazione, solidale col rotore, ruota al traferro alla velocità  $\omega_c = \omega_m$ .

Il campo rotante così prodotto induce nell'avvolgimento trifase che è alloggiato nelle cave di statore un sistema trifase simmetrico di f.e.m., sinusoidali nel tempo con pulsazione  $\omega$  data dalla seguente relazione:

$$\omega = p\omega_m$$

# Generatore sincrono (alternatore)

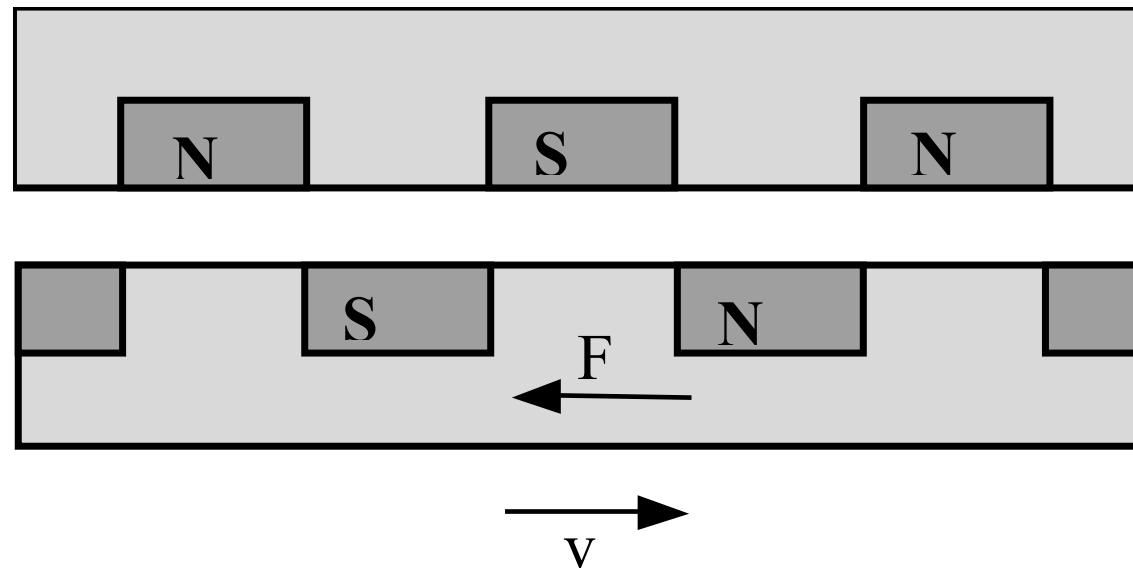
Se lo statore alimenta un carico equilibrato, esso diventa sede di tre correnti equilibrate di pulsazione  $\omega$  che producono un campo rotante statorico.



Poiché gli avvolgimenti di statore e rotore hanno uguale numero di coppie polari, il campo rotante statorico ruota con velocità angolare  $\omega_c = \omega/p = \omega_m$ .

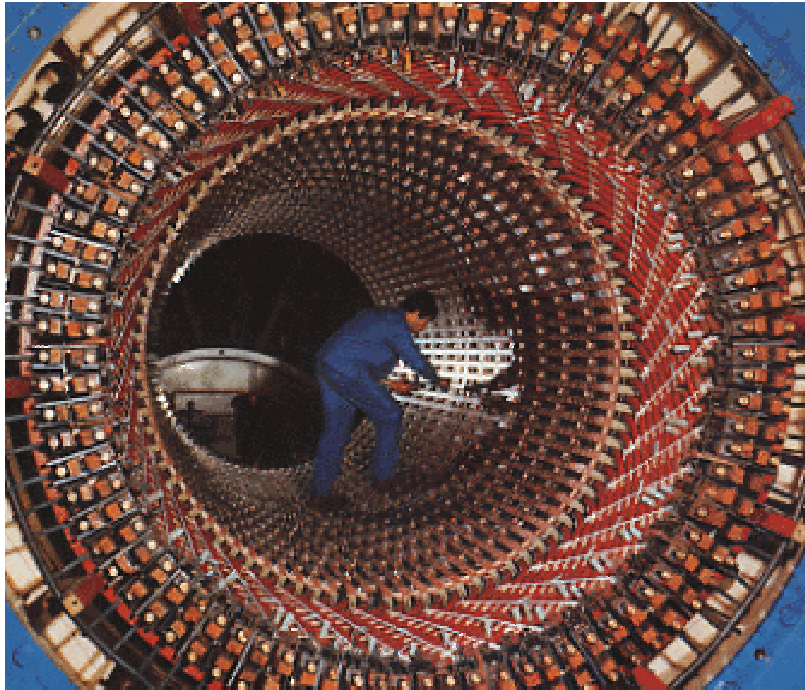
# Generatore sincrono (alternatore)

Ai due campi rotanti rotorico e statorico è associata una coppia elettromagnetica che si esercita tra rotore e statore; nel funzionamento da generatore tale coppia è resistente.



Il campo rotante statorico ruota alla stessa velocità del campo rotante rotorico, generando un unico campo risultante al traferro. Il campo risultante ruota pertanto alla stessa velocità del rotore, da cui il nome di macchina sincrona.

# Generatore sincrono (alternatore)



La potenza meccanica fornita all'albero della macchina per vincere la resistenza della coppia elettromagnetica, viene pertanto trasformata, a meno delle perdite interne della macchina, in potenza elettrica ceduta al carico collegato allo statore



# Generatore sincrono (alternatore)

Alternatore da 21 MVA, 15 kV, 4 poli



Alternatore da 23 MVA



# Generatore sincrono (alternatore)

## Regolazione della frequenza

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{p\omega_m}{2\pi} \quad \omega_m = \frac{2\pi n}{60} \quad n = \frac{60f}{p}$$

La regolazione della frequenza delle tensioni concatenate della rete alimentata dall'alternatore è strettamente legata alla regolazione della velocità di rotazione del rotore.

La frequenza industriale italiana, ovvero la frequenza normalizzata della rete di trasmissione è pari a 50 Hz. Per ottenerla, gli alternatori di centrale devono ruotare alla velocità  $n = 1500$  giri/min se dotati di due coppie polari, o alla velocità  $n = 3000$  giri/min se dotati di una sola coppia di poli (*turboalternatori*).

# Generatore sincrono (alternatore)

Regolazione della frequenza

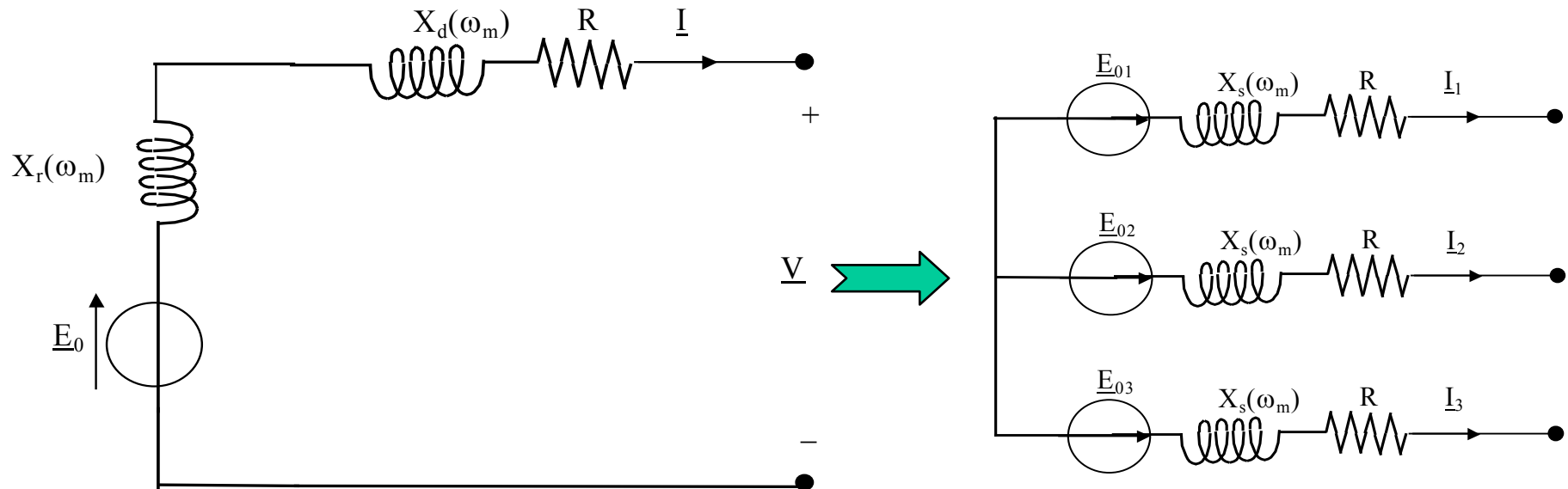
$$n = \frac{60f}{p}$$

Numero di poli	50 Hz	60 Hz
2	3000	3600
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720
12	500	600



# Generatore sincrono (alternatore)

Circuito equivalente per fase



# Generatore sincrono (alternatore)

## Regolazione della tensione

La regolazione della tensione concatenata di linea puo essere ottenuta regolando la corrente di eccitazione  $i_e$  del rotore. Se si considera il funzionamento a vuoto dell'alternatore, che si ha quando ad esso non sono collegati carichi elettrici, si ha:

$$V = \sqrt{3} E \quad E = \omega K_a N \Phi$$

Il flusso dipende a sua volta linearmente dalla corrente di eccitazione che lo genera, ovvero da  $i_e$ . La regolazione di  $V$  potrebbe anche avvenire agendo sulla velocita angolare del rotore  $\omega_m$ , e quindi su  $\omega$ , ma tale regolazione non consentirebbe di fissare rigorosamente la frequenza al valore normalizzato.

# Motore sincrono

---

Nel funzionamento da motore la macchina assorbe potenza elettrica dalla rete e la trasforma, a meno delle perdite, in potenza meccanica trasferita all'albero. La coppia elettromagnetica in questo tipo di funzionamento è motrice, e mantiene in moto sia il rotore della macchina sia il carico meccanico ad essa collegato.

L'utilizzo di questo tipo di macchina ha recentemente trovato vasta applicazione con una versione semplificata del rotore, dotato di magneti permanenti per creare il campo rotorico (motori *brushless*). Tale soluzione risulta molto vantaggiosa in quanto evita l'utilizzo di contatti striscianti e spazzole necessarie per l'adduzione di corrente ad un avvolgimento rotante.

Affinche si sviluppi una coppia motrice nella macchina, occorre il sincronismo tra campo rotante generato dallo statore e il rotore, il che si verifica solo quando il motore è già avviato e ruota alla velocità  $\omega_m = \omega/p$

Il motore sincrono non può pertanto autoavviarsi, e deve essere "lanciato" con qualche altro sistema.

# Motore sincrono

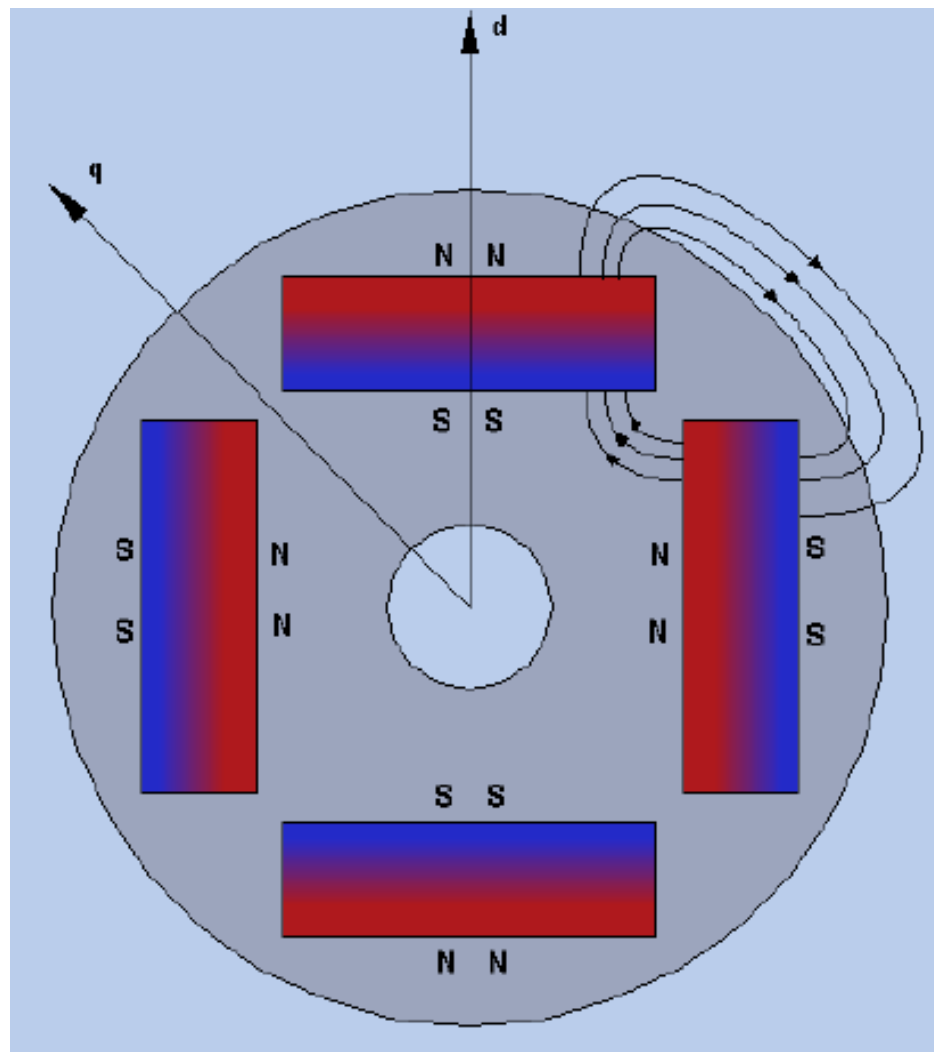
---

La soluzione tecnica piu semplice consiste nel dotare il rotore della macchina di una gabbia costituita da sbarre disposte in cave praticate nelle espansioni polari e chiuse in cortocircuito da anelli frontali.

L'alimentazione del rotore viene staccata e lo statore collegato alla linea trifase. Il motore si avvia come un normale motore asincrono a gabbia, fino ad una velocita prossima a quella di sincronismo con il campo rotante statorico. A questo punto si eccita il rotore, che viene accelerato dal campo statorico fino a raggiungere il sincronismo. Il vantaggio dei motori sincroni e la possibilita di mantenere rigorosamente costante la velocita, dato che essa dipende esclusivamente dalla frequenza di alimentazione dello statore.

Una tipica applicazione nel campo delle grandi potenze si ha nell'industria della carta, dove il perfetto sincronismo di diversi motori consente di evitare la rottura dei fogli.

# Motore sincrono



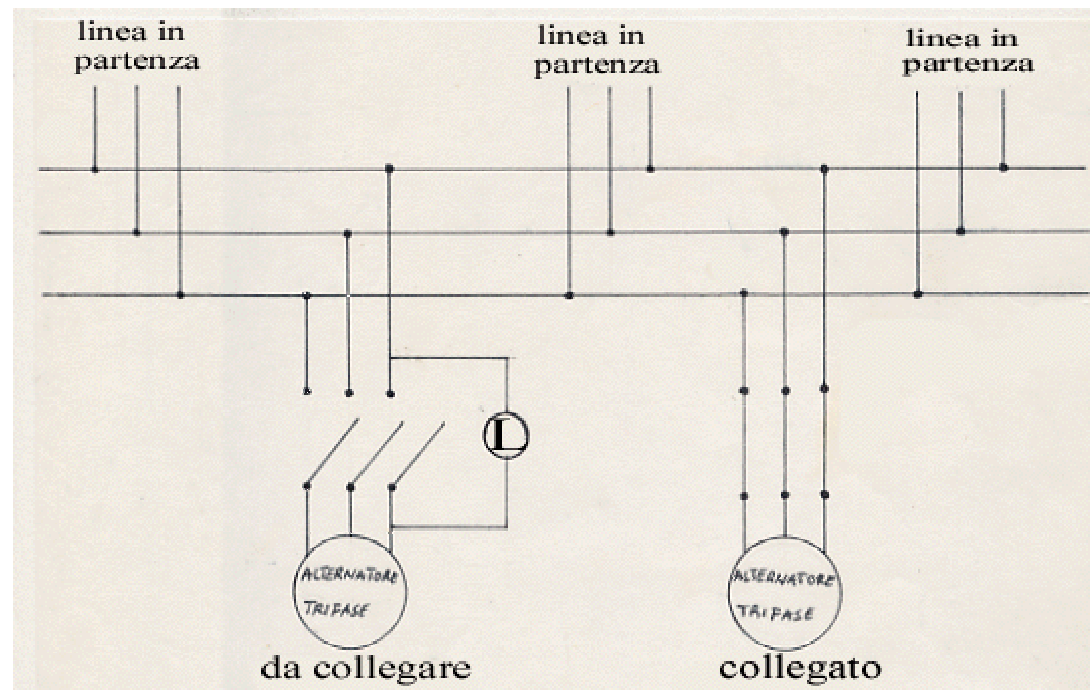


# Motore sincrono



# Parallelo con una rete di potenza infinita

Si supponga di collegare l'avvolgimento statorico 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).



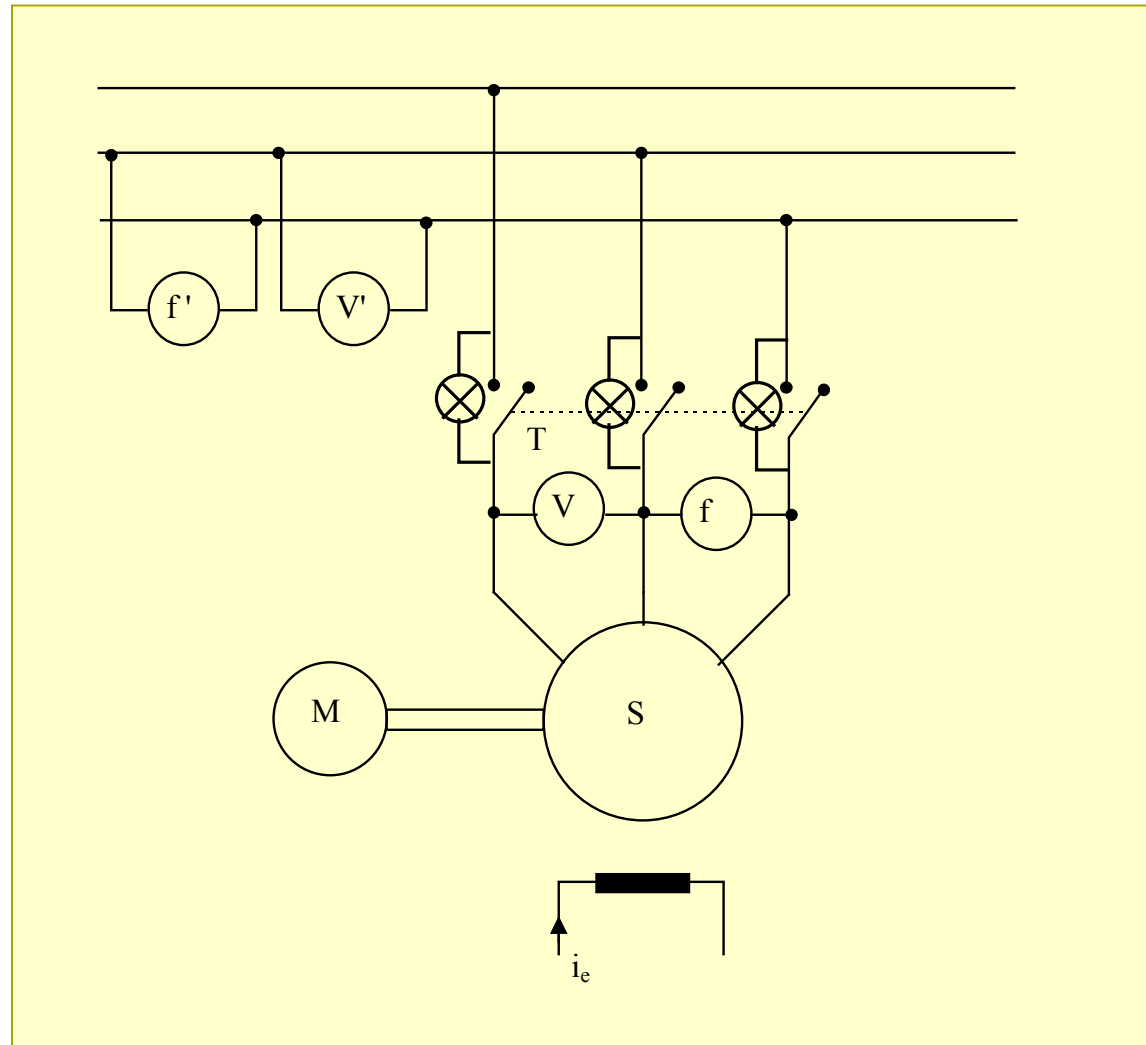
## Parallelo con una rete di potenza infinita

---

Per potere effettuare correttamente il parallelo con la rete occorre portare prima la macchina sincrona in un regime di funzionamento, a vuoto, in cui le tensioni concatenate ai morsetti della macchina coincidano in valore efficace, frequenza e fase con quelle di rete. Se cos non fosse, alla chiusura dell'interruttore di collegamento della macchina con la rete si svilupperebbero nello statore della macchina sincrona correnti di valore elevato che potrebbero provocare un grave danneggiamento della macchina stessa.

1) La macchina viene portata in rotazione, a vuoto, alla velocità di sincronismo imposta dalla frequenza di rete ( $n = 60 f / p$ ) dal motore primo M che in questo caso deve fornire solo la coppia necessaria a vincere gli attriti interni della macchina, essendo nulle la corrente di eccitazione e quella di armatura e pertanto anche la coppia elettromagnetica.

# Parallelo con una rete di potenza infinita



## Parallelo con una rete di potenza infinita

2) Viene alimentato l'avvolgimento di eccitazione con una tensione tale da ottenere ai morsetti della macchina un sistema di tensioni concatenate avente una frequenza ed un valore efficace coincidenti con quelli della rete e misurati mediante i voltmetri  $V$  e  $V'$  ed i frequenzimetri  $f$  ed  $f'$ . La macchina opera ancora a vuoto e quindi ancora il motore  $M$  deve fornire solo la coppia necessaria per vincere gli attriti.

3) Si agisce sul motore  $M$ , con una regolazione fine della velocità, per portare tensioni concatenate di rete e di macchina a coincidere in frequenza e in fase. A tale scopo si utilizzano tre lampade che si spengono solo quando le due terne di tensioni concatenate coincidono in valore efficace e fase. Quando le tre lampade sono spente (in realtà le tre lampade si illumineranno e si spegneranno con una frequenza tanto più bassa quanto più la frequenza della macchina è prossima a quella della rete), viene chiuso l'interruttore  $T$  ed il parallelo è concluso.

## Parallelo con una rete di potenza infinita

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 eguagliano 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.

