

1 Lezione del 12-12-24

1.1 Macchina rotante asincrona

Abbiamo visto una semplice macchina elettrica che sfruttava il moto traslazionale di una bobina mobile. Adesso vediamo una macchina più comune, che sfrutta il moto rotazionale.

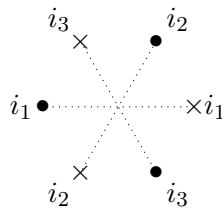
La macchina rotante è composta da una parte statica, detta **statore**, composta da un materiale ferromagnetico su cui sono ricavati apposite **cave** dove scorrono fili percorsi da correnti, e una parte rotante, detta **rotore**, coassiale allo statore. Fra rotore e statore c'è uno strato di aria, detto **traferro**.

La macchina rotante che andremo a vedere è detta **macchina asincrona**, in quanto il rotore ruota con una pulsazione minore della pulsazione del campo magnetico rotante generato dallo statore. Esistono anche **macchine sincrone**, comunemente dette **alternatori**, dove le pulsazioni combaciano.

1.1.1 Principio di funzionamento

- **Statore**

Assumiamo uno statore con 6 cave disposte esagonalmente. Possiamo immaginare all'interno delle cave singoli grandi fili percorsi da corrente, che si richiudono arrivati all'estremo longitudinale dello statore sulla cava opposta, a formare delle bobine.



Quindi, se su un lato avremo una corrente I , sul lato opposto dello statore avremo una corrente $-I$. Una qualsiasi di queste correnti i_i sarà data dalla funzione sinusoidale:

$$i_1(t) = I_m \sin \omega t$$

Dalla legge di Biot-Savart si andrà a formare un campo di induzione magnetica diretto tangenzialmente rispetto ai fili, secondo la legge della mano destra. Avremo però che la somma vettoriale dei campi generati dai due fili è effettivamente un campo radiale, che risulterà uscente sul lato destro dello statore, e entrante sul lato sinistro. In funzione di un angolo θ all'origine, questa sarà approssimativamente cosinusoidale, cioè:

$$B_1(t) = c_1 i_1(t) \cos(\rho\theta)$$

dove ρ è il numero delle **paia polari** (nel caso dei sistemi trifase, coppie di triple di avvolgimenti di filo, cioè il numero di coppie *nord-sud* nello statore). Modificando il numero di paia polari si può variare il periodo di rotazione del campo oltre $\frac{2\pi}{\omega}$, cioè ottenere velocità angolari minori, ma coppie maggiori.

La coppia dei fili percorsi da $i_1(t)$ e $-i_1(t)$ non sarà però l'unica coppia di fili sullo statore. Assumiamo 6 cave che portano corrente trifase (1 paia polare), quindi 3

correnti in forma:

$$\begin{cases} i_1(t) = I_m \sin(\omega t) \\ i_2(t) = I_m \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ i_3(t) = I_m \sin(\omega t + \frac{4}{3}\pi) \end{cases}$$

Vediamo quindi l'intensità del campo di induzione magnetica generato, rispetto all'angolo θ sull'asse x da cui viene osservato, da ogni avvolgimento:

$$\begin{cases} B_1(t) = c_1 i_1(t) \sin(\rho\theta) \\ B_2(t) = c_2 i_2(t) \sin(\rho\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ B_3(t) = c_3 i_3(t) \sin(\rho\theta + \frac{4}{3}\pi) \end{cases}$$

Il campo magnetico totale sarà quindi dato dalla somma dei singoli campi generati da coppie di fili, cioè:

$$B(t) = B_1(t) + B_2(t) + B_3(t) = k I_m \cos(\omega t - \rho\theta) = B(t, \theta)$$

con k dipendente da c_1 , c_2 e c_3 .

Il campo $B(t, \theta)$ prende il nome di **campo magnetico rotante**, **campo sincronizzato** o *campo magnetico di statore* ed è funzione sia del tempo che dell'angolo θ su cui lo osserviamo. Indichiamo la velocità di rotazione del campo, in radianti al secondo, come Ω_s . Per valutarla prendiamo due valori temporali su due angoli dove il campo è nullo:

$$\begin{cases} \omega t_1 - \rho\theta_1 = 0 \\ \omega t_2 - \rho\theta_2 = 0 \end{cases}$$

Sarà allora che:

$$\Omega_s = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} = \frac{\frac{\omega t_2}{\rho} - \frac{\omega t_1}{\rho}}{t_2 - t_1} = \frac{\frac{\omega}{\rho}(t_2 - t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{\omega}{\rho}$$

• Statore

Esistono due possibilità realizzative per il rotore:

- Costruzione *analogo allo statore*, dove si dice **rotore avvolto**, con l'unica differenza che gli avvolgimenti di rotore non sono alimentati, ma chiusi in cortocircuito sulle estremità longitudinali del rotore stesso;
- Attraverso barre longitudinali al rotore, dove si dice **rotore a gabbia di scoiattolo**.

Qualsiasi sia la modalità di realizzazione del rotore, si ha che le spire disposte longitudinalmente sono chiuse su stesse, cioè quando il rotore inizia a ruotare si ha forza elettromotrice indotta data dalla legge di Faraday:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

Definiamo allora la velocità di rotazione del campo magnetico di statore come Ω_s . Chiamiamo la ω associata allo statore *pulsazione delle grandezze elettriche di statore* ω_1 , e introduciamo la *pulsazione delle grandezze elettriche di rotore* ω_2 , da cui la velocità di rotazione del **campo magnetico di rotore** o del **campo asincrono** Ω_s .

Definiremo la differenza di velocità $\Omega_{sr} = \Omega_s - \Omega_r$. Questa sarà utile a definire lo **scorrimento** s , con:

$$s = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} = \frac{\Omega_{sr}}{\Omega_s}$$

Possiamo distinguere più situazioni sulla base di s :

- $s = 0$, $\Omega_{sr} = 0$, $\Omega_s = \Omega_r$: si parla di **rotore libero**;
- $s = 1$, $\Omega_{sr} = \Omega_s$, $\Omega_r = 0$: si parla di **rotore bloccato** (chiaramente, da $\Omega_r = 0$).

Notiamo che, se:

$$s = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \Rightarrow s\Omega_s = \Omega_s - \Omega_r \Rightarrow \Omega_r = (1 - s)\Omega_s$$

e inoltre, se:

$$\Omega_s = \frac{\omega_1}{\rho} \Rightarrow \Omega_{sr} = \Omega_s - \Omega_r = \frac{\omega_2}{\rho}$$

$$s \frac{\omega_1}{\rho} = \frac{\omega_2}{\rho}$$

Possiamo quindi riassumere il principio di funzionamento della macchina rotante in:

1. Alimentiamo i circuiti dello statore con 3 correnti trifase cioè sfasate di 120° . Questo genera un campo magnetico rotante con velocità $\Omega_s = \frac{\omega}{\rho}$;
2. Sugli avvolgimenti o le barre della gabbia di scoiattolo del rotore si genera una forza elettromotrice indotta, e quindi per momento meccanico una coppia che la porta a ruotare con una velocità di $\Omega_r = (1 - s)\Omega_s$ dove s è lo *scorrimento*.

La macchina asincrona lavora in un continuo stato di scorrimento (in quanto quando $s = 0$ non si genera f.e.m. per Faraday e quindi non c'è coppia sul rotore). In seguito vedremo nel dettaglio come questa coppia dipende da s , e quindi qual'è la condizione di regime della macchina.