

Transformatorji:

1. Kako nastanejo in kako velike so izgube v železnem jedru transformatorja?

Do izgub pride zaradi izmeničnega magnetenja oz. ob spreminjanju magnetnega polja v železnem jedru transformatorja. Jedro je lamelirano, da čimbolj zmanjšamo izgube zaradi vrtilčnih tokov. Jedro sestavimo tako, da se konci lamel med jarmi in stebri prekrivajo, pri čimer si prizadevamo čimbolj izločiti zračne reže, ker je za magnetenje teh potrebno veliko več ampernih ovojev, kot za magnetenje železa.

Pojavljata se dve vrsti izgub:

a) HISTEREZNE

Nastanejo zaradi izmeničnega magnetenja (vzpostavljanja in podiranja elementarnih magnetnih področij – Weissova področja) in so enake ploščini histerezne krivulje pri enem obhodu. Zmanjšati se jih da s primerno izbiro mehkomagnetnega materiala, magnetno orientiranih, hladno valjanih pločevin in podobno.



$$P_h = k_h \cdot \frac{f}{50} \cdot B^{1,5do3} \cdot m_{Fe}$$

k_h so specifične histerezne izgube v W/kg, pri $f=50\text{Hz}$ in $B=1\text{T}$.

b) VRTINČNE

Nastanejo zaradi vrtilčnih tokov, zaradi česar lameliramo pločevino, uporablja pa se pločevina debeline 0,1mm do 0,35mm. Jedro se obnaša kot kratkostično sekundarno navitje. Pri velikih močeh, bi se jedro segrelo tako močno, da bi se stopilo.

$$P_v = k_v \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot B^{1,5do3} \cdot m_{Fe}$$

k_v so specifične vrtilčne izgube v W/kg, pri $f=50\text{Hz}$ in $B=1\text{T}$.

Izgube v železu se izražajo kot vsota obeh,

$$P_{Fe} = P_h + P_v$$

vendar pa prevladujejo histerezne nad vrtilnimi.

2. Napetostna in tokovna prestava transformatorja? (fizikalna slika in izvajanje)

Zaradi pritisnjene napetosti na primarni strani, se v obeh navitjih inducirata napetosti:

$$E_1 = 4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot \phi_{gl}$$

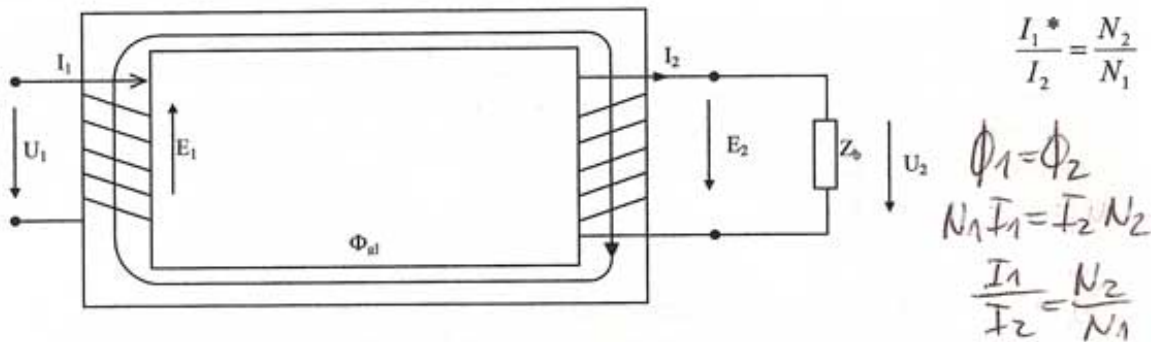
$$E_2 = 4,44 \cdot N_2 \cdot f \cdot \phi_{gl}$$

NAPETOSTNA PRESTAVA oz. 1. zakon transformacije, je razmerje teh dveh napetosti:

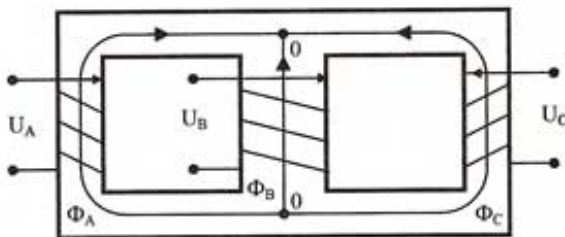
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Na sekundarju imamo drugo inducirano napetost E_2 . Nanjo priklopimo zunanje breme Z_b . Po tem bremenu steče sekundarni tok I_2 , ki dodatno magneti železno jedro. Zato bi se moral spremeniti magnetni fluks, saj imamo dvojno magnetenje $I_1 N_1 + I_2 N_2$. Če pa se spremeni

fluks, po fazi in amplitudi, se spremeni tudi E_1 . Ker se napetost na primarju ni spremenila pomeni, da je na primarju stekel še en tok (I_1^*). Ta tok kompenzira mag. napetost, ki jo povzroči I_2 . Iz tega dobimo TOKOVNO PRESTAVO oz 2. zakon transformacije:

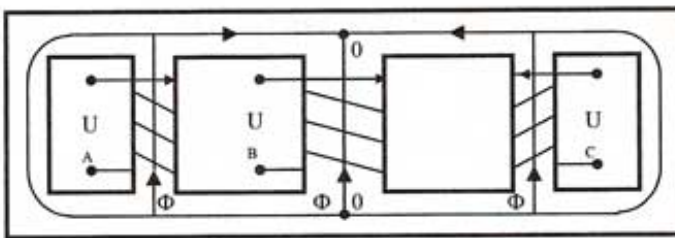


3. Trifazni transformator? (delovanje in tipi magnetnih jeder)



Večinoma so zgrajeni z enim železnim jedrom, ki nosi navitja za vse tri faze. Transformator za največje moči in napetosti so sestavljeni iz treh enofaznih tr. (vsaka faza svojega). To je zaradi transporta, ker enega velikega včasih ni mogoče prepeljati, tri enofazne pa se da.

Ker tvorijo U_A , U_B in U_C simetričen trifazni sistem, morajo po enačbah iz 2. vprašanja tudi fluksi Φ_1 , Φ_2 in Φ_3 tvoriti trifazni simetrični sistem. Velja relacija $\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$, kar pomeni, da ne rabimo »magnetnega ničlovoda«, ker ni rezultirajočega fluksa. Na ta način postane trifazno jedro lažje kot tri enofazna za isto moč transformacije.

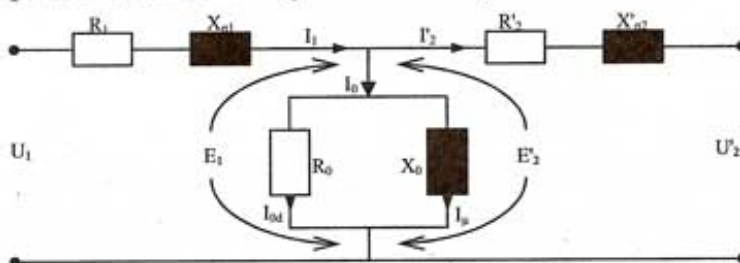


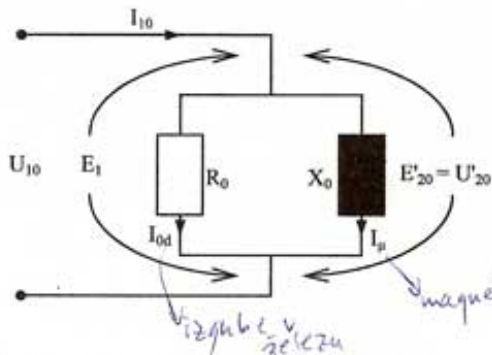
Ko postanejo, pri večjih močeh in napetostih trifazni transformator preveliki za transport, jih zgradimo kot petstebrne. Pri teh jedrih velja:
 $\Phi_A / \sqrt{3} = \Phi_B / \sqrt{3} = \Phi_C / \sqrt{3}$
 Zato je jarem lahko za $\sqrt{3}$ nižji kot pri tritebrnem.

za $\sqrt{3}$ ožja tudi stranska stebra

4. Komponente praznega teka transformatorja?

Splošno nadomestno vezje transformatorja:





Ker pa na sekundarju ni obremenitve, je slika naslednja:

Za transformator v praznem teku je $I_2=0$ in napetost $E'_{20}=U'_{20}$. Tok praznega teka je v primerjavi z nazivnim zelo majhen (od 1-2%). Ker so relativne upornosti transformatorja majhne smemo zanemariti tudi padca napetosti na R_1 in X_{01} . V praznem teku velja napetostna prestava na sponkah $\frac{U_{10}}{U'_{20}} = \frac{E_{10}}{E'_{20}} = \frac{N_1}{N_2}$, kar ne

velja za normalno obremenjen transformator, kjer padci napetosti niso zanemarjeni. Prav tako pa lahko zanemarimo tudi izgube v navitju, ker v transformatorju tečejo samo izgube za kritje izgub v železu (jedro se magneti teče pa zelo majhen tok): $P_0 = P_{Fe}$.

5. Segrevanje el. stroja kot homogenega telesa? (dif enačba in izvajanje)

Stroj ima svojo specifično toploto c (Ws/kg °C) in maso m (kg) in proizvaja izgube s toplotno močjo P_i . Toploto odvaja z faktorjem odvajanja h (W/m² °C) na hladilni površini S (m²). Na površini ima stroj temperaturo θ okolica pa θ_0 (nadtemperatura je $\Theta = \theta - \theta_0$). Velja naslednja enakost:

$$P_i dt = mc d\Theta + Sh\Theta dt$$

$$P_i \cdot dt = m \cdot c \cdot d\theta + S \cdot h \cdot \theta \cdot dt$$

izgube akumul. toplota odteče v okolico

Pred enačajem se v času dt sprosti v stroj toplotna energija $P_i \cdot dt$. Prvi del po enačaju pomeni akumulirano toploto, ki dvigne temperaturo za $d\theta$, drugi del pa odteče v okolico.

ZAČ. POGOJ: $t=0, \theta = \theta_0$

IŠČEMO: $\theta = f(t)$

$$\frac{P_i}{S \cdot h} dt = \frac{m \cdot c}{S \cdot h} d\Theta + \Theta \cdot dt \Rightarrow \frac{P_i}{S \cdot h} = \Theta_{max}$$

$$T = \frac{m \cdot c}{S \cdot h}$$

$$\Theta_{max} dt = T \cdot d\Theta + \Theta \cdot dt$$

$$(\Theta_{max} - \Theta) dt = T \cdot d\Theta$$

$$\frac{dt}{T} = \frac{d\Theta}{\Theta_{max} - \Theta} \quad \int$$

$$\frac{t}{T} = -\ln(\Theta_{max} - \Theta) + C$$

ZAČ POGOJ: $t=0, \theta = \theta_0$

$$0 = -\ln(\Theta_{max} - \Theta_0) + C \Rightarrow C = \ln(\Theta_{max} - \Theta_0)$$

$$\frac{t}{T} = \ln \frac{\Theta_{max} - \Theta_0}{\Theta_{max} - \Theta}$$

enačba segrevanja hom telesa:

$$\Theta = (\Theta_{max} - \Theta_0)(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \Theta_0$$

$$\Theta = \Theta_m(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \Theta_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

$$(1 - e^{-\frac{t}{T}})\Theta_0 = \Theta_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

$$\begin{cases} \log_a b = x \\ a^x = b \end{cases}$$

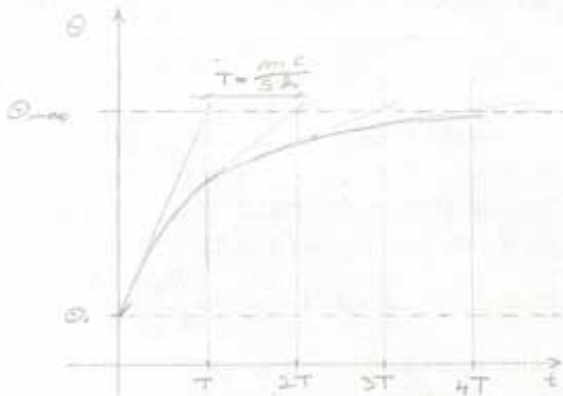
$$e^{\frac{t}{T}} = \frac{\Theta_m - \Theta_0}{\Theta_m - \Theta}$$

$$(\Theta_m - \Theta) e^{\frac{t}{T}} = \Theta_m - \Theta_0$$

$$+ \Theta = -(\Theta_m - \Theta_0) e^{-\frac{t}{T}} + \Theta_m$$

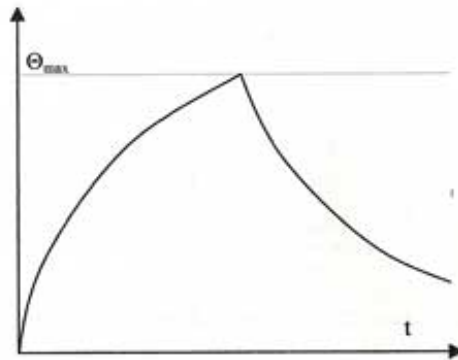
$$\Theta = \Theta_m(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \Theta_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

6. Segrevanje in ohlajanje el. stroja? (časovna konstanta segrevanja)



Prehodni pojav je po 4-ih periodah *praktično* končan. Če ima telo ob začetnem času že neko temp. različno od 0, velja naslednja enačba:

$$\Theta = (\Theta_{\max} - \Theta_0)(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \Theta_0$$



Enačba hlajenja: $\Theta = \Theta_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{T}}$

$$\Theta = (\Theta_{\max} - \Theta_0)e^{-\frac{t}{T}} + \Theta_0$$

Največja nadtemperatura se spremeni, če se spremeni moč izgub, kar se zgodi pri spremembi obremenitve.

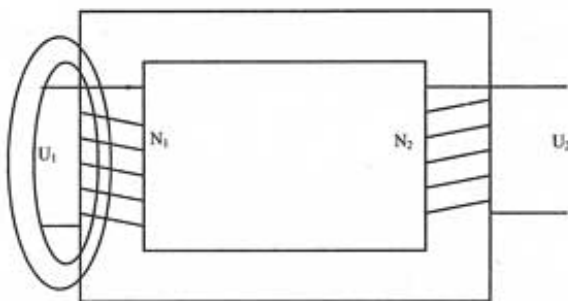
ČASOVNA KONSTANTA: $T = \frac{m \cdot c}{s \cdot h}$ → daljša čim večja je topl. kapacitivnost
 → krajša čim bolj je učinkovito hlajenje

Od nje je odvisno, kako hitro se stroj segreva. Stroj se po približno 4 časovnih konst. segreje do svoje nadtemperature.

Konstanta je neodvisna od izgub → tudi če so izgube 2x višje, se časovni pojav konča v istem času, le končna nadtemperatura je 2x višja.

7. Kaj je magnetno stresanje v transformatorju in kakšen učinek ima?

Delovanje strojev se odvija s posredovanjem magnetnega polja tam kjer ga stroj potrebuje. Za to uporabljamo feromagnetna jedra. Glavni namen magnetnega polja je PRENOS MOČI IN ENERGIJE iz enega dela stroja v drugega, ali iz stacionarnega dela v gibljiv del stroja. Torej mora magnetno polje oklepiti vsaj 2 navitji (primar/sekundar) in mu zato pravimo glavno magnetno polje (Φ_{gl}). Prenos moči se izvrši z induciranjem napetosti in s silo na vodnik v Φ_{gl} . Okrog navitij, ki vodijo el. tokove, se vedno oprede nekaj magnetnega polja, ki ne seže do sekundarja. Takšno polje je sklenjeno le z lastnim navitjem in je izgubljeno nekje v prostoru. Zato mu rečemo, da je STRESENO.



Streseno magnetno polje, ki ga povzročajo izmenični tokovi je tudi izmenično. V istem navitju, ki jih vzbuja inducirajo napetost, ki jo obravnavamo kot padec napetosti na induktivnosti stresanja navitja:

$$u_s = N \frac{d\Phi_s}{dt} = N \frac{d\Phi_s}{di} \frac{di}{dt} = L_s \frac{di}{dt}$$

stresano polje
padec napetosti na stresani indukt.

Pri sinusnih tokovih je napetost pri zgornji enačbi induktivni padec napetosti v velikosti:

$$U_s = I \cdot X_s = I \cdot \omega \cdot L_s$$

X_s

8. Kako velike so (izvajanje) in kako nastanejo izgube v navitjih transformatorja?

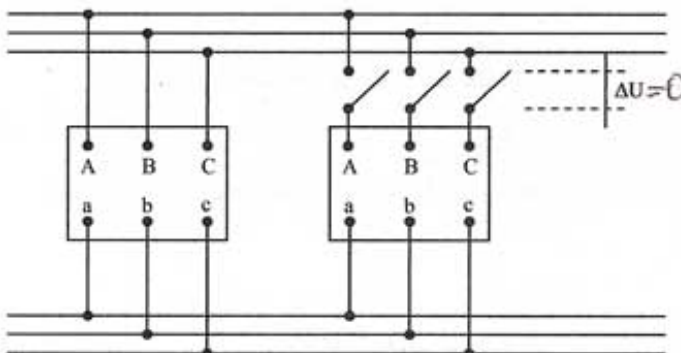
To so TOPLOTNE izgube, ki nastanejo, ker po navitju (bakru) teče el. tok. Računamo jih po enačbi za joulsko moč v upor: $P_{Cu} = I^2 R$. Računamo jo s pomočjo tokove gostote $\Gamma = I/q$, ker je to značilen podatek stroja. Izgube so tako $P_{Cu} = (\Gamma q)^2 \cdot \rho_{Cu} (l_{Cu}/q)$ in masa $m_{Cu} = \gamma_{Cu} l_{Cu} q$. Specifične izgube na maso navitja so tako: $P_{Cu}/m_{Cu} = \Gamma^2 (\rho_{Cu}/\gamma_{Cu})$.

Če imamo izmenične razmere, je treba upoštevati še vrtilne tokove, ki povzročijo izriv toka na površje vodnika; t.i. SKIN EFEKT, s čimer se poveča temp na zunanjem delu vodnika in s tem izgube. Procentualne nazivne izgube so enake nazivnemu procentualnemu padcu nap. na upor navitja: $p_{Cu}\% = u_r\%$. (izg. zaradi izvira toka in vrtilnih tokov padajo z navaščajočo temperaturo)

povečava efektivna upornost

9. Pogoji za paralelno obratovanje transformatorjev? (tolerance, izenačevalni tok, itd.)

Transformatorji obratujejo paralelno, kadar so na primarni in sekundarni strani priključeni na skupni primarni in sekundarni el. omrežji. Paralelno morajo obratovati tako, da v praznem teku med njimi ne tečejo izenačevalni toki in da si pri obremenitvi enakomerno porazdelijo bremenske tokove, proporcionalno svojim nazivnim močem. Izenačevalni tokovi ne tečejo, če je pri odprtem stikalu na sliki ni napetosti. ($\Delta U = 0$)



Ločimo:

→ tesno par. obr.:

transformatorji so priključeni na iste zbiralke v transformatorski postaji in nimata praktično nobene upornosti (težje izpolnimo zgornji zahtevi)

→ ohlapno par. obr.:

povezani so z deli omrežji zelo daleč z opaznimi upornostmi.

POGOJI:

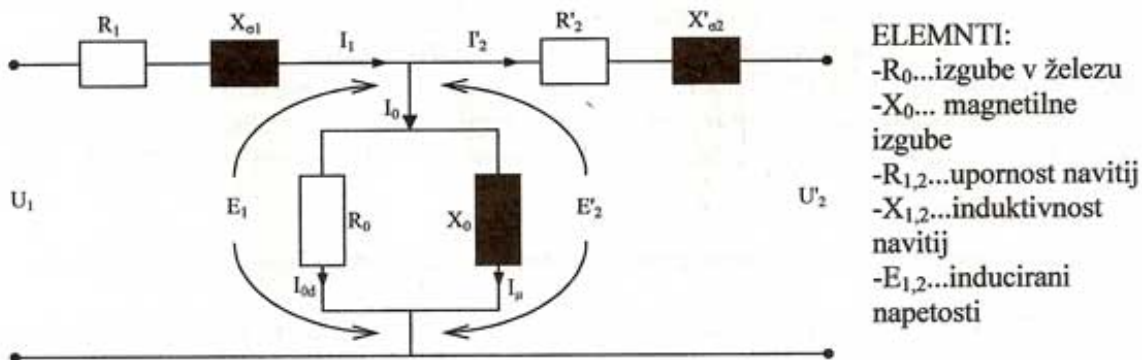
- Napetostna prestava obeh transformatorjev mora biti enaka. Oba transformatorja morata imeti približno enake nazivne napetosti, da različno nasičenje železnega jedra ne spremeni prestavi. Prestava se lahko razlikuje za največ 0,5%

- Enaki fazni številki, ali razliko 4, ker tako med fazami ni pot. razlik.
- Zaporedje faznih priključkov na primarni in sekundarni strani mora biti enako na obeh transformatorjih

a	b	a	b
	c		c
- Relativne vrednosti ~~μ~~ ^μ morajo biti enake, saj v primeru, da se razlikujejo preveč, lahko pride do primera, da je eden od transformator preobremenjen, eden pa neizkoriščen. Toleranca je ±10%.
- Nazivni moči transformatorjev se lahko razlikujeta največ za faktor 3, torej $P_1 \leq 3P_2$. To zato, da sta toka obeh transformatorjev približno v fazi. S tem izgubimo nekaj moči in tok na bremenu bo nekaj manjši od vsote tokov $I_b < I_1 + I_2$.

10. Ekvivalentna shema transformatorjev. Diskusija posameznih elementov.

Črtice na sekundarni strani ob simbolih pomeni, da je ta stran zreducirana na primarno. Pri tem morajo ostati lastnosti transformatorja nespremenjene (ovojne napetosti pri inducirani napetosti, magnetne napetosti pri tokovih, moči, izgube). Če naredimo to dobimo naslednje vezje:



$$U_1 = U_2' + I_2'R_2' + jI_2'X_2' + I_1R_1 + jI_1X_1$$

11. Redukcijski faktorji za napetosti, toke in upornosti pri transformatorju? (izvajanje)

Z redukcijskim faktorjem sekundarne veličine preračunamo v primarne ali obratno.

Drugo stran obravnavamo kot da bi imeli transf. prestavo $k=1$

- ovojne napetosti pri inducirani napetosti morajo biti enake

na prim. strani: $E_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi \rightarrow E_2' = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi'$ razmere na 2. tuljavi opazujemo iz 1. tuljave

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi$$

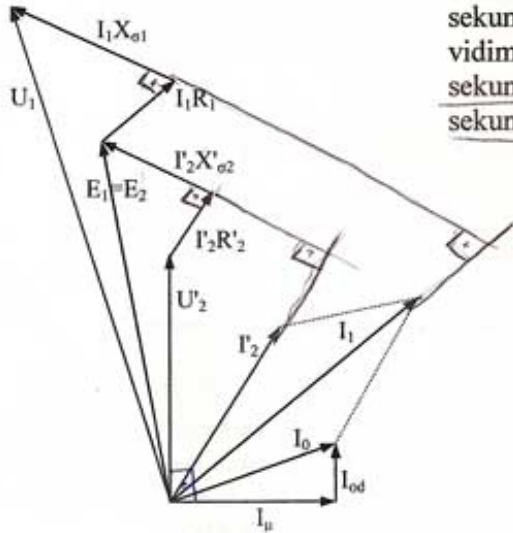
$\Phi' = \Phi$, če zanemarimo stresanje

$$\frac{E_2'}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow E_2' = E_2 \frac{N_1}{N_2}$$

14. Razlaga kazalčnega diagrama transformatorja s stališča uporabnika. Zanemaritev toka prostega teka.

Gledamo samo s stališča primarja in sekundarja sponk ekvivalentnega vezja. Tok $I_1 = I_0 + I_2'$. Inducirana napetost E_1 je padec napetosti, ostale napetosti pa so: $U_1 = E_1 + I_1 R_1 + I_1 X_{\sigma 1}$ ter $E_2' = E_1 = U_2' + I_2' R_2' + I_2' X_{\sigma 2}'$.

Tako dobimo spodnji kazalčni diagram:



Prednost tega diagrama je, da imamo primarne in sekundarne veličine vse na eni strani diagrama. Tu vidimo, da so padci napetosti v primarnem in sekundarnem navitju direktno razlika med primarno in sekundarno napetostjo na sponkah transformatorja.

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_2' = \vec{U}_1 - \vec{U}_2'$$

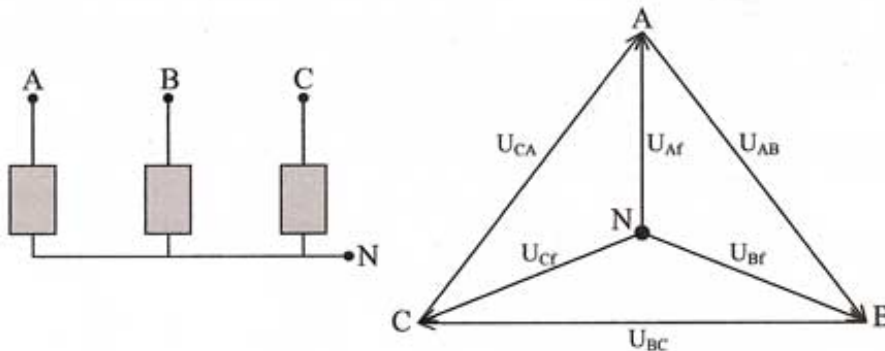
15. Značilnosti trifaznih vezav Y, D, Z? (napetosti, toki, število ovojev, preseki žic)

A) Vezava zvezda (Y)

fazna nap.: $U_f = U_{mf} / \sqrt{3}$,

toki v navitjih so isti kot v dovodih: $I_f = I$,

moč: $P = \sqrt{3} \cdot U_f \cdot I$,



B) Vezava trikot (D)

napetost na enem faznem navitju je medfazna napetost: $U_f = U_{mf}$,

tok v faznem dovodu je za $\sqrt{3}$ večji od toka po fazi: $I_f = I / \sqrt{3}$,

moč: $P = \sqrt{3} \cdot U_f \cdot I$,

Primerjava obeh vezav:

➤ napetost enega ovoja je ~~pri obeh enaka~~:

$$U_Y = u_{ov} \cdot N_Y = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$$

$$\frac{U_D}{U_Y} = \sqrt{3} \quad \frac{N_D}{N_Y} = \sqrt{3}$$

$$U_D = u_{ov} \cdot N_D = U_N$$

Napetost in število ovojev sta pri vezavi D $\sqrt{3}$ večja kot pri vezavi Y.

➤ tok:

$$I_Y = I$$

$$\frac{I_Y}{I_D} = \sqrt{3}$$

$$I_D = I / \sqrt{3}$$

Tok vezave D je $\sqrt{3}$ manjši kot pri vezavi Y.

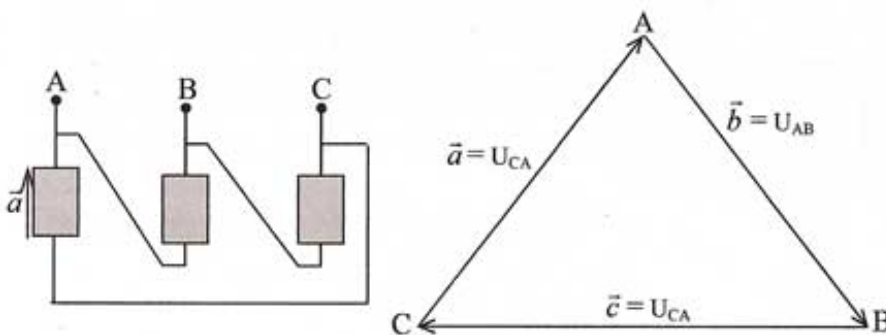
➤ presek žic:

$$U_{navY} = 4,44 \cdot f \cdot N_Y \cdot A_Y \cdot B = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$$

$$\frac{S_Y}{S_D} = \sqrt{3}$$

$$U_{navD} = 4,44 \cdot f \cdot N_D \cdot A_D \cdot B = U_n$$

št. ovojev za isto napetost mora biti pri D vezavi za $\sqrt{3}$ večja kot pri Y



Presek bakra je pri vezavi D za $\sqrt{3}$ manjši kot pri vezavi Y.

C) Vezava zig-zag (Z)

navitja so na vsakem stebru razdeljena na pol. Fazne napetosti so sestavljene iz napetosti dveh navitij, ti pa sta med seboj zamaknjeni, torej je inducirana napetost v enem stebru geometrijska vsota induciranih napetosti v obeh navitjih,

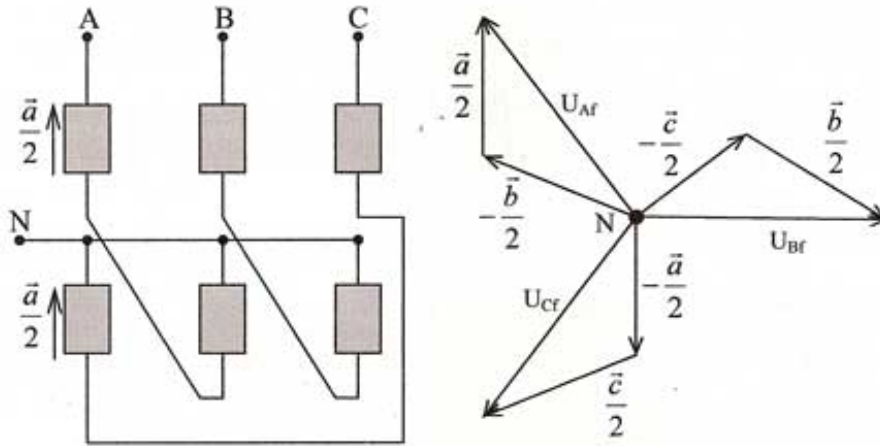
$$U_{fz} = 2U_{temenska}$$

$$U_{fz} = \sqrt{3}U_{temenska}$$

➔ št. ovojev

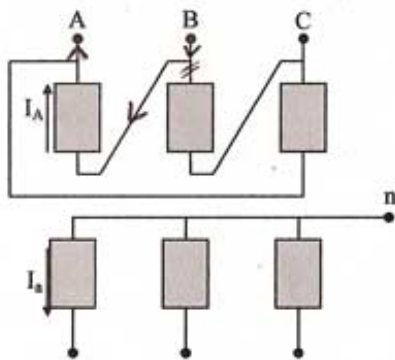
pri tej vezavi rabimo 15,5% bakra več, da dosežemo isto napetost, zato to vezavo uporabljamo za nižje napetosti, toki v navitjih pa so isti kot v dovodih.

↳ (enaki kot pri Y vezavi)



16. Zakaj so potrebne vezave Dy, Yz in kdaj lahko uporabimo vezavo Yy?

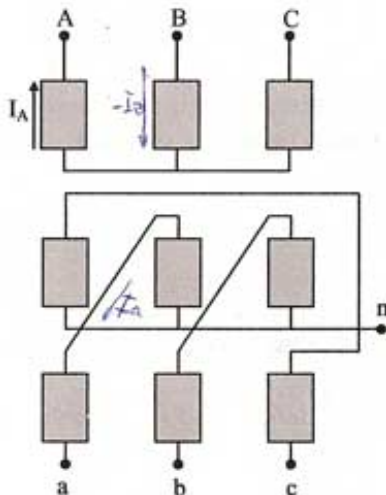
Vezava Dy:



Pri tej vezavi se tok enofazne obremenitve I_a transformira v primarno navitje na prvem stebri v tok $I_A = I_a \frac{N_1}{N_2}$.

Navitja na ostalih stebrih so brez toka. Dodatnega sofaznega vzbujanja ni in ni tudi premaknitve zvezdišča faznih napetosti. Vezje torej dovoljuje enofazno obremenitev sekundarne strani in jo spreminja v dvofazno na primarni strani. Vezava omogoča NESIMETRIČNO VEZAVO.

Vezava Yz:

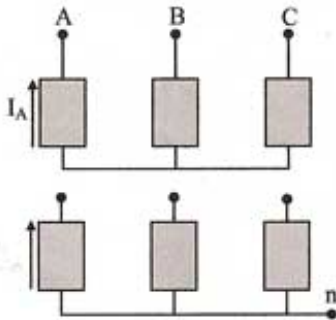


Enofazni sekundarni tok I_a teče po sekundarnem navitju 1. in 2. stebra z $N_2/2$ ovojev. transformira se v obe primarni navitji 1. in 2. stebra $I_A = I_a N_1/N_2$ in $I_A = -I_B$. Ni dodatnega magnetenja vseh treh stebrov, ker se enofazna sekundarna obremenitev pretvori v dvofazno primarno tako, da je na vseh treh stebrih skupno magnetno vzbujanje vseh bremenskih tokov enako nič. Vezava omogoča NESIMETRIČNE OBREMENTITVE.

Takih obremenitev Yy ne prenese. Vendar pa sta ti dve navitji dražji od Yy, saj imamo za 7,65% težjo konstrukcijo. D navitje ima sicer za $\sqrt{3}$ več ovojev, vendar po njih teče $\sqrt{3}$ manjši trikotni tok. D navitje bo imelo v celoti za $\sqrt{3}$ več ovojne izolacije kot navitje Y in

bo rabilo več prostora. Za nižje moči je cenejši Yz, za večje pa Dy.

Vezava Yy:



Obremenjeno imamo samo eno fazo, po kateri teče tok I_A . Na začetku je v drugih dveh fazah le $I_\mu = 1\% I_A$. Takoj ko steče I_A , steče tudi tok, ki tega kompenzira, V navitjih B in C je tako sedaj 51% I_n , kar pa ni mogoče ~~in...~~

↳ ker I_b na sekundarja ne teče.

Matematična razlaga:

Nesimetrija tokov ($I_B = I_C = I_A/2$) povzroči, da sta magnetni jedri B in C močno nasičeni in inducirajo se zelo velike napetosti v teh dveh fazah, kar povzroči močan premik ničlišča iz težišča trikotnika proti A. Premakne se za neko napetost U_0 . Ker pa se pojavi nova napetost se vzbudi tudi dodatni magnetni fluks Φ_0 (SOFAZNI FLUKS), ki se od jarma do jarma zaključuje po zraku. Posledice so dvojne:

- popačitev simetrije faznih napetosti,
- vrtilčni tokovi, ki povzročajo nezaželeno segrevanje delov transformatorja

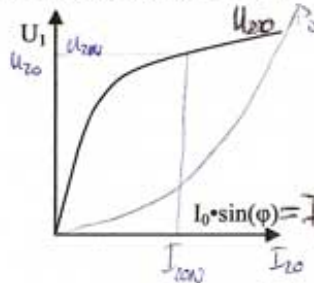
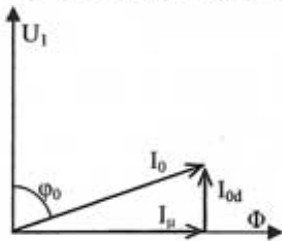
Temu se izognemo tako, da predvidimo ničlovod tudi na primarni strani, ali pa ga odstranimo na sekundarni. Vezava Yy je možna samo, če je simetrična oz. je nesimetrija znosna, če je po ničlovodu vsota vseh tokov 10-krat manjša on I_n .

17. Preizkus praznega teka transformatorja. Kaj merimo? Oblika magnetilnega toka.

Glej tudi odgovor 4.

Merimo: $-U_1$
 $-U_2$
 $-I_{10}$
 $-P_0$

Oblika magnetilnega toka in karakteristika PT-ja:



→ jalova komponentna toka praznega teka (za magnetenje)

18. Preizkus kratkega stika transformatorja. Kaj merimo in kaj izračunamo?

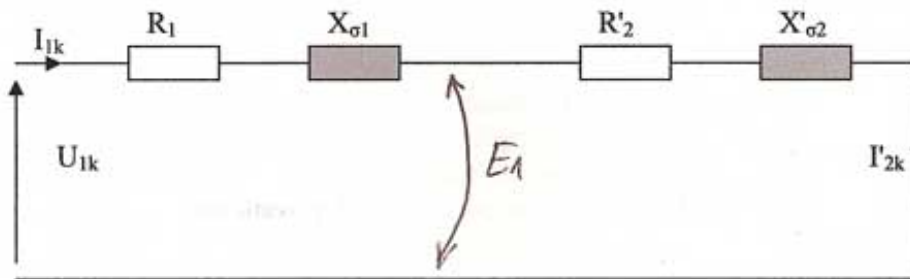
Sponke transformatorja na sekundarni strani, vežemo kratko ($U_{2k}=0$). Vsiljena primarna napetost se porazdeli v celoti na notranje padce napetosti. Glavni magnetni fluks je majhen, zato je majhna tudi inducirana napetost ($E_{1k} = 0,5 U_{1k}$), zato smemo magnetilni tok I_μ in izgubni tok I_{0d} zanemariti v primerjavi s kratkostičnim.

$$\cos \phi_k = \frac{U_R}{U_{1k}} \rightarrow \text{pri nazivnem toku in kratkem stiku}$$

$$U_R = I_k R_k$$

$$I_n^2 (P_{Fe} + P_{Cu}) = \frac{P_{2kn}}{S_n}$$

Merimo: $-I_{1k}$
 $-I_{2k}$
 $-U_{1k}$
 $-P_k$

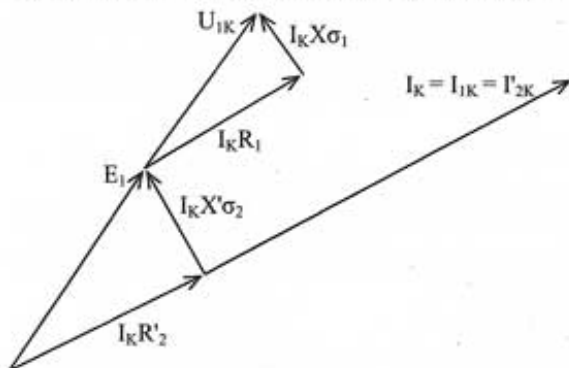


Tokovna prestava za te razmere je:

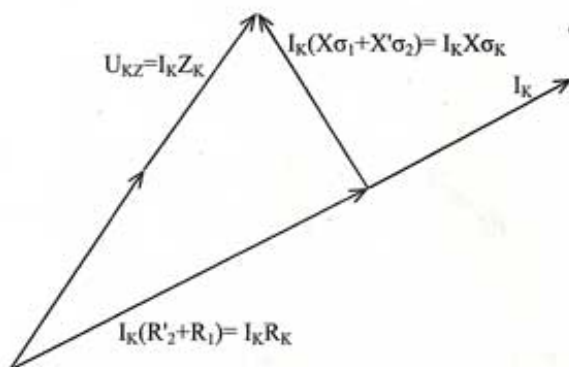
$$I_{1k} = I'_{2k} \Rightarrow \frac{I_{1k}}{I'_{2k}} = \frac{N_2}{N_1}$$

Moč v kratkem stiku pa so samo izgube v navitju: $P_k = P_{Cw} = I_k^2 R_k$

Tok I_k povzroča padce napetosti na vseh upornostih, kot kaže slika:



Ker pa nas v KS ne zanimajo magnetne razmere in inducirana napetost, ga preuredimo tako, da združimo oba padca napetosti na ohmskih in induktivnih uporih:



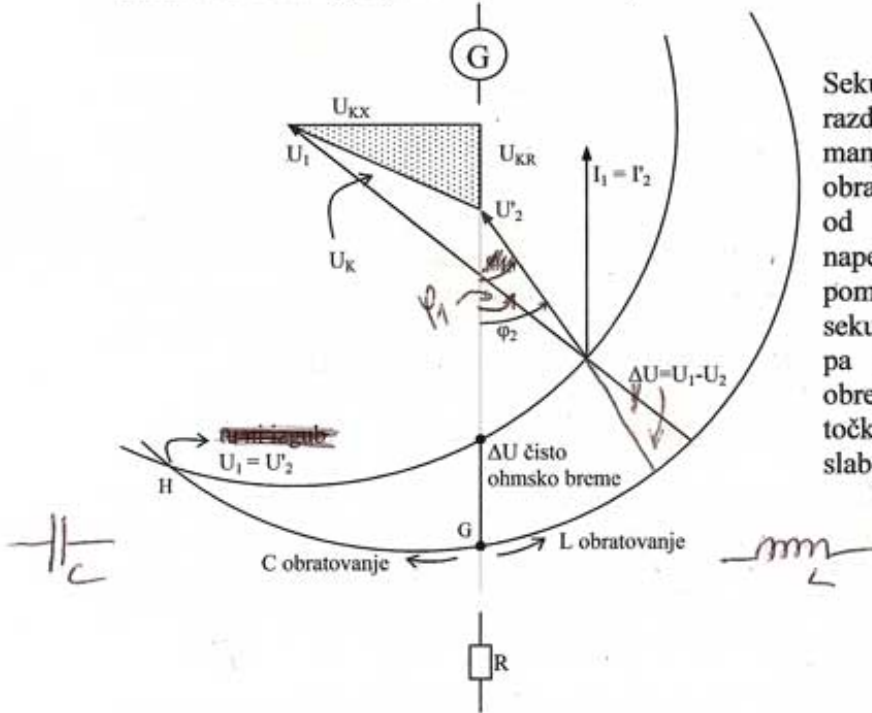
To je t.i. KRATKOSTIČNI TRIKOTNIK TRANSFORMATORJA.

Vsiljena napetost je enaka $U_{1k} = I_{1k} (R_1 + R'_2) + I_{1k} (X_1 + X'_2)$. U_R U_X
Kratkostična napetost (U_k) je tudi podatek na transformatorju. Pove nam koliko je tista najmanjša vsiljena primarna napetost, da po transformatorju v KS teče I_n .

19. Konstrukcija in uporaba Kappovega diagrama.

Odgovorjeno že pri 12,13.

Na Kappovem diagramu najlažje vidimo razmere med različno obremenjenim transformatorjem. Skonstruiramo ga tako, da na diagramu realne obremenitve transformatorja zanemarimo I_0 in sekundar prezrcalimo preko središča navzgor. Nato ga še orientiramo tako, da kaže tok I navzgor, zato da je teko obrnjen tudi kratkostični padec na upor.



Sekundarna napetost U_2' , je za razdaljo med obema krogoma in φ_2 manjša od U_1 . Pri kapacitivnem obratovanju je napetost U_1 manjša od napetosti U_2' . Sprememba napetosti ΔU je negativna, kar pomeni, da pride do dviga sekundarne napetosti, fazni kot φ pa je negativen. Pri induktivni obremenitvi je ravno obratno. Med točkama G in H čuti transformator slabo kapacitivno breme.

20. Kako deluje transformator (idealni transformator, fizikalna slika)?

Transformator je iz feromagnetnega jedra, na katerega sta naviti primarno in sekundarno navitje, ki tako oklepata isti magnetni fluks. Na primarno navitje vsilimo neko izmenično napetost, ki zaradi toka po navitju povzroči nastanek magnetnega fluksa po jedru. Pri idealnem transformatorju zanemarimo upornost in streseno magnetno polje primarnega navitja. Ta izmenični fluks povzroči inducirano napetosti E_2 , ki jo uporabimo za nov vir napetosti in na njo priključimo zunanje breme Z_b . Inducirana napetost požene tok I_2 , ki zaostaja za fazni kot $\text{tg} \varphi = X_b / R_b$. Tako imamo sedaj sekundarno napetost $U_2 = I_2 Z_b$. Ker imamo sedaj nov tok I_2 , ki dodatno magneti jedro in ruši napetostno ravnotežje v primarju, vanj požene nov tok I_1 , ki ponovno vzpostavi napetostno ravnotežje. Magnetno jedro torej magnetimo z dvema tokovoma I_1 in I_2 . Tok I_1 je bolj induktiven kot I_2 , ker je $\varphi_1 > \varphi_2$. Vzrok pa je I_μ , ki je čisto induktiven in je komponenta primarnega toka. V transformatorju se prenašata dve navidezni moči $U_1 I_1^*$, ki se koristno uporabi v bremenu in $U_1 I_\mu$, ki je jalova moč za magnetenje jedra.

Poznamo 1. in 2. zakon transformacije:
$$\frac{I_1^*}{I_2} = -\frac{N_2}{N_1} \text{ in } \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

S spreminjanjem števila ovojev in preseka žic lahko vplivamo na velikosti tokov in inducirane napetosti. S tem lahko reguliramo velikosti tokov in inducirane napetosti na sekundarju.

21. Konstruktivske značilnosti transformatorja (magnetno jedro, tipi hlajenja, itd.)

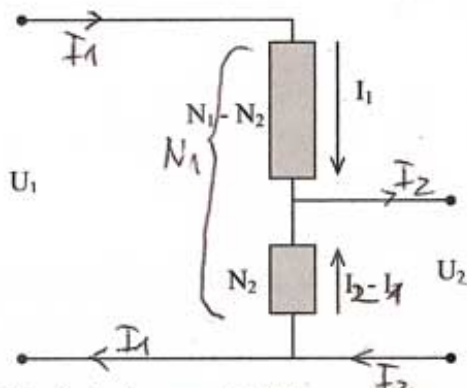
Transformator je zgrajen iz feromagnetnega jedra, ki služi za vodenje glavnega magnetnega fluksa. Sestavljen je iz med seboj izoliranih pločevin, za omejevanje vrtničnih tokov, ki nastanejo zaradi magnetnih napetosti, ki povzročajo segrevanje jedra. Če jedro ne bi bilo lamelirano, bi lahko celo zažarelo in bi časoma izgubilo svoje feromagnetne lastnosti.

na jedro sta naviti primarno in sekundarno navitje. Primarno je priključeno na vir moči, sekundarno pa na bremena potrošnikov. Vodnik je iz bakra ovitega s papirjem v izolacijskem transformatorskem olju, ali pa je lakiran; odvisno od temperatur. Pomen izolacije je v tem, da med seboj, fizično loči ovoje, ker od njih zavisi transformacija napetosti.

Tipi hlajenja so odvisni od moči transformatorja. Za transformator za majhne moči, do neke 50kVA, je dovolj že primerno narebrena površina iz dobro toplotno prevodne kovine (Al, Cu, pozlačeno). Za večje moči nato pritrdimo na rebra ventilatorje, ki dodatno povečajo konvekcijo. Za še večje moči, pa ta način ni več dovolj učinkovit, zato na transformator pripenemo radiatorje z vodo ali oljem, ki so tudi lahko dodatno hlajena z ventilatorji.

22. Avtotransformator. Značilnosti vezave. Prehodna in tipska moč.

Inducirana napetost, ki se inducira v primarnem navitju izkoristimo kot sekundarni vir napetosti. Tako postane sekundarno navitje del primarnega. Primarna in sekundarna stran sta galvanjsko povezani z vodnikom in med seboj nista izolirani. S tem prihranimo del navitja, zato temu transformatorju rečemo tudi varčni transformator.



Prehodna moč P_p je tista, ki prihaja od primarnih do sekundarnih sponk. Tipska moč P_t pa je tista, ki se transformira preko magnetnega polja oz. tista, ki bi jo imel transformator pri običajni izvedbi, z ločenima navitjema, za katero velja $P_p = P_t$.

$$P_p = U_1 I_1 = U_2 I_2$$

$$P_t = I_1 (U_1 - U_2) = U_2 (I_2 - I_1)$$

Vzbujanje bremenskih tokov se kompenzira zato velja $I_1(N_1 - N_2) = N_2(I_2 - I_1)$.

Velikost AT v primerjavi z navadnim dobimo iz razmerja $\frac{P_t}{P_p} = 1 - \frac{U_2}{U_1}$. In čim bližje je

napetostna prestava $U_1/U_2 = N_1/N_2$ vrednosti 1 manjši je AT. Pri velikih prestavnih razmerjih postane AT vse bolj enak navadnemu. Moč, ki jo je zmožen prenašati pa se dobi iz razmerja

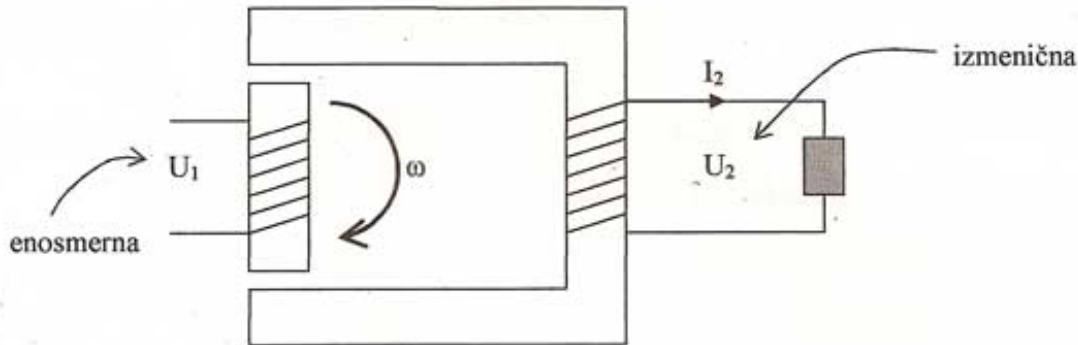
$$\frac{P_p}{P_t} = \frac{1}{1 - N_2/N_1}$$

in velja, da je prenosna moč čim večja bolj ko se razmerje N_1/N_2 približna vrednosti 1. Slabost AT je to, da imamo galvanjsko povezavo med navitji. Če se pretrga ničelni vodnik ne more več teči magnetilni tok in ni fluksa in pojavi se prevelika napetost na sekundarju, zaradi česar lahko počí.

Sinhronski stroji:

1. Kako iz transformatorja nastane sinhronski stroj? Osnovna razlika med strojema.

Transformator je statična naprava, brez gibljivih delov, ki izrablja pojav inducirane napetosti. Po feromagnetnem jedru vodimo izmenični magnetni fluks, ki seže do obeh navitij, ki z ovoji N_1 in N_2 oklepata jedro. Tako se v drugem navitju inducira napetost. Transformator prenaša MOČ od enega do drugega navitja preko magnetnega polja. *zavradi spremenljivega pretoka*
Sinhronski stroj razvijemo iz transformatorja. Sestavljen je iz mirujočega dela (STATORJA) in vrtečega oz. rotacijskega (ROTORJA) dela:



Z vrtenjem stebra dobimo na sekundarni strani izmenični potek fluksa. Zato je SS dinamična naprava. *enosmerno vzbujanega*
Torej glavna razlika med strojema je v gibljivem rotorju, ki pretvarja mehansko energijo v električno (in obratno). Ko SS obremenimo steče na sekundarni strani tok I_2 , na katerega pa, za razliko od transformatorja, primarna stran ne odreagira. Ta tok nam povzroča t.i. REAKCIJO INDUKTA. Pri SS je primarna stran enosmerna, šele z vrtenjem rotorja dosežemo izmeničen fluks, ki inducira izmenično napetost. Transformator moramo vzbujati z izmenično napetostjo, če želimo imeti izmenični fluks. Pri transformatorju inducirana napetost zaostaja za mag. poljem za 90° , tu pa prehiteva za 90° .

2. Kako deluje SS (fizikalna slika)?

Sestavljata ga rotor in stator. Rotor je za stroje

- manjših moči iz trajnega magneta,
- večjih moči pa ga napajamo z enosmernim tokom

Rotor se vrti s sinhronsko hitrostjo n_s . Stator nosi večfazno navitje. Rotor se vrti v statorju, s čimer statorju inducira magnetno polje in s tem napetost v statorskem navitju. Ta del stroja imenujemo INDUKT, ker nosi navitje v katerem se inducira napetost → STATOR = INDUKT
Po palicah induktivnega navitja tečejo izmenični tokovi, ki vzbudi svoje magnetno polje. Ti tokovi so med seboj fazno zamaknjeni, zato se statorsko polje tudi premika. Frekvenca in faza statorskih tokov mora biti takšna, da se rotorsko in statorsko polje vrtita z isto hitrostjo n_s . Samo v tem primeru imamo med rotorjem stalno mehansko silo in vrtilni moment, ki omogoča trajno delovanje stroja. Torej ta stroj deluje le v SINHRONIZMU, ko je vrtenje

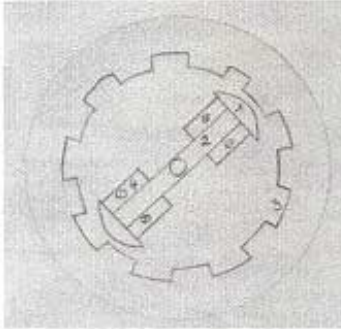
rotorskega in statorskega polja enako: $n_s = \frac{f}{p} = n_r$.

Pri transformatorju inducirana napetost zaostaja za magnetnim poljem za 90° , tu pa prehiteva za 90° .

s statorskim tri faznim navit. vzbudimo vrtilno magnetno polje
rotor se vrti sinhrono s poljem

SS lahko obratuje ko MOTOR (električno energijo v mehansko) ali GENERATOR (mehanska energija na rotorju inducira napetost v statorju), ali *sinhronski kompenzator faktorja moči*

3. Konstruktivske značilnosti SS-a (zgradba in izvedbe, tipi rotorjev, število polov)?



1...polov čevelj, 2...steber, 3...utori, 4...navitje

- τ_p ...kot med poloma (polova delitev ali polov korak):

$$\tau_p = \frac{N}{2p} \quad \text{pove koliko utorov pade na en pol}$$

- N...število utorov

- τ_n ...kot med utoroma (utorova delitev)

$$- \alpha_g \dots \alpha_g = \frac{360}{N}$$

$$- \alpha_e \dots \alpha_e = p \cdot \alpha_g$$

- q...število utorov na pol in fazo: $q = \frac{N}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{\tau_p}{m}$

Navitje na statorju prikažemo z utorovo zvezdo, vezalno shemo, ali razpredelnico.

Poznamo:

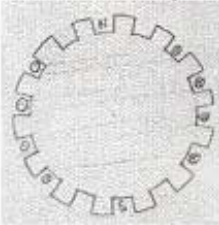
- stroj z neizraženimi poli
- stroj z $2p > 2$ oz. z izraženimi poli

↳ 3 ali več parov polov

Ločimo jih tudi po tipu rotorjev:

- TURBOROTOR → *se vrti zelo hitro, izraženi poli ne vzdržijo sil*

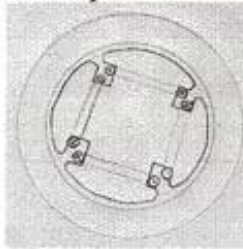
Je sinhronski gen., ki ga ženejo parne ali plinske turbine. Vrteti se mora čim hitreje, da imajo turbine dober izkoristek. Pri frekvenci 50Hz se bo najhitreje vrtel dvopolni stroj s 50 vrt/s oz. 3000 vrt/min. Pri teh strojih je enosmerno vzbujalno navitje porazdeljeno po utorih. Zračna reža je praktično konstantna po obodu rotorja.



običajno je zasedenih le 2/3 utorov, saj tako dobimo bolj pravilni sinus na izhodu, pa še ceneje je

- konstrukcija z izraženimi poli na rotorju

So večpolni sinhronski generatorji, ki se vrtijo počasneje, ker jih ženejo vodne turbine ali dizelski motorji. Generator ima od 4 do 100 polov.



→ ne zdržijo visokih hitrosti vrtenja

→ neenakomerna zračna reža

→ ima reluktančni navor tudi če rotor ni vzbujan s tokom (mora pa biti priključen na napetost)

4. Transformatorska in generatorska inducirana napetost (izpeljava generatorske).

- Transformatorska inducirana napetost: $E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N \cdot f \cdot \Phi_m$ *↳ 4,44*
- generatorska inducirana napetost:

Napetost se spreminja, če se krajevno ali časovno spreminja fluks
 $(d\Phi = B_x l dx \rightarrow v = \frac{dx}{dt}) \rightarrow \frac{d\Phi}{dt} = B_x l v \rightarrow \frac{d\Phi}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} = e_p = N B_x l v$

$$B_x = B_m \sin(x\pi/\tau_p) \rightarrow v = 2p\tau_p n \rightarrow x = vt = 2p\tau_p n t$$

$$e = 2e_p = 2B_m N l 2p\tau_p n \sin(2pnt\pi) \quad \sin(2pnt\pi) = \sin(\omega t)$$

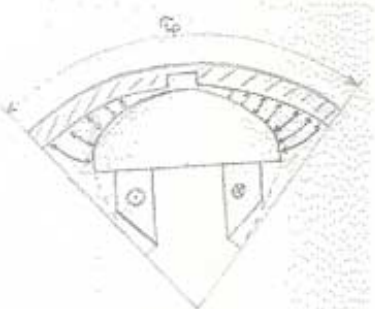
$$\omega = 2\pi f = 2pn\pi \rightarrow f = pn \quad e_{max} = 4B_m N l \tau_p p n = 4B_m N l \tau_p f$$

$$\Phi = (1/\pi) l \tau_p B_m \int_0^\pi \sin \alpha d\alpha = (2/\pi) l \tau_p B_m \sin(\omega t) \quad e_m = 2\pi N f \Phi$$

$$E = (2\pi/\sqrt{2}) N f \Phi = 4,44 N f \Phi$$

$$E = e_{in}/\sqrt{2}$$

5. Oblika magnetnega polja rotorja pod izraženim polom (idealna, realna).



Magnetna gostota B, pod polom je odvisna od konstantne magnetne napetosti $\theta = I \cdot N$ in od različne magnetne upornosti. Poleg nasičenega železa glavno upornost predstavlja zračna reža pod polom. V medpolovnem prostoru se zračna reža močno poveča in s tem tudi magnetna upornost (magnetna gostota B se zmanjša). S primernim oblikovanjem reže lahko dosežemo razmeroma dobro sinusno porazdelitev. Do potlačanja krivulje razdelitve magnetnega polja na sredini pod polom pride, ker pride polov čevljev, pri velikih magnetnih gostotah, v nasičenje.



Idealno obliko magnetnega polja bi dobili, če bi imel pol obliko kaplje, vendar s tem nebi imeli prostora za ovoje.

IDEALNO:

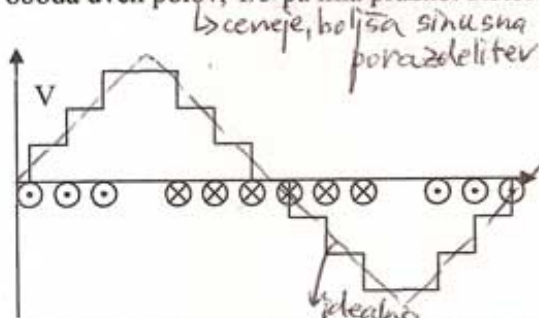
$$B = B_{max} \sin\left(\frac{x}{\tau_p} \pi\right)$$

$$B_{max} = \mu_0 \frac{I \cdot N}{\delta_0}$$

$$\delta_0 = \delta \sin\left(\frac{x}{\tau_p} \pi\right) \rightarrow \text{idealno spreminjanje zračne reže}$$

6. Oblika magnetnega polja rotorja v cilindrični (turbo) izvedbi (idealna, realna).

Pri tej izvedbi, je zračna reža konstantna. Imamo en polov par ($2p=2$), ki ima ovit samo $2/3$ oboda dveh polov, $1/3$ pa ima prazno. Rotor raztegemo v ravnino.



Pri vsakem prehodu preko vodnika se poveča magnetna napetost za njegov doprinos. Dobimo stopničasto krivuljo, ki ima toliko stopnic kot je utorov. Več kot je utorov, bolj se stopničasta razdelitev približa trikotni. Taka porazdelitev je značilna za komutatorska navitja. Slika, ki je narisana nastane kadar imamo ovito samo $2/3$ oboda. Pri velikem številu utorov preide v trapezno porazdelitev. Taka so običajno

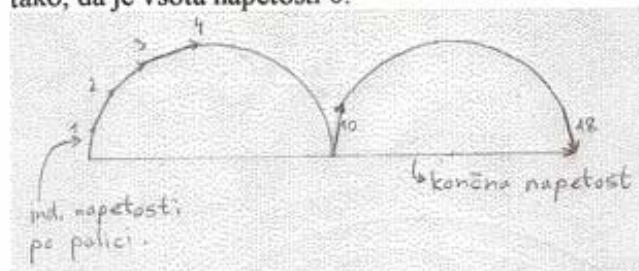
enosmerna vzbujalna navitja pri neizraženih polih ali pa enofazna navitja.

7. Hitrost vrtenja SS-a. Pasovni faktor in faktor skrajšanja navitja. Posledica obeh.

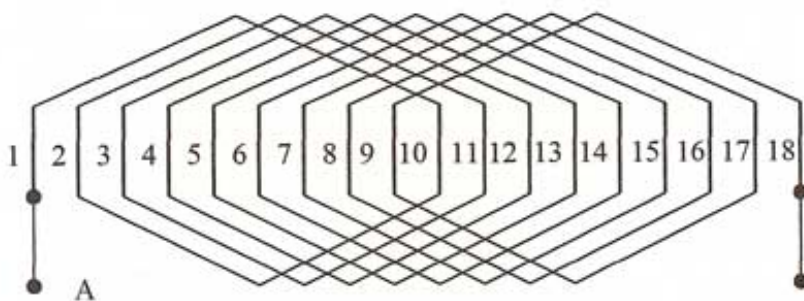
Hitrost vrtenja dobimo po naslednji enačbi: $v = 2p \cdot \tau_p \cdot \frac{n[\text{vrt/min}]}{60} = 2p \cdot \tau_p \cdot \frac{60f}{60} \Rightarrow v = 2f\tau_p$

Pasovni faktor:

Ker vemo, da je vsota napetosti enega polovega para 0, ga lahko razdelimo na dve polovici tako, da je vsota napetosti 0.

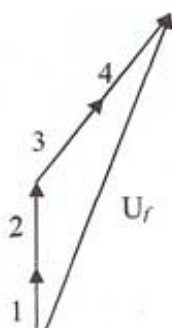


napetosti se seštevajo vektorsko, ne pa aritmetično, kot smo "predpostavili" v enačbi $E = 4,44N\Phi$



Primer: V eni fazi imamo 4 palice.

$f_p = \frac{\sum \text{geom. vsota}}{\sum \text{aritm. vsota}} \rightarrow$ geometrijska in aritmetična vsota se razlikujeta, ker vektorji ne ležijo vzporedno.



$$f_p = \frac{\sin(q \frac{\alpha_{el}}{2})}{q \cdot \sin(\frac{\alpha_{el}}{2})} \Rightarrow \text{posledica je za faktor zmanjšana inducirana napetost.}$$

$$q = \frac{N}{2p \cdot m} \rightarrow \text{m...število faz}$$

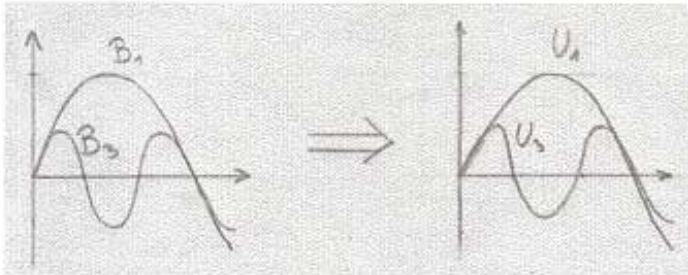
$\approx \frac{\tau_p}{m}$

Za višje harmonske komponente se enačba dopolni: $f_{pv} = \frac{\sin(q \frac{v\alpha_{el}}{2})}{q \cdot \sin(v \frac{\alpha_{el}}{2})}$

Faktor skrajšanja:

Do sedaj smo napetost seštevali diametralno (1-10, 2-11, ...) in smo dobili $2 \times E$. za ~~višje harmonske komponente lahko~~ *skrajšane tuljave* postopamo drugače:

$$f_s = \sin(\frac{s \pi}{\tau_p 2}) \rightarrow \text{skrajšava}$$



Ko ima prva harmonska komponenta 180° , ima 3. že $3 \times 180^\circ$ ($\alpha_{dv} = v \cdot \alpha_{el}$)

Tudi ta faktor se za višje harmonske komponente dopolni:

$$f_{sv} = \sin(\frac{s}{\tau_p} v \frac{\pi}{2})$$

Kako lahko določeno harmonsko komponento izničimo?

$$\sin(\frac{s}{\tau_p} v \frac{\pi}{2}) = 0 \Rightarrow \frac{s}{\tau_p} v \frac{\pi}{2} = n\pi \Rightarrow \frac{s}{\tau_p} v = 2n \rightarrow \text{utore skrajšamo za } \frac{\tau_p}{s}$$

\hookrightarrow za to uporabljamo skrajšane tuljave

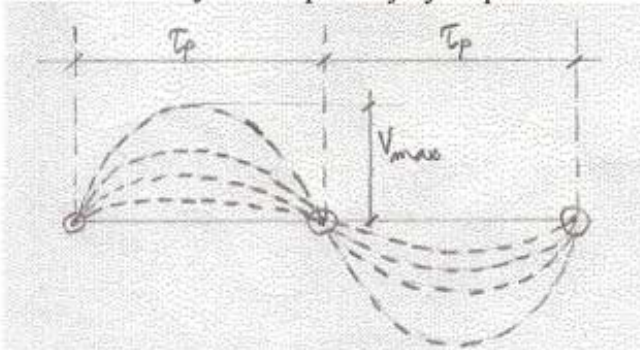
npr.: $v=5, \tau_p=15$

$$15/5=3; \quad (s/\tau_p=12/15)$$

Torej za 3 skrajšamo korak. namesto 1-10 naredimo korak 1-7.

8. Magnetno polje SS-a, ki ga vzbudi enofazno statorsko navitje?

Če tuljavo vzbujamo s tokom $i = \sqrt{2} I \cos(\omega t)$, kjer je I efektivna vrednost toka v tuljavi, dobimo naslednjo sliko spreminjanja napetosti V



Celo navitje ima sedaj amplitudo vzburjanja $V_{\max} = \sqrt{2} \frac{2k_n}{\pi p} I N$ (k_n ...koeficient navitja). Ta

napetost časovno utripa v skladu z izmeničnim tokom navitja i . Za magnetno gostoto velja izraz:

$$B = \mu_0 \frac{V}{\delta} = B_{\max} \sin(x\pi / \tau_p) (\cos(\omega t)) = \frac{1}{2} B_{\max} [\sin(x\pi / \tau_p - \omega t) + \sin(x\pi / \tau_p + \omega t)].$$

Pri takem vzburjanju je tako, kot da se dve magnetni polji vrtita v nasprotnih smereh, ~~katere giblje magnetne kolesi pri enosmernem vzburjanju~~. Z izmeničnim vzburjanjem mirujočih tuljav dobimo torej dve enaki nasprotno se vrteči magnetni polji. Njuna hitrost vrtenja pa je dana s frekvenco vzbujalega toka (tako kot bi vrteli dve magnetni kolesi vsakega v svojo smer). magnetni polji imata isto število polovih parov kot navitje.

9. Vrtilno magnetno polje trifaznega sistema (levo in desno, hitrost, izpeljava).

Trifazno porazdeljeno navitje je sestavljeno iz treh enofaznih, ki so med seboj zamaknjene za 120° . Imamo 3 leva in 3 desna vrteča polja. Seštejemo vsa polja, ki se vrtijo v desno in vsa, ki se vrtijo v levo:

• DESNO

$$B_{ad} = \frac{1}{2} B_{\max} \sin\left[\frac{x}{\tau_p} \pi - \omega t\right]$$

$$B_{bd} = \frac{1}{2} B_{\max} \sin\left[\left(\frac{x}{\tau_p} \pi + 120^\circ\right) - (\omega t + 120^\circ)\right] = \frac{1}{2} B_{\max} \sin\left[\frac{x}{\tau_p} \pi - \omega t\right]$$

$$B_{cd} = \frac{1}{2} B_{\max} \sin\left[\left(\frac{x}{\tau_p} \pi + 240^\circ\right) - (\omega t + 240^\circ)\right] = \frac{1}{2} B_{\max} \sin\left[\frac{x}{\tau_p} \pi - \omega t\right]$$

$$B = B_{ad} + B_{bd} + B_{cd} = \frac{3}{2} B_{\max} \sin\left[\frac{x}{\tau_p} \pi - \omega t\right]$$

Vsota da desno vrteče trifazno polje, ki potuje z amplitudo $3/2 B_{\max}$.

• LEVO

$$B_{al} = \frac{1}{2} B_{\max} \sin\left[\frac{x}{\tau_p} \pi + \omega t\right]$$

$$B_{bl} = \frac{1}{2} B_{\max} \sin\left[\left(\frac{x}{\tau_p} \pi + 120^\circ\right) + (\omega t + 120^\circ)\right] = \frac{1}{2} B_{\max} \sin\left[\frac{x}{\tau_p} \pi + \omega t + 240^\circ\right]$$

$$B_{cl} = \frac{1}{2} B_{\max} \sin\left[\left(\frac{x}{\tau_p} \pi + 240^\circ\right) + (\omega t + 240^\circ)\right] = \frac{1}{2} B_{\max} \sin\left[\frac{x}{\tau_p} \pi + \omega t + 120^\circ\right]$$

$$B = B_{al} + B_{bl} + B_{cl} = 0$$

Vsota treh levo se vrtečih polj je vsota treh sinusnih funkcij, od katerih ima vsaka za 120° večji kot od prejšnje. In tako polje ima v vseh točkah prostora x in v vseh časih t vrednost 0. torej levo polje izgine.

Simetrično trifazno navitje vzbudi krožno vrtilno magnetno polje, ki se vrti po enačbi $n = f/p$ s hitrostjo $v = 2 \cdot f \cdot \tau_p$, če tečejo po navitju simetrični tokovi. Če ta pogoj ni izpolnjen se levo polje ne izniči. Pravimo, da ima polje inverzno komponento. Smer vrtenja polja lahko tudi spremenimo, če zamenjamo dva fazna priključka.

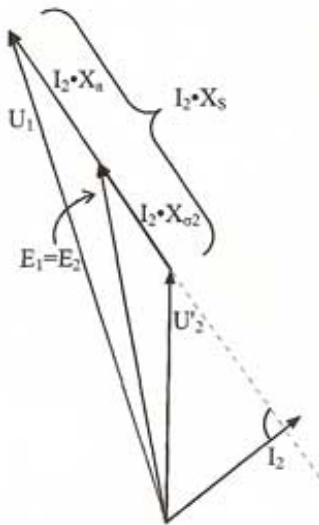
10. Kaj je to reakcija indukta? Sinhronska relativna reaktanca. Zakaj prečna in vzdolžna?

Reakcija indukta:

magnetno vzbujanje statorja zaradi lastnega statorskega toka

Indukt je stator, ki nosi običajno trifazno ali polifazno navitje, po katerem tečejo tokovi. Ti tokovi v statorskem navitju vzbujajo magnetno polje v zračni reži. Reakcija indukta ima konstantno amplitudo in se v prostoru vrti s hitrostjo n . Statorski tokovi (reakcija indukta) morajo torej imeti isto frekvenco kot inducirana napetost, če naj se reakcija indukta vrti z isto hitrostjo kot magnetno kolo oz. rotor stroja. Statorski tokovi dodatno magnetijo zračno režo in glavni magnetni krog stroja. ^{bikantkostižni} Dodaten magnetni tok, ki ga rotor sprosti, je rotorški enosmerni vzbujalni tok. Kot rezultat obeh pa je rezultirajoče magnetno polje. Oba vzbujalna toka, pri trajnem stanju, ne vplivata direktno drug na drugega, kot pri transformatorju.

Sinhronska reaktanca:



Omogoča nam računanje in analizo delovanja stroja samo s statorskimi veličinami in podatki. Običajne vrednosti so v mejah $0,9 < X_s < 2,5$. Če združimo induktivna padca zaradi stresanja ($I_2 \cdot X_{o2}$) in zaradi reakcije indukta ($I_2 \cdot X_a$) dobimo induktivni padec napetosti kot kaže slika levo. Od tu dobimo nadomestno reaktanco $X_s = X_{o2} + X_a$. Sinhronska reaktanca je močno odvisna od zračne reže. Na to vpliva X_a , ki je ob majhni zračni reži večji, ker tokovi lažje magnetijo. Zračno režo diktira tako kompromis med potrebnim vzbujanjem in zahtevano sinhronsko reaktanco.

Če imamo stroj z izraženimi poli, razdelimo reakcijo indukta na njen vpliv v prečni in vzdolžni smeri.

V vzdolžni smeri deluje $V_{2d} = V_2 \sin \psi$, v prečni smeri pa $V_{2q} = V_2 \cos \psi$. Vzdolžna reakcija indukta vzbudi vzdolžni sekundarni fluks Φ_{2d} , prečna pa prečnega Φ_{2q} . Ker pa zračni reži v d in q osi nista enaki, reakcija indukta v prečni smeri vzbudi manjši fluks, kot vzdolžna.

Posledica tega je, da rezultirajoči sekundarni fluks Φ_2 ni v isti smeri kot celotna reakcija indukta. Vzdolžna in prečna komponenta statorskega toka I_2 nam povzročita vzdolžni in prečni padec inducirane napetosti:

$$E_{ad} = I_{2d} X_{ad}$$

$$E_{aq} = I_{2q} X_{aq}$$

Pri izraženih polih se torej reakcija indukta pokaže na strani statorskih napetosti kot padec napetosti na navideznih reaktancah X_{ad} in X_{aq} . Pri tem je X_{ad} večji, ker je reaktanca indukta v vzdolžni smeri bolj učinkovita, zaradi manjše zračne reže, kot v prečni.

VZDOLŽNA sinhronska reaktanca: $X_{sd} = X_{ad} + X_{o2}$

PREČNA sinhronska reaktanca: $X_{sq} = X_{aq} + X_{o2}$

$X_{o2} \rightarrow$ stresano magnetno polje ne kaže izraženosti, ker nanj ne vpliva rotor (je v obeh smereh enaka).

relativna

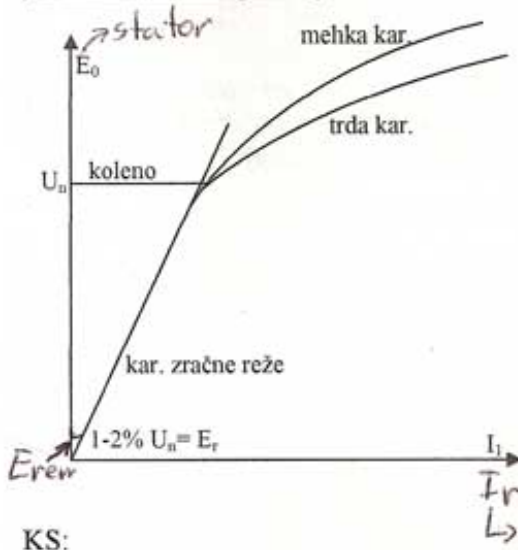
$$X_{sr} = \frac{X_s}{Z_{osn}}$$

$$Z_{osn} = \frac{U_n}{I_n}$$

11. Preizkus praznega teka in kratkega stika (kazalčni diagram KS, obe karakteristiki)?

PT: *vrtime ga z motorjem pri 1500* → *statorske sponke so odprte* → *merimo napetost na statorju*
 Stroj tu ni obremenjen ($I_2=0$). Z vzbujanjem magnetimo železo in zračno režo. Ker pa rabimo veliko več ampernih ovojev za magnetenje reže, lahko magnetenje železa zanemarimo. Magnetilni tokovi pri SS-u so lahko veliki, ker mora magnetna krivulja 2× čez režo.

Karakteristika magnetenja:

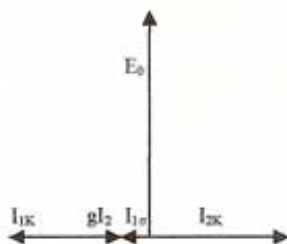


Pri dvojnem toku bo v reži dvojna gostota, zato je, dokler magnetimo le režo, karakteristika linearna. Ker pa ima tudi železo neko B-H karakteristiko, pride v nasičenje in karakteristika ni več linearna.

$$P = P_{\text{rot}} + P_{\text{cu, stat.}} + P_{\text{er, vent}}$$

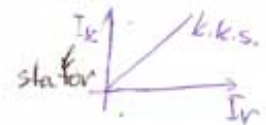
KS:

Sponke trifaznega statorskega navitja so vezane kratko ($U_2=0$). Rotorske magnetne vzbujamo z rotorskim kratkostičnim tokom I_{1k} , ki daje fiktivno napetost E_0 . Celotna ta napetost se porabi samo za notranje padce napetosti v stroju (zanemarimo R_2). Celotna upornost stroja je tako samo sinhronska reaktanca X_s , ki je v KS-u:



$$E_0 = I_{2k} X_s$$

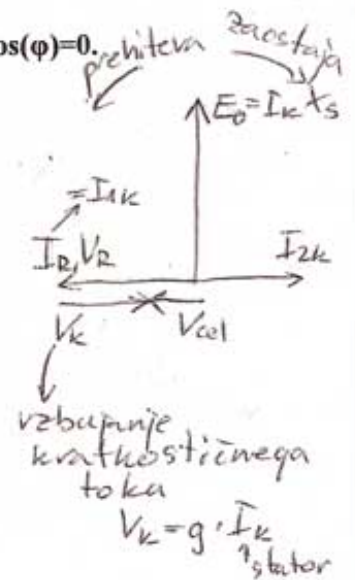
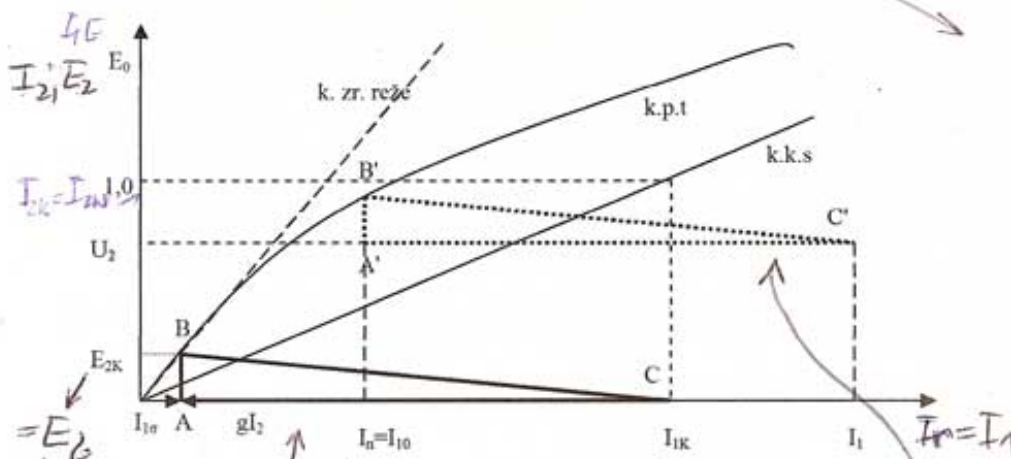
$g \cdot I_2$...kompenzacija reakcije indukta



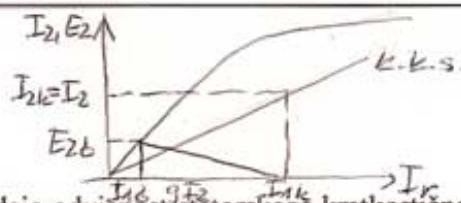
V KS-u je E_2 le 20% nazivne napetosti, ker se inducira le napetost, ki krije padce napetosti zaradi stresa

$$E_{2k} = I_{2k} X_o \quad P_k = P_{\text{er, vent.}} + P_{\text{cu, stat.}}$$

12. Opis Potierovega trikotnika in določitev vzbujanja za nazivni tok ter $\cos(\phi)=0$.



velja samo če je I_k popolnoma induktiven (tudi pri napetosti U_2)

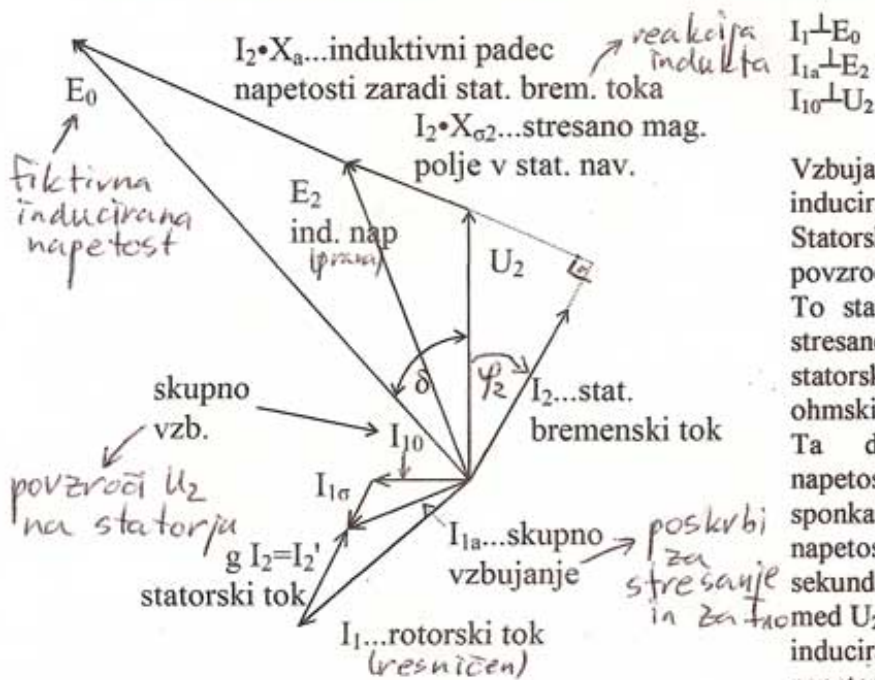


Karakteristika KS-a daje odvisnost statorskega kratkostičnega toka I_{2K} od vzbujalnega I_{1K} . To je premica, saj je v KS-u sinhronska reaktanca X_S praktično konstantna, ker je železno jedro daleč od magnetnega nasičenja.

SS je v KS-u vzbujen s takšnim tokom I_{1K} , da je statorski tok I_{2K} enak nazivnemu I_{2n} . Večina vzbujalnega toka I_{1K} je potrebno za kompenzacijo reakcije indukta $g \cdot I_2$. Preostanek vzbujalnega toka pa daje inducirano napetost E_{2K} za induktivni padec napetosti. Tako dobimo Potierov trikotnik.

Pri popolnoma induktivnem toku statorja I_2 ($\cos(\varphi)=0$), vedno nastane ta trikotnik reakcije indukta in inducirane napetosti $E_{2K}=I_{2K} \cdot X_p$ zaradi stresanja. Samo da se, pri neki dani napetosti U_2 , premakne z vrhom B po KPT in tako dobimo vzbujanje I_{1a} , za nek $\cos(\varphi)=0$ in I_{1a} . E_{2K} imenujemo tudi Potierov padec napetosti na Potierovi reaktanci X_p (reaktanca zaradi stresanja statorskega navitja).

13. Kazalčni diagram sinhronskega turbogeneratorja (opis posameznih kazalcev)

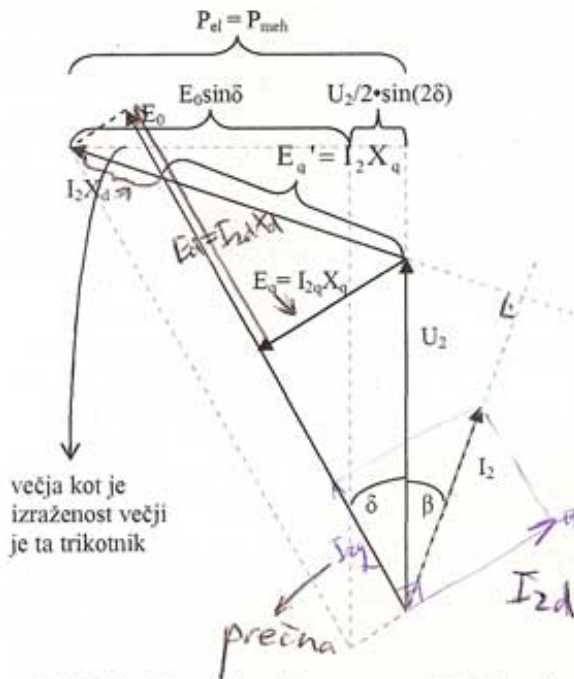


Vzbujalni tok I_{1a} povzroči inducirano napetost E_2 . Statorski bremenski tok I_2 pa povzroči dva padca napetosti. To sta padec napetosti zaradi stresanega magnetnega polja v statorskem navitju $I_2 \cdot X_{\sigma 2}$ in ohmski padec napetosti $I_2 \cdot R_2$. Ta dva padca zmanjšata napetost E_2 na napetost na sponkah U_2 (to je gonilna napetost, ki žene I_2). Breme na sekundarni strani diktira kot φ_2 med U_2 in I_2 . V sliko vrišemo še inducirano napetost E_0 (fiktivna napetost), ki bi se inducirala v statorskem navitju, če nebi bilo

statorskega toka I_2 . Smer I_{10} je smer skupnega vzbujanja, ki ne sovпада z magnetno osjo rotorja. Kot δ (kolesni kot oz. navorni kot) kaže na izmik rotorja iz skupnega magnetnega polja. Stroj v takem stanju, kot je na sliki, daje delovno moč in jalovo induktivno moč bremenu.

14. Kazalčni diagram SG z izraženimi poli?

Obremenjen stroj



poznavati moramo
 β in δ
 ϕ_2

večja kot je izraženost večji je ta trikotnik

$I_{2d} \rightarrow$ vzdolžna

prečna

15. Kaj je "kratkostično razmerje"? Izračun sinhronske relativne reaktance v vzdolžni smeri.

I_{1k} - rotorški tok, ki v k.s. po statorju požene nazivni tok

Kratkostično razmerje:

Dobimo ga iz razmerja tokov I_{10} in I_{1K} (glej Potierov trikotnik), ki dasta nazivno napetost v PT-ju U_{2n} in nazivni tok I_{2n} v KS-u ($X_{srel} \rightarrow$ relativna sinhronska reaktanca):

rotorska tokova \rightarrow

$$\frac{I_{10}}{I_{1K}} = \frac{U_{2n}}{X_S} I_{2n} = \frac{1}{X_{srel}}$$

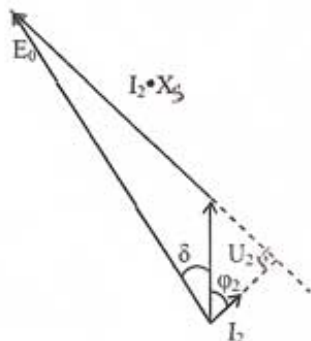
$I_{10} = I_n =$ vk prostega teka rotorja

Vzdolžna smer oz. d-os, je smer t.i. največje magnetne prevodnosti. Pravokotna na to pa je prečna smer. Med njima je kot ene polovice polove delitve ($\tau_p/2$). Vzbujalni tok I_1 vedno teče v vzdolžni smeri. Reakcijo indukta V_2 razdelimo na vpliv v vzdolžni in prečni smeri. $I_{2d} = I_2 \sin \psi$
 Vzdolžna reakcija indukta $V_{2d} = V_2 \cdot \sin(\psi)$, vzbudi vzdolžni sekundarni fluks Φ_{2d} . Tudi statorski tok bo imel dve komponenti. Prečna $I_{2q} = I_2 \cdot \cos(\psi)$. Magnetni fluks Φ_{2d} bo induciral v statorju napetost $E_{ad} = I_{2d} \cdot X_{ad}$ (induciran padeč napetosti zaradi vzdolžne reakcije induktivega toka). Torej reakcija indukta se pokaže kot padeč napetosti na navidezni reaktanci. Ko seštejemo reaktanco, ki ponazarja reakcijo indukta, v vzdolžni smeri, ter reaktanco zaradi stresanja statorskega polja (X_{ad} in $X_{\sigma 2}$) dobimo vzdolžno sinhronsko reaktanco v vzdolžni smeri X_d .

$V_{2d} = V_2 \sin \psi$
 $I_{2d} = I_2 \sin \psi$
 $E_{ad} = I_{2d} X_{ad}$

$X_d = X_{\sigma 2} + X_{ad} \rightarrow E_{ad} = I_{2d} X_{ad} \rightarrow I_{2d} = I_2 \sin \psi \rightarrow (\psi + \delta)$

16. Mehanska moč (vrtilni moment) potrebna za turbogenerator (izpeljava).



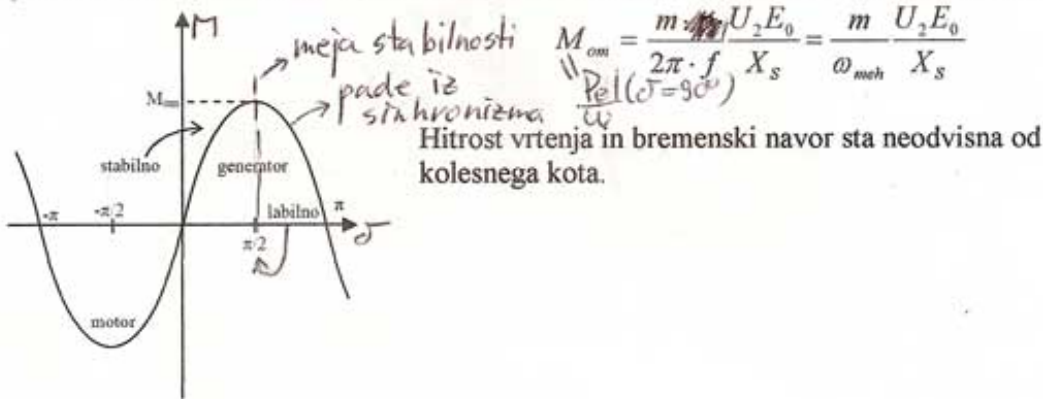
Mehanska moč se prenaša preko vrtilnega magnetnega polja od rotorja in se obenem pretvarja v električno moč statorskega navitja. Če zanemarimo vse izgube (mehanske in električne) je stroj obremenjen po narisani sliki. Rotorški vzbujalni tok I_1 mora vzbuditi tako fiktivno napetost E_0 , da je med E_0 in U_2 ravno padeč napetosti na sinhronski reaktanci stroja $I_2 \cdot X_s$.

Za moč velja: $P_{meh} = P_{el}$. Za m fazni stroj bo enačba naslednja $P_{el} = m I_2 U_2 \cos \varphi$
 Lahko pa moč izračunamo tudi s pomočjo kolesnega kota in napetostima E_0 in U_2

$m I_2 U_2 \cos \varphi = P_{el} = m \frac{E_0 U_2}{X_s} \sin \delta = M \omega_{meh}$. To je tudi t.i. delovna moč. Imamo pa tudi jalovo moč:

$$P_{jalova} = I_2 X_s \cos \varphi_{2n} = E_0 \sin \delta.$$

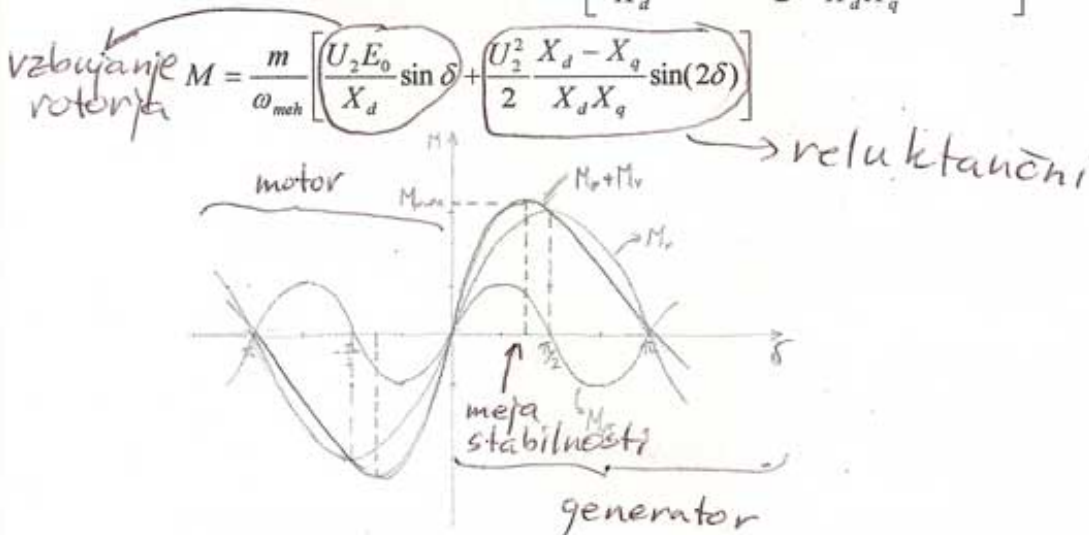
Navor dobi svojo največjo vrednost pri kolesnem kotu $\pm 90^\circ$. Tu razvije stroj t.i. omahni moment (M_{om}), kar je največ kar ga lahko obremenimo. Če zunanji navor le malo povečamo, stroj omahne in se ustavi, lahko pa se celo pokvari. To je torej meja statične stabilnosti SS-a.



17. Mehanska moč (vrtilni moment) potrebna za SG z izraženimi poli (izpeljava).

Glej sliko pri vpr. 14.

$$P_{el} = P_{meh} = m \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi = m \left[\frac{U_2 E_0}{X_d} \sin \delta + \frac{U_2^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin(2\delta) \right]$$

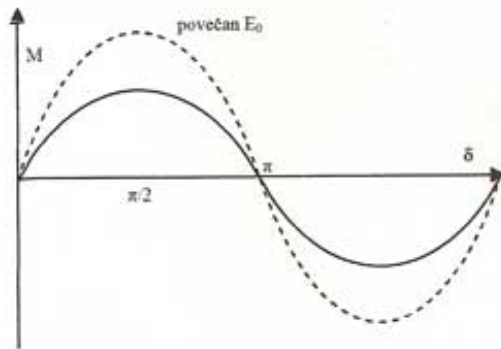


Navor je sestavljen iz dveh komponent. Prva je navor zaradi vzbujanja rotorja (M_{vr}), na katerega vpliva E_0 in je odvisen od kolesnega kota, namesto X_s pa upoštevamo X_d . Drugi del je t.i. **reluktančni navor** (M_r), ki nastane samo pri stroju z izraženimi poli, ko X_d ni enak X_q . Zanj je potrebna samo napetost U_2 , ne pa tudi E_0 . Njegova karakteristika se spreminja s sinusom dvojnega kolesnega kota. Največji navor M_{max} je pri kotu nekaj manjšem kot 90° , spreminja pa se še s spreminjanjem vzbujanja E_0 . Če se spremeni E_0 se spremeni M_{vr} , M_r pa ostane konstanten. Če vzbujanja ni ($E_0 = 0$), stroj omahne pri 45° .

18. Karakteristika delovna moč-kolesni kot za oba tipa SS-a. Meja statične stabilnosti.

Glej vprašnji 16. in 17.

19. Kakšen vpliv ima spreminjanje parametrov SS-a na stabilnost delovanja (glej enačbo za moment)?

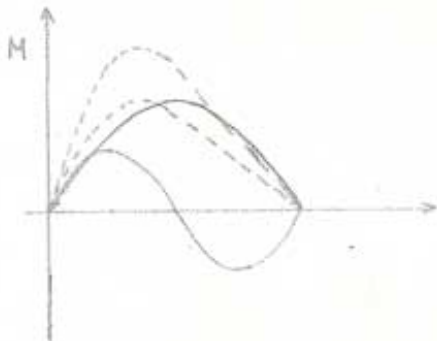


CILINDRIČNI SS: $M_{om} = \frac{m}{\omega_{meh}} \frac{U_2 E_0}{X_s} \sin \delta$ (toga omrežje 220V)

Z večanjem vzbujanja se večja E_0 in s tem M_{om} . Tako mu povečamo stabilno stanje. SS z manjšim X_s bi imel višjo karakteristiko navora in večji omahni navor. To dosežemo z večjo zračno režo.

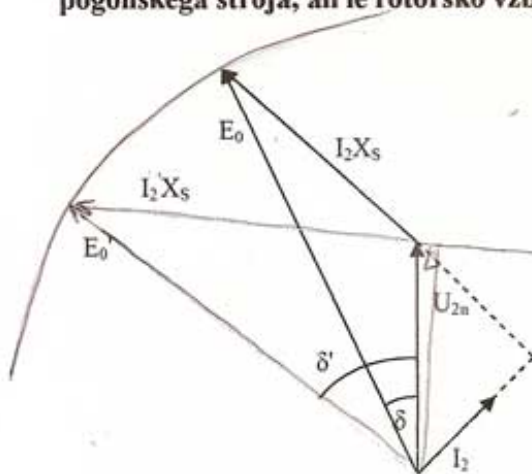
kar pa zahteva močnejše rotorsko vzbujanje in s tem večje rotorsko navitje, kar je dražje

SS Z IZRAŽENIMI POLI:



Pri temu stroju nastopi M_{max} pri $\delta < \pi/2$ zaradi reluktančnega navora. Če povečamo vzbujanje, se nam bo sinhronski del navora povečal, reluktančni del navora pa ostane enak. Zato se vsota $M_{max} = M_v + M_r$ spremeni in s tem se spremeni tudi oblika in lega M_{max} .

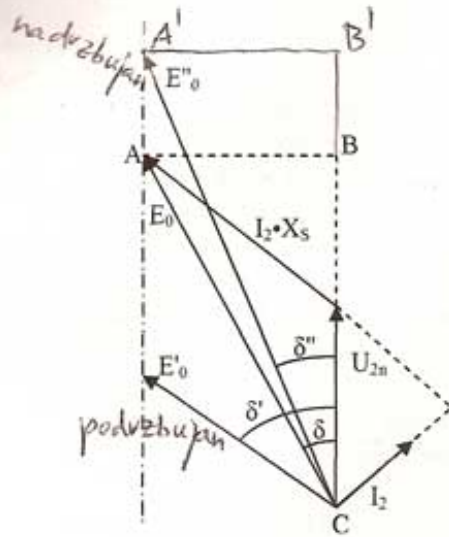
20., 21. Kako se spreminja delovanje turbogeneratorja, če večamo le mehansko moč pogskega stroja, ali le rotorsko vzbujanje?



→ Večamo le MEH. MOČ:

- $E_0 = \text{konst};$
- $U_{2n} = \text{konst};$
- $I_1 = \text{konst (toga mreža)}$

Pri večanju mehanske moči, se večja delovna komponenta toka I_2 , ker se povečuje δ . $P_{delovna}$ lahko povečujemo le toliko časa, dokler ne presežemo P_{om} , kajti drugače pade iz sinhronizma. pri $\delta' = 90^\circ$



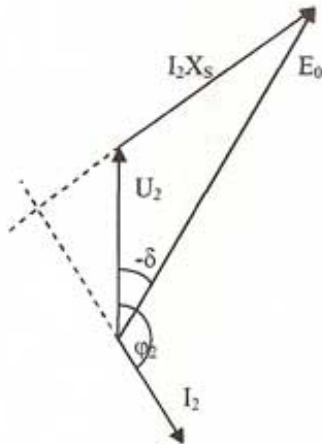
→ večamo le ROTORSKO VZBUJANJE:
 $P_{\text{meh}} = P_d = \text{konst}$;
 spreminjamo I_v

Če povečamo vzbujačni tok I_v , se poveča tudi E_0 . Delovna komponenta moči ostane konstantna (daljica AB), zato je edina možnost, da se E_0 giblje po premici vzporedni U_2 . Zato se spreminja le jalova komponenta moči (premica BC). Ta se bo povečala, če bomo zvečali vzbujačni tok in obratno. Poznamo dve stanji generatorja:

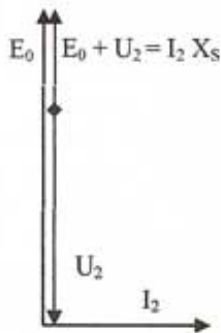
- nadvzbujen gen. → proizvaja jalovo moč (podnevi)
- podvzbujen gen. → troši jalovo moč (ponoči)

Tako pridemo do zaključka, da s spreminjanjem mehanske moči vplivamo na proizvod delovne moči, s spreminjanjem vzbujaanja pa na proizvod jalove moči.

22. Kako delujeta sinhronski motor in kompenzator (kazalčni diagram s turbo izvedbo)?



Pri generatorskem delovanju E_0 prehitava napetost na sponkah U_2 , če pa obrnemo smer delovanja zunanjega navora dobimo motorsko delovanje, ki je prikazano na sliki. To delovanje daje negativno moč in navor. Pri motorskem obratovanju sila vleče rotor v smeri vrtenja. SM-ji se morajo vrteti ves čas z isto hitrostjo. Ne smemo spreminjati obremenitve (dolgo časa delajo isto stvar).



Sinhronski kompenzator (SK):

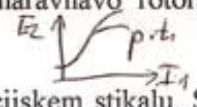
Če SS deluje kot kompenzator ima kazalčni diagram na sliki. V tako stanje ga spravimo tako, da ga nadvzбудimo. Omrežje ga čuti kot čisto kapacitivno "breme". SS dobavlja omrežju jalove tokove za induktivna bremena in s tem razbremenjuje ostale generatorje v omrežju.

↳ kot da bi bil priključen na omrežje kondenzator

↳ ne potrebuje pogona, vendar se samo v sinhronizmu vrti na omrežju

23. Sinhronizacija SS-a na omrežje.

SS-a ne moremo kar priključiti na omrežje napetosti U_2 in frekvence f_2 . SS deluje samo v primeru, da se njegova hitrost vrtenja ujema s frekvenco napetosti po enačbi $n = f \cdot 60 / p$. Paziti pa moramo tudi, da pri priklopu ne nastanejo tokovni in navorni sunki, ki lahko poškodujejo stroj in ostale naprave v omrežju. Pri sinhronizaciji brez sunkov moramo izpolniti naslednje pogoje:

- Enaki frekvenci omrežja in SS-a ($f_2 = f_s$). To dosežemo z naravnano hitrostjo vrtenja rotorja z $n = f_2 \cdot 60 / p$
- Enaki napetosti omrežja in SS-a ($U_2 = E_0$). To dosežemo z naravno rotorskega vzbujalnega toka I_1 , ki je preko karakteristike PT-ja povezan z E_0 , 
- Enaki fazni zaporedji priključkov omrežja in SS-a na sinhronizacijskem stikalu. S tem zagotovimo vrtenje obeh sistemov v isto smer,
- Enaki fazi omrežne napetosti U_2 in strojeve napetosti E_0 .

Ko so vsi ti pogoji izpolnjeni je napetost na sinhronizacijskem stikalu nič ($\Delta U=0$) in stroj lahko priklopimo na omrežje, brez da bi s tem nastal kakšen sunek.

- motorjevi-žagonska kletka (kratkostična) na rotorju; rotorsko vzbujalno navitje kratko vezano
- v prostem teku doseže skoraj sinhronizem
- vklopimo sinhronizacijsko stikalo in ga obenem vzbudimo
- skoči v sinhronizem (tokovni sunek)

Asinhronski stroji:

1. Kako deluje asinhronski motor (fizikalna slika)?

AS je el. stroj anjših in srednjih moči. Deluje tako, da njegovo statorsko navitje priključimo na trifazni vir napetosti. V stroju se vzbudi glavno vrtilno polje, ki oklepa tudi rotorsko navitje. V obeh navitjih se inducira napetost. Rotorska ind. napetost požene po rotorskemu navitju tok, ki tvori z vrtilnim poljem navor. Vezje, ki daje največji rotorski tok, je KS rotorskega navitja, zato so palice, v utorih rotorja, med seboj električno sklenjene. Zaradi navora se rotor začne vrteti. Da se ohrani napetostno ravnotežje med vsiljeno in inducirano napetostjo v statorskem navitju, mora ostati vrtilno polje nespremenjeno. Zato bo v statorskem navitju stekel tok, ki bo kompenziral dodatno mag. vzbujanje rotorskega toka (kot pri tr.). Moč priteka iz stat. navitja in se preko vrtilnega polja prenaša v rotor.

2. Kakšni so rotorji AM, kako se inducira v njih napetost, kakšen je slip, kakšna je frekvenca toka in napetosti?

Imamo dve vrsti rotorjev:

- navit rotor (tri faze) - *zdviguimi obroči*
- rotor s kratkostično kletko (je termično in mehansko zelo robusten)

Induciranje napetosti:

Statorsko navitje priključimo na trifazno napetostno omrežje (U_1). Tako se vzbudi vrtilno polje Φ , ki se vrti v zračni reži s sinhronsko hitrostjo $n_s = f \cdot 60/p$. V statorskem faznem navitju se inducira napetost $E_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi \cdot k_{n1}$. Isti fluks oklepa tudi sek. navitje v katerem se inducira $E_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi \cdot k_{n2}$.

Napetostna prestava je naslednja: $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 k_{n1}}{N_2 k_{n2}}$. Za vzbujanje mag. polja, bo teklo po

primarnem navitju magnetilni tok I_m . Ta tok se ravna po magnetnem uporu mag. kroga, kot pri tr. Za zmanjšanje tega jalovega toka gradimo stroje s čim manjšo zračno režo.

Ind. napetost E_2 požene po stroju sekundarni tok, za katerega si prizadevamo, da je čim večji. Zato so rotorska navitja večinoma v KS-u. Rotorski tok z vrtilnim poljem tvori navor, ki nam zavrti rotor. Rotor bo pospeševal toliko časa dokler elektromag. navor ne bo imel vrednosti bremenskega. Rotorska napetost se inducira toliko časa, dokler rotorsko navitje reže vrtilno polje. Ko se rotor vrti, hitrost rezanja rotorskih palic navitja v vrtilnem mag. polju ni več enaka kot pri stoječem rotorju. Upoštevati moramo sedaj relativno hitrost med vrtilnim poljem in vrtečim se rotorjem. Zato vpeljemo pojem slipa, ki nam pove, kolikšna je relativna vrednost hitrosti rotorja proti polju:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

kjer je n_s sinhr. hitrost polja, n pa hitrost vrtenja rotorja.

Inducirana napetost E_1 bo še vedno ista, napetosti E_2 pa se bo, zaradi vrtenja rotorja, spremenila frekvenca. Frekvenca rotorske napetosti f_2 , bo enaka frekvenci rezanja rotorja v vrt. polju $\rightarrow f_2 = s \cdot f_1$. Inducirana nap. na rotorju bo $E_2 = s \cdot E_{20}$, kjer je napetost E_{20} na rotorju, ko stroj stoji in sta frekvenci statorja in rotorja enaki.

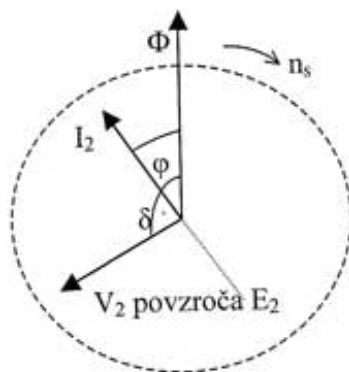
Tok I_2 pri stoječem rotorju, je posledica ind. nap. E_2 : $I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$. Ko se rotor vrti; se rotorski tok še vedno računa po tej formuli, le da se, zaradi spremembe frekvence sekundarne napetosti spremeni E_2 in X_2 : $I_2 = \frac{s \cdot E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (s \cdot X_2)^2}}$.

3. Kazalčni diagram zavrtega AM in primerjava s tr.. Velikost kratkostičnega rotorskega toka.

AM z odprtim in stoječim rotorskim navitjem lahko izkoristimo kot transformator z napetostno prestavo $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 k_{n1}}{N_2 k_{n2}}$. Fazni premik med primarno in sekundarno napetostjo je dan s kotom zavrtitve po enačbi $\varphi = p\alpha$ (φ je fazni kot, α je mehanski kot). Običajno uporabljamo tak tr. v avtotransformatorski vezavi in je znan pod imenom avtotransformator. Pri obremenitvi se pojavi elektromagnetni navor, ki hoče zavreti rotor, zato mora biti ta močno zavrt. Da ind napetost požene čim večji tok po rotorskem navitju, poskrbimo tako, da ga kratko vežemo.

Ena faza rotorskega navitja ima upornost: $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}$, Tako je sekundarni tok

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}, \text{ fazni kot med } E_2 \text{ in } I_2 \text{ pa } \cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}.$$



Vrtilno mag. polje se vrti z n_s in v rotorju inducira E_2 . Ta napetost požene I_2 , ki fazno zaostaja za φ_2 . V prostoru se ta fazni zamik manifestira kot prostorski premik. Magnetno vzbujanje V_2 je premaknjeno proti Φ za t.i. navorni kot: $\delta = 90^\circ + \varphi_2$. Navor se bo pri AS spreminjal s sekundarnima tokom in faznim kotom (I_2 in φ_2).

4. Vrtilno mag. polje trifaznega sistema (levo in desno, hitrost, izpeljava).

Odgovor je isti kot pri SS-u vprašanje 9.

Trifazno porazdeljeno navitje je sestavljeno iz treh enofaznih, ki so med seboj zamaknjene za 120° . Imamo 3 leva in 3 desna vrteča polja. Seštejemo vsa polja, ki se vrtijo v desno in vsa, ki se vrtijo v levo:

DESNO

$$\sum B_d = \frac{3}{2} B_{\max} \sin\left(\frac{x}{\tau_p} \pi - \omega t\right)$$

Vsota da desno vrteče trifazno polje, ki potuje z amplitudo $3/2 B_{\max}$.

LEVO

$$\sum B_l = 0$$

Vsota treh levo se vrtečih polj je vsota treh sinusnih funkcij, od katerih ima vsaka za 120° večji kot od prejšnje. In tako polje ima v vseh točkah prostora x in v vseh časih t vrednost 0. torej levo polje izgine.

Simetrično trifazno navitje vzbudi krožno vrtilno magnetno polje, ki se vrti po enačbi $n = f \cdot 60/p$, če tečejo po navitju simetrični tokovi. Če ta pogoj ni izpolnjen se levo polje ne izniči. Pravimo, da ima polje inverzno komponento.

Smer vrt. polja lahko tudi spremenimo, če zamenjamo dva fazna priključka.

5. Velikost rotorskega toka. Ekvivalentna shema rotorja. Delitev moči v rotorju.

Tok v rotorskem navitju pri stojčem rotorju: $I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$

Tok v rotorskem navitju pri vrtenju: $I_2 = \frac{s \cdot E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (s \cdot X_2)^2}}$ /: s

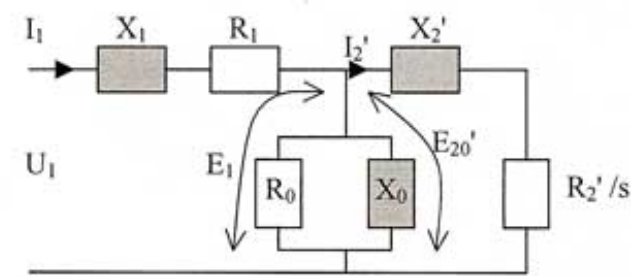
Fazni kot: $\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$

Rotorske veličine zreduciramo na statorsko (primarno) stran in dobimo E_{20}' , E_2' , R_2' in X_2' .

↳ izenačili smo tudi statorsko in rotorsko frekvenco

$I_2 = \frac{E_{20}'}{\sqrt{(R_2'/s)^2 + X_2'^2}}$ → dobimo ekvivalentno vezje kot pri tr. (E_{20}' in X_2' nista odvisna od

slipa)



spodaj.

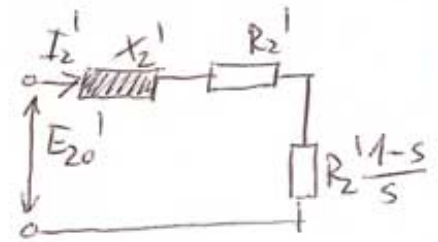
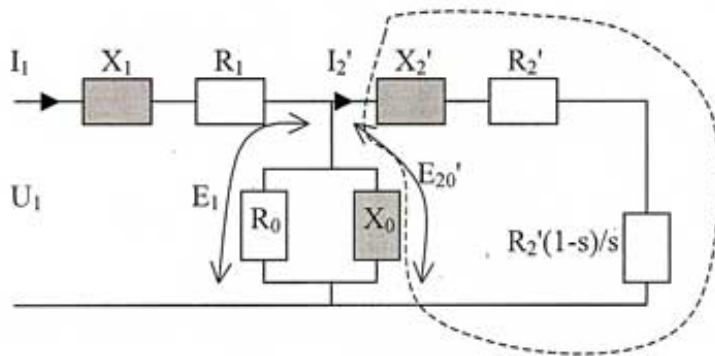
Pri zavrtem rotorju, ko je $s = 1$ in $f_1 = f_2$, deluje stroj kot transformator.

Ohmska upornost v vezju R_2'/s ni prava upornost v vezju, zato jo razdelimo na vsoto prave in preostale upornosti:

$R_2'/s = R_2' + R_2'(1-s)/s$. Tako dobimo izpopolnjeno vezje AM

ker je v resnici upornost navitja stalna, ne pa odvisna od slipa

Del vezja obkrožen s črtkano črto je EKVIVALENTNO VEZJE ROTORJA.



Delitev moči v rotorju:

Moč ki se pretaka v AS ima tri oblike. Na primarni strani imamo električno moč, ki priteka iz omrežja v stroj. Na gredi motorja imamo mehansko moč, ki jo stroj odda bremenu. Imamo pa tudi izgubo moči zaradi toplote.

Moči v rotorju:

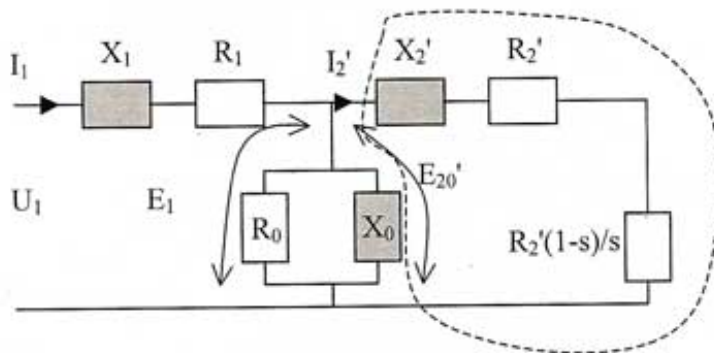
→ moč vrtilnega mag. polja: to je moč, ki skozi režo prehaja iz statorja na rotor in je zaradi padcev v železu in bakru statorja manjša od P_{meh} .

$$P_{vp} = M_b \omega_s = \frac{P_{meh}}{1-s} = P_{Cu2} + P_{meh} \quad \text{Če zanemarimo trenje in ventilacijo } P_{tr,v}$$

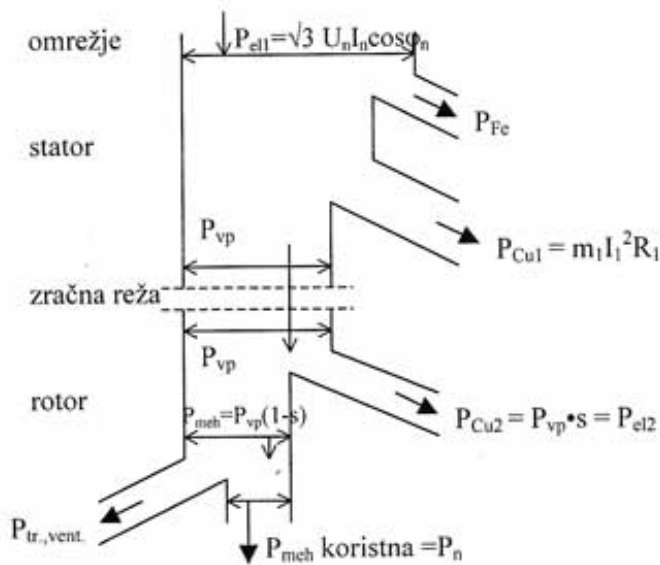
→ izgubna moč v rot. navitju: $P_{Cu2} = m_2 I_2'^2 R_2' = P_{vp} s$

→ moč v upor: $P_{meh} = m_2 I_2'^2 R_2' \frac{1-s}{s} = P_{vp} (1-s) \rightarrow$ mehanska moč
 ↳ niresnična upornost

6. Ekvivalentna shema AM. Energijska bilanca za motor in generator.

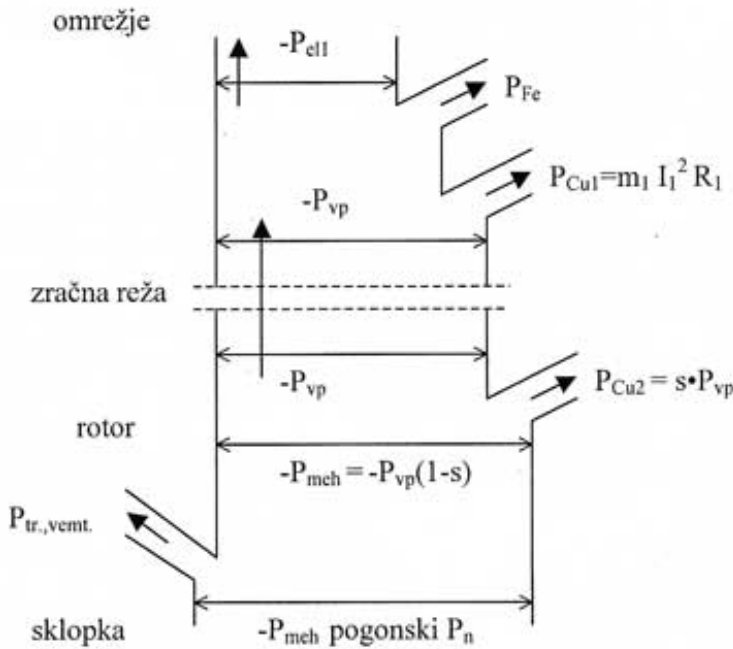


Energijska bilanca motorja:



Iz omrežja priteka na stator moč P_{el1} . Del te moči se zgubi pri magnetenju železa P_{Fe} , del pa v statorskem navitju P_{Cu1} . Preostanek moči prenese vrtilno polje preko zračne reže v rotor kot moč vrtilnega polja P_{vp} . V rotorju se je del izgubi zaradi jouskih izgub, preostanek pa gre v mehansko moč rotorja P_{meh} . Del te pa se ponovno izgubi na ležajih rotorja in za poganjanje ventilatorjav za hlajenje stroja. Preostalo moč dobimo kot koristno oz. netto moč, ki se uporabi za poganjanje stroja.

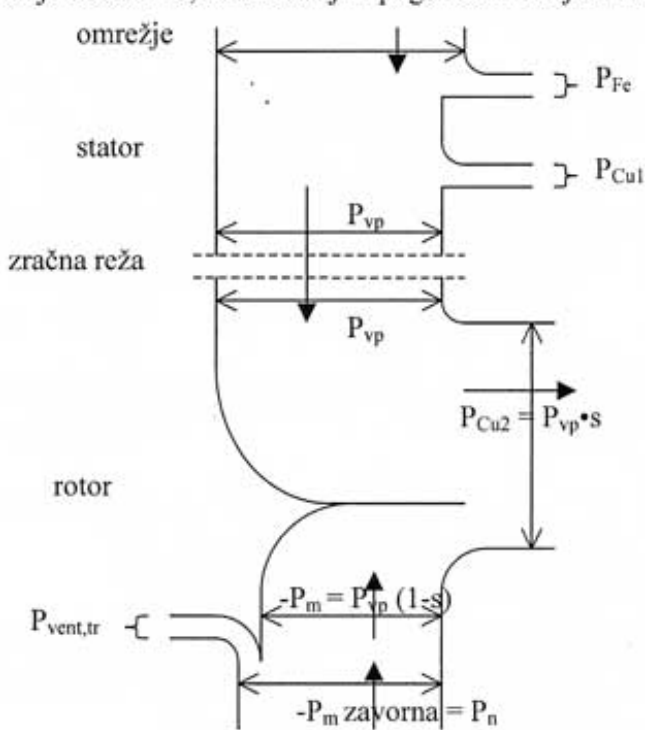
Energijska bilanca generatorja:



7. Energijska bilanca AM v zavornem področju. Kdaj lahko dela v tem področju?

$s > 1$

Rotor se vrti v nasprotno smer vrtilnega polja, torej z negativno hitrostjo vrtenja (-n). To stanje dosežemo, če z zunanjim pogonskim strojem vrtimo rotor proti smeri vrtilnega polja.



Moč vrtilnega polja je sedaj $P_{vp} = \frac{P_{Cu2}}{s}$. Ker je slip večji od 1 in pozitiven, je moč vrtilnega polja manjša od P_{Cu} in pozitivna. Mehanska moč pa je zaradi slipa večjega od 1 negativna. Obe moči pritekata v rotor in se uničujeta kot toplotna moč P_{Cu2} v rotorskem navitju ($P_{Cu2} = P_{vp} + P_{meh}$).

$$P_{meh} = -P_{vp}(1-s)$$

$$\left(\begin{aligned} P_{Cu2} &= P_{vp} + P_{meh} \\ &= \frac{P_{Cu2}}{s} - \frac{P_{Cu2}}{s}(1-s) \\ &= \frac{P_{Cu2}}{s} (1 - 1 + s) = P_{Cu2} \end{aligned} \right)$$

v tem področju teče le izjemoma in le za kratek čas:
 - izgubimo več energije kot z zavoro;
 - veliko toplote se sprošča - lahko stopimo izolacijo

8. Momentna karakteristika AS (izpeljava graf).

Navor, če zanemarimo $P_{tr.,vent.}$, je ima naslednjo formulo:

$$M = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{P_m \cdot 60}{2\pi n} = \left(\frac{P_{vp}(1-s)}{\omega_{ms}(1-s)} = \frac{P_{vp} \cdot 60}{2\pi n_s} \right)$$

$$P_m = P_{vp}(1-s)$$

$$\omega_m = \omega_{ms}(1-s)$$

$$\hookrightarrow n = n_s(1-s)$$

Vidimo, da se elektromagnetni navor AS spreminja točno tako, kot se spreminja moč vrtilnega polja (P_{vp}). Torej lahko navor AS izračunamo že iz te moči, ne da bi pri tem morali računati dejansko hitrost vrtenja rotorja.

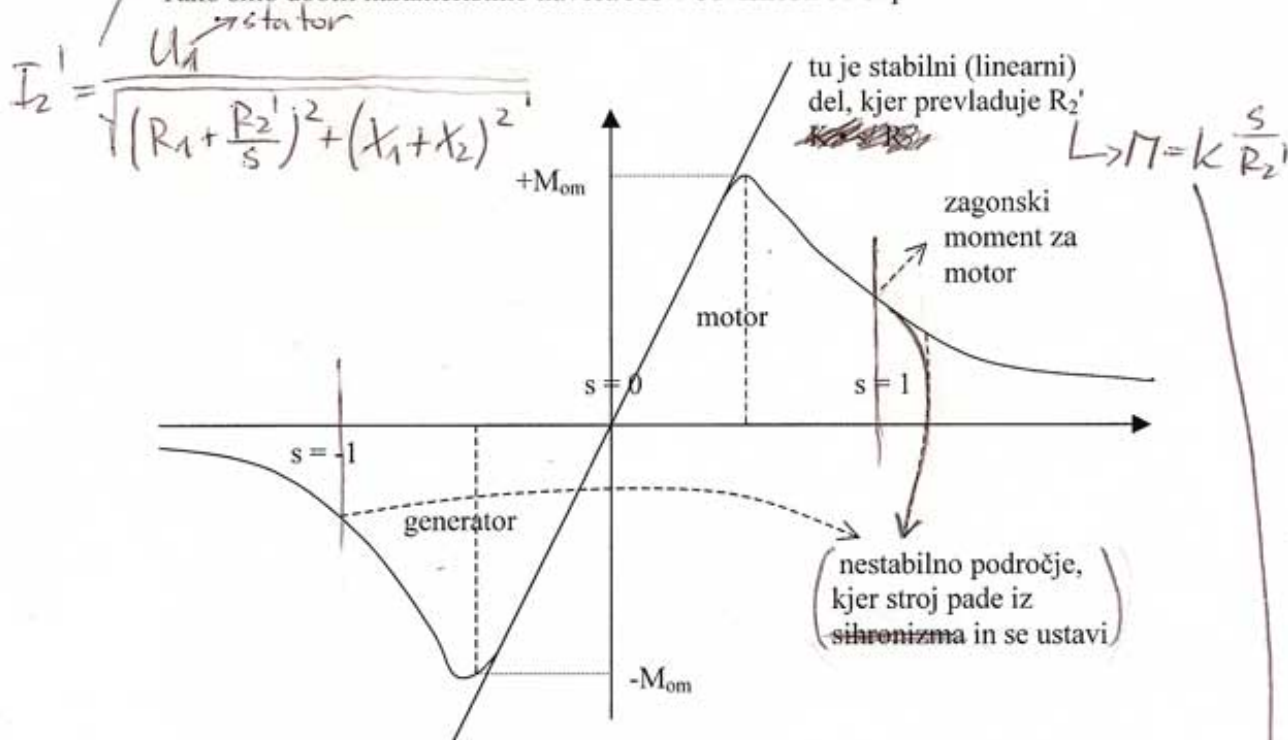
Navor lahko določimo iz poenostavljenega ekvivalentnega vezja. Moč vrt. polja je

$P_{vp} = m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s}$ pri čemer je moment, če zapišemo še formulo za I_2' naslednji:

$$\left(M = \frac{m_1 \cdot 60}{2\pi \cdot n_s \cdot s} \frac{E_{20}^2 R_2'}{(R_2'/s)^2 + X_2'^2} \right)$$

$$I_2' = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_2'^2}}$$

Tako smo dobili karakteristiko navora AS v odvisnosti od slipa



9. Momentna kar. AS v linearnem delu (izpeljava momenta in omahnega slipa, komentar).

Izpeljava:

$$M = \frac{P_{mch}}{\omega_{mch}} = \frac{P_{vp}(1-s) \cdot 60}{2\pi n} = \frac{P_{vp}(1-s) \cdot 60}{2\pi n_s(1-s)} = \frac{P_{vp}}{\omega_s} = \frac{m_1 \cdot 60}{2\pi \cdot n_s \cdot s} \frac{E_{20}^2 R_2'}{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_2'^2}$$

V linearnem delu, je slip zelo majhen ($s \ll 1$), zato R_2' , po velikosti, prevladuje nad vsemi drugimi upornostmi, ki jih zato lahko zanemarimo. Zgornja enačba se zato spremeni v

$$M = \frac{m_1 \cdot 60}{2\pi \cdot n_s} \frac{E_{20}^2}{R_2'} \cdot s = K \frac{s}{R_2'}$$

kar je enačba premice, ko gre skozi $M = 0$ in $s = 0$. To je tudi t.i stabilni del, v katerem delujejo stroji.

Maksimalen navor, ki ga doseže AS, da se ne začne ustavljati, je omahni navor (M_{om}). Stroj večjega navora ne zmore in omahne, če ga še bolj obremenimo. Izračunamo ga iz prve enačbe, tako, da ga odvajamo po spremenljivki s in odvod izenačimo z 0.

$$\frac{dM}{ds} \frac{d}{ds} \left(k \frac{E_{20}^2 R_2'}{(R_2'^2/s + sX_2'^2)^2} \right) = k \frac{E_{20}^2 R_2' (R_2'^2 + s^2 X_2'^2) - 2E_{20}^2 R_2' X_2'^2 \cdot s^2}{(R_2'^2 + s^2 X_2'^2)^2} = 0$$

$$E_{20}^2 R_2' (R_2'^2 + s^2 X_2'^2) - 2E_{20}^2 R_2' X_2'^2 \cdot s^2 = 0$$

$$R_2'^2 + s^2 X_2'^2 - 2X_2'^2 \cdot s^2 = 0$$

$$R_2'^2 - s^2 X_2'^2 = 0$$

$$R_2'^2 = s^2 X_2'^2$$

$k = \frac{m_1 \cdot 60 E_{20}^2}{2\pi n_s R_2'}$

$$E_{20}^2 R_2' (R_2'^2 + s^2 X_2'^2 - 2X_2'^2 s^2) = 0$$

$$s_{om} = \pm \frac{R_2'}{X_2'} = \pm \frac{R_2}{X_2}$$

- + motorski del
- generatorski del

Z R_2' lahko spreminjamo s_{om} oz. naklon linearnega dela karakteristike navora.

10. Velikost omahnega momenta (kako vplivamo nanj?). Klossova enačba

V enačbo $M = \frac{m_1 \cdot 60}{2\pi \cdot n_s \cdot s} \frac{E_{20}^2 R_2'}{(R_2'/s)^2 + X_2'^2}$ v stavimo $s_{om} = R_2'/X_2'$ namesto s in dobimo

$$M_{om} = \pm \frac{m_1 \cdot 60 E_{20}^2}{2\pi \cdot n_s \cdot 2X_2'}$$

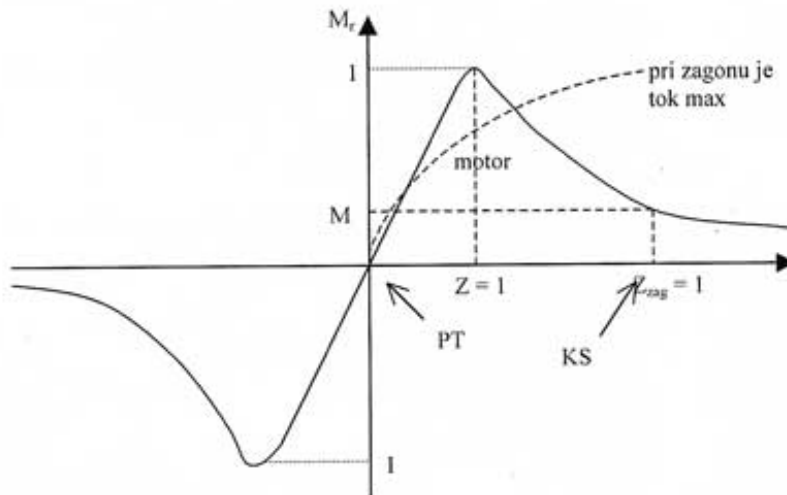
Vidimo, da je omahni moment neodvisen od delovne upornosti v rotorskem tokokrogu, pač pa se spreminjanje R_2' spreminja slip in s tem tudi nagib linearne karakteristike.

Omahni moment se spreminja s spreminjanjem ind. upornosti X_2' (čim večje je stresanje, tem manjši je omahni moment). Tako se znižuje celotna navorna karakteristika. Prav tako nanj deluje tudi vsiljena omrežna napetost E_{20} .

Pri $s = 1$ imamo ZAGONSKI NAVOR

Klossova enačba $\frac{M_{naz}}{M_{om}} = \frac{2}{\frac{s_n}{s_{om}} + \frac{s_{om}}{s_n}}$

11. Normirana oblika Klossove enačbe in enačbe rotorskega toka (diskusija).



$$\frac{M_n}{M_{om}} = \frac{2}{\frac{s_n}{s_{om}} + \frac{s_{om}}{s_n}}$$

$$\frac{M_n}{M_{om}} = M_r ; \frac{s_n}{s_{om}} = Z \rightarrow M_r = \frac{2}{Z + \frac{1}{Z}}$$

$$Z_{zok} = \frac{s_{zok}}{s_{om}} = \frac{1}{s_{om}} = \frac{X_2}{R_2}$$

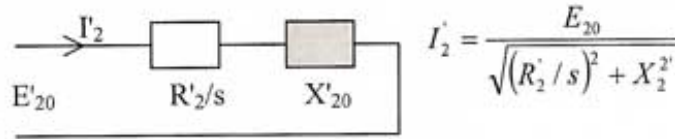
$$I_2 = \frac{E_{20}^2}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_2'^2}} = \frac{E_{20}^2}{X_2'} \frac{1}{\sqrt{(R_2/sX_2')^2 + 1}}$$

\downarrow
 $\frac{s_{om}}{s_n} = \frac{1}{Z}$

$$I_{2r} = \frac{1}{\sqrt{(1/Z)^2 + 1}}$$

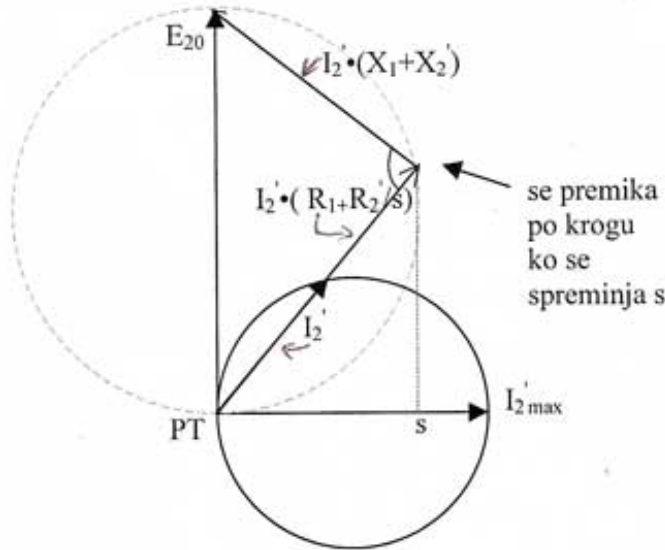
12. Poenostavljeni krožni diagram AS (značilne premice, izpeljava iz enačbe za rotorski tok).

Nad. vezje ~~statorja~~
rotorja



$$I_2' = \frac{E_{20}}{\sqrt{(R_2'/s)^2 + X_2'^2}}$$

Iz enačbe za rotorski tok izpeljemo krožni diagram, ki predstavlja odvisnost toka od slipa.



$$E_{20} = I_2 (R_1 + R_2' / s) + jI_2 (X_1 + X_2')$$

E_{20} je sestavljena iz ohmskega in induktivnega padca napetosti.

Največji tok $I_{2\max}$ nastopi, ko izgineti ohmsak upornost. V tem primeru je

$$\text{slip negativen in znaša: } s = -\frac{R_2'}{R_1}$$

Točko sinhronske hitrosti dobimo, ko je $s = 0$. To je, ko je $I_{20} = 0$. To je v koordinatnem izhodišču, kjer je točka PT-ja. Druga pomembna točka je točka KS-a oz. pri vrednosti slipa $s = 1$. Takrat teče kratkostični tok

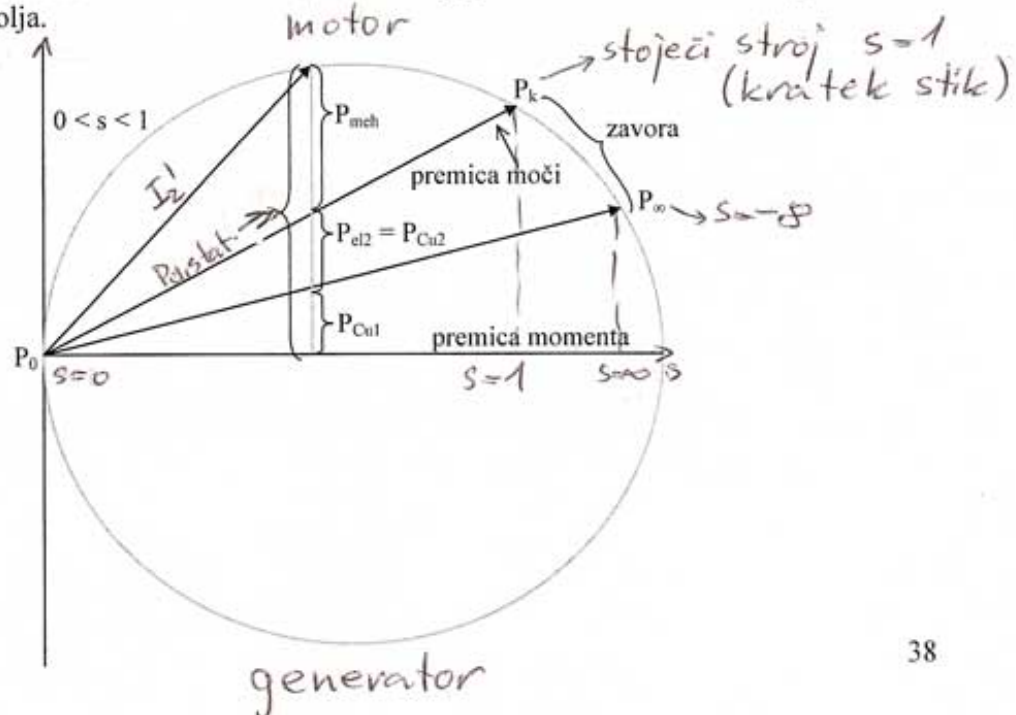
$$I_{20} = 0$$

$$I_{2k} = \frac{E_{20}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (s=1)$$

Tretja pomembna točka pa je, ko je slip neskončen ($s = \pm\infty$). Tu je tok

$$I_{2\infty} = \frac{E_{20}}{\sqrt{(R_1 + 0)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (s \rightarrow \infty)$$

AS se bo približeval isti obratovalni točki, če se bo njegov rotor vrtel v isto ali nasprotno smer vrtilnega polja.

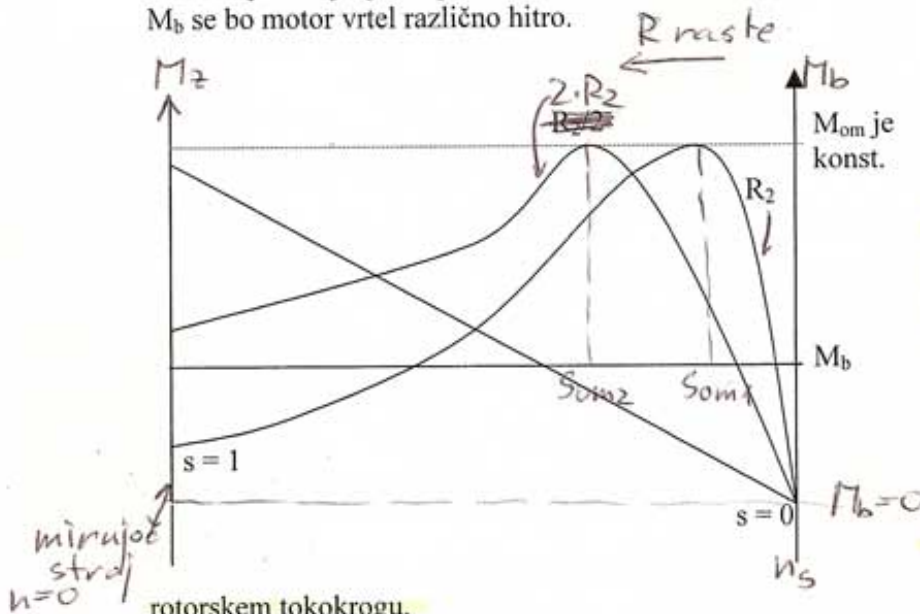


13. Regulacija vrtljajev AM z dodajanjem ohmskih upornosti v rotorski tokokrog.

Z dodajanjem uporov na drsne obroče AM spremenimo karakteristiko navora in toka. Karakteristika navora se spremeni, z dodatnim uporom (R_d) in rotorsko upornostjo (R_2) z vsoto obeh, omahni navor pa ostane nespremenjen. Ta navor pa razvija pri drugem slipu, ki je:

$$s_{om} = \frac{R_2 + R_d}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

Tako s spreminjanjem upornosti dobimo družino navornih karakteristik. Pri stalnem navoru M_b se bo motor vrtel različno hitro.



Sprememba hitrosti je je tem večja, čim večji je navor bremena, kar pomeni, da pri razbremenjenem motorju, sploh ne moremo spreminjati hitrosti rotorja z vključevanjem dodatnih upornosti. Pri počasnejšem vrtenju in pri večjih slipih se več moči P_{vp} pretvarja v toploto oz. izgubo in manj v mehansko moč. Torej je spreminjanje hitrosti z dodatnimi upori povezano z večjimi izgubami v

rotorskem tokokrogu.

Določitev dodatnega upora:

V rotorju mora veljati naslednje ravnotežje napetosti

$$E_{20} \cdot s' = I_2 (R_2 + R_d) \quad \text{za dodatni upor in}$$

$$E_{20} \cdot s = I_2 \cdot R_2 \quad \text{brez dodatnega upora}$$

Iz teh dveh enačb sedaj določimo dodatni upor: $R_d = \frac{E_{20}}{I_2} (s' - s)$

Ker imajo vsi motorji z drsnimi obroči napisane podatke o nazivni rotorski napetosti u ($E_{20} = u/\sqrt{3}$), nazivnem rotorskem toku i in nazivnem slipu s_n , lahko zapišemo enačbo drugače:

$$R_d = \frac{u}{\sqrt{3}} \frac{M_n}{iM} s' \quad \frac{M_n}{\Gamma} s' = (s' - s)$$

Tako lahko izračunamo dodatni upor pri spreminjanju hitrosti in tudi za izračun zagonkega dodatnega upora, samo da računamo z $s' = 1$.

Za linearni del karakteristike lahko predpišemo določen tok I_2 pri določenem slipu, da dobimo dodaten upor in dobimo:

$$R_d = \frac{u}{\sqrt{3}} \frac{1}{i_1} s'$$

Če želimo omejiti zagonski tok motorja na zeleno vrednost i_{1z} , upoštevamo $s' = 1$.

z dodatno upornostjo se veča zagonski navor, a tudi izgube v tej upornosti \rightarrow zato jih uporabimo le za zagon

14. Slabosti regulacije vrtljajev AM s spreminjanjem napajalne napetosti. *statorja!*
 in 15. Regulacija vrtljajev AM s spreminjanjem napajalne frekvence in napetosti.

a) regulacija s spremembo napajalne napetosti

S spreminjanjem napajalne napetosti na statorju, se spreminjata navor AS, po enačbi

$$M = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{P_{vp} \cdot 60}{2\pi n_s s} = \frac{m_1 I_2^2 \frac{R_2'}{s} \cdot 60}{2\pi n_s s} \rightarrow M = \frac{m_1 \cdot 60}{2\pi \cdot n_s \cdot s} \frac{E_{20}^2 R_2'}{(R_2'/s)^2 + X_2'^2}$$

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

in tok po enačbi

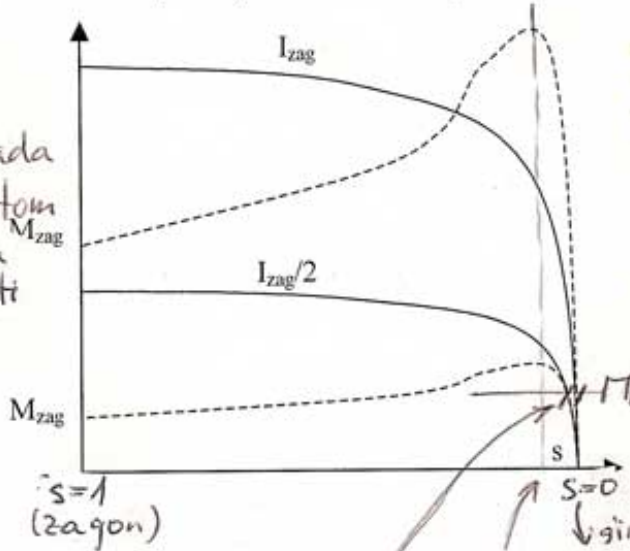
$$\frac{P_m = P_{vp}(1-s)}{\omega_m = \omega_n(1-s)}$$

$$I_2' = \frac{E_{20}}{\sqrt{(R_2'/s)^2 + X_2'^2}}$$

pri povežanju slipa se vedno povečajo tudi izgube v rotorskem tokokrogu

S tem lahko spreminjamo hitrost vrtenja in dosežemo majhne zagonske tokove.

navor pada s kvadratom padanja napetosti



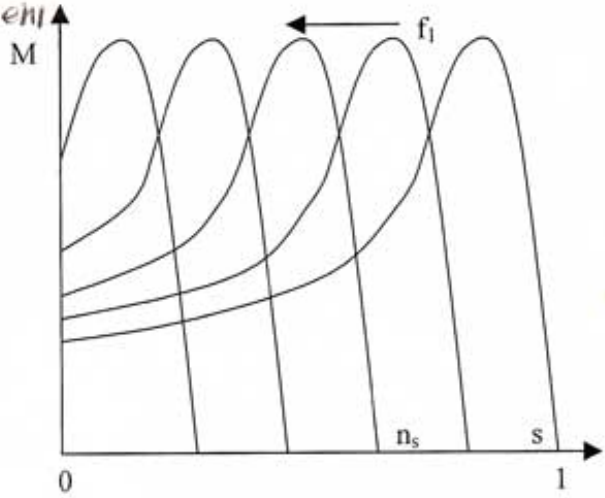
Z znižanjem napetosti se proporcionalno zniža zagonski tok I_{zag} . Zagonski navor M_{zag} pa se zniža s kvadratom napetosti. Stroj je pri istem bremenskem navoru M_b in znižani napajalni napetosti U_1 veliko bolj obremenjen, kot pri obratovalni. Zato smemo z znižanjem napetosti zagnati le AM, ki med stekom niso obremenjeni. Če je motor med stekom obremenjen, nam lahko običi, ker ne more premagati M_b . Tako lahko zaženemo večje motorje.

rotorski tok se, ob znižanju napetosti, poveča

b) regulacija s spreminjanjem frekvence

Zaradi zgoraj omenjenega problema, AM v večini zaganjamo s spreminjanjem frekvence. S tem stroju spremenimo hitrost vrtenja. Motor ohranja svoj navor samo, če ostane vrt. mag. polje nespremenjeno. ~~S spremembo frekvence se magnetni fluks ne spremeni.~~ Konstantno mora ostati razmerje E_1/f_1 , zato moramo hkrati s frekvenco spremeniti primarno napetost U_1 , sicer pridemo v nasičenje in rabimo prevelik tok za določen navor, ter s tem povečamo izgube. Rotorska frekvenca f_2 je zaradi konstantne razlike $n_s - n$, tudi konstantna. S

fluks se takrat ne spremeni



spreminjanjem statorske frekvence dobimo za posamezne sinhronske hitrosti n_s premaknjene, a po obliki iste karakteristike navora. S spreminjanjem frekvence se spreminja tudi hitrost

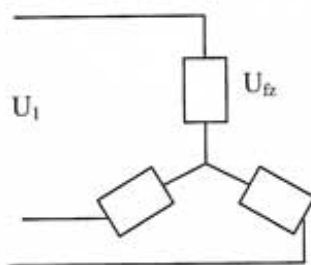
$$n_s' = a \frac{60 f_1}{p} = a \cdot n_s$$

Če spremenimo frekvenco za faktor a, se za toliko spremenijo tudi vrtljaji.

$s = \frac{f_2}{f_1}$
 $f_2 \rightarrow$ rotor
 $f_1 \rightarrow$ stator

16. Zagon AM s stikalom zvezda-trikot.

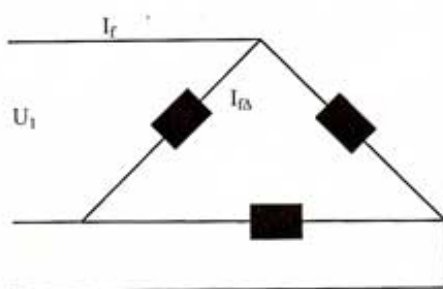
Vezava zvezda:



$$U_{fz} = U_1 / \sqrt{3}$$

$$I_{fz} = I_1$$

Vezava trikot:



$$I_{fs} = I_f / \sqrt{3}$$

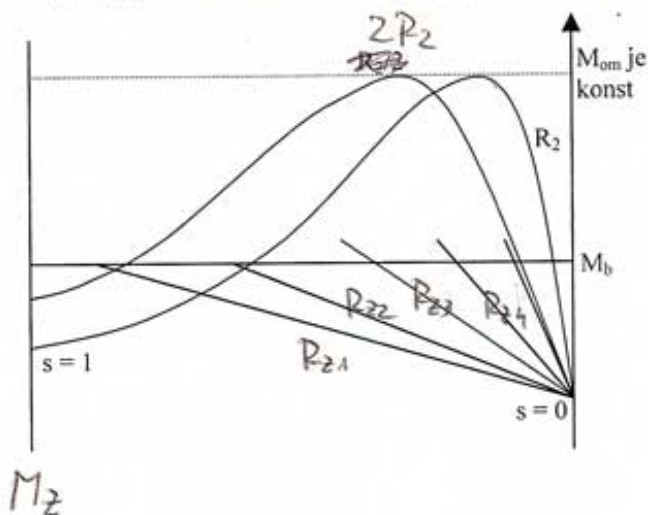
$$U_{f\Delta} = U_1$$

in sistem tokovni sunek

Da bi znižali zagonski moment, moramo znižati napetost. Kot vidimo, je napetost v vezavi zvezda za $\sqrt{3}$ manjša kot pri vezavi trikot. Seveda mora biti stroj narejen tako, da normalno deluje v vezavi trikot. Znižamo tudi zagonski tok in sicer za faktor $1/3$ ($1/\sqrt{3} \cdot 1/\sqrt{3}$). Tako skozi varovalko teče 3-krat manjši tok in za 3-krat smo zmanjšali zagonski navor. Tudi ta način zagona pa lahko uporabimo pri lahkóih zagonih. Preklop iz zvezde v trikot lahko opravimo šele ko je stroj že skoraj v sinhronizmu. Drugače dobimo ob prezgodnjem preklopu velik tokovni sunek in ta zagon ne doseže svojega namena.

17. Zagon AM z uporovimi stopnjami.

Problem zagona pri velikih motorjih je, da imajo nizek zagonski moment (M_z). Pri večjih bremenskih momentih (M_b) motor sploh ne more steči. Ta problem rešimo z uporí, ki nam omogočajo, da motor zaženemo pri poljubnem M_z .



Z dodatnimi upori dosežemo, da je $M_z > M_b$. Dobimo ΔM , ki pospeši motor do neke hitrosti $\Delta M = y \cdot d\omega/dt$. Ko upore postopoma preklapljamó, nam motor počasi pospešuje. Tako pridemo do osnovnega momenta (narisana karakteristika na grafu). Če imamo ΔM konstanten imamo stalen pospešek in imamo zvezen stek. Pri takem zagonu so izgube velike, vendar je ta pojav kratek.

18. AM z globokimi utori ali dvojno kratkostično kletko.

a) Dvojna KS kletka:



ima malce večji zagonski tok kot navadna kratkostična kletka → zagon z nižano napetostjo ponavadi

b) Globoki utori: (cena je)



Zgornji kletki ima palice manjšega prereza kot spodnja in ima zato večjo upornost, ker pa je tik pod površino rotorja, se stresano magnetno polje $\Phi_{\sigma r}$ samo malo razvije in ima majhno induktivnost. S spodnjimi palicami pa je ravno obratno.

$$f_2 = s f_1$$

Tak rotor naredimo takrat kadar hočemo izkoristiti spremenljivo rotorsko frekvenco za izriv rotorskega toka (skin efekt), da bo AM razvil velik zagonski navor. Učinek je tak, kot da bi pri večjih rotorskih frekvencah v rotor vključili dodatni upor in se karakteristika v tem področju dvigne.

a) Ko motor priključimo je $f_1 = f_2$ in teče tok v večini po zgornji kletki, ker se deli v razmerju induktivnih upornosti. Upornosti R_{2z} in R_{2s} , zaradi velike rotorske frekvence in $s = 1$, ne vplivata na delitev toka med kletkama. Zgornja kletka deluje torej tako, kot da bi povečali upornost rotorskega tokokroga in s tem dvignili navorno karakteristiko.

Ko rotor teče, se rotorska frekv. vse bolj manjša in s tem tudi induktivni upornosti obeh kletk, dokler popolnoma ne prevladata upornosti. Sedaj teče tok v glavnem po spodnji kletki in motor ima normalno karakt. navora, pri majhni rotorski upornosti.

b) Podobno deluje tudi rotor z globokimi utori in kratkostično kletko. Če pogledamo stresano mag. polje toka v palici vidimo, da spodnji del palice oklepa veliko večje stresano polje kot zgornji del in ima zato večjo induktivnost. Ob zagonu se zato pojavi izriv toka proti površju in zveča se rotorska upornost in imamo podobno stvar, kot če bi vključili dodatne upore v tokokrog. Ko pa rotor steče, se rotorska frekvenca zmanjšuje in rotorska upornost pade na svojo najmanjšo vrednost. Pri taki kletki ta pojav ni tako izrazit kot pri prejšnjem primeru, vendar se tudi tu poveča zagonski navor.

Značilne oblike navorne karakt.:



19. Asinhronski generator.

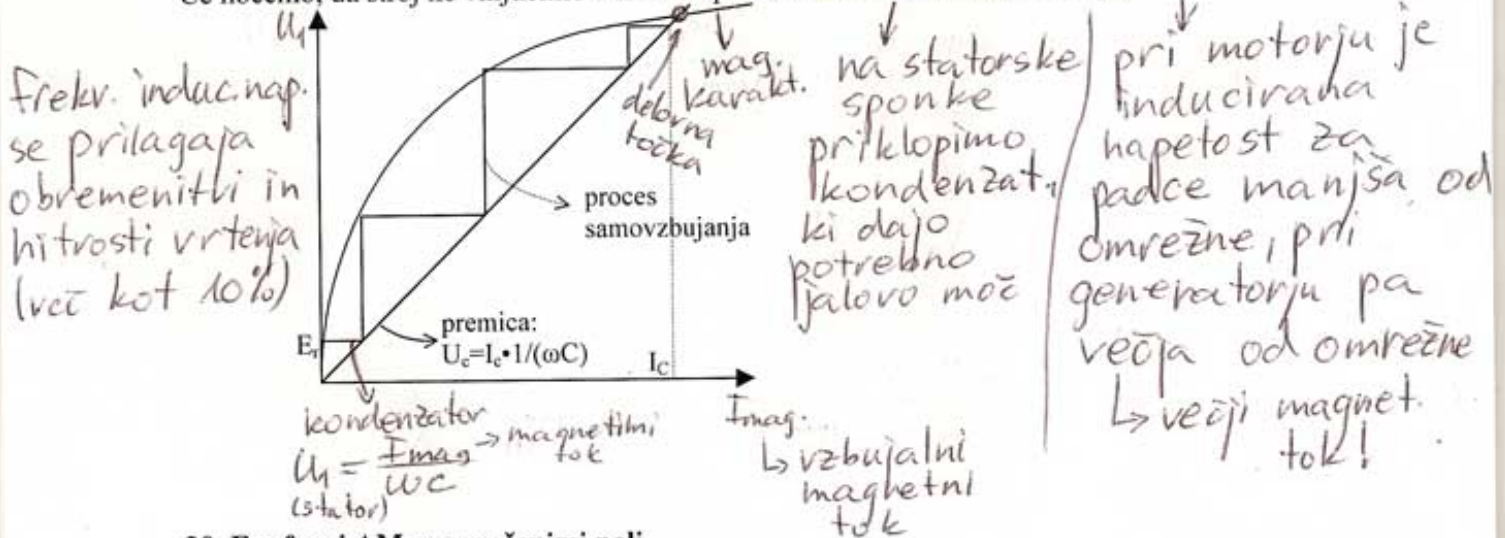
AS je redko generator. Uporabljamo ga za majhne moči. Za generatorsko delovanje velja

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} < 0$$

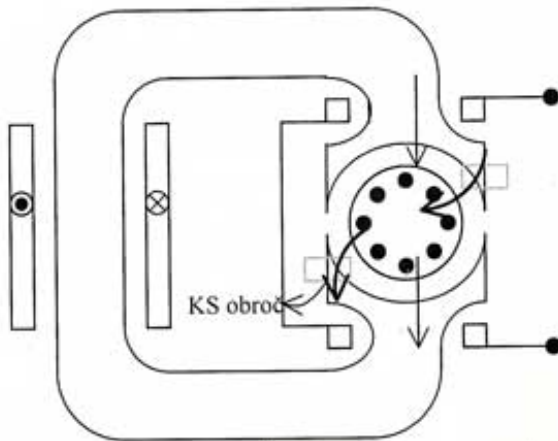
• AG v tuji mreži:

AG dobimo, če vzamemo AS in vrtimo njegov rotor v nasprotno smer kot se vrti, ko deluje kot motor. Ko dosežemo sinhronske vrtljaje, ga priključimo v mrežo, ki mu dovaja jalovo energijo. Nato rotor pospešimo v nadsinhronizem (dobimo negativen slip in pridemo v generatorsko področje) in stroj nam začne oddajati energijo v mrežo. Tuja mreža pogojuje generatorju frekvenco in za to ne rabimo regulacije vrtljajev. Rabimo le merilec vrtljajev, ki nam zapre turbino, ko mehanska moč postane prevelika. Ta meja je pri dvakratni sinhronski hitrosti.

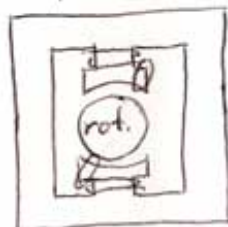
• AG brez mreže (ločno delovanje) *zasilna razsvetljava (pažiti moramo, da stroj (železo) ne zaide v nasičenje*
 Če hočemo, da stroj ne vključimo v mrežo uporabimo kondenzatorske baterije.



20. Enofazni AM z zasenčenimi poli.



kot enofazni motor, ko doseže

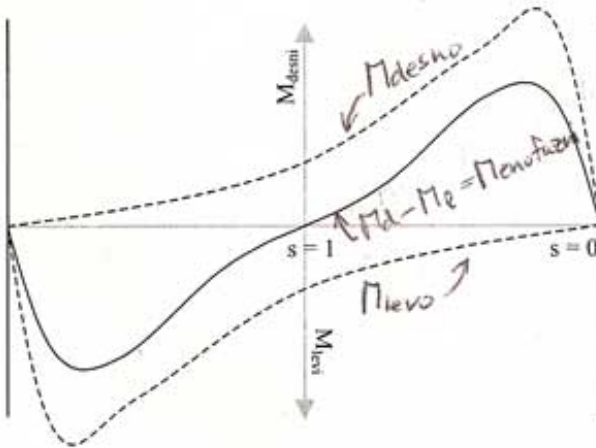
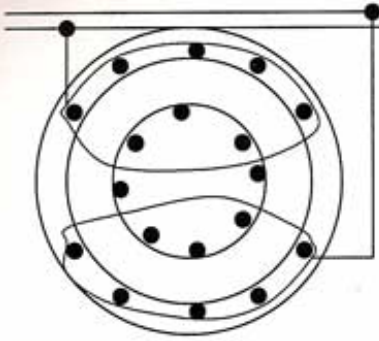


Rotor je običajno s KS kletko. Pol pa nosi enofazno navitje. En del polovega čevlja, je ovit s KS obročem, ki ~~nekako~~ zasenči obvit del površine čevlja. Enofazno navitje vzbudi fluks Φ . Del tega fluksa (Φ_1) na nezassenčenem delu čevlja neovirano prestopa v rotor. KS obroč pa zakasni izmenični mag. fluks (Φ_2), ki ga oklepa. Zato Φ_2 zaostaja za Φ_1 . Amplituda fluksa potuje v desno pod gornjim polom in levo pod spodnjim, kot kaže slika. S tem dobimo neo močno popačeno vrtilno polje, ki pri lahkem zagonu zavrti rotor v določeno smer. Motor deluje kot skoraj tako

polno hitrost. Delovanje KS obroča je sibirsko in le za zagotavljanje začetne smeri vrtenja

21. Enofazni AM s pomožno fazo (ohmski in induktivni upor, kondenzatorski motor).

Čisti enofazni AM ima na statorju samo eno fazo in na rotorju KS kletko. Ko priključimo fazno navitje na enofazni izvor se vzbudi enofazno izmenično mag. polje. To polje v prostoru stoji; spreminja se mu le velikost in smer. Ena tuljavica ustvarja torej krajevno stoječe in časovno utripajoče polje. To polje lahko razstavimo na levo in desno vrtilno polje. Ko rotor stoji se polji vrtita proti rotorju s slipom 1. Vsako polje razvija svoj zagonski navor, ki pa sta enaka po velikosti in nasprotna po smeri. Tako stroj ne steče. Tak motor moramo od zunaj zavrteti v eno smer in motor bo pospeševal toliko časa, da se v bližini sinhronizma navora ne izenačita.

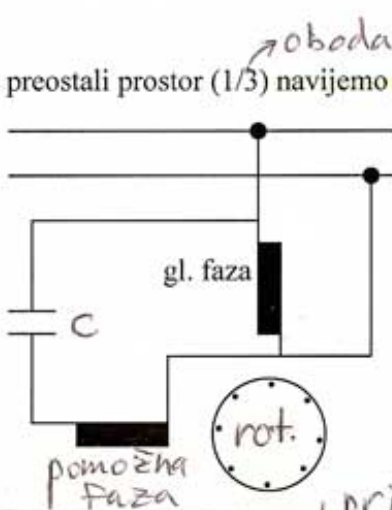


Problem zagona se izognemo tako, da na preostali prostor navijemo pomožno fazo, ki ustvari neko vrtilno polje, ki potegne rotor za seboj.

↳ večje izgube
↳ utripanje navora, slabši izkoristek

1. KONDENZATORSKA POMOŽNA FAZA

Na preostali prostor (1/3) navijemo pomožno fazo, katere magnetna os je pravokotna na magnetno glavne faze (krajevni zamik). Glavno fazo priključimo direktno na napetost, pomožni fazi pa vežemo v serijo kondenzator (časovni zamik). Tako dobimo krajevno in časovno zakasnjeno vrt. mag. polje, ki povzroča v rotorju rezultirajoči navor, ki nam ga zavrti. (Ko rotor steče, se zaradi kondenzatorja polje lahko popači, poleg tega pa v pomožni fazi tečejo veliki tokovi, ki lahko pregrejejo navitje. Zato startni kondenzator po zagonu izklopimo. Izklop opravi avtomatično stikalo, ko motor doseže določeno hitrost vrtenja.)

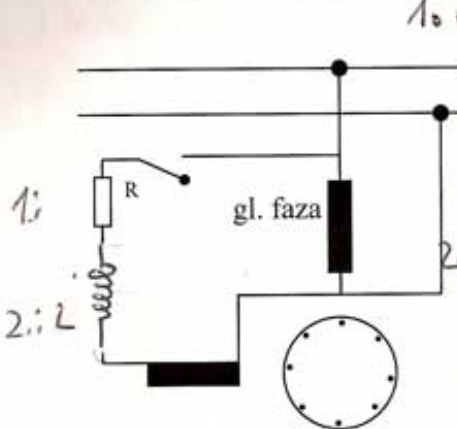


tok v pomožni fazi prehitelva napetost

ima slab zagonski navor, kar rešimo še z dodatnim zagonskim C_z, ki ga potem izključimo (pri 80% nazirne hitrosti) in teče le še z osnovnim kondenzatorjem.

pri primerno izbranim C, dosežemo premaknitar za skoraj 1/4 periode, kar je skoraj dvofazna simetrija. ↳ to lahko dosežemo le pri enem slipu, ker se C ne spreminja s hitrostjo vrtenja, ↳ pri ostalih pa bo deloval z večjimi izgubami in nižjim navorom.

2. UPOROVNA IN INDUKTIVNA POMOŽNA FAZA



1. uporovna:

Ta način je redkeje uporabljen kot zgornji. Med glavno in pomožno fazo dobimo zamik toka, vendar nikoli ~~več~~ $\frac{1}{4}$ periode. S tem dobimo vrtilno polje, vendar ne krožno simetrično. Motor steče v eno smer, navor pa je majhen in primeren samo za lahke zagone. Pomožno fazo po steku izklopimo, da zmanjšamo izgube.

2. induktivna:

Še slabše pa so razmere z induktivno pomožno fazo. tudi tu motor steče v eno smer, vendar pa je zagonski navor majhen in primeren samo za lahek zagon. Zaporedje tokov v pomožni in glavni fazi je obratno kot pri uporovi ali kondenzatorski (tok v pomožni fazi

~~prebita~~). Motor se vrti v obratno smer kot v prejšnjih dveh primerih. *zaostaja*

tok pomožne faze z večjo upornostjo manj zaostaja za napetostjo kot tok glavne faze

motor sedaj kot čisti enofazni motor

dušika je draga, po steku jo tudi izključimo

22. Opišite delovanje AM, ki dviga ali spušča breme (dodajanje uporov-motorsko, zavorno, generatorsko obratovanje).

Ko začne dvigalo dvigati breme želimo, da čim lažje steče. V ta namen uporabimo ali dodatne upore, ali rotor z dvojno KS kletko, ali rotor z globokimi utori. Npr. delamo z upori. Ko motor steče izključimo upore in dvigalo se giblje konstantno z neko hitrostjo, ki jo pogojuje hitrost vrtenja rotorja. Ko breme dvignemo do neke višine, hočemo motor počasi zaustaviti. To dosežemo tako, da upore postopoma vklapljammo in motor počasi zabremza. Ko hočemo dvigalo ponovno spustiti, se hoče motor še vedno vrteti tako kot prej, zato trošimo energijo iz omrežja in energijo motorja in imamo tako velike izgube. To traja le malo časa, saj s stikalom, ki *zamenja 2 fazi*, preklopimo smer vrtenja motorja in motor se začne vrteti v smer padanja bremena in postane generator, ker se dvigalo spušča z malo večjo hitrostjo kot je sinhronska in je slip negativen. Dvigalo tako vrača energijo v mrežo, vendar pa ne vse. zaradi izgub po žicah in motorju,...

forej v nasprotno smer

V nadsinhronizmu!

23. Kako deluje trifazni AM pri zamenjavi dveh faz ali izpadu ene faze.

• *Zamenjava faz!*

Če AM zamenjamo dve fazi, mu spremenimo smer vrt. mag. polja in s tem vrtilni moment ter seveda tudi smer vrtenja.

• *Izpad faze!*

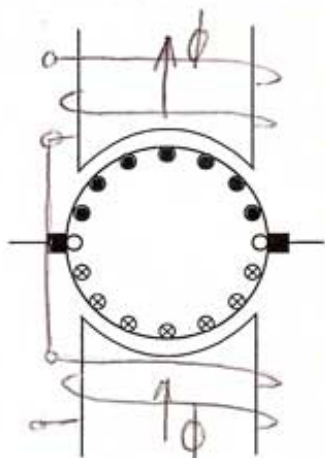
Trifazni AM, ki mu izpade ena faza, se spremeni v čisto enofaznega priključenega na eno medfazno napetost. Če je že prej, bo deloval naprej, bo pa v ostalih navitjih preobremenjen in ga moramo zato čim prej izklopiti.

*navor bo utripal → hrup
izgube se bodo povežale vsaj z 2x*

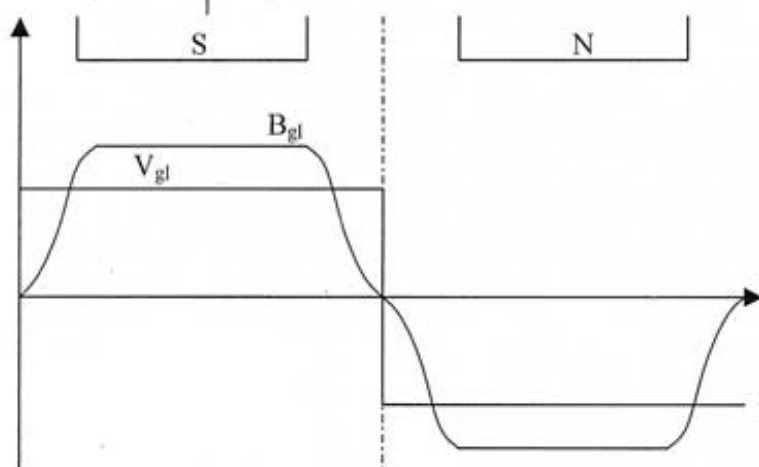
Enosmerni komutatorski stroji:

1. Kako deluje kolektorski stroj (opis s pomočjo Gramovega obročastega stroja)?

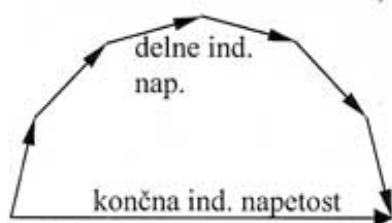
Stator je dvopolni ali večpolni elektromagnet in skrbi za vzbujanje glavnega magnetnega polja. Ima vedno izražene pôle, ki nosijo vzbujaľna navitja, ali pa so trajni magneti in nimajo navitij (pri manjših strojih). Rotor je indukt in nosi samo vase sklenjeno navitje in na stikih dveh tuljav prikljuĉeno na lamele komutatorja.



Na stator je pritisnjena enosmerna napetost, ki povzroĉi enosmerno polje. Ko tuljavo rotorja vrtimo v tem enosmernem polju, se v stranicah tuljave (palicah) inducira napetost; $e_p = B \cdot v \cdot l$. Ind. nap. je po obliki enaka obliki polja pod poli. Inducirani napetosti v obeh stranicah tuljave sta nasprotno usmerjeni, zato je geometrijska vsota dvakratna. Ćasovno je po obliki ind. nap. izmenična, zato je v principu to izmenični stroj. Vsaka tuljavica tega navitja gre na komutator, po njem pa drsijo šĉetke, ki jemljejo enosmerno napetost. Torej imamo v rotorju izmenične razmere, na statorju in šĉetkah pa ĉutimo enosmerno napetost.



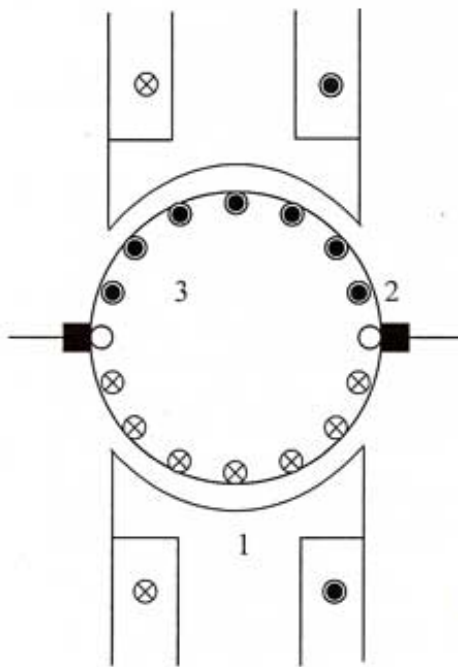
Vsota vseh napetosti je vedno pravokotna na magnetno polje, ki ga ustvarjata magnetna pola. To povzročita šĉetki, ki preklapljata med tuljavami rotorja. Slika vsote delnih napetosti je vedno enaka, ĉeprav kazalci krožijo. Zato je to enosmerna napetost. Torej je kolektor oz. komutator mehanski usmernik, ki iz izmeničnega stroja naredi enosmernega in obratno.



vrtenja. P_{el} se spremeni v P_{meh} .

Seveda lahko stroj dela kot motor ali kot generator. Će tok teĉe v enosmerno mrežo ($E_i > U_{mreže}$), kar pomeni da vrtimo rotor stroja z mehansko moĉjo, dobimo generator. Će meh. moĉi ne dovoljamo, nam moment rotor zavira in E_i pada dokler ne postane manjša od $U_{mreže}$ in stroj zaĉne jemati energijo iz omrežja in preide v motorsko obratovanje. Smer toka se glede na generatorsko obrne, tako da kaŹe v smer

2. Konstruktivske značilnosti enosmernega kolektorskega stroja (stator, rotor, paralelne veje, kolektor).



- 1...stator
- 2...ščetke na kolektorju
- 3...rotor

lamelle so med seboj izolirane

Na rotorju imamo kolektor (lameliran bakren obroč), po katerem drsijo ščetke, preko katerih dovajamo ali dobivamo enosmerno napetost. Kolektor oz. komutator je mehanski usmernik, ki iz izmeničnega stroja naredi enosmernega in obratno. Rotor, ki je lameliran, je indukt in nosi navitje, ki je večinoma vase sklenjeno ^{vedno} dvoplastno zankasto. Izbira navitja je odvisna od tokov in napetosti, ki pogojujejo potrebno število paralelnih vej. Poznamo dve vrsti navitij: zančasto in valovito. Zančasta so bolj primerna za večje tokove in manjše napetosti, ker imajo vsaj toliko paralelnih vej kot je polov. Valovito navitje pa ima neglede na število polov stroja lahko samo dve paralelni veji in je primerno pri visokih napetostih in majhnih tokovih. Kadar ima navitje več paralelnih vej,

zvežemo mesta istih potencialov navitja z izenačevalnimi zvezami na komutatorju. S posebnimi vezavami se da pri obeh vrstah navitij število paralelnih vej povečati z večkratnimi navitji, ki jih širše ščetke na komutatorju vežejo paralelno. Vsaka tuljavica je vezana na kolektor, po katerem drsijo ščetke, ki so največkrat v magnetno nevtralni legi. Stator je dvopolni ali večpolni elektromagnet in skrbi za vzbujanje glavnega magnetnega polja. Ima vedno izražene pole, ki nosijo vzbujalna navitja, ali pa so trajni magneti in nimajo navitij (pri manjših strojih). Poznamo dve vrsti rotorjev: bobnasti in cevasti. Boljši je bobnasti, ker pri cevastem ne izkoristimo vsega bakra.

lito železo
(ker je enosmer. = no mag. polje)

hitrost vrtenja ni odvisna od števila polov

na statorja so še komutacijski poli, ki slabijo posledice slabe komutacije

3. Inducirana napetost pri enosmernem kol. stroju (izvajanje, valovitost napetosti).

Napetost se inducira v ~~kollektorskem~~ navitju rotorja in jo dobimo na ščetkah v nevtralni coni. Nevtralna cona ščetk, je postavitvev ščetk tako, da mirujejo in odjemajo napetost v legi, ko prehaja palica od enega pod drug pol, ko se v njem ravno menja smer ind. nap. Inducirana nap. ni stalna, ampak valovi. Valovitost zmanjšamo in hkrati povečamo frekvenco valovitosti, če povečamo število utorov tuljavic (palic) in komutatorskih lamel. Pri zelo velikem številu utorov preidemo v napetostni krog (glej zadnjo sliko pri prvem vprašanju).

V eni palici se ind. nap. $e_p = B \cdot v \cdot l$. Celotna ind. napetost pa je vsota napetosti po palicah

$$E_i = \sum e_p = \frac{p \cdot z}{60 \cdot a} n \cdot \Phi = k_E \cdot n \cdot \Phi$$

Φ ...mag. fluks glavnega pola
 p...število polovih parov stroja
 a...število parov paralelnih vej
 z...število vseh palic v vseh utorih na rotorju
 k_E ...konstrukcijski koeficient za napetost

srednja vrednost

$$B_{sr} = \frac{\Phi}{l \tau_p}$$

$$E_i = \frac{z}{2a} \frac{\Phi}{l \tau_p} z p l p n \omega = \frac{z p}{60 a} \Phi n$$

$$v = 2 p l p n$$

Pogosto pa nas zanima, kako se spreminja ind. nap. s hitrostjo vrtenja ω . V tem primeru izpeljemo enačbo s pomočjo zgornje:

$$E_i = k_E \cdot n \cdot \Phi = k_E \cdot \frac{\omega}{2\pi} \cdot \Phi = k_\Phi \cdot \omega$$

k_Φ ...koeficient magnetnega fluksa (V/rad·sek)

$$\omega = 2\pi F \rightarrow 2\pi \frac{n}{60}$$

$$n = \frac{\omega \cdot 60}{2\pi}$$

vodniki, ki pripadajo eni vzporedni veji navitja

ščetke razdelijo navitje na a vzporednih vej, to je toliko kot ima stroj polov

4. Moment enosmernega kol. stroja (izvajanje).

Navor izpeljemo iz Biot-Savartovega zakona: $M = B \cdot l \cdot i \cdot r$ (v...obodna hitrost palice v polju; r...radij rotorja)

Navor, ki deluje na eno palico bo po zgornji enačbi $M = B \cdot l \cdot I_p \cdot r$. In če navore vseh palic = št. palic seštejemo in vsote posameznih gostot B nadomestimo z srednjo gostoto B_{sr} dobimo za navor enačbo $M = B_{sr} \cdot l \cdot I_p \cdot r \cdot z$. Če vzamemo celotni magnetni fluks za en pol dobimo

$$M = \frac{p \cdot z}{2\pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot I$$

$$B_{sr} = \frac{\Phi}{l \tau_p} \quad I_p = \frac{I}{2a}$$

$$\tau_p = \frac{2\pi r}{2p}$$

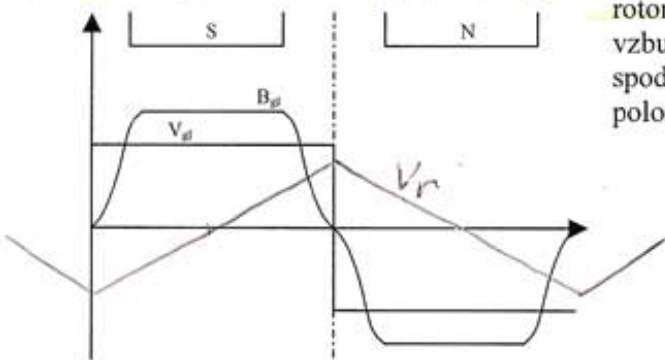
Iz tega pridemo do: $M = \frac{E \cdot I}{2\pi \cdot n} = \frac{E \cdot I}{\omega_{meh}} = \frac{P_{meh}}{\omega_{meh}} = \frac{P_{el}}{\omega_{meh}}$

št. palic (z)

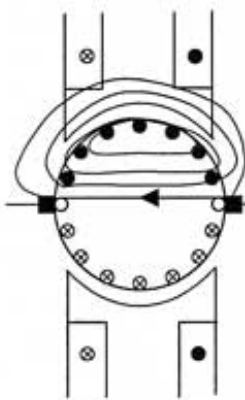
5. Reakcija indukta enosm. kol. str. in posledice.

Reakcija indukta rečemo pojavu, ko po rotorskem komutatorskem navitju preko ščetk steče

rotorski tok I in vzbudi svoje mag polje. To vzbujanje označimo z V_r . Potek je viden na spodnji sliki. Kot vidimo, je velika gostota le pod polom, v medpolovem prostoru pa upade.



$V_g + V_r = V_s$
 pod robom pola pride do nasičenja; B je zato močno popačena



Smer magnetenja rotorja je odvisna od prostorskega položaja ščetk. V večini primerov so ščetke v nevtralni legi, kot na sliki, tako da sta magnetni osi vzbujalnega in rotorskega navitja pravokotni druga na drugo. Tako ni medsebojne indukcije med tema navitjema.

Amplitudna reakcija indukta bo v smeri ščetk po enačbi

$$I_p \text{ posledici } V_{rm} = \frac{I \cdot z}{8 \cdot a \cdot p} = \left(\frac{I}{2 \cdot a} \right) \frac{z}{4p} \rightarrow I_p$$

- zmanjšanje B pod robom pola (manjša E)

- povečane izgube v rotorskem železu

- premik mesta brez polja izven nevtralne cone

- zelo različne induc. nap. v posameznih palicah

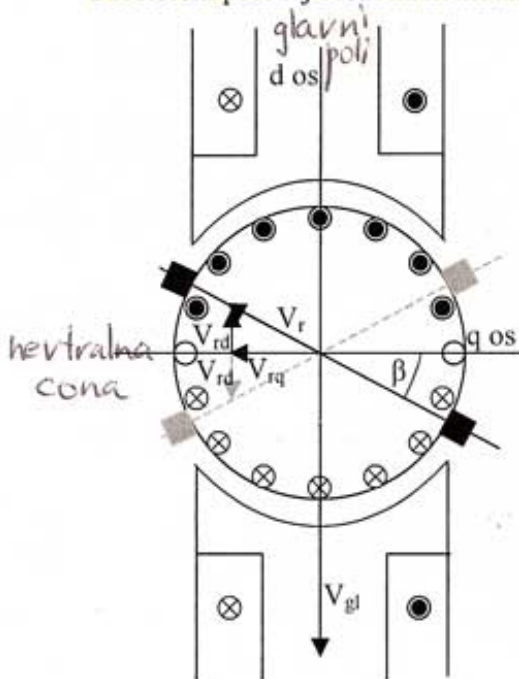
↳ rotorsko mag. polje se sklepa okoli rotorskega navitja → lastna induktivnost

$\frac{z}{4p}$ število rotorskih palic pod eno polovico pola ($\tau_p/2$)

$\frac{I}{2 \cdot a}$ tok v palici ene paralelne veje rotorskega navitja

6. Kako pri enosm. kol. stroju premik ščetk iz nevtralne lege vpliva na magnetno polje stroja.

Prostorski položaj ščetk na komutatorju določa smer rotorskega magnetnega vzbujanja oz.



smer reakcije indukta. Če ščetke premaknemo za kot β v smeri vrtenja generatorja oz. proti smeri vrtenja motorja, se smer reakcije indukta V_r tudi premakne za β . To vzbujanje lahko razdelimo na dva dela;

-vzbujanje v smeri nevtralne cone V_{rq}

-vzbujanje v smeri glavnih polov V_{rd}

Komponenta V_{rq} učinkuje tako kot je prej celotna reakcija indukta s ščetkami v nevtralni coni.

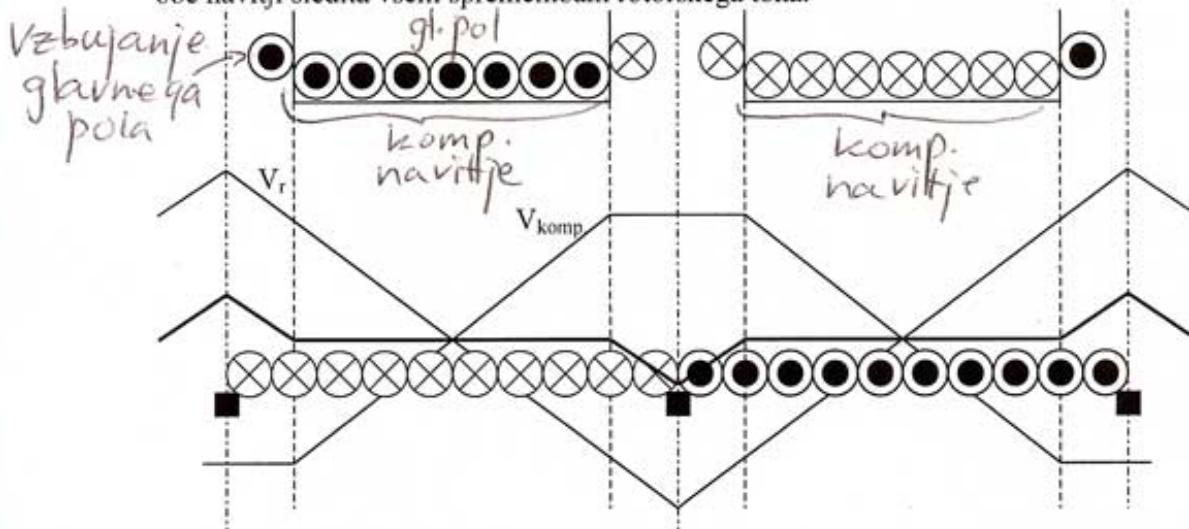
Komponenta V_{rd} pa učinkuje v isti smeri kot glavno mag. polje. Ta komponenta slabi glavno vzbujanje, ker deluje njemu nasprotno. $V_{gl} - V_{rd}$

Rotorsko navitje navidezno razpade na dve tuljavi, ki magnetita vsaka v svoji osi. V d-osi magneti navidezna tuljava, ki obsega vse palice znotraj kota 2β . V q-osi pa magneti navidezna tuljava, ki obsega preostale palice znotraj kota $[\pi/p - 2\beta]$.

Če bi ščetke premaknili v nasprotni smeri vrtenja generatorja oz. v smeri vrtenja motorja bi komponenta V_{rd} podpirala glavno vzbujanje. Vsota obeh vzbujanj je prečna reakcija indukta $V_r = V_{rq} + V_{rd}$.

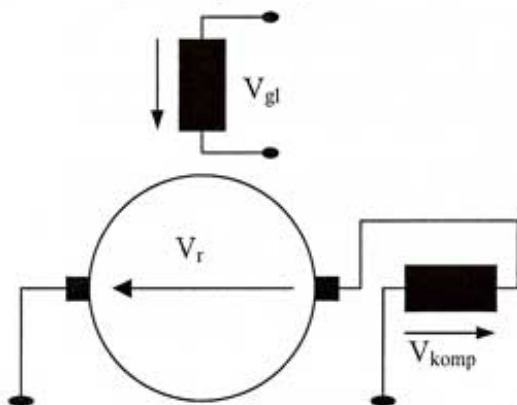
7. Zakaj pri enosm. kol. strojih uporabljamo kompenzacijsko navitje?

Kompenzacijsko navitje uporabimo, da se znebimo posledic prečnega magnetnega vzbujanja rotorja oz. reakcije indukta v prečni smeri. To dosežemo tako, da vzbujamo z nekim dodatnim navitjem v nasprotni smeri kot vzbujajo rotor. Najbolje je, če je to navitje porazdeljeno vzdolž oboda zr. reže na enak način, kot je rotorsko navitje. Vežemo ga v protistiku z rotorjem, da obe navitji sledita vsem spremembam rotorskega toka.



Kompenzacijsko navitje ima tako število ovojev, da imamo pod polom popolno kompenzacijo. Kompenzirani ni le v medpolovem prostoru, kjer pa je velika mag. upornost in je gostota B tam zelo majhna.

Vežje s komp. navitjem:

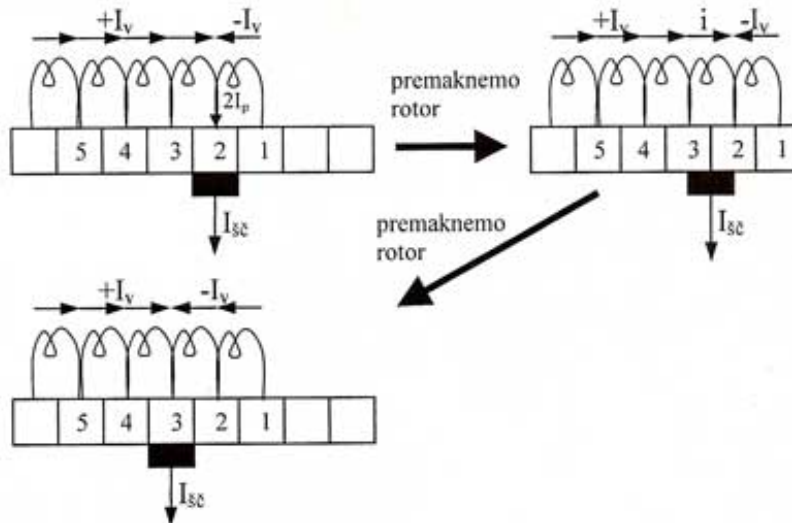


8. Problem komutacije (uporovna, napetostna samoindukcija).

Vse težave pri komutaciji povzročata spreminjanje toka v tuljavah navitja. Ščetke skupaj s komutatorjem predstavljajo drsni kontakt med vrtečim se rotorskim navitjem in mirujočimi priključnimi sponkami. Naloga ščetk je dvojna:

- usmerjanje rotorske napetosti (ščetke nam dajo dve paralelni veji in zato vsota vseh napetosti v palicah ni enaka nič, pač pa je konstantna in kaže \leftarrow ali \rightarrow)
- usmerjanje rotorskega toka (ščetke nam tok po zgornjih in po spodnjih palicah seštevajo)

Težavo pri komutaciji povzroči tuljava, ki prehaja iz zgornje veje v spodnjo, kot je na sliki:



V nekem trenutku bo ščetka ležala delno na 2. in delno na 3. lameli. Tuljava 3 prehaja iz ene paralelne veje v drugo. V njej se mora torej smer toka I_p od prejšnje obrniti. Ta pojav se začne v trenutku, ko zadane sprednji rob ščetke 3. lamelo in konča, ko zadnji rob ščetke zapusti 2. lamelo. Ta čas je doba komutacije (T_k) in je

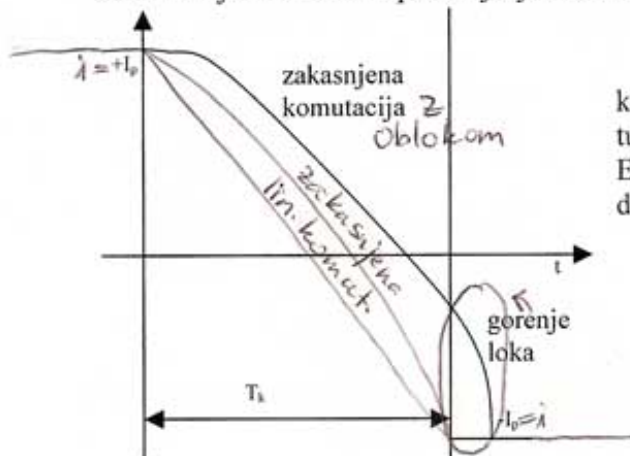
običajno krajši od 1ms. V tem času sta lameli v kratkem stiku. Po njej lahko teče poljubnen tok i , ki je odvisen le od lastne napetosti in upornosti tokokroga tuljave v KS-u. Pogosto se zgodi, da se tok v času T_k ne spremeni popolnoma iz $-I_p$ do $+I_p$. Tako tok i ne doseže vrednosti nič, lamela 2 pa kljub temu zapusti ščetko in prekine kontakt. V takem primeru se pojavi iskra (električni lok) med 2. lamelo in ščetko, ki se vzdržuje toliko časa, da je sprememba toka dokončna in doseže tok i vrednost nič.

NAPETOSTNA SAMOINDUKCIJA:

V komutirajoči tuljavi se mora v dobi komutacije T_k spremeniti tok iz $-I_p$ do $+I_p$. Tuljava ima lastno induktivnost zaradi stresanja mag. polja Φ_s . Vse lastnemedsebojne induktivnosti komutirajočih tuljav poenostavimo v eno lastno induktivnost L zaradi stresanega fluksa Φ_s . V komut. tuljavi se zaradi spreminjanja toka inducira napetost:

$$e_L = L \frac{di}{dt} = N \frac{d\Phi_s}{dt}$$

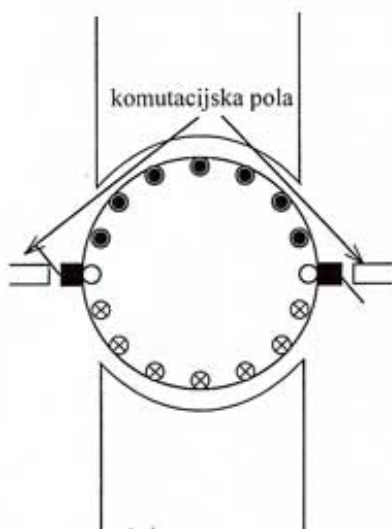
ki nasprotuje vsakršni spremembi toka i v komut. tuljavi. Vpliv napetosti e_L je prikazan na sliki. Električni lok predstavlja veliko upornost in dobimo zato hitrejše spreminjanje i .



uporovna = linearna
 L ščetke z visoko upornostjo (dobroja) so večje izgube na ščetkah

9. Vloga pomožnih polov pri enosm. kol. strojih. Dimenzioniranje.

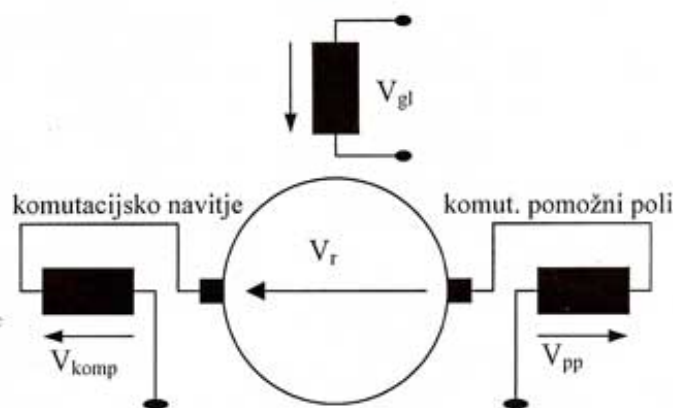
Napetostno samoindukcijo kompenziramo s komutacijskimi (pomožnim) poli. Te pole



namestimo v nevtralno cono, kjer vzbujajo komutacijsko polje Φ_K , v katerem se giblje komutirajoča tuljava. Ti poli so širine ščetk, saj kompenzacijsko polje ni potrebno v ostalem prostoru. Tako se v komutirajoči tuljavi inducira gibalna napetost e_K , ki mora prevladati nad napetostjo e_L . Večinoma je v vsaki nevtralni coni en komutacijski pol. Le zelo majhni stroji imajo včasih enega na polov par.

Za tak stroj pravimo, da je NADKOMUTIRAN.

mehke ščetke - poveča se vpliv lastne induktivnosti komutirajoče tuljave → poveča se vpliv lastne induktivnosti



široki so toliko, da se v njihovem polju giblje tuljava v času komutacije T_k

10. Kako nastane enosmerni stroj, generator ali motor (smer momenta, toka, velikosti ind. napetosti glede na pritisnjeno napetost)?

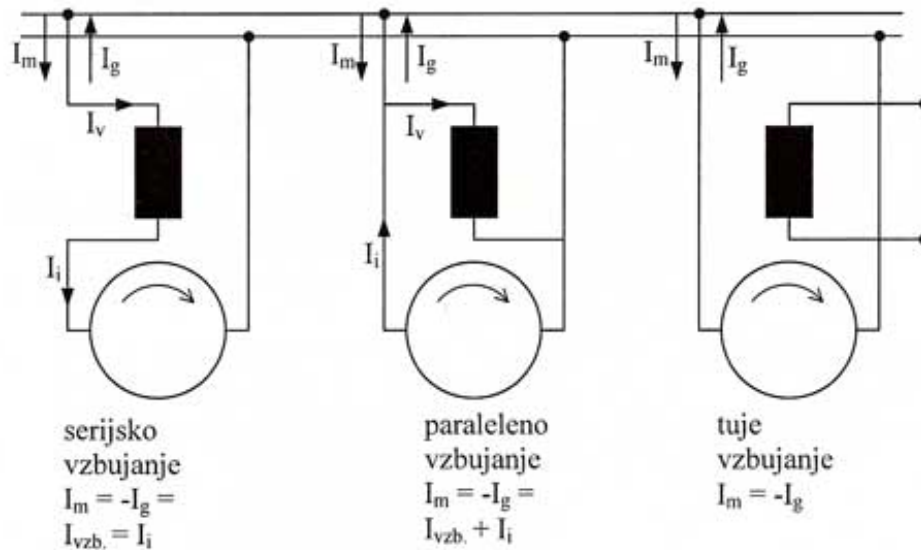
Generator nastane, če stroju vrtimo rotor oz. mu vsiljujemo mehansko moč. S tem premagamo elektromagnetni navor, ki hoče rotor zavrteti v drugo smer in tako teče tok iz stroja v omrežje.

P_{meh} se pretvarja v P_{el} . Mehanski moment je nasproten elektromagnetnemu, prav tako pa je nasprotna smer vrtenja, kot jo povzroča el. mag. moment. Inducirana napetost je večja, kot napetost na sponkah generatorja.

Če na stroj pritisnemo neko napetost in rotorja ne vrtimo, se bo začel vrteti sam. Ker je rotor indukt, bo imel moment smer elektromagnetnega in rotor se bo vrtil v nasprotno smer kot pri generatorju. Tok bo tekkel v omrežje. P_{el} se pretvarja v P_{meh} .

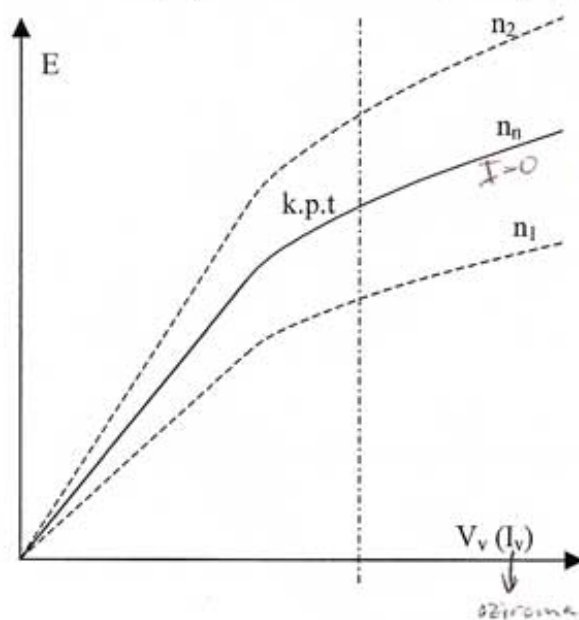
11. Vezave enosm. strojev. Karakteristika PT-ja in obremenilna karakteristika.

Imamo dva električna tokokroga s svojimi navitji. En vključuje vzbujalna navitja, s katerim vzbujamo glavno magnetno polje. Drugi pa vključuje rotorsko (induktivno) navitje s komutatorjem in ščetkami ter morebitno kompenzacijsko navitje. Ta dva tokokroga lahko na različne načine vežemo med seboj, kombiniramo navitja itd. Različne vezave dajo stroju različne obratovalne lastnosti, delovanje stroja pa ostane ves čas isto.



V rotorskem tokokrogu so komutatorsko, kompenzacijsko in komutacijsko navitje vedno vezani v serijo.

KARAKTERISTIKA PT-ja je osnovna kar. enosmernega stroja. Daje nam odvisnost od inducirane napetosti E na odprtih sponkah komutatorskega navitja v odvisnosti od vzbujanja glavnih polov V_v oz statorskega vzbujalnega toka I_v . Pri tem mora biti hitrost vrtenja rotorja n stalna in konstantna. Inducirana napetost je po enačbi $E_i = k_g \cdot n \cdot \Phi$ proporcionalna mag. fluksu Φ . Ta pa je odvisen od od mag. vzbujanja V_v in od magnetne upornosti poti fluksa.

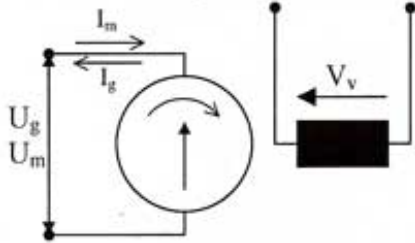


Mag. upornost se spreminja v skladu s krivuljo magnetenja železa. Glavni značilnosti sta vpliv nasičenja, ki krivi karakteristiko PT-ja, ter remanenca, ki daje neko malo remanentno napetost že brez vzbujanja. Karakteristika PT-ja se spremeni, če se spremeni hitrost vrtenja stroja. Sprememba je pri konstantnem vzbujanju in istem fluksu:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

OBREMENILNA KARAKTERISIKA:

Rotorski tokokrog obremenimo z rotorskim tokom.



Bremenski tok povzroči dve spremembi:

- > padec napetosti na uporih R_r vseh navitij rotorskega tokokroga, ta padec je $I_g \cdot R_r = I_m \cdot R_r$,
- > zmanjšanje fluksa za $\Delta\Phi$ zaradi lokalnega nasičenja mag. pola, ki ga povzroči reakcija indukta I_g oz. I_m . Zato se zmanjša tudi ind. nap. E za ΔE .

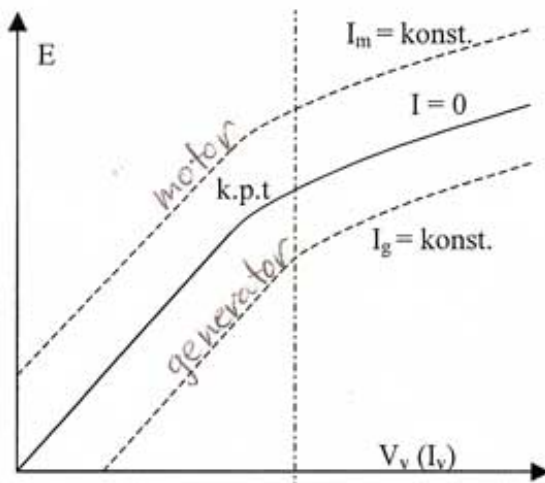
Na sponkah generatorja imamo tako napetost U_g , ki je za oba padca manjša od E_{PT} (ind. nap. PT-ja)

$$U_g = E_{PT} - I_g R_r - \Delta E \rightarrow \text{zaradi reakcije indukt.}$$

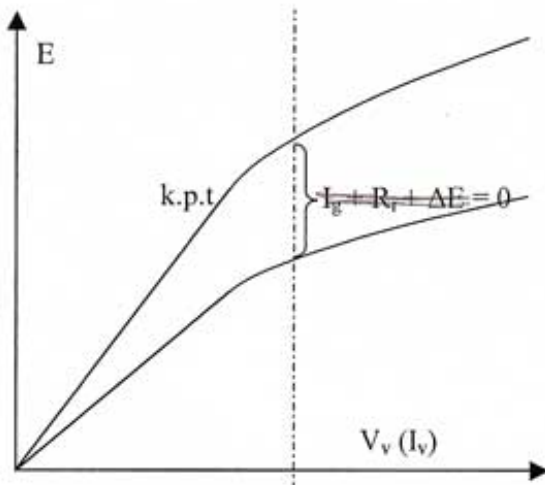
Na sponkah motorja pa se pojavi napetost U_m , ki je za padec napetosti na R_r večja od inducirane. Ind. nap. pri obremenjenem motorju je za ΔE manjša kot v PT-ju, ker reakcija indukta vedno povzroči delno nasičenje in s tem zmanjšanje mag. fluksa za $\Delta\Phi$. Torej je

$$U_m = E_{PT} + I_m R_r - \Delta E$$

↳ zaradi reakcije indukta



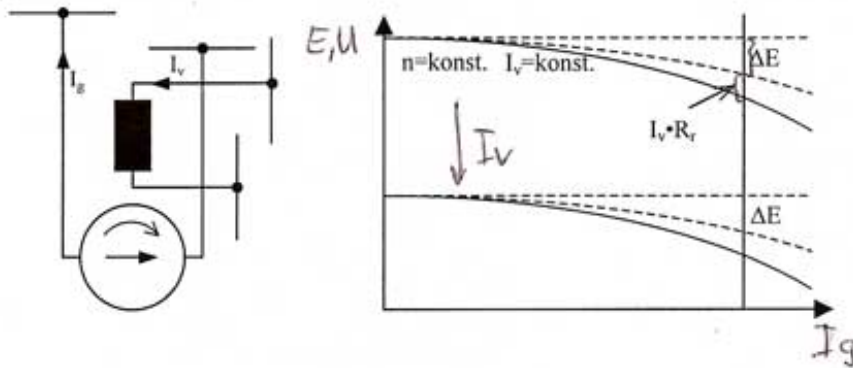
Karakteristika za konstanten rotorski tok.
 $n = \text{konst.}$



Karakteristika s konstantnim bremenskim uporom.
 $n = \text{konst.}$

↳ če generator obratuje samostojno na konstant. bremenskem uporu

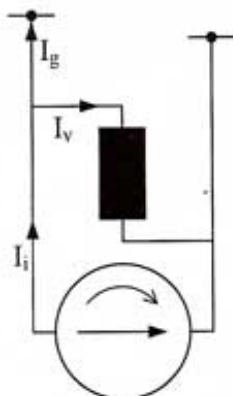
12. Enosmerni generator s tujim vzbujanjem (vezalna shema, zunanja karakteristika, lastnosti).



Vzbujanje je vezano na tuj vir in je vedno \perp na položaj ščetk. Napetost stroja na sponkah je $U_g = E_{PT} - I_g R_r - \Delta E$. Prava ind. napetost pa bo $U_g = E_{PT} - \Delta E = k_\Phi \omega$. Koeficient mag. fluksa k_Φ je spremenljiv in odvisen od I_v in I_g , ker njegova reakcija zmanjšuje mag. fluks za $\Delta\Phi$. Inducirana napetost $k_\Phi \omega$ pri obremenjenem generatorju pade po črtkani krivulji v odvisnosti od rotorskega toka I . Končna ind. nap. (polna črta) je napetost, ko prejšnji odštejemo še padec napetosti $I_g R_r$. Tako dobimo napetost na sponkah U kot funkcijo rotorskega toka. Drugo kar. dobimo, če spreminjamo hitrost vrtenja ali I_v , s čimer vplivamo na k_Φ (če I_v povečamo se poveča tudi k_Φ).

- z regulacijo napetosti na rotorja lahko nastavljamo hitrost vrtenja od praktično 0 do nazivne hitrosti, pri čemer lahko razvija poln navor;
- s slabljenjem polja in vzbujalnega toka. nastavljamo hitrost vrtenja od 1,5 do 3 kratne nazivne hitrosti;
- smer vrtenja obrnemo z zamenjavo priključkov rotorja;
- ob prekinitvi vzbujanja lahko motor pobegne
- deluje kot generator, če se vrtil hitreje od prostega teka

13. Enosm. gen s paralelnim vzbujanjem (vezalna shema, samovzbujajne, zunanja karakteristika, lastnosti).

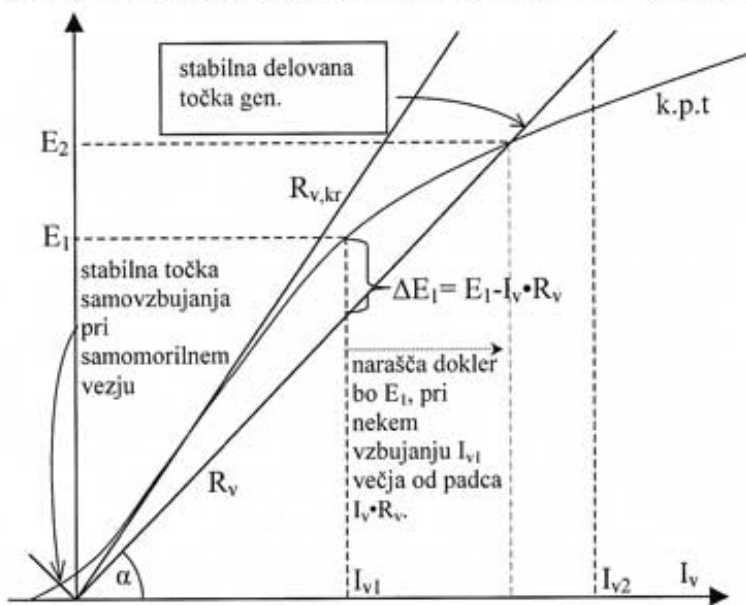


Kot motor se ne uporablja več

Tak generator se lahko z vrtenjem rotorja sam vzbudi in sicer dvigne napetost na svojih rotorskih sponkah, zato mu rečemo tudi samovzbudni generator.

Proces samovzbujanja:

V začetku vzemimo, da je gen. v praznem teku. Na ščetkah se pojavi napetost $E = k_{\phi} \omega$, kot jo določa k.p.t. na sliki. Kot vidimo, ima karakteristika dve kolena in linearni del. Nad gornjim kolenom je nasičenje, pod kolenom linearni del in še spodnje koleno z napetostjo E_r zaradi remanentnega magnetizma.



Napetost, ki se inducira v rotorskem navitju, požene vzbujalni tok

$$I_v = E/R_v$$

kjer je R_v upornost celotnega vzbujalnega tokokroga. To upornost narišemo pod kotom

$$\operatorname{tg} \alpha = E/I_v = R_v$$

Za neko vzbujanje I_{v1} bo razlika napetosti v vzbujalnem tokokrogu $\Delta E_1 = E_1 - I_{v1} \cdot R_v$. Dokler ta razlika ni enaka 0, se generator samovzbuja (zgoraj do napetosti E_2). Stroj ima presežek ind. napetosti (ΔE) že od začetka. Presežek

zagotavlja E_r . Generator se bo vedno vzbudil do stabilne delovne točke, pa če bo prej nad ali pod njo.

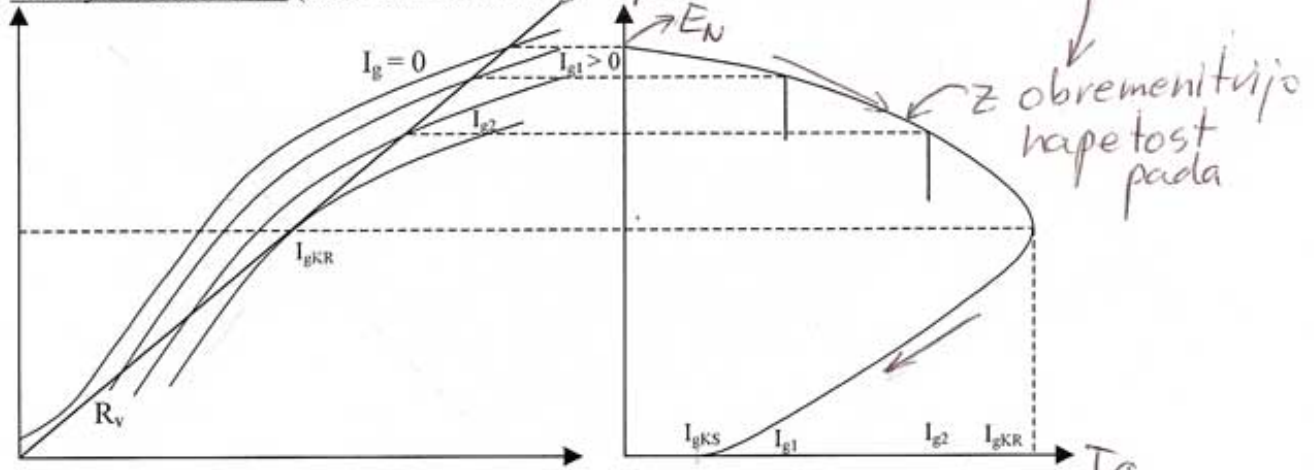
Samomorilno vezje:

Če se zgodi, da priključimo vzbujalno vezje v obratni smeri, torej da vzbujamo v nasprotni smeri remanentne napetosti, dobimo stabilno točko samovzbujanja levo od ordinatne osi (glej sliko). Generator tako uniči svoj remanentni magnetizem in s tem izgubi svojo zmožnost samovzbujanja.

Prehodno področje samovzbujanja v področje brez samovzbujanja je tangencialna lega uporabne kar. na k.p.t. To je kritična lega, ki jo dosežemo s kritično upornostjo $R_{v,kr}$

in kritično hitrostjo vrtenja $\omega_{kr} = 2\pi \cdot n_{kr}$.

Zunanja karakteristika: (obremenilna kar. za I_g)

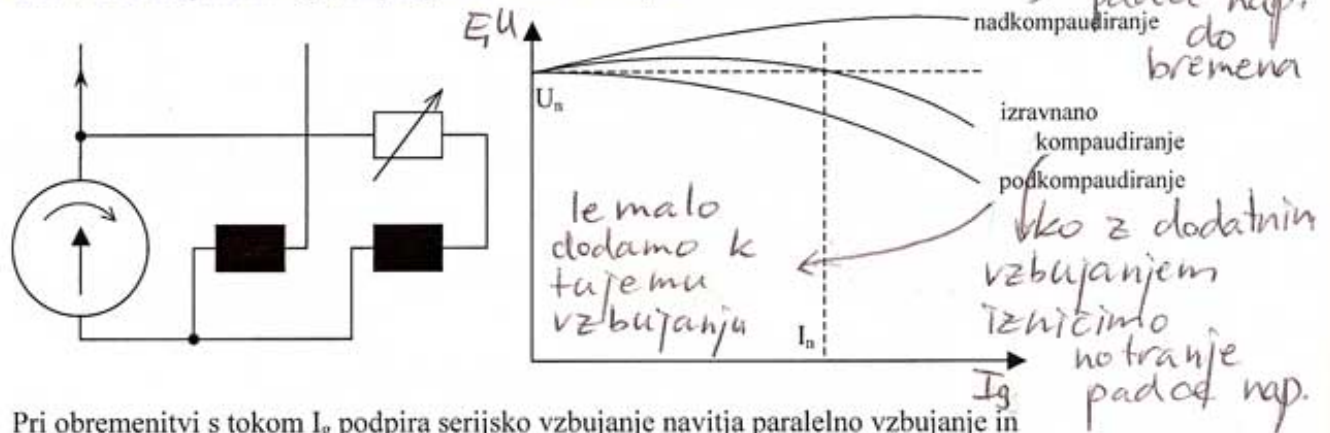


I_{gKR} je največji bremenski tok, pri katerem se stroj še sam vzbuja. Če tok le še malč povečamo se U , I_g in I_v sesedejo v KS. I_{gKS} pa je majhen, ker ga žene samo remanentna ind. napetost.

↑ samomorilna vezava
↑ kritični tok

14. Kompaudni gen. (vezalna shema, zunaja kar., problemi paralelnega dela).

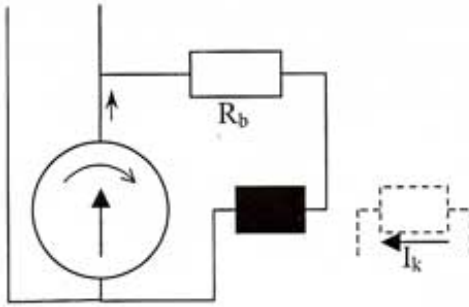
To je generator, ki ima na glavnih polih več vzbujalnih navitij, ki so tuje, paralelno in serijsko vezana. Najpogosteje je takšno mešano vzbujanje, da osnovnemu tujemu ali paralelnemu dodamo še serijsko navitje, ki podpira osnovno navitje.



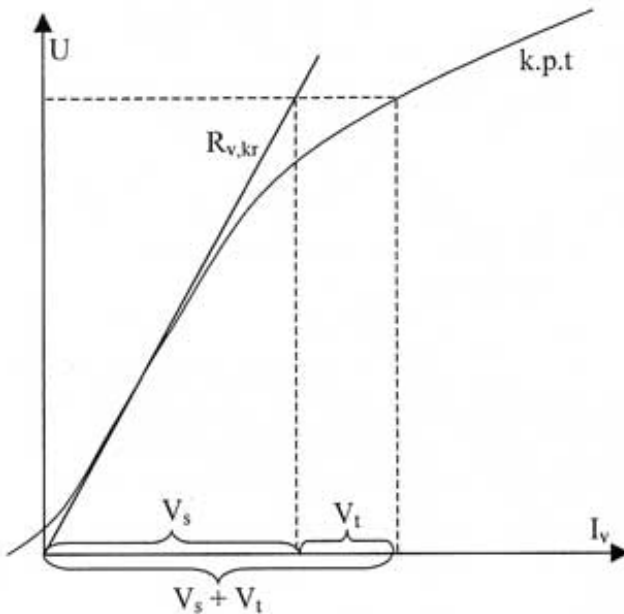
Pri obremenitvi s tokom I_g podpira serijsko vzbujanje navitja paralelno vzbujanje in karakteristika napetosti se dvigne. Dosežemo lahko tak dvig, da je pri nazivnem bremenu $I_g = I_n$ ista napetost $U_g = U_n$ (t.i. izravnano kompaudiranje).

- ima zelo mehko karakteristiko hitrosti (kot zaporedno vzbujan) vendar pri razbremenitvi ne bo pobegnil, se bo pa vrtel hitreje
- bolj kot je stroj obremenjen, I_v se poveča v zaporednem navitju, povečano polje upočasnjuje motor

15. Zakaj je enosmerni generator s serijskim vzbujanjem neuporaben (zunanja kar., diskusija)?



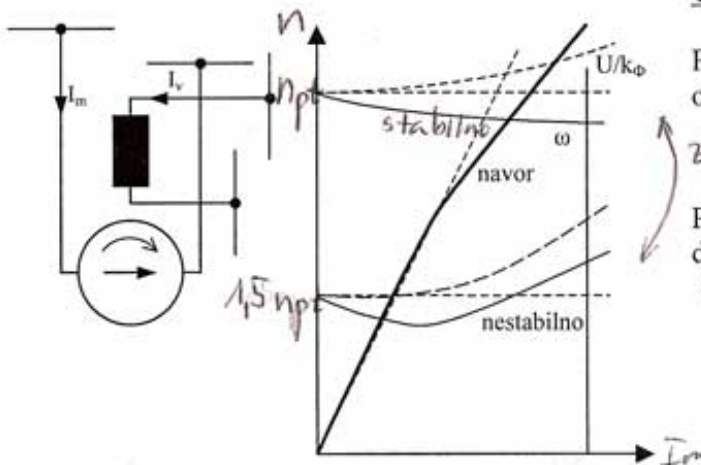
Generator deluje kot samovzbudni s tem, da bo bremenski upor R_b vključen v vzbujalni tokokrog in bo tako povečal upor vzbujalnega tokokroga. Tak generator se bo vzbujal močno odvisno od bremena in težko mu je uravnati napetost. Pri večjih bremenskih tokovih (manjših R_b) se bo sam vzbudil, pri manjših bremenskih tokovih (večjih R_b) pa bo možnost samovzbujanja izgubil. Deloval bo tako zelo nestabilno.



Serijsko gen. uporabljamo včasih za napajanje stalnega bremena R_b . Naprimer, če je breme vzbujalno navitje velikega sinhr. gen., enosmerni serijski generator pa je njegov vzbujalnik. Serijski tokokrog uredimo tako, da ne pride do samovzbujanja, da je torej uporabna karakteristika strmejša kot obremenilna. Upornost serijskega tokokroga je večja od kritične ($R_s > R_{kr}$). Tako dodamo krmilno tuje vzbujanje navitje s krmilnim tokom I_k . To navitje bo dalo vzbujanje $V_f = I_k \cdot N_f$, serijsko pa $V_s = I_a \cdot N_s$. Skupaj dobimo potrebno vzbujanje za napetost U . Z majhnim V_t torej krmilimo napetost U in I_a , tako gnan serijski gen je znan pod imenom ~~rototrol~~.

rototrol

16. Enosmerni motor s tujim (vzporednim) vzbujanjem (vezalna shema, zunanja karakteristika, lastnosti).



TUJE VZBUJANJE:

Pri konstantni napetosti napajalnega omrežja, se bo stroj vrtel s hitrostjo

$$\omega = \frac{E}{k_\phi} = \frac{U}{k_\phi} - \frac{I_a R_a}{k_\phi}$$

Pri konstantnima I_a in U opazimo dvojni vpliv bremenskega toka I :

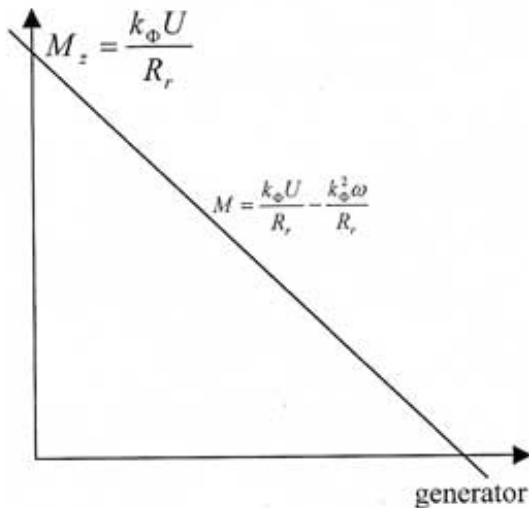
- zaradi zmanjševanja k_ϕ bo rasel prvi člen enačbe in zaradi njega se hoče dvigniti hitrost vrtenja. Zato temu motorju ne smemo prekiniti vzbujanja, ker imenovalec pade na 0 in bi se

- karakt se povezuje zaradi ΔV s kvadratom toka
 - karakt se znižuje zaradi padca nap. $I_a R_a$

teoretično motor zavrtel z neskončno hitrostjo in bi se uničil.

- zaradi naraščanja toka I bo padec IR_r naraščal in zniževal karakteristiko $\omega = \frac{E}{k_\Phi}$.

Lahko se zgodi, da reakcija indukta tako zmanjša k_Φ , da je to močnejše od vpliva IR_r . Tak primer se pojavi pri večjih obremenitvah, kjer se k_Φ zmanjšuje s kvadratom I, padec IR_r pa linearno. Tako se hitrost večja in delovanje postane nestabilno.



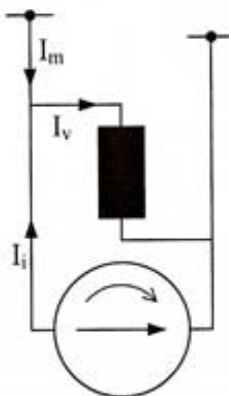
Navor, ki ga razvije motor je $M = k_\Phi \cdot I$. Ta bo proporcionalen toku I dokler je k_Φ konstanten. Pod vplivom reakcije indukta, pa se nekoliko zmanjša zaradi $\Delta\Phi$, zato ne bo več rasel čisto linearno. Navor se v odvisnosti od hitrosti vrtenja ω , pri konstantni napetosti U, toku I_v in k_Φ , spreminja po formuli

$$M = \frac{k_\Phi U}{R_r} - \frac{k_\Phi^2 \omega}{R_r}$$

Imamo tudi 3 možnosti za spreminjanje hitrosti:

1. Spremenimo napetost U na rotorskih priključkih. Samo od U_n navzdol, drugače lahko pride do preboja na komutatorju. Pri počasnem vrtenju moramo paziti na hlajenje rotorja, ker ostaja I_v konstanten.
2. Spremenimo vzbujalni tok I_v , s čimer spremenimo magnetni fluks in k_Φ (znižamo vzbujanje, zvečamo hitrost)
3. Povečamo upor rotorskega tokokroga R_r z vključevanjem zunanjih dodatnih uporov. S tem povečujemo padec $\frac{I_m R_r}{k_\Phi}$ in karakteristika pada.

VZPOREDNO VZBUJANJE:

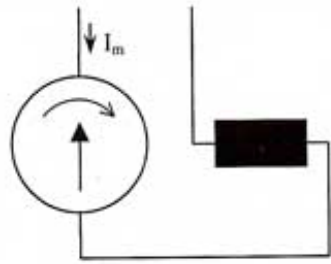


Napetost na vzbujalnem navitju je ista kot na rotorju. To je napetost U enosmernega omrežja, za katero mora biti dimenzionirano vzbujalno navitje. Pri konstantni napetosti omrežja ni razlike v delovanju motorja s tujim in paralelnim vzbujanjem.

za pogone tramvajev, vozičkov, ...

ko gre v klanec se vrtil počasneje z večjim navorom; poravnani pa hitreje z manjšim navorom

17. Enosmerni motor s serijskim vzbujanjem (vezalna shema, zunanja karakteristika, lastnosti).

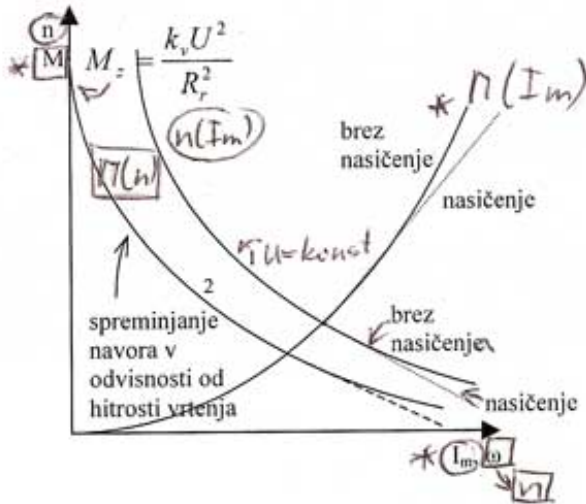


$I_m = I_v$

$\omega = 2\pi \cdot n = \frac{E}{k_\phi} = \frac{U - I_m R_r}{k_\phi} = \frac{U - I_m R_r}{k_v I_m}$

k_ϕ je proporcionalen motorskemu toku po relaciji $k_\phi = k_v I_m$

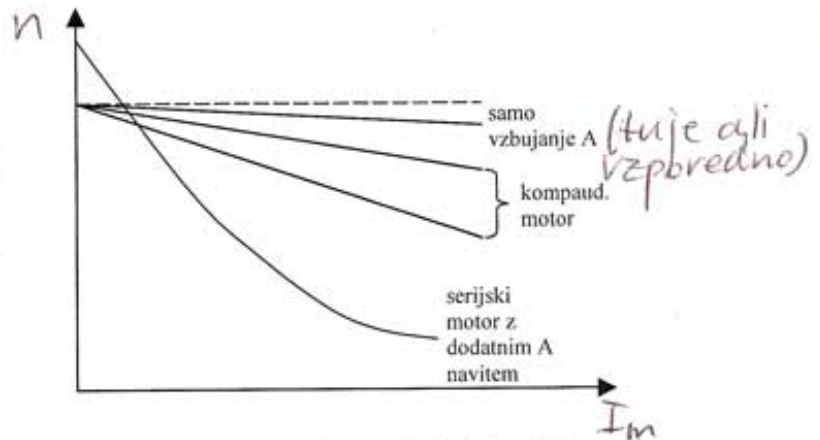
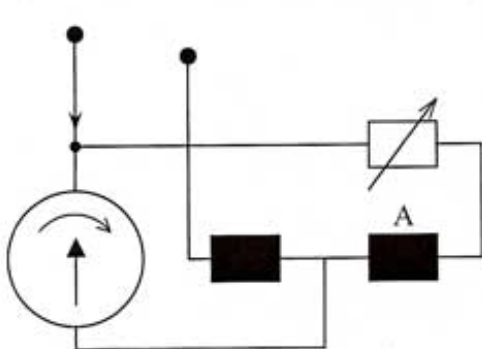
ne potrebuje prestat in sklopke.



V diagramu je kar. hitrosti vrtenja, če upoštevamo da sta U in k_v konstantna. V nasičenju se magnetni fluks praktično ne spreminja in postane konstanten kot pri stroju s tujim vzbujanjem. Hiperbola zato preide v premico kot je na sliki. Navor je $M = k_\phi I_m = k_v I_m^2$. V nasičenju preide parabola v premico tuje vzbujanega stroja. Serijski motor ima zelo mehko karakteristiko hitrosti vrtenja in navora. Primeren je predvsem za pogon transportnih strojev. Hitrost vrtenja in navor lahko spreminjamo tako, kot smo povedali pri vprašanju 16.

pri razbremenitvi lahko pobegne

18. Kompandni motor (vezalna shema, zunanja karakteristika brez enačb za vrtiljaje, vpliv vzporednega oz. serijskega navitja).



To je motor, ki ima na glavnih polih več vzbujalnih navitij, ki so tuje, paralelno in serijsko vezana. Najpogosteje je takšno mešano vzbujanje, da osnovnemu tujemu ali paralelnemu dodamo še serijsko navitje, ki podpira osnovno navitje. Pri motorju se vzbujanji vedno podpirata. Protikompatiran stroj je nestabilen in karakteristika hitrosti vrtenja se mu z obremenitvijo večja. Serijsko navitje karakteristiko bolj nagne in tak motor mehkeje sprejema sunke obremenitve. Motor na sliki ima mehko karakteristiko, podobno serijskemu. Vendar pri razbremenitvi ne uide, ker mu navitje A oskrbi osnovno magnetno polje. Hitrost vrtenja v PT bo omejena z vzbujanjem A.

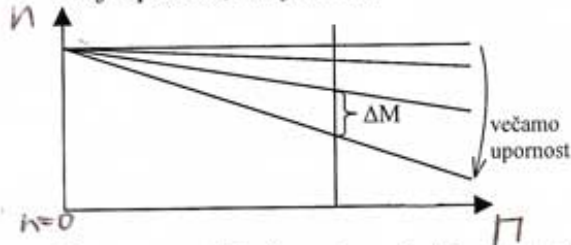
↳ vzporedno ali tuje

19. Kako zaganjamo enosmerne motorje (KS tok, problem pobega)?

Zagon enosm. motorja je problematičen, ker je ob priklopu kratek stik.

$$I_{iKS} = \frac{U}{R_i}$$

Ko stikalo priklopimo steče velik tok, ker je R_i zelo majhen. Le majhni stroji nimajo teh problemov, ker imajo majhen vztrajnostni moment in se takoj zavrtijo; se ne upirajo. Pri velikih strojih pa so zagonski momenti veliki, zato dodamo ZAGONSKE UPORE (R_z), da mehkeje sprejme sunke obremenitve. Ti upori predstavljajo velike izgube zato jih čimprej, ko stroj lepo teče, izključimo.



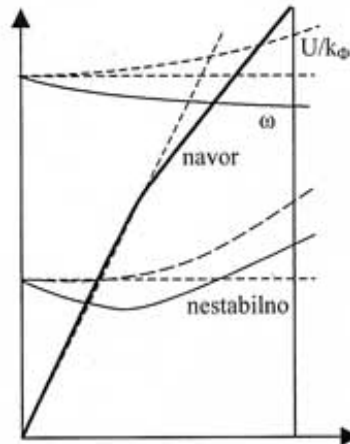
Upornost preklapljamemo iz največje proti najmanjši po ΔM in stroj pospešimo do končne hitrosti. Motor vedno zaženemo s polnim vzbujanjem, ker je takrat ~~poln~~ fluks in so vrtljaji najmanjši. Tako stroj lepo steče.

↳ največji

20.
s tujim

Regulacija hitrosti vrtenja pri en. motorju
(paralelnim) vzbujanjem.

Karakteristika:



manjša se učinkovitost ventilatorjev

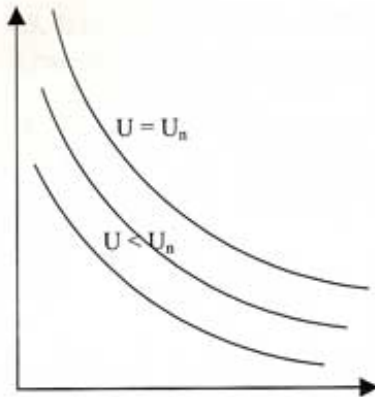
Imamo 3 možnosti za spreminjanje hitrosti:

1. Spremenimo napetost U na rotorskih priključkih. Samo od U_n navzdol, drugače lahko pride do preboja na komutatorju. Pri počasnem vrtenju moramo paziti na hlajenje rotorja, ker ostaja I_v konstanten. Pri znižanju U se zmanjša hitrost vrtenja. Običajno jo smemo znižati do nič oz. do $0,01 U_n$. ~~Pri počasnem vrtenju moramo paziti na hlajenje rotorja.~~ Stroj bo pri nazivnem Toku I_n razvijal M_n , po stroju pa bo tekel fluks Φ_n . Moč stroja se bo zmanjševala proporcionalno napetosti U ($P=I_n \cdot U$), oziroma hitrosti vrtenja ω ($P=M_n \cdot \omega$).
2. Spremenimo vzbujalni tok I_v , s čimer spremenimo magnetni fluks in k_Φ (znižamo vzbujanje zvečamo hitrost). Stroji običajno dovoljujejo obratovanje z $0,7-0,33 I_{vn}$. Moč stroja bo $P=I_n \cdot U_n$. S povečanjem hitrosti vrtenja ω se obratno sorazmerno zmanjša navor M , enako kot se zmanjša fluks.
3. Povečamo upor rotorskega tokokroga R_r z vključevanjem zunanjih dodatnih uporov. S tem povečujemo padec $\frac{I_n R_r}{k_\Phi}$ in karakteristika pada. Poleg tega pa predstavlja to velike izgube in zmanjšuje izkoristek. Moč je:

$$P_{meh} = U_n I_n - I_n^2 R_r = P_{el,n} - P_{foulska}$$

Tak način zmanjšanja hitrosti uporabimo redko. Samo pri omejevanju tokovnega sunka in za zagotavljanje mehkega steka.

21. Regulacija hitrosti vrtenja pri enosm. motorju s serijskim vzbujanjem.



Navor in hitrost lahko takemu stroju spreminjamo tako, da mu spreminjamo priključno napetost U , vključimo dodatne rotorske upore R_{dod} , ali pa zmanjšamo vzbujanje oz. koeficient vzbujanja k_v . Vse te možnosti so zajete v enačbah:

$$\omega = 2\pi \cdot n = \frac{E}{k_\Phi} = \frac{U}{k_\Phi} - \frac{I_m R_r}{k_\Phi} = \frac{U - I_m (R_r + R_{dod})}{k_v I_m}$$

$$M = k_\Phi I_m = k_v I_m^2$$

$$n = \frac{U}{k_v \sqrt{M}}$$

Z znižanjem napetosti U se hitrost vrtenja proporcionalno zmanjšuje pri istem toku I in istem navoru M . Ko dodamo upore, speljemo čez njih nekaj toka in tako zmanjšamo fluks in dobimo višje vrtljaje. Vendar tu zaradi serijske upornosti pride do večjih izgub, zato to ni dobro.

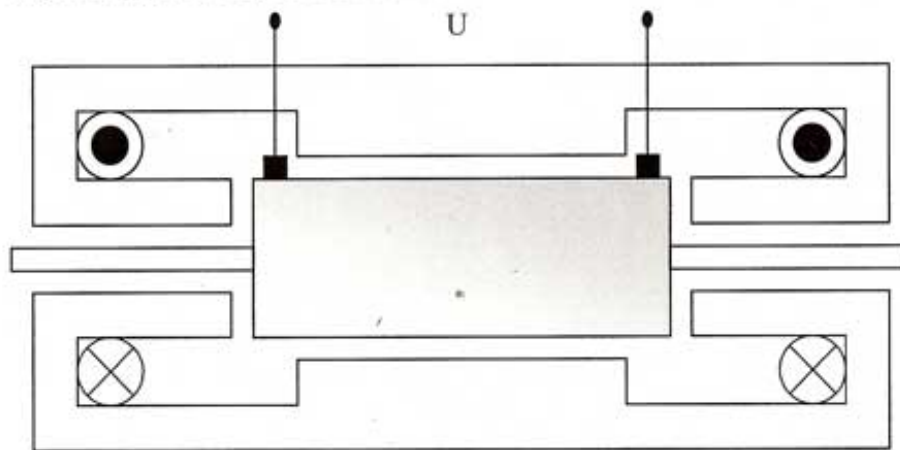
22. Unipolarni enosmerni stroj.

To je enopolni stroj in edini, ki nima kolektorja. Tok tega stroja je enosmeren, zato je enosmeren tudi fluks. Polje v reži je homogeno, ker je tudi reža homogena.

$$M = k \cdot \Phi \cdot I \quad \text{fluks je zelo majhen}$$

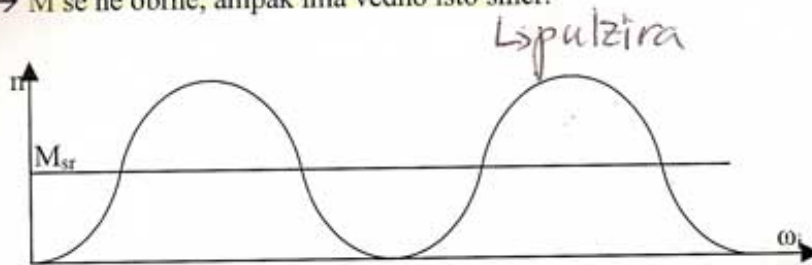
$$E_i = k \cdot \Phi \cdot n$$

Stroj je narejen za nizke napetosti in zelo visoke toke (do 60.000A), saj moramo že za zelo majhno napetost stroj zelo hitro vrteti.



23. Izmenični kolektorski stroj (imenovan univerzalni). Fizikalna slika delovanja.
Transformatorska napetost in problemi komutacije.

- deluje le kot motor v serijski vezavi,
- imamo izmenično vzbujanje, kar pomeni da je tudi Φ izmeničen,
- M se ne obrne, ampak ima vedno isto smer.



$$M_{sr} = k_n \cdot \Phi_{ef} \cdot I_{ef} = k \cdot I^2$$

→ navor pulzira z dvojno frekvenco omrežja

Ta motor ima pri istem nazivnem navoru moč kot enosmerni kolektorski motor.

- lahko ga priključimo na enosmerno ali izmenično omrežje
- visoke hitrosti vrtenja