

## Campi magnetici rotanti e motori asincroni

### 1) Premessa. Alternatore e dinamo.

L'alternatore è un generatore di tensione alternata (sinusoidale) che sfrutta la legge di Faraday dell'induzione elettromagnetica. Immaginiamo una spira conduttrice immersa in un campo magnetico  $\mathbf{B}$  generato da un magnete a ferro di cavallo. La spira è solidale a un albero (un cilindro) libero di ruotare intorno al suo asse ortogonale al campo magnetico. I capi della spira sono collegati a due anelli di rame, detti collettori, saldati sull'albero, che può essere posto in rotazione da un turbina idraulica o termica (o da una manovella nei modellini da Liceo).

Il flusso magnetico tagliato dalla spira rotante con velocità angolare  $\omega$  è  $\Phi = BS \cdot \cos(\omega t)$  e la f.e.m. indotta ai capi della spira è  $fem_i = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \cdot \sin(\omega t)$ . (S area della spira). Nella formula del flusso compare il coseno: ciò significa che abbiamo assunto come istante iniziale 0 l'istante in cui la spira è perpendicolare al campo magnetico). La tensione è prelevata da due spazzole conduttrici premute contro i collettori. (Vedi fig.1).

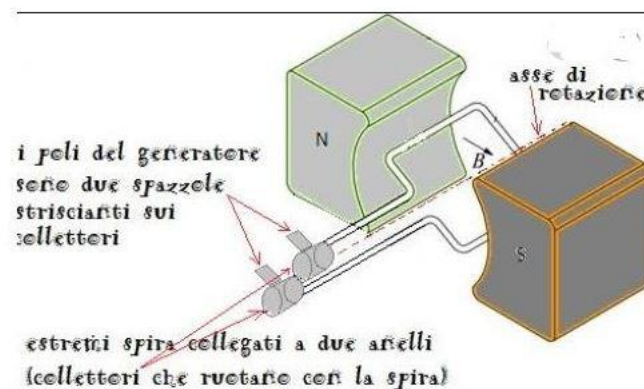


fig.1

In pratica la spira è sostituita da una bobina con N spire; ciò produce ai collettori una f.e.m. N volte maggiore. Inoltre il magnete è sostituito da un elettromagnete alimentato da una dinamo sussidiaria (vedi avanti) e in più la bobina si mantiene fissa e al suo interno si fa ruotare l'elettromagnete, così la f.e.m. prodotta si preleva con morsetti fissi, e le spazzole striscianti sui collettori vengono applicate al rotore dell'elettromagnete che è a tensione più bassa e perciò l'usura dei contatti striscianti è più limitata.

**In pratica**, non si costruiscono alternatori monofase e neanche bifase, ma **trifase**.

Nel caso di un alternatore bifase lo statore (l'indotto) è costituito da due bobine identiche perpendicolari tra loro e perciò i poli del rotore (l'induttore: l'elettromagnete rotante) eccitano le bobine con un ritardo temporale di un quarto di periodo, cioè con una differenza di fase di  $\pi/2$  radianti. Ciò significa che le tensioni indotte sono  $V_1 = V_0 \cdot \sin(\omega t)$  e  $V_2 = V_0 \cdot \sin(\omega t + \pi/2) = V_0 \cdot \cos(\omega t)$ . La loro somma non è nulla e perciò si richiedono 4 fili, due per ciascuna fase.

Per questo motivo si costruiscono alternatori trifase, che forniscono 3 fasi con soli 4 fili per il trasporto, perché la somma delle 3 tensioni è zero e si può usare un solo filo comune per chiudere i circuiti, **il cosiddetto neutro**.

**Siccome** con quattro fili si possono trasportare tre fasi, anziché due, il vantaggio economico è evidente, perciò tutte le centrali producono correnti trifase.

Il principio dell'alternatore **trifase** è ovvio: lo statore contiene **tre** bobine identiche disposte a  $120^\circ$  una dall'altra. Se poniamo  $V_1=V_0 \cdot \text{Sen}(\omega t)$ , segue  $V_2=V_0 \cdot \text{Sen}(\omega t + 2\pi/3)$  e  $V_3=V_0 \cdot \text{Sen}(\omega t + 4\pi/3)$ .

**Verificate**, con le formule goniometriche di addizione, che  $V_1+V_2+V_3=0$ . Se le correnti delle tre fasi, in tempo di esercizio, sono equilibrate, cioè se sono chiuse su **impedenze** uguali, anche la somma delle tre correnti è zero, altrimenti può esserci una (**piccola**) corrente di ritorno; ecco perché basta un unico filo, il neutro, per chiudere i circuiti. Di solito, nelle abitazioni si porta una sola delle tre fasi con due fili, uno collegato a uno dei tre fili sotto tensione (il **positivo**) e l'altro collegato al neutro.

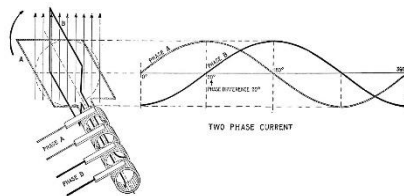


fig.2

La fig.2 mostra uno schema di alternatore bifase, con i 4 fili che prelevano le due correnti.

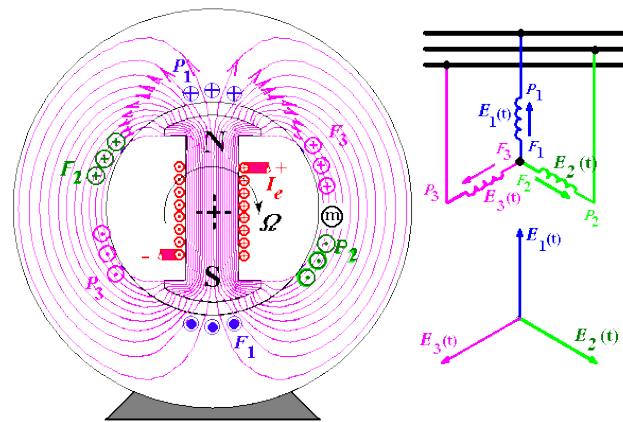


fig.3

La fig.3 mostra uno schema di alternatore **trifase** e, a destra, il trasporto delle correnti con tre fili, il neutro lo dovete immaginare al centro del collegamento a "**stella**".

Il rotore è un elettromagnete che deve avere polarità ben definite, perciò deve essere alimentato da una dinamo, cioè un generatore di corrente **continua** (o, per lo meno, **unidirezionale**).

Una dinamo è essenzialmente un (piccolo) alternatore in cui il **collettore** è costituito da un unico anello diviso a metà e i capi della bobina sono collegati ciascuno a un semianello, che si chiama **commutatore**. A ogni mezzo giro del rotore le polarità si invertono, ma si invertono anche i contatti delle spazzole con le due metà del commutatore, perciò la tensione (e la corrente è **raddrizzata**).

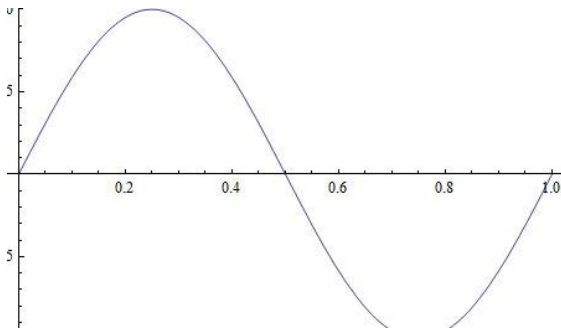


fig.4

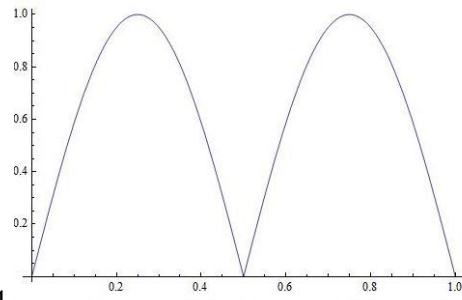


fig.5

Corrente alternata (sinusoidale), in fig.4, corrente raddrizzata dal commutatore in fig.5

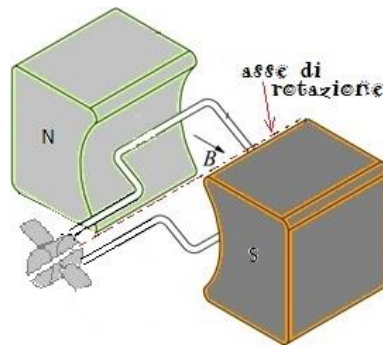


fig.6

In fig.6 uno schema di dinamo; si noti, sulla sinistra, il commutatore. La corrente prodotta è *pulsata*; per ottenere una corrente più livellata, occorre l'anello di Pacinotti.

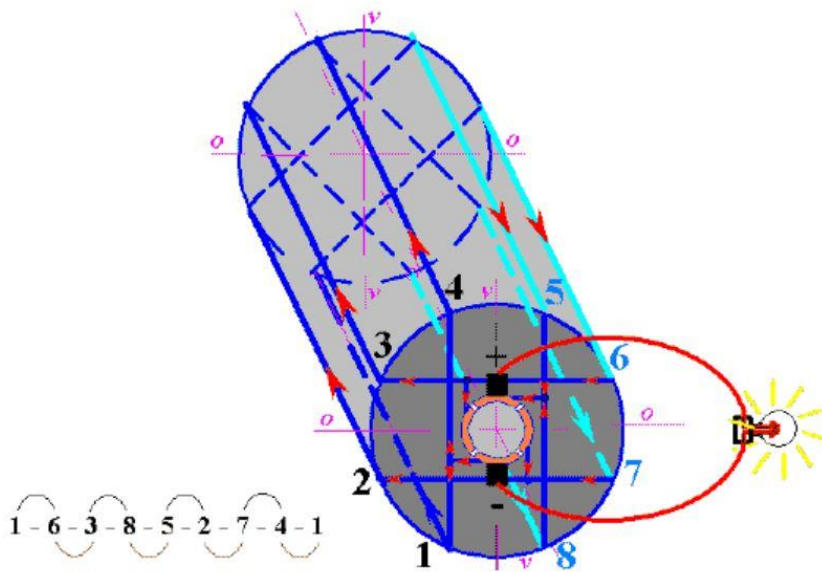


fig.7

La fig.7 rappresenta una dinamo di Pacinotti in cui l'anello è in realtà un **cilindro** (il **tamburo**), in cui l'indotto è costituito da 8 bobine a 45° una dall'altra (1/8 di giro) e il commutatore è, perciò, diviso in 8 settori, in modo che tramite le spazzole si prelevano 8 correnti raddrizzate e sfasate di 1/8 di periodo una dall'altra. Si ottiene perciò una corrente **quasi continua** (**livellata**). L'induttore (non riportato in figura) è costituito da un elettromagnete la cui bobina è avvolta su un magnete permanente che serve a produrre una debole corrente all'avvio. Poi, mediante una derivazione, parte della corrente prodotta va nell'avvolgimento dell'elettromagnete, fino a raggiungere uno stato di regime. Si dice che la dinamo funziona per *auto-eccitazione*.

## 2) Campo magnetico rotante con corrente bifase.

Il primo che ideò un motore elettrico basato su un campo magnetico rotante fu Galileo Ferraris nel 1886. L'idea fu di disporre due bobine ad angolo retto alimentate da due correnti alternate sfasate di  $\frac{1}{4}$  di periodo, utilizzando un generatore "bifase".



fig.8

La fig-8 mostra un modello di motore a campo magnetico rotante di Galileo Ferraris alimentato da corrente bifase. I due telai rettangolari ad angolo retto sono gli elettromagneti alimentati ciascuno da una fase. Al centro è posto l'albero del motore, messo in rotazione dal campo magnetico rotante.

Per capire come vanno le cose, si introduca un sistema di assi cartesiani coincidenti con gli assi delle bobine (vedi fig.9).

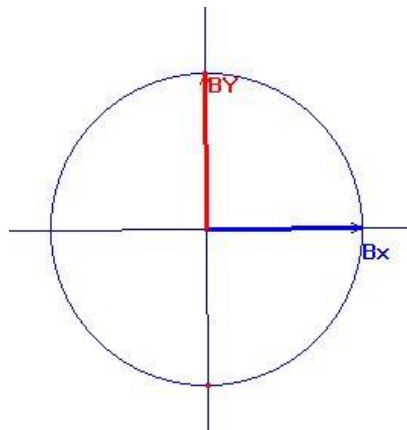


fig.9

Si ricordi che  $B_x$  e  $B_y$  son vettori:  $B_x=(B_0.\text{Cos}(\omega t), 0)$  e  $B_y=(0, B_0.\text{Sen}(\omega t))$ .

Quadrando e sommando, si ottiene  $\frac{B_x^2}{B_0^2} + \frac{B_y^2}{B_0^2} = 1$ , che rappresenta la circonferenza di raggio  $B_0$ . La risultante dei due campi magnetici sinusoidali è un campo magnetico di modulo costante  $B_0$ , che descrive la circonferenza con velocità angolare costante pari a  $\omega$ , pulsazione dei due campi magnetici sinusoidali. L'albero centrale fatto di un cilindro di rame saldato intorno a un asse di acciaio, vedi fig.8, sarebbe percorso da una corrente indotta, che lo riscalderebbe, se fosse bloccato. Se invece è libero di ruotare, seguirà la rotazione del campo magnetico, per la legge di Lenz.

### 3) Campo magnetico rotante con corrente trifase.

Fu brevettato negli Stati Uniti nel 1888 dal serbo Nicola Tesla.

E' analogo al motore di Galileo Ferraris, salvo che lo statore è costituito da tre bobine (identiche) spaziate di  $120^\circ$  una dall'altra e alimentate da corrente trifase (vedi fig.10).

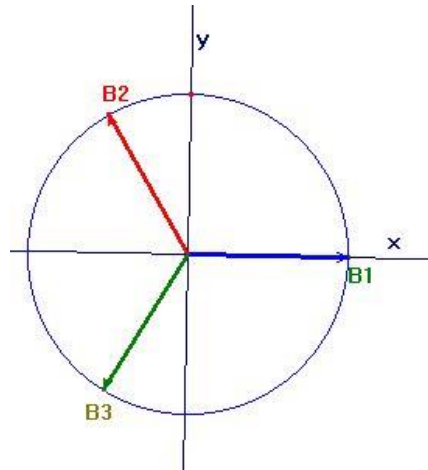


fig.10

I tre vettori magnetici  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  hanno modulo, rispettivamente,  $B_0 \cdot \cos(\omega t)$ ,  $B_0 \cdot \cos(\omega t + 120^\circ)$ ,  $B_0 \cdot \cos(\omega t + 240^\circ)$ , perciò  $B_x = B_0 [\cos(\omega t) + \cos(120^\circ) \cdot \cos(\omega t + 120^\circ) + \cos(240^\circ) \cdot \cos(\omega t + 240^\circ)]$ ,

perciò

$$[1] B_x = B_0 \left[ \cos(\omega t) - \frac{1}{2} \left( -\frac{1}{2} \cos(\omega t) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\omega t) \right) - \frac{1}{2} \left( -\frac{1}{2} \cos(\omega t) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\omega t) \right) \right] = \frac{3}{2} B_0 \cdot \cos(\omega t). \text{ Analogamente}$$

$B_y = B_0 [0 + \sin(120^\circ) \cdot \cos(\omega t + 120^\circ) + \sin(240^\circ) \cdot \cos(\omega t + 240^\circ)]$ , e perciò

$$[2] B_y = B_0 \left[ 0 + \frac{\sqrt{3}}{2} \left( -\frac{1}{2} \cos(\omega t) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\omega t) \right) - \frac{\sqrt{3}}{2} \left( -\frac{1}{2} \cos(\omega t) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\omega t) \right) \right] = -\frac{3}{2} B_0 \cdot \sin(\omega t).$$

Quadrando e sommando le formule [1] e [2], si ottiene un campo magnetico di modulo costante  $\frac{3}{2} B_0$  rotante con velocità angolare pari alla pulsazione  $\omega$  dei campi magnetici delle tre bobine.

(**Si noti** che la **rotazione**, con le condizioni iniziali imposte, è **oraria**).

La velocità angolare  $\omega_r$  del rotore è un po' minore di quella di sincronismo  $\omega$  del campo rotante; ciò fa sì che si generi una coppia meccanica, **coppia motrice**. Per questo motivo tale motore si chiama **asincrono**.

E' **interessante** osservare che, se il rotore è **forzato** a ruotare con una velocità angolare  $\omega_r > \omega$ , il motore funziona da generatore, restituendo energia elettrica alla rete; il motore produce energia elettrica e frena, come succede nei treni a trazione elettrica o nelle auto **ibride**; in questo caso l'energia elettrica prodotta aziona una dinamo che carica le batterie dell'auto.

**Per variare** la velocità angolare  $\omega_r$  del rotore, cioè per variare la velocità di marcia del motore, occorre variare la pulsazione  $\omega$  della corrente trifase che alimenta lo statore; ciò si fa con un dispositivo detto “**variac**” che cambia la frequenza di alimentazione.