5. 10. 2012
(Miljavec)
(MES)

Lab. vaje
- čet. 11. 10. 2012 v LES od 9h do 10h
- seminar se šteje kot ustni in pisni del izpita ; zagovor je v aprilu/maju
- Preizkušanje el. strojev ; Aučin, Jereb

---

El. stroji :

- transformatorji
- komutatorski stroji
- Sinhronski
- Asinhronski } stroji

} generatorji, motorji, zavore, kompenzatorji jalove moči

---

2.) Komutatorski stroji: → iz redkih zemelj so tanjši

- feritni magneti → prepoznamo jih po debelini (da doseže določeno delovno točko)
- mag. polje med poloma
- vzb. sistem → trajni magnet
  → z navitje (vzbujanje z enosmernim tokom)

magneti { + več amperovojev, da dosežemo enak učinek kot z magneti
- rotor na sponkah je vedno "vir", ind. nap.

navitje { + več polov → težje naredimo navitje v velikosti mag.
- več polov → počasnejši
tudi rotor mora ~~biti~~ imeti enako št. polov ali pa ima magnete

---

3.) Sinhronski stroji

- več polov - počasnejši → ob večjih premerih pride do večje centrifugalne sile → pri visokih hitrostih lahko raztrga rotor
  → počasnejši ⟹ rotor z izrezanimi poli

---

4.) Asinhronski stroji

- "poševljenje" kr. st. kletke → od ene do druge strani utora
  → dosežemo gladek tek, ind. nap. je bolj sin. oblike, ker ni interakcije med palicami rotorja in statorja
- brez hlajenja bi bila zmogljivost stroja mnogo manjša
  tudi zmanjša hrupnost stroja

- Lab. vaje

http://~~les~~.fe.uni-lj/mes

- začetek 23. 10 2012
- 10 vaj
- 2 skupini po 4; nimate iste vaje naenkrat
- čet. 18. 10. 2012 → varstvo pri delu, 13:15
- priprave na vajo = DOMA
- sproti oddajamo poročila (dodamo grafe, komentarje, izračune)
- ena skupina = 1 poročilo
- gradivo je na webpage-u.
- 5 nalog na izpitu; podobne naloge kot na vajah; zbirka nalog je na spletu.

→ Magnetna napetost – razlika mag. potencialov

$$\underbrace{V_m = \int_{P_1}^{P_2} \vec{H}\cdot d\vec{l}}$$

$$V_m = \oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = \int_A \vec{J}\cdot d\vec{A} = \sum_{i=1}^{N} I = IN$$

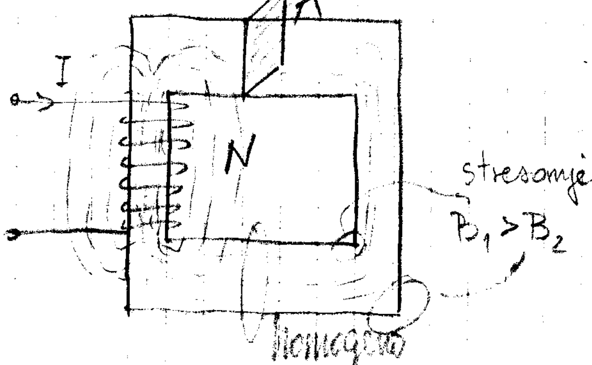
→ velja le za opazovano zanko; vse silnice ne grejo skozi vse zanke.

$$V_m = \Phi \cdot \underbrace{R_m}$$

→ reluktanca

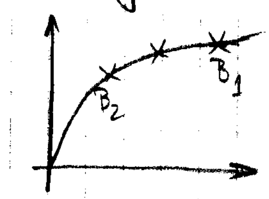
$$R_m = \frac{V_m}{\Phi} = \frac{\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l}}{\int_A \vec{B}\cdot d\vec{A}} = \frac{\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l}}{\mu_0\mu_r \int_A \vec{H}\cdot d\vec{A}}$$

V primeru homogenosti se izraz poenostavi




Stresanje polja – ker navitje ni dobro navito, za nekatere silnice je mag. upr. nekje manjše, kjer je najmanjši upora; polje ni povsem homogeno

vzbujamo s tokom (za reluktanco je vseeno – izmenični ali enosmerni)




Poenostavimo:

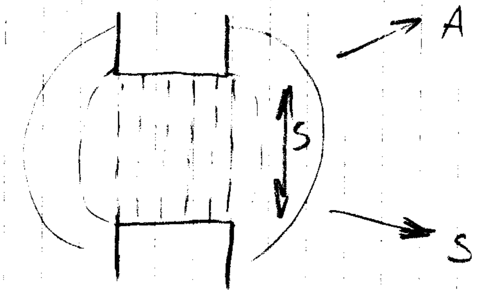
1.) Polje je homogeno v celotni strukturi → $\int \vec{B}\cdot d\vec{A} \Rightarrow BA$

2.) Polje je kanalizirano v jedru; ni stresanja → $\oint \vec{H}\, d\vec{l} = IN$

$$\underbrace{R_m} = \frac{V_m}{\Phi} = \frac{IN}{BA} = \frac{IN}{\mu_0\mu_r HA} = \frac{IN}{\mu_0\mu_r \frac{IN}{l} A} = \underbrace{\frac{1}{\mu_0\mu_r}\frac{l}{A}}$$

→ sr. dolžina gostotnice

Če dodamo zr. režo, obravnavamo kot serijo uporov.



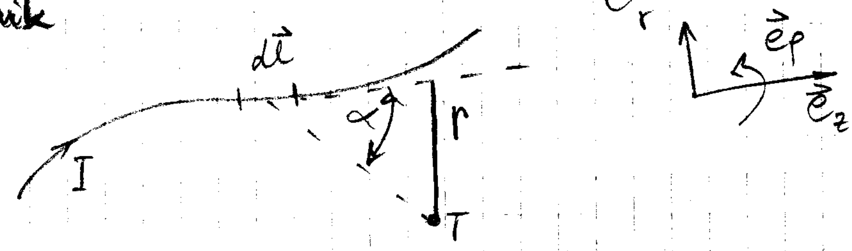

Carterjev faktor } $K_c$

12.10.2012

# Magnetni sklep, reluktanca, induktivnost, reaktanca (induktivna), mag. energija

→ Biot-Savart-ov zakon:

∘ poljuben vodnik




Zanima nas polje v neki točki T

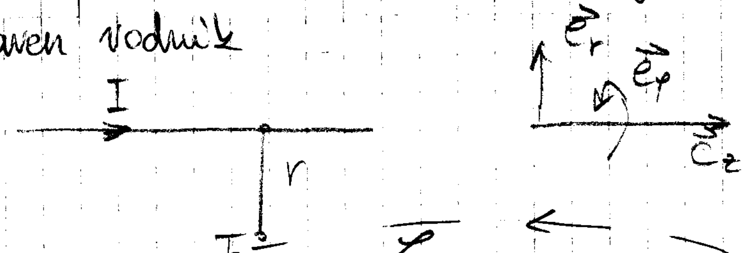
$I \cdot d\vec{l}$ → element toka

$$\boxed{d\vec{B}_T = \vec{e}_\varphi \frac{\mu_0 \mu_r I dl}{4\pi r^2} \sin\alpha}$$

$r$ → pravokotna oddaljenost

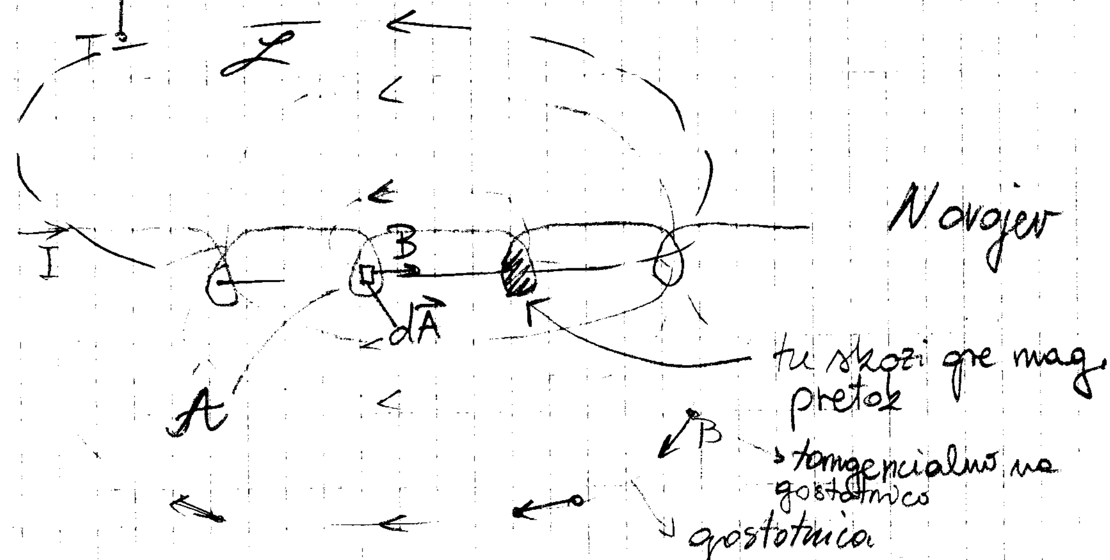
{polje računamo v vsaki točki posebej ⇒ veliko dela}

∘ raven vodnik




$$\vec{B}_T = \vec{e}_\varphi \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r}$$

∘ tuljava




$\Phi = \oint_{A_1} \vec{B} \cdot d\vec{A}$ ) $\vec{B} \parallel d\vec{A}$ (sk. produkt)

$B$ na ploskvi $A_1$ je homogeno ⟹ $\Phi = B \cdot A$

Zmožnost vzbujanja mag. pr. je opisana z mag. pol. jakostjo $\vec{H}$.

privzamemo: $\vec{B} \parallel \vec{H}$

$$\boxed{\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}}$$

→ Magnetni sklep

$$\Psi = N\Phi$$ ; $\Phi$ je enak skozi vse ovoje; če ne → $\phi_1 N_1 + \phi_2 N_2 + \ldots$

$$L = \frac{\Psi}{I}$$

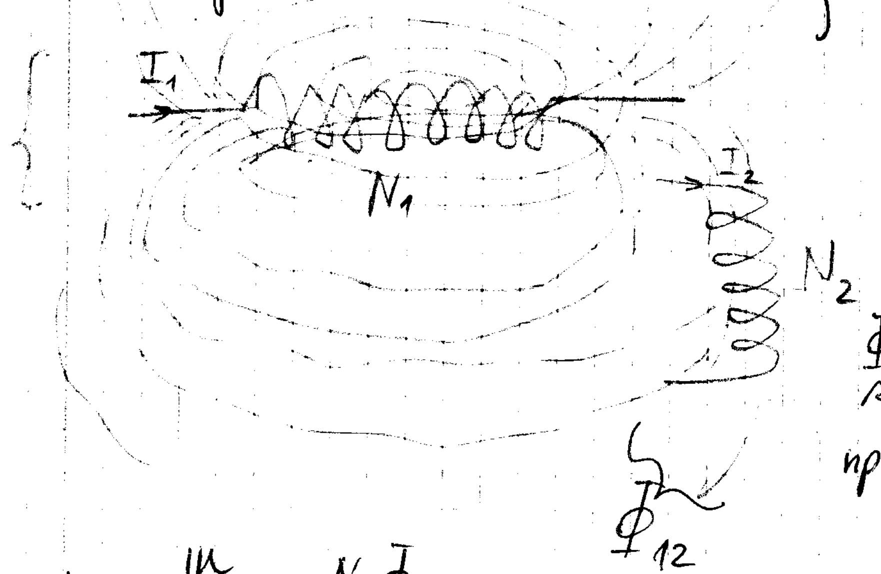
tok, ki je povzročil sklep

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N\Phi}{I}$$

$$L = \frac{N^2}{R_m}$$ → velja vedno; včasih zaradi geometrije težko izračunamo $R_m$

Če povečamo $N$, se s kvadratom poveča induktivnost → vklopni časi bodo večji.

→ Medsebojna induktivnost




koristi nam samo $\Phi_{12}$

$\Phi_{12}$ skozi tuljavo, inducira se napetost

npr.: nam nekaj sveti, ostali fluks je „potraten“

$$L_{12} = \frac{\Psi_{12}}{I_1} = \frac{N_2\Phi_{12}}{I_1}$$

$\Phi_{12}$ – skupni mag. pretok, ki ima skupno mag. upornost

$$\phi = \frac{V_m}{R_m}$$

$$L_{12} = \frac{N_2}{I_1}\Phi_{12} = \frac{N_2}{I_1}\frac{I_1 N_1}{R_{m12}}$$

$$L_{12} = \frac{N_1 N_2}{R_{m12}}$$

$$L_{21} = \frac{\Psi_{21}}{I_2} = \frac{N_1\Phi_{21}}{I_2}$$

$$L_{21} = \frac{N_1 N_2}{R_{m21}}$$

$$\boxed{L_{21} = L_{12}}$$

mag. pretoki v našem sistemu

$\phi_1 > \phi_{12}$ $\qquad \phi_1 = \phi_{12} + \phi_{1\sigma}$

$\phi_2 > \phi_{21}$ $\qquad \phi_2 = \phi_{21} + \phi_{2\sigma}$

Lastna induktivnost je sestavljena

$$\underline{\underline{L_{11}}} = \frac{N_1 \phi_1}{I_1} = \frac{N_1}{I_1}\left(\phi_{12} + \phi_{1\sigma}\right) = \underbrace{\frac{N_1}{I_1}\phi_{12}}_{\frac{N_1 N_2}{N_2}\frac{\phi_{12}}{I_1} \; L_{12}} + \frac{N_1}{I_1}\phi_{1\sigma} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right) L_{12} + L_{1\sigma} =$$

$$= \underline{\underline{L_{12}' + L_{1\sigma}}}$$

reduciranje na $N_1$

stresana ind. prve tuljave

$$\underline{\underline{L_{22}}} = \ldots = \left(\frac{N_2}{N_1}\right) L_{21} + L_{2\sigma} = \underline{\underline{L_{21}' + L_{2\sigma}}}$$

reduciranje na $N_2$

$$L = \frac{N^2}{R_m}$$

induktivnost ni odvisna od napajalne napetosti; odvisna je od geometrije in nasičenja

$$\rightarrow \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l}{A}$$

Reaktanca:

$X_L = \omega L_{12}$

$X_{12} = \omega L_{12}$

$X_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma}$

$X_{11} = \omega L_{11}$ ; $\omega = 2\pi f$

---

→ Energija mag. polja

Mag. polje je medij za prenos energije

$$\Delta W = \int_{t_1}^{t_2} P \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} u \cdot i \, dt$$

na elementu s konst. ind. je napetost: $u = L\frac{di}{dt}$

$$\Delta W = \int_{t_1}^{t_2} L\frac{di}{dt} i \, dt = \int_{i_1}^{i_2} L i \, di = \frac{1}{2} L\left(i_2^2 - i_1^2\right)$$

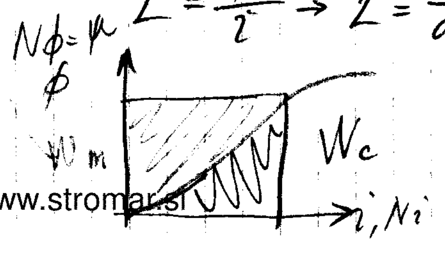
$$t_1 = 0 \rightarrow i_1 = 0 \Rightarrow \underline{W = \frac{1}{2} L i^2}$$

Spremembe energije lahko določimo s pomočjo mag. sklepa

$$\Delta W = \int_{i_1}^{i_2} L i \, di = \int_{i_1}^{i_2} \frac{d\psi}{di} i \, di = \int_{\psi_1}^{\psi_2} i \, d\psi = \int_{\phi_1}^{\phi_2} N i \, d\phi$$

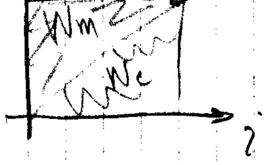
← integriramo po y-osi

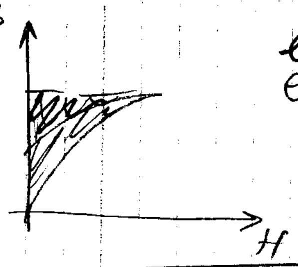
$$L = \frac{\psi}{i} \rightarrow L = \frac{d\psi}{di}$$




$W_m = W_c$

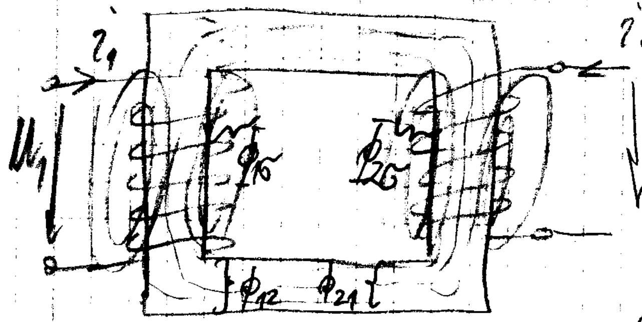
mag. koenergija






energija v tuljavo
energija iz tuljave

# TRANSFORMATOR




v teoriji EMP (el. mag. polja)

$\phi_{12}$ in $\phi_{21}$ sta združena v glavni mag. pretok.
Navitju se dodan še rozsuti mag. pretok

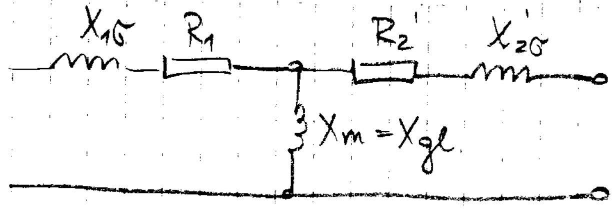
$$\phi_1 = \phi_{12} + \phi_{21} + \phi_{1\sigma}$$
$$\phi_1 = \phi_m + \phi_{1\sigma}$$
$$\phi_2 = \phi_{21} + \phi_{12} + \phi_{2\sigma} = \phi_m + \phi_{2\sigma}$$

združevanje:
$\phi_{12}, \phi_{21}, \phi_{1\sigma}, \phi_{2\sigma}$

V vezni teoriji sta za 1. navitje združena lastni mag. sklep in lastni rozsuti fluks v skupni lastni fluks, temu pa je dodan še $\phi_{21}$

$$\phi_1 = \underbrace{\phi_{12} + \phi_{1\sigma}}_{\phi_{11}} + \phi_{21} = \phi_{11} + \phi_{21}$$

$$\phi_2 = \phi_{21} + \phi_{2\sigma} + \phi_{12} = \phi_{22} + \phi_{12}$$




→ Transformator v luči vezne teorije

$$u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} \quad ; \quad \phi_1 = \phi_{11} + \phi_{21}$$
$$u_2 = R_2 i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} \qquad \psi_1 = N_1\phi_{11} + N_1\phi_{21}$$

$$\frac{d\psi_1}{dt} = N_1 \frac{d\phi_{11}}{di_1}\frac{di}{dt} + N_1 \frac{d\phi_{21}}{di_2}\frac{di_2}{dt}$$

$\phi$ = v sorodu s tokom

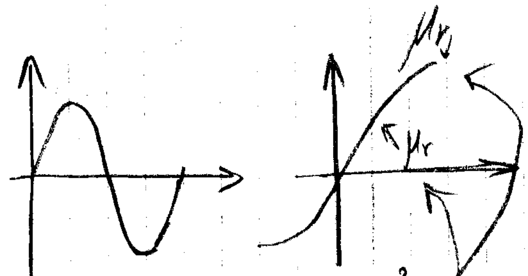
$$\frac{d\psi_1}{dt} = L_{11} p i_1 + L_{21} p i_2$$

$L_{21} = L_{12}$

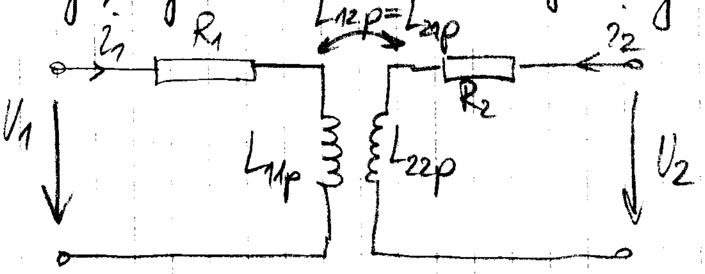
$$\frac{d\psi_2}{dt} = L_{22} p i_2 + L_{12} p i_2$$

→ Matrični zapis

$$* \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + L_{11}p & L_{21}p \\ L_{12}p & R_2 + L_{22}p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$




Induktivnost bi se tudi spreminjala s časom zaradi večanja/manjšanja $\mu_r$. Ampak mi smo privzeli linearno teorijo, kjer se ind. ne spreminja. $L = \frac{N^2}{R_m}$




p... operator odvajanja

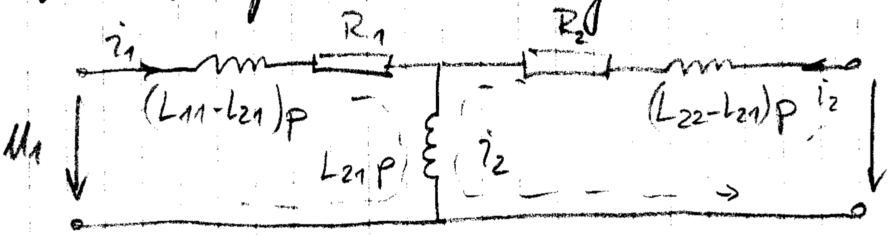
matriko * preoblikujemo : odštejemo in prištejemo

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + ((L_{11} - L_{21}) + L_{21})p & L_{21}p \\ L_{21}p & R_2 + ((L_{22} - L_{12}) + L_{12})p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

$L_{21} = L_{12}$

· tako smo povezali tokokroga.

19.10.2012




---

PARAMETRI TR. ZA NAD. VEZJE

1.) določanje upornosti (z UI metodo)

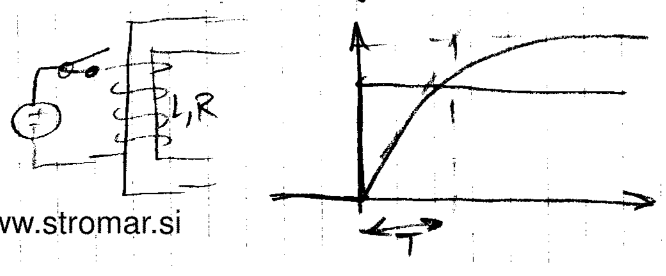
$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

vse komponente povezane z induktivnostjo enačimo z 0; gre za enosmerne razmere

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1}, \quad R_2 = \frac{U_2}{I_2}$$

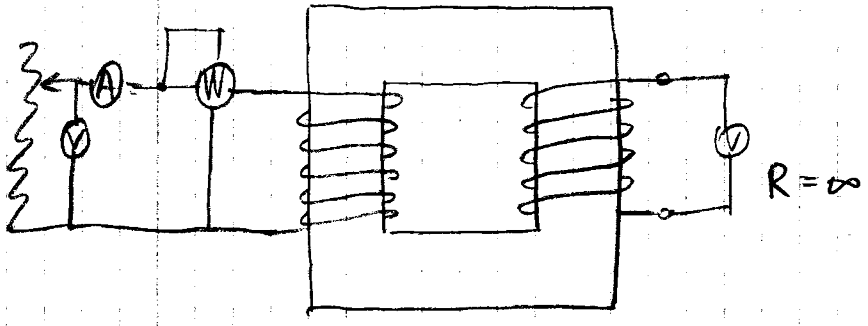
napetost skočno povečamo, tok ne sledi

želje:
→ moči in izkoristek čim večji, majhna upornost žic, veliko N
→ L je velik, R je majhen ; delimo: ⇒ velika časovna konstanta toka




- enak problem nastane pri odklopu

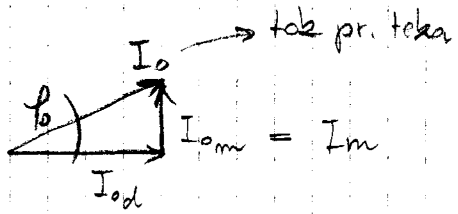
## 2.) Preizkus prostega teka:

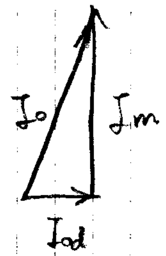



$U_1, I_1, U_2, \cancel{I_2}$ → efektivne vrednosti (izmerimo)

$P_0$ → moč pr. teka

$P_0 = U_1 I_1 \cos\varphi_1$ ; $\cos\varphi = \frac{P_0}{U_1 I_1}$




$I_{0d} = I_1 \cos\varphi_0$ ($\varphi_0$ .. pr. tek)

$I_m = I_1 \sin\varphi_0$

- delovna moč se troši zaradi izgub v železu in v bakru
- nadomestna upornost $R_{Fe}$ (ponazarja izgube v železu)

$$R_{Fe} = \frac{U_1}{I_{0d}} = \frac{U_1^2}{P_0}$$

- induktivna upornost (Im se porablja za magnetenje jedra in kritje stresanega polja)

$$j\omega L_m = jX_m = \frac{U_1}{I_m}$$

dalje računamo

$X_{12} = \frac{U_2}{I_1}$ ← medsebojna induktivnost

$Z_{11} = \frac{U_1}{I_1} = \sqrt{R_1^2 + X_{11}^2}$ ← lastna impedanca

$R_1 = R_{Fe} + \cancel{R_{Cu1}}$

$X_{11} = \sqrt{Z_{11}^2 - R_{Fe}^2}$ ← ind. upornost primarnega navitja

$X_{22}$ ... merimo s sekundarne strani: $\leftarrow$ lastna ind. sekundarja
$U_2$ in $I_2$

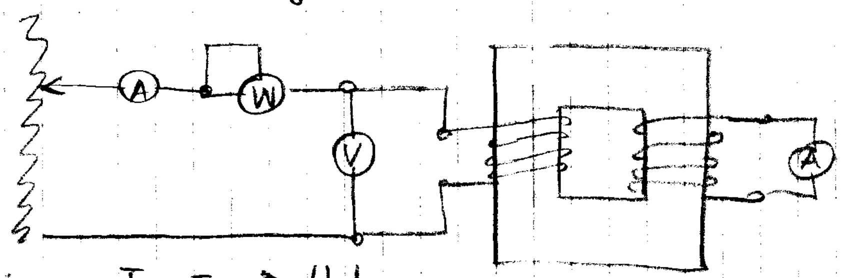
$$X_{22} = \frac{U_2}{I_2}$$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + jX_{11} & jX_{22} \\ jX_{21} & R_2 + jX_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$X_{11}$ in $X_{22}$ se spreminjata z mag. nasičenjem železa

operator $p = \frac{d}{dt}$ zamenjamo z $j\omega$ $\rightarrow$ obravnavanje stroja v stacionarnem stanju.

3.) Preizkus kratkega stika:




KS: $I = I_N \Rightarrow U \downarrow$

$U_2 = 0$

$I_1 = I_K$ del. moč, ki se troši zaradi gretja bakra

$U_1 \downarrow \rightarrow B \downarrow$

$P_K \Rightarrow$ za $P_{cu_1}$ & $P_{cu_2}$ redukcija na primar

$$Z_K = \frac{U_1}{I_1} = (R_1 + R_2') + j(X_{\sigma_1} + X_{\sigma_2}')$$

$pr = \frac{U_1}{U_2} \Rightarrow$ preskus P.T. zaradi nizke napetosti je mag. veja zanemarljiva

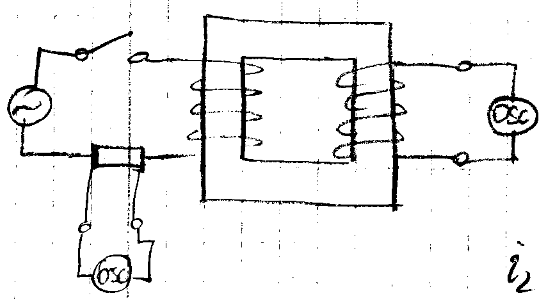
$$R_1 + R_2' = R_K = \frac{P_K}{I_K^2}$$

$$X_{\sigma_1} + X_{\sigma_2}' = X_K = \sqrt{Z_K^2 - (R_1 + R_2')^2}$$

$$\hookrightarrow \underbrace{\frac{X_K}{2} = X_{\sigma_1} = X_{\sigma_2}'}_{\text{simetrija}}$$

(imamo le eno stresano polje, ki se razširi skozi celoten stroj $\rightarrow$

# VKLOP ENOFAZNEGA TR. V PROSTEM TEKU



$u_1 = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \alpha_0)$

časovni prostor (obravnavamo preh. pojave)

v katerem trenutku vklopimo

$i_2 = 0$ (prosti tek!)

- predpostavimo linearno magnetenje jedra (ni nasičenja)
- brez histereze
- vse induktivnosti so konstantne → ni izgub v železu

Čas. pr.

$$\begin{bmatrix} \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \alpha_0) \\ u_2' \end{bmatrix} \neq \begin{bmatrix} \cancel{R_1 + jX_{11}} \end{bmatrix} \Longrightarrow \begin{bmatrix} R_1 + L_{11} p & L_{12} p \\ L_{21} p & R_2' + L_{22}' p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

kazalci

$$\sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \alpha_0) = (R_1 + L_{11} p) i_1$$

$$u_2' = L_{12} p\, i_1 = L_{21} p\, i_1$$

po izpeljavi preko $\mathcal{L}$ tr. dobimo:

$$i_1 = \frac{\sqrt{2} U_1}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_{11})^2}} \sin\left(\omega t + \alpha_0 + \operatorname{arctg}\frac{\omega L_{11}}{R_1}\right) - \frac{\sqrt{2} U_1}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_{11})^2}} +$$ (I izm.)

$$+ \sin\left(\alpha_0 + \operatorname{arctg}\frac{\omega L_{11}}{R_1}\right) e^{-\frac{R_1}{L_{11}} t}$$ (I enosm.)

v trenutku vklopa = vsota 0

1.) $\frac{R_1}{L_{11}} = T_{10}$ .. primarna čas. konst. pr. teka tr.

2.) $\operatorname{arctg}\frac{\omega L_{11}}{R_1} = \varphi_0$ ... fazni kot primarnega izm. toka proti primarni izm. nap.

I. Izm. komponenta predstavlja trajni tok prostega teka

II. enosmerna izenačevalna komponenta, ki usiha s čas. konst. prostega teka

- Ko je $t = 0$; kolikšna je vrednost obeh členov?
  → obe komponenti sta enaki in se odštevata

v trenutku vklopa začne vklopni tok z vrednostjo 0,

vrednost enosmerne komponente je odvisna od trenutka vklopa

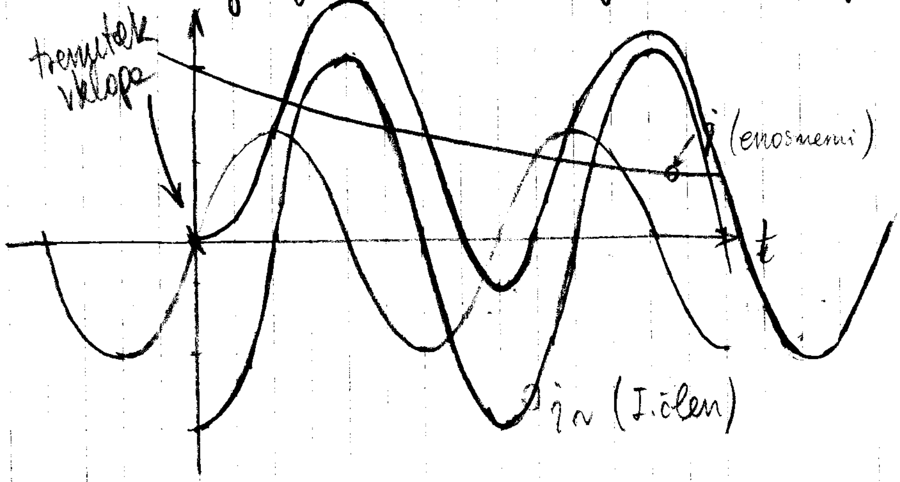
* $\alpha_0 + \varphi_0 = 90°$

* $I_0$ v pr. teku je skoraj 90°

vklopni kot $\alpha_0 = 0$ ; največja težava ob vklopu nastane, ko je nap. $u_1 = 0$.

$\Rightarrow \underline{u_1(t=0)=0}$ neugodno

tok bo največjo vrednost dosegel v prvi polperiodi vklopa.




enosm. upada počasi → velika čas. konst.

po žici teče vsota obeh tokov

⇓

izgleda, kot da bi nihala okoli usihajoče komp.

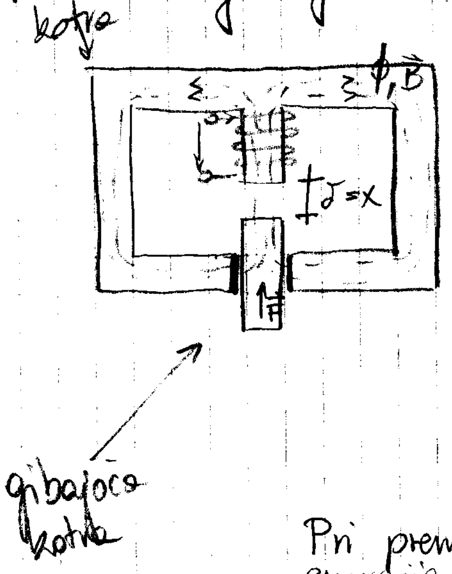
napetost na sek. strani !

$$\underbrace{u_2' = L_{12}' \frac{di_1}{dt}}$$

po preh. pojavu se stabilizira v konstantno napetost

26.10.2012

# PRETVARJANJE ENERGIJE V SISTEMU Z ENOJNIM NAPAJANJEM

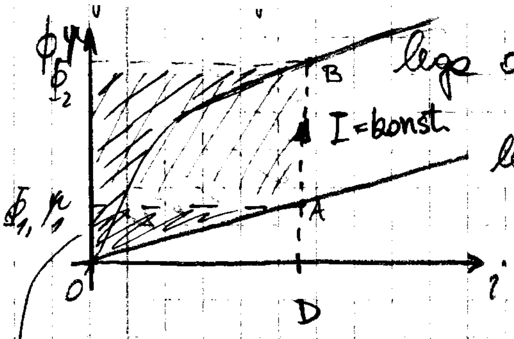



1.) ◦ če sistem miruje, sila ne opravlja dela.
◦ v mag. polju je nakopičena energija

2.) ◦ kotva se premakne → sila F opravi mehansko delo $A_{meh}$
◦ spreminja se:
- zračna reža
- magnetni krog
- energija mag. kroga
- magnetno polje
- tok in napetost

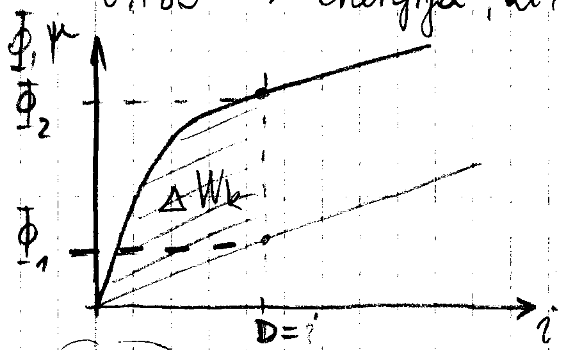
Pri premiku se energija polja, električna energija in mehanska energija se spreminjajo (pretvarjajo) ena v drugo.

- magnetilnica (pri široki zračni reži in ozki zr. reži)

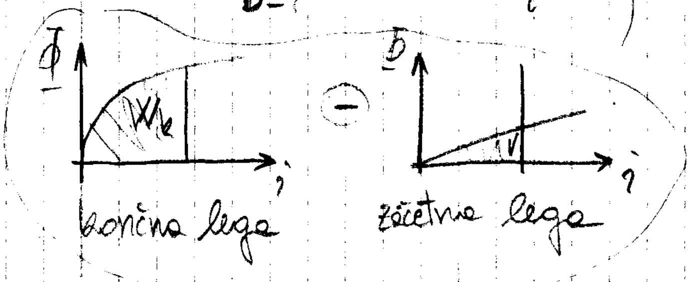



tok i = D

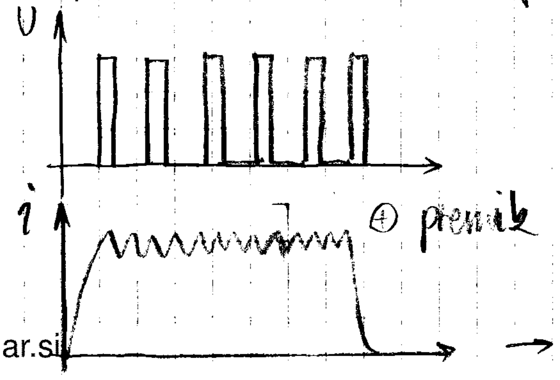
- Vklopimo tok, zaradi blokade se energija akumulira v mag. polju (plastični distančnik)
- Umaknemo blokado → premik → težì k manjši zr. reži
  - $A\Phi_1 0$ → akumulirana mag. energija
  - $AB\Phi_2\Phi_1$ → energija iz električnega vira
- po končanem premiku se zadeve ustavi; tok teče, ponovno se nekje akumulira energija
  - $0B\Phi_2$ → akumulirana mag. energija po premiku
- sila je na poti $\delta$ opravila delo A, ki se kaže kot premik
  - $0AB0$ → energija, ki se je pretvorila v meh. delo $F \cdot \delta$

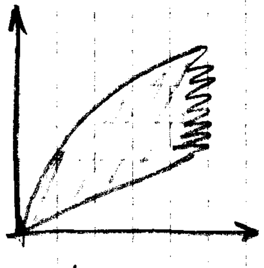


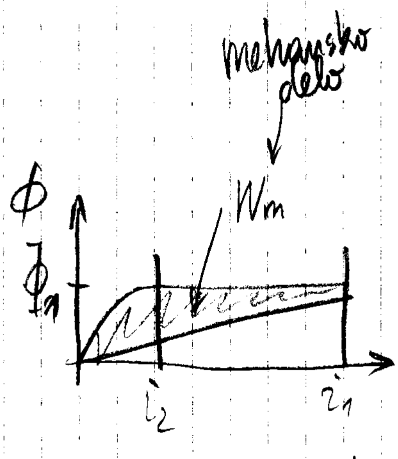

- energija, ki je pritekla iz vira in se pretvorila v delo
- $\Delta W_k$ → sprememba magnetne koenergija
→ to površina predstavlja razliko koenergije med začetno in končno lego




- pulzno-širinska modulacija (PŠM; PWM)

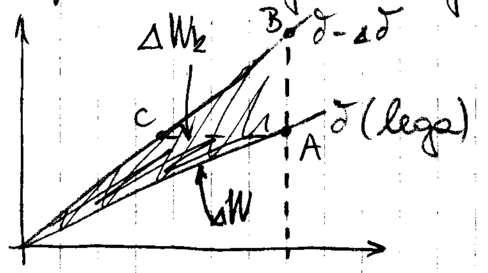





→ konstanten mag. pretok (spreminjamo tok)

- zelo majhen premik
- pri premiku lege ohranjamo tok




- koenergije v naravi ni, vendar je izračun lažji + ne delamo velike napake
- napaka, ki jo delamo je proporcionalna trikotniku ABC
- če bi bil premik enak nekemu diferencialnemu delu poti, bi bila napaka še manjša

$$\left.\begin{aligned}\Delta W_k &= OAB \\ \Delta W &= OAC\end{aligned}\right\} \Delta W_{k_1} = ABC$$

$$\underline{\Delta W_k = \Delta W_m = F \cdot \Delta\delta} \rightarrow \text{velja, če je tok pri premiku konstanten.}$$

$$* \quad \underline{F = \left.\frac{\Delta W_k}{\Delta\delta}\right|_{i=\text{konst.}}}$$

---

- Energija mag. polja izražena z induktivnostjo
  $\delta = x$

$W = \frac{1}{2} L i^2$ ; velja, če je induktivnost linearna

$$\frac{\Delta W}{\Delta x} = ?$$

$$\rightarrow \frac{dW}{dx} = \underbrace{L i \frac{di}{dx}}_{1.} + \underbrace{\frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx}}_{2.}$$

1. akumulirana energija (zračna reža se ne premika, ne ~~spre~~ opravlja dela)
2. spreminjanje energije $\underline{dW = L i di + \frac{1}{2} i^2 dL}$

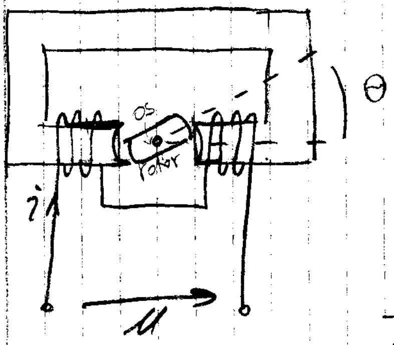
$$* \quad F = \left(\frac{dW}{dx}\right)\Big|_{i=\text{konst.}} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx}$$

$i = \text{konst.}$, $di = 0$

$dW = L i di$

$$\frac{dW}{dt} = p = L i \frac{di}{dt} = i L \frac{di}{dt} = i u \rightarrow \text{moč s katero se polni energija mag. polja}$$

# SISTEM Z VRTEČIM SEDELOM IN ENOJNIM NAPAJANJEM




$$W = \frac{1}{2} L i^2$$

- Sila hoče zamakniti v lego najboljše prevodnosti → sprememba energije zaradi spremembe položaja

$$\frac{dW}{d\Theta} = Li\frac{di}{d\Theta} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\Theta} \rightarrow$$

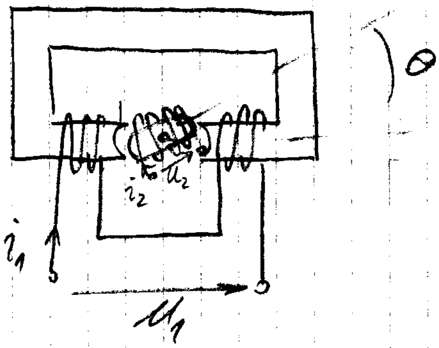
$$\Delta W = \underbrace{Lidi}_{\text{kopičenje energije}} + \underbrace{\frac{1}{2} i^2 dL}_{\text{energija, ki se je spremenila} \rightarrow \text{spremembo mehanske energije}}$$

$\underline{dW = M \cdot d\Theta}$ → sprememba mehanskega dela je pri vrtenju določena z navorom in spremembo kota

$\underline{M = \frac{dW}{d\Theta}\Big|_{i=konst.}}$ = → premik je zelo majhen

$\underline{= \frac{1}{2} L i^2 \frac{dL}{d\Theta}}$ → v takšne enačbe veljajo za reluktančne stroje (železo+baker)

→ DVOJNO NAPAJANJE




→ obstajata lastni induktivnosti $L_{11}$ in $L_{22}$ ter medsebojni induktivnosti $L_{12}$ in $L_{21}$ → tuljavi sta magnetno sklopljeni

- energija mag. polja sistema:

$$\Delta W = \int_{t_1}^{t_2} u i dt = \int_{t_1}^{t_2} L_{11}\frac{di_1}{dt} i_1 dt + \int_{t_1}^{t_2} L_{22}\frac{di_2}{dt} i_2 dt + \int_{t_1}^{t_2} L_{12}\frac{di_2}{dt} i_1 dt =$$

ob $t_1 = 0$ velja $i_1, i_2 = 0$; po času $t_2$ velja $i_1 = I_1$, $i_2 = I_2$

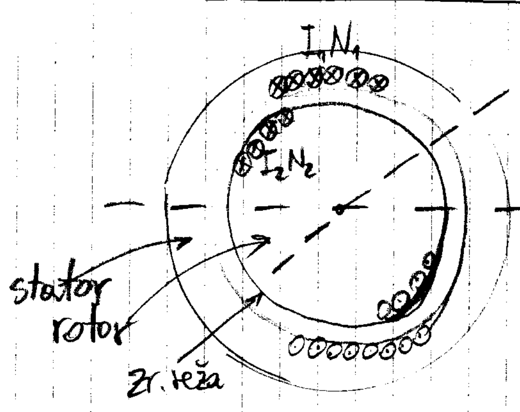
$$\Rightarrow W = \frac{1}{2} L_{11} I_1^2 + \frac{1}{2} L_{22} I_2^2 + L_{12} I_1 I_2$$

po izpeljavi za navor:

$$\underline{M = \frac{1}{2} I_1^2 \frac{dL_{11}}{d\Theta} + \frac{1}{2} I_2^2 \frac{dL_{22}}{d\Theta} + I_1 I_2 \frac{dL_{12}}{d\Theta}} \rightarrow \underline{\text{elektromagnetni navor}}$$

E-M navor izvira iz el. (mag.) polja in električnega napajanja

- Cilindrične : rotor in stator:




- Kdaj se razvije navor ? Ko se induktivnost spreminja s kotom.

V našem primeru se spreminja le medsebojna induktivnost.

$$\left.\begin{array}{l}\frac{dL_{11}}{d\theta} = 0 \\ \frac{dL_{22}}{d\theta} = 0\end{array}\right\} \text{zr. reža je konst.}$$

$$\frac{dL_{12}}{d\theta} \neq 0 \quad ; \quad \underline{M = I_1 I_2 \frac{dL_{12}}{d\theta}} = \left.\frac{dW}{d\theta}\right|_{i = \text{konst.}}$$

- Kako stroj naredimo čimboljši ?

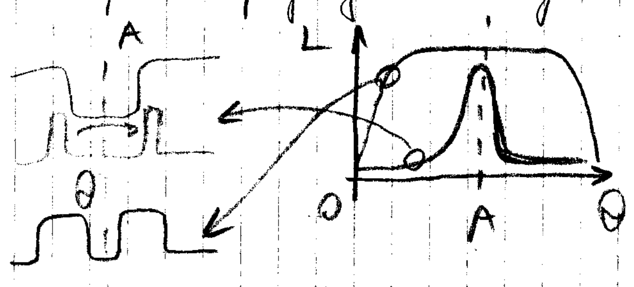
Da bi bila sprememba induktivnosti čim večja.

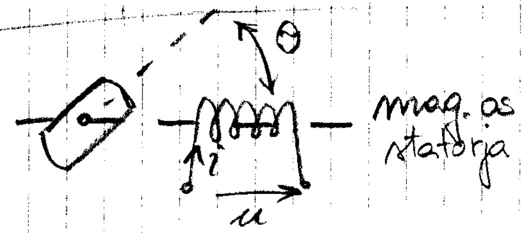
ENOJNO NAPAJANJE -- vezje je sestavljeno iz induktivnosti in upornosti

## E-M SISTEM KOT VEZJE

– Enojno napajanje → tuljava R in L (R ← ohmski del (navitja, ...))

v L je skrita geometrija




$$u = i \cdot R + \frac{d\psi}{dt} \qquad \psi = Li$$

$$u = iR + \frac{d(Li)}{dt} = \underbrace{i \cdot R}_{\text{padec napetosti na žicah}} + \underbrace{L\frac{di}{dt}}_{\text{ind. nap. pri konst. } L} + \underbrace{i\frac{dL}{dt}}_{\text{ind. nap., padec nap. pri } i = \text{konst in spreminjajoči } L}$$

padec napetosti na žicah — sprememba energije v toploto

ind. nap. pri konst. L — Transformator

ind. nap., padec nap. pri i = konst in spreminjajoči L — gibalna ind. nap.

$$p = u \cdot i = \underbrace{i^2 R}_{\text{toplota}} + \underbrace{L i \frac{di}{dt}}_{\substack{\text{pretvarjanje el. energije} \\ \text{nazaj v el. energijo} \\ (\cos\varphi, \ldots)}} + \underbrace{i^2 \frac{dL}{dt}}_{\text{gibanje}}$$

gibanje ; pretvarjanje el. energije v mehansko en.

∘ preuredimo:

$$\underbrace{i^2 R + L i \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt}}_{} + \underbrace{\frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt}}_{\text{mehanska moč na gredi}}$$

$$\underbrace{\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2} L i^2\right)}_{\text{moč spreminja el. energijo polja}}$$

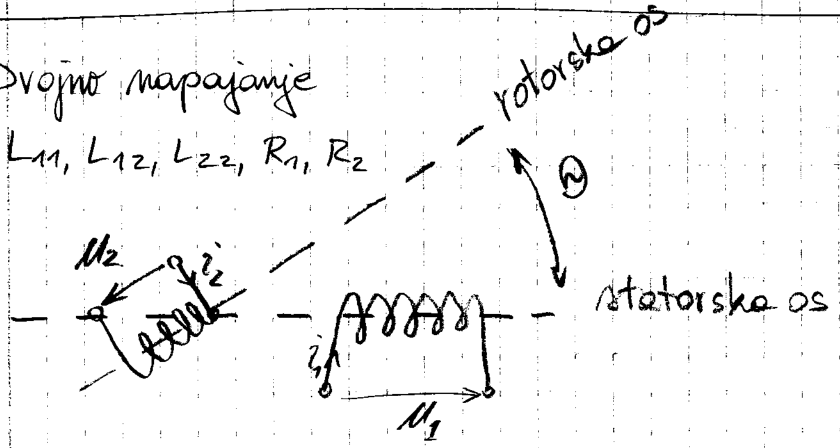
$$P_{meh} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \underbrace{\frac{d\theta}{dt}}_{\omega}$$

$$\boxed{\frac{P_{meh}}{\omega} = M = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}}$$

---

– Dvojno napajanje

$L_{11}, L_{12}, L_{22}, R_1, R_2$




$$u_1 = i_1 \cdot R_1 + \frac{d\psi_1}{dt} \quad ; \quad \psi_1 = L_{11} i_1 + L_{12} \cdot i_2$$

$$u_2 = i_2 R_2 + \frac{d\psi_2}{dt} \quad ; \quad \psi_2 = L_{22} i_2 + L_{21} i_1$$

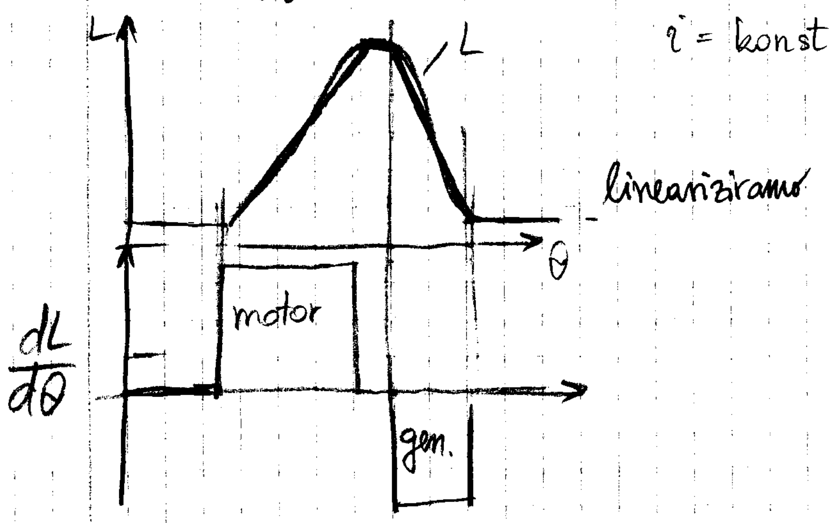
$L_{21} = L_{12}$

zapisano v smislu vezne teorije

Po izpeljavi:

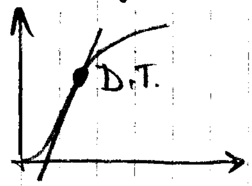
$$M = \frac{1}{2} i_1 \frac{dL_{11}}{d\theta} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_{22}}{d\theta} + i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\theta}$$

$i = \text{konst.} \rightarrow M \approx \frac{dL}{d\theta}$



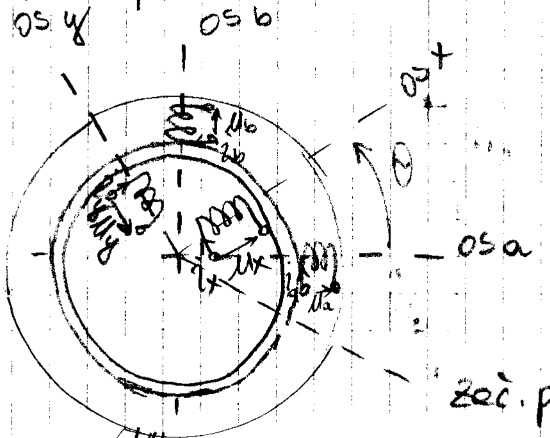
# OSNUTEK VEZNEGA MODELA ROTACIJSKIH EL. STROJEV

- dobro opiše stroj
- sestavljen iz $L_{11}, L_{12}, L_{22}$
- mag. polje naj ima iste lastnosti kot v realnosti
- $P_{Fe} = 0$, če je potrebno jih naknadno vključimo
- linearnost feromagnetikov (nadaljnji izračun velja v okolici D.T.)




- za različne D.T. moramo ponovno določiti linearne karakteristike
- navitja nameščena na 2 prostorski osi, ki ste med seboj pravokotni, da izničimo njun medsebojni vpliv
  tuljav (navitij)

- za stator posebej, za rotor posebej
- med R in S še vedno obstaja medsebojna induktivnost, ki se spreminja z lego.
- za dosego pravokotnih odnosov je potrebno opraviti transformacijo
- obravnavamo le osnovni harmonski val.
- vse induktivnosti se naj spreminjajo po sinusu
- vsi modeli bodo dvopolni
- $p = \frac{d}{dt}$ ; $p\theta = \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta} = \omega$
- meh. moč $P_m > 0$ za smer po gredi ven (motor)
  $P_m < 0$ ... noter (generator)
  $M > 0$ ... motor
  $M < 0$ ... generator
- $P_{el} > 0$, ko priteka iz vira v navitje




→ 4 sistemi – 4 enačbi

$$u_a = i_a R_a + \frac{d\psi_a}{dt}$$

$$u_b = i_b R_b + \frac{d\psi_b}{dt}$$

$$u_x = i_x R_x + \frac{d\psi_x}{dt}$$

$$u_y = i_y R_y + \frac{d\psi_y}{dt}$$

$L \cdot i = \psi$ zapišemo v matrični obliki

$$[u] = [R][i] + \frac{d}{dt}[\psi]$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_x \\ u_y \end{bmatrix} = [u] \quad ; \quad \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_x \\ i_y \end{bmatrix} = [i] \quad ; \quad [R] = \begin{bmatrix} R_a & & & 0 \\ & R_b & & \\ & & R_x & \\ 0 & & & R_y \end{bmatrix}$$

$$[\psi] = [L]\cdot[i]$$

$$\begin{cases} L_{ab} = L_{ba} = 0 \\ L_{xy} = L_{xy} = 0 \end{cases}$$

med seboj so pravokotne

$$[\psi] = \begin{array}{c} a \\ b \\ x \\ y \end{array} \begin{bmatrix} L_{aa} & 0 & L_{ax} & L_{ay} \\ 0 & L_{bb} & L_{bx} & L_{by} \\ L_{xa} & L_{xb} & L_{xx} & 0 \\ L_{ya} & L_{yb} & 0 & L_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_x \\ i_y \end{bmatrix}$$

odvisno od lege, čeprav so tudi pravokotne

- ta matrika v bistvu opiše stroj
- tu se skriva pretvorba energije in generacija navora

9.11.2012

$$[u] = [R]\cdot[i] + \frac{d}{dt}[L][i]$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_x \\ u_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_x \\ i_y \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & 0 & L_{ax} & L_{ay} \\ 0 & L_{bb} & L_{bx} & L_{by} \\ L_{xa} & L_{xb} & L_{xx} & 0 \\ L_{ya} & L_{yb} & 0 & L_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_x \\ i_y \end{bmatrix}$$

pred produktom $L \cdot i$

$$[Z] = [R] + [L]$$

$$[u] = \frac{d}{dt}[Z][i]$$

$$\frac{d}{dt} = p$$

(ni trenutna moč oz. polovi pari !)

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_x \\ u_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_{aa} & 0 & pL_{ax} & pL_{ay} \\ 0 & R_b + pL_{bb} & pL_{bx} & pL_{by} \\ pL_{xa} & pL_{xb} & R_x + pL_{xx} & 0 \\ pL_{ya} & pL_{yb} & 0 & R_y + pL_{yy} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_x \\ i_y \end{bmatrix}$$

- če v stroj vsiljujemo stroj
- poznamo stroj
- računamo napetost
- potrebujemo moč na gredi

## NAVOR IN MEHANSKO RAVNOTEŽJE V ENOSTAVNEM STROJU

- Sistem z enojnim napajanjem in vrtečim delom

$$\underline{M = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}}$$

Splošna enačba za navor :

$$\underline{M = \frac{1}{2} [i]^T \left\{ \frac{d}{d\theta}[L] \right\} [i]}$$

- velja za 2 polen stroj $\underline{p_p = 1}$

- večpolen stroj :

$$\underline{M = \frac{p_p}{2} [i]^T \left\{ \frac{d}{dt}[L] \right\} [i]}$$

- stroj z več $p_p$ razvije višji navor
- zmanjše se hitrost
- moč se ne poveča

- V matriki $[Z]$ moramo poznati odvisnost vseh induktivnosti od kota $\theta$.
- za različna obratovalna stanja potrebujemo vse tokove (dobimo iz matrične enačbe)

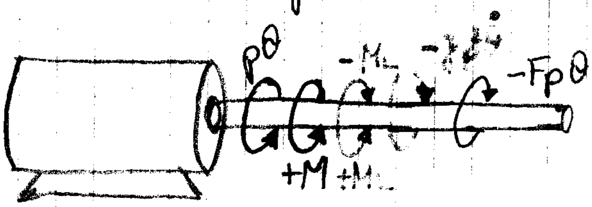
potrebujemo:

- napetostno ravnovesno enačbo
- Elektromagnetno navorno enačbo
- Mehansko enačbo

} tvorita navorno ravnotežje

NAVORNA RAVNOTEŽNA ENAČBA

- opisuje razmere na gredi stroja
- vsi navori na gredi so v ravnovesju → mehansko stacionarno stanje




- $p\theta = \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta}$ ... trenutna kotna hitrost vrtenja rotorske gredi
- $+M$ ... pogonski navor stroja (elektromagnetni)
- $+M_L$ ($L$ ... load → breme) ... zunanji bremenski navor, ki poganja rotor v smeri vrtenja
- $-M_L$ ... zun. brem. navor, ki zavira vrtenje gredi
- $J\frac{d\omega}{dt} = Jp^2\theta$ ... navor zaradi vztrajnostnih mas; skuša preprečiti vsako spremembo hitrosti vrtenja
- $Fp\theta = F\frac{d\theta}{dt} = F\omega$ ... navor viskoznega vrtenja

Če na gredi ni ravnovesja lahko stoji ali pa je pognana v $\infty$.

$$0 = M - Jp^2\theta - Fp\theta \mp M_L$$

$$M = J\frac{d\omega}{dt} + F\cdot\omega \pm M_L$$

$$\uparrow$$

$$\frac{1}{2}[i]^T\left\{\frac{d}{dt}[L]\right\}[i]$$

- odvisno od pospeševanja je odvod različno predznačen
: $Jp^2\theta$

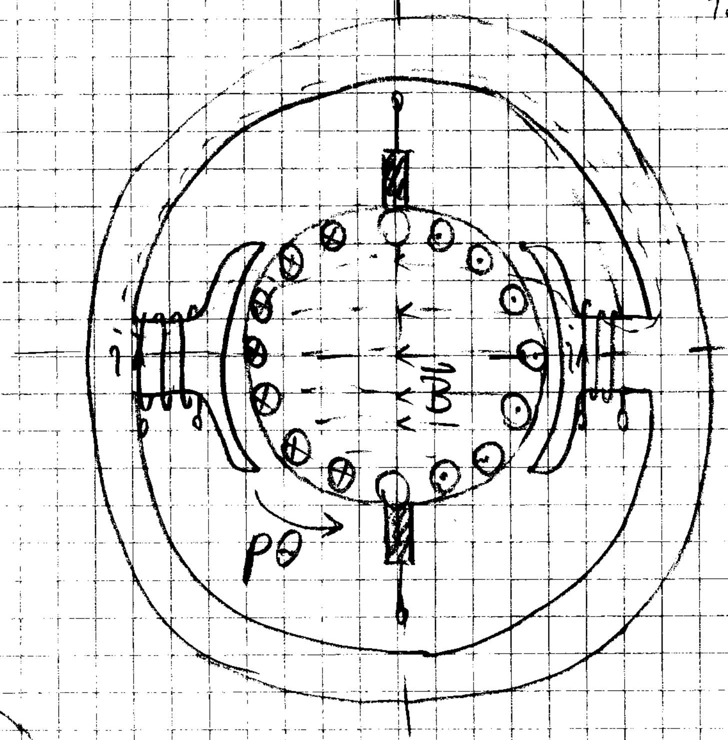
$$p = \frac{d}{dt} \qquad p^2 = \frac{d^2}{dt^2} \qquad \frac{d\theta}{dt} = \omega$$

- poznati moramo: $J, F, M_L, M \rightarrow u, R, L$ :

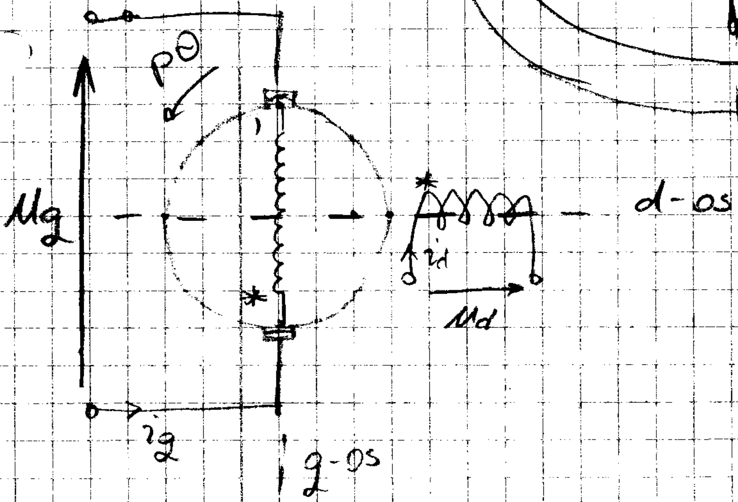
$\boxed{\text{potek } \omega}$ $\quad i \xrightarrow{L} M$

# KOMUTATORSKI STROJI

magnetna os rotorja
$q$-os → navorna os
tok $I_q$ → navorni tok

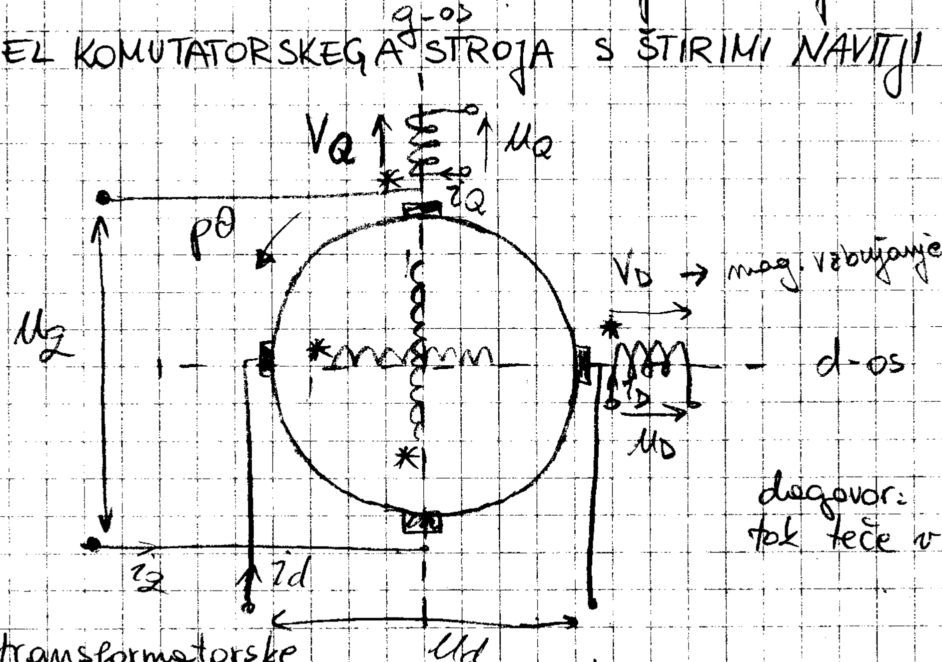



mag. os statorja
d-os
magnetilna os




- navorni koordinati sta dani s konstrukcijo $d$ in $q$ osi
- rotorska navitja so nepremična - na $q$-osi; navidezno mirujejo
- vsa navitja v prostoru navidezno mirujejo čeprav imamo gibanje
- $R$ in $L$ ter $M$ so konstantne - zato ni potrebna nobena nadaljna transformacija $V, I, Z$

## 1.) MODEL KOMUTATORSKEGA STROJA S ŠTIRIMI NAVITJI




dogovor:
tok teče v *

* smer transformatorske inducirane napetosti (odvisna od smeri navoja)
gibalno inducirana napetost

$V_D$ povzroči induciranje v tuljavi $q$

- napetostna ravnovesna matrična enačba:
  - napetost določamo glede na dejstva za posamezna navitja
    - padec napetosti na upornosti $R$
    - ind. nap. zaradi spreminjanja toka v istem navitju se vzame kot padec napetosti na lastnem navitju ($L_{xx}$)
    - isto velja glede medsebojnih induktivnosti
    - gibalno ind. nap. samo v rotorskem navitju, zaradi vrtenja rotorja v mag. polju v vseh tistih navitjih katerih mag. osi niso vzporedne z mag. osjo opazovanega rotorskega navitja. To velja ne glede ali so na rotorju ali na statorju. Tudi te napetosti se vzamejo kot padci napetosti na konstantnih tki koeficientih ~~rotorske~~ gib. ind. napetosti ($G_{xy}$)

zaradi pravokotnosti

$$\begin{bmatrix} u_D \\ u_Q \\ u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_D + pL_{DD} & 0 & L_{Dd}p & \cancel{L_{Dq}}\ 0 \\ 0 & R_Q + L_{QQ}p & 0 & L_{Qq}p \\ L_{dD}p & G_{dQ}\dot{\theta} & R_d + L_{dd}p & G_{dq}\dot{\theta} \\ G_{qD}\dot{\theta} & L_{qQ}p & G_{qd}\dot{\theta} & R_q + L_{qq}p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix}$$

- členi:

$$\left.\begin{matrix} G_{dQ}\dot{\theta}\, i_Q \\ G_{dq}\dot{\theta}\, i_q \\ -G_{qD}\dot{\theta}\, i_D \\ -G_{qd}\dot{\theta}\, i_d \end{matrix}\right\}$$ gibalna inducirana napetost;

členi ~~$\theta$~~ $G_{qD}$, $G_{qd}$, $G_{dq}$, $G_{dQ}$ → imajo dimenzijo (enoto) induktivnosti

- Ker porazdelitev polja v reži ni sinusna, zato pri členu za gib. ind. nap. ni induktivnost ampak koeficient gibalne ind. nap.

- normalen kom. stroj ima izražene pole in s tem enakomerno zr. režo → ni sinusne porazdelitve

$$[u] = [R][i] + [L]p[i] + [G]\dot{\theta}[i]$$

moč v sistemu: izgub v železu ne upoštevamo

$$[i]^T[u] = [i]^T[R][i] + [i]^T[L]p[i] + [i]^T[G]\dot{\theta}[i]$$

1.) v mirovanju: $\dot{\theta} = 0$
sledi

$$\Delta \quad \underbrace{[i]^T[u]}_{\text{moč, ki jo dovajamo v sistem}} = \underbrace{[i]^T[R][i]}_{\text{izgubna moč (toplota vnavitju)}} + \underbrace{[i]^T[L]p[i]}_{\text{moč s katero se energetsko polnijo in praznijo mag. tuljave / polja → povezane z lastnimi in medsebojnimi induktivnostmi}}$$

2.) gibanje → $\dot{\theta} \neq 0$

$$\Delta + [i]^T[G]\dot{\theta}[i] \} = \underline{M\dot{\theta}}$$ mehanska moč na gredi (koristno delo)

P meh

◦ navorna enačba:

$$\frac{P_{meh}}{\dot{\Theta}} = M = \underline{\underline{\tfrac{1}{2}}}[i]^T[G][i]$$

{ni $\frac{1}{2}$, ker je faktor G upoštevan le na rotorski strani}

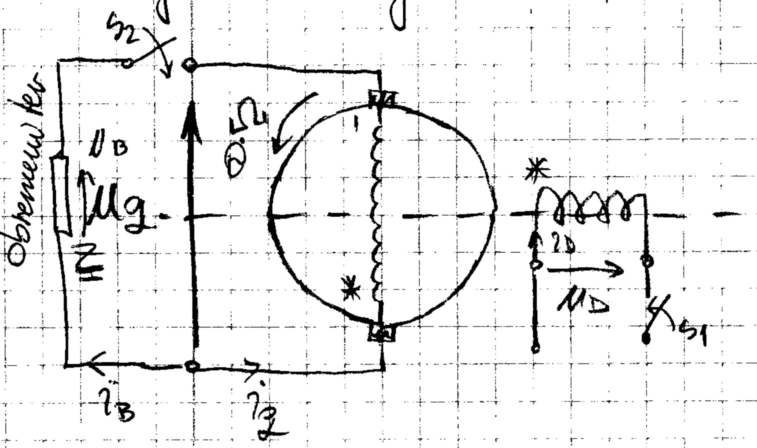
◦ navorna enačba v ~~razširjeni~~ obliki:

$$M = [i_D \; i_Q \; i_d \; i_q] \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_{dQ} & 0 & G_{dq} \\ G_{qD} & 0 & -G_{qd} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix}$$

v konverziji navora nastopajo členi, ki vsebujejo ω.

---

# TUJE VZBUJAN ENOSMERNI GENERATOR




$\Omega$ → stacionarno vrtenje
$\dot{\Theta}$ → dinamično stanje

d-os (magnetilna os)

◦ napetostna ravnovesna enačba v matrični obliki:
- kroga sta sklopljena preko gib. ind. nap.

$$\begin{bmatrix} u_D \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_D + L_{DD}p & \overset{\frown}{0} \\ \underbrace{-G_{qD}\dot{\Theta}} & R_q + L_{qq}p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_D \\ i_q \end{bmatrix}$$

povezava med vzbujalnim krogom in rotorskim krogom

smatramo, da vpliva rotorskega kroga na statorju.

16.11.2012

$u_B$ → nap. bremena, drži protinapetost inducirani napetosti

• $S_2$ odprto, $S_1$ vklopljeno:

$i_q = 0$ → na rotorju: $u_q = -G_{qD}\Omega i_D = -E_q$

vrednost: $i_D = \dfrac{u_D}{R_D + L_{DD}p}$

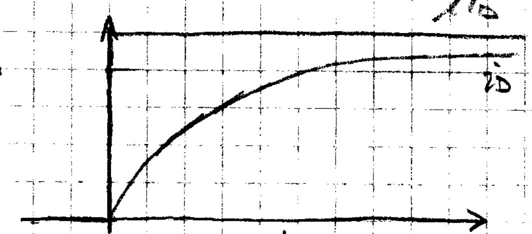
Če bi bilo stanje stacionarno → $L_{DD}p = 0$

ob vklopu $S_1$ se skočno spremeni napetost na $L_{DD}$

→ $u_D(s) = \frac{U_D}{s}$ (pretvorimo v Laplaceov prostor) → $\underline{i_D(s) = \frac{\frac{U_D}{s}}{R_D + L_D s}}$

- $S_2$ je ves čas odprt
- pride do pojava čas. konst.: $T_D = \frac{L_D}{R_D}$

$$\underline{i_D = \frac{U_D}{R_D}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_D}}\right)}$$




$$u_g = -G_{gD}\Omega_1 \cdot i_D = -G_{gD}\Omega_1 \frac{U_D}{R_D}\left(1 - e^{-t/T_D}\right) = -E_g$$

- na vzbujalni strani je sedaj stacionarni tok → vzbujalni tok definira vrednost ind. nap., ki je odvisna od $\Phi$
- toka ne moremo večati v neskončnost → gretje žic, nasičenje železa
- če na statorju navitje zamenjamo z magnetom, je vedno prisotna inducirana napetost in je ne moremo ugasniti (z večanjem napetosti (hitrost avtomobila narašča) → preboj na elektroniki)

---

- Stacionarno stanje:

$$\begin{bmatrix} U_D \\ u_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ -G_{gD}\Omega_1 & R_g + L_g p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_D \\ i_g \end{bmatrix}$$

+ vklop $S_2$, stanje na bremenu je: $u_B = (R_B + L_B p)\, i_B$

$\underline{i_g = -i_B}$

$$\begin{bmatrix} [Z_1] & 0 \\ 0 & [Z_2] \end{bmatrix} = \left[Z_{skupna}\right] \Longrightarrow \underline{\begin{bmatrix} U_D \\ u_g \\ u_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_D & 0 & 0 \\ -G_{gD}\Omega_1 & R_g + L_g p & 0 \\ 0 & 0 & R_B + L_B p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_D \\ i_g \\ i_B \end{bmatrix}}$$

uporabimo povezovalno **matriko** (zmanjšamo število spremenljivk)

→ manjše število tokov

$$\begin{bmatrix} I_D \\ i_g \\ i_B \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{[C]} \begin{bmatrix} I_D \\ i_B \end{bmatrix}$$

transformacije z uporabo matrike $[C]$:

- za toke $\rightarrow [i] = [C]\underbrace{[i']}_{\text{preoblikovane veličine}}$
- za napetosti $\rightarrow [u'] = [C]^T [u]$
- za impedance $\rightarrow [z'] = [C]^T [z][C]$

$$\begin{bmatrix} U_D \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_D & 0 \\ G_{gD}\Omega & (R_g+R_B)+(L_g+L_B)p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_D \\ i_B \end{bmatrix}$$

$u_B - u_g = 0$

k upornosti navitja prištejemo upornost bremena

- sledi:

$$E_g = G_{gD}\Omega I_D$$

iščemo $i_B$:

$$E_g + (R_g+R_B) + (L_g+L_B)p \cdot i_B = 0$$

$$i_B = \frac{-E_g}{(R_g+R_B)+(L_g+L_B)p}$$

Laplace T.

- prehodna konstanta $T_g = \dfrac{L_g + L_B}{R_g+R_B}$

$$i_B(t) = \frac{-E_g}{R_g+R_B}\left(1 - e^{-t/T_g}\right)$$

- ustaljeno stanje:

$$I_B = -\frac{E_g}{R_g+R_B}$$

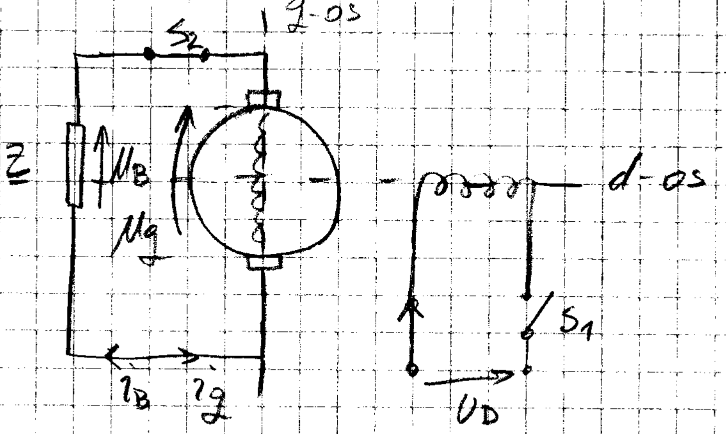
- kratek stik

$$I_g = \frac{-E_g}{R_g}$$

∘ sklenemo oba stikala :

→ spremembe inducirane napetosti → spreminjanje toka

$$i_B(t) = \frac{-E_g}{R_g + R_B}\left(1 - e^{-t/T_D}\right)$$




Vklop $S_1$, pri čemer je $S_2$ že vklopljen, generatorsko je vseskozi gnan

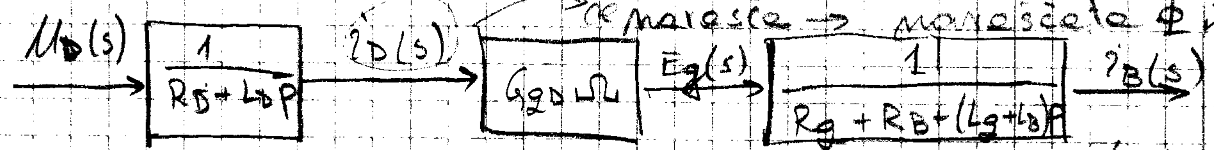
$$\begin{bmatrix} U_D \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_D + L_D p & 0 \\ G_{gD}\Omega & (R_g + R_B) + (L_g + L_B)p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_D \\ i_B \end{bmatrix}$$

∘ kako sta sklopljena vzbujalni in rotorski krog :

$$E_g = -E_{gD}\,\Omega\, i_D$$

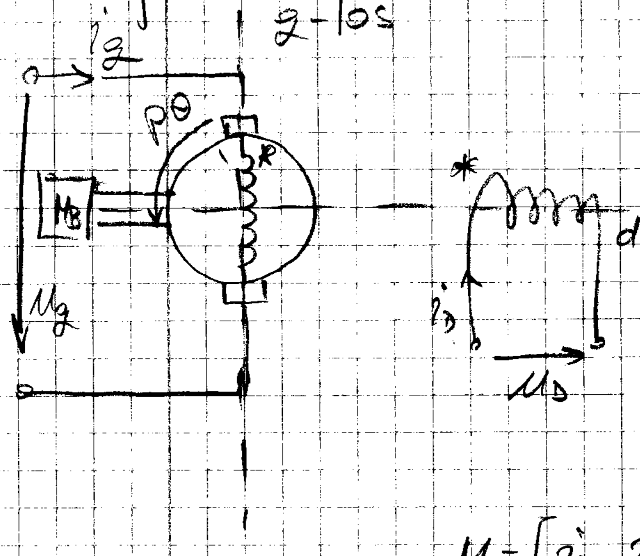
→ Laplace + blokovna shema

je naraščanje → naraščanje $\Phi$ in E




(reševanje → glej knjigo)

# TUJE VZBUJANI ENOSMERNI MOTOR




- napetostna ravnotežna enačba:

$$\begin{bmatrix} u_D \\ u_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_D + L_D p & 0 \\ G_{gD}\dot{\theta} & R_g + L_g p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_D \\ i_g \end{bmatrix}$$

- navorna ravnotežna enačba:

$$M = \begin{bmatrix} i_D & i_g \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ G_{gD} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_D \\ i_g \end{bmatrix} = i_D i_g G_{gD}$$

$$J\ddot{\theta} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{trenje}}}{F\dot{\theta}} \pm M_B = M = G_{gD} i_g i_D$$

- $i_g$ se bo spreminjal eksponentno (ob vklopu enega stikala)
  $\Rightarrow$ tudi navor eksponentno narešča

---

- ustaljeno obratovanje:

$\underbrace{i_D, i_g = \text{konst}}$, $u_D, u_g = \text{konst}$.

- $u_D = U_D$, $u_g = U_g$, $i_g = I_g$, $i_D = I_D$
- $p = \frac{d}{dt} = 0$ (vsi členi, ki vsebujejo $p$)
- $\dot{\theta} = p\theta = \Omega_1 = \text{konst}$.

---

~~v rotorskem tokokrogu:~~

$I_D = \frac{U_D}{R_D}$ ; $I_g \Longrightarrow U_g = G_{gD}\Omega_1 I_D + R_g I_g$

$\uparrow$ $\nearrow$

$*$ $*$ $I_g = \frac{U_g - G_{gD}\Omega_1 I_D}{R_g}$

---

delovanje v stacionarnem stanju (vrtenje)

$$F\Omega_1 \pm M_B = G_{gD} \underset{\substack{\uparrow \\ *}}{I_g} \underset{\substack{\uparrow \\ *}}{I_D}$$

$$\boxed{\Omega_1 = \frac{G_{gD}\frac{U_D}{R_D}\frac{U_g}{R_g}}{F + G_{gD}^2 \frac{U_D}{R_D R_g}} I_D}$$

• kako bi izmerili $G_{gD}$?

$$E = G_{gD}\, \Omega_r I_D$$

---

ZNAČILNA STANJA:

1.) Zagon: (stroj pred tem stoji)

- $\Omega_r = 0$ ; vzbujanje je že aktivno
- $I_g(t=0) \approx \frac{U_g}{R_g}$ → ni protiinducirane napetosti
- razvije zagonski navor:

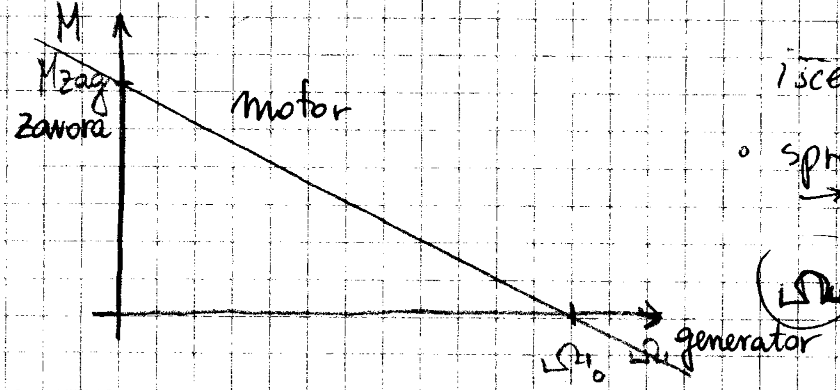
$$\underline{M_{zag}} = G_{gD} I_g I_D = \underline{G_{gD} \frac{U_D}{R_D} \frac{U_g}{R_g}}$$

2.) Prosti tek: (stroj neobremenjen)

- $M_B = 0$
- $I_g = \frac{U_g - G_{gD}\Omega_{r0} I_D}{R_g}$ (ob ženi razlika inducirane in pritisnjene (rotorske) napetosti
- $\Omega_{r0} = \frac{G_{gD}\frac{U_D}{R_D}\frac{U_g}{R_g}}{F + G_{gD}^2 \frac{U_D}{R_D R_g} I_D}$

če ni trenja ⇒ $F = 0$ (linearno povezan s hitrostjo vrtenja)

$$\Longrightarrow \underline{\Omega_{r0} = \frac{U_g}{G_{gD} I_D}}$$




iščemo odvisnost $M_B$ od $\Omega_r$

- sprememba bremena (ustaljeno stanje) → sprememba $\Omega_r$

$$\Omega_r = \frac{G_{gD}\frac{U_D}{R_D}\frac{U_g}{R_g} \pm M_B}{\underset{F=0}{0} + G_{gD}^2 \frac{U_D}{R_D R_g} I_D} =$$

$$= \underbrace{\frac{U_g}{G_{gD} I_D}}_{\Omega_{r0}} \left(1 \pm \frac{M_B}{\underbrace{G_{gD}\frac{U_g}{R_g}\frac{U_D}{R_D}}_{M_{zag}}}\right) =$$

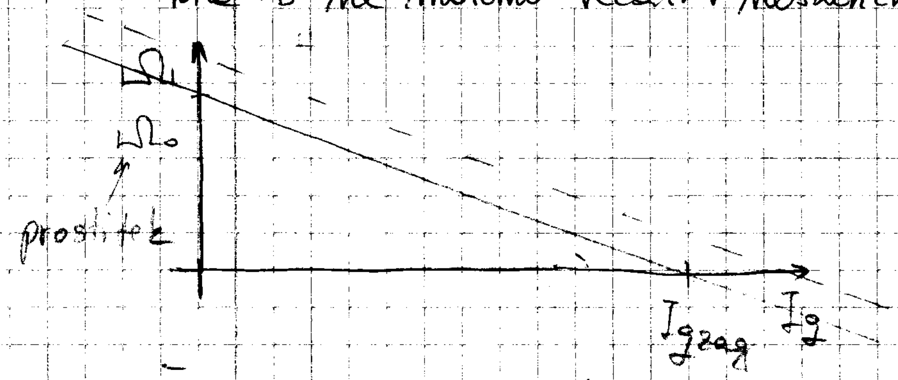
$$= \boxed{\Omega_{r0}\left(1 \pm \frac{M_B}{M_{zag}}\right)}$$

∘ Kako spreminjamo hitrost vrtenja? *

$$U_g = G_{gD} I_D \Omega_1 + I_g R_g$$

$$\Omega_1 = \frac{U_g - I_g R_g}{G_{gD} I_D}$$

toka $I_D$ ne moremo večati v neskončnost → material, itd



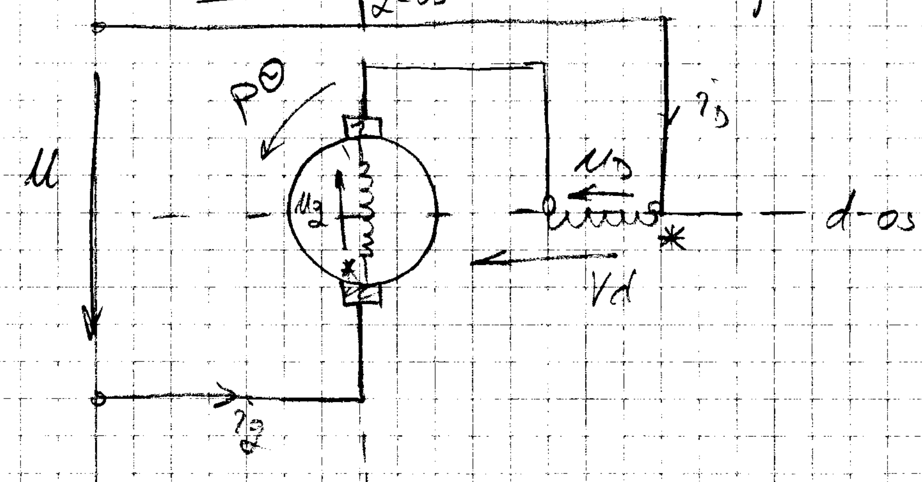

*I) znižamo $I_D$ → slabljenje polja
$I_D < I_{D,N}$ & $U_g = U_{g,N}$

Če ne bi bilo varovalke, bi v prostem teku hitrost zelo narasla

*II. $U_g < U_{g,N}$ zmanjšamo napetost
$U_D = konst = U_{D,N}$

*III. spreminjamo $R_g$ → vključevanje dodatnih bremenskih uporov v rotorski tokokrog ⟹ poslabšamo izkoristek ; (slabe metode)

ENOSMERNI MOTOR Z ZAPOREDNIM (SERIJSKIM) VZBUJANJEM




$$\begin{bmatrix} u_D \\ u_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_D + L_D p & 0 \\ -G_{gD}\dot{\Theta} & R_g + L_g p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_g \end{bmatrix}$$

$$J\ddot{\Theta} + F\dot{\Theta} \pm M_B = -G_{gD}\, i_d\, i_g$$

delovanje v generatorskem režimu → mi obravnavamo motor

$i = i_D;\ i_g = -i$

- povezovalna matrika:

$$\begin{bmatrix} i_D \\ i_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} i \quad , \quad [1, -1] \begin{bmatrix} u_D \\ u_g \end{bmatrix} = u = u_D - u_g$$

$$[C]^T [Z] [C] = [Z']$$

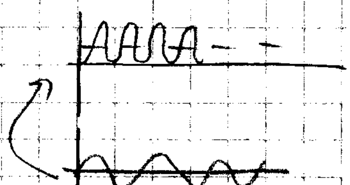
$$[Z'] = [1 \ -1] \begin{bmatrix} R_D + L_D p & 0 \\ -G R_D \dot{\Theta} & R_g + L_g p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = (R_D + R_g) + (L_g + L_d) p + G_{gD} \dot{\Theta}$$

$$u = ((R_D + R_g) + (L_g + L_d) p) i + G_{gD} \dot{\Theta} i$$

$$J \ddot{\Theta} + F \dot{\Theta} + M_B = G_{gD} i^2$$

- Ali se bo stroj vrtel?

Da,



iz izmeničnega napajanja ustvari neko konstantno srednjo vrednost (napetosti)

motor doseže visoke obrate, cenovno ugodno masovno proizvodnja

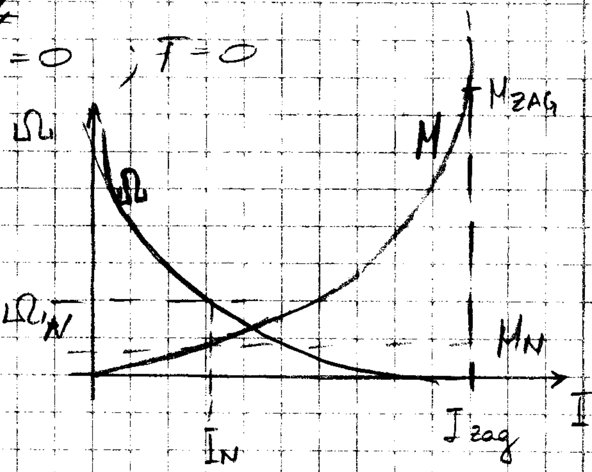
- Ustaljeno delovanje:

$u = U \ , \ i = I \ ; \ \dot{\Theta} = \Omega \ , \ p = 0 \ ; \ F = 0$

$U = (G_{gD} \Omega + R) \cdot I$

$M = G_{gD} I^2$

$$\Omega = \frac{U - RI}{G_{gD} I}$$



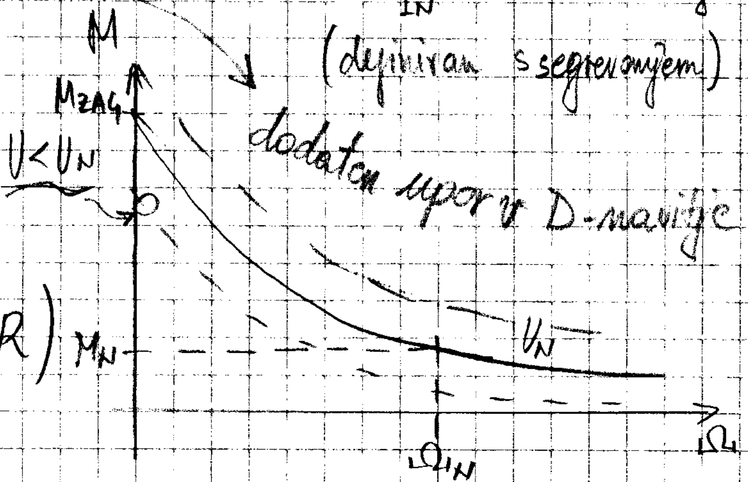

(definiran s segrevanjem)

$\boxed{M(\Omega) = ?}$

$$I = \frac{U}{G_{gD} \Omega + R}$$

$$M = G_{gD} \frac{U^2}{(G_{gD} \Omega + R)^2}$$

$$\Omega = \frac{1}{G_{gD}} \left( U \sqrt{\frac{G_{gD}}{M}} - R \right)$$

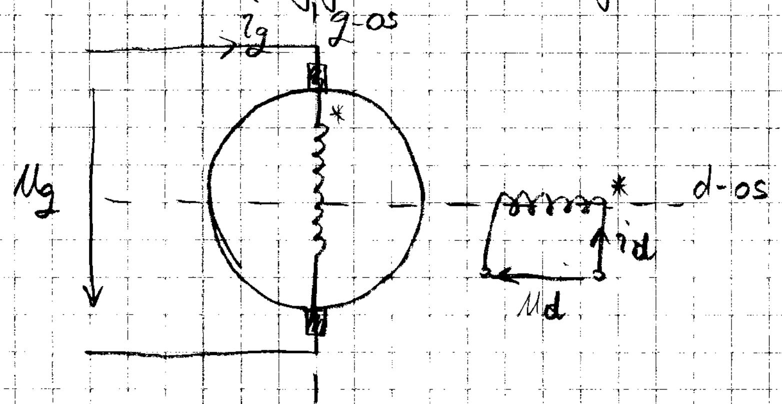


○ Parametri enosmernih strojev za vezno teorijo → knjiga

23.11.2012

ENOFAZNI KOMUTATORSKI STROJI

○ vedno delujejo kot motorji (zaradi načina vezave)




$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_d + L_d p & 0 \\ G_{gd}\dot{\theta} & R_g + L_g p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_g \end{bmatrix}$$

$$M = [i]^T [Z] [i] = \begin{bmatrix} i_d & i_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ G_{gd} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_g \end{bmatrix}$$

~~M =~~

○ ustaljeno stanje

- U in I so iste frekvence (če ne, ni navora)
- $p = j\omega$ (vpeljemo kompl. števila)
- U in I → kompleksorji
- induktivnosti obravnavamo kot reaktance

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + jX_d & 0 \\ G_{gd}\Omega & R_g + jX_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_g \end{bmatrix}$$

→ kompl. št., efektivna vrednost

na podlagi tega člena je zamaknjen $I_d$

→ absolutni eff. vrednosti

$$M = \mathrm{Re}\left[G_{gd} I_d I_g^*\right] = \underline{G_{gd} |I_d| |I_g^*| \cdot \cos \varphi_{dg}}$$

○ med $I_d$ in $I_g$ je nek fazni kot → $\varphi_{dg}$

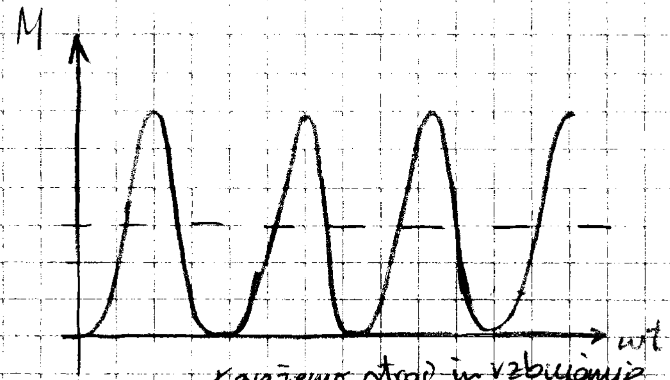
○ ob regulaciji pogona želimo $I_d$ in $I_g$ držati v fazi → največja vrednost $\cos\varphi_{dg}$

$$i_d = \sqrt{2}\, I_d \sin(\omega t + \varphi_d)$$

$$i_g = \sqrt{2}\, I_g \sin(\omega t + \varphi_g)$$

$$M = 2\, G_{gd} I_d \sin(\omega t + \varphi_d) \cdot I_g \sin(\omega t + \varphi_g)$$

$$\underline{M = G_{gd} I_d I_g \cos(\overbrace{\varphi_d - \varphi_g}^{\varphi_{dg}}) - G_{gd} I_d I_g \cos(2\omega t + \varphi_d + \varphi_g)}$$



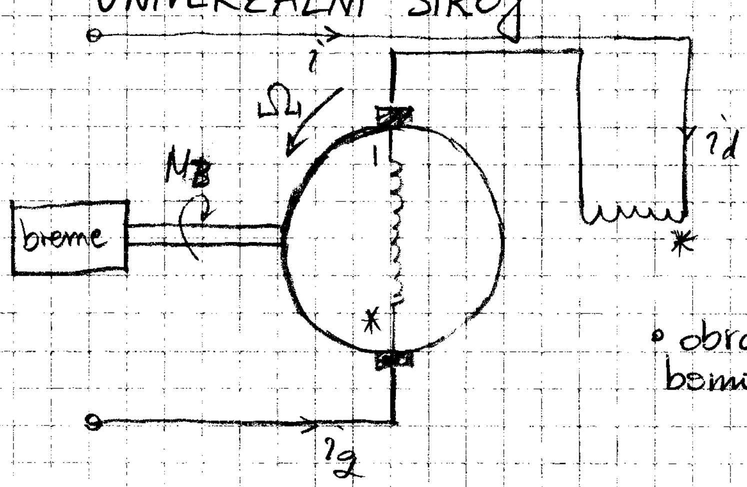

I. predstavlja konstantno vrednost
.. predstavlja nihanje okrog konstantne (srednje) vrednosti

pri $u_{dg} = 0$

~~zvežemo stroj in vzbujanje~~

- serijsko ~~vzbujan stroj~~ → univerzalni motor
(palični mešalnik)

UNIVERZALNI STROJ




- obravnavamo trenutne vrednosti ki jih bomo kasneje preoblekovali v reaktance

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_d + L_d p & 0 \\ -G_{gd}\Omega & R_g + L_g p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_g \end{bmatrix}$$

- izpeljano pri enosmernem serijskem motorju (velja tudi za univerzalni motor)

$$u = (G_{gd}\dot{\Theta} + R + Lp)\, i$$

$$R = R_g + R_d; \quad L = L_d + L_g$$

$$J\ddot{\Theta} + F\dot{\Theta} + M_B = M = G_{gd}\, i^2$$

- ustaljeno stanje

$$U = (G_{gd}\Omega + R + jX)\, I$$

$$I = \frac{U}{G_{gd}\Omega + R + jX} = \frac{U(G_{gd}\Omega + R - jX)}{(G_{gd}\Omega + R)^2 + X^2}$$

- maksimalna vrednost toka je odvisna od neke hitrosti → ko bo člen $G_{gd}\Omega + R = 0 \rightarrow \Omega = -\frac{R}{G_{gd}}$

na X ne moremo vplivati, ker je odvisen od omrežja

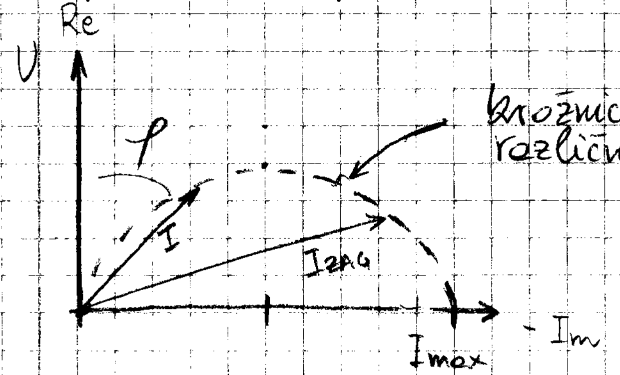
$\boxed{I_{max} = \cancel{\quad} - j\frac{U}{X}}$ → vodilni kazalec

- kakšen je zagonski tok:

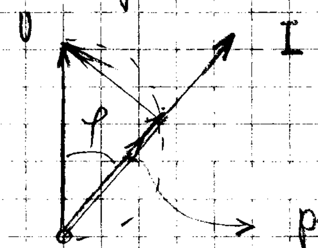
največji je takrat, ko je $\Omega_1 = 0$

$$\boxed{I_{zag} = \frac{U(R-jX)}{R^2+X^2}}$$

- odnos med tokom ~~je~~ in napetosti →
pri različnih hitrostih se spreminja tok
s spremembo napetosti se spremeni tok

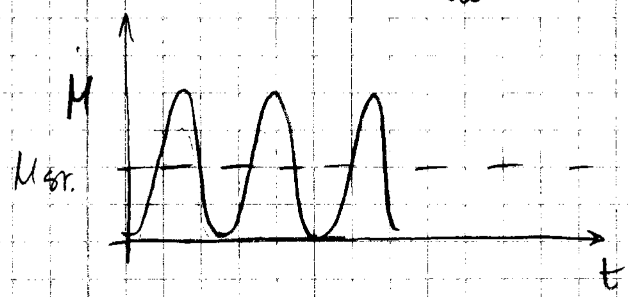



° kazalčni diagram U in I




Na podlagi spl. modela enosmerno napajanega kom. stroja zapišemo enačbo za napajanje univerzalnega motorja.

$$\boxed{M = \underbrace{G_{gd} I_d I_q}_{\text{enosmerni del}} \underbrace{(1-\cos 2\omega t)}_{\text{pulzirajoči del}} = G_{gd} I^2 (1-\cos 2\omega t)}$$




navor pulzira → vpliva na osi ni, ker vztrajnostne mase rotorja zgladijo funkcijo

$$\underline{I} = \frac{U}{G_{dz}\Omega_1 + R + jX}$$

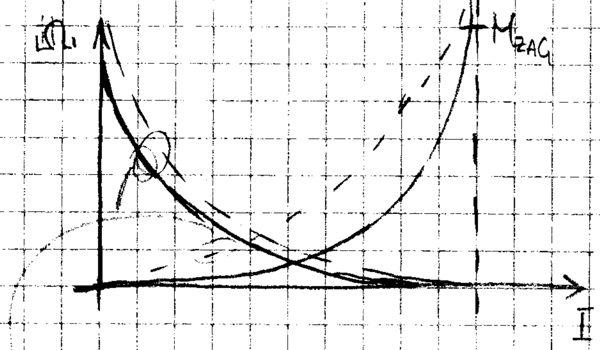
efektivna vrednost

$$\underbrace{I = \frac{U}{\sqrt{(G_{dz}\Omega_1 + R)^2 + X^2}}}$$

- stroj je enofazen; zanima nas tudi faktor delavnosti

$$\underbrace{\cos\varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{G_{dz}\Omega_1 + R}{\sqrt{(G_{dz}\Omega_1 + R)^2 + X^2}}}$$

- navor in vrtilna hitrost v odvisnosti od toka




$U_\sim = U_=$

efektivna vrednost

$M_{zag}$ = večji pri enosmernem napajanju

$I_{zag}$ = —//—

enosmerno napajanje

– zagonski tok: $I_{zag}$ ; $\Omega_1 = 0$

$$\underbrace{(\text{enosm.})\ \frac{U}{R} > \frac{U}{\sqrt{R^2+X^2}}}\ (\text{izm.})$$

– zagonski navor: $\Omega_1 = 0$

$$\underbrace{(\text{enosm.})\ \frac{G_{dz}U^2}{R^2} > \frac{G_{dz}U^2}{R^2+X^2}}\ (\text{izm.})$$

# TRANSFORMACIJE osnovnega modela

30.11.2012

cilj: 3f stroje preoblikujemo v vezne modele, podobne
(večfazne)
enosmernim strojem.

$$[u] = [z][i]$$

$$\sum W_{zunanji} = \frac{1}{2}[i]^T[z][i]$$ ; tok je neznanka, $[U]$ in $[Z]$ znani.

$$[i] = [z]^{-1}[u]$$

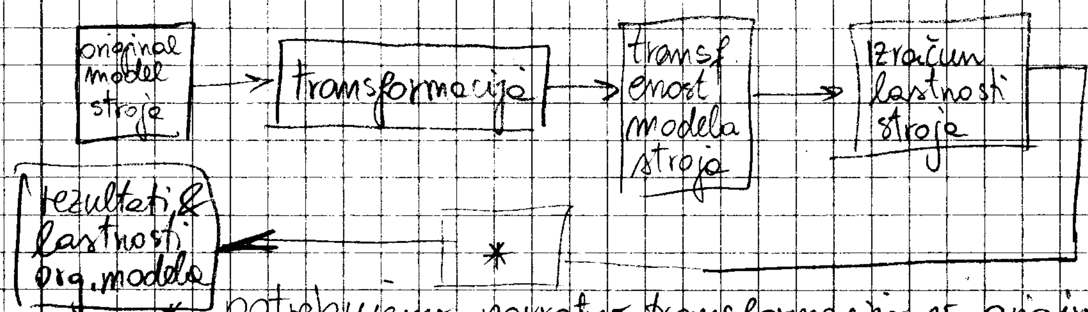
└ problem določanja inv. matrike

induktivnosti so lahko odvisne od časa in kota: $L(t)$, $L(\theta)$

$\frac{dL}{d\theta}$ ali $\frac{dL}{dt}$ $\Longrightarrow$ pridemo do sistema D.E., zadeve je otežena za obravnavanje

problem določanja parametrov matrike $[z]$

- stroj z izraženimi poli + dušilna kletka → ni dostopa do kletke, nemogoče meriti




* potrebujemo povratno transformacijo v originalni model

- Ena od zahtev: pri transformaciji se mora ohraniti moč

$$p = [i^*]^T[u] = [i'^*]^T[u'] = p'$$

$$[i'] = [C_i]^{-1}[i]$$

└ → poljubna matrika (govorimo na splošno)

$$[i] = [C_i][i']$$

$$[i'^*]^T[u'] = [i^*]^T[u] = \left[[C_i][i']\right]^{*T}[u] =$$

$= [i^*]^T [c_i^*]^T [u]$

pravilo z matrikami: $\left([A][B]\right)^T = [B]^T [A]^T$

$[u'] = [c_i^*]^T [u]$

---

$[u'] = [z'][i']$ $\qquad$ $[u] = [z][i]$

$[c_i^*]^T [u] = [c_i^*]^T [z][i] = [c_i^*]^T [z] [c_i] [i'] = [z'][i']$

$[z']$ dobimo preko trojnega matričnega produkta

$[z'] = [c_i^*]^T [z] [c_i]$

---

- transformacije navorne enačbe

$$\boxed{M = \frac{1}{2} [i] \left[\frac{d}{dt} [L]\right] [i]}$$

zamenjamo z $d\theta$ → induktivnosti so povezane z rotom gibanja

$[c_i^*]^T [c_i] = 1$

$$M = \frac{1}{2} [i']^T [c_i]^T \left\{\frac{d}{d\theta} \left(\underbrace{[c_i] \cdot [L'] \cdot [c_i^*]^T}_{[L]}\right)\right\} [c_i][i'] =$$

$$= \frac{1}{2} [i']^T [c_i]^T \frac{d}{d\theta} [c_i] \cdot [L'] [i'] + \frac{1}{2} [i']^T \frac{d[L']}{d\theta} [i]$$

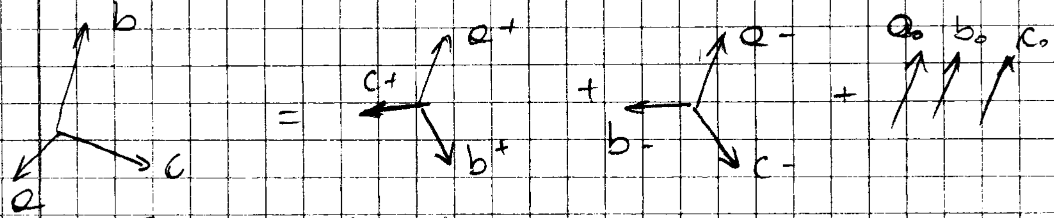
$[c_i]$ more biti neodvisna $\theta$ $\qquad$ torej del $= 0$ $\qquad$ preko ohranitve moči

$$\boxed{M' = \frac{1}{2} [i']^T \frac{d[L']}{d\theta} [i']}$$

- oblika se ohranja.

- zaporedje transformacij: enake ne samo el. sistema lahko pričakujemo, da je potrebno opraviti več transformacij

3f nesimetrične → 3f simetrične ; 2f sim → dvoosne transformacija 3f sistema s simetričnimi komponentami




$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_+ \\ i_- \end{bmatrix}$$

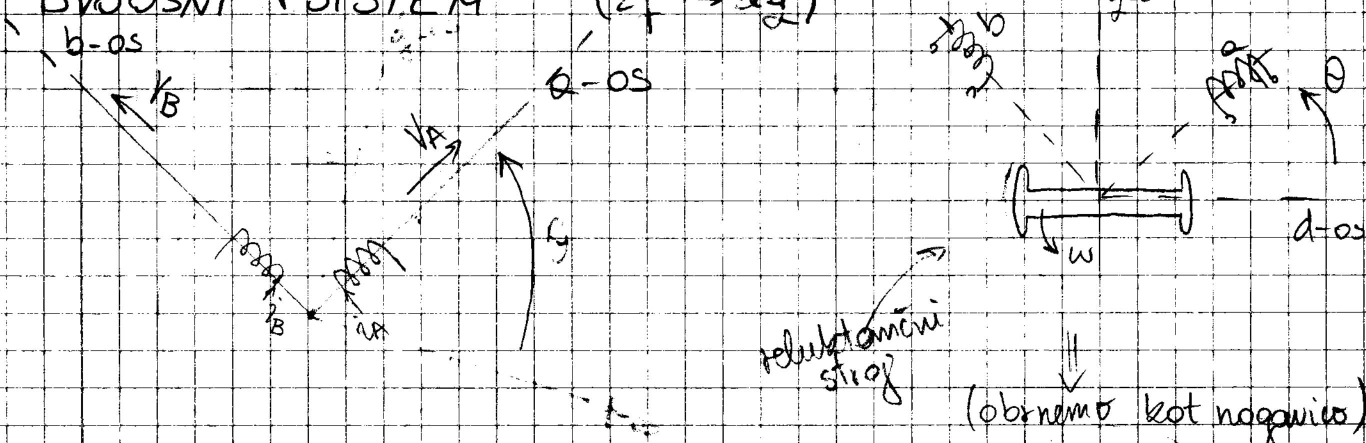
$$a = e^{j120^\circ}$$

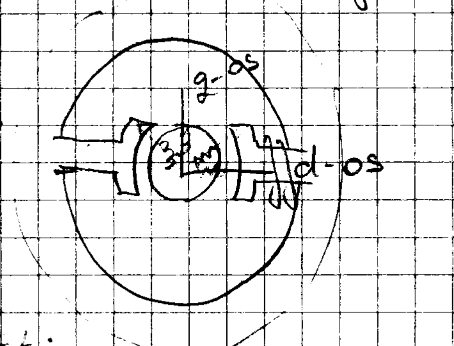
$$a^2 = e^{-j120^\circ} = e^{j240^\circ}$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_+ \\ i_- \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

V primeru, da je stroj nesimetrično grajen ali nesimetrično napajan, uporabimo najprej d/q transformacijo. Iz tem pa izračunamo še ostale transformacije.

TRANSFORMACIJA PROSTORSKIH KOORDINAT IZ DVOFAZNEGA V DVOOSNI SISTEM (2f → dq)




Če se rotor vrti z neko hitrostjo, se $\Theta$ spreminja

$i_A N_A = V_A$ → učinek v d in q osi

$i_B N_B = V_B$ → ...

– projeciramo toka:

$V_d = V_A \cos\Theta - V_B \sin\Theta$

$V_q = V_A \sin\Theta + V_B \cos\Theta$

(če vrtimo fiksiramo koje v ...)

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \end{bmatrix} \qquad [V_{dq}] = [P]^T [V_{ab}]$$

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \Rightarrow [V_{ab}] = [P][V_{dq}]$$

- Je velja:

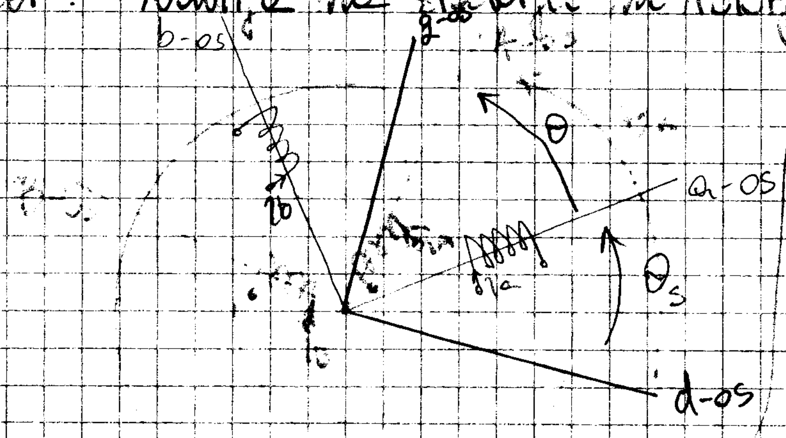
$N_A = N_B = N_d = N_q = N$ ([illegible])

- [illegible] tr.:

[illegible] za [illegible] in napetosti

---

- Primer: Navitje na statorju in rotorju.




uporabimo pri komutatorskem stroju:
- rotor more biti grajen fazno simetrično
- stator je lahko nesimetrično grajen in ima lahko izražene pole

- Možnosti postavitve k.s. za stator in rotor

1.) [illegible] k.s. $dq$ [illegible] kot statorski → α-β

$\theta_s = 0$ — statorskih količin ni potrebno transformirati

$\theta_R = \theta$

hitrost vrtenja: $\omega = \dot{\theta}$

---

2.) $Dq$ [illegible] kot rotorski + B

"obesimo" se na rotor → tistih količin ni potrebno transformirati

- rotorskih količin [illegible] transformirati

$\theta_R = 0$, $\theta_s = \theta$, $\dot{\theta}_s = \dot{\theta}$

uporabimo pri sinhronskih strojih → pogoj: stator je simetrično grajen

lahko ima izražene pole na rotorju; na rotorju ima lahko vzbujanje in dušilne kletke

3.) Koor. $dq$ naj se vrti s sinhronsko hitrostjo $\omega$ (v eno ali v drugo smer)

- transformiramo rotorske in statorske veličine

$\Theta_s = \pm \omega t + \Theta_{s0}$ → statorski začetni kot, kot zadevo začnemo upravnavati

$\Theta_r = \pm \omega t + \Theta + \Theta_{r0}$

Uporabimo pri Asinhronskih strojih
- simetrična gradnja rotorja in statorja (večfazno navitje → simetrično razporejeno po prostoru)
- $dq$ se vrti v z vrtilnim mag. poljem.

Za različne tipe strojev uporabimo različne transformacije.

---

$u_a = \sqrt{2}\, U \cos(\omega t)$

$u_b = \sqrt{2}\, U \sin(\omega t)$

- po velikosti sta enaki, fazi sta zamaknjeni za $90°$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Theta & -\sin\Theta \\ \sin\Theta & \cos\Theta \end{bmatrix} \sqrt{2}\, U \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \end{bmatrix} = \sqrt{2}\, U \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \Theta) \\ \sin(\omega t + \Theta) \end{bmatrix}$$

- $u_d$ in $u_q$ sta zamaknjeni za $90°$.

Koor. $dq$ sistem se vrti proti statorskemu s kotno hitrostjo $\dot{\Theta}$ →

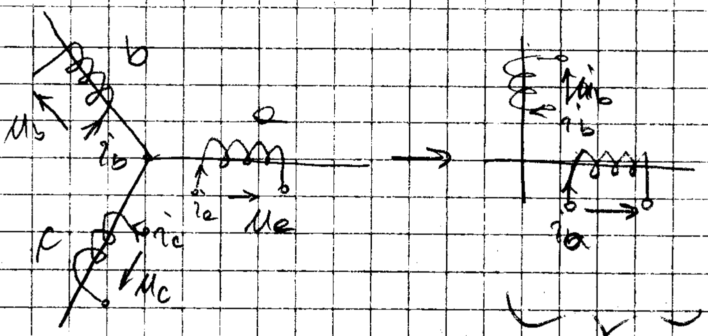
$\Theta = \dot{\Theta} t + \Theta_0$
(začetni kot)

$$u_d = \sqrt{2}\, U \cos(\omega t + \dot{\Theta} t + \Theta_0) = \sqrt{2}\, U \cos((\omega + \dot{\Theta}) t + \Theta_0)$$

$$\omega_{dq} = \omega + \dot{\Theta}$$

- frekvenca novih transformiranih napetosti je odvisna od vrtenja ($\omega$) frekvence prvotnih izm. napetosti in vrtenja k.s.

# $3f \rightarrow 2f \rightarrow dq$ (transformacije)




pravokotno → da ni sprege med njimi

- trifazni sistem → simetrične komponente

$$[i_{abc}] = [S_3][i_{0+-}]$$

- simetrične komponente → dvofazni sistem

$$[i_{0+-}] = [S_{02}^*]^T [i_{0\alpha\beta}]$$

- V primeru simetrije 3f sistema in stroja:

$$[i_{abc}] = [S_{02}^*]^T [i_{0\alpha\beta}]$$

- dvofazni sistem → zavrten dvofazni sistem

$$[i_{0\alpha\beta}] = [P][i_{0dq}]$$

$$[i_{abc}] = \underbrace{[S_3][S_{02}^*]^T [P]}_{[F_\theta]}[i_{0dq}]$$

$[F_\theta]$ → matrika namesto mnogih transformacij

$$[F_\theta] = \frac{1}{\sqrt{3}}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} \sqrt{2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & j \\ 0 & 1 & -j \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$[F_\theta] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\theta & \sin\theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta+\frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta+\frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta+\frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$i_{abc}$ … $i_{0dq}$

npr.: $\theta = 0$ → dvofazni sistem ni zavrten in miruje v prostoru in prati trifaznemu npr.: $\Theta = 0$

$$[i_{abc}] = [F_\Theta][i_{odq}]$$

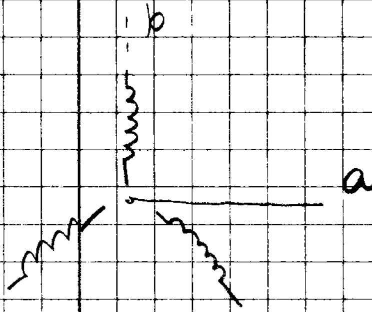
$$[i_{odq}] = [F_\Theta]^{-1}[i_{abc}]$$

$$[C]^{-1} = [C^*]^T$$

- toki, ki se v času spreminjajo
- če želimo, da so enosmerni, se mora K.S. vrteti in sicer kot:

$\Theta t = \omega t$ ⟹ dobimo enosmerne komponente (vrteti se mora s sinhrono hitrostjo)

14. 12. 2012




$3f \rightarrow 2f$

1.) (izmenični) sinhronski stroj

- rotor → sinhrono vrtenje

električna hitr./frek.

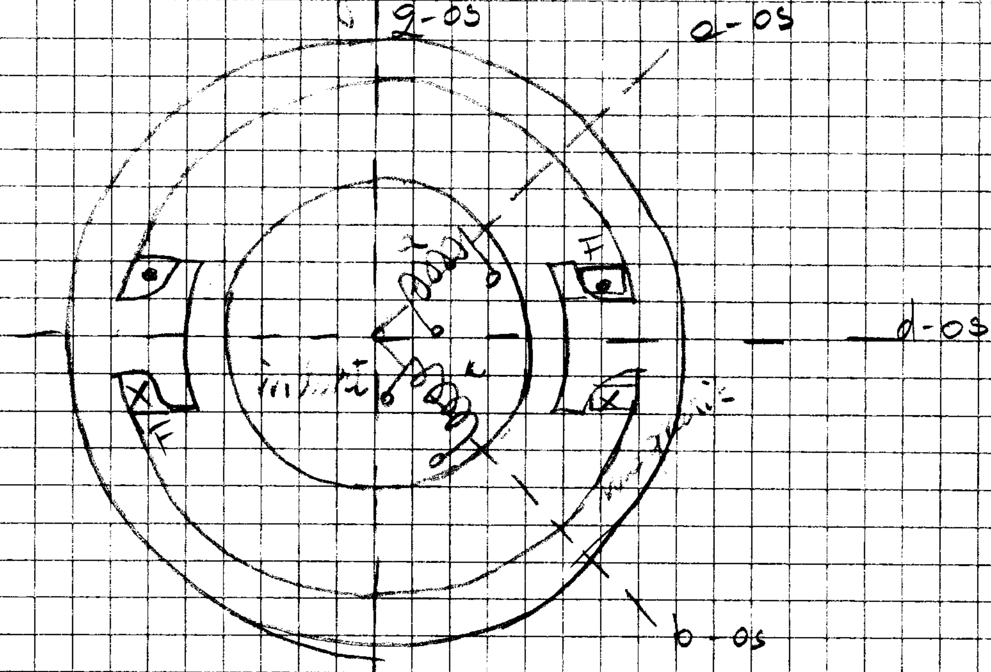
- $\Omega_m = 2\pi n = 2\pi \frac{f}{p_p} = \frac{\omega}{p_p}$ ; $p_p = 1 \rightarrow \Omega_m = \omega$

mehanska frekvenca/hitrost — $p_p$: polovi pari

- induktor → stator
  → uporabimo $d$-$q$ transformacijo → mogoče nalitk
- magnetilo → rotor
  → enosmerni magnet ali trajni magnet
  - posebna oblika električnih magnet izraženo pol → električni rotor

OSNOVNI DVOFAZNI MODEL SINH. STROJA S TREMI NAVITJI

(stroj cons... kot "magnitoe")




$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [illegible] & [illegible] & p\,L_{aF} \\ [illegible] & [illegible] & p\,L_{bF} \\ p\,L_{Fa} & p\,L_{Fb} & i_F + p\,L_F \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_F \end{bmatrix}$$

s položajem se spreminjajo medsebojne induktivnosti ...

→ Vpliv izraženosti na induktivnost ...

vzbujanje navitja "a": $V_a = N_a \cdot i_a$

$V_{ad} = N_a \cdot i_a \cdot \cos\Theta = V_a \cos\Theta$

Vpliv navitja "a" ...

projekcija

$V_{aq} = N_a i_a \cdot \sin\Theta = V_a \sin\Theta$

- tuljava "a" ima 2 dva magnetna poti: ...

⟹ ... $L_a$ in ... → ...

...

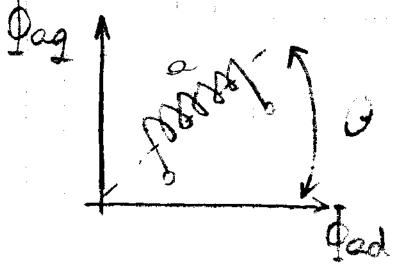
$\Phi = \Lambda \cdot V$

$\Phi_{ad} = (\Lambda_d + \Lambda_{a\sigma}) \cdot V_{ad} = (\Lambda_d + \Lambda_{a\sigma})\, i_a N_a \cos\Theta$

- fluks se ne bo v osi zaključeval preko magnetika; [illegible]

$\Phi_{aq} = (\Lambda_q + \Lambda_{a\sigma}) V_{aq} = (\Lambda_q + \Lambda_{a\sigma})\, i_a N_a \sin\Theta$

- kako ga povežemo z magnetnim sklepom (potrebujemo za izračun induktivnosti)?




$L = \frac{N\Phi}{i} = \frac{\Psi}{i}$

gledamo projekcijo pretoka skozi tuljavo "a":

$\Phi_{ad} \cdot N_a \cos\Theta = \Psi_{ad}$

$\Psi_{ad} = (\Lambda_d + \Lambda_{a\sigma})\, i_a N_a^2 \cos^2\Theta$

$\Phi_{aq} \cdot N_a \sin\Theta = \Psi_{aq}$

$\Psi_{aq} = (\Lambda_q + \Lambda_{a\sigma})\, i_a N_a^2 \sin^2\Theta$

izračunamo induktivnost faze "a" v odvisnosti od obeh magnetnih poti.

$L_a' = \frac{\Psi_{ad}}{i_a} = (\Lambda_d + \Lambda_{a\sigma}) N_a^2 \cos^2\Theta$ ... induktivnost v d smeri

$L_a = \frac{\Psi_{ad}+\Psi_{aq}}{i_a} = \underbrace{(\Lambda_d+\Lambda_{a\sigma})N_a^2}_{L_d}\cos^2\Theta + \underbrace{(\Lambda_q+\Lambda_{a\sigma})N_a^2}_{L_q}\sin^2\Theta$ ... celotna ind. tuljave "a"

$L_a = L_d \cos^2\Theta + L_q \sin^2\Theta$

- preoblikujemo s trigonometričnimi pravili:

$L_a = \frac{L_d+L_q}{2} + \frac{L_d-L_q}{2}\cos(2\Theta)$

$\boxed{L_a = L_{a0} + L_{a\Theta}\cos(2\Theta)}$ ... $L_{a0}$ ... konst.
... $L_{a\Theta}$ ... odvisen od $\Theta$

⟹ faze b:

- zamik: $\frac{\pi}{2}$ : $\theta \rightarrow \frac{\pi}{2} - \theta$

- v primeru 3-h faz, bi bili zamiki za 120°

$$L_b = L_d \cos^2\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) + L_q \sin^2\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$

$$L_b = \frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} \cos(2\theta)$$

$$L_b = L_{b0} - L_{b\theta} \cos(2\theta)$$

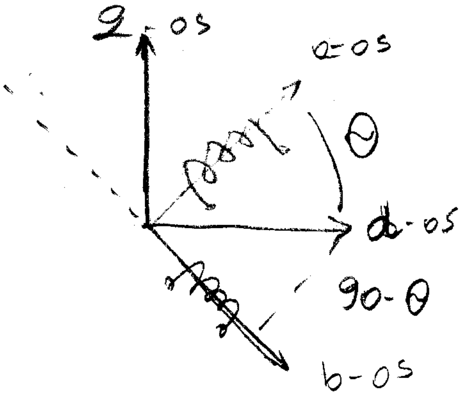
- kako bi dobili $L_d$ in $L_q$?

obrnemo induct → os "q" in poravnamo z osjo "d"

→ Simetrično navitje:

$L_{a0} = L_{b0}$

$L_{a\theta} = L_{b\theta}$




$$\Phi_{ad} = (\Lambda_d + \Lambda_\sigma)\, i_a N_a \cos\theta$$

$$\Phi_{aq} = (\Lambda_q + \Lambda_\sigma)\, i_a N_a \sin\theta$$

$$\Psi_{ba} = \Phi_{ad} N_b \sin\theta - \Phi_{aq} N_b \cos\theta$$

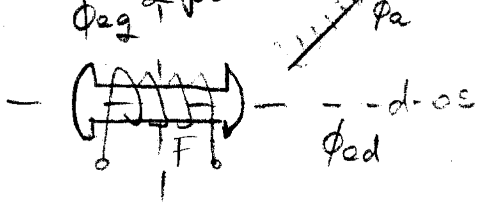
$$L_{ab} = \frac{\Psi_{ba}}{i_a}$$

- končne enačbe (vstavimo ...):

$$L_{ab} = L_d \cos\theta \sin\theta - L_q \sin\theta \cos\theta = \frac{L_d - L_q}{2} \sin(2\theta)$$

$$L_{ab} = L_{a\theta} \sin(2\theta)$$ (velja le za izraženost; drugače = 0)

→ medsebojna induktivnost $L_{aF}$




$\Phi_a$ razstavimo na $\Phi_{ad}$ in $\Phi_{aq}$

- Zanima nas le pretok, ki se sklepa s F tuljavo.

$$\Phi_{ad} = \Lambda_d N_a \cdot i_a \cos\Theta$$

$$L_{aF} = \frac{\Phi_{aF}}{i_a} = \frac{N_F \cdot N_a \cancel{i_a} \cos\Theta \cdot \Lambda_d}{\cancel{i_a}}$$

zaobjamemo $\Phi_{ad}$

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \Lambda N^2$$

$$\Longrightarrow \quad L_{aF} = L_{dF} \cos\Theta$$

$$L_{bF} = L_{dF} \sin\Theta \qquad \Theta \rightarrow \frac{\pi}{2} - \Theta$$

(pri enosm. stroju → d-os za induciranje vzbujalnega polja
q-os za navor)

gibanje fiksirano z projekcijo

Z vstavljanjem induktivnosti v napetostne enačbe dobimo:

$$1.) \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + p[L_d \cos^2\Theta + L_q \sin^2\Theta] & p\overbrace{[L_d \cos\Theta\sin\Theta - L_q \sin\Theta\cos\Theta]}^{L_{ab}} & p\overbrace{[L_{dF} \cos\Theta]}^{L_{aF}} \\ & & \\ & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_F \end{bmatrix}$$

1.) ... vsi členi so odvisni od kota.

- te nap. enačbe opisujejo obnašanje stroja v pripadajočih naravnih koordinatah.

TRANSFORMACIJA (2-f naravne → dvoosni model)

$$[i_{dqF}] = [P]^T [i_{abF}]$$

$$[u_{dqF}] = [P]^T [u_{abF}]$$

$$[Z_{dqF}] = [P]^T [Z_{abF}] [P]$$

Iščemo transformacijsko matriko $[P]$

$[u_{dqF}] = [Z_{dqF}][i_{dqF}]$

- upoštevamo projiciranje tok. na d in q-osi.

$$[P_r] = [P_r]^T = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ \sin\theta & -\cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- navorna os S.S. je vezana na bolj magnetno os rotorja

$$p(L\cos\theta \cdot i) = L\frac{d\cos\theta}{dt}\cdot i + L\cos\theta\frac{di}{dt}$$

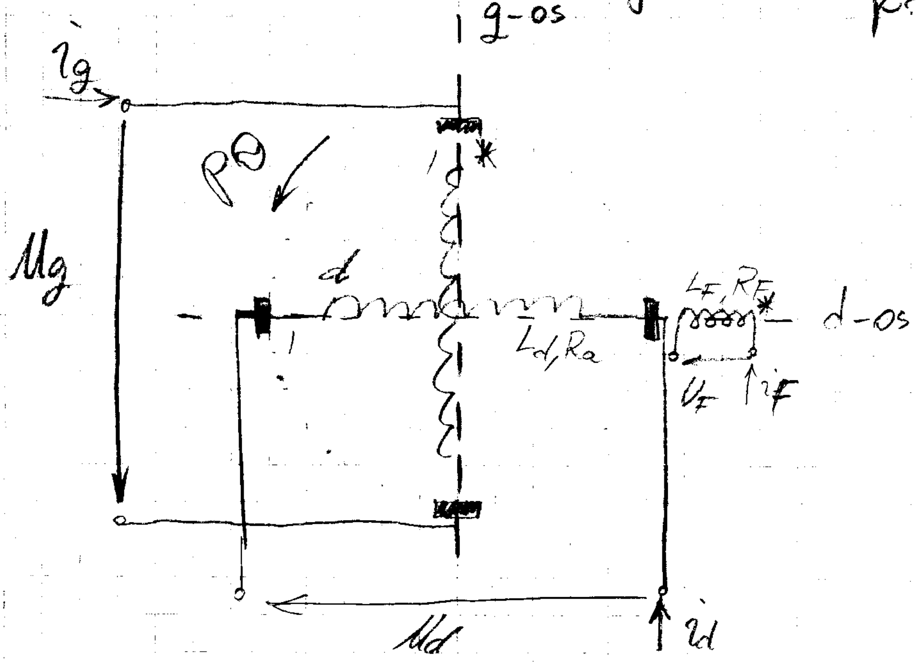
analiza operatorja $p$ na vpliv $L$ in $i$

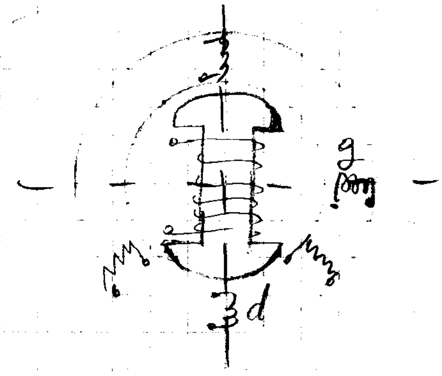
- operacijo odvajanja moramo upoštevati pri obeh veličinah → s časom se spreminja kot $\theta$, tudi $i$ se s časom spreminja, ker je izmenični
- z upoštevanjem pravil odvajanja in matričnega množenja dobimo transformiramo impedančno matriko:

$$[Z_{dqF}] = \begin{bmatrix} R_a + L_d p & L_q p & L_{dF}\, p \\ -L_d\dot{\theta} & R_a + L_q p & -L_{dF}\dot{\theta} \\ L_{dF} & 0 & R_F + L_F p \end{bmatrix}$$

opis S.S. z izraženimi poli; $\dot{\theta}$ je skrito gibanje ⇒ navor

- nadaljujemo z matriko od prejšnjič.
- matriko narišemo v obliki vezja → stroj z izraženimi poli

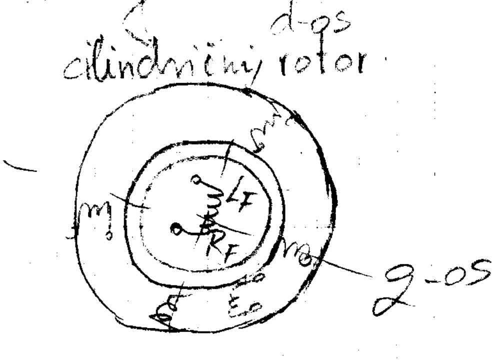



- Kje je v matriki razvidno, da gre za polariziran stroj - stroj z izraženimi poli:

→ za cilindrični rotor:
mag. prevodnost je: $\Lambda_d = \Lambda_g = \Lambda_a = \Lambda_b \Rightarrow L_d = L_g$ →
ni izraženosti, ni medsebojne induktivnosti med a in b →
zamaknjeni sta za 90° → križa ostaja enaka
zapisano v matriki 2, 3 strani nazaj

$$[Z_{dgF}] = \begin{bmatrix} R_a + L_d p & 0 & L_{dF} p \\ 0 & R_a + L_d p & L_{dF} p \\ L_{dF} p & 0 & R_F + L_F p \end{bmatrix}$$




- v stacionarnem stanju členi s p odpadejo
- členi povezani s Θ so "odgovorni" za ustvarjanje navora
ustvarjata se reluktančni in sinhronski navor.
cilindrični ustvarja le sinhronski navor

## NAVOR V USTALJENEM STANJU

- potrebujemo enačbo, ki povezuje navore, toke, napetosti in induktivnosti

### SIMETRIČEN DVOFAZNI SISTEM

- imamo 2 napetosti

$u_a = \sqrt{2}\, U \sin(\omega t)$

$u_b = \sqrt{2}\, U \cos(\omega t)$

- dvofazni model sinhr. stroja s transformacijami:

$\Theta = \omega t + \delta$ in $\dot{\Theta} = \omega$

; vrtilni kot se veča, ob obremenitvi se pojavi še kolesni kot, ki se prišteje obstoječemu kotu

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_F \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Theta & \sin\Theta & 0 \\ \sin\Theta & -\cos\Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{2}\, U \sin(\omega t) \\ \sqrt{2}\, U \cos(\omega t) \\ U_F \end{bmatrix} =$$

stacionarno stanje

se ne transformira

$$= \begin{bmatrix} -\sqrt{2}\, U \sin\delta \\ +\sqrt{2}\, U \cos\delta \\ U_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + L_d p & L_q \dot{\Theta} & L_{dF} p \\ -L_d \dot{\Theta} & R_a + L_q p & -L_{dF} \cdot \dot{\Theta} \\ L_{dF} p & 0 & R_F + L_F p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_d \\ \hat{I}_q \\ I_F \end{bmatrix}$$

amplitudni vrednosti

že enosmerni

- stacionarno stanje → členi s "p" postanejo enaki 0.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & L_q \dot{\Theta} & 0 \\ -L_d \dot{\Theta} & R_a & -L_{dF} \dot{\Theta} \\ 0 & 0 & R_F \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_d \\ \hat{I}_q \\ I_F \end{bmatrix}}$$

$\Downarrow$

preko te matrike lahko izračunamo tok.

- dobimo:

$$I_F = \frac{U_F}{R_F}$$

$$* \quad \hat{I}_d = \frac{-\sqrt{2}U\cos\delta - L_{dF}\dot{\Theta} I_F}{L_d\dot{\Theta}}$$

$$\left.\begin{matrix}\hat{I}_d \\ \hat{I}_q\end{matrix}\right\} \Rightarrow R_a = 0 \Longrightarrow \hat{I}_q = -\frac{\sqrt{2}U\sin\delta}{L_q\dot{\Theta}}$$

kolesni kot = 0 $\Longrightarrow$ prosti tek, rotor in polje sta poravnana

* če želimo spreminjati tok, spreminjamo vzbujanje

Ali lahko na magnetno komponento toka vplivamo, če imamo stroj s trajnimi magneti?

Lahko regulirani s statorske strani in tako vplivamo na razmere v rotorju

- matrični produkt za izračun navora sinhronskega stroja:

$$M = [i]_T [G][i]$$ ; uporabimo to enačbo, ker gre pri s.s. za komutatorski model

$\downarrow$

matrika koeficientov, vezanih na inducirane napetosti, ki so povezane z vrtenjem

- za s.s. velja:

$$M = [I_d \;\; I_q \;\; I_F] \begin{bmatrix} 0 & L_d & 0 \\ -L_d & 0 & -L_{dF} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_d \\ \hat{I}_q \\ I_F \end{bmatrix}$$

$$M = L_q \hat{I}_d \hat{I}_q - L_d \hat{I}_q \hat{I}_d - \hat{I}_q L_{dF} I_F = \underbrace{(L_q - L_d)\hat{I}_d \hat{I}_q}_{\text{reluktančni del navora}} \underbrace{- L_{dF}\hat{I}_q I_F}_{\text{vzbujalni del navora}}$$

- pri cilindričnem rotorju vzbujamo s tokom $I_F$ (z navitjem rotorja)

- V zg. enačbo vstavimo enačbe za toke $I_d$, $I_q$, $I_F$ in po preureditvi dobimo:

$$M = \underbrace{\frac{\sqrt{2}\, U L_{dF} \dot{\Theta} I_F \sin\vartheta}{L_d \dot{\Theta}^2}}_{\text{vzb. del}} - \underbrace{\frac{(\sqrt{2}\, U)^2 \sin 2\vartheta}{2\dot{\Theta}^2}\left(\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d}\right)}_{\text{reluktančni del}}$$

ne pokrajšamo zaradi stacionarnega stanja

Upeljemo vzdolžni reaktanci

$X_d = \omega L_d = \dot{\Theta} L_d$

$X_q = \omega L_q = \dot{\Theta} L_q$

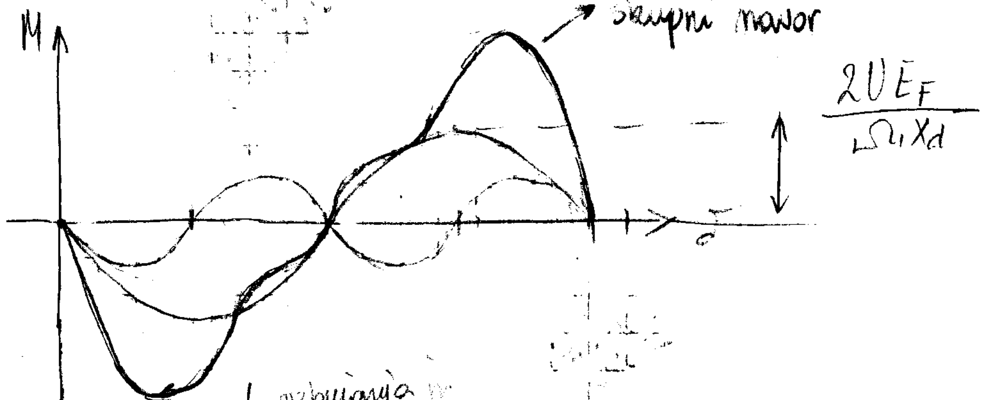
---

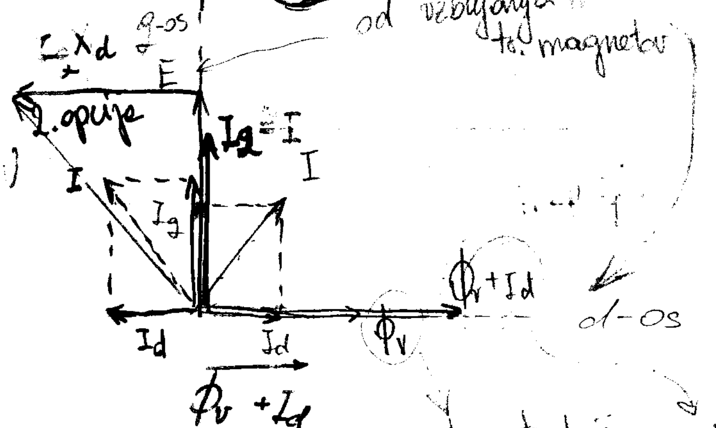
$\sqrt{2}\, E_F = -L_{dF}\, \dot{\Theta}\, I_F$

$$M = -\frac{2 U E_f \sin(\overbrace{\vartheta_{geo} \cdot p_p}^{\vartheta})}{\Omega_1 X_d} - U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \cdot \sin 2(\overbrace{p_p \vartheta_{geo}}^{\vartheta})$$

$\Omega_1 = \omega$ pri $p_p = 1$

$E_F$ je ind. nap. na statorju (inducira se zaradi trajnih magnetov)




Kakšen tok moramo vsiljevati, da bo navor maksimalen in da še ne bo nasičenja?

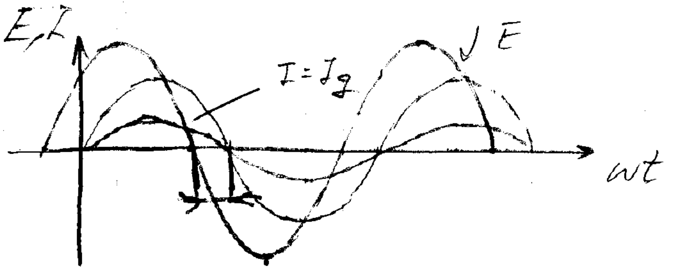
- $I_q$ je omejen z izgubami v navitju, potem nap. na prečni induktivnosti
- potem moramo inducirano napetost

konstrukcije se poveča → nasičenje

Vsiljujemo tok, ki bo v fazi z inducirano napetostjo za stroj s cilindričnim rotorjem oz. s trajnimi magneti na površju

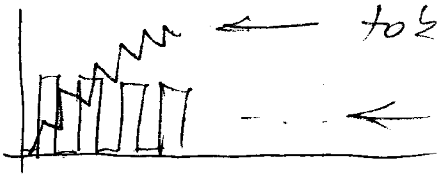
Vsiljen tok je sofazen z inv. napetostjo

$I = I_g$




Poznati moramo lego rotorja (da vemo kdaj gre skozi 0; začetni kot)

tok je nazobčen zaradi [illegible] modulacije napetosti




vsiljujemo tok, magnetne razmere se ne spremenijo → povzeto iz enosmernih strojev.

---

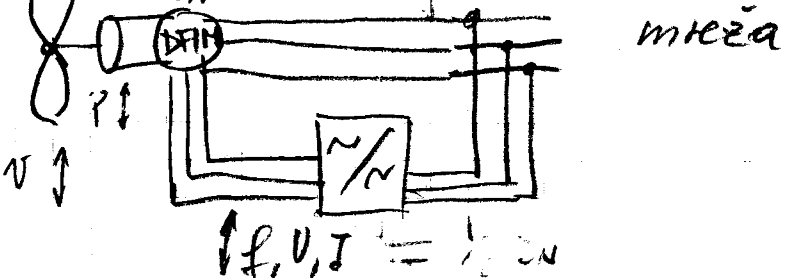
# ASINHRONSKI STROJ

11. 1. 2013

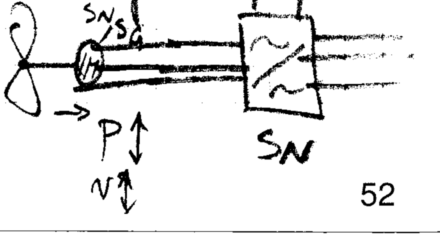
- stator → 3-f navitje, simetrično (nesimetrične povzročijo vrtilno polje v nasprotni smeri → izgube)
  - 2-f //
  - 2-f, nesimetrično ([illegible] št. ovojev, tanjše žice → [illegible] upornost.)
  - 1-f ([illegible] navora, [illegible] rotor v statorju (z [illegible] poli))
- rotor → simetrična kratkostična kletka ([illegible])
  - simetrično 3-f navitje ([illegible] z opremljanjem navorne karakteristike)

→ dvojno napajan AS (vetrnice, črpalke) [illegible] pretvornika

Statorski del je povezan na omrežje [illegible] pretvornik




enojno napajan AS:

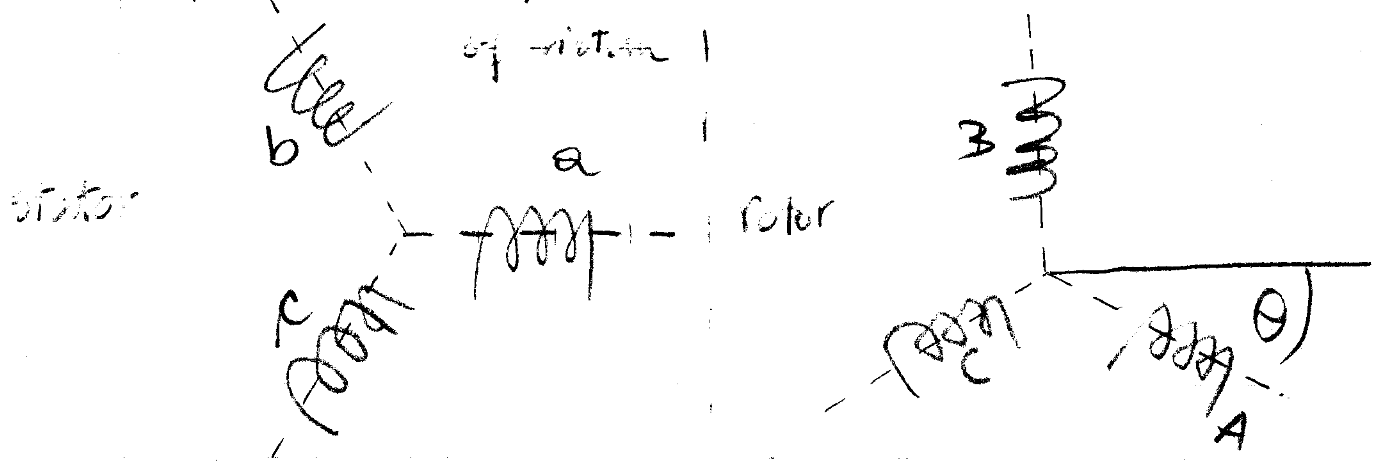


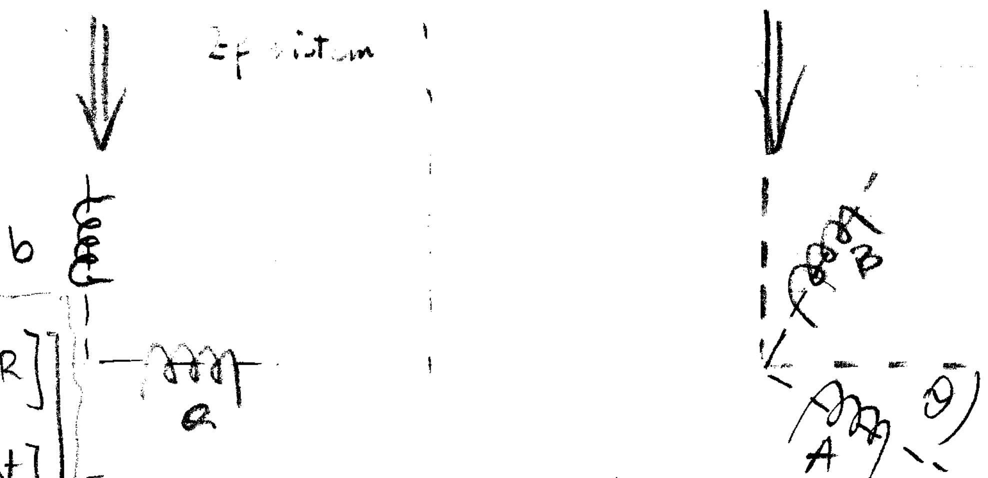
## - model AS stroja

- privzamemo, da so rotorske veličine reducirane na statorsko stran.
- uporabimo 3-f v 2-f transformacijo

2-f model je enostavnejši za obravnavo (...)

- 3-f v 2-f transf.




$$[Z_f] = \begin{bmatrix} [st] & [SR] \\ [RS] & [Rot] \end{bmatrix}$$

$$[Z_{3f}] = \left[\begin{array}{ccc|ccc} R_s + pL_s & -pL_{ss} & -pL_{ss} & pL_{SR}\cos\theta & pL_{SR}\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & pL_{SR}\cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ & R_s + pL_s & & & & \\ & & R_s + pL_s & & & \\ \hline pL_{RS}\cos(\theta) & & & R_R + pL_R & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{array}\right]$$

Privzamemo, da sta R in L enaka; stroj ... transponiran v ... koordinatah

Medsebojne induktivnosti so odvisne od kota $\theta$

Uporabimo transf. matriko, ki jo dobimo s prijemom:

2-f sistem zavrten in [illegible] v prostoru in proti 3-f sistemu

$$[F] = \frac{\sqrt{2}}{3}\left[\begin{array}{ccc|ccc} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & & & \\ 0 & 0 & 0 & & & \\ 0 & 0 & 0 & & & \end{array}\right]$$

ista matrika

Imamo $[Z_{3f}]$ in $[F]$

$$[Z_{2f}] = [F]^T [Z_{3f}] [F]$$

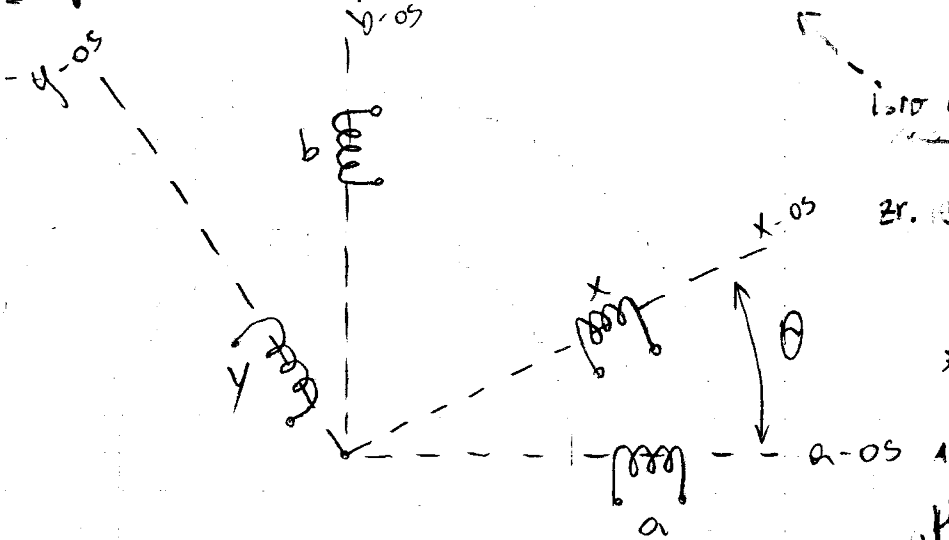
dobimo matriko 2x2

ind. med dvema faznima statorja pravokotni [illegible]

$$[Z_{2f}] = \begin{bmatrix} R_s + p(L_s + L_{ss}) & 0 & \frac{3}{2} p L_{SR} \cos\Theta \, * & \frac{3}{2} p L_{SR} \sin\Theta \\ 0 & R_s + p(L_s + L_{ss}) & -\frac{3}{2} p L_{SR} \sin\Theta & \frac{3}{2} p L_{SR} \cos\Theta \\ \frac{3}{2} p L_{RS} \cos\Theta & -\frac{3}{2} p L_{RS} \sin\Theta & R_R + p(L_R + L_{RR}) & 0 \\ \frac{3}{2} p L_{RS} \sin\Theta & \frac{3}{2} p L_{RS} \cos\Theta & 0 & R_R + p(L_R + L_{RR}) \end{bmatrix}$$

isto kot zgoraj → rotorja

zr. reža se ne spreminja




* člen lahko zapišemo kot

$pL_{ax}$

odvisno od pozicije

pravilneje lahko zapišemo kot so ostali vendar s pravilnim indeksiranjem

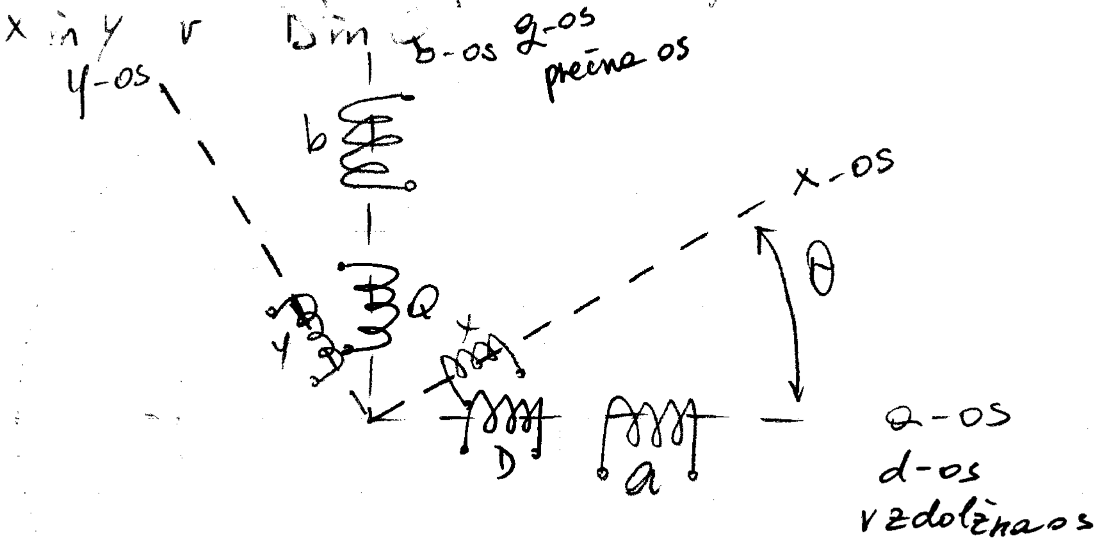
Zapišemo napetostno ravnotežnostno enačbo; upoštevamo:
- enakomerno zr. režo (utori v rotorju)
- mag. polje v zr. reži vzdolž oboda je sestavljeno le iz osnovnega harmonika
- zaradi vrtenja se s kotom θ spreminja le medsebojna induktivnost
- lastne induktivnosti so konstantne (ni izraženosti, rotor je cilindričen)

Zaradi ... simetrične sheme rotorskega navitja so vse ... ohmske upornosti, lastne ind. in medsebojne ind. s stat. ...

Glede na zapletenost je potrebno ... poenostaviti:

---

- Opravimo prostorsko transformacijo na osnovi statorski sistem x in y v D in Q




- ohranjamo lastnosti na statorju, medsebojne razmere med ... se ne spreminjajo

$$[P] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$\theta = \omega t$$

$$[u_{abxy}] = [Z_{abxy}][i_{abxy}]$$

$$[u_{abDQ}] = [P]^{-1}[u_{abxy}]$$

$$[i_{abDQ}] = [P]^{-1}[i_{abxy}]$$

$$[u_{abDQ}] = [P]^{T}[Z_{abxy}][P][i_{abDQ}]$$

Po celostni izpeljavi dobimo nap. ravn. enačbo, ki opisuje AS stroj v Park s stanjem.

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_D \\ u_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + L_{aa}p & 0 & L_{aR}p & 0 \\ 0 & R_b + L_{bb}p & 0 & L_{bR}p \\ L_{Ra}p & L_{Rb}(p\theta) & R_R + L_{RR}p & L_{RR}(p\theta) \\ -L_{Ra}(p\theta) & L_{Rb}p & -L_{RR}(p\theta) & R_R + L_{RR}p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad *1$$

- enačba obravnava stroj v mirujočem stanju in tudi v prehodnem stanju.
- členi s $(p\theta)$ so povezani z vrtenjem (gibanjem)

Členi neodvisni od vrtenja so pri računanju navora izničijo. Induktivnost je neodvisna od časa (doseženo s transformacijo)

$$M = \begin{bmatrix} i_a & i_b & i_D & i_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{Rb} & 0 & L_{RR} \\ -L_{Ra} & 0 & -L_{RR} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

zapišemo elektromagnetni navor:

$$M = L_{Rb} i_b i_D - L_{Ra} i_a i_Q + \underbrace{(L_{RR} - L_{RR}) i_D i_Q}$$

Člena s križajočo magneta ... [illegible]

$$M_E = (L_{Rb} i_b i_D - L_{Ra} i_a i_Q) - J(p^2\theta) - F(p\theta) \quad *2$$

$*_1$ in $*_2$ opisujeta stroj $\longrightarrow$ primerni za analizo ... [illegible] stanj

za motor ... [illegible]

Pri statorskih navitjih je potrebno uporabiti transf. v simetrične komp. za analizo ustaljenega stanja

- Pri generatorju je hitrost konst. (zaradi ... [illegible]) zato $A_0$ ostane ... [illegible] ... simetrične ... [illegible]

ustaljeno stanje:

$$i = \sqrt{2}\, I \sin(\omega t)$$

- pri členih z induktivnostmi se operator $p$ zamenja z $j\omega$ → ali računamo s kompleksnimi veličinami.

$$Lp(\sqrt{2}\, I \sin(\omega t)) = \omega L \sqrt{2}\, I \cos(\omega t)$$

→ zamaknjen za $1/4$ periode ($\pi/2$) → $\underline{jX_L I = j\omega L I}$

enačbo $*_1$ pišemo za kom. tokove in napetosti v obliki:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_D \\ U_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + j\omega L_{aa} & 0 & j\omega L_{aR} & 0 \\ 0 & R_b + j\omega L_{bb} & 0 & j\omega L_{bR} \\ j\omega L_{Ra} & L_{Rb}(p\Theta) & R_R + j\omega L_{RR} & L_{RR}(p\Theta) \\ -L_{Ra}(p\Theta) & j\omega L_{Rb} & -L_{RR}(p\Theta) & R_R + j\omega L_{RR} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix}$$

vse vrednosti so kompleksni (kazalci)

transformiramo simetrični ... (na statorski strani pa transformiramo v simetrične komp.)

transformiramo stator in rotor:

$$[S_2] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ -j & j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -j & j \end{bmatrix}$$

$$[S_{2S}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -j & j \end{bmatrix}$$

$$[U_{S+-,R+-}] = [S_2]^{-1}[U_{abDQ}]$$

ničrne komponente ne zapišemo → ker predpostavimo, da U ni vezana na stroju!

$$[U_{S+-,R+-}] = \underbrace{[S_2]^{*T}[Z_{abDQ}][S_2]}_{[Z_{S+-,R+-}]}[I_{S+-,R+-}]$$

Pri [illegible] prevodni [illegible] : $L_{aR} = L_{bR}$ (ker je [illegible] med R in [illegible])

Upoštevamo tudi slip:

→ $\underbrace{s = \frac{\Omega - \Omega_R}{\Omega}}$ $\Omega$ ... hitrost vrtenja vrtilnega polja

→ $\underline{\Omega_R = p \cdot \dot{\vartheta}}$ ; $\omega = \Omega$ (za dvopolni stroj)

⇒ Rotorski [illegible] izraženi s slipom:

$\underline{\omega - (p\dot{\vartheta}) = \omega s}$ ... frekvenca pozitivnega sistema simetričnih komponent.

$\underline{\omega + (p\dot{\vartheta}) = (2-s)\omega}$ ... frekv. negativnega sistema simetr. komponent.

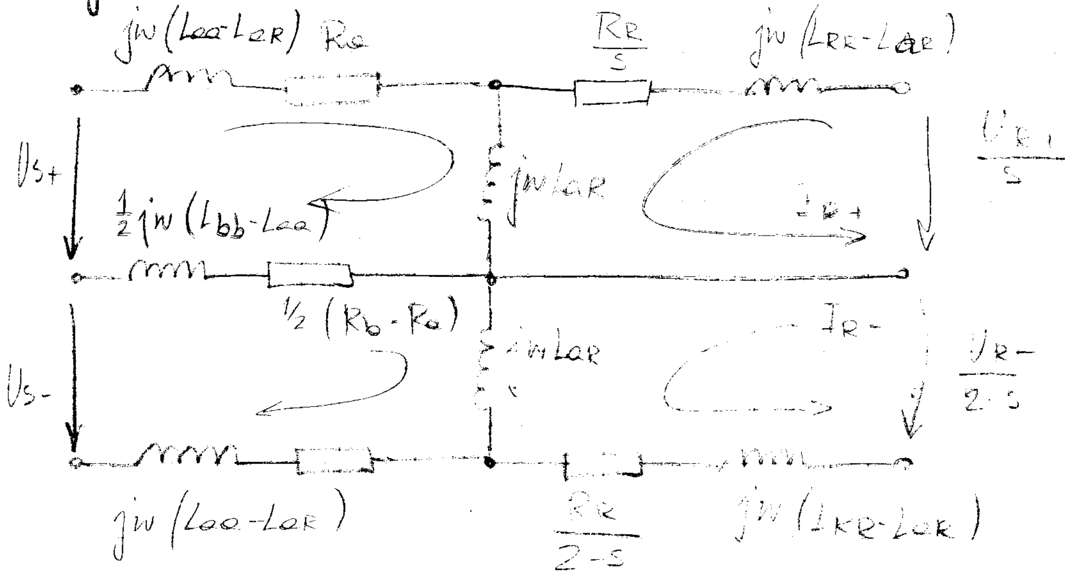
model [illegible] s simetričnimi komponentami (v [illegible])

$$\begin{bmatrix} U_{S+} \\ \frac{U_{R+}}{s} \\ U_{S-} \\ \frac{U_{R-}}{2-s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\left((R_a+R_b)+j\omega(L_{aa}+L_{bb})\right) & j\omega L_{aR} & \frac{1}{2}\left((R_a-R_b)+j\omega(L_{aa}-L_{bb})\right) & 0 \\ j\omega L_{aR} & \frac{R_R}{s}+j\omega L_{RR} & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}\left((R_a-R_b)+j\omega(L_{aa}+L_{bb})\right) & 0 & \frac{1}{2}\left((R_a+R_b)+j\omega(L_{aa}+L_{bb})\right) & j\omega L_{RR} \\ 0 & 0 & j\omega L_{RR} & \frac{R_R}{2-s}+j\omega L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S+} \\ I_{R+} \\ I_{S-} \\ I_{R-} \end{bmatrix}$$

Simetrično [illegible] in [illegible] [illegible] matrika je diagonalno simetrična

Prvi člen v 3. vrstici povezuje pozitivni in negativni sistem simetričnih komponent 18.1.2013

Z upoštevanjem gornjih dejstev lahko zgradimo nadomestno vezje




- Omejitve modela:
  - simetrično grajeno rotorsko navitje
  - statorska navitja: → lahko je fazno nesimetrično
    → lahko napajamo z napetostno-fazno nesimetričnim virov na statorskim in rotorskim
  - povezovalna meja (nesimetrija) obstaja vedno pri enofaznih strojih (z ali brez pomožnega faznega navitja) s to vejo lahko vključimo dodatni R ali C ali L element → zagon

$$\frac{R_R}{s} = R_R + \underbrace{R_R\frac{1-s}{s}}\ \dots \text{motorski navor oz. moč}$$

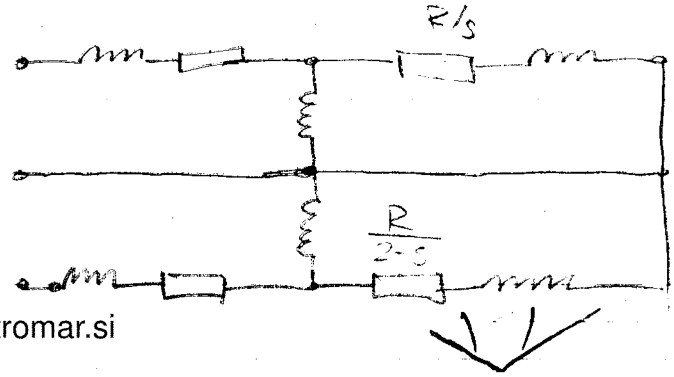
$$\frac{R_R}{2-s} = R_R - \underbrace{R_R\frac{1-s}{2-s}}\ \dots \text{zaviralni navor oz. moč}$$

---

Prilagojeno ekvivalentno vezje

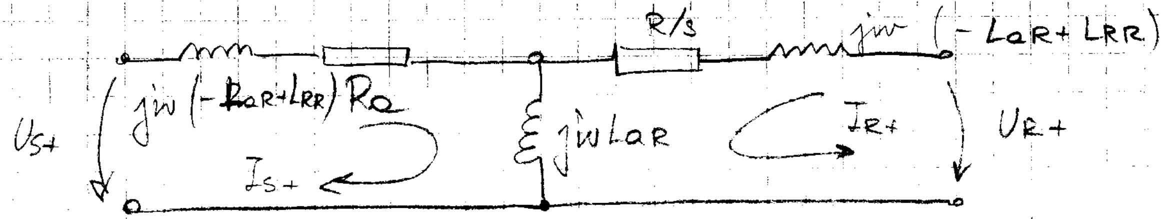
AS je simetrično grajen: Rotor in stator

- V nadomestnem vezju sta navitja a in b enaki ⟹ $R_a=R_b=R_s$ tudi $L_{aa}=L_{bb}=L_{ss}$ ; nastane vezje.




ostali elementi so nespremenjeni

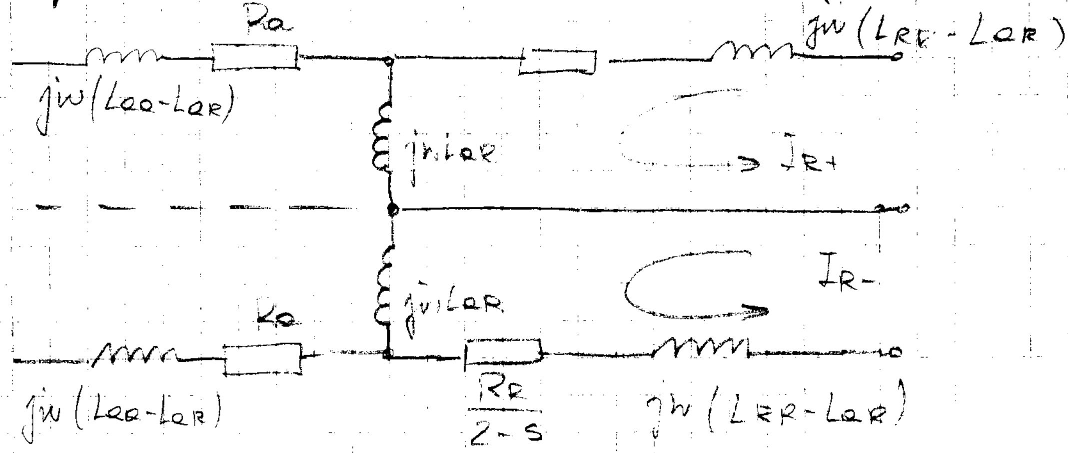
← kratkostična kletka




NADOMESTNO VEZJE ENOFAZNEGA AS. MOTORJA

- na statorju ima samo eno fazno navitje

upoštevamo : $R_b = \infty$ , $L_{bb} = \infty$



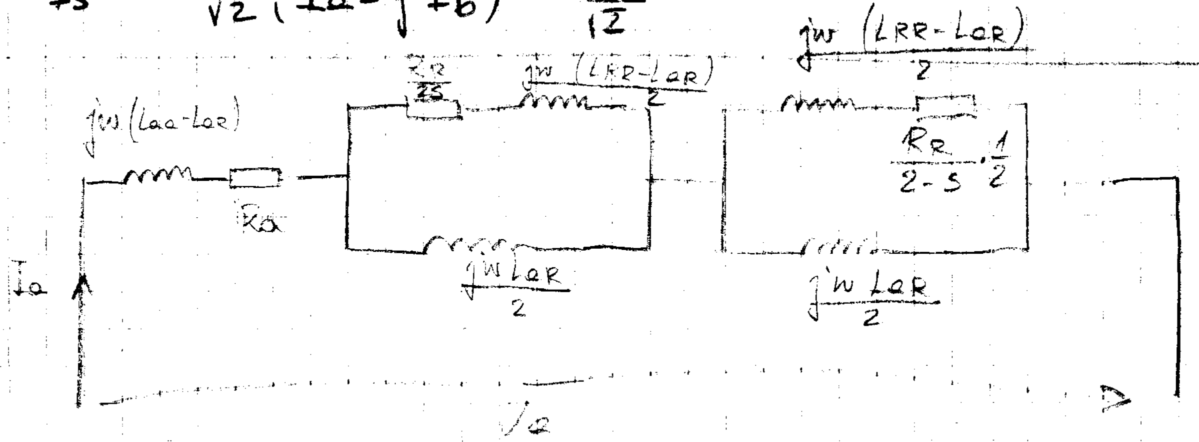

- preostavitev vezja ob upoštevanju:

$$U_{s+} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(U_a + jU_b^{=0}\right) = \frac{U_a}{\sqrt{2}}$$

$$U_{s-} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(U_a - jU_b^{=0}\right) = \frac{U_a}{\sqrt{2}}$$

$$I_{s+} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(I_a + jI_b\right) = \frac{I_a}{\sqrt{2}}$$

$$I_{s-} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(I_a - jI_b\right) = \frac{I_a}{\sqrt{2}}$$



# MOČI IN NAVORI V USTALJENEM STANJU

- moč za pozitivni sistem

↳ moč vrtilnega polja

$$P_{vp+} = I_R^2 \cdot \frac{R_R}{s}$$

moč vrtilnega polja negativnega sistema

$$P_{vp-} = I_R^2 \frac{R_R}{2-s}$$

$$P_{vp} = P_{vp+} + P_{vp-} = R_R \left( \frac{I_{R+}^2}{s} + \frac{I_{R-}^2}{2-s} \right)$$

$$P_{izg} = R_R \left( I_{R+}^2 + I_{R-}^2 \right)$$

$$P_{meh} = P_{vp} - P_{izg} = \underbrace{R_R I_{R+}^2 \left( \frac{1-s}{s} \right)}_{P_{motor}} \underset{!!!}{-} \underbrace{R_R I_{R-}^2 \left( \frac{1-s}{2-s} \right)}_{P_{zavora}}$$

- navor:

$$M = \frac{P_{meh}}{\Omega_R} = \frac{P_{meh}}{\Omega_1 (1-s)} = \frac{P_{vp}}{\Omega_1} \quad ; \quad s = \frac{\Omega_1 - \Omega_R}{\Omega_1}$$

$$M = \frac{R_R}{\Omega_1} \left( \frac{I_{R+}^2}{s} - \frac{I_{R-}^2}{2-s} \right)$$

$$\boxed{M = J \frac{d\omega_R}{dt} + F \omega_R + M_b}$$

mehanska ravnotežna enačba

$$\underline{\underline{M = F \Omega_R + M_b}}$$