



# MACCHINE ELETTRICHE

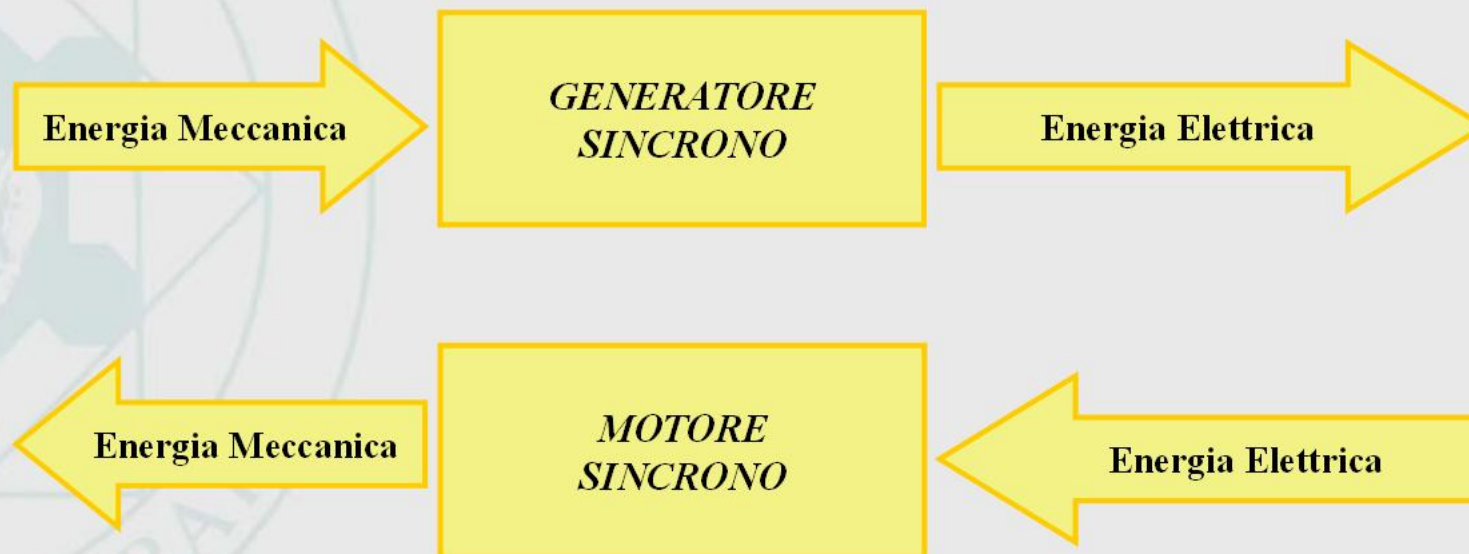
---

## *MACCHINA SINCRONA*



## ASPETTI COSTRUTTIVI

La macchina sincrona è una macchina rotante reversibile, ovvero può funzionare sia come **generatore** (trasformando energia meccanica in energia elettrica) sia come **motore** (effettuando la trasformazione inversa).





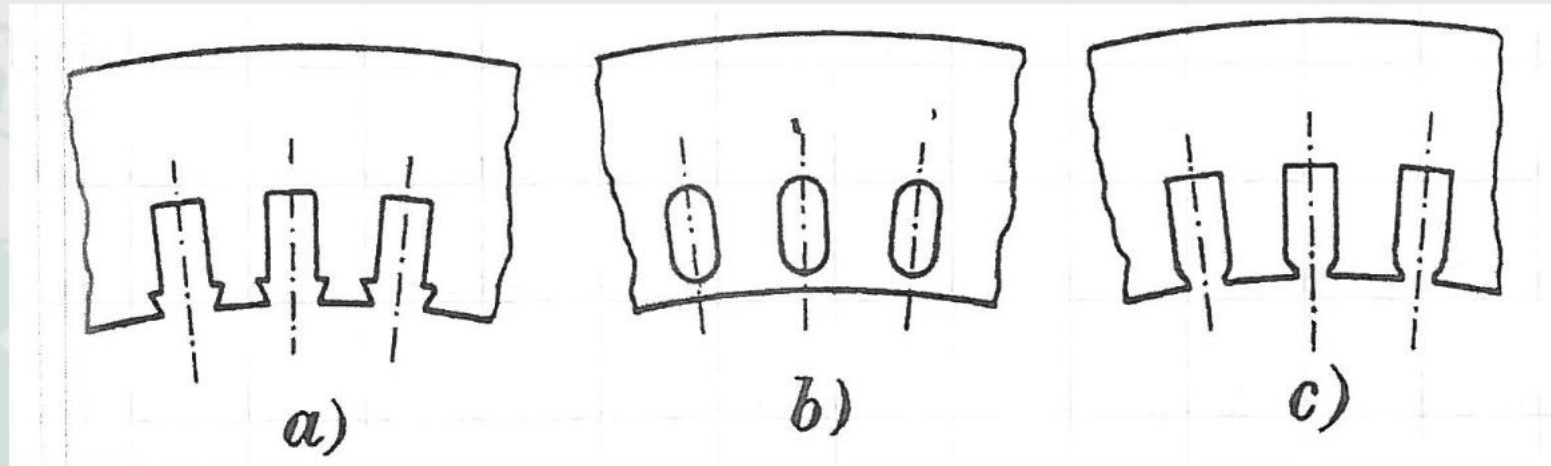
## ASPETTI COSTRUTTIVI

La macchina sincrona si compone essenzialmente di due parti:

➤ Lo **STATORE**, che rappresenta il sistema indotto ed è costituito da un nucleo cilindrico cavo di materiale ferromagnetico. Esso è costruito in forma di pacco lamellare, impiegando lamiere di ferro dello spessore di circa 0,5 mm, tagliate a forma di corone circolari e isolate tra loro con un sottile foglio di carta o un leggero strato di vernice isolante.

La divisione del nucleo magnetico in lamierini si rende necessaria per interrompere la continuità metallica del nucleo stesso, che altrimenti diverrebbe sede di notevoli perdite per correnti parassite. Infatti il nucleo dello statore, essendo soggetto a variazioni di flusso (le stesse a cui sono soggetti i conduttori attivi dell'avvolgimento) tende ad essere percorso da correnti parassite dirette parallelamente all'asse della macchina.

Sulla superficie cilindrica interna dello statore vengono praticate, lungo le generatrici del cilindro, delle scanalature dette “**cave**” o “**canali**”, destinate ad accogliere i conduttori attivi che compongono l'avvolgimento di statore. In ogni cava viene sistemato un fascio di conduttori che, collegati opportunamente, costituiscono l'avvolgimento di statore che può essere monofase o trifase;

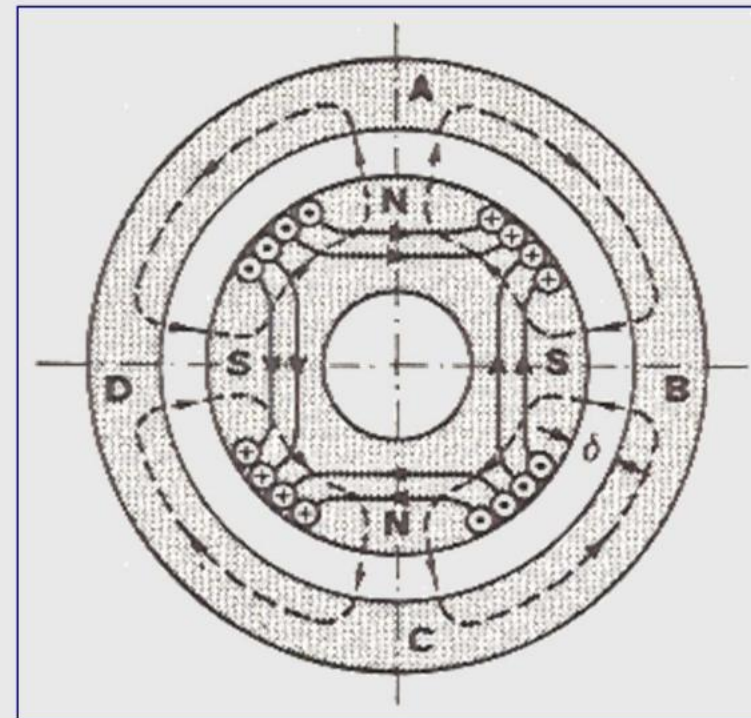
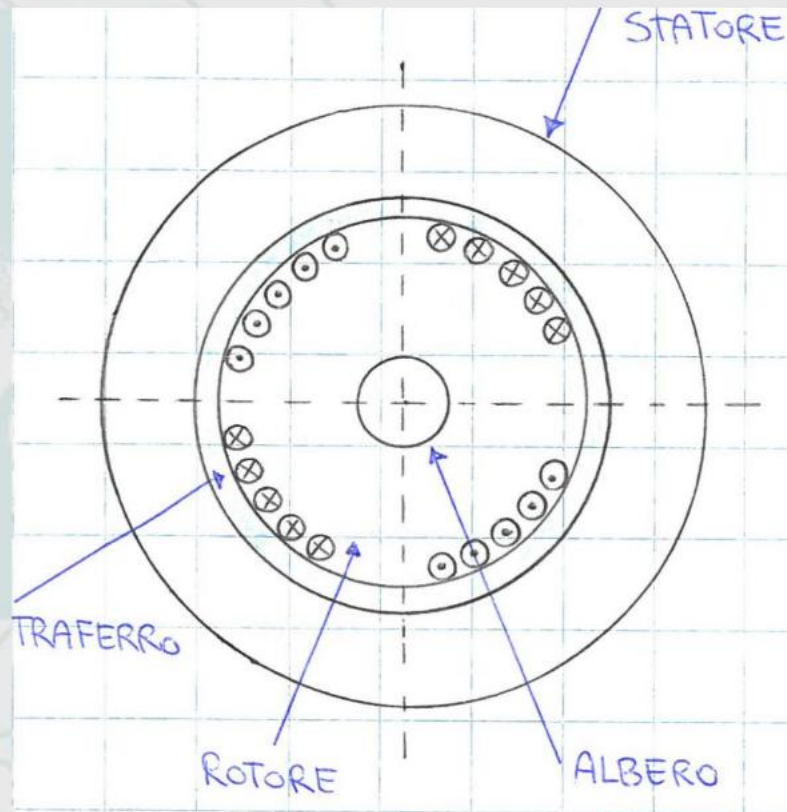


Forme tipiche dei canali d'indotto aperti (a), chiusi (b) e semichiusi (c).

➤ il **ROTORE**, che costituisce il sistema induttore. Esso è collegato sull'albero di rotazione della macchina e posto all'interno dello statore. In genere, il rotore è di materiale ferromagnetico massiccio; si possono avere due diversi tipi di struttura di rotore: a poli lisci e a poli salienti.

## ASPETTI COSTRUTTIVI

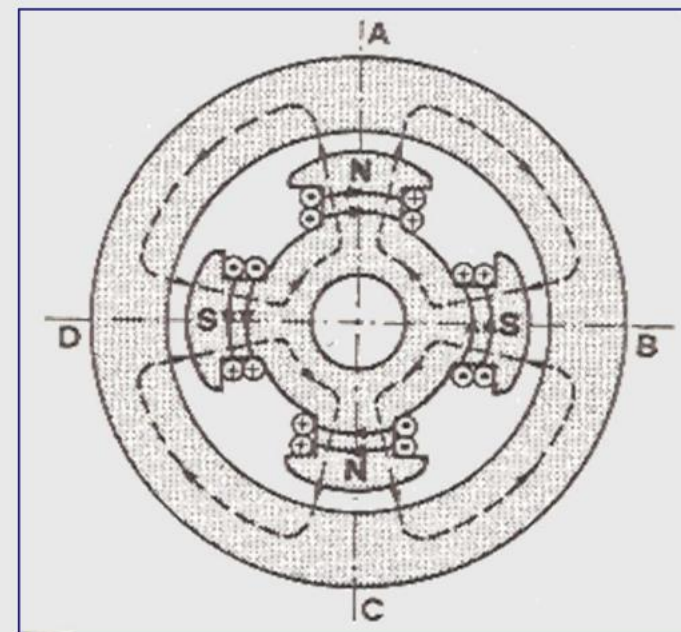
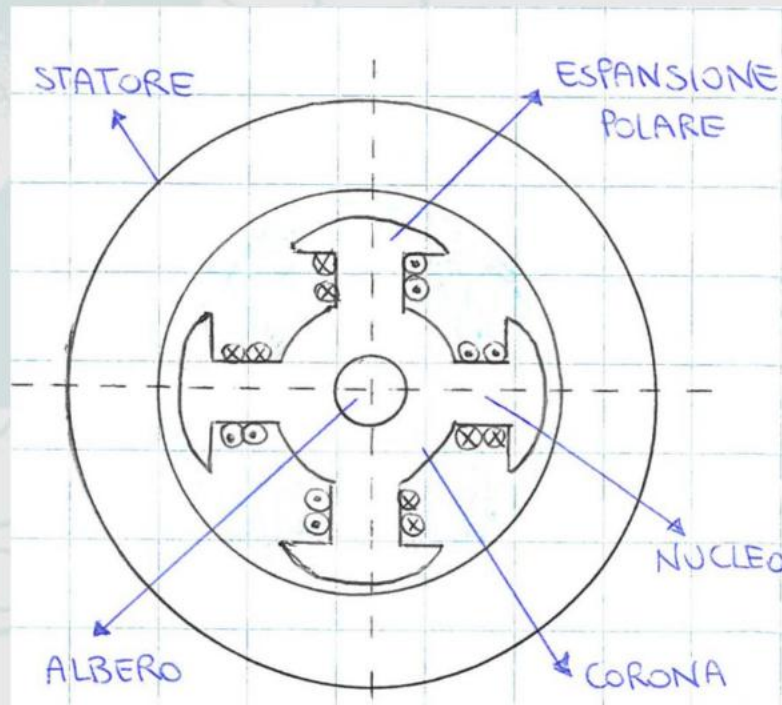
- Nel **rotore a poli lisci** l'avvolgimento di eccitazione, percorso da corrente continua, è disposto in cave praticate lungo la periferia del rotore. In questo caso quindi il traferro ha uno spessore costante ed il circuito magnetico è isotropo.



Macchina sincrona a poli lisci

## ASPETTI COSTRUTTIVI

- Il **rotore a poli salienti**, invece, è costituito fundamentalmente da una **corona** di acciaio dalla quale sporgono radialmente verso l'esterno i diversi **poli**, ciascuno costituito da un **nucleo** e da una **espansione polare** opportunamente sagomata e in genere laminata. L'insieme della corona e dei poli costituisce la **ruota polare**. Sui poli sono avvolte le bobine magnetizzanti collegate in serie tra loro. Esse vengono percorse dalla corrente continua di eccitazione in verso tale da creare alternativamente dei poli nord e sud. In questo caso il circuito magnetico risulta anisotropo, in quanto lo spessore del traferro non è costante.



Macchina sincrona a poli salienti



## ASPETTI COSTRUTTIVI

Il rotore a poli lisci ha un ingombro radiale più contenuto, pertanto la forza centrifuga cui sono sottoposti i poli con i relativi avvolgimenti durante la rotazione del rotore è più contenuta. Per questo motivo il rotore a poli lisci viene adottato per gli alternatori caratterizzati da elevate velocità di rotazione (1500-3000 giri/min), che in genere sono quelli accoppiati alle turbine a vapore o a gas.

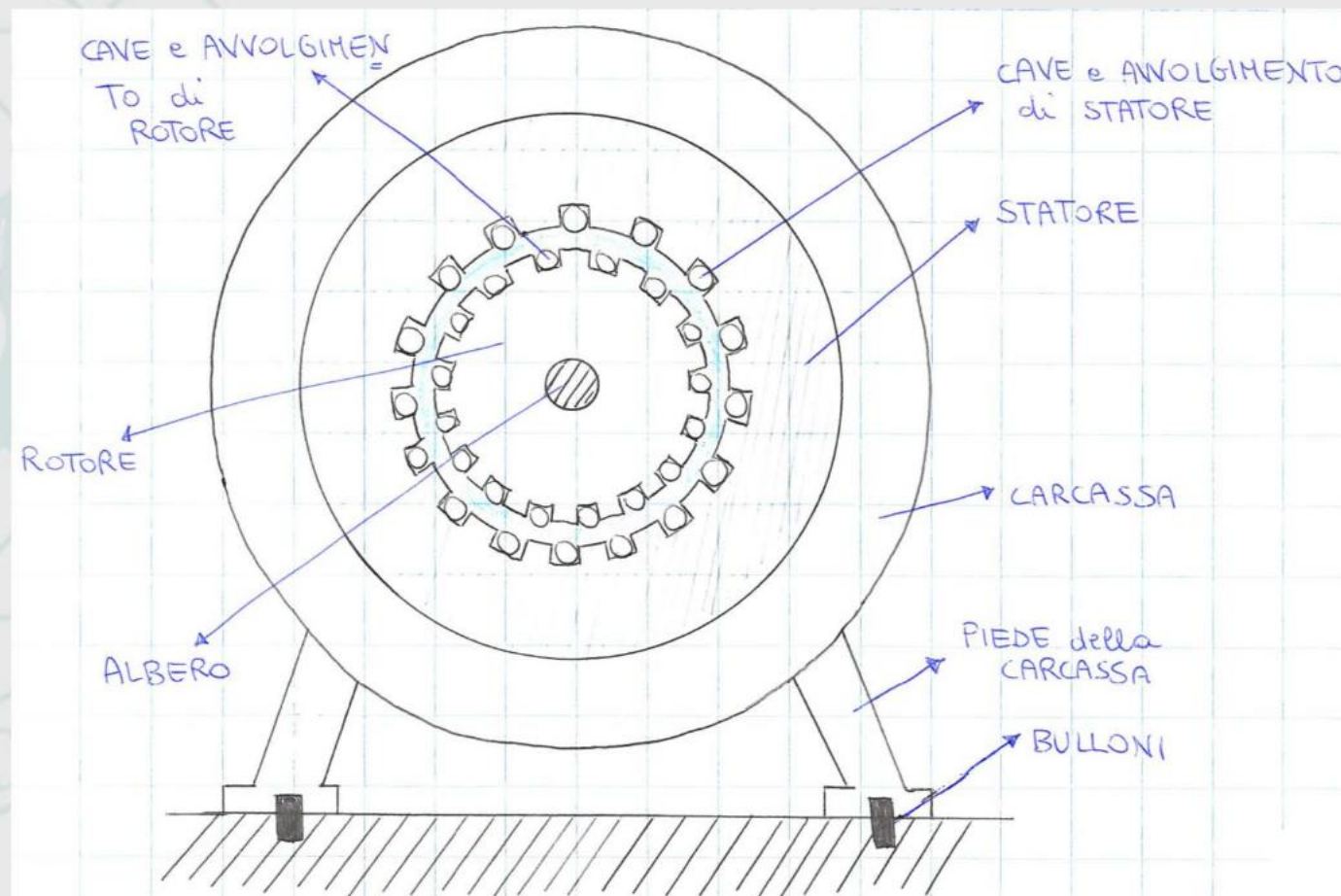
In entrambi i casi, l'alimentazione in corrente continua dell'avvolgimento di eccitazione viene eseguita collegando i due capi dell'avvolgimento di rotore a due anelli di bronzo calettati sull'albero ed isolati tra loro. Sui due anelli poggiano due spazzole di grafite, alle quali viene addotta la corrente di eccitazione. Infine, l'insieme di rotore e statore viene centrato e sorretto entro una struttura di ghisa, o lamiera saldata, che costituisce la carcassa.

La carcassa non ha nessuna funzione elettrica o magnetica, ma adempie esclusivamente alla funzione meccanica di struttura portante della macchina. Il basamento della macchina viene poi vincolato a terra tramite bulloni per evitare il ribaltamento della macchina stessa; infatti, quando il rotore viene posto in rotazione, su di esso agisce una coppia e, per il principio di azione e reazione, sullo statore agisce una coppia uguale e contraria che tenderebbe a ribaltarla se non fosse vincolato.



## ASPETTI COSTRUTTIVI

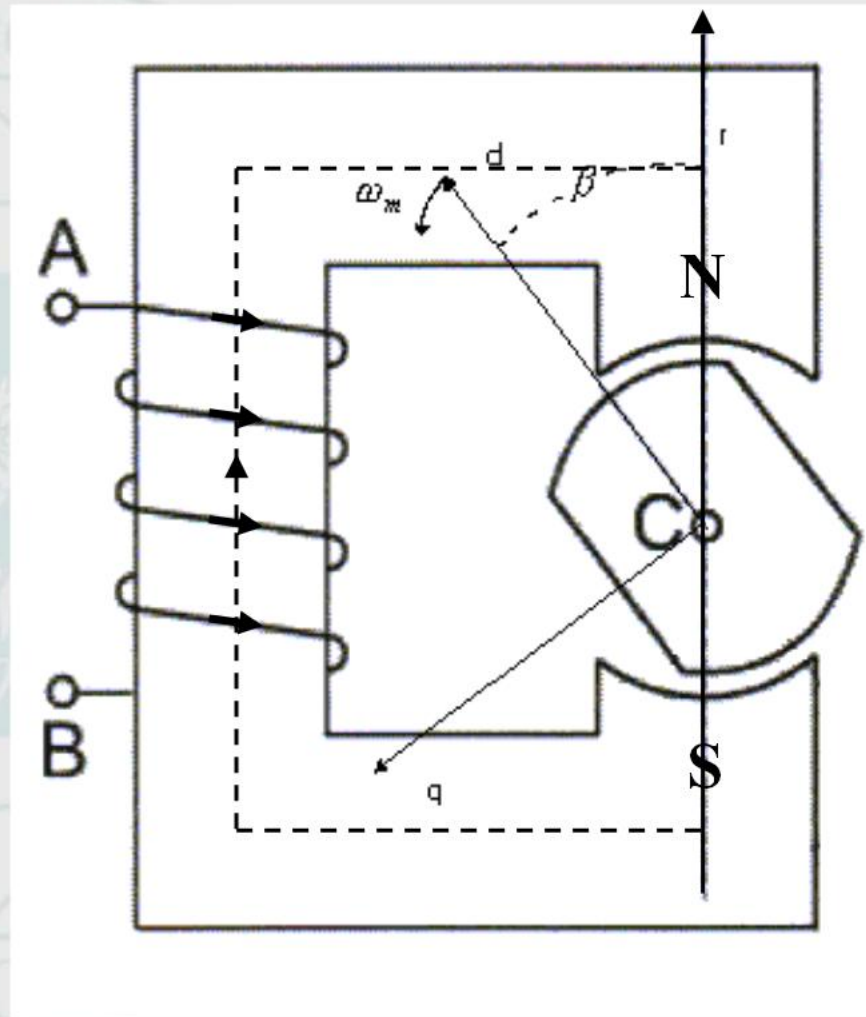
Le macchine sincrone sono, da sempre, maggiormente impiegate come generatori di elevata potenza (dell'ordine delle decine o centinaia di MVA), tuttavia negli ultimi anni si sta diffondendo il loro impiego come motori.







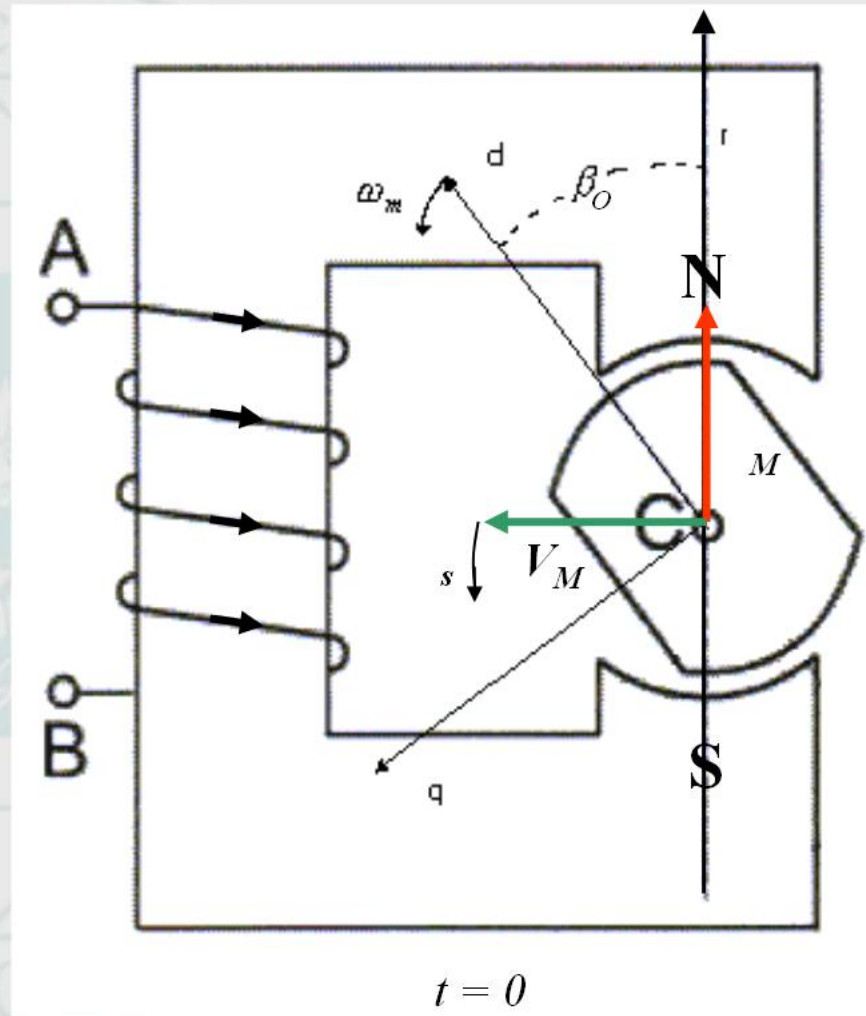
## MACCHINA SINCRONA MONOFASE A RILUTTANZA ELEMENTARE



La macchina sincrona monofase a riluttanza (RSM) elementare è costituita da un nucleo ferromagnetico (lo statore) sul quale sono avvolte  $N$  spire percorse da corrente alternata sinusoidale di pulsazione  $\omega_s$ . Tra le due espansioni polari di statore è disposto il rotore a struttura anisotropa. Si supponga di trascurare i flussi magnetici di dispersione e la resistenza dell'avvolgimento di statore.



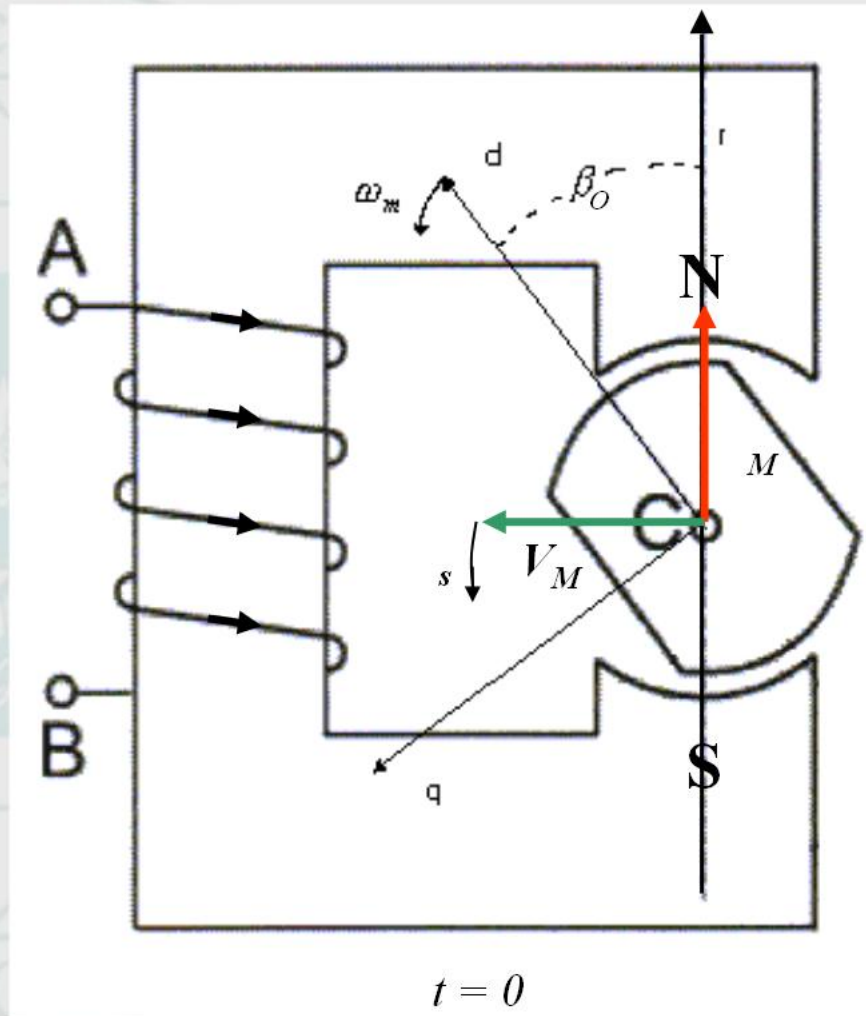
## MACCHINA SINCRONA MONOFASE A RILUTTANZA ELEMENTARE



Sia  $r$  l'asse di riferimento dei poli di statore, e  $d-q$  il sistema di riferimento rotante alla velocità angolare  $\omega_m$  e solidale con il rotore. Si assuma come istante iniziale  $t=0$  l'istante in cui il flusso nel nucleo è massimo e la tensione di alimentazione è nulla. Nel sistema di riferimento di statore, tali grandezze possono essere rappresentate mediante vettori di ampiezza costante e rotanti a velocità  $s$ .



# MACCHINA SINCRONA MONOFASE A RILUTTANZA ELEMENTARE



La proiezione di tali vettori sull'asse di statore  $r$  fornisce i valori istantanei del flusso nel nucleo e della tensione di statore. L'angolo  $\beta_0$  è l'angolo che l'asse  $d$  di rotore forma rispetto al vettore del flusso. Se la velocità di rotore  $\omega_m$  differisce da  $s$ , allora l'angolo  $\beta_0$  varierà nel tempo come segue:

$$\frac{d}{dt} \beta_0 = \omega_m - s$$



# MACCHINA SINCRONA MONOFASE A RILUTTANZA ELEMENTARE

Se  $\delta$  è l'angolo di sfasamento istantaneo tra l'asse  $d$  di rotore e l'asse  $r$  dei poli di statore, allora:

$$i_m = \frac{d}{dt} \int_0^t i_m dt + i_m(0)$$

da cui:

$$i_m(0) = \int_0^t i_m dt + i_m(0) - \int_0^t \left( \frac{d}{dt} i_m(0) \right) dt + i_m(0)$$

Per  $t=0$   $i_m(0) = 0$ , per cui:

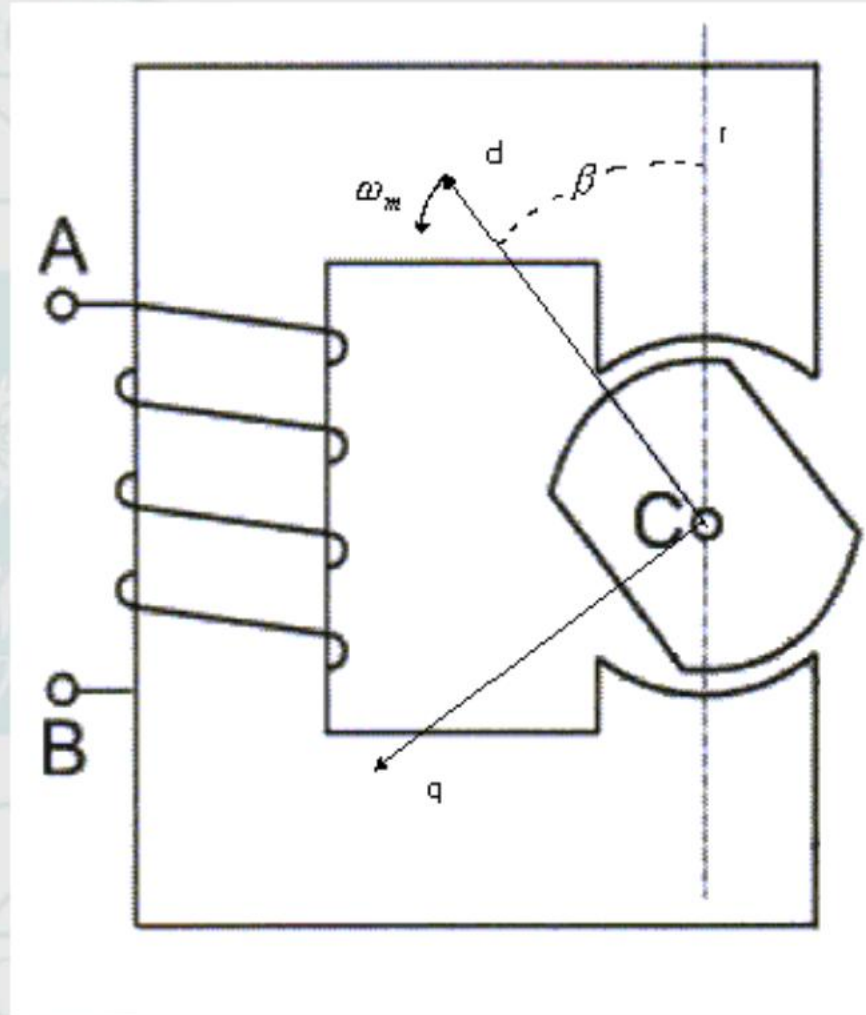
$$i_m(t) = i_m(0) + \int_0^t \left( \frac{d}{dt} i_m(0) \right) dt$$

Se  $i_m = \text{cost}$ , allora

$$i_m(t) = i_m(0) + \int_0^t 0 dt = i_m(0)$$



## MACCHINA SINCRONA MONOFASE A RILUTTANZA ELEMENTARE

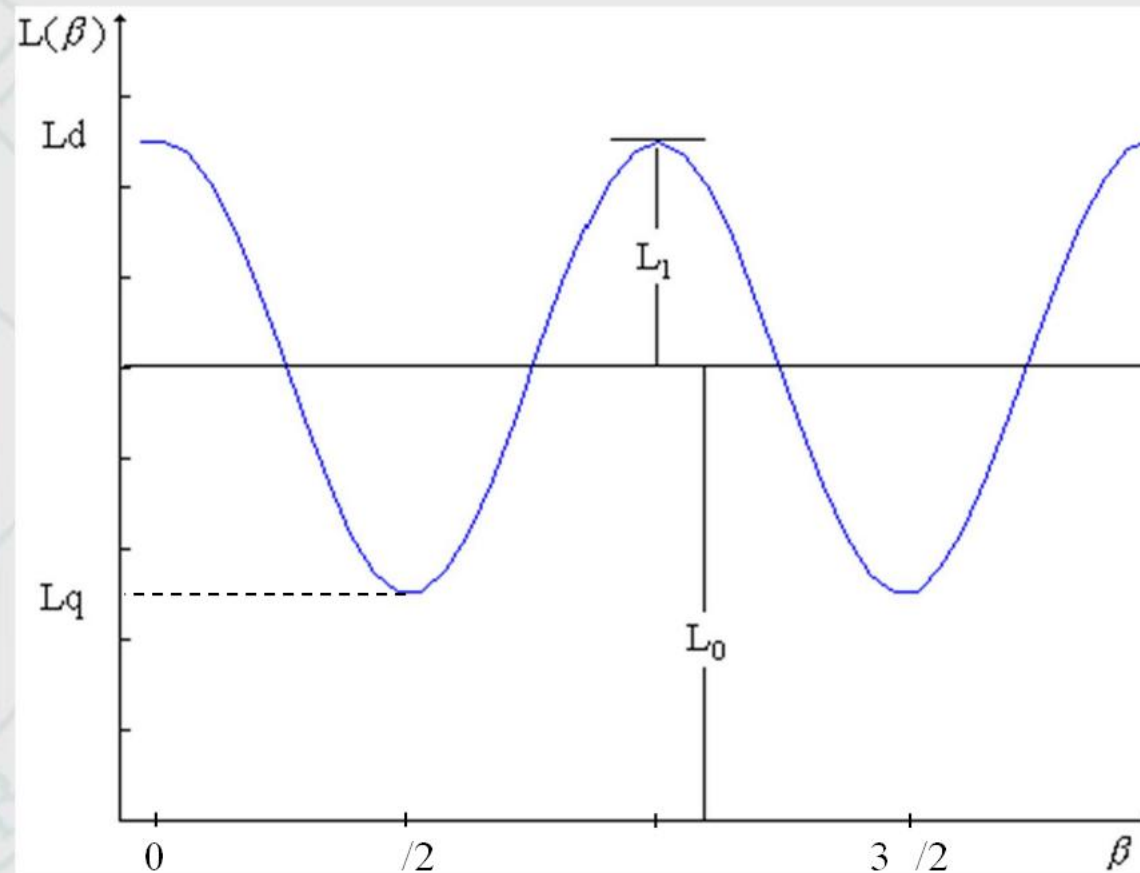


Il circuito magnetico presenta minima riluttanza  $R_d$  quando l'asse  $d$  del rotore è allineato con l'asse di riferimento  $r$  di statore, mentre ha riluttanza massima  $R_q$  quando l'asse  $d$  è in quadratura, cioè l'asse  $q$  è allineato con l'asse di riferimento  $r$ . Di contro, l'induttanza  $L = N^2 / R$  varia tra un valore massimo  $L_d = N^2 / R_d$  ed un valore minimo  $L_q = N^2 / R_q$ .



## VARIAZIONE DELL'INDUTTANZA CON L'ANGOLO DI ROTORE

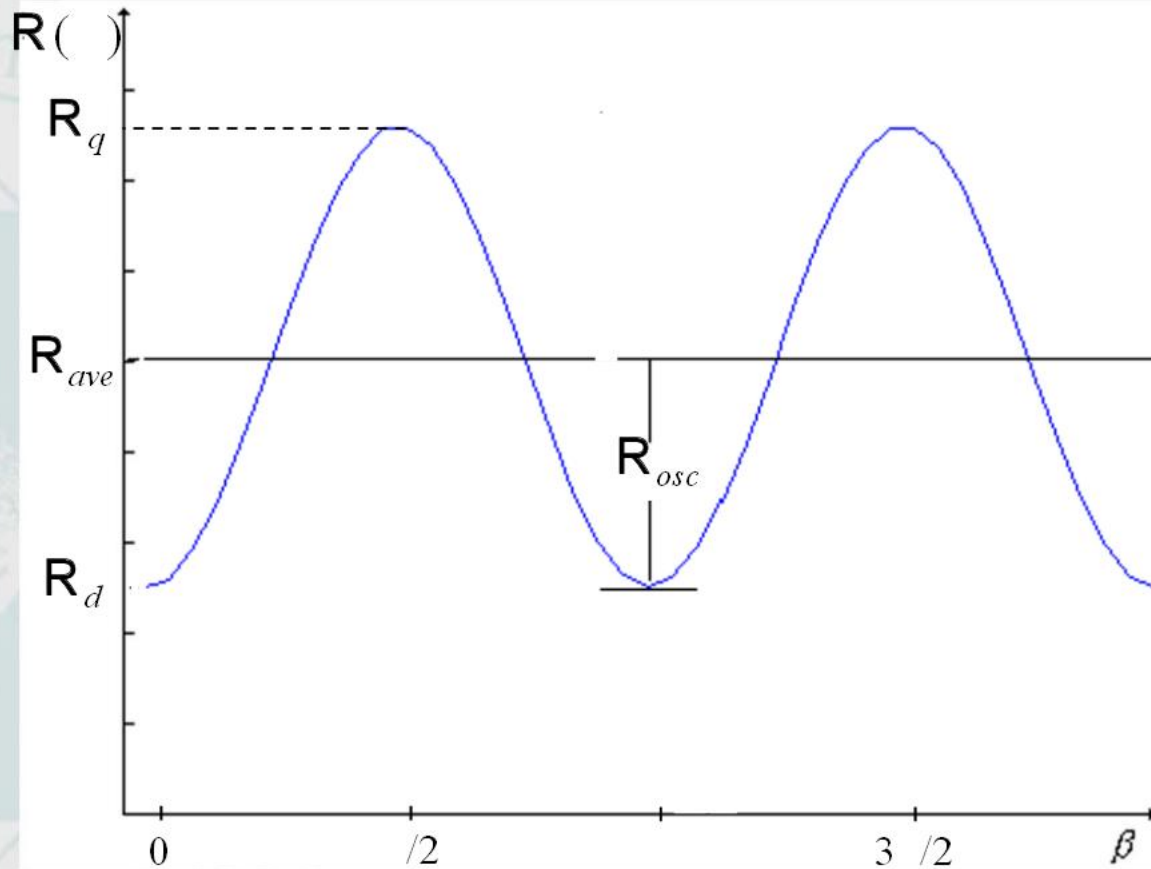
Assumendo che l'induttanza vari con legge sinusoidale al variare dell'angolo formato tra l'asse  $d$  e l'asse  $r$ , risulta:



$$L(\beta) = \frac{1}{2} (L_d + L_q) + \frac{1}{2} (L_d - L_q) \cos 2\beta$$



# VARIAZIONE DELLA RILUTTANZA CON L'ANGOLO DI ROTORE



$$R_{ave} = \frac{R_d + R_q}{2}$$

$$R_{osc} = \frac{R_q - R_d}{2}$$

$$R = R_{ave} + R_{osc} \cos 2\beta$$



# COPPIA ELETTROMAGNETICA

$$v \quad Ri \quad \frac{d}{dt} Li \quad Ri \quad L \frac{d}{dt} i \quad i \frac{d}{dt} L$$

$$v dt \quad Ri^2 dt \quad Lidi \quad i^2 dL \quad dW_j \quad Lidi \quad \frac{1}{2} i^2 dL \quad \frac{1}{2} i^2 dL$$

$$dW_j \quad dW_{mag} \quad dW_{mec}$$

$$dW_{mec} \quad \frac{1}{2} i^2 dL \quad C \quad \frac{dW_{mec}}{d} \quad \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d}$$





# COPPIA ELETTROMAGNETICA

$$C = \frac{i^2}{2} \frac{d}{d} L = \frac{i^2}{2} \frac{d}{d} \frac{N^2}{R} = \frac{(Ni)^2}{2} \frac{1}{R^2} \frac{dR}{d}$$

$$\frac{(Ni)^2}{2} \frac{1}{R^2} (2R_{osc} \sin 2 \dots)$$

$$C = 2R_{osc} \sin 2 \dots \quad \frac{2}{M} \cos^2(\dots) R_{osc} \sin 2 \dots$$

$$\frac{1}{2} \frac{2}{M} R_{osc} (\sin 2 \dots \sin 2 \dots \cos 2 \dots)$$

$$\frac{K}{2} \sin 2 \dots \quad \frac{1}{2} \sin(2 \dots_m t \quad 2 \quad 0 \quad 2 \quad_s t) \quad \frac{1}{2} \sin(2 \dots_m t \quad 2 \quad 0 \quad 2 \quad_s t)$$



## COPPIA ELETTROMAGNETICA

Affinché la macchina possa sviluppare una coppia media non nulla è necessario che  $m \neq s$ . In tal caso la coppia media risulta uguale a:

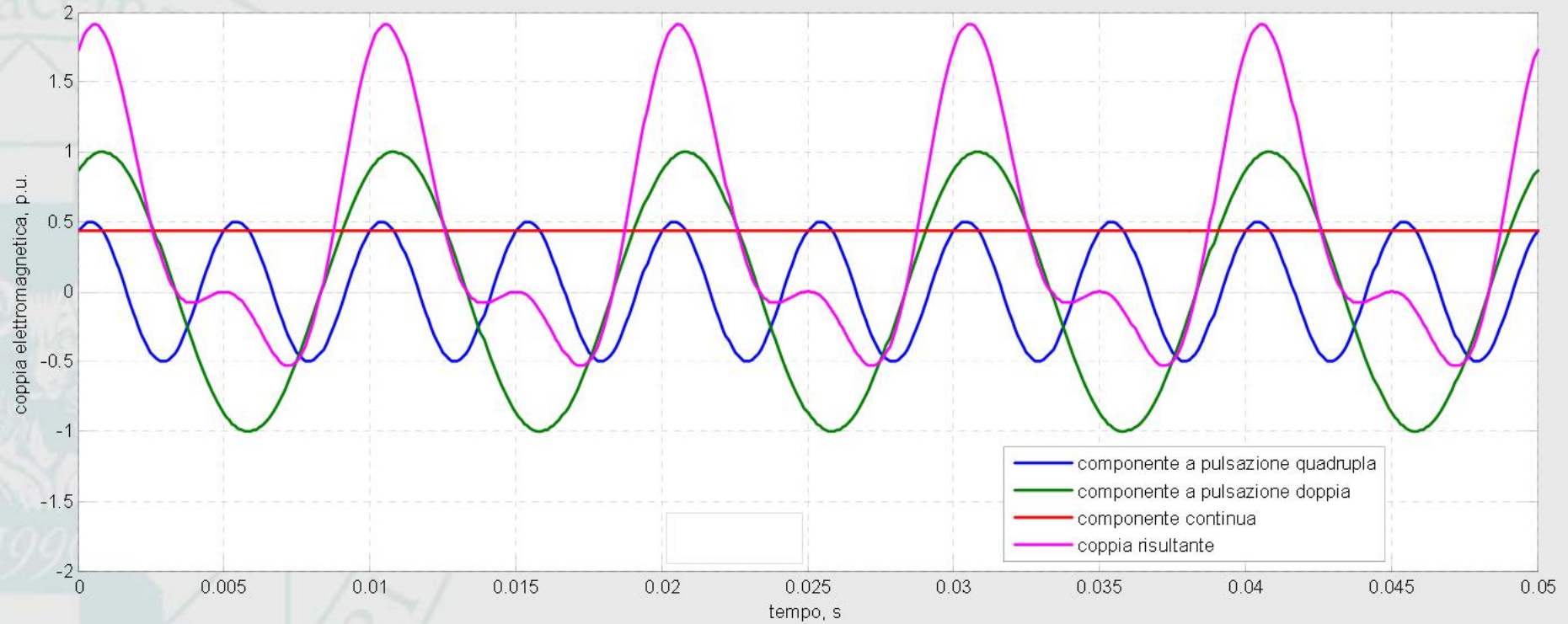
$$C_{ave} = K \frac{\sin 2\theta_0}{4}$$

La coppia istantanea contiene anche due termini alternativi a pulsazione doppia e quadrupla della pulsazione di sincronismo.

$$C = \frac{K}{2} \sin 2s\omega_s t - 2\theta_0 - \frac{1}{2} \sin(4s\omega_s t - 2\theta_0) - \frac{1}{2} \sin(2\theta_0)$$



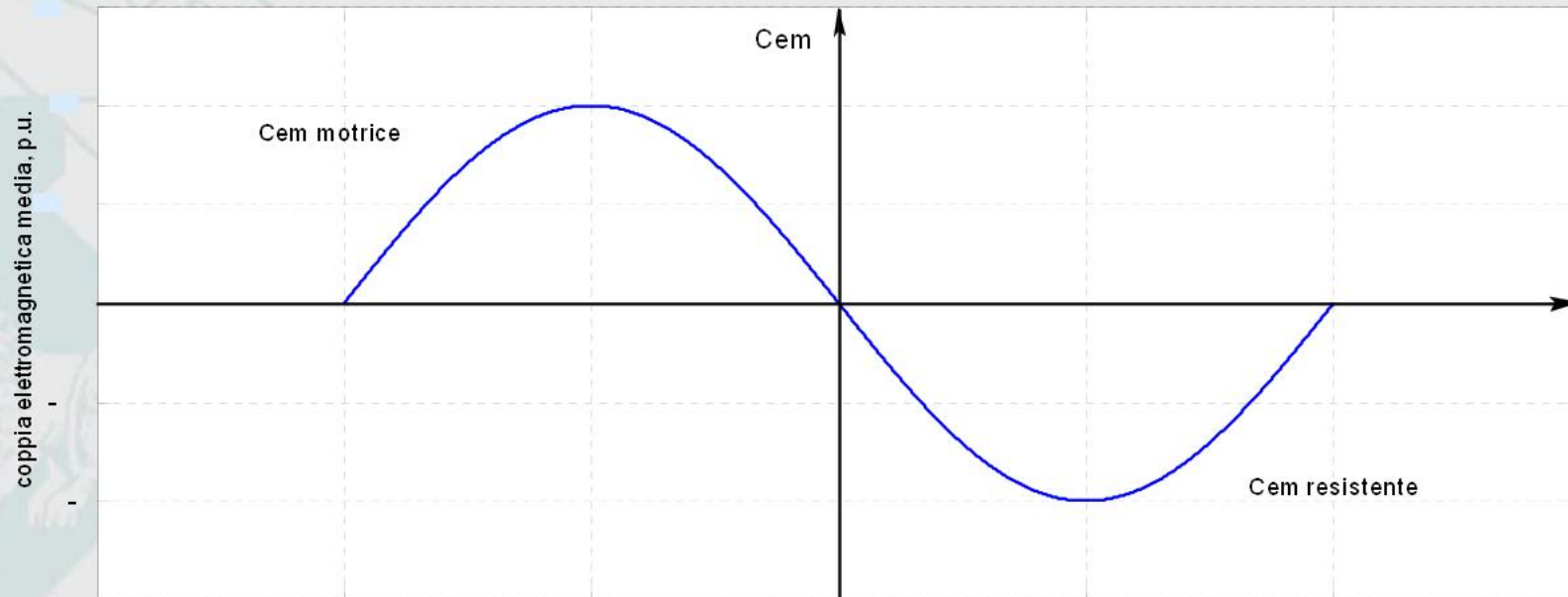
# COPPIA ELETTROMAGNETICA



N.B. - Coppia elettromagnetica, p.u. = coppia elettromagnetica / (-K/2)

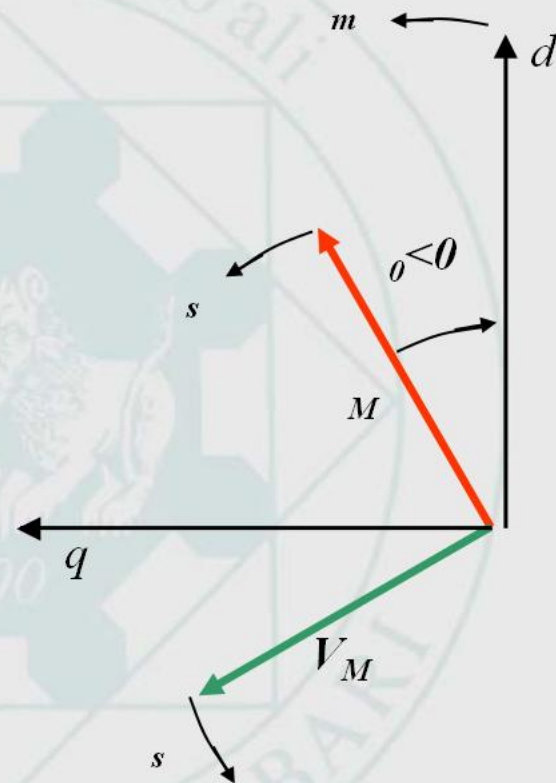


# COPPIA ELETTROMAGNETICA MEDIA IN FUNZIONE DELL'ANGOLO $2\theta_0$





## FUNZIONAMENTO DA MOTORE

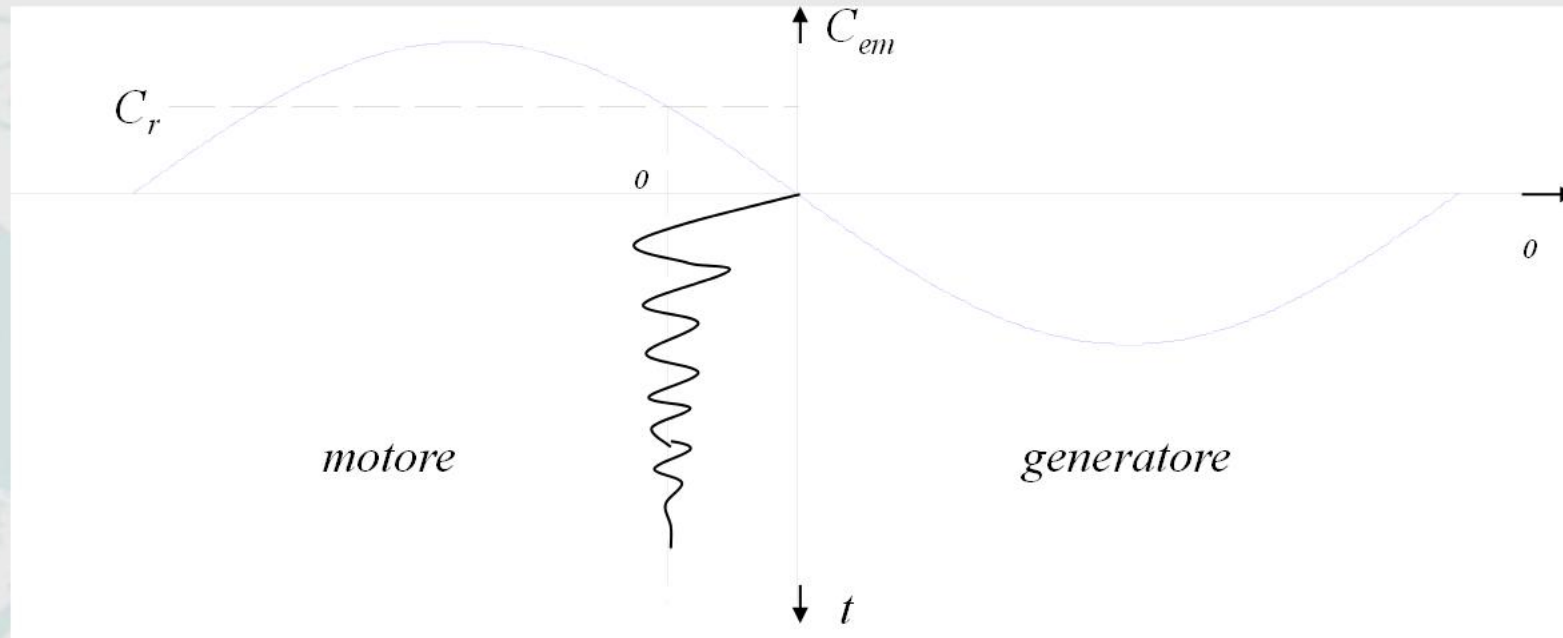


In assenza di coppia motrice e coppia resistente, la macchina ruota alla velocità di sincronismo  $\omega_s$  e l'angolo di coppia  $\theta_0$  è pari a zero. Applicando una coppia di carico resistente all'albero del rotore, quest'ultimo tende a rallentare, la velocità di rotore  $\omega_m$  diminuisce rispetto alla velocità di sincronismo  $\omega_s$  e l'angolo di coppia  $\theta_0 < 0$ . Il vettore del flusso tende perciò a precedere l'asse  $d$  di rotore dell'angolo  $\theta_0$ . La macchina a questo punto sviluppa una coppia elettromagnetica motrice (positiva) che cresce con l'angolo  $\theta_0$ , fino ad eguagliare la coppia resistente del carico meccanico applicato. La macchina si comporta da motore sincrono, assorbendo potenza elettrica dalla rete di alimentazione.

E' importante sottolineare il fatto che il motore sincrono sviluppa coppia mediamente non nulla solo alla velocità di sincronismo. Ne consegue che non è in grado di auto avviarsi (partenza da fermo) se alimentato direttamente dalla rete di potenza a frequenza costante. In tal caso è necessario avviare il motore trascinandolo alla velocità di sincronismo mediante un motore primo.



# FUNZIONAMENTO DA MOTORE

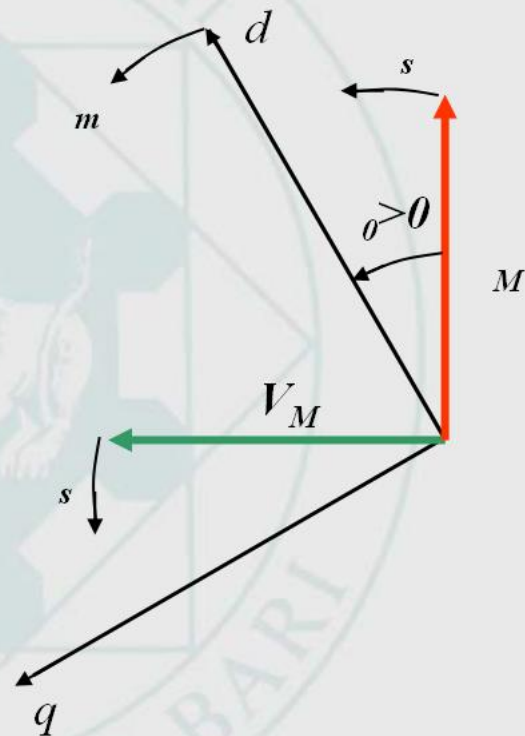


$$J \frac{d}{dt} \quad m \quad C_{em} \quad C_r \quad 0$$

$$\frac{d}{dt} \quad o \quad m \quad s \quad 0$$



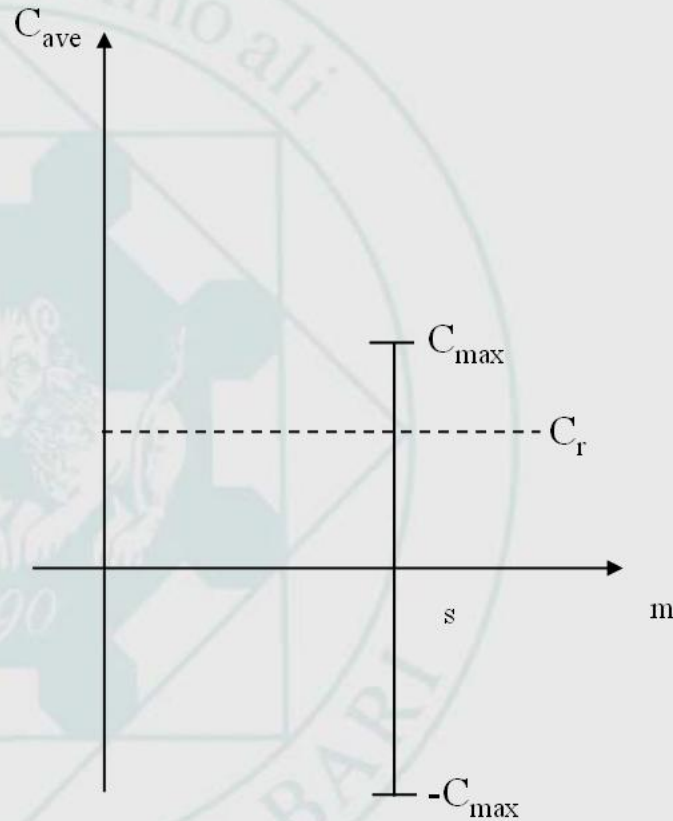
## FUNZIONAMENTO DA GENERATORE



Ritornando alla condizione di funzionamento di macchina scarica, cioè in assenza di coppia motrice e coppia resistente, rotante alla velocità di sincronismo  $s$  e con angolo di coppia  $\theta_0$  pari a zero, si supponga di applicare una coppia motrice alla macchina tramite un motore primo collegato all'albero del rotore. Questo tende ad accelerare, la velocità di rotore  $m$  aumenta rispetto alla velocità di sincronismo  $s$  e l'angolo di coppia  $\theta > 0$ . L'asse  $d$  di rotore tende perciò a precedere il vettore del flusso dell'angolo  $\theta$ . La macchina a questo punto sviluppa una coppia elettromagnetica resistente (negativa) che cresce con l'angolo  $\theta$ , fino ad eguagliare la coppia motrice fornita dal motore primo.



## CARATTERISTICA COPPIA – VELOCITA'



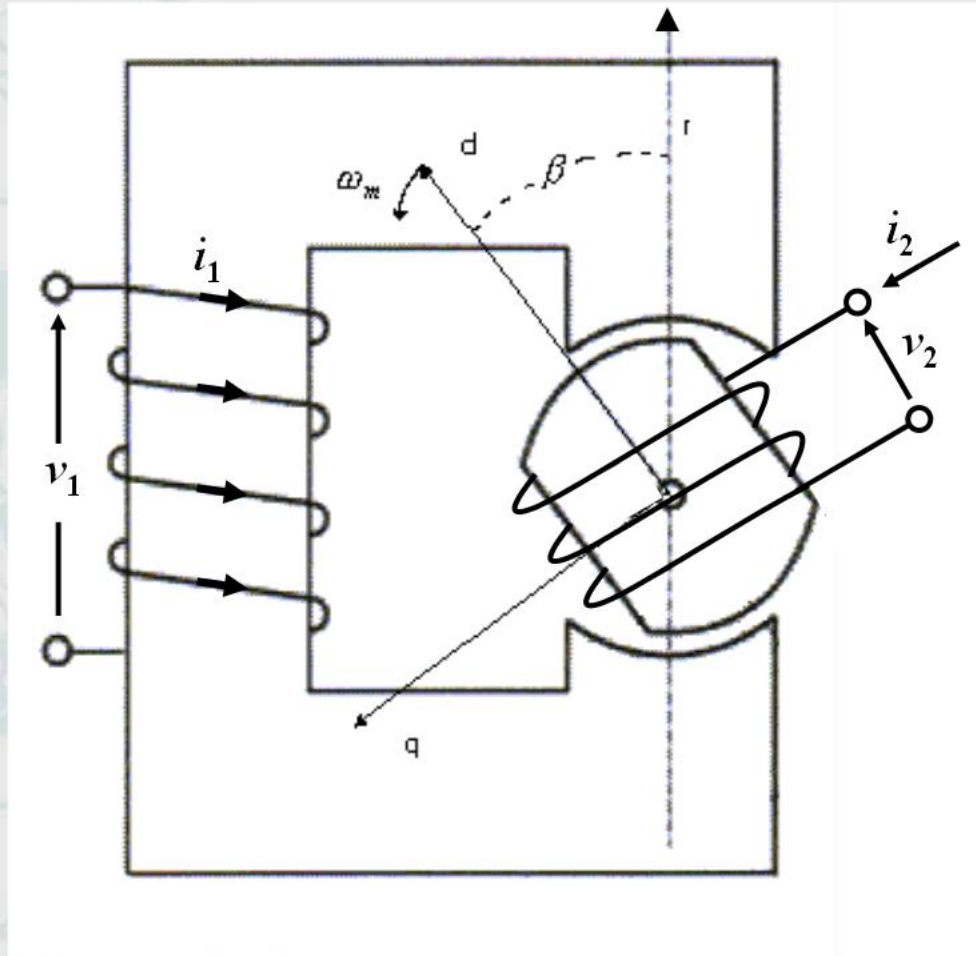
La caratteristica coppia-velocità della macchina sincrona è rigida, in quanto essa sviluppa coppia alla sola velocità di sincronismo. Inoltre, la presenza di componenti alternative (coppie pulsanti) nella coppia elettromagnetica provoca oscillazioni di velocità tanto maggiori quanto minore è l'inerzia  $J$  delle masse rotanti.

$$J \frac{d}{dt} \omega_m = C_{em} - C_r - C_{osc} = C_{ave} - C_r$$





# MACCHINA SINCRONA MONOFASE ANISOTROPA CON AVVOLGIMENTO SU ROTORE E STATORE



Si disponga sul rotore un avvolgimento di  $N_2$  spire, alimentato dalla tensione  $v_2$  e percorso dalla corrente  $i_2$ . Le equazioni di tensione degli avvolgimenti di statore e di rotore sono le seguenti:

$$\begin{aligned} v_1 &= R_1 i_1 + \frac{d}{dt} L_{11} i_1 + \frac{d}{dt} L_{12} i_2 \\ v_2 &= R_2 i_2 + \frac{d}{dt} L_{22} i_2 + \frac{d}{dt} L_{21} i_1 \end{aligned}$$

dove  $L_{11}$  e  $L_{22}$  sono le autoinduttanze dei due avvolgimenti, mentre  $L_{12}=L_{21}$  è la mutua induttanza tra essi.



# MACCHINA SINCRONA MONOFASE ANISOTROPA CON AVVOLGIMENTO SU ROTORE E STATORE

L'energia elettrica complessivamente entrante nella macchina nell'intervallo di tempo infinitesimo  $dt$  vale:

$$dW_e = v_1 i_1 dt + v_2 i_2 dt - R_1 i_1^2 dt - R_2 i_2^2 dt + i_1 dL_{11} i_1 + i_2 dL_{22} i_2 + i_1 dL_{12} i_2 + i_2 dL_{12} i_1 + R_1 i_1^2 dt + R_2 i_2^2 dt + L_{11} i_1 di_1 + L_{22} i_2 di_2 + L_{12} i_1 di_2 + L_{12} i_2 di_1 + i_1^2 dL_{11} + i_2^2 dL_{22} + 2i_1 i_2 dL_{12}$$

L'energia magnetica immagazzinata nel campo magnetico vale:

$$W_{mag} = \frac{1}{2} L_{11} i_1^2 + \frac{1}{2} L_{22} i_2^2 + L_{12} i_1 i_2$$

$$dW_{mag} = L_{11} i_1 di_1 + L_{22} i_2 di_2 + L_{12} i_1 di_2 + L_{12} i_2 di_1 + \frac{1}{2} i_1^2 dL_{11} + \frac{1}{2} i_2^2 dL_{22} + i_1 i_2 dL_{12}$$

ne consegue che

$$dW_e = dW_J + dW_{mag} = \frac{1}{2} i_1^2 dL_{11} + \frac{1}{2} i_2^2 dL_{22} + i_1 i_2 dL_{12} + dW_J = dW_{mag} + dW_{mec}$$

$$dW_{mec} = \frac{1}{2} i_1^2 dL_{11} + \frac{1}{2} i_2^2 dL_{22} + i_1 i_2 dL_{12}$$



# MACCHINA SINCRONA MONOFASE ANISOTROPA CON AVVOLGIMENTO SU ROTORE E STATORE

La coppia elettromagnetica sviluppata dalla macchina ha quindi l'espressione seguente:

$$C_e = \frac{dW_{mec}}{d} = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_{11}}{d} - \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_{22}}{d} + i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d}$$

I primi due termini rappresentano termini di coppia di riluttanza, mentre il terzo termine si definisce coppia di mutua induttanza. Nel caso di macchina a rotore liscio o cilindrico (rotore isotropo) risulta

$$C_e = i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d}$$

La mutua induttanza tra avvolgimento di statore e di rotore varia con l'angolo formato tra gli assi dei due avvolgimenti, assumendo valore massimo  $L_{12}$  quando i due assi sono allineati, e valore nullo quando sono in quadratura. Assumendo che la mutua induttanza vari con legge sinusoidale con l'angolo  $\theta$ , la coppia elettromagnetica assume l'espressione seguente:

$$C_e = i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d} = i_1 i_2 \frac{d}{d} L_{12} \cos \theta = -i_1 i_2 L_{12} \sin \theta$$