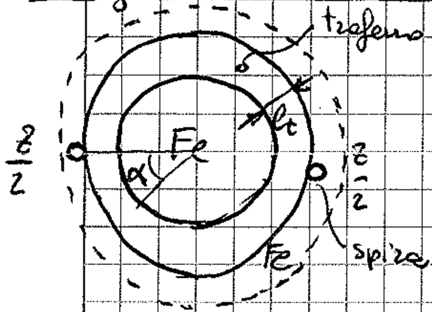
MACCHINE A CAMPO ROTANTE

si dividono in

- Sincrone: rotazione sincrona con il campo rotante
- Asincrone: rotore sempre più piano del campo

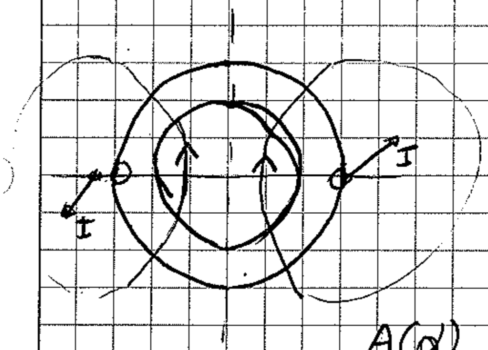
Avvolgimenti di una macchina a campo rotante:



Parte esterna: statore
Parte interna: rotore

Ritengo il ferro ideale ($\mu_r \to \infty$ e senza perdite).

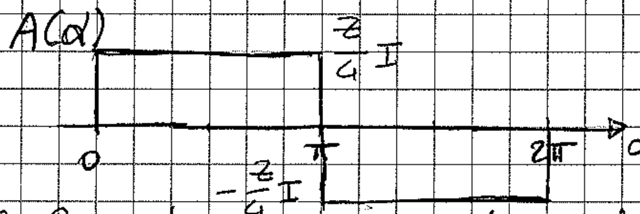
z: numero totale di conduttori attivi



Dobbiamo determinare l'intensità di H presente nel traferro. ($H_t = ?$)

$$\frac{z}{2} \cdot I = 2 H_t l_t \Rightarrow \underbrace{H_t l_t}_{} = \frac{z}{4} I = A$$

caduta di tensione magnetica (forza magneto-motrice)



A è positiva se le linee di campo vanno da statore a rotore

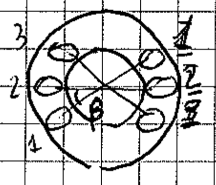
$$A(\alpha) = \frac{4}{\pi} \frac{z_f I}{4} \sum_{h=1,3,5}^{\infty} \frac{\sin(h\alpha)}{h}$$ ~~per~~ sviluppo in serie di Fourier

In prima battuta prendiamo in considerazione l'armonica fondamentale

$$A_{fond}(\alpha) = \frac{zI}{\pi} \sin(\alpha) \qquad H_{fond}(\alpha) = \frac{A_{fond}(\alpha)}{l_t}$$

Per un buon funzionamento sarebbe ottimo che A fosse realmente sinusoidale e non solo approssimativamente

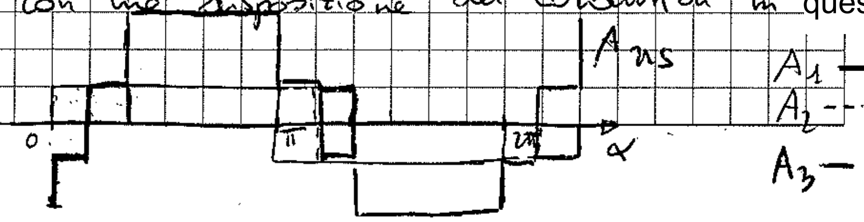
Posso anche frazionare i conduttori in più cave

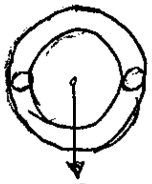


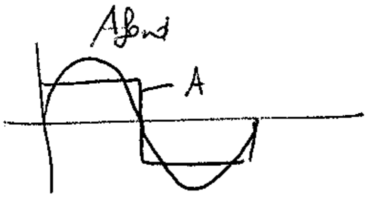
z_f n° conduttori di fase

$z = \frac{z_f}{q}$ q: numero di cave (in questo caso q = 3)

Quale sarà A con una disposizione dei conduttori in questo modo?

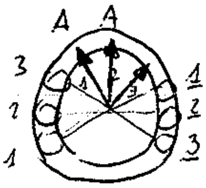




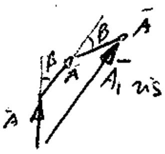


$$\bar A_{fond} = \frac{Z\bar I}{\pi}$$

Vettori spaziali $\quad \bar A = \frac{Z}{\pi}\bar I \;,\quad \bar H_t = \frac{\bar A}{l_t} \qquad \bar B_t = \mu_0 \bar H_t$

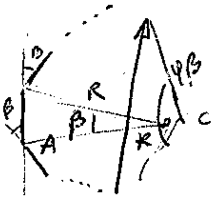


$$|\bar A| = \frac{Z}{\pi} I_1 = \frac{Z_f}{q\pi} I$$



Ricaviamo la formula generale di q coppie di cave

$$A = \frac{Z}{\pi} I = \frac{Z_f}{q\pi} I$$



La poligonale è iscritta in una circonf. di centro C e raggio R

$$A = 2R \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

$$R = \frac{A}{2\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} \qquad A_{ris} = \frac{A}{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} \sin\left(\frac{q\beta}{2}\right)$$

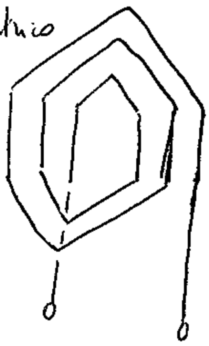
$$= \frac{Z_f}{q\pi} I \underbrace{\frac{\sin\left(\frac{q\beta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}}_{Kd}$$

Kd: coeff. di distribuzione dell'avvolgimento ed è funzione di q e β

Posso usare bobine

, ma ottengo lo stesso risultato.

Concentrico



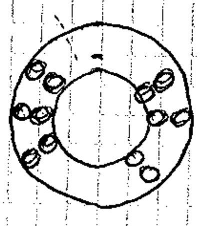
Embricato

$$\hat A_1 = \frac{Z_f}{\pi} \hat I \cdot Kd$$

Questa formula è valida per qualunque scelta di collegamento di tipo costruttivo.

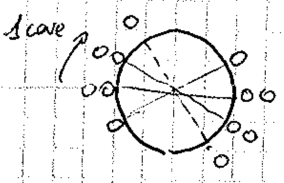
Questo tipo di avvolgimenti è detto a passo intero.
Inoltre l'aggiunta di avvolgimenti riduce la distorsione armonica.

Avvolgimento in doppio strato

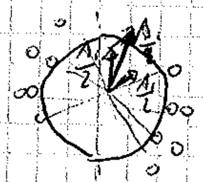


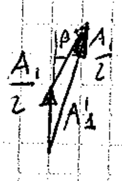
$\frac{Z}{2}$ conduttori allo strato 1 e $\frac{Z}{2}$ allo strato 2

Nella tecnica dell'accorciamento di passo si ruota uno strato rispetto all'altro di 1 (2-3) cave



Avvolgimento accorciato ad 1 cava. Non tutte le cave sono riempite alla stessa maniera.
La tecnica di accorciamento del passo rende A più simile ad una sinusoide. Inoltre si possono ridurre le connessioni frontali. L'accorciamento dell'avvolgimento ha effetti anche sull'armonica fondamentale.





$$\hat{A}'_1 = \hat{A}_1 \cos\frac{\beta}{2}$$

Accorciamento a n_r cave

$$\hat{A}'_1 = \hat{A}_1 \underbrace{\cos\left(n_r \frac{\beta}{2}\right)}_{K_r}$$

Posso quindi caratterizzare un avvolgimento con

zg: n° totale avvolgimenti att.vi

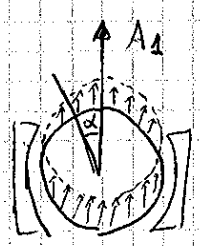
q: n° cave

β: sfasamento delle cave

n_r: n° di accorciamenti

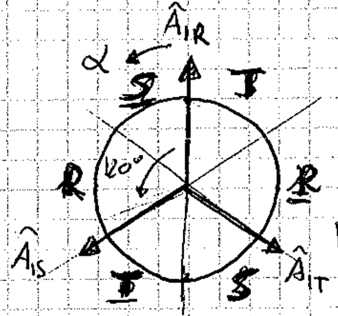
$$A_1 = \frac{zg}{\pi} \underbrace{K_d K_r}_{K_a} I \quad , \quad K_d = \frac{\sin\left(q\frac{\beta}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} \quad , \quad K_r = \cos\left(n_r \frac{\beta}{2}\right)$$

K_a: coefficiente di avvolgimento. K_a è sicuramente minore di 1.



$$A_1(\alpha) = A_1 \cos\alpha$$
$$A_1 = \frac{2f}{\pi} K_a \hat{I} = N'\hat{I}$$

Analizzare degli avvolgimenti polifase, in particolare 3-fase.



Gli archi di circonferenza saranno destinati ad ospitare cave delle fasi (1, 2, 3).

Posso frazionare ciascun settore in q cave ed il n° totale delle cave sarà 6q

Ovviamente q e β sono correlate tra loro. infatti: $\beta = \frac{360°}{6q} = \frac{60°}{q}$

I vettori forza magnetomotrice fondamentale saranno:

$$\left.\begin{aligned} \hat{A}_{1R} &= N'\hat{I}_R \\ \hat{A}_{1S} &= N'\hat{I}_S \\ \hat{A}_{1T} &= N'\hat{I}_T \end{aligned}\right\}$$

Se le tre bobine sono messe in questo modo lungo il traferro ci saranno 3 forze magnetomotrici sinusoidali disposte a 120° tra loro.

$$A_1(\alpha) = N' I_R \cos(\alpha) + N' I_S \cos(\alpha - 120°) + N' I_T \cos(\alpha - 240°)$$

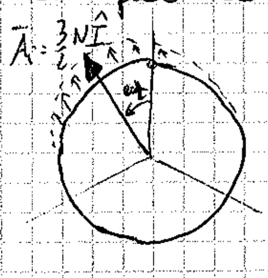
Supponiamo che le 3 bobine siano alimentate da un sistema simmetrico ed equilibrato.

$$\begin{cases} I_R(t) = \hat{I}\sin(\omega t) \\ I_S(t) = \hat{I}\sin(\omega t - 120°) \\ I_T(t) = \hat{I}\sin(\omega t - 240°) \end{cases} \Rightarrow A_1(\alpha) = N'\hat{I}\left\{\sin(\omega t)\cos\alpha + \sin(\omega t - 120°)\cos(\alpha - 120°) + \sin(\omega t - 240°)\cos(\alpha - 240°)\right\}$$

Usiamo le formule di prostaferesi $\sin\alpha\cos\beta = \frac{1}{2}\left[\sin(\alpha+\beta) + \sin(\alpha-\beta)\right]$

$$A_1(\alpha) = \frac{1}{2} N'\hat{I}\left\{\cancel{\sin(\omega t + \alpha)} - \sin(\alpha - \omega t) + \cancel{\sin(\alpha + \omega t - 240)} - \sin(\alpha - \omega t) + \cancel{\sin(\alpha + \omega t - 120)} - \sin(\alpha - \omega t)\right\} =$$
$$= \frac{1}{2} \cdot 3 N'\hat{I} \sin(\omega t - \alpha)$$

Si produce un'onda (traslante) rotante nel traferro con velocità ω.



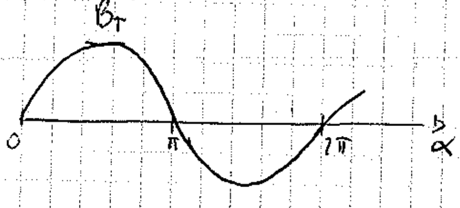
$$\bar{H}_t = \frac{\bar{A}_1}{l_t} \qquad \bar{B}_t = \mu_0 \bar{H}_t$$

$\bar{A}_1$, $\bar{H}_t$ e $\bar{B}_t$ sono vettori spaziali.

Quindi note i_1, i_2, i_3 sono in grado di ricavare A_1 H_t B_t.

Associamo ai 3 vettori anche un vettore $\hat{I}$ che discende dalla relazione $\hat{A}_1 = \frac{3}{2} N' \hat{I}$. Quindi $\hat{I}$ è in fase con $\hat{A}$. Il vettore $\hat{I}$ ha la proprietà che, una volta definiti gli assi RST, la sua proiezione su questi rappresenta i valori istantanei delle correnti i_1, i_2, i_3. Il vettore $\hat{I}$ è un vettore rotante, ma non un fasore.

Definiamo flusso di macchina il flusso che attraversa il traferro.



$$\hat{\Phi}_u = \int_0^{\pi} \hat{B}_{t_{max}} \sin\alpha \, RL \, d\alpha$$

R_t: raggio medio traferro

L = lunghezza.

$$\Phi_u = 2 \hat{B}_t R_t L$$

Se l'avvolgimento fosse formato da una sola bobina formata da Z conduttori:

$$\hat{\Lambda}_{u(1)} = \frac{Z}{2} \hat{\Phi}_u$$

$$\Lambda_{u(1)} = \hat{\Lambda}_{u(1)} \cos(\omega t)$$

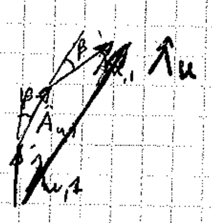
Una bobina diametrale può concatenare il max flusso possibile, ma meno a meno che tra la il flux ha un andamento sinusoidale.

$\hat{\Lambda}_u$ potrebbe essere considerato un altro vettore rotante da aggiungere alla schiera $\hat{A}, \hat{B}_t, \hat{H}_t, \hat{I}$.

$$\hat{\Lambda}_u = \frac{Z}{2}\hat{\Phi}_u = \frac{Z}{2}\hat{B}_t \cdot 2 R_t L = \frac{Z}{\cancel{2}} \mu_0 H_t R_t L \cdot \cancel{2} = Z \mu_0 \frac{A}{l_t} R_t L =$$

$$= Z \cdot \frac{3}{2} N' \hat{I} \frac{1}{l_t} \mu_0 R_t L = \frac{3Z}{2} N' I \mu_0 \frac{R_t L}{l_t}$$

Il mio avvolgimento però è formato da più bobine sfasate in più avvolg. diametrali. (Ad esempio 3 bobine sfasate di un angolo β)



$$\hat{\Lambda}_u = \underbrace{\frac{Z_g}{2} K_d K_r}_{N} \hat{\Phi}_u$$

$$\boxed{\hat{\Lambda}_u = \frac{3}{2} N N' \mu_0 \frac{2 R_t L}{l_t} \hat{I}}$$

Con

$N = \frac{Z_g}{2} K_a$ e $N' = \frac{Z_g}{\pi} K_a$

Definiamo

$$\mathcal{R}_t = \frac{l_t}{2\mu_0 R_t L} \Longrightarrow \hat{\Lambda}_u = \frac{3}{2}\frac{NN'}{\mathcal{R}_t}\hat{I}$$

Definiamo quindi

$L_m = \frac{3}{2}\frac{NN'}{\mathcal{R}_t}$ l'induttanza di magnetizzazione dell'avvolgimento.

L_m non è tutta l'induttanza di un avvolgimento, non è nemmeno l'induttanza di un avvolgimento (perché non corrisponde alla definizione di induttanza). L'induttanza di magnetizzazione descrive contemporaneamente ciò che avviene sui 3 avvolgimenti. Inoltre descrive solo quello che avviene sull'armonica fondamentale del flusso concatenato. Infatti andrebbe definita "~~armonica~~ induttanza di magnetizzazione fondamentale".

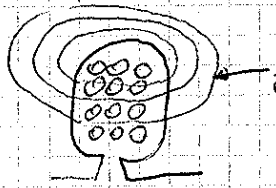
Distinguiamo 4 flussi:

$\phi_{principale}$: ϕ che attraversa il traferro

ϕ_{utile}

ϕ_{locale} : ϕ che non attraversa il traferro

$\phi_{disperso}$



Inoltre ci sono le testate che anch'esse danno vita a flussi locali.

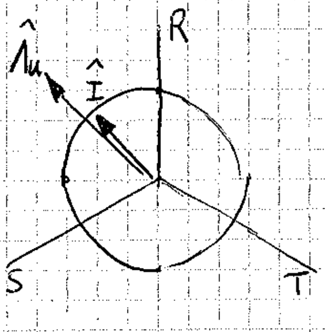
$$\begin{cases} \phi_{tot} = \phi_{pr} + \phi_{loc.} \\ \phi_{tot} = \phi_u + \phi_{disp.} \end{cases}$$

Nei trafo $\phi_u = \phi_{pr}$. Nelle macchine a campo rotante non c'è così. Infatti il flusso principale è dato da una serie di gradini, mentre il flusso utile è solo la fondamentale.

Dalle due relazioni si ha che

$$\phi_{disp} = \phi_{pr} + \phi_{loc} - \phi_u$$

$\phi_{pr} - \phi_u = \phi_{disp.\,traferro}$ flusso disperso al traferro.



$$\hat{\Lambda}_u = L_m \hat{I}$$

Rappresentiamo le equazioni elettriche.

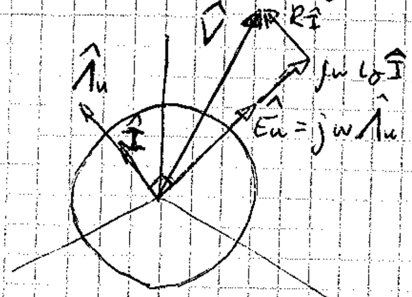
$$\begin{cases} \overline{v}_R = R\,\overline{i}_R + j\omega\,\overline{\Lambda}_{u,r} + j\omega\,\overline{\lambda}_{\sigma R} \\ \overline{v}_S = \dots \\ \overline{v}_t = \dots \end{cases}$$

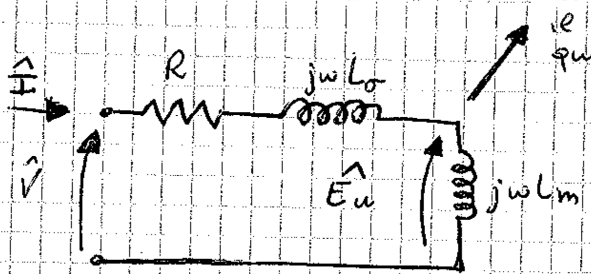
$\overline{\lambda}_{\sigma R} = L_{\sigma R}\,\overline{i}_R$

λ_σ flussi dispersi

Però posso scrivere le equazioni in modo vettoriale (un vettore rotante)

$$\overline{V} = R\overline{I} + j\omega L_m\overline{I} + j\omega L_\sigma \overline{I}$$





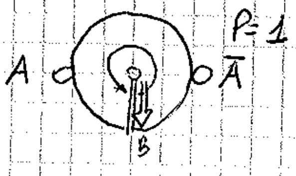
il circuito equivalente rappresenta il diagramma vettoriale e quindi tutta la macchina.

Se sono in regime sinusoidale posso utilizzare i valori efficaci delle grandezze anziché ~~dei~~ i valori massimi.

$L_\sigma = L_{\sigma,ecc.} + L_{\sigma,tref.}$

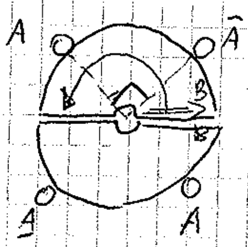
È possibile generare campi rotanti a velocità sottomultiple della pulsazione.

Coppie polari



Consideriamo una bobina $A\bar{A}$. Produciamo un taglio nel ferro e immaginiamo di deformarla fino a creare un semicerchio. Se in $T = 20\,ms$ il campo magnetico compie un giro completo nel caso precedente, in questo caso compie una rotazione di 180°.

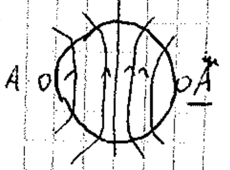
La struttura del semicerchio viene raddoppiata. Si vengono così a creare 2 coppie polari.



P=2

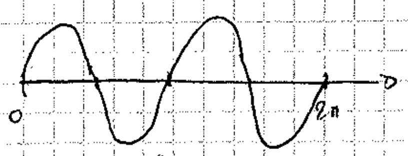
P: paia poli (coppie polari)

Se P=1 linee campo



Se P=2 linee campo.

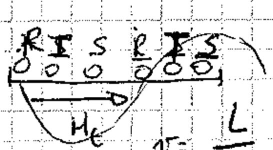
Se si aumenta il no di coppie polari la velocità del campo diminuisce in modo inversamente proporzionale al n° di coppie polari.



In una macchina con più coppie polari si hanno P periodi di forza ~~magneto~~ elettromotrice indotta.

In particolare se con P=1 queste vengono in funzione di $\sin(\alpha - \omega t)$ con due coppie polari verranno di $\sin(2\alpha - \omega t)$. In generale $\sin(P\alpha - \omega t)$.

Se $P \to \infty$ l'arco di circonferenza diventa una retta. Il campo non ruota più, ma bensì trasla. Posso immaginare di costruire una macchina traslante ~~ent~~ invece di una rotante. Questo è il principio per la costruzione di una macchina ~~traslante~~ lineare. Il vantaggio di un motore traslante è il fatto di non avere bisogno dell'attrito.



Armoniche superiori

$$sqw(\alpha) = \sum_{h\ \text{dispari}} \frac{4}{\pi h} \sin(h\alpha)$$

sqw: square wave (onda quadra).

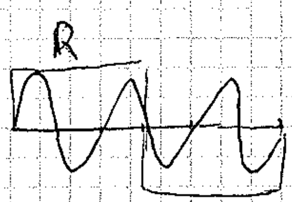
Oltre all'armonica fondamentale ci sono altre armoniche.

L'armonica di ordine 3 dice che al traferro c'è un'armonica con 3 poli.

La velocità delle armoniche spaziali è sottomultiplo della velocità di quella fondamentale.

$$h = 6K + 1 \quad , \quad K = \underbrace{-\infty, \ldots, -2, -1}_{\text{armoniche che girano in senso opposto}}, \underbrace{0}_{\text{fondamentale}}, \underbrace{1, 2, 3, \ldots +\infty}_{\text{armoniche che girano nello stesso verso della fondamentale}}$$

Nella formula mancano le armoniche multiple di 3. Queste armoniche sono omopolari, quindi non danno luogo ad un campo risultante al traferro. (Se alimentate con terne simmetriche ed equilibrate).



L'armonica della fase S sarà sfasata di 120° rispetto a R e quella della fase T di 240°.

La somma di queste 3 armoniche da 0.

Per affermare che le 3ª armoniche non ci sono basta che il sistema sia equilibrato.

Le armoniche non fondamentali dicono ~~solo~~ del disturbo. A noi interessa solo la principale.

Nelle macchine a campo rotante normalmente l'avvolgimento si trova sullo statore.