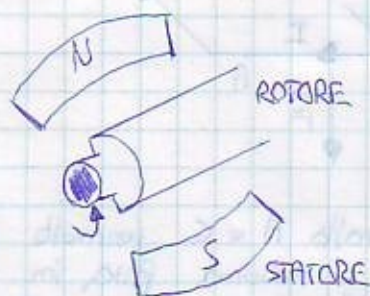
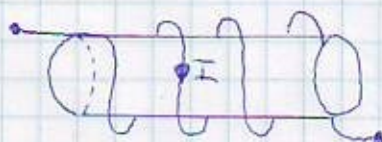


72

Un motore elettrico è un dispositivo che converte energia elettrica in energia meccanica. Il principio su cui si basa un motore elettrico è piuttosto semplice. Innanzitutto utilizzando l'approccio riduzionista analizziamo i motori più semplici ossia i motori a corrente continua. Innanzitutto analizziamo le motori a corrente continua a magneti permanenti. Un tale motore è costituito da una parte rotante detta rotore e da una parte fissa detta statore.



Sullo statore sono posti i magneti che generano il campo magnetico, mentre il rotore è un solenoide composto da materiale ferromagnetico avvolto da spire di filo conduttore (filo di rame per esempio).



Su tale filo circola una corrente indicata I .

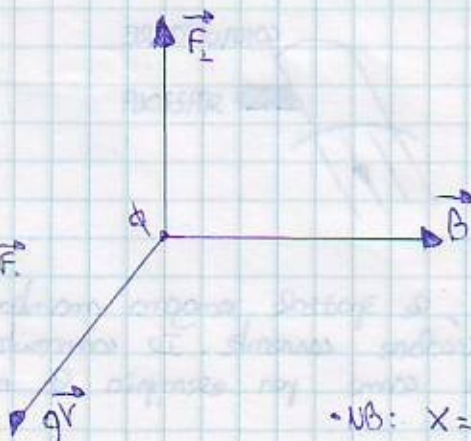
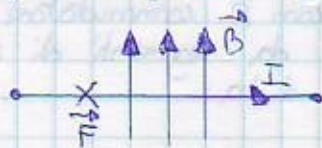
In realtà le spire sono poste parallelamente all'asse del rotore. Lo spazio vuoto di forma anulare presente tra lo statore e il rotore prende il nome di **traferro**. Nel traferro le linee di forza del campo magnetico sono disposte in senso radiale. Il circuito così posto dal rotore e dagli avvolgimenti viene chiamato **circuito di armatura**.



Siccome una carica elettrica in moto in un campo magnetico è sottoposta alla forza di Lorentz:

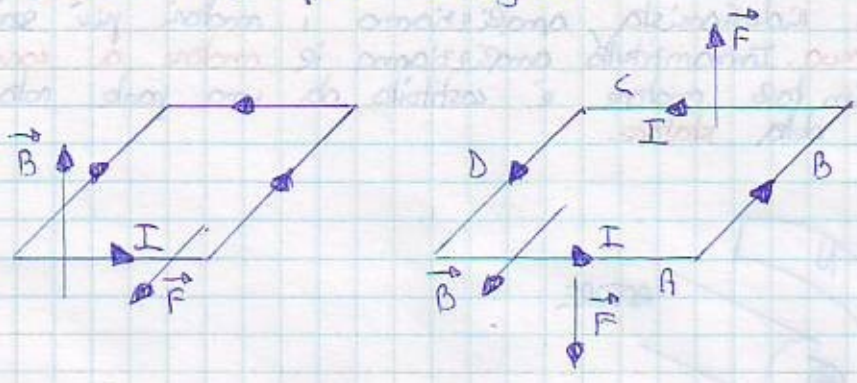
$$\vec{F}_L = q\vec{V} \times \vec{B}$$

si ha che su un filo di conduttore percorso da una corrente I è sottoposto al campo magnetico $\vec{B}$, agisce una forza $\vec{F}$. Quindi:

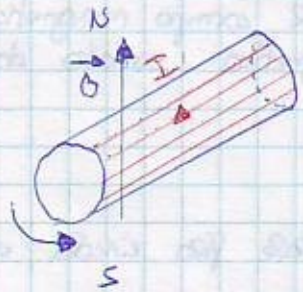


• NB: X = uscente dal foglio.

Analogamente se considero una spira rettangolare:



In sostanza l'applicazione della forza $\vec{F}$ sui tratti A e C permette alla spira di ruotare. Si noti che lungo i tratti B e D non vi è nessuna forza in quanto $\vec{v}$ e $\vec{B}$ sono paralleli. Qui $\vec{v}$ è la velocità di deriva degli elettroni e assume lo stesso verso della corrente I. Tornando sul rotore del motore si ha:



Si genera una forza $\vec{F}$ che fa ruotare il rotore.

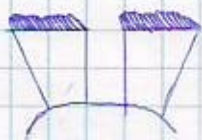
In realtà si genera una coppia, ossia due forze parallele tra loro, di direzione opposta poste in questa maniera:



Le spire del circuito di armatura fanno capo ad un commutatore posto a sua volta a contatto con delle spazzole.

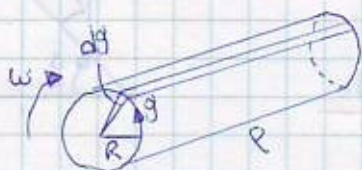


Durante la rotazione le spazzole rimangono mantenute in contatto con il commutatore in modo da possa circolare corrente. Il commutatore è composto da segmenti di rame separati da isolante come per esempio la mica. Graficamente si ha:



■ = nisen

Il nisen è una spargenza, attraverso cui sono collegati i terminali delle spire. Il numero di nisen coincide con il numero di spire. Supponiamo ora che gli avvolgimenti siano distribuiti uniformemente sul solenoide.



Se N è il numero totale di conduttori si ha che il numero di conduttori compreso in un arco di ampiezza dg è:

$$dn = \frac{N}{2\pi} dg$$

Chiaramente ciascun conduttore sarà soggetto ad una forza F tangente alla circonferenza, e le modeste forze dF esercitate su dn conduttori sono:

$$dF = I \cdot l \cdot B(g) \frac{N}{2\pi} dg$$

Infatti si ricordi che la forza totale che agisce su un conduttore può essere determinata integrando la seguente espressione:

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B} \Rightarrow \vec{F} = \int I d\vec{l} \times \vec{B} = I \vec{l} \times \vec{B}$$

Quindi:

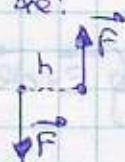
$$F = I l B \sin g$$

Per il nostro caso specifico: $dF = I l B(g) dn = I l B(g) \frac{N}{2\pi} dg$ avendo posto $B \sin g = B(g)$.

Siccome con $\vec{j}$ indichiamo la coppia esercitata dal motore, si ha che:

$$\vec{j} = I l B \sin g \vec{r}$$

dove $h =$ braccio della coppia



Però la coppia di esercitata dall'asse del motore risultanti:

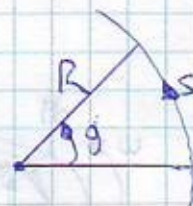
$$d\tau = \frac{N}{2\pi} I R B(\theta) R d\theta$$

dove R è il raggio del motore. Quindi la coppia complessiva sarà:

$$J_m = 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\tau = \frac{N}{\pi} I \int_{-\pi/2}^{\pi/2} R B(\theta) R d\theta$$

Si ricordi però che il flusso magnetico è:

$$\phi = B \cdot S \Rightarrow d\phi = B dS \quad \text{con} \quad \underline{dS = R d\theta}$$



Quindi: $d\phi = R d\theta B(\theta)$

Siccome il flusso magnetico attraversa un oggetto di volume $e \cdot R \cdot \theta$ si ha:

$$d\phi = R B(\theta) R d\theta \Rightarrow \phi = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} R B(\theta) R d\theta$$

$$\underline{J_m = \frac{N}{\pi} I \phi = k_T I}$$

Però con I qui indichiamo la corrente che percorre ciascun conduttore. Tale corrente però è la metà della corrente impressa al circuito di armatura in quanto il numero di conduttori effettivamente in serie è la metà. Quindi:

$$\underline{J_m = 2I \Rightarrow I = \frac{J_m}{2} \Rightarrow J_m = \frac{N}{\pi} \frac{J_m}{2} \phi = k_T J_m}$$

k_T prende il nome di costante di coppia del motore. Per la legge di Faraday, un cambiamento del flusso magnetico nel tempo produce una p.e.m. Quindi:

$$\underline{p.e.m. = - \frac{d\phi}{dt}}$$

Siccome la p.e.m. è data anche da: $\epsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$ si ottiene:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \vec{u}_n ds = - \frac{d(\mu_0 B \sin \theta)}{dt} = - \omega \mu_0 B \cos \theta$$

Concludendo:

$$dE = \frac{N}{2\pi} \omega B(\theta) R d\theta = \text{forza elettromotrice.}$$

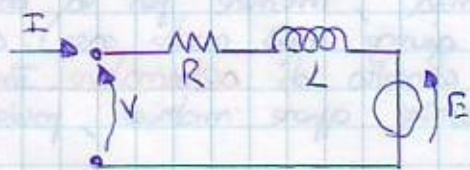
La forza elettromotrice complessiva è data da:

$$E = \frac{N}{2\pi} \omega \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B(\theta) R d\theta = \frac{N\phi}{2\pi} \omega = k_e \omega$$

k_e è nota come costante di forza elettromotrice ed è tale che:

$$k_T = k_e$$

Osservando che la corrente che si applica allo spazzole si ripartisce in tre contributi, dovuti rispettivamente alla caduta di tensione di tipo resistivo sugli avvolgimenti, all'induttanza degli avvolgimenti e alla forza elettromotrice, si ottiene come modello dinamico del motore il seguente circuito elettrico:



$$\text{Quindi: } E = R \cdot I + L \frac{dI}{dt} + E$$

$$E = k_e \omega$$

$$T_m = k_T \cdot I$$

R rappresenta la resistenza di armatura, mentre L rappresenta l'induttanza di armatura. Quindi ricapitolando per aumentare T_m bisogna aumentare la corrente I giocando con la tensione di pilotaggio V .

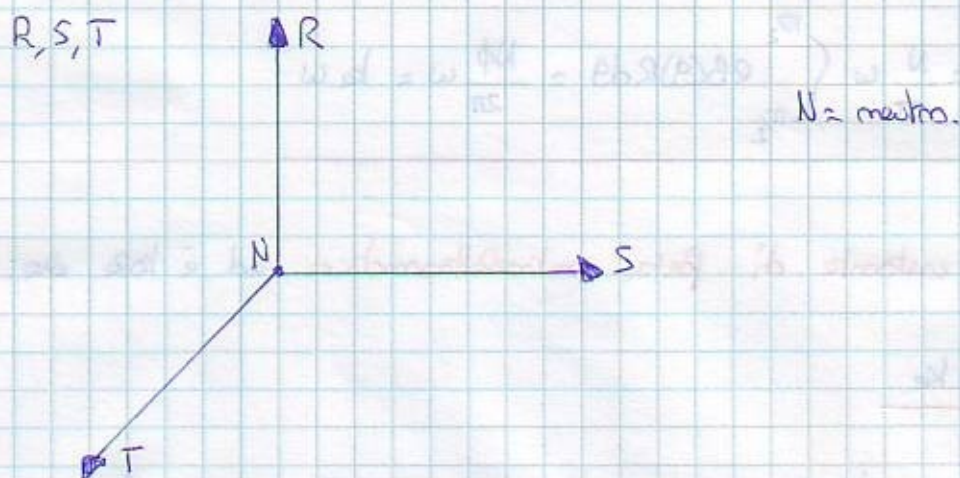
Il vantaggio del motore a magneti permanenti è che si può regolare T_m regolando I . Purtroppo però tale motore comporta degli svantaggi legati all'usura del commutatore, e al problema del sincronamento che si ha quando lo spazzole lascia il commutatore. Quest'ultimo problema viene eliminato con l'utilizzo dei motori brushless (ossia senza spazzole). In questo motore i magneti permanenti sono alloggiati sul motore, mentre i tre avvolgimenti di fase sono disposti sullo statore.



- Le fasi sono alimentate alternativamente in modo che il campo magnetico generato dalla corrente sia sempre antagone a quello generato dai magneti.

In questo motore il motore brushless viene visto come un motore sincrono. Per mantenere tale sincronismo è necessario commutare, tramite un inverter, le correnti negli avvolgimenti dello statore in funzione della posizione angolare del motore.

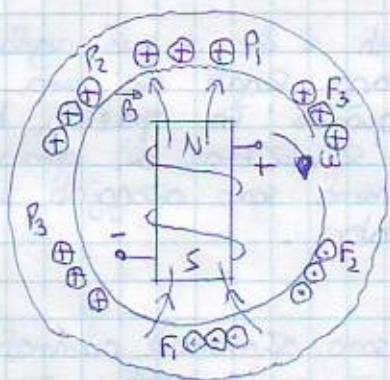
In questo motore bisogna utilizzare un sensore. L'angolo si può definire come quel dispositivo alla cui rotazione debba ruotare il motore trifase. Ma vediamo cosa è un sistema trifase. Un **sistema trifase** è un sistema costituito da tre fasi che azionano contemporaneamente e utilizzatore. Indichiamo queste fasi con:



Sostanzialmente sono tre sinusoidi aventi la stessa frequenza, ma sfasate tra loro di 120° gradi. N ha potenziale nullo. L'utilizzo del sistema trifase, in bassa tensione (220V) si ha per utilizzatori di media e alta potenza, mentre per la bassa potenza si utilizza un **sistema monofase** (la tensione che giunge nelle nostre case). La caratteristica di un sistema trifase si riconduce al concetto di **alternatore**. In generale il rotore di una macchina sincrona, che sia generatrice oppure motore, possiede una rotazione del tipo:

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

dove f è la frequenza e p è numero di coppie poli dell'induttore. Consideriamo in merito una spira posta in rotazione con velocità angolare costante.



Indichiamo con P il punto di principio della pila e con F il punto finale.

Con B indichiamo il **campo induttore**.

Qui, $p = 3$ (Coppia di poli).

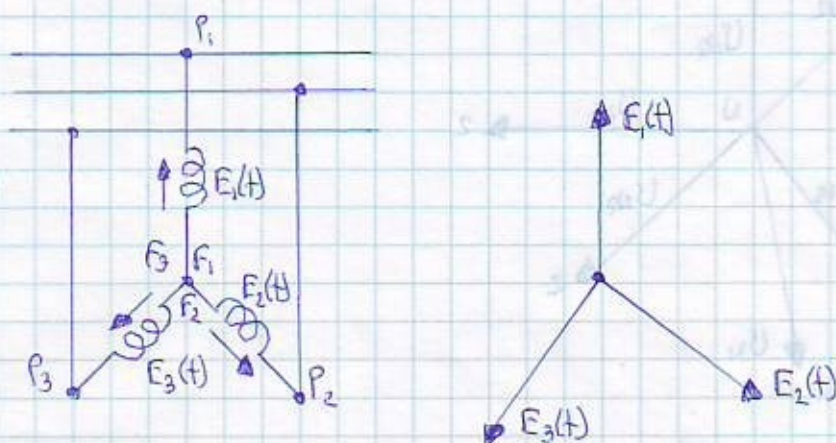
La spira, ruotando, taglia le linee del campo induttore e di conseguenza ai capi della spira è disponibile una f.e.m. alternata, che viene prelevata agli estremi della spira stessa. Si può anche pensare di tenere fissa la spira e far muovere l'anello creando un campo magnetico rotante mediante una coppia di poli. I grandi alternatori delle centrali utilizzano quest'ultimo sistema.

Siccome:

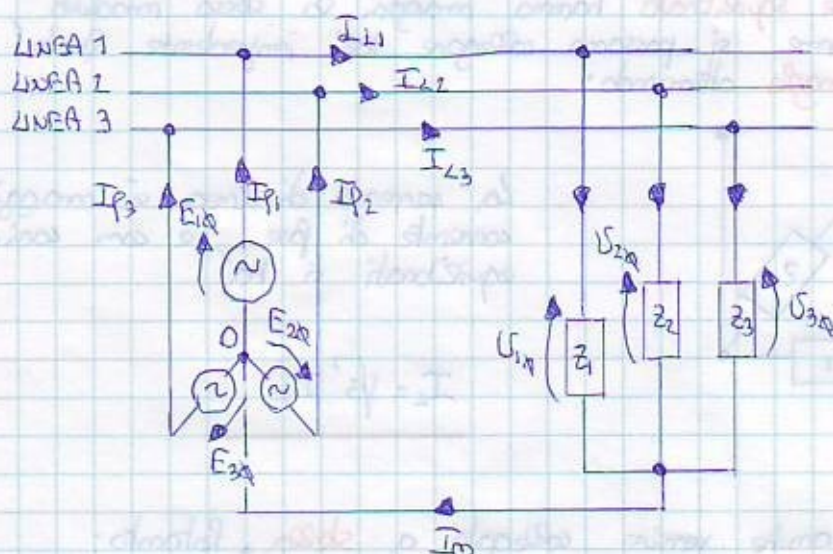
$$m = \frac{60p}{r} \Rightarrow \frac{pm}{60} = p$$

Da: $p = \frac{1}{T}$ e $\omega = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow \omega = 2\pi p$ e quindi: $\frac{\omega}{2\pi} = \frac{pm}{60} \Rightarrow \omega = \frac{2\pi pm}{60}$

L'alternatore trifase genera tre p.e.m. identiche ma sfasate di 120 gradi.



Considerando il precedente circuito in una più complessa comprendente anche utilizzatori si ha:



dove:

- I_m = corrente dal neutro
- I_{P1}, I_{P2}, I_{P3} = correnti della fase 1, della fase 2 e della fase 3.
- I_{L1}, I_{L2}, I_{L3} = correnti della linea 1, della linea 2, della linea 3.
- $U_{1,0}, U_{2,0}, U_{3,0}$ = cadute di tensione sull'utilizzatore 1, 2, 3.

Invece con:

$U_{2,1}$ indichiamo per esempio la d.d.p. tra la linea 2 e la linea 1.

Quindi: