

Rešene naloge iz predmeta
Električni stroji

Doc. dr. Maks Berlec

Rešene naloge za SINHRONSKE STROJE

1. Narišite razvito shemo navitja in izračunajte faktor navitja za dvopolni trifazni sinhronski generator, ki ima na statorju 24 utorov, navitje ni skrajšano!

Podatke na kratko zapišemo takole:

$$2p = 2$$

$$m = 3$$

$$N = 24$$

Naša naloga je pravilno razporediti navitja po statorskih utorih. Pri razporejanju imamo načeloma proste roke zato lahko navitja lahko razporedimo na več načinov. Držimo se naslednjih pravil:

1. Inducirane napetosti v navitjih posameznih faz morajo biti enake. To najlažje dosežemo, če so tuljavice navitij vseh faz enako razporejene.
2. Napetosti morajo biti premaknjene za 120° . Če so tuljavice posameznih faz enako razporejene, morajo biti navitja faz med sabo premaknjena za električni kot 120° .
3. Stremimo za tem, da ob enaki količini porabljenega materiala dosežemo čim večjo napetost.
4. Upoštevamo dodatne zahteve, npr., da ima napetost čimbolj sinusno obliko.

Tovrstne probleme začnemo reševati razmeroma rutinsko, in sicer izračunamo število utorov, ki se nahajajo pod enim rotorskim magnetnim polom:

$$\tau_p = \frac{N}{2p} = \frac{24}{2} = 12$$

Nato izračunamo število utorov pod enim polom, ki pripadajo eni fazi (število utorov v pasu):

$$q = \frac{\tau_p}{m} = \frac{12}{3} = 4$$

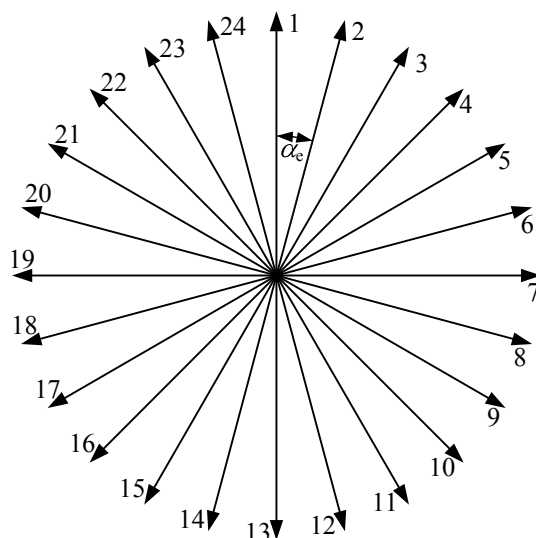
Sledi izračun geometrijskega kota med dvema sosednjima utoroma:

$$\alpha_g = \frac{360^\circ}{N} = \frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$$

Za izračun faktorja navitja in razporeditev tuljavic po utorih je zelo pomemben električni kot α_e med induciranimi napetostma v dveh sosednjih utorih. Izkaže se, da se napetost ne inducira v vseh utorih hkrati. Spomnite se poizkusa na vajah. Geometrični kot α_g in električni kot α_e sta medsebojno povezana. Razmišljamo lahko takole: Ko se rotor zavrti za en vrtljaj (opravi geometrični kot 360°), dobimo p period inducirane napetosti (električni kot $p \cdot 360^\circ$). Iz tega lahko sklepamo, da je električni kot večji od geometričnega kota za faktor p :

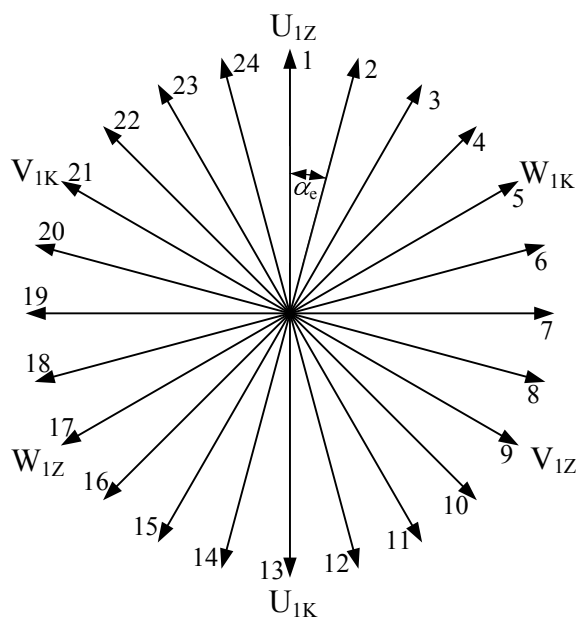
$$\alpha_c = p \cdot \alpha_g = 1 \cdot 15^\circ = 15^\circ$$

S pomočjo izračunanega električnega kota lahko narišemo kazalčni diagram utorških induciranih napetosti, ali utorovno zvezdo:



Slika 1. Utorovna zvezda

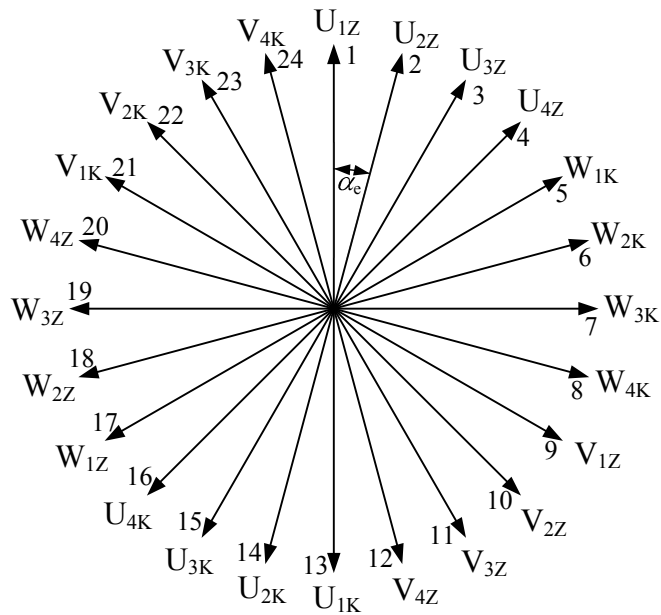
Sedaj lahko začnemo z razporejanjem navitij. V utor 1 vstavimo prvo stranico prve tuljavnice faze U, ki jo označimo U_{1Z} . V utor 13 vstavimo drugo stranico prve tuljavnice U_{1K} . Številka v indeksu pomeni številko tuljavnice, črka Z pomeni začetno stranico in črka K končno stranico tuljavnice. Za električni kot 120° moramo zamakniti prvo stranico prve tuljavnice faze V, kar pomeni, da v utor 9 vstavimo V_{1Z} in v utor 21 vstavimo V_{1K} . Začetek faze W zamaknemo za električni kot 120° za začetkom faze V. Zato v utor 17 vstavimo stranico tuljavnice W_{1Z} in v utor 5 vstavimo W_{1K} .



Slika 2. Stanje navitij po tem, ko smo za vsako fazo vstavili po eno tuljavnico.

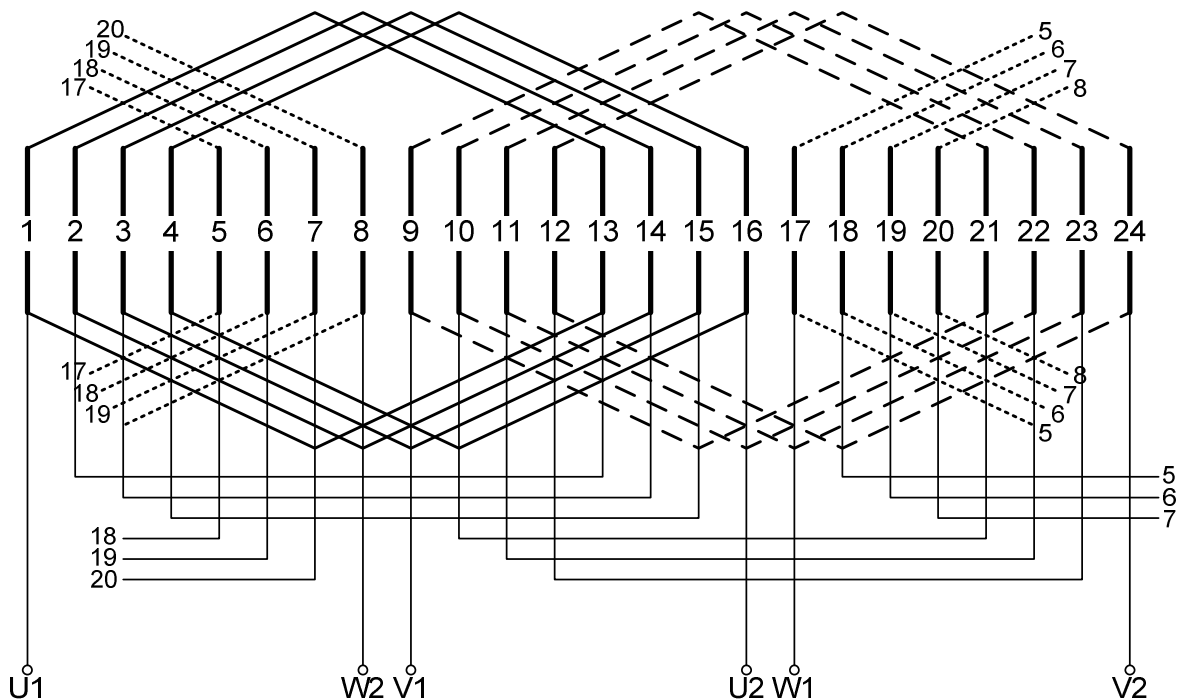
Kot vidimo na sliki imamo na voljo še $\frac{3}{4}$ utorov. Skladno s številom utorov v pasu q , ki znaša 4, moramo za vsako fazo dodati še po 3 navitja. Če želimo doseči čim višjo induci-

rano napetost, moramo za začetke tuljavic iste faze izbrati utore, ki so čim bliže skupaj. Zato v utore 2, 3 in 4 damo začetke druge, tretje in četrte tuljavice faze U, v utore 14, 15, in 16 dodamo pripadajoče končne stranice tuljavic faze U. Podobno storimo tudi pri navitjih preostalih dveh faz.



Slika 3. Razpored vseh navitij

Navitje pa lahko prikažemo tudi drugače, saj zgornji način postane nepregleden, če ima stroj veliko polov. Na sliki 3 so nazorno prikazane posamezne stranice tuljavic. Prikaz posameznih tuljavic pa je bolj nazoren na razviti shemi navitja. Razvito shemo dobimo, če stator navidezno prerežemo in ga zravnamo:



Slika 4. Razvita shema navitja

Izračunati moramo še faktor navitja f_n . Faktor navitja je razmerje med vektorsko seštetimi in algebrsko seštetimi utorskimi napetostmi. Faktor navitja je sestavljen iz dveh faktorjev, in sicer $f_n = f_p f_s$. Prvi faktor f_p imenujemo pasovni faktor, ki nastopa zato, ker so inducirane napetosti tuljavic, ki so v pasu, med sabo premaknjene za električni kot. Navitja običajno skrajšujemo, kar pomeni, da je širina tuljavice krajša od τ_p . V tem primeru dobimo v tuljavici manjšo inducirano napetost, ker tuljavica nikoli ne objame celotnega magnetnega pretoka. Zmanjšanje napetosti zaradi skrajšanja, upoštevamo s faktorjem skrajšanja f_s .

$$f_p = \frac{\sin\left(q \frac{\alpha_e}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{\alpha_e}{2}\right)} = \frac{\sin\left(4 \frac{15^\circ}{2}\right)}{4 \sin\left(\frac{15^\circ}{2}\right)} = 0,95766$$

V našem primeru navitje ni skrajšano. Faktor skrajšanja tako znaša:

$$f_s = \sin\left(90^\circ \frac{s}{\tau_p}\right) = \sin\left(90^\circ \frac{12}{12}\right) = 1$$

Faktor navitja znaša:

$$f_n = f_p f_s = 0,9577 \cdot 1 = \underline{\underline{0,95766}}$$

2. Narišite razvito shemo navitja in izračunajte faktor navitja za štiripolni trifazni sinhronski stroj, ki ima na statorju 24 utorov, navitje ni skrajšano!

Podatke na kratko zapišemo takole:

$$2p = 4$$

$$m = 3$$

$$N = 24$$

Naloga je zelo podobna prejšnji nalogi. Za podrobnosti glej prejšnjo nalogo!

$$\tau_p = \frac{N}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

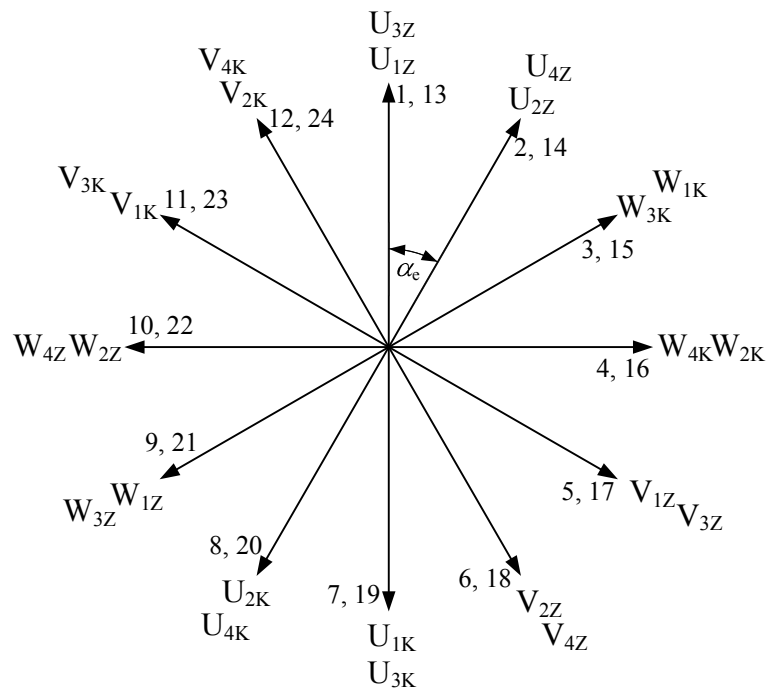
$$q = \frac{\tau_p}{m} = \frac{6}{3} = 2$$

$$\alpha_g = \frac{360^\circ}{N} = \frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$$

$$\alpha_e = p \cdot \alpha_g = 2 \cdot 15^\circ = 30^\circ$$

Na podlagi električnega kota α_e lahko narišemo utorovno zvezdo. Velja:

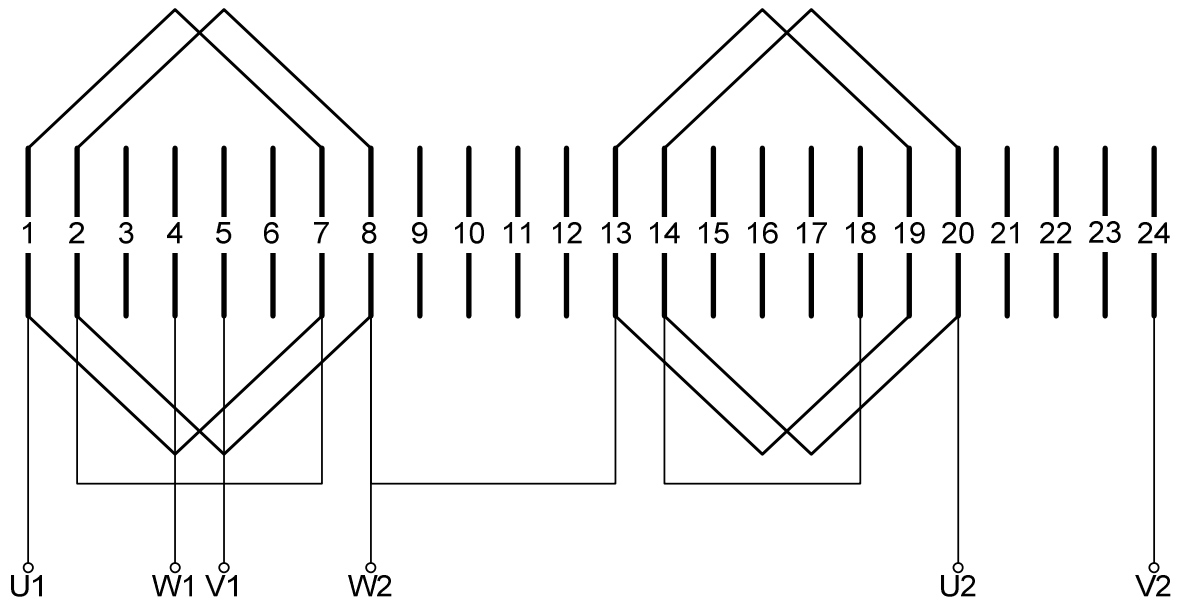
$$\text{Število kazalcev} = \frac{360^\circ}{\alpha_e} = \frac{360^\circ}{30^\circ} = 12$$



Slika 5. Utorovna zvezda za štiripolni stroj

Pri tem primeru je pomembno, da imamo po dve številki utora pri vsakem kazalcu napetosti. V splošnem imamo p številke utorov pri vsakem kazalcu. V našem primeru imamo po dva severna in južna pola. Zato se hkrati nahajata po dva utora v enakem magnetnem položaju in zato se tudi v obeh utorih inducira enaka napetost.

V tem primeru je prehod od utorovne zvezde do razvite sheme navitja za malenkost bolj zapleten. Bolj je navitje zapleteno, bolj je važno, da si ustvarimo predstavo o tem kako so tuljavice razporejene in povezane med sabo.



Slika 6. Razvita shema navitja za štiripolni stroj

$$f_p = \frac{\sin\left(q \frac{\alpha_e}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{\alpha_e}{2}\right)} = \frac{\sin\left(2 \frac{30^\circ}{2}\right)}{2 \sin\left(\frac{30^\circ}{2}\right)} = 0,9659$$

V našem primeru navitje ni skrajšano. Faktor skrajšanja znaša:

$$f_s = \sin\left(90^\circ \frac{s}{\tau_p}\right) = \sin\left(90^\circ \frac{6}{6}\right) = 1$$

Končna vrednost faktorja navitja znaša:

$$f_n = f_p f_s = 0,9659 \cdot 1 = \underline{\underline{0,9659}}$$

- 3. Narišite razvito shemo navitja in izračunajte faktor navitja za dvopolni trifazni sinhronski generator, ki ima na statorju 24 utorov! Navitje je skrajšano na 9 utorov.**

Podatke na kratko zapišemo takole:

$$2p = 4$$

$$m = 3$$

$$N = 24$$

$$s = 9$$

Opravimo rutinske izračune:

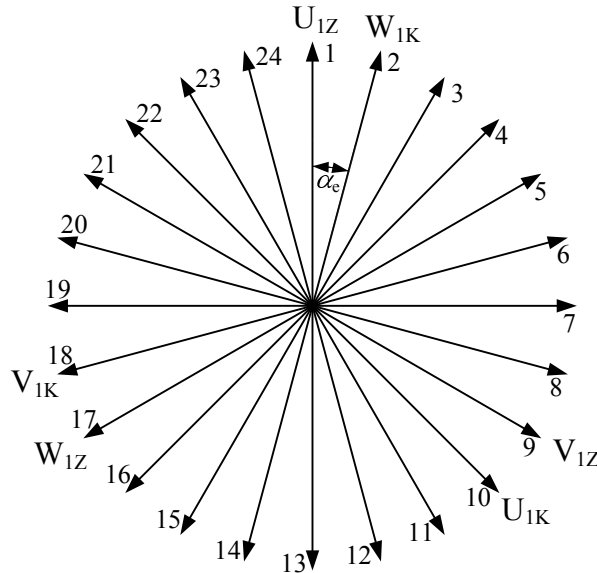
$$\tau_p = \frac{N}{2p} = \frac{24}{2} = 12$$

$$q = \frac{\tau_p}{m} = \frac{12}{3} = 4$$

$$\alpha_g = \frac{360^\circ}{N} = \frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$$

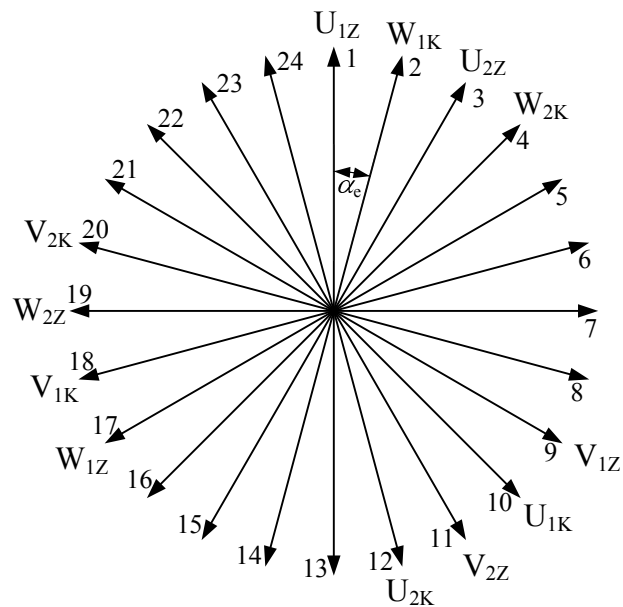
$$\alpha_e = p \cdot \alpha_g = 1 \cdot 15^\circ = 15^\circ$$

Sedaj lahko narišemo utorovno zvezdo. Zaradi skrajšanja navitja nimamo na voljo naslednjega utora za drugo tuljavico vsake faze. Npr. drugo tuljavico navitja faze U načeloma vstavimo v utor 2, ki pa je že zaseden s končno stranico prve tuljavice faze W.



Slika 7. Utorovna zvezda z vstavljeno po eno tuljavico na navitje faze

Zato smo prisiljeni vstaviti drugo tuljavico navitja faze U v utor 3.

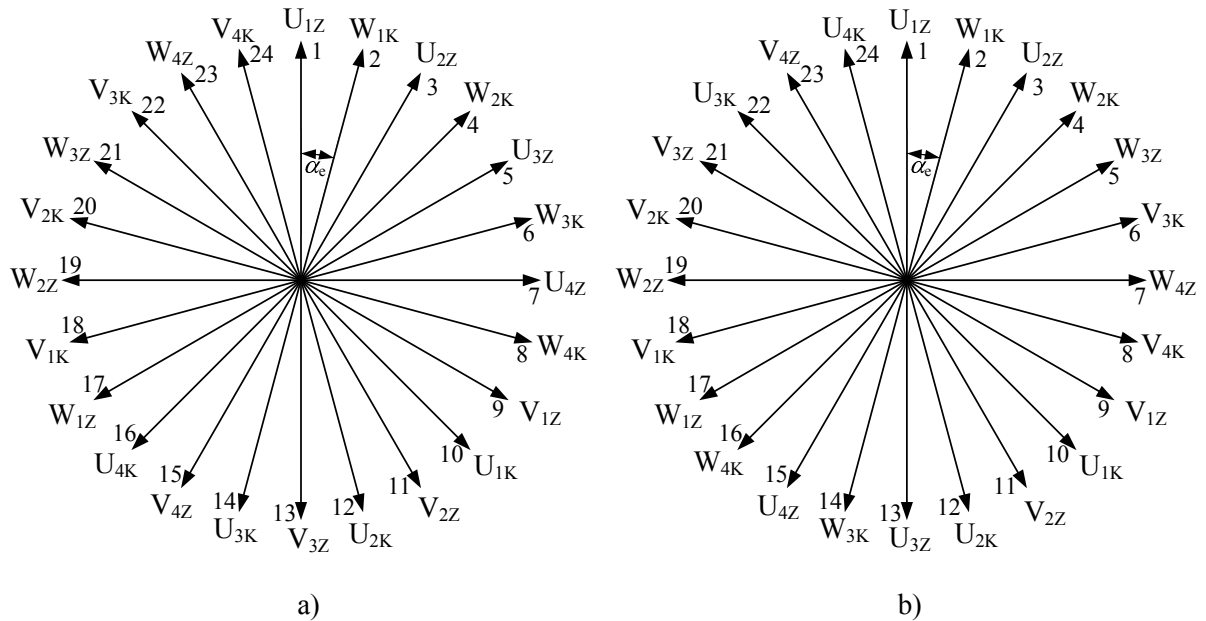


Slika 8. Utorovna zvezda z vstavljeno polovico tuljavic

Tuljavice bi lahko sistematično vstavljali naprej, kar pomeni, da bi v utor 5 vstavili tretjo tuljavico navitja faze U, ker pa želimo doseči višjo končno napetost pa je bolj smiselno, da nadaljujemo v utoru 24, ker tako dosežemo manjši kot med posameznimi napetostmi. V tem primeru nastopi težava pri izračunih, ker ne moremo izračunati faktorja navitja na

običajen način. Električni kot med napetostmi namreč ni konstanten. Zato moramo kazalce napetosti sešteti vektorsko.

Na sliki 9a so sistematično razporejene tuljavice. S tako razporeditvijo navitij pa ne dobimo najvišje možne napetosti. To pomeni, da je faktor navitja manjši od največjega možnega. Pri izračunu faktorja navitja za sistematično razporejene tuljavice je pomembno, da upoštevamo dejanski električni kot med kazalci napetosti začetkov stranic tuljavic. Ker za isto fazo uporabimo vsak drugi utor, je dejanski kot med kazalci napetosti enak $2\alpha_e$.



Slika 9. Sistematično in optimalno razporejene tuljavice

$$f_p = \frac{\sin\left(q \frac{2\alpha_e}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{2\alpha_e}{2}\right)} = \frac{\sin\left(4 \frac{2 \cdot 15^\circ}{2}\right)}{4 \sin\left(\frac{2 \cdot 15^\circ}{2}\right)} = 0,8365$$

$$f_s = \sin\left(90^\circ \frac{s}{\tau_p}\right) = \sin\left(90^\circ \frac{9}{12}\right) = 0,9239$$

$$f_n = f_p \cdot f_s = 0,8365 \cdot 0,9239 = \underline{\underline{0,7778}}$$

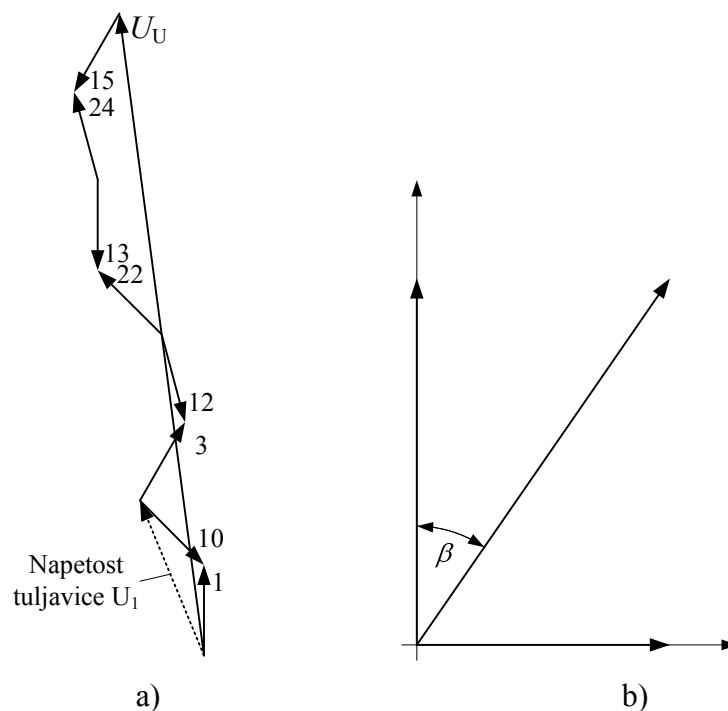
Sistematično razporejeno navitje ima razmeroma nizek faktor navitja, kar pomeni visoko končno ceno stroja, zato takšnih navitij v resnici ne izdelujemo. Skrajševanje navitij je sicer zelo pomemben konstrukcijski ukrep, ki je namenjen predvsem izboljševanju oblike napetosti. Ugodnejše faktorje skrajšanih navitij dosežemo tako, da izdelujemo **dvoplastna navitja**. Sedaj si oglejmo še izračun faktorja navitja, ki je razporejeno optimalno. Napetosti bomo sešteli vektorsko, kar je prikazano na sliki 10a. Številke ob konicah puščic so številke utorov. Dva kazalca, ki sta obrnjena s konicami skupaj, predstavljata napetost tuljavice, ki jo dobimo z odštevanjem kazalcev pripadajočih utorov. Kazalca iste tuljavice odštejemo zato, ker poteka ovoj ene stranice tuljavice v eno smer, druge stranice pa v drugo smer. Kot n -tega kazalca glede na ordinato izračunamo s formulo:

$$\beta = (n - 1) \alpha_e$$

Komponenti napetosti tuljavice, ki se začne v n -tem utoru in ima tuljavica širino s in je dolžina kazalca 1, znašata:

$$U_x = \sin((n - 1) \alpha_e) - \sin((n + s - 1) \alpha_e)$$

$$U_y = \cos((n - 1) \alpha_e) - \cos((n + s - 1) \alpha_e)$$



Slika 10. Kazalci napetosti, ki sestavljajo napetost faze U.

Komponenti fazne napetosti izračunamo tako, da seštejemo komponente posameznih kazalcev:

$$\begin{aligned} U_{xf} &= \sin((1 - 1)15^\circ) - \sin((1 + 9 - 1)15^\circ) + \sin((3 - 1)15^\circ) - \sin((3 + 9 - 1)15^\circ) \\ &\quad - \sin((13 - 1)15^\circ) + \sin((13 + 9 - 1)15^\circ) - \sin((15 - 1)15^\circ) + \sin((15 + 9 - 1)15^\circ) = \\ &= \sin(0^\circ) - \sin(135^\circ) + \sin(30^\circ) - \sin(165^\circ) \\ &\quad - \sin(180^\circ) + \sin(315^\circ) - \sin(210^\circ) + \sin(345^\circ) = -0,93185 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{yf} &= \cos((1 - 1)15^\circ) - \cos((1 + 9 - 1)15^\circ) + \cos((3 - 1)15^\circ) - \cos((3 + 9 - 1)15^\circ) \\ &\quad - \cos((13 - 1)15^\circ) + \cos((13 + 9 - 1)15^\circ) - \cos((15 - 1)15^\circ) + \cos((15 + 9 - 1)15^\circ) = \\ &= \cos(0^\circ) - \cos(135^\circ) + \cos(30^\circ) - \cos(165^\circ) \\ &\quad - \cos(180^\circ) + \cos(315^\circ) - \cos(210^\circ) + \cos(345^\circ) = 7,07812 \end{aligned}$$

Vektorsko sešeta napetost navitja faze U znaša:

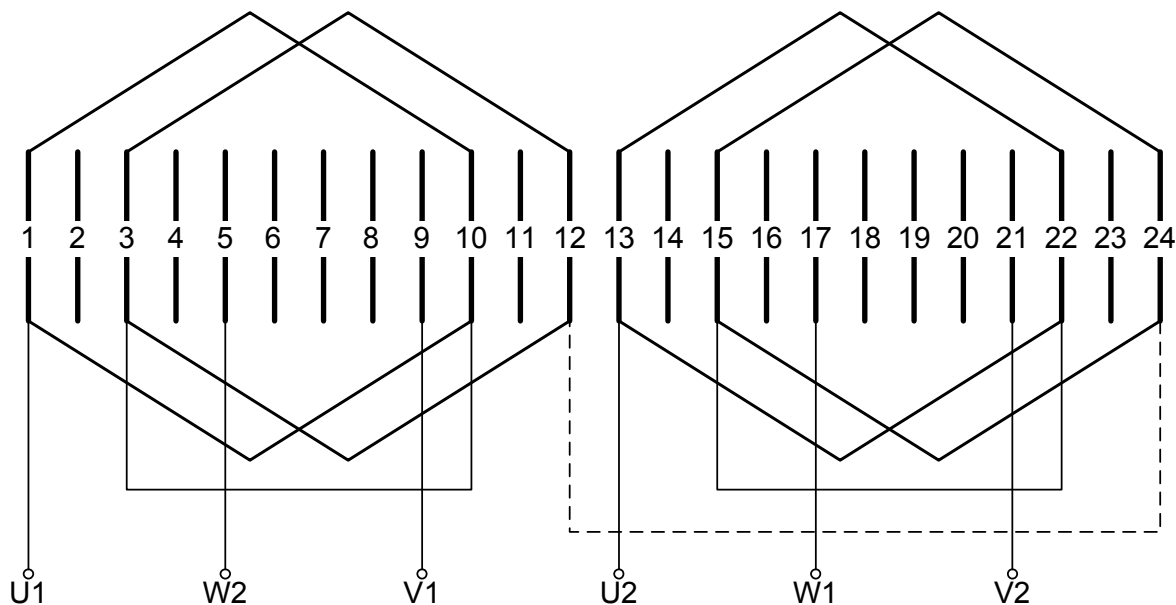
$$U = \sqrt{U_{xf}^2 + U_{yf}^2} = \sqrt{(-0,93185)^2 + 7,07812^2} = 7,1392$$

Napetosti navitij ostalih dveh faz sta, seveda, enaki.

Faktor navitja je razmerje med vektorsko seštetimi in aritmetično seštetimi kazalci U_a . Ker je vseh kazalcev 8, znaša aritmetična vsota napetosti $U_a = 8$. Faktor navitja znaša:

$$f_n = \frac{U}{U_a} = \frac{7,1392}{8} = 0,8924$$

Očitno je faktor navitja pri razporeditvi navitij s slike 9b (0,8924) mnogo boljši kot faktor navitja s slike 9a (0,7778). Potrebno je paziti pri vezavi tuljavic, saj moramo tretjo in četrto tuljavico zvezati v obratni smeri. Ta posebnost je na razviti shemi, ki je prikazana na sliki 11 poudarjena s črtkano črto:



Slika 11. Razvita shema dvopolnega skrajšanega enoplastnega navitja.

4. Narišite razvito shemo dvoplastnega navitja z naslednjimi podatki:

$$\begin{aligned} 2p &= 2 \\ m &= 3 \\ N &= 12 \\ s &= 5 \end{aligned}$$

Slabost enoplastnih navitij (navitij ki smo jih obravnavali do sedaj) je ta, da končne stranice tuljavic zasedajo utore, ki bi bili ugodni za začetki stranic tuljavic naslednje faze. Zato moramo dati naslednjo tuljavico v utor z večjim faznim zamikom, kar poslabša faktor navitja. Pri prejšnji nalogi smo morali iz navedenega razloga drugo tuljavico faze U začeti v utoru 3, čeprav je utor 2 ugodnejši.

Omenjeno slabost rešimo z dvoplastnim navitjem. Bistvo pri dvoplastnih navitjih je, da vsaka tuljavica zaseda le pol utora. Na ta način imamo vedno prostor za optimalen začetek nove faze. Pri dvoplastnih navitjih je število ovojev tuljavice približno za polovico manjše, kot pri tuljavici enoplastnega navitja, je pa zato tuljavic še enkrat več.

Pri dvoplastnem navitju so izračuni enaki kot pri enoplastnem navitju:

$$\tau_p = \frac{N}{2p} = \frac{12}{2} = 6$$

$$q = \frac{\tau_p}{m} = \frac{6}{3} = 2$$

$$\alpha_g = \frac{360^\circ}{N} = \frac{360^\circ}{12} = 30^\circ$$

$$\alpha_e = p \cdot \alpha_g = 1 \cdot 30^\circ = 30^\circ$$

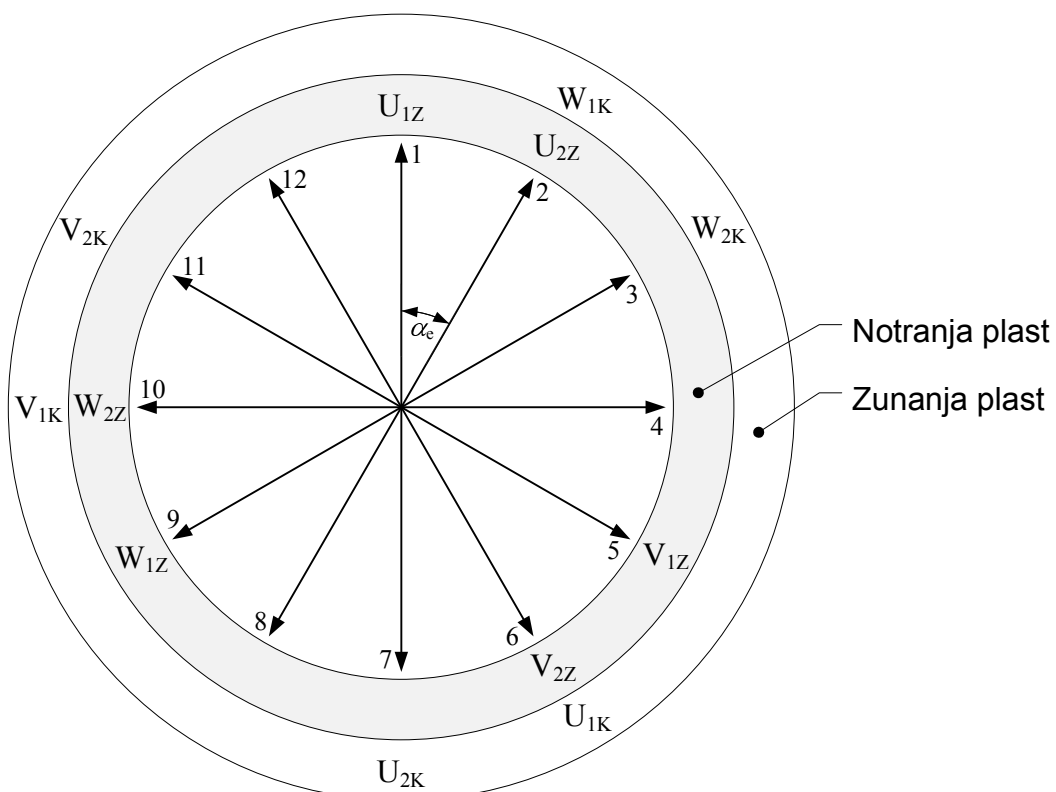
$$f_p = \frac{\sin\left(q \frac{\alpha_e}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{\alpha_e}{2}\right)} = \frac{\sin\left(2 \frac{30^\circ}{2}\right)}{2 \sin\left(\frac{30^\circ}{2}\right)} = 0,96593$$

V našem primeru navitje ni skrajšano. Faktor skrajšanja tako znaša:

$$f_s = \sin\left(90^\circ \frac{s}{\tau_p}\right) = \sin\left(90^\circ \frac{5}{6}\right) = 0,96593$$

Faktor navitja znaša:

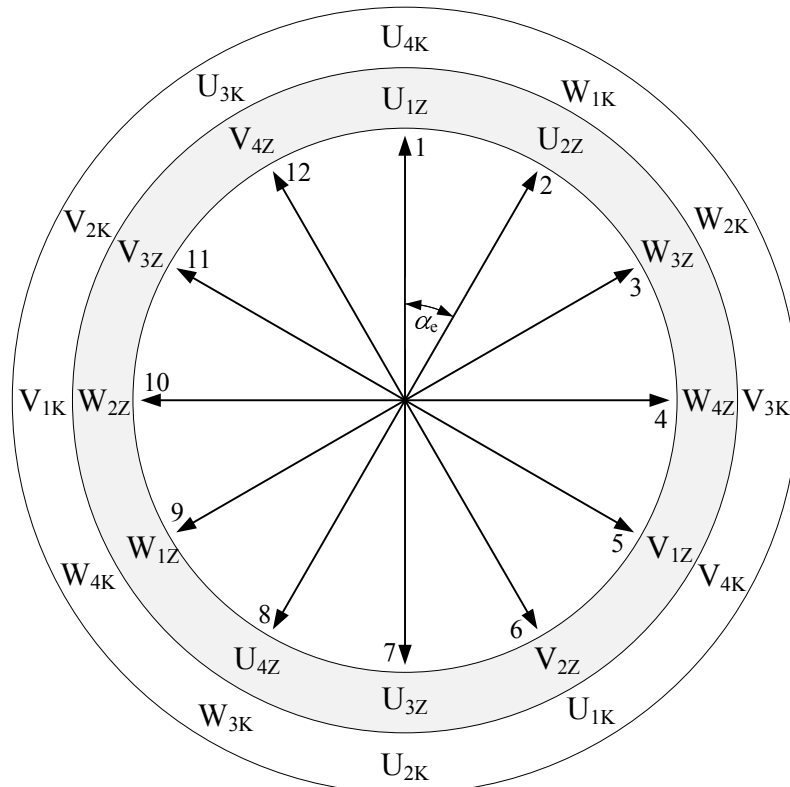
$$f_n = f_p f_s = 0,9577 \cdot 1 = \underline{\underline{0,93301}}$$



Slika 12. Utorovna zvezda dvoplastnega navitja, ko je nameščena polovica tuljavic

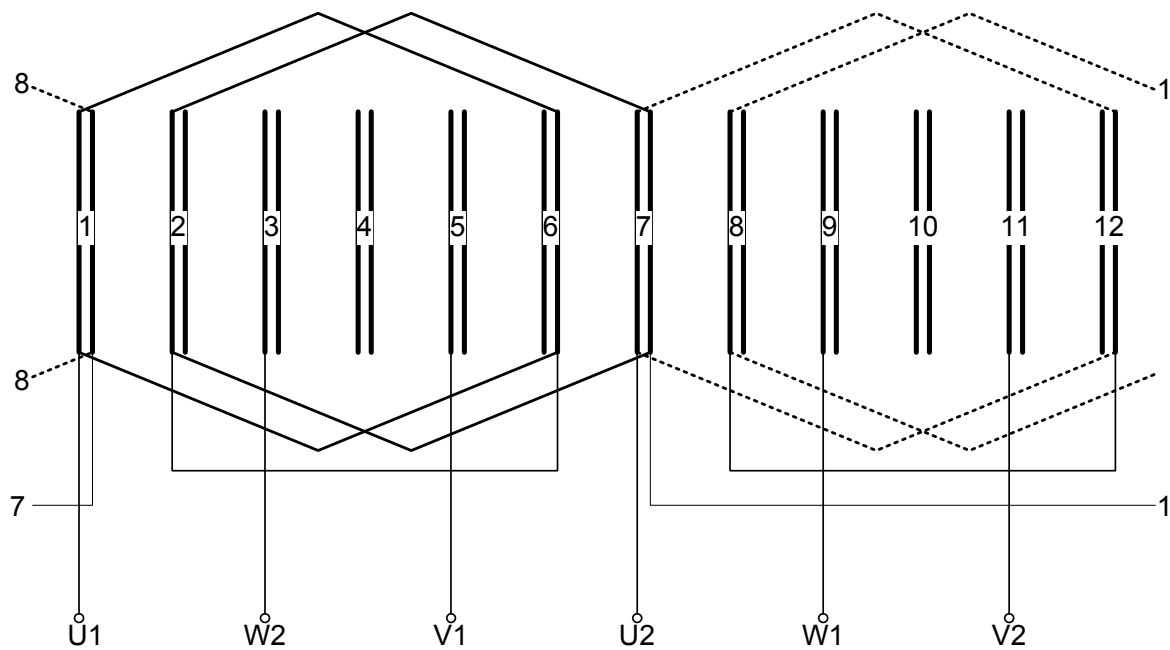
V vsakem utoru sta stranici dveh tuljavic. Pas utorov je strnjen, čeprav je navitje skrajšano, kar zagotavlja maksimalne faktorje navitja. Tuljavice, ki so nameščene do sedaj spada-

jo v prvo grupo tuljavic. Porabljenega je polovico prostora v utorih. V preostalo polovico prostora namestimo drugo grupo tuljavic, ki jo za navitje faze U začnemo nameščati v utor 13. Napetost v utoru 13, kjer je začetek druge grupe navitja faze U, je za 180° premaknjena glede na napetost v utoru 1, kjer je začetek prve grupe navitja faze U, zato moramo drugo grupo vezati v obratni smeri.

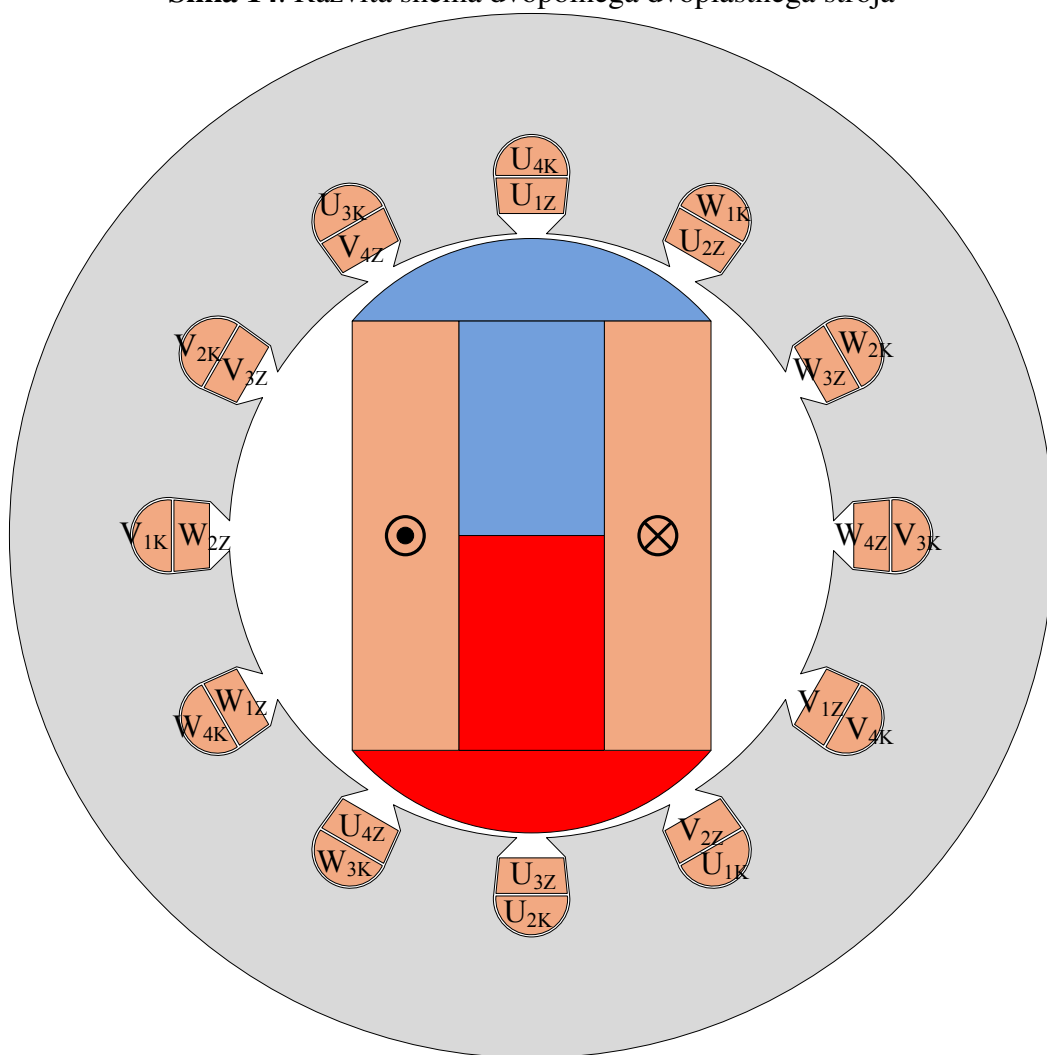


Slika 13. Utorovna zvezda dvoplastnega navitja

Razvito shemo narišemo tako, da utore narišemo dvojno, ker imamo pri dvoplastnem navitju po dve stranici tuljavice v vsakem utoru. Pri dvoplastnem navitju izgubimo nekaj prostora v vsakem utoru, ker je potrebna dodatna medfazna izolacija znotraj vsakega uto-
ra.



Slika 14. Razvita shema dvopolnega dvoplastnega stroja

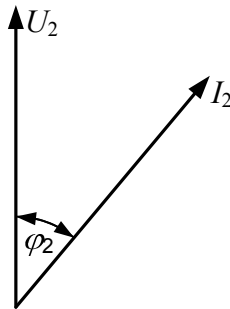


Slika 15. Shematski prikaz prečnega prereza stroja

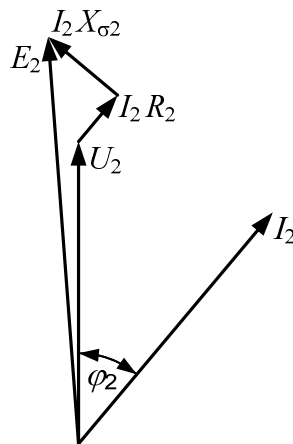
5. Sinhronski stroj s cilindričnim rotorjem ima naslednje podatke: relativna sinhronska reaktanca $X_{sr}=1,4$ in $\cos(\varphi_{2n})=0,75$. Narišite kazalčne diagrame za različna obratovalna stanja!

Kazalčni diagram sinhronskega stroja nam omogoča proučevanje obratovalnih stanj, če le poznamo neko, ali nekaj obratovalnih stanj, npr. prosti tek, kratek stik, nazivno stanje....

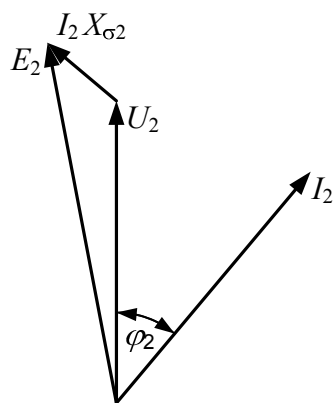
Kazalčni diagram začnemo risati iz nečesa, kar je znano. Običajno je znano nazivno stanje. V tem stanju je znana napetost na sponkah stroja, tok ki teče iz stroja, ali v stroj in kot med tokom in napetostjo:



V nadaljevanju pa razmišljamo takole. Ker je skozi statorsko navitje tok in ima navitje ohmsko in induktivno upornost, imamo znotraj navitja zagotovo tudi padca napetosti. Napetost, ki se inducira v navitju, je večja od napetosti na izhodnih sponkah stroja ravno za padec napetosti v navitju. Ohmski padec napetosti $I_{2n} R_2$ je sofazen s tokom, torej ima isto smer kot tok I_{2n} . Induktivni padec napetosti $I_{2n} X_{\sigma 2}$ pa prehiteva tok I_{2n} za 90° :

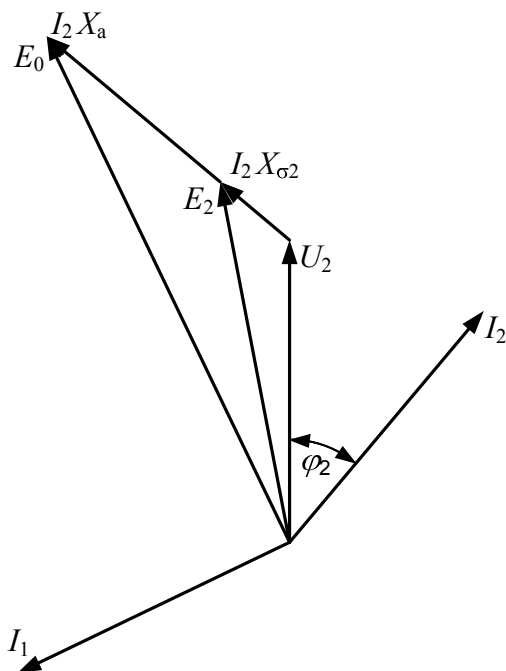


Resnični stroji imajo zelo nizko upornost R_2 glede na induktivno upornost $X_{\sigma 2}$. Zato pri risanju običajno zanemarimo ohmski padec napetosti. Pri generatorjih majhnih moči zanemaritev ohmskega padca napetosti včasih ni upravičena in lahko vodi do napačnih rezultatov, zato je potrebno upravičenost zanemaritve pri majhnih sinhronskih strojih posebej preučiti. Pri sinhronskih generatorjih, kakršni so instalirani v elektrarnah, je zanemaritev ohmskega padca upravičena in v tem primeru dobimo naslednj kazalčni diagram:



Do sedaj smo narisali sliko fizikalnega dogajanja na statorju. V statorju se napetost E_2 dejansko inducira. Dejansko so prisotni padci napetosti, na sponkah imamo vresnici napetost U_{2n} in v statorju je dejanski tok I_{2n} . Sedaj moramo v kazalčni diagram vpeljati še dogajanje v rotorju.

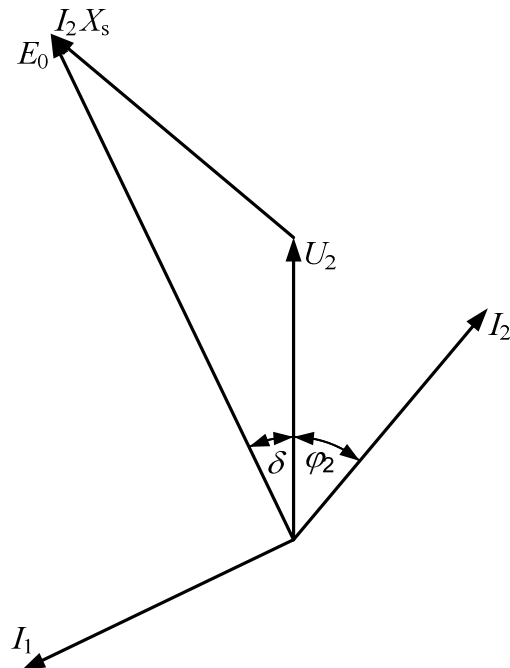
Na celotno magnetno polje v stroju vplivata tako rotorski, kot statorski tok. V večini obratovalnih stanj statorski tok zmanjšuje magnetno polje v stroju. Ta pojav imenujemo reakcija indukta. Posledica tega je zmanjšanje napetosti na sponkah stroja. Reakcijo indukta lahko obravnavamo kot induktivni padec napetosti $I_2 X_a$. Reakcijo indukta moramo kompenzirati z rotorskim tokom. Za povezavo med statorjem in rotorjem vpeljemo neko navidezno napetost, ki se v resnici ne inducira je pa sorazmerna z rotorskim tokom I_1 . Napetost E_0 bi se inducirala, če bi generator razbremenili in stroj ne bi prešel v nasičenje. Rotorski tok I_1 rišemo pravokotno na kazalec napetosti E_0 .



Stresano induktivno upornost $X_{\sigma 2}$ in reakcijo indukta X_a običajno združimo v eno samo induktivno upornost, ki jo imenujemo sinhronska reaktanca $X_s = X_{\sigma 2} + X_a$. Pri risanju in izračunih običajno uporabljamo normirane količine. Pogosto pa normiranim količinam rečemo tudi relativne količine. Nazivna vrednost posamezne količine dobi normirano vrednost 1. Ali uporabimo absolutne, ali relativne količine je stvar naše odločitve. Napetosti,

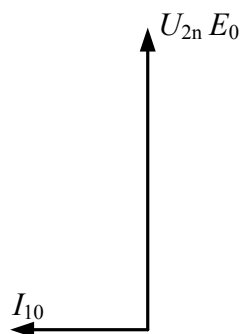
tokovi, moči... so običajno podani v absolutnih iznosih, npr. $U_{2n}=10$ kV. Sinhronska reaktanca pa je pogosto podana v normiranem iznosu. Normiranim (relativnim) količinam dodamo v indeks r , npr. X_{sr} .

V kazalcu E_0 je skrit tudi položaj rotorja. Tako lahko vidimo, da rotor pri generatorju prehiteva statorsko napetost za kot δ . Ta kot imenujemo kolesni kot in je odločilen pri obremenjevanju stroja.



Za zgoraj navedene podatke ($X_{sr} = 1,4$, $\cos(\varphi_{2n}) = 0,75$) narišimo kazalčni diagram za prosti tek. Normirano vrednost 1 bomo narisali 4cm dolgo.

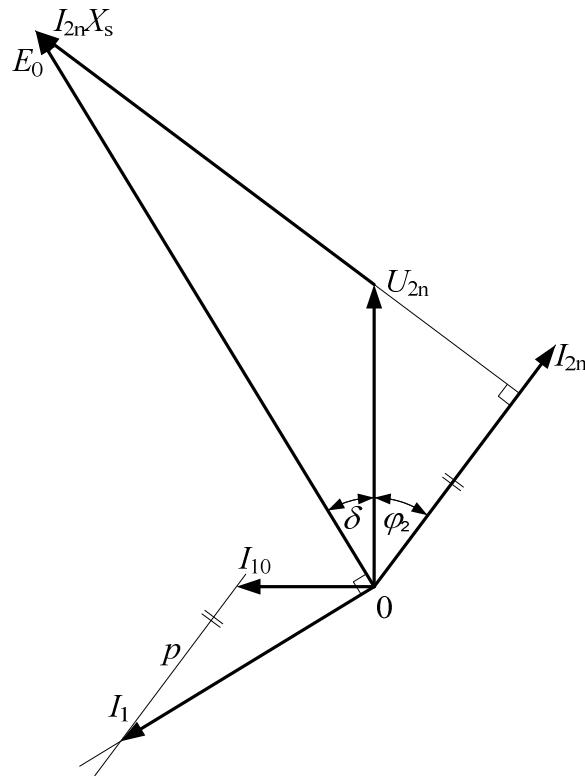
V prostem teku ima tok I_2 vrednost 0. Padec napetosti na sinhronski reaktanci $I_2 X_{sr} = 0$, zato v prostem teku E_0 sovpada z napetostjo U_{2n} . V ta kazalčni diagram lahko vrišemo le še rotorski vzbujaalni tok prostega teka I_{10} , ki je manjši od nazivnega vzbujaalnega toka I_{1n} .



Narišimo kazalčni diagram za isti stroj v naslednjem obratovalnem režimu: $U_2 = U_{2n}$, $I_2 = I_{2n}$ in $\cos(\varphi_2) = 0,8$ ind.!

Postopek risanja kazalčnega diagrama je naslednji: Narišemo statorsko napetost U_{2n} in tok I_{2n} , ki znašata 1, oziroma 4cm. Med njima je kot φ_2 . Nato pravokotno na tok I_{2n} in od konice napetosti U_{2n} narišemo padec napetosti na sinhronski reaktanci, ki znaša 1,4, ozi-

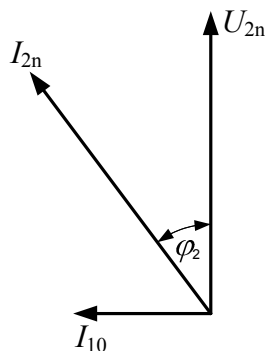
roma 5,6cm. Od izhodišča do konice padca napetosti na sinhronski reaktanci narišemo fiktivno napetost E_0 . Narišemo rotorski tok prostega teka I_{10} , ki za 90° prehiteva statorsko napetost U_{2n} . Skozi konico vzbujačnega toka prostega teka I_{10} potegnemo vzporednico p s statorskim tokom I_{2n} . Od izhodišča narišemo pravokotnico na fiktivno napetost E_0 do sečišča vzporednice p . Tako smo dobili še ustrezen vzbujačni tok za konkretno obratovalno stanje. Navedeni postopek konstruiranja rotorskega toka izhaja iz podobnosti trikotnikov $0, U_{2n}, E_0$, in $0, I_{10}, I_1$.



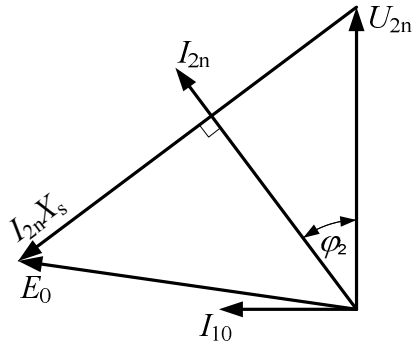
Narišimo kazalčni diagram za isti stroj v naslednjem obratovalnem režimu: $U_2 = U_{2n}$, $I_2 = I_{2n}$ in $\cos(\varphi_2) = 0,8$ cap.!

Naloga je enaka kot prejšnja, le, da je značaj obremenitve kapacitiven. Kazalčni diagram izgleda v tem primeru precej drugače, kot v prejšnjem primeru, čeprav veljajo iste zakoničnosti in pravila risanja, zato bomo sliko narisali v več korakih. Postopek risanja kazalčnega diagrama je naslednji:

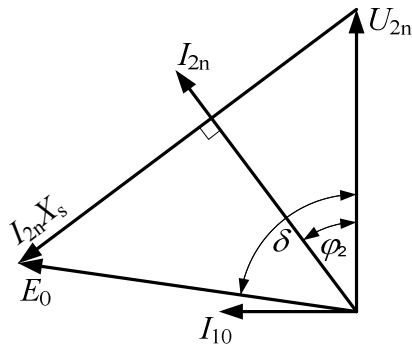
Narišemo statorsko napetost U_{2n} in tok I_{2n} , ki znašata 1, oziroma 4cm. Med njima je kot φ_2 . Hkrati narišemo tudi tok I_{10} , saj je to značilni podatek stroja:



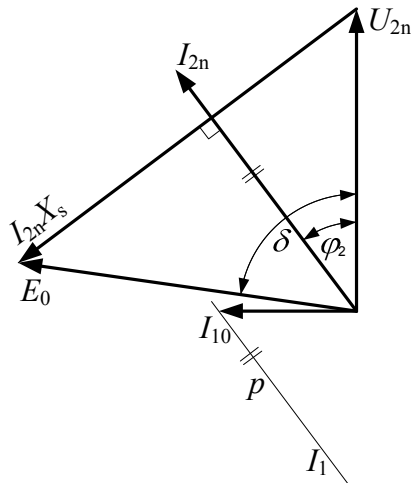
Zaradi kapacitivnega značaja bremena tok prehiteva napetost za kot φ_2 . Nato pravokotno na tok I_{2n} in od konice napetosti U_{2n} narišemo padec napetosti na sinhronski reaktanci, ki znaša 1,4. Od izhodišča do konice padca napetosti na sinhronski reaktanci narišemo fiktivno napetost E_0 .



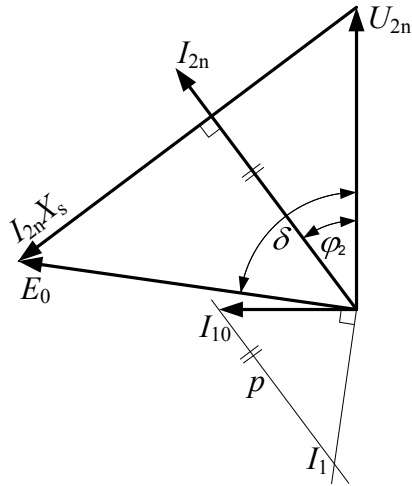
Označimo kolesni kot δ .



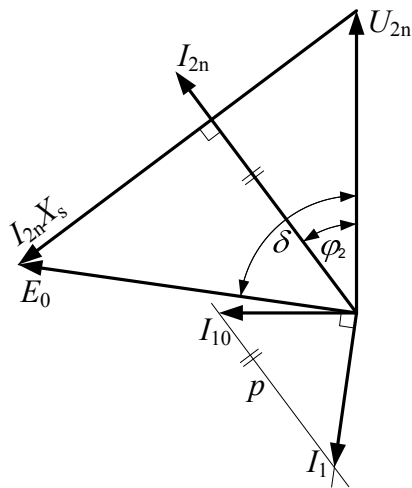
Skozi konico vzbujalnega toka prostega teka I_{10} potegnemo vzporednico p s statorskim tokom I_{2n} :



Od izhodišča narišemo pravokotnico na fiktivno napetost E_0 do sečišča vzporednice p . Tako smo dobili še ustrezen vzbujalni tok za konkretno obratovalno stanje. Konica rotorkega toka I_1 leži na presečišču med vzporednico p , ter pravokotnico na E_0 . Navedeni postopek konstruiranja kazalnega diagrama je univerzalen, če so znani nazivni podatki in obremenitev stroja.



Narišimo še vzbujačni ali rotorski tok:



6. Synchronski turbogenerator s podatki: $S_n=6,3$ MVA, $U_{2n}=10$ kV, $f=50$ Hz, $I_{1n}=50$ A, $\cos(\varphi_{2n})=0,7$, $X_{sr}=1,2$. Izračunajte vzbujačni tok potreben za moč $S=S_n/4$, $\cos(\varphi_2)=\cos(\varphi_{2n})$!

Vzbujačni tok in fiktivna napetost sta si sorazmerna, kar zapišemo $E_0=k I_1$. To velja za nazivno in tudi za vsa ostala stanja. Zato zapišemo takšno enačbo za nazivno stanje in za novo stanje:

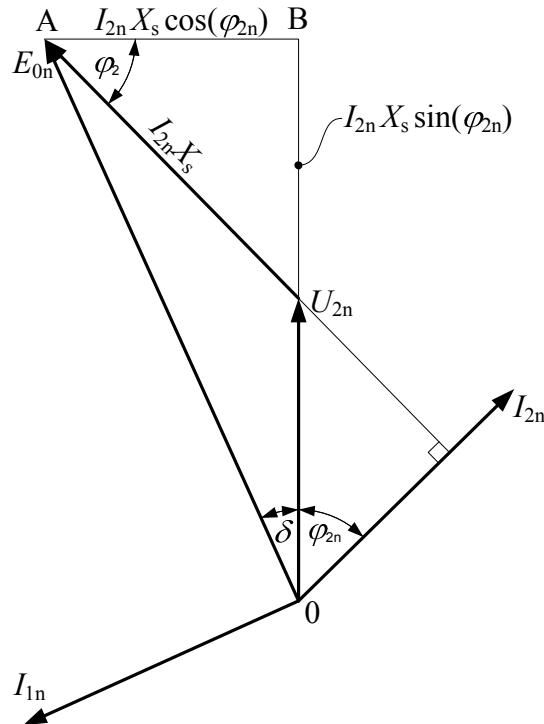
$$\begin{aligned} E_0 &= k I_1 \\ E_{0n} &= k I_{1n} \end{aligned}$$

Enačbi delimo med sabo in izrazimo iskani vzbujačni tok I_1 :

$$\frac{E_0}{E_{0n}} = \frac{k \cdot I_1}{k \cdot I_{1n}} = \frac{I_1}{I_{1n}} \quad \Rightarrow \quad I_1 = \frac{E_0}{E_{0n}} I_{1n}$$

Izračunati moramo fiktivno napetost za nazivno obratovalno stanje E_{0n} in fiktivno napetost za novo stanje E_0 . Nalogo rešimo z uporabo kazalčnega diagrama. Načeloma bi lahko nalogo rešili grafično, tako, da bi kazalčni diagram narisali v merilu. V tem primeru bi dobili manj natančen rezultat, zato bomo kazalčni diagram uporabili le za izpeljavo for-

mule. Izračunajmo najprej fiktivno napetost E_{0n} za nazivno obratovalno stanje, zato narišimo ustrežni kazalčni diagram:



Za izračun fiktivne napetosti E_{0n} tvorimo pomožni pravokotni trikotnik AB0. Velikost fiktivne napetosti E_{0n} je enaka dolžini hipotenuze tega trikotnika. Izračunamo jo s Pitagorovim izrekom:

$$E_{0n} = \sqrt{(I_{2n} X_{sr} \cos(\varphi_{2n}))^2 + (U_{2n} + I_{2n} X_{sr} \sin(\varphi_{2n}))^2}$$

$$E_{0n} = \sqrt{(1 \cdot 1,2 \cdot 0,7)^2 + (1 + 1 \cdot 1,2 \sqrt{1 - 0,7^2})^2} = 2,038$$

Za nazivno napetost in tok smo vzeli vrednost 1. Enako postopamo pri izračunu fiktivne napetosti E_0 . Najprej izračunamo tok v novem obratovalnem stanju, za izračun uporabimo dejstvo, da je v novem obratovalnem stanju moč enaka četrtini nazivne moči:

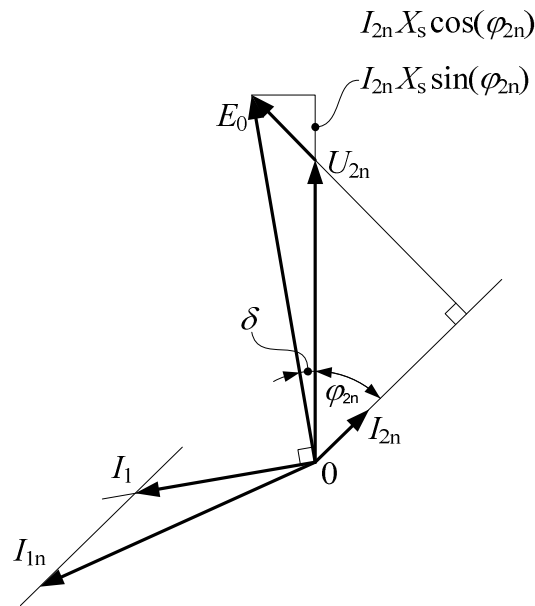
$$S = \frac{S_n}{4}$$

$$U_{2n} I_2 = \frac{U_{2n} I_{2n}}{4}$$

Okrajšamo napetost, in dobimo:

$$I_2 = \frac{I_{2n}}{4} = \frac{1}{4} = 0,25$$

Sedaj lahko narišemo kazalčni diagram:



$$E_0 = \sqrt{(I_2 X_{sr} \cos(\varphi_{2n}))^2 + (U_{2n} + I_2 X_{sr} \sin(\varphi_{2n}))^2}$$

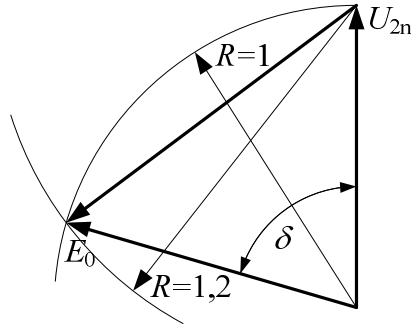
$$E_0 = \sqrt{(0,25 \cdot 1,2 \cdot 0,7)^2 + (1 + 0,25 \cdot 1,2 \sqrt{1 - 0,7^2})^2} = 1,232$$

Sedaj lahko izračunamo končni rezultat:

$$I_1 = \frac{E_0}{E_{0n}} I_{1n} = \frac{1,232}{2,038} 50 = \underline{\underline{30,2A}}$$

7. Synchronski turbogenerator s podatki: $S_n=6,3$ MVA, $U_{2n}=10$ kV, $f=50$ Hz, $I_{1n}=50$ A, $\cos(\varphi_n)=0,7$, $X_{sr}=1,2$, je vzbujen za prosti tek. Ali lahko generator obremenimo z nazivno navidezno močjo, ne da bi pri tem spremenili vzbujanje? Kolikšna sta kolesni kot δ in kot φ_2 ?

Generator lahko stabilno obratuje, če je kolesni kot manjši od 90° . Podatek, da je generator vzbujen za prosti tek pomeni, da je $E_0=U_{2n}=1$. Nazivna navidezna moč pa v bistvu pomeni, da je generator obremenjen z nazivnim tokom. Posledica tega je tudi nazivni padec napetosti na sinhronski reaktanci, ki znaša $I_{2n} X_{sr}=1 \cdot 1,2=1,2$. V tem primeru moramo narisati trikotnik z znano dolžino stranic, ker je znana velikost statorske napetosti $U_{2n}=1$, velikost padca napetosti $I_{2n} X_{sr}=1,2$ in velikost fiktivne napetosti. Določiti pa moramo kolesni kot δ . Kazalčni diagram narišemo tako, da narišemo statorsko napetost U_{2n} .

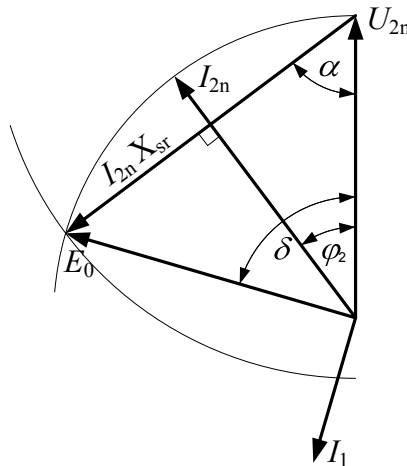


Kot je razvidno iz kazalčnega diagrama, je kolesni kot δ manjši od 90° , kar pomeni, da generator lahko stabilno obratuje. Vseeno pa izračunajmo še številsko vrednost kolesnega kota. Za izračun uporabimo kosinusni izrek:

$$(I_{2n} X_{sr})^2 = E_0^2 + U_{2n}^2 - 2E_0 U_{2n} \cos(\delta) \quad \Rightarrow \quad \cos(\delta) = \frac{E_0^2 + U_{2n}^2 - (I_{2n} X_{sr})^2}{2E_0 U_{2n}}$$

$$\delta = \arccos\left(\frac{E_0^2 + U_{2n}^2 - (I_{2n} X_{sr})^2}{2E_0 U_{2n}}\right) = \arccos\left(\frac{1^2 + 1^2 - (1 \cdot 1,2)^2}{2 \cdot 1 \cdot 1}\right) = \underline{\underline{73,74^\circ}}$$

Izračunajmo še kot φ_2 !



Lahko bi upoštevali dejstvo, da imamo opraviti z enakokrakim trikotnikom ($E_0=U_{2n}=1$). Tok I_{2n} je pravokoten na protiležno stranico (padeč na sinhronski reaktanci), zato pri enakokrakem trikotniku razpolavlja kot. Iz tega sledi da je $\varphi_2 = \delta/2$. Mi bomo ubrali splošno pot za izračun kota φ_2 . Pomagali si bomo s kotom α , ki ga izračunamo s sinusnim izrekom:

$$\frac{\sin(\alpha)}{E_0} = \frac{\sin(\delta)}{I_{2n} X_{sr}} \quad \Rightarrow \quad \alpha = \arcsin\left(\frac{E_0 \sin(\delta)}{I_{2n} X_{sr}}\right) = \arcsin\left(\frac{1 \cdot \sin(73,74^\circ)}{1 \cdot 1,2}\right) = 53,13^\circ$$

Sledi:

$$\alpha + \varphi_2 + 90^\circ = 180^\circ \quad \Rightarrow \quad \varphi_2 = 180^\circ - 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 53,13^\circ = \underline{\underline{36,87^\circ}}$$

Kolikšna je maksimalna navidezna moč generatorja S_{om} , če je vzbujen za prosti tek?

Generator oddaja maksimalno moč takrat, ko je kolesni kot δ enak 90° . Navidezna moč, ki jo generator daje v omrežje je sorazmerna s padcem napetosti na sinhronski reaktanci:

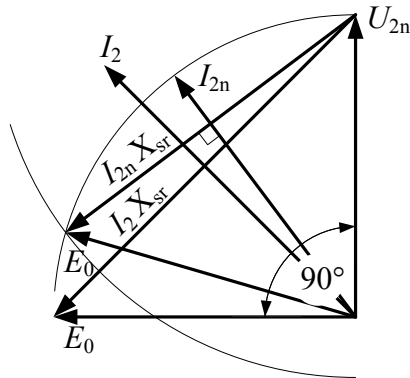
$$S_n = k I_{2n} X_{sr}$$

Ista enačba velja tudi za stanje, ko generator oddaja omahno moč:

$$S_{om} = k I_2 X_{sr}$$

Sledi:

$$S_{om} = S_n \frac{I_2 X_{sr}}{I_{2n} X_{sr}}$$



Ob izpadu iz sinhronizma, je padec napetosti na sinhronski reaktanci je enak:

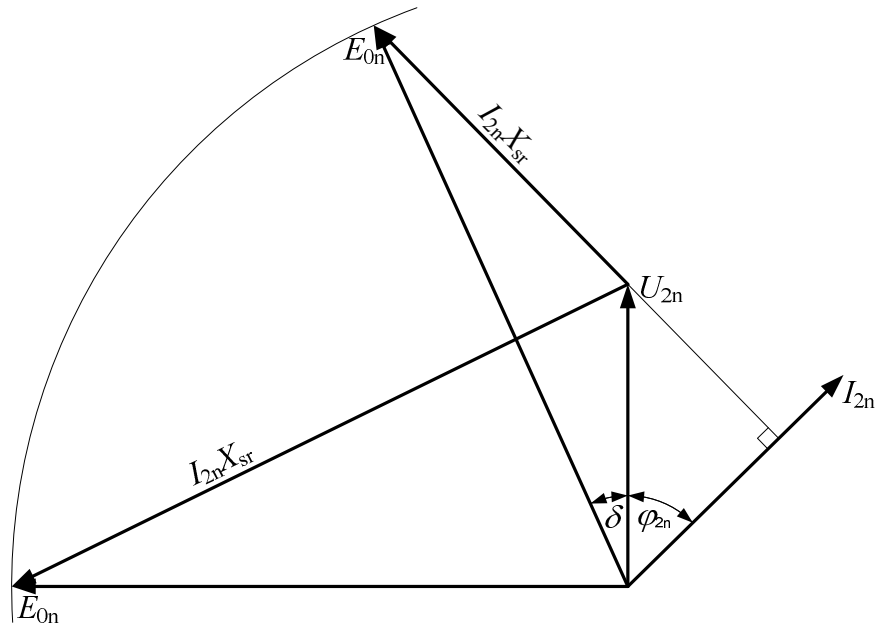
$$I_2 X_{sr} = \sqrt{E_0^2 + U_{2n}^2} \quad (\text{glej sliko!})$$

$$S_{om} = S_n \frac{I_2 X_{sr}}{I_{2n} X_{sr}} = S_n \frac{\sqrt{E_0^2 + U_{2n}^2}}{I_{2n} X_{sr}} = 6,3 \cdot 10^6 \frac{\sqrt{1^2 + 1^2}}{1 \cdot 1,2} = \underline{\underline{7,42 \text{ MVA}}}$$

Izračunajmo še omahno moč generatorja, če je vzbujen za nazivni režim obratovanja!

Omahno moč izračunamo enako kot v prejšnjem primeru:

$$S_{om} = S_n \frac{I_2 X_{sr}}{I_{2n} X_{sr}} = S_n \frac{\sqrt{E_{0n}^2 + U_{2n}^2}}{I_{2n} X_{sr}}$$



V enačbo moramo vstaviti le ustrezno vrednost napetosti E_{0n} , ki je v tem primeru nazivna vrednost:

$$E_{0n} = \sqrt{(I_{2n} X_{sr} \cos(\varphi_{2n}))^2 + (U_{2n} + I_{2n} X_{sr} \sin(\varphi_{2n}))^2} = \\ = \sqrt{(1 \cdot 1,2 \cdot 0,7)^2 + (1 + 1 \cdot 1,2 \sqrt{1 - 0,7^2})^2} = 2,038$$

Omahna moč pri nazivno vzbujenem stroju znaša:

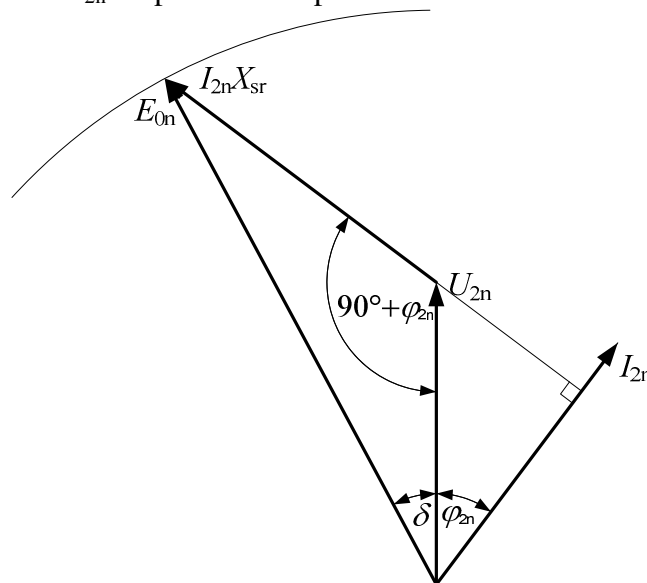
$$S_{om} = S_n \frac{I_{2n} X_{sr}}{I_{2n} X_{sr}} = S_n \frac{\sqrt{E_0^2 + U_{2n}^2}}{I_{2n} X_{sr}} = 6,3 \cdot 10^6 \frac{\sqrt{2,038^2 + 1^2}}{1 \cdot 1,2} = \underline{\underline{11,92 \text{ MVA}}}$$

- 8. Sinhronski generator $S_n = 5 \text{ MVA}$, $U_{2n} = 4360 \text{ V}$, $f = 60 \text{ Hz}$, $\cos(\varphi_{2n}) = 0,8$ ima pri nazivni obremenitvi vzbujalni tok I_{1n} za 90% večji od vzbujalnega toka za prosti tek I_{10} . Izračunajte sinhronsko reaktanco generatorja!**

Ker sta si vzbujalni tok in fiktivna napetost sorazmerna, je tudi nazivna fiktivna napetost E_{0n} za 90% večja od fiktivne napetosti v prostem teku, ki je enaka napetosti U_{2n} . To pomeni, da ima fiktivna napetost vrednost $E_{0n} = 1,9$.

Potek risanja je naslednji:

- V kazlični diagram najprej narišemo nazivno statorsko napetost U_{2n} .
- Narišemo in nazivni statorski tok I_{2n} , tako, da je med tokom I_{2n} in napetostjo U_{2n} nazivni kot φ_{2n} .
- Znana je dolžina fiktivne napetosti E_{0n} , ni pa znana smer. Zato narišemo lok s polmerom 1,9 in središčem v izhodišču kazalčnega diagrama.
- Znana je smer padca napetosti na sinhronski reaktanci. Padec napetosti na sinhronski reaktanci je pravokoten na statorski tok I_{2n} . Zato potegnemo pravokotnico na tok I_{2n} od konice napetosti U_{2n} do presečišča s predhodno narisano krožnico.



Sinhronsko reaktanco X_{sr} izračunamo s kosinusnim izrekom:

$$E_{0n}^2 = U_{2n}^2 + (I_{2n} X_{sr})^2 - 2U_{2n} I_{2n} X_{sr} \cos(90^\circ + \varphi_{2n})$$

Upoštevajmo da velja:

$$\cos(90^\circ + \varphi_n) = -\sin(\varphi_n)$$

Dobimo:

$$E_{0n}^2 = U_{2n}^2 + (I_{2n} X_{sr})^2 + 2U_{2n} I_{2n} X_{sr} \sin(\varphi_{2n})$$

Enačbo preoblikujemo v običajno obliko kvadratne enačbe glede na to, da je neznanka X_{sr} :

$$I_{2n}^2 X_{sr}^2 + 2U_{2n} I_{2n} X_{sr} \sin(\varphi_{2n}) + U_{2n}^2 - E_{0n}^2 = 0$$

Uporabimo nastavek:

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Dobimo enačbo:

$$X_{sr_{1,2}} = \frac{-2U_{2n} I_{2n} \sin(\varphi_{2n}) \pm \sqrt{(2U_{2n} I_{2n} \sin(\varphi_{2n}))^2 - 4I_{2n}^2 (U_{2n}^2 - E_{0n}^2)}}{2I_{2n}^2}$$

$$X_{sr_{1,2}} = \frac{-U_{2n} I_{2n} \sin(\varphi_{2n}) \pm \sqrt{(U_{2n} I_{2n} \sin(\varphi_{2n}))^2 - I_{2n}^2 (U_{2n}^2 - E_{0n}^2)}}{I_{2n}^2}$$

$$X_{sr_{1,2}} = \frac{-1 \cdot 1 \cdot \sqrt{1-0,8^2} \pm \sqrt{(1 \cdot 1 \cdot \sqrt{1-0,8^2})^2 - 1^2 (1^2 - 1,9^2)}}{1^2}$$

$$X_{sr_{1,2}} = \frac{-1 \cdot 1 \cdot 0,6 - \sqrt{(1 \cdot 1 \cdot 0,6)^2 - 1^2 (1^2 - 1,9^2)}}{1^2}$$

$$X_{sr_{1,2}} = -0,6 \pm \sqrt{2,97}$$

$$X_{sr_1} = 1,1234$$

$$X_{sr_2} = -2,3264$$

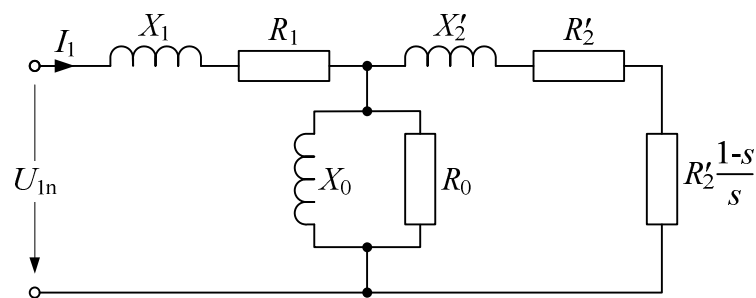
Drugi vrednost korena kvadratne enačbe ni smiselna, ker je negativna, zato privzamemo vrednost prvega korena:

$$\underline{\underline{X_{sr} = 1,1234}}$$

Rešene naloge za ASINHRONSKE STROJE

1. Trifazni štiripolni asinhronski motor z drsnimi obroči ima naslednje nazivne podatke: moč motorja $P_n = 25 \text{ kW}$, napetost statorja $U_{1n} = 380 \text{ V}$, frekvenca $f = 50 \text{ Hz}$, hitrost vrtenja $n_n = 1440 \text{ min}^{-1}$, statorski tok $I_{1n} = 49 \text{ A}$, faktor moči $\cos(\varphi_{1n}) = 0,87$, napetost odprtih rotorskih sponk mirujočega rotorja $E_{20} = 335 \text{ V}$, rotorski tok $I_{2n} = 46 \text{ A}$, upornost statorskega navitja $R_1 = 0,14 \Omega$. Pri preizkusu prostega teka in kratkega stika z nazivno napetostjo dobimo naslednje podatke: tok prostega teka $I_{10} = 18,9 \text{ A}$, moč, ki teče v motor v prostem teku $P_{10} = 1,14 \text{ kW}$, tok kratkega stika $I_{1k} = 318 \text{ A}$, moč, ki teče v motor pri kratkem stiku $P_{1k} = 135 \text{ kW}$. Izračunajmo elemente nadomestne sheme preračunane na statorsko stran! Predpostavimo, da je reducirana rotorska reaktanca enaka statorski reaktanci.

Lastnosti nadomestnega vezja morajo biti čim bolj podobne lastnostim dejanskega stroja. Idealno bi bilo, če bi bile lastnosti enake. Na pogled je ta nadomestna vezava podobna nadomestni vezavi transformatorja, kar je logično, ker sta si stroja zelo podobna:

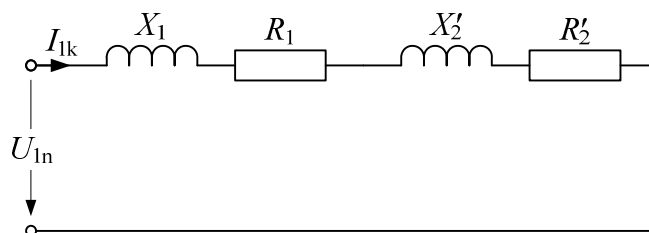


Vsa navitja imajo svojo upornost in induktivnost. Upornost statorskega navitja lahko preprosto izmerimo. Pri naši nalogi je ta upornost že podana. V nadomestni shemi R_1 predstavlja upornost statorskega navitja. Z upornostjo rotorskega navitja R_2 pa imamo težave, še posebej takrat, kadar imamo rotor s kratkostično kletko. V tem primeru moramo upornost R_2 izmeriti posredno. Statorsko in rotorsko navitje imata običajno različno število ovojev in različna faktorja navitja. Zato moramo parametre rotorja reducirati na statorsko stran. Reducirane količine označimo s črtico. Reducirano vrednost rotorske upornosti lahko izračunamo iz merilnih rezultatov kratkega stika. Izkáže se, da je impedanca prečne veje nadomestnega vezja (R_0 in X_0) zelo velika v primerjavi z reducirano impedanco rotorja, zato lahko tok skozi prečno vejo zanemarimo, kar pomeni, da vejo odstranimo iz nadomestne vezave. Poleg tega ima upornost, ki nadomešča mehansko moč vrednost 0, ker je slip v kratkem stiku enak 1:

$$R'_2 \frac{1-s}{s} = R'_2 \frac{1-1}{s} = 0$$

Pri asinhronskem stroju pod pojmom kratek stik razumemo stoječ rotor. V trenutku vklopa stoječega motorja, je motor v kratkem stiku.

Za simuliranje kratkostičnih razmer uporabimo preprostejšo nadomestno vezavo:



Nadomestna vezava nadomešča eno fazo. Zato se mora v tem vezju trošiti tretjina kratkos-
tične moči. Moč se troši na obeh uporih.

$$\frac{P_{1k}}{3} = I_{1k}^2 (R_1 + R'_2)$$

Izrazimo reducirano rotorsko upornost:

$$I_{1k}^2 (R_1 + R'_2) = \frac{P_{1k}}{3}$$

$$R_1 + R'_2 = \frac{P_{1k}}{3 I_{1k}^2}$$

$$R'_2 = \frac{P_{1k}}{3 I_{1k}^2} - R_1 = \frac{135000}{3 \cdot 318^2} - 0,14 = \underline{\underline{0,305 \Omega}}$$

Prav tako se mora na obeh dušilkah nadomestne vezave trošiti tretjina jalove moči. Celot-
na navidezna moč v kratkem stiku znaša:

$$S_{1k} = \sqrt{3} I_{1k} U_{1n}$$

Jalovo moč izračunamo iz navidezne moči z uporabo Pitagorovega izreka:

$$Q_k = \sqrt{S_{1k}^2 - P_{1k}^2} = \sqrt{(\sqrt{3} I_{1k} U_{1n})^2 - P_{1k}^2} = \sqrt{3 I_{1k}^2 U_{1n}^2 - P_{1k}^2}$$

Tretjina jalove moči se troši na obeh reaktancah:

$$\frac{\sqrt{3 I_{1k}^2 U_{1n}^2 - P_{1k}^2}}{3} = I_{1k}^2 (X_1 + X'_2)$$

Vsota obeh reaktanc tako znaša:

$$X_1 + X'_2 = \frac{\sqrt{3 I_{1k}^2 U_{1n}^2 - P_{1k}^2}}{3 I_{1k}^2} = \frac{\sqrt{3 \cdot 318^2 \cdot 380^2 - 135000^2}}{3 \cdot 318^2} = 0,5272 \Omega$$

Če upoštevamo še enakost stresanih reaktanc, dobimo:

$$X_1 + X_1 = 0,5272$$

$$2 X_1 = 0,5272$$

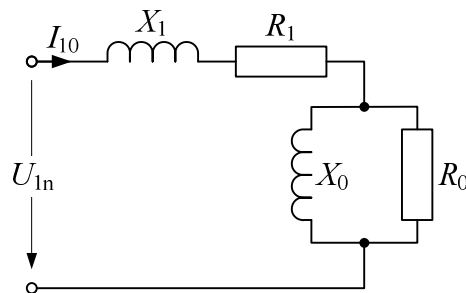
$$X_1 = \frac{0,5272}{2} = 0,2636 \Omega = X'_2$$

Upornost R_0 je v nadomestnem vezju zato, da nadomesti moči, ki se trošijo v stroju v
prostem teku. Pri tej predpostavki naredimo znatno napako, vendar pa jo vseeno privza-
memo, ker bi bilo sicer računanje preveč zapleteno. Za razliko od transformatorja, je tok
prostega teka asinhronskega stroja precej velik (do 70 % nazivnega toka), zato so že v

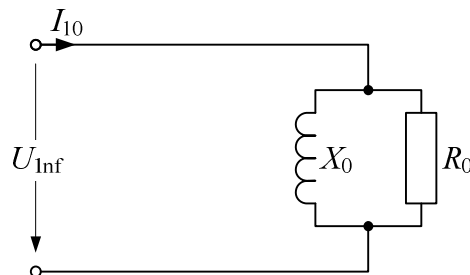
prostem teku znatne izgube tudi v statorskem navitju. Z našo predpostavko pa celotne izgube prostega teka pripišemo izgubam v železu in mehanskim izgubam. Induktivna upornost nadomešča magnetilni tok. Magnetilni tok ima poln iznos že v prostem teku, ker moramo imeti v stroju magnetni pretok v polnem iznosu takoj, ko nanj priključimo nazivno napetost. Jalova komponenta toka prostega teka je približno enaka magnetilnemu toku. Tudi pri določitvi elementov R_0 in X_0 bomo nadomestno vezje nekoliko poenostavili: V prostem teku ima upornost, ki predstavlja mehansko obremenitev

$$\lim_{s \rightarrow 0} R_2' \frac{1-s}{s} = \infty$$

neskončno vrednost, zato lahko iz nadomestnega vezja odstranimo celotno rotorsko vejo.



Poleg tega je serijska impedanca R_1 in X_1 majhna v primerjavi s paralelno impedanco R_0 in X_0 , kar pomeni, da je na serijski impedanci R_1 in X_1 zanemarljiv padec napetosti, kar pomeni, da elementa serijske impedance lahko odstranimo iz nadomestnega vezja:



Na upor R_0 se troši tretjina delovne moči prostega teka:

$$\frac{P_{10}}{3} = \frac{U_{inf}^2}{R_0} \Rightarrow R_0 = \frac{3 \left(\frac{U_{in}}{\sqrt{3}} \right)^2}{P_{10}} = \frac{3 \frac{U_{in}^2}{3}}{P_{10}} = \frac{U_{in}^2}{P_{10}} = \frac{380^2}{1140} = \underline{\underline{127 \Omega}}$$

Poudarjam, da imamo pri nadomestni vezavi opraviti s faznimi količinami, torej tudi s fazno napetostjo. Induktivno upornost izračunamo iz jalove moči prostega teka:

$$Q_0 = \sqrt{(\sqrt{3} U_{in} I_{10})^2 - P_{10}^2} = \sqrt{3 I_{10}^2 U_{in}^2 - P_{10}^2}$$

Tretjina jalove moči prostega teka se troši na reaktanci X_0 :

$$\frac{Q_0}{3} = \frac{U_{lnf}^2}{X_0}$$

$$X_0 = \frac{3U_{lnf}^2}{Q_0} = \frac{3\left(\frac{U_{ln}}{\sqrt{3}}\right)^2}{\sqrt{3I_{10}^2 U_{ln}^2 - P_{10}^2}} = \frac{U_{ln}^2}{\sqrt{3I_{10}^2 U_{ln}^2 - P_{10}^2}} \frac{380^2}{\sqrt{3 \cdot 18,9^2 \cdot 380^2 - 1140^2}} = \underline{\underline{11,66 \Omega}}$$

2. **Asinhronski motor ima naslednje nazivne podatke: moč $P_n = 50 \text{ kW}$, napetost $U_{ln} = 380 \text{ V}$, frekvenco $f = 50 \text{ Hz}$, tok $I_{ln} = 100 \text{ A}$, hitrost vrtenja $n_n = 1480 \text{ min}^{-1}$ in nazivni faktor moči $\cos(\varphi) = 0,8$. Izračunajte nazivni navor in izkoristek!**

Nazivni navor izračunamo z uporabo formule za izračun mehanske moči. **Moč motorja je po definiciji mehanska moč, ki jo lahko breme jemlje z gredi motorja.** Torej je moč motorja P_n v resnici mehanska moč P_m . Mehanska moč je enaka:

$$P_m = P_n = \omega_m M_n \quad \Rightarrow \quad M_n = \frac{P_n}{\omega_m}$$

Poudarjam, da je ω_m nazivna kotna hitrost gredi motorja, torej je mehanska količina in je ne smemo zamenjevati z električno krožno frekvenco. Za kotno hitrost velja:

$$\omega_m = 2\pi f_m$$

f_m je mehanska frekvenca gredi, ki jo lahko izračunamo iz nazivne hitrosti vrtenja:

$$f_m = \frac{n_n}{60}$$

Kotna hitrost gredi znaša:

$$\omega_m = 2\pi \frac{n_n}{60}$$

Ko kotno hitrost osi vstavimo v formulo za izračun navora dobimo:

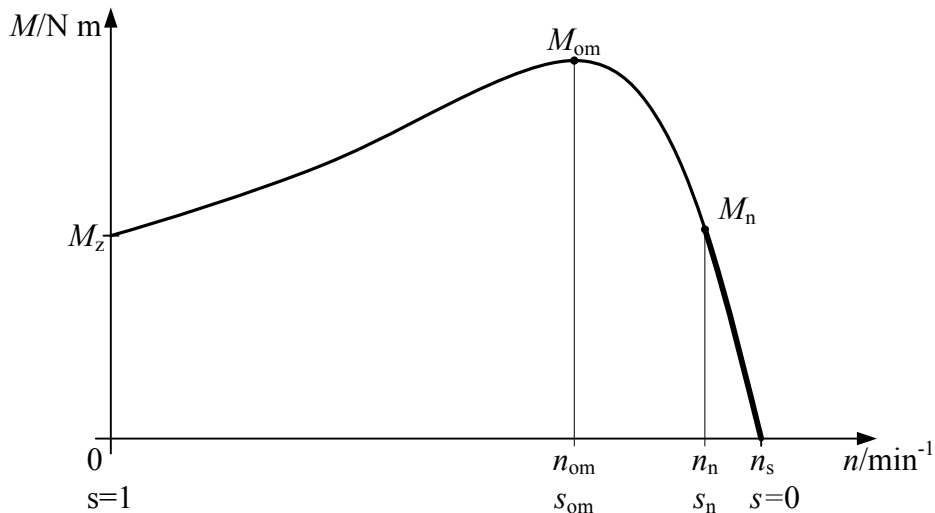
$$M_n = \frac{P_n}{\omega_m} = \frac{60 P_n}{2\pi n_n} = \frac{60 \cdot 50 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 1480} = \underline{\underline{322,6 \text{ Nm}}}$$

Nazivni izkoristek η je po definiciji razmerje med močjo, ki jo motor odda na gredi in električno močjo, ki jo vzame iz omrežja, pomnoženo s 100%:

$$\eta = \frac{P_n}{P_{el}} 100\% = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_{ln} I_{ln} \cos(\varphi)} 100\% = \frac{50 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 100 \cdot 0,8} 100\% = \underline{\underline{95\%}}$$

3. Asinhronski motor z nazivno močjo $P_n = 50 \text{ kW}$, nazivno napetostjo $U_{1n} = 380 \text{ V}$, nazivno frekvenco $f_n = 50 \text{ Hz}$, nazivnim tokom $I_{1n} = 100 \text{ A}$, nazivnim faktorjem moči $\cos(\varphi) = 0,8$ in razmerjem $M_{om}/M_n = 2$ dviga breme, ki znaša $M_b = 0,8 M_n$. Izračunajte najnižjo napetost pri kateri motor še zmore dvigati breme!

Izhajamo iz navorne karakteristike asinhronskega motorja. Navorna karakteristika je odvisnost navora motorja od hitrosti vrtenja oziroma slipa s :



- M_n – nazivni navor. Navor s katerim je motor lahko trajno obremenjen pri vseh ostalih nazivnih pogojih.
- n_n – nazivna hitrost vrtenja. Hitrost s katero motor vrti, če ga priključimo na nazivno napetost, frekvenco in ga obremenimo z nazivnim navorom.
- n_s – sinhronska hitrost vrtenja, ki jo izračunamo $n_s = 60 \cdot f/p$.
- M_{om} – omahni navor. Največji navor, ki ga motor zmore. Če ga obremenimo z večjim navorom, se motor ustavi.
- s_{om} – omahni slip
- n_{om} – omahna hitrost vrtenja
- M_z – zagonski navor. Navor s katerim motor povleče, ko rotor stoji. Ta navor lahko imenujemo tudi kratkostični navor, ker stanje rotorja predstavlja kratek stik.

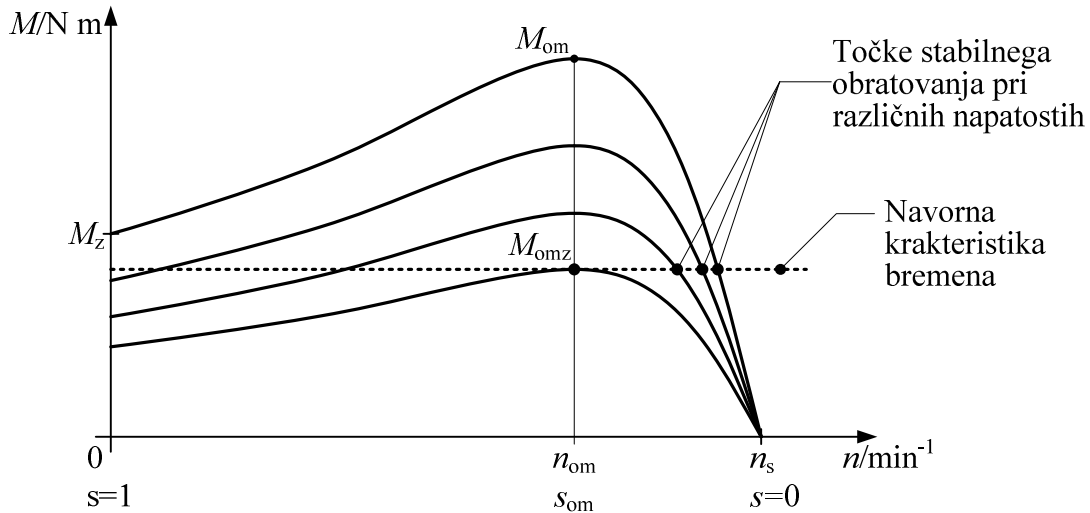
Za rešitev našega problema moramo ugotoviti kako se spreminja navor pri neki hitrosti vrtenja v odvisnosti od napetosti. Preprosto lahko razmišljamo takole: Če znižamo napetost npr. za polovico, se bo v stroju zmanjšal tudi magnetni pretok za polovico (glej Faradayev zakon!). Skladno s tem se razpolovi tudi gostota magnetnega pretoka, inducirana napetost v rotorju in tudi tok v rotorju. Spomnimo se enačbe za izračun sile, ki deluje na električni tok v magnetnem polju:

$$\vec{F} = I \vec{l} \times \vec{B}$$

Ugotovili smo, da se pri razpolovljeni napetosti razpolovita tako tok I kot gostota magnetnega pretoka B . Njun produkt se tako zmanjša za štirikrat. Z enakim načinom razmišljanja pridemo do zaključka, da je navor sorazmeren kvadratu napetosti $M \propto U^2$. Iz tega sledi, da se navor pri vsaki hitrosti vrtenja spremeni z razmerjem kvadratov napetosti:

$$M(n, U) = M_n(n) \left(\frac{U_1}{U_{1n}} \right)^2$$

Ko bo motor dvigal breme in se bo napetost zmanjševala, se bo zniževala navorna karakteristika. Zato se bo motor vrtel čedalje počasneje. Skrajna točka obratovanja je tista, pri kateri bo omahni navor na znižani karakteristiki M_{omz} enak navoru bremena:



Na novorni karakteristiki je točka stabilnega obratovanja tista, pri kateri velja:

- Navor bremena je enak navoru motorja, kar velja v presečišču navorne karakteristike bremena in navorne karakteristike motorja.
- Pri nižji hitrosti od hitrosti presečišča mora biti navor motorja večji od navora bremena.
- Pri višji hitrosti od hitrosti presečišča mora biti navor motorja manjši od navora bremena.

Če pogoja b in c nista izpolnjena, je točka obratovanja labilna. Labilna je tudi skrajna točka obratovanja, ki jo pri nalogi iščemo. Na zgornji sliki lahko vidimo, da obstaja še več presečišč med navornimi karakteristikami motorja in navorno karakteristiko bremena. Vsa presečišča, ki niso označena kot točke stabilnega obratovanja, so labilne točke obratovanja. Motor se ne bo vrtel v labilni točki, čeprav je navor bremena enak navoru motorja.

$$M_{omz} = M_b$$

Uporabimo izraz za odvisnost navora od napetosti:

$$M_{omz} = M_{om} \left(\frac{U_1}{U_{1n}} \right)^2$$

$$M_{om} \left(\frac{U_1}{U_{1n}} \right)^2 = M_b$$

Upoštevajmo še podatka $M_{om} = 2 M_n$ in $M_b = 0,8 M_n$ in dobimo:

$$2 M_n \left(\frac{U_1}{U_{1n}} \right)^2 = 0,8 M_n \Rightarrow U_1 = U_{1n} \sqrt{\frac{0,8}{2}} = 380 \sqrt{\frac{0,8}{2}} = \underline{\underline{240V}}$$

4. Asinhronski motor z nazivno močjo $P_n = 50 \text{ kW}$, nazivno napetostjo $U_{1n} = 400 \text{ V}$, nazivno hitrost vrtenja $n_n = 1480 \text{ min}^{-1}$, nazivno frekvenco $f_n = 50 \text{ Hz}$, nazivnim tokom $I_{1n} = 92,3 \text{ A}$ in nazivnim faktorjem moči $\cos(\varphi) = 0,85$ dviga breme, ki znaša $M_b = 0,7 M_n$. Izračunajte hitrost vrtenja motorja pri navedeni obremenitvi!

Asinhronski motor ima približno linearno karakteristiko od nazivne do sinhronske hitrosti vrtenja, oziroma od vrednosti slipa 0 do nazivnega slipa. Nalogo lahko rešimo na dva načina. Prvi način je, da skozi točki (n_n, M_n) in $(n_s, 0)$ položimo premico in iz premice izračunamo hitrost vrtenja n pri navoru M_b . Drugi način pa je, da upoštevamo, da je v linearnem delu je navor sorazmeren slipu $M = \text{konst.} \cdot s$. V obeh primerih pa moramo določiti sinhronsko hitrost vrtenja n_s . Sinhronska hitrost je hitrost s katero bi se vrtel motor, če bi bil rotor popolnoma neobremenjen, kar je v prostem teku skorajda izpolnjeno. Tudi če motorja ne obremenimo, na rotor lahko zaviralno delujejo navor trenja v ležajih, navor ventilatorje in viskozni upor. Vsi ti navori povzročajo mehanske izgube v stroju. Ker so mehanske izgube pri stroju dokaj majhne, se v prostem teku motor vrti skorajda s sinhronsko hitrostjo.

Sinhronska hitrost vrtenja je odvisna od frekvence napajalne napetosti f in od števila polovih parov stroja p . Izračunamo jo s formulo $n_s = 60/f/p$. Frekvenca napajalne napetosti je običajno znana. Števila polovih parov ponavadi neposredno ne podajamo. Sinhronska hitrost vrtenja je pri normalno konstruiranih motorjih tista, ki je prva višja sinhronska hitrost od nazivne vrtilne hitrosti pri nazivni frekvenci. Naredimo si tabelo sinhronskih hitrosti vrtenja za različno število polovih parov in dveh najpogostejših frekvencah:

p	Sinhronske hitrosti pri frekvencah:	
	$f = 50\text{Hz}$	$f = 60\text{Hz}$
1	3000	3600
2	1500	1800
3	1000	1200
4	750	900
5	600	720
6	500	600

Za podano nazivno hitrost vrtenja $n_n = 1480 \text{ min}^{-1}$ in nazivno frekvenco $f_n = 50 \text{ Hz}$, je prva višja sinhronska hitrost $n_s = 1500 \text{ min}^{-1}$. To je sinhronska hitrost vrtenja pri $p = 2$, ali pri $2 \cdot p = 4$, kar pomeni, da imamo opraviti s štiripolnim asinhronskim motorjem.

Prvi način izračuna hitrosti vrtenja, ko skozi nazivno točko obratovanja in točko prostega teka postavimo premico:

Naj ima enačba premice obliko:

$$M(n) = a_0 + a_1 n$$

Izračunajmo koeficienta a_0 in a_1 ! Na podlagi dveh znanih točk iz navorne karakteristike lahko zapišemo sistem dveh linearnih enačb z dvema neznankama:

$$M_n = a_0 + a_1 n_n$$

$$0 = a_0 + a_1 n_s$$

Iz druge enačbe izrazimo koeficient a_0 :

$$a_0 = -a_1 n_s$$

Izraz vstavimo v prvo enačbo in jo rešimo:

$$M_n = -a_1 n_s + a_1 n_n$$

$$a_1 n_n - a_1 n_s = M_n$$

$$a_1 (n_n - n_s) = M_n$$

$$a_1 = \frac{M_n}{n_n - n_s}$$

Izračunamo še koeficient a_0 :

$$a_0 = -a_1 n_s = -\frac{M_n}{n_n - n_s} n_s$$

$$a_0 = -\frac{M_n n_s}{n_n - n_s}$$

Koeficienta a_0 in a_1 vstavimo v enačbo premice za navor:

$$M(n) = -\frac{M_n n_s}{n_n - n_s} + \frac{M_n}{n_n - n_s} n$$

$$M(n) = \frac{M_n (n - n_s)}{n_n - n_s}$$

Hitrost, s katero se motor vrti, dobimo tako, da upoštevamo ravnovesje navorov $M(n) = M_b$:

$$\frac{M_n (n - n_s)}{n_n - n_s} = M_b$$

$$\frac{M_n (n - n_s)}{n_n - n_s} = 0,7 M_n$$

$$\frac{n - n_s}{n_n - n_s} = 0,7$$

$$n = 0,7(n_n - n_s) + n_s$$

$$n = 0,7(1480 - 1500) + 1500 = \underline{\underline{1486 \text{ min}^{-1}}}$$

Drugi način izračuna hitrosti vrtenja:

Uporabimo dejstvo, da je v linearnem delu je navor motorja sorazmeren slipu $M \propto s$. To sorazmerje velja za vsako točko znotraj intervala $[n_n, n_s]$, oziroma $[0, s_n]$. Sorazmerje zapišemo v drugačni obliki:

$$M(s) = \text{konst. } s$$

Konstanto konst. izračunamo iz znane nazivne točke obratovanja:

$$M_n = \text{konst. } s_n \quad \Rightarrow \quad \text{konst.} = \frac{M_n}{s_n}$$

Za navor pri vsakem slipu v območju linearne navorne karakteristike lahko zapišemo:

$$M(s) = \text{konst. } s = \frac{M_n}{s_n} s$$

Ko izenačimo navor motorja in navor bremena lahko izračunamo slip, pri katerem bo motor obratoval:

$$\frac{M_n}{s_n} s = M_b$$

$$\frac{M_n}{s_n} s = 0,7 M_n$$

$$\frac{s}{s_n} = 0,7$$

$$s = 0,7 s_n$$

Na splošno izračunamo slip z enačbo:

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

Nazivni slip izračunamo tako, da v to formulo vstavimo nazivno hitrost vrtenja:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1500 - 1480}{1500} = \frac{20}{1500} = \frac{1}{75} = 0,0133333..$$

Slip, pri katerem obratuje motor, tako znaša:

$$s = 0,7 s_n = 0,7 \frac{1}{75} = 0,00933333..$$

Z uporabo enačbe za slip lahko izračunamo hitrost vrtenja:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad \Rightarrow \quad n = n_s (1 - s) = 1500 \left(1 - \frac{0,7}{75} \right) = \underline{\underline{1486 \text{ min}^{-1}}}$$

5. Asinhronskemu motorju z nazivno močjo $P_n = 40 \text{ kW}$, nazivno napetostjo $U_{1n} = 380 \text{ V}$, nazivno hitrost vrtenja $n_n = 2970 \text{ min}^{-1}$, nazivno frekvenco $f_n = 50 \text{ Hz}$, nazivnim statorskim tokom $I_{1n} = 80,4 \text{ A}$ nazivnim faktorjem moči $\cos(\varphi) = 0,84$ in razmer-

jem $M_{om}/M_n = 2,1$ postopno povečujemo bremenski navor. Izračunajte hitrost vrtenja motorja n_{om} pri kateri bo motor omahnil!

Glede na to, da je znano razmerje med omahnim in nazivnim navorom M_{om}/M_n , lahko za izračun uporabimo Klossovo enačbo:

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

Iz Klossove enačbe moramo izračunati s_{om} :

$$\frac{M_n}{M_{om}} \left(\frac{s_n}{s_{om}} + \frac{s_{om}}{s_n} \right) = 2$$

$$\frac{s_n}{s_{om}} + \frac{s_{om}}{s_n} - 2 \frac{M_{om}}{M_n} = 0$$

$$\frac{s_{om}^2}{s_n} - 2 \frac{M_{om}}{M_n} s_{om} + s_n = 0$$

Dobili smo kvadratno enačbo oblike $a x^2 + b x + c = 0$, ki jo rešimo z nastavkom:

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

V našem primeru imajo koeficienti a , b in c naslednje vrednosti:

$$a = \frac{1}{s_n}; \quad b = -2 \frac{M_{om}}{M_n}; \quad c = s_n$$

Vrednosti omahnega slipa izračunamo tako, da koeficiente vstavimo v nastavek:

$$s_{om_{1,2}} = \frac{2 \frac{M_{om}}{M_n} \pm \sqrt{4 \left(\frac{M_{om}}{M_n} \right)^2 - 4 \frac{1}{s_n} s_n}}{2 \frac{1}{s_n}} = s_n \left(\frac{M_{om}}{M_n} \pm \sqrt{\left(\frac{M_{om}}{M_n} \right)^2 - 1} \right) = 0,02 \left(2 \pm \sqrt{2^2 - 1} \right)$$

Izračunajmo nazivni slip, pri čemer upoštevamo, da znaša v tem primeru sinhronska hitrost 3000 min^{-1} , torej je stroj dvopolen:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{3000 - 2870}{3000} = \frac{30}{3000} = \frac{1}{100} = 0,01$$

$$s_{om_{1,2}} = 0,01 \left(2,1 \pm \sqrt{2,1^2 - 1} \right)$$

$$s_{om_1} = 0,39466; \quad s_{om_2} = 0,002534$$

Drugi koren kvadratne enačbe ima nesmiselno vrednost, ker je manjša od nazivnega slipa. Za omahno vrednost slipa vzamemo vrednost prvega korena. Omahno hitrost vrtenja izračunamo s formulo, ki jo izpeljemo iz formule za slip:

$$n_{\text{om}} = n_s (1 - s_{\text{om}}) = 3000(1 - 0,39466) = \underline{\underline{1816 \text{ min}^{-1}}}$$

6. **Asinhronski motor z navitim rotorjem (drsnimi obroči) ima naslednje podatke: $P_n = 4 \text{ kW}$, $U_{1n} = 400 \text{ V}$, $f_{1n} = 50 \text{ Hz}$, $n_n = 2940 \text{ min}^{-1}$, $I_{1n} = 8,2 \text{ A}$, $\cos(\varphi) = 0,82$, $I_{2n} = 14,9 \text{ A}$ in $E_{20} = 165 \text{ V}$. Kolikšna je fazna upornost rotorskih navitij?**

Za izračun impedance rotorja uporabimo Ohmov zakon:

$$Z = \frac{E_{2f}}{I_2} = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}$$

Če pomislimo na fizikalno sliko delovanja, vemo, da se inducirana napetost v rotorju spreminja odvisno od hitrosti vrtenja, oziroma slipa. Ko se rotor vrti s sinhronsko hitrostjo (vrednost slipa takrat znaša $s = 0$), se v rotorju magnetni pretok ne spreminja, kar pomeni, da se v rotorju ne inducira napetost $E_2 = 0$. Ko rotor stoji ($s = 1$), se magnetni pretok v rotorju spreminja najhitreje, in zato dobimo takrat največjo inducirano napetost (Če odmislimo zavorni režim delovanja $s > 1$). Medfazno vrednost te napetost označimo z E_{20} . Inducirano napetost pri poljubnem slipu lahko izračunamo z enačbo $E_2 = s \cdot E_{20}$. Podobno se spreminja tudi induktivna upornost rotorja X_2 , ki je enaka:

$$X_2 = 2\pi f_2 L$$

Frekvenca rotorske inducirane napetosti je sorazmerna slipu:

$$f_2 = f_{1n} s$$

Induktivna upornost rotorja pri poljubnem slipu tako znaša:

$$X_2 = s 2\pi f_{1n} L = s X_{20}$$

Impedanca rotorja pri poljubnem slipu znaša:

$$Z = \frac{s E_{20}}{\sqrt{3} I_2} = \sqrt{R_2^2 + (s X_{20})^2}$$

Navedena enačba velja za vsak slip in pripadajoči rotorski tok, mi pa imamo na voljo običajne podatke za asinhronski motor. Med temi podatki je tudi nazivni rotorski tok I_{2n} , zato moramo za izračun uporabiti tudi pripadajoči, to je nazivni, slip. Izkaže se, da je pri nazivnem slipu rotorska frekvenca zelo nizka in zato je tudi induktivna upornost rotorja nizka in velja $R_2 \gg s X_{20}$. Pri nazivnem slipu lahko induktivno upornost zanemarimo:

$$Z = \frac{s_n E_{20}}{\sqrt{3} I_{2n}} = \sqrt{R_2^2}$$

$$\frac{s_n E_{20}}{\sqrt{3} I_{2n}} = R_2$$

$$R_2 = \frac{s_n E_{20}}{\sqrt{3} I_{2n}}$$

Na voljo imamo vse podatke razen nazivnega slipa, ki ga lahko izračunamo:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{3000 - 2940}{3000} = 0,02$$

Sedaj lahko izračunamo upornost rotorskega navitja:

$$R_2 = \frac{s_n E_{20}}{\sqrt{3} I_{2n}} = \frac{0,02 \cdot 165}{\sqrt{3} \cdot 14,9} = \underline{\underline{0,128 \Omega}}$$

7. **Asinhronski motor z drsnimi obroči ima naslednje podatke: $P_n = 4 \text{ kW}$, $U_{1n} = 380 \text{ V}$, $f_{1n} = 50 \text{ Hz}$, $n_n = 2925 \text{ min}^{-1}$, $I_{1n} = 8,4 \text{ A}$, $\cos(\varphi) = 0,82$, $I_{2n} = 13,5 \text{ A}$, $E_{20} = 180 \text{ V}$ in $M_{om}/M_n = 2,8$. Izračunajte rotorsko upornost in induktivnost?**

Rotorsko upornost izračunamo na enak način kot pri prejšnji nalogi:

$$R_2 = \frac{s_n E_{20}}{\sqrt{3} I_{2n}}$$

Znani so vsi podatki razen nazivnega slipa, ki ga izračunamo:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{3000 - 2925}{3000} = 0,025$$

Vrednosti vstavimo v enačbo:

$$R_2 = \frac{s_n E_{20}}{\sqrt{3} I_{2n}} = \frac{0,025 \cdot 180}{\sqrt{3} \cdot 13,5} = \underline{\underline{0,1925 \Omega}}$$

Za izračun induktivnosti lahko uberemo naslednjo pot:

- Znana je velikost omahnega navora, zato lahko izračunamo omahni slip s_{om} z uporabo Klossove enačbe
- Za izračun rotorske induktivne upornosti (reaktance) uporabimo relacijo:

$$s_{om} = \frac{R_2}{X_{20}} \quad \Rightarrow \quad X_{20} = \frac{R_2}{s_{om}}$$

- Iz reaktance X_{20} izračunamo induktivnost:

$$X_{20} = 2 \pi f_2 L_2 = 2 \pi f_{1n} s_{om} L_2 = 2 \pi f_{1n} L_2 \quad \Rightarrow \quad L_2 = \frac{X_{20}}{2 \pi f_{1n}}$$

Izračunajmo omahni slip z uporabo Klossove enačbe

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

Enačbo preoblikujemo v kvadratno enačbo:

$$\frac{s_{\text{om}}^2}{s_n} - 2 \frac{M_{\text{om}}}{M_n} s_{\text{om}} + s_n = 0$$

Koren kvadratne enačbe izračunamo z nastavkom:

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Uporaben je tisti koren kvadratne enačbe v katerem diskriminanto prištejemo:

$$s_{\text{om}} = s_n \left(\frac{M_{\text{om}}}{M_n} + \sqrt{\left(\frac{M_{\text{om}}}{M_n} \right)^2 - 1} \right) = 0,025 \cdot \left(2,8 + \sqrt{2,8^2 - 1} \right) = 0,13538$$

Induktivno upornost izračunamo iz razmerja:

$$X_{20} = \frac{R_2}{s_{\text{om}}} = \frac{0,1925}{0,13538} = \underline{\underline{1,422 \Omega}}$$

Izračunamo še induktivnost:

$$L_2 = \frac{X_{20}}{2 \pi f_{1n}} = \frac{1,422}{2 \pi 50} = \underline{\underline{4,53 \text{ mH}}}$$

8. Asinhronski motor z drsnimi obroči ima naslednje podatke: $P_n = 4 \text{ kW}$, $U_{1n} = 380 \text{ V}$, $f_{1n} = 50 \text{ Hz}$, $n_n = 2895 \text{ min}^{-1}$, $I_{1n} = 9,2 \text{ A}$, $\cos(\varphi) = 0,8$, $R_2 = 0,26 \Omega$ in $M_{\text{om}}/M_n = 2,6$. Izračunajte zagonski navor, če je rotor kratko sklenjen! Kolikšne dodatne upore moramo vključiti v rotorski tokokrog, da bo motor stekel z maksimalnim možnim navorom?

Klossova enačba opisuje celotno navorno karakteristiko! Če vanjo vstavimo slip ob zagonu $s_z = 1$, bomo lahko izračunali zagonski navor:

$$\frac{M_z}{M_{\text{om}}} = \frac{2}{\frac{s_z}{s_{\text{om}}} + \frac{s_{\text{om}}}{s_z}} = \frac{2}{\frac{1}{s_{\text{om}}} + \frac{s_{\text{om}}}{1}}$$

$$M_z = \frac{2 M_{\text{om}}}{\frac{1}{s_{\text{om}}} + \frac{s_{\text{om}}}{1}}$$

Vidimo, da nam manjkata dva podatka, in sicer omahni navor M_{om} in omahni slip s_{om} . Omahni navor izračunamo iz podatkov:

$$\frac{M_{\text{om}}}{M_n} = 3 \quad \Rightarrow \quad M_{\text{om}} = 3 M_n = 3 \frac{60 P_n}{2 \pi n_n} = \frac{90 P_n}{\pi n_n} = 39,5826 \Omega =$$

Za izračun omahnega slipa pa moramo uporabiti Klossovo enačbo:

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

Koren enačbe znaša:

$$s_{om} = s_n \left(\frac{M_{om}}{M_n} + \sqrt{\left(\frac{M_{om}}{M_n} \right)^2 - 1} \right)$$

Izračunati moramo še nazivni slip:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{3000 - 2895}{3000} = 0,035$$

$$s_{om} = s_n \left(\frac{M_{om}}{M_n} + \sqrt{\left(\frac{M_{om}}{M_n} \right)^2 - 1} \right) = 0,035 \cdot \left(2,6 + \sqrt{2,6^2 - 1} \right) = 0,175$$

Tako smo prišli do podatkov, ki jih potrebujemo za izračun zagonskega navora:

$$M_z = \frac{2 M_{om}}{\frac{1}{s_{om}} + \frac{s_{om}}{1}} = \frac{2 \cdot 39,5826}{\frac{1}{0,175} + \frac{0,175}{1}} = \underline{\underline{13,44 \Omega}}$$

Za rešitev drugega dela naloge sklepamo takole:

- Vsak trenutek so napetosti v ravnovesju, kar pomeni, da se pritisnjeni napetosti zoperstavijo protinapetosti.
- Večino protinapetosti sestavlja inducirana napetost.
- Ostale protinapetosti običajno zanemarimo.
- Pri konstantni pritisnjeni napetosti mora biti tudi inducirana napetost konstantna, kar pomeni, da mora biti v stroju konstanten magnetni pretok.
- Velikost navora je pri vsakem slipu odvisna le še od delovne komponente rotorskega toka.

Izračunajmo delovno komponento rotorskega toka:

$$I_{2d} = \frac{E_{2f}}{\underbrace{Z_2}_{I_2}} \cos(\varphi_2)$$

Nadalje velja:

$$E_{2f} = \frac{s E_{20}}{\sqrt{3}}$$

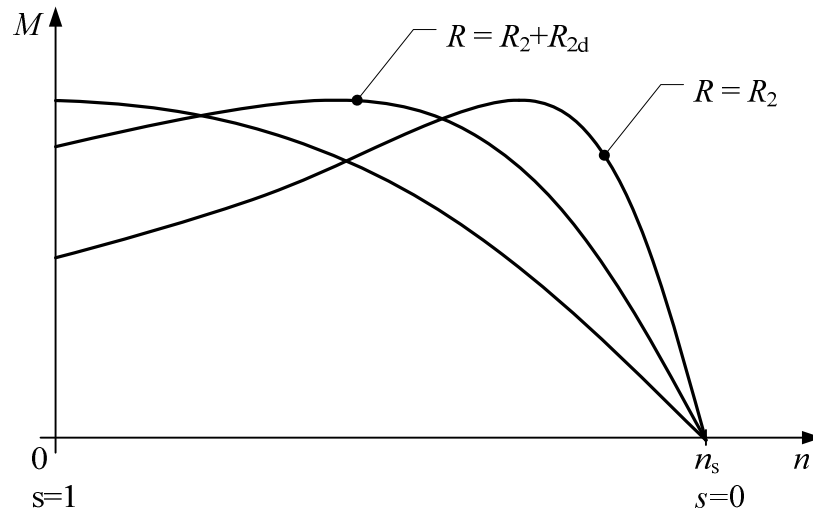
$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + s^2 X_{20}^2}$$

$$\cos(\varphi_2) = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_{20}^2}}$$

Vrednost delovne komponente rotoskega toka, ki je sorazmerna z navorom, tako izračunamo z izrazom:

$$I_{2d} = \frac{E_{2f}}{Z_2} \cos(\varphi_2) = \frac{s E_{20} R_2}{\sqrt{3} (R_2^2 + s^2 X_{20}^2)}$$

Na sliki so prikazane razmere, če povečujemo upornosti v rotorskem tokokrogu:



Če moramo izračunati kako velike dodatne upore moramo dodati v rotorski tokokrog, da se bo motor zagnal z omahnim (maksimalnim) navorom, moramo izračunati kako sta omahni navor in upornost rotorskega tokokroga povezana. Glede na dejstvo, da sta si navor in delovni rotorski tok sorazmerna, lahko preučujemo kar rotorski tok. Izračunajmo maksimalni delovni rotorski tok glede na slip! V ta namen ga odvajajmo rotorski tok po slipu s :

$$\frac{dI_{2d}}{ds} = \frac{E_{20} R_2 (R_2^2 + s^2 X_{20}^2) - s E_{20} R_2 2s X_{20}^2}{\sqrt{3} (R_2^2 + s^2 X_{20}^2)^2} = \frac{E_{20} R_2 (R_2^2 - s^2 X_{20}^2)}{\sqrt{3} (R_2^2 + s^2 X_{20}^2)^2}$$

Slip, pri katerem doseže delovna komponenta rotoskega toka I_{2d} maksimalno vrednost, izračunamo tako, da odvod izenačimo z 0:

$$\frac{dI_{2d}}{ds} = \frac{E_{20} R_2 (R_2^2 - s^2 X_{20}^2)}{\sqrt{3} (R_2^2 + s^2 X_{20}^2)^2} = 0 \quad \Rightarrow \quad R_2^2 - s^2 X_{20}^2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \underline{\underline{s = \frac{R_2}{X_{20}} = s_{om}}}$$

Zagon motorja z omahnim navorom dosežemo, če ima omahni slip vrednost 1.

$$s'_{om} = \frac{R_2 + R_{2d}}{X_{20}} = 1$$

To v nadaljevanju pomeni, da mora biti ob zagonu rotorska upornost enaka induktivni upornosti:

$$R_2 + R_{2d} = X_{20}$$

$$R_{2d} = X_{20} - R_2$$

Vrednost induktivne upornosti rotorja izračunamo z izrazom za omahni slip:

$$X_{20} = \frac{R_2}{s_{\text{om}}} = \frac{0,26}{0,175} = 1,4857 \Omega$$

$$R_{2d} = X_{20} - R_2 = 1,4857 - 0,26 = \underline{\underline{1,226 \Omega}}$$

Rešene naloge za KOLEKTORSKE STROJE

Kolektorski stroji so bili prvi tehnično uporabni električni rotacijski stroji. Uporabljali so jih kot generatorje in motorje. Na statorju imamo vzbujaľna navitja. Namen vzbujaľnih navitij je, da ustvarijo magnetno polje v stroju, ko je v njih vzbujaľni tok. Včasih pa namesto vzbujaľnih navitij uporabimo trajne magnetne. V magnetnem polju, se vrtijo rotorske tuljave, v katerih se zaradi vrtenja spreminja magnetni pretok, zato se v tuljavah inducira napetost. Velikost inducirane napetosti je sorazmerna z velikostjo magnetnega pretoka Φ in hitrostjo vrtenja rotorja n :

$$U_i = k_E n \Phi$$

Ko se v rotorskih tuljavah pojavi še električni tok, deluje na rotor navor, ki je sorazmeren s tokom I in magnetnim pretokom Φ :

$$M = k_M I \Phi$$

Navitja kolektorskega stroja so lahko zvezana na tri različne načine. Od vezave navitij so bistveno odvisne lastnosti stroja.

Če vzbujaľno (statorsko) navitje ni električno povezano z induktom (rotorsko navitje), govorimo o tuje vzbujanem stroju. V tem primeri sta magnetni pretok in rotorski tok popolnoma neodvisna. Stroj, ki ima namesto vzbujaľnega navitja vgrajene trajne magnetne, je po lastnostih najbolj podoben tuje vzbujanemu stroju.

Kadar sta vzbujaľno navitje in rotorsko navitje vezana vzporedno, govorimo o paralelno vzbujanem stroju. Paralelno vzbujan stroj ima podobne lastnosti kot tuje vzbujan stroj. Oba stroja delujeta kot motor in kot generator. Bistveno pa se stroja razlikujeta v primeru, ko z napetostjo želimo nastavljati vrtilno hitrost.

V sodobnem času pa se pojavlja veliko motorjev, ki imajo rotorsko in vzbujaľno navitje vezano v serijo. Stroj ima drugačne lastnosti od ostalih dveh. Pri tem stroju je skozi obe navitji isti tok. Serijsko vzbujan stroj lahko deluje le kot motor.

- 1. Tuje vzbujaľni enosmerni kolektorski motor z nazivnimi podatki: moč $P_n = 200$ kW, napetost $U = 440$ V, nazivni tok $I_n = 480$ A, nazivna hitrost vrtenja $n_n = 1000$ min⁻¹, upornost rotorja $R_i = 0,048$ Ω in padec napetosti na ščetakih $\Delta U_{\text{šć}} = 2$ V. Kako hitro se mora vrteti, če hoćemo motor uporabiti kot generator in bo imel pri nazivnem toku na sponkah nazivno napetost?**

Na nazivno obremenjen motor je prikljućena nazivna napetost in v motor teće nazivni tok. Napetosti na sponkah motorja U_n , ki je v tem primeru gonilna napetost, drŹijo ravnovesje inducirana napetost motorja U_{iM} , padec napetosti na upornosti navitja $I_n R_i$ in padec napetosti na ščetakih $\Delta U_{\text{šć}}$, kar zapišemo z naslednjo enaćbo:

$$U_n = U_{iM} + I_n R_i + \Delta U_{\text{šč}}$$

$$U_{iM} = U_n - I_n R_i - \Delta U_{\text{šč}} = 440 - 480 \cdot 0,048 - 2 = 415 \text{ V}$$

Zaradi padcev napetosti je inducirana napetost v motorju manjša od pritisnjene napetosti. Takrat, ko stroj deluje kot generator, je inducirana napetost gonilna napetost. Inducirani napetosti mora biti od napetosti na sponkah U_n večja za padec napetosti na notranji upornosti $I_n R_i$ in padec napetosti na ščetkah $\Delta U_{\text{šč}}$:

$$U_{iG} = U_n + I_n R_r + \Delta U_{\text{šč}} = 440 + 480 \cdot 0,048 + 2 = 465 \text{ V}$$

Inducirana napetost je sorazmerna s hitrostjo vrtenja in magnetnim pretokom. Magnetni pretok je v našem primeru konstanten. Inducirani napetosti motorja in generatorja znašata:

$$U_{iM} = k_i n_n \Phi$$

$$U_{iG} = k_i n \Phi$$

Sedaj rešimo sistem enačb tako, da spodnjo enačbo delimo z zgornjo in dobimo:

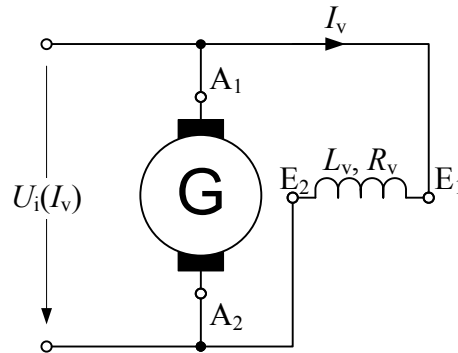
$$\frac{U_{iG}}{U_{iM}} = \frac{k_i n \Phi}{k_i n_n \Phi} \Rightarrow n = n_n \frac{U_{iG}}{U_{iM}} = 1000 \frac{465}{415} = \underline{\underline{1120 \text{ min}^{-1}}}$$

Magnetni pretok Φ je v obeh režimih delovanja enak, ker vzbujaalnega toka nismo spreminjali.

- 2. Enosmerni generator s paralelnim vzbujanjem ima upornost vzbujaalnega navitja $R_v = 18,5 \Omega$ in karakteristiko prostega teka, ki je podana v spodnji tabeli. Določite napetost, na katero se generator vzbudi U_G in določite vrednost dodatnega upora v vzbujaalnem tokokrogu R_{vd} , da se bo generator vzbudil na napetost 150V.**

I_v/A	U_i/V
0	20
1	45
2	72
3	99
4	119
5	133
6	144
7	152
8	158
9	162

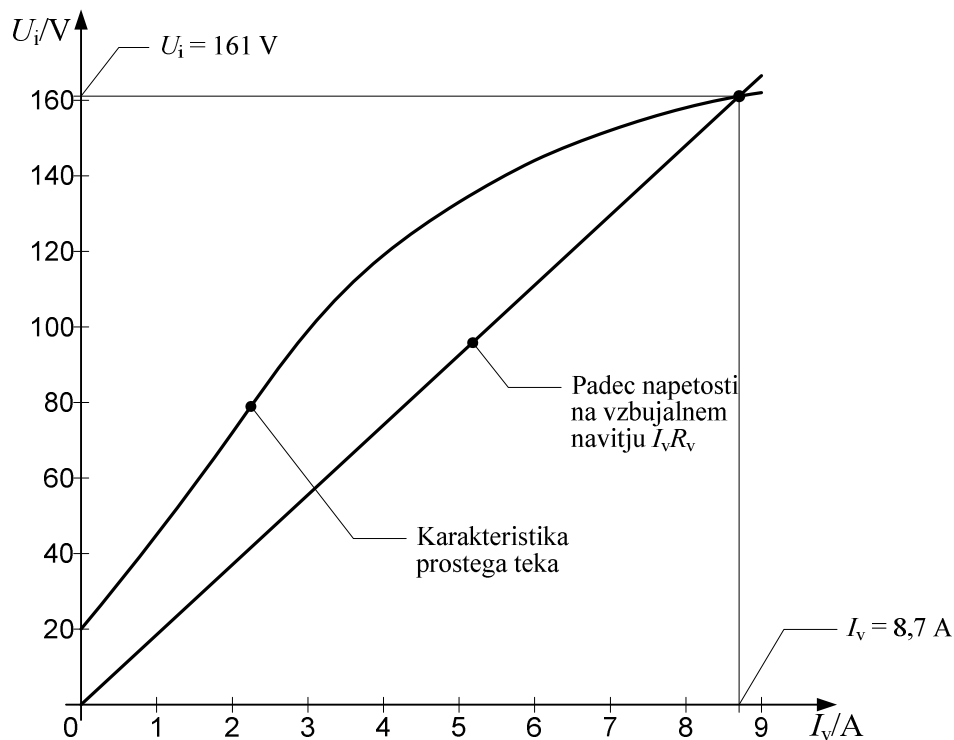
Karakteristika prostega teka je odvisnost inducirane napetosti od vzbujaalnega toka. Izmerimo jo pri neki določeni konstantni hitrosti vrtenja. Z vzbujaalnim tokom I_v nastavljamo velikost magnetnega pretoka Φ v generatorju. Velikost inducirane napetosti izračunamo z enačbo $U_i = k_E n \Phi$, kjer je magnetni pretok odvisen od vzbujaalnega toka I_v . Vzbujaalna veja je pri tem stroju vezana vzporedno z rotorjem (induktom). Če na stroj gledamo, kot na električno vezje, lahko rečemo, da imamo dve vzporedni veji. V prvi, rotorski veji imamo inducirano napetost $U_i(I_v)$. V drugi vzporedni veji pa imamo padec napetosti na upornosti vzbujaalnega navitja $I_v R_v$.



V obeh vzporednih vejah moramo imeti enako napetost, kar zapišemo kot:

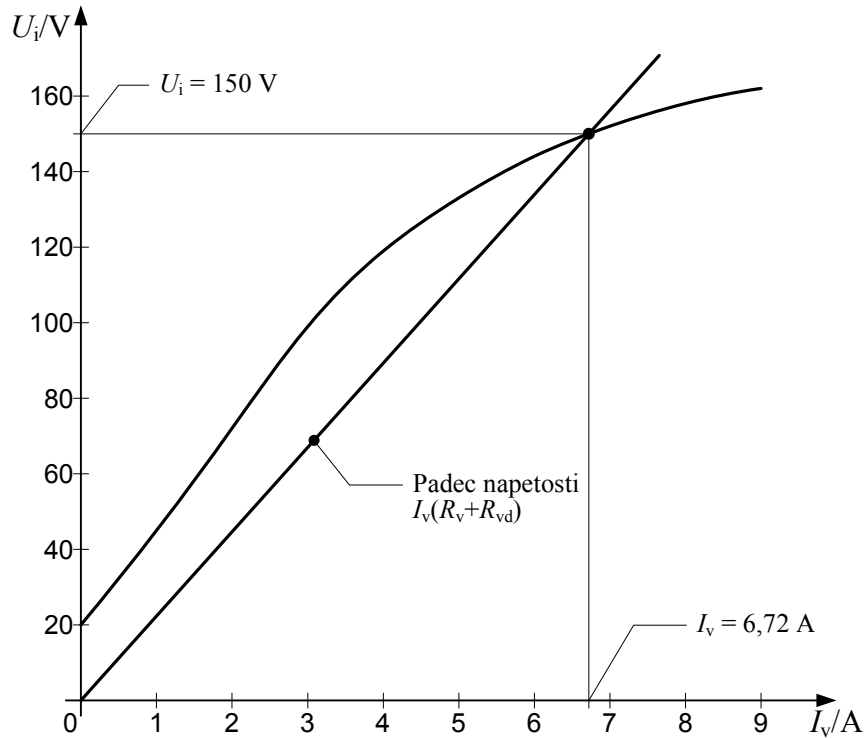
$$U_i(I_v) = I_v R_v$$

Enačbo lahko razumemo kot, da imamo na obeh straneh neko funkcijo vzbujalnega toka. Na levi strani je karakteristika prostega teka, na desni stani pa je premica. Rešitev enačbe je presečišče obeh krivulj, ki ga pri naši nalogi določimo grafično. Alternativa grafičnemu reševanju je, da karakteristiko prostega teka aproksimiramo z neko funkcijo, in z eno od numeričnih metod poiščemo presečišče. Tovrstne probleme lahko zelo hitro rešimo z računalniškimi paketi kot so: Mathematica, MathCAD, Maple... Za grafično reševanje narišemo karakteristiko prostega teka in padec napetosti na vzbujalnem navitju, nato najdemo presečišče funkcij:



Krivulja padca napetost na vzbujalnem navitju se seka s karakteristiko prostega teka pri napetosti $U_G = 161$ V in vzbujalnem toku $I_v = 8,7$ A.

Vrednost dodatnega upora R_{vd} določimo tako, da iz grafa odčitamo vzbujalni tok, ki je potreben za napetost generatorja 150 V. Zaradi preglednosti je graf narisana na novo, čeprav bi vse skupaj lahko opravili na istem grafu:

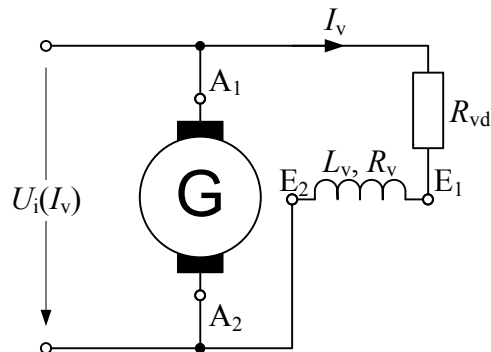


Inducirano napetost 150 V dobimo pri vzbujačnem toku $I_v = 6,72$ A. To pomeni, da mora biti pri napetosti 150 V skozi vzbujačno navitje 6,72 A toka. Z Ohmovim zakonom izračunamo celotno potrebno upornost:

$$R_{vc} = R_v + R_{vd} = \frac{U_i}{I_v} = \frac{150}{6,72} = 22,32 \Omega$$

$$R_{vd} = R_{vc} - R_v = 22,32 - 18,5 = \underline{\underline{3,82 \Omega}}$$

Na sliki je prikazana vezava dodatnega upora:



3. Enosmerni generator s paralelnim vzbujanjem ima upornost vzbujalne veje $R_v = 50 \Omega$. Pri nazivni hitrosti vrtenja $n_n = 2400 \text{ min}^{-1}$ smo izmerili karakteristiko prostega teka. Nazivna napetost generatorja U_n znaša 160 V. Kolikšno dodatno upornost moramo dodati v vzbujalni tokokrog, če želimo da se bo pri hitrosti vrtenja $n = 2700 \text{ min}^{-1}$ vzbudil na nazivno napetost?

I_v/A	U_{in}/V
0,0	18,0
0,5	31,6
1,0	55,9
1,5	83,6
2,0	111,2
2,5	137,6
3,0	155,5
3,2	160,0
3,5	164,5
4,0	168,4
4,5	170,7

Iz karakteristike prostega teka lahko izračunamo karakteristiko prostega teka pri vsaki drugi hitrosti. Izhajamo iz enačbe:

$$U_i = k_E n \Phi$$

Pri tem se moramo zavedati, da je v tej enačbi skrit vzbujalni tok, in sicer je skrit v magnetnem pretoku, ki je odvisen od vzbujalnega toka:

$$U_i = k_E n \Phi(I_v)$$

Za karakteristiko prostega teka, ki smo jo izmerili pri nazivni hitrosti vrtenja lahko zapišemo:

$$U_{in} = k_E n_n \Phi(I_v)$$

Če zgornjo enačbo delimo s spodnjo dobimo:

$$\frac{U_i}{U_{in}} = \frac{k_E n \Phi(I_v)}{k_E n_n \Phi(I_v)} = \frac{n}{n_n}$$

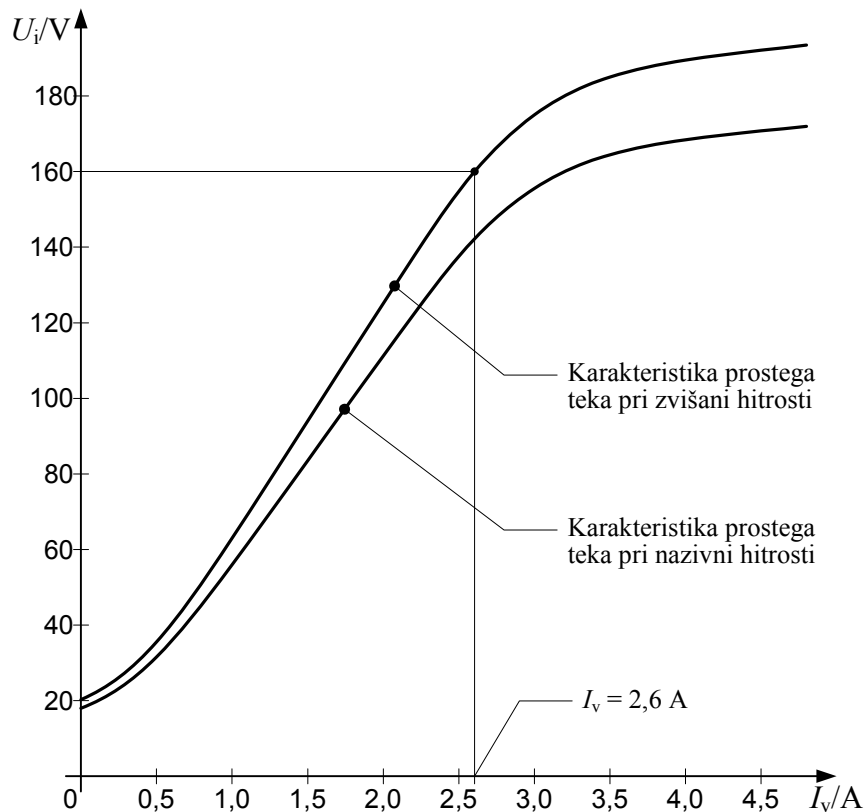
$$U_i = U_{in} \frac{n}{n_n}$$

Z dobljeno enačbo lahko izračunamo točke karakteristike prostega teka pri poljubni hitrosti vrtenja. V enačbo lahko vstavimo konkretne vrednosti:

$$U_i = U_{in} \frac{n}{n_n} = U_{in} \frac{2700}{2400} = U_{in} 1,125$$

I_v/A	U_{in}/V	U_i/V
0,0	18,0	20,25
0,5	31,6	35,55
1,0	55,9	62,89
1,5	83,6	94,05
2,0	111,2	125,1
2,5	137,6	154,8
3,0	155,5	174,9
3,2	160,0	180,0
3,5	164,5	185,1
4,0	168,4	189,5
4,5	170,7	192,0

Preračunane vrednosti so navedene v tretjem stolpcu zgornje tabele. Postopek reševanja je zelo podoben kot pri prejšnji nalogi. Na novi karakteristiki prostega teka moramo najti tisti vzbujalni tok I_v pri katerem je inducirana napetost $U_i(I_v)$ enaka nazivni napetosti. Nalogo rešimo grafično:



Ker se generator vrti hitreje, dobimo pri enakem magnetnem pretoku višjo napetost. Če naj bo napetost ohranjena, je potrebno znižati magnetni pretok, kar pomeni, da moramo znižati vzbujalni tok. Pri nazivni hitrosti vrtenja je moral vzbujalni tok znašati 3,2 A. Pri povišani hitrosti pa na grafu vidimo, da zadošča že 2,6 A vzbujalnega toka. Ustrezni vzbujalni tok izračunamo enako kot pri prejšnji nalogi:

$$R_{vc} = \frac{160}{2,6} = 61,5 \Omega$$

$$\underline{\underline{R_{vd} = R_{vc} - R_v = 61,5 - 50 = 11,5 \Omega}}$$

4. Enosmerni motor s trajnimi magneti ima naslednje podatke: nazivna moč $P_n = 200 \text{ W}$, nazivna napetost $U_n = 12 \text{ V}$, nazivna hitrost vrtenja $n_n = 1200 \text{ min}^{-1}$, nazivni tok $I_n = 21 \text{ A}$ in upornost rotorja $R_i = 0,1 \Omega$. Motor mora ob zagonu razviti navor $M_z = 4 \text{ Nm}$. Izračunajte minimalno napetost U_z pri kateri motor še lahko steče! Predpostavimo, da pri stoječem rotorju ni padca napetosti na ščerkah!

Pri tej nalogi moramo izračunati tok I , ki je potreben, da motor razvije zahtevani navor. Potem bomo izračunali napetost, ki je potrebna, da požene takšen tok. Ta napetost pa je tudi rezultat te naloge. Navor motorja je sorazmeren z rotorskim tokom in magnetnim pretokom:

$$M = k_M I \Phi$$

Ker ta enačba velja za poljuben navor, velja tudi za nazivni in za bremenski navor:

$$M_n = k_M I_n \Phi$$

$$M_z = k_M I \Phi$$

Motor ima trajne magnetne zato je magnetni pretok konstanten. Spodnjo enačbo delimo z zgornjo in dobimo:

$$\frac{M_z}{M_n} = \frac{I}{I_n} \Rightarrow I = I_n \frac{M_z}{M_n}$$

Za izračun toka I potrebujemo nazivni navor M_n , ki ga izračunamo:

$$M_n = \frac{60 P_n}{2\pi n_n} = \frac{60 \cdot 200}{2 \cdot \pi \cdot 1200} = 1,5915 \text{ Nm}$$

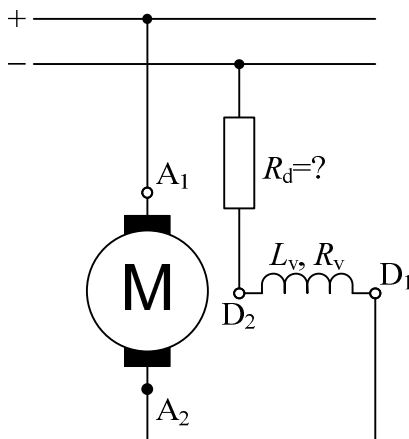
Tok, ki je potreben za bremenski navor znaša:

$$I = I_n \frac{M_z}{M_n} = 21 \frac{4}{1,5915} = 52,78 \text{ A}$$

Minimalna zagonska napetost, ki požene tok zadostni zagonski tok skozi rotor znaša:

$$\underline{\underline{U_z = I R_i = 52,78 \cdot 0,1 = 5,28 \text{ V}}}$$

5. Enosmerni serijski motor ima naslednje podatke: skupna upornost vzbujačnega in rotorskega navitja $R_v + R_i = 0,325 \Omega$, nazivna hitrost vrtenja $n_n = 1200 \text{ min}^{-1}$, nazivni tok $I_n = 46 \text{ A}$ in nazivna napetost $U_n = 220 \text{ V}$. Izračunajte predupor, ki ga je treba vključiti v tokokrog motorja, da se motorju hitrost vrtenja zmanjša na $n = 950 \text{ min}^{-1}$, če je motor obremenjen navorom $M_b = 0,9 \cdot M_n$!



Pri serijsko vzbujanem motorju se moramo zavedati, da magnetni pretok Φ ni konstanten, ker je skozi rotor in vzbujalno navitje isti tok, zato je magnetni pretok odvisen tudi od obremenitve motorja. Pri serijskem motorju upoštevamo, da je magnetni pretok sorazmerno s tokom. Skladno s tem, velja za navor enačba:

$$M = k_M I \Phi = k_M I \underbrace{k I}_{\Phi} = k_{MS} I^2$$

Tudi pri inducirani napetosti moramo upoštevati, da se le ta spreminja z velikostjo toka:

$$U_i = k_E n \Phi = k_E n \underbrace{k I}_{\Phi} = k_{ES} n I$$

Pri nazivnih razmerah znaša inducirana napetost:

$$U_{in} = U_n - I_n (R_v + R_i) = 220 - 46 \cdot 0,325 = 205,05 \text{ V}$$

Glede na enačbo za navor serijskega motorja lahko izračunamo tok, ki je potreben za bremenski navor M_b :

$$\begin{aligned} M_b &= k_{MS} I^2 & \Rightarrow & \frac{M_b}{M_n} = \frac{I^2}{I_n^2} & \Rightarrow & I = I_n \sqrt{\frac{M_b}{M_n}} = 46 \sqrt{\frac{0,9 M_n}{M_n}} = 43,639 \text{ A} \\ M_n &= k_{MS} I_n^2 \end{aligned}$$

V novem obratovalnem stanju se inducira naslednja napetost:

$$\begin{aligned} U_i &= k_{ES} n I & \Rightarrow & \frac{U_i}{U_{in}} = \frac{n I}{n_n I_n} & \Rightarrow & U_i = U_{in} \frac{n I}{n_n I_n} = 205,05 \frac{950 \cdot 43,639}{1200 \cdot 46} = 154,0 \text{ V} \\ U_{in} &= k_{ES} n_n I_n \end{aligned}$$

Da je izpolnjeno napetostno ravnovesje, mora znašati padec napetosti na upornostih:

$$\Delta U = U_n - U_i = I (R_v + R_i + R_d) \Rightarrow R_d = \frac{U_n - U_i}{I} - (R_v + R_i) = \frac{220 - 154}{43,639} - 0,325 = \underline{\underline{1,19 \Omega}}$$

Rešitev pisnega izpita iz predmeta ELEKTRIČNI STROJI

1. Transformatorja delujeta paralelno. Prvi transformator ima nazivno moč $S_{n1}=40$ MVA in kratkostično napetost $u_{k1}=11,5$ %. Drugi transformator pa ima nazivno moč $S_{n2}=60$ MVA in kratkostično napetost $u_{k2}=12,4$ %. Izračunajte največjo dovoljeno skupno moč!

Rešitev:

Pri tej nalogi se moramo zavedati naslednjih dejstev:

- Ker sta transformatorja vezana paralelno, je na obeh transformatorjih enak padec napetosti, ki je odvisen od faktorja obremenitve b vsakega transformatorja.
- Transformator z nižjo kratkostično napetostjo prevzame relativno večjo obremenitev.
- Celotna moč je seštevek obeh moči.

$$\Delta u_1 = \Delta u_2$$

$$\frac{S_1}{S_{n1}} u_{k1} = \frac{S_2}{S_{n2}} u_{k2}$$

Ker velja:

$$b_1 = \frac{S_1}{S_{n1}}; \quad b_2 = \frac{S_2}{S_{n2}}$$

Lahko zapišemo:

$$b_1 u_{k1} = b_2 u_{k2}$$

Ker je prvi transformator, ki ima nižjo kratkostično napetost, relativno bolj obremenjen, ga lahko obremenimo s faktorjem obremenitve 1. Drugi transformator je zaradi enakih padcev napetosti na obeh transformatorjih obremenjen s faktorjem obremenitve:

$$b_2 = b_1 \frac{u_{k1}}{u_{k2}} = 1 \frac{11,5}{12,4} = 0,92742$$

Celotna moč je seštevek obeh moči:

$$S_c = S_1 + S_2 = b_1 S_{n1} + b_2 S_{n2} = 40 + \frac{11,5}{12,4} 60 = \underline{\underline{95,6 \text{ MVA}}}$$

2. Transformatorju smo v prostem teku izmerili moč $P_0=1360$ W. Pri preizkusu kratkega stika smo izmerili moč $P_k=2840$ W. Pri nazivni napetosti $U_{1n}=400$ V se je transformator segrel na nadtemperaturo $\vartheta_n=85$ K. Kolikšna je nadtemperatura, če napetost na omrežju pade na $U_{1n}=385$ V. Na transformator je priključeno breme, ki ima konstantno impedanco.

Rešitev:

Pri tej nalogi se moramo zavedati naslednjih dejstev:

- Moč, ki jo izmerimo v prostem teku, je enaka nazivni moči izgub v jedru transformatorja, ker je jedro transformatorja že v prostem teku že polno obremenjeno.

- b) Moč izgub v jedru je sorazmerna kvadratu gostote magnetnega pretoka B , oziroma napetosti U_1 .
- c) Moč, ki jo izmerimo v kratkem stiku je enaka nazivni moči, ki se troši v navitjih, ker v navitjih teče nazivni tok.
- d) Moč, ki se troši v navitjih je sorazmerna kvadratu toka.
- e) Celotna moč, ki se troši v navitjih in jedru se pretvori v toploto, ki mora iz transformatorja odtekat v okolico.
- f) V našem primeru se spremeni napetost, zato se spremenijo izgube v jedru. Ker pa je na sekundarno stran transformatorja priključeno breme s konstantno upornostjo, se ob spremembi napetosti spremeni tudi tok in zato tudi izgube v navitjih.
- g) Nadtemperatura transformatorja je sorazmerna z močjo izgub, ki mora odtekat v okolico.

$$\vartheta_n = k P_{izg,n} = k(P_{Cun} + P_{Fen})$$

$$\vartheta = k P_{izg} = k(P_{Cu} + P_{Fe})$$

$$P_{Fen} = P_0$$

$$P_{Cun} = P_k$$

$$P_{Fe} = P_0 \left(\frac{U_1}{U_{1n}} \right)^2$$

$$P_{Cu} = P_k \left(\frac{I_1}{I_{1n}} \right)^2 = P_k \left(\frac{\frac{U_1}{Z}}{\frac{U_{1n}}{Z}} \right)^2 = P_k \left(\frac{U_1}{U_{1n}} \right)^2$$

$$\frac{\vartheta}{\vartheta_n} = \frac{k(P_{Cu} + P_{Fe})}{k(P_{Cun} + P_{Fen})} = \frac{P_{Cu} + P_{Fe}}{P_{Cun} + P_{Fen}}$$

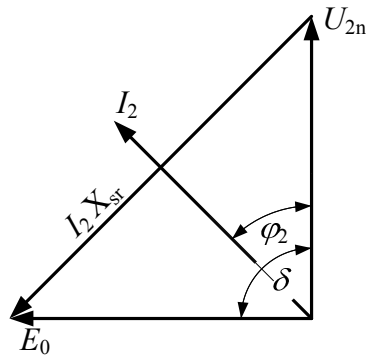
$$\vartheta = \vartheta_n \frac{P_{Cu} + P_{Fe}}{P_{Cun} + P_{Fen}} = \vartheta_n \frac{P_k \left(\frac{U_1}{U_{1n}} \right)^2 + P_0 \left(\frac{U_1}{U_{1n}} \right)^2}{P_k + P_0} = \vartheta_n \left(\frac{U_1}{U_{1n}} \right)^2 = 85 \left(\frac{385}{400} \right)^2 = \underline{\underline{78,7K}}$$

3. Trifazni sinhronski turbogenerator s podatki $S_n=300$ MVA; $U_{2n}=21$ kV; $f_n=50$ Hz; $\cos(\varphi_n)=0,7$; $X_{sr}=1,8$. Generator je priključen na togo omrežje in je vzbujen za prosti tek. Izračunajte moč, pri kateri bo generator omahnil! Kakšen bo kot med tokom in napetostjo?

Rešiev:

Pri tej nalogi se moramo zavedati naslednjih dejstev:

- a) Moč, ki jo generator oddaja v omrežje, je sorazmerna padcu napetosti na sinhronski reaktanci $I_2 X_{sr}$.
- b) Ko je generator vzbujen za prosti tek velja $E_0 = U_{2n} = 1$.
- c) Generator izpade iz sinhronizma, če velja $\delta \geq 90^\circ$.



Pri nazivni obremenitvi ima padec napetosti na sinhronski reaktanci vrednost $I_{2n}X_{sr}=1,8$. Padec napetosti ob izpadu iz sinhronizma pa izračunamo s pomočjo kazalčnega diagrama in znaša:

$$I_2 X_{sr} = \sqrt{U_{2n}^2 + E_0^2} = \sqrt{1^2 + 1^2} = \sqrt{2}$$

$$S = S_n \frac{I_2 X_{sr}}{I_{2n} X_{sr}} = 300 \frac{\sqrt{2}}{1,8} = \underline{\underline{235 \text{ MVA}}}$$

Kot med tokom in napetostjo določimo s pomočjo slike. Opravka imamo z enakokrakim pravokotnim trikotnikom. Pri tem je tok I_2 pravokoten na hipotenuzo, to je padec napetosti na sinhronski reaktanci. Tok I_2 zato razpolavlja kolesni kot δ . Kot med tokom in napetostjo izračunamo:

$$\varphi_2 = \frac{\delta}{2} = \frac{90^\circ}{2} = \underline{\underline{45^\circ}}$$

4. Asinhronski motor s podatki: $P_n=100 \text{ kW}$, $U_n=400 \text{ V}$, $f_n=50 \text{ Hz}$ in $n_n=1470 \text{ min}^{-1}$ poganja breme z nazivnim navorom. Izračunajte hitrost vrtenja tega motorja, če se napetost na sponkah poveča na $U=405 \text{ V}$ in je navor bremena enak v obeh primerih!

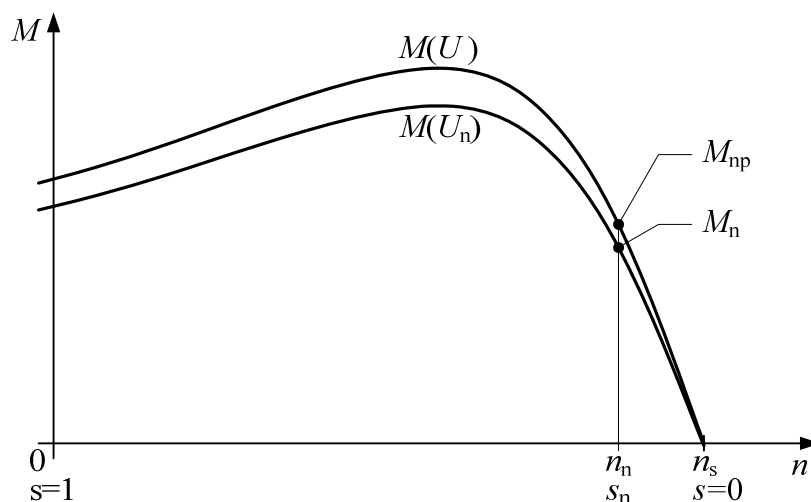
Rešitev:

Pri tej nalogi se moramo zavedati naslednjih dejstev:

- Navor asinhronskega motorja je pri poljubni hitrosti vrtenja oziroma slipu sorazmeren s kvadratom napetosti.
- Navorna karakteristika asinhronskega motorja je v področju od nazivnega navora do prostega teka skorajda linearna ($M = k s$).
- Navor motorja je enak navoru bremena.

Pri napetosti U ima motor novo, višjo navorno karakteristiko $M(U)$. Motor razvije pri povišani napetosti in nazivnem slipu namesto nazivnega navora M_n , višji navor:

$$M_{np} = M_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^2$$



Računamo z linearno navorno karakteristiko, ki jo dobimo pri zvišani napetosti:

$$M(s) = \frac{M_{np}}{s_n} s$$

$$M(s) = \left(\frac{U}{U_n}\right)^2 \frac{M_n}{s_n} s$$

Izenačimo navor bremena, ki je enak nazivnemu navoru in navor motorja:

$$\left(\frac{U}{U_n}\right)^2 \frac{M_n}{s_n} s = M_n$$

$$\left(\frac{U}{U_n}\right)^2 \frac{s}{s_n} = 1$$

$$s = s_n \left(\frac{U_n}{U}\right)^2$$

Izračunamo nazivni slip:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_n} = \frac{1500 - 1470}{1500} = 0,02$$

Izračunamo slip pri zvišani napetosti:

$$s = s_n \left(\frac{U_n}{U}\right)^2 = 0,02 \left(\frac{400}{405}\right)^2 = 0,019509$$

Z dobljenim slipom izračunamo hitrost vrtenja:

$$n = n_s (1 - s) = 1500(1 - 0,019509) = \underline{\underline{1470,7 \text{ min}^{-1}}}$$

5. Enosmerni tujevzbujani generator ima naslednje podatke: $P_n=800 \text{ W}$, $U_n=200 \text{ V}$, $n_n=1000 \text{ min}^{-1}$, upornost indukta $R_l=4 \Omega$ in padeč na ščetkah $\Delta U=2 \text{ V}$. Kakšen tok teče skozi breme z upornostjo $R_b=70 \Omega$, če se generator vrti s hitrostjo $n_n=1040 \text{ min}^{-1}$?

Rešitev:

Pri tej nalogi se moramo zavedati naslednjih dejstev:

- Generatorju se pri spremembi hitrosti vrtenja spremeni inducirana napetost.
- Pri tujezbujanem generatorju je inducirana napetost U_i sorazmerna le hitrosti vrtenja n , če vzbujanja ne spreminjamo.
- V vsakem režimu obratovanja je inducirana napetost enaka vsem protinapetostim.

$$U_{in} = k n_n$$

$$U_i = k n$$

Nazivno inducirano napetost lahko izračunamo tudi skladno s točko c:

$$U_{in} = U_n + I_n R_i + \Delta U_{\text{šč}}$$

Nazivni tok izračunamo iz nazivne moči in napetosti:

$$I_n = \frac{P_n}{U_n} = \frac{800}{200} = 4 \text{ A}$$

Inducirana napetost znaša:

$$U_{in} = U_n + I_n R_i + \Delta U_{\text{šč}} = 200 + 4 \cdot 4 + 2 = 218 \text{ V}$$

Skladno s točko b znaša inducirana napetost pri hitrosti vrtenja n :

$$U_i = U_{in} \frac{n}{n_n} = 218 \frac{1040}{1000} = 226,72 \text{ V}$$

Inducirani napetosti se zoperstavijo padec napetosti v rotorju $I R_i$, padec napetosti na ščetkah $\Delta U_{\text{šč}}$ in napetost na bremenu, kar zapišemo:

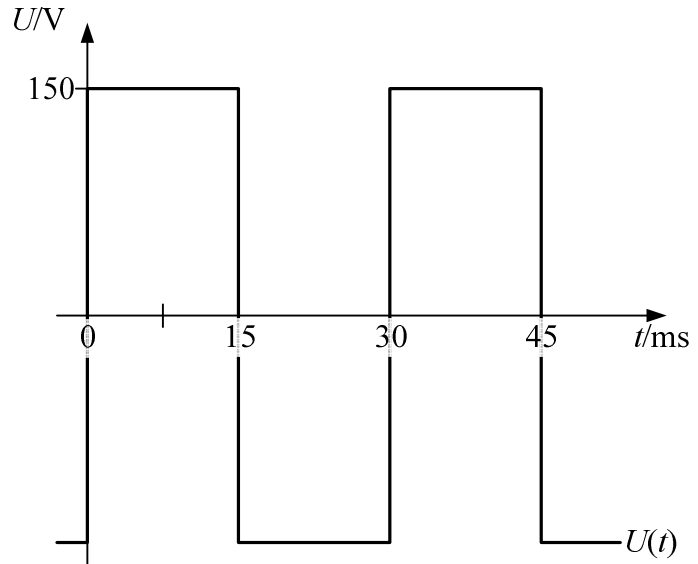
$$U_i = I R_i + \Delta U_{\text{šč}} + I R_b = I(R_i + R_b) + \Delta U_{\text{šč}}$$

$$I = \frac{U_i - \Delta U_{\text{šč}}}{R_i + R_b} = \frac{226,72 - 2}{4 + 70} = \underline{\underline{3,037 \text{ A}}}$$

Pisni izpit iz predmeta

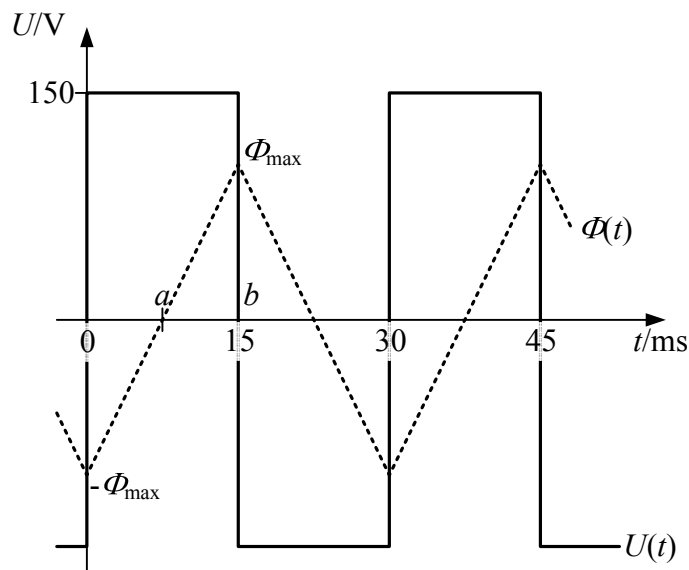
ELEKTRIČNI STROJI

1. Transformator priključimo na napetost pravokotne oblike kot je prikazana na sliki. Transformator ima presek jedra $S=30 \text{ cm}^2$. Skicirajte časovni potek magnetnega pretoka pri dani napetosti! Izračunajte število primarnih obojev N_1 , da bo znašala maksimalna gostota magnetnega pretoka $B=1,25 \text{ T}$!



Potek magnetnega pretoka je določen s Faradayevim zakonom:

$$\Phi = \frac{1}{N_1} \int U(t) dt$$



V eni četrtini periode napetosti se magnetni pretok spremeni od vrednosti 0 do maksimalne vrednosti Φ_{\max} .

$$\Phi_{\max} = \frac{1}{N_1} \int_a^b U(t) dt = \frac{1}{N_1} 150t \Big|_{0,0075}^{0,015} = \frac{1,125}{N_1}$$

Magnetni pretok je enak produktu $B \cdot S$.

$$\frac{1,125}{N_1} = B S$$

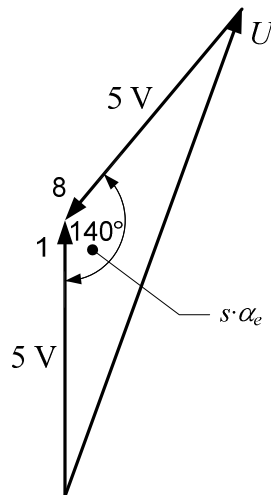
Izrazimo število ovojev in ga izračunamo:

$$N_1 = \frac{1,125}{B S} = \frac{1,125}{1,25 \cdot 30 \cdot 10^{-4}} = \underline{\underline{300}}$$

2. Na statorju sinhronskega generatorja je $N = 36$ utorov, število polov $2p = 4$, širina tuljavice $s = 7$, število ovojev v tuljavici oz. palic $z = 12$, v vsaki palici se inducira napetost $e = 5$ V. Izračunajte inducirano napetost, ki se inducira v vsaki tuljavici!

Vse tuljavice so enake, zato lahko za izračun vzamemo katerokoli. Vzemimo tuljavico, ki se začne v utoru 1. Širina tuljavice znaša $s = 7$. Zato se druga stranica tuljavice nahaja v utoru 8. Kot med kazalcema obeh napetosti znaša $s \cdot \alpha_e$. Najprej izračunamo električni kot α_e :

$$\alpha_g = \frac{360^\circ}{N} = \frac{360^\circ}{36} = 10^\circ \quad \alpha_e = p \alpha_g = 2 \cdot 10 = 20^\circ$$



Napetost v enem ovoju tuljavice znaša:

$$U_{ov} = \sqrt{e^2 + e^2 - 2e^2 \cos(140^\circ)} = e \sqrt{2(1 - \cos(140^\circ))} = 5 \sqrt{2(1 - \cos(140^\circ))} = 9,397 \text{ V}$$

$$U = \underline{\underline{U_{ov} z = 9,397 \cdot 12 = 112,76 \text{ V}}}$$

Nalogo lahko rešimo tudi s faktorjem navitja, pri čemer moramo upoštevati, da je tuljavica ena sama, zato znaša pasovni faktor $f_p = 1$.

$$\tau_p = \frac{N}{2p} = \frac{36}{4} = 9$$

$$f_s = \sin\left(\frac{s}{\tau_p} 90^\circ\right) = \sin\left(\frac{7}{9} 90^\circ\right) = 0,93969$$

$$f_n = f_p f_s = 0,93969$$

$$U = \underbrace{2}_{\substack{\text{število} \\ \text{utorov}}} \cdot \underbrace{e \cdot z}_{\substack{\text{napetost} \\ \text{v enem} \\ \text{utoru}}} \cdot f_n = 2 \cdot 5 \cdot 12 \cdot 0,93969 = 112,76 \text{ V}$$

3. Asinhronski motor ima naslednje podatke: $P_n = 100 \text{ kW}$, $U_n = 400 \text{ V}$, $f_n = 50 \text{ Hz}$ in $n_n = 1450 \text{ min}^{-1}$. Motor je obremenjen z ventilatorjem, ki ima navorno karakteristiko $M_v = 3,2 \cdot 10^{-4} n^2$. Ali deluje motor v dopustnem režimu? Odgovor utemeljite z izračunom!

Do odgovora lahko pridemo na dva načina. Prvi, lažji, način je, da preverimo velikost navora bremena pri nazivni hitrosti vrtenja motorja. Če je navor bremena, ki s hitrostjo vrtenja narašča, večji od nazivnega navora, bo motor preobremenjen, kar pomeni, da motor v tem režimu ne sme trajno obratovati.

$$M_n = \frac{60 P_n}{2 \pi n_n} = \frac{60 \cdot 100 \cdot 10^3}{2 \pi \cdot 1450} = 658,57 \text{ Nm}$$

$$M_v = 3,2 \cdot 10^{-4} n_n^2 = 672,8 \text{ Nm}$$

Navor ventilatorja (bremena) M_v je pri nazivni hitrosti vrtenja večji od navora motorja, zato je takšno obratovanje **nedopustno!**

Drugi, težji, način je, da izračunamo hitrost vrtenja motorja. Če je hitrost vrtenja manjša od nazivne hitrosti, je motor preobremenjen. Najprej izračunamo navorno karakteristiko, kjer upoštevamo linearnost karakteristike v okolici sinhronske hitrosti:

$$M_m = M_n \frac{s}{s_n} = M_n \frac{\frac{n_s - n}{n_s}}{\frac{n_s - n_n}{n_s}} = M_n \frac{n_s - n}{n_s - n_n}$$

Izenačimo navor motorja in navor bremena (ventilatorja), ker velja zakon o ravnovesju navorov:

$$M_n \frac{n_s - n}{n_s - n_n} = 3,2 \cdot 10^{-4} n^2$$

Iz enačbe izračunamo hitrost vrtenja n :

$$3,2 \cdot 10^{-4} n^2 + M_n \frac{n}{n_s - n_n} - \frac{M_n n_s}{n_s - n_n} = 0$$

$$n_{1,2} = \frac{-\frac{M_n}{n_s - n_n} \pm \sqrt{\left(\frac{M_n}{n_s - n_n}\right)^2 + 4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4} \frac{M_n n_s}{n_s - n_n}}}{2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4}}$$

$$n_{1,2} = \frac{-\frac{658,57}{1500 - 1450} \pm \sqrt{\left(\frac{658,57}{1500 - 1450}\right)^2 + 4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4} \frac{658,57 \cdot 1500}{1500 - 1450}}}{2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4}}$$

$$n_{1,2} = \frac{-\frac{658,57}{50} \pm \sqrt{\left(\frac{658,57}{50}\right)^2 + 4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4} \frac{658,57 \cdot 1500}{50}}}{2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4}} = -20580,38 \pm 22029,37$$

$$n_1 = 1448,99$$

$$n_2 = -42609,8$$

Smiselno vrednost ima prvi koren kvadratne enačbe, zato ga privzamemo za hitrost vrtenja:

$$n = 1448,99 \text{ min}^{-1}$$

Hitrost vrtenja motorja je nižja od nazivne hitrosti vrtenja $n < n_n$, kar pomeni, da je motor preobremenjen. **Delovanje ni dopustno!**

Slednji način izračuna je lahko problematičen, ker nimamo jamstva, da je navorna karakteristika še linearna, kakršno smo predpostavili. Vrednost izračunane hitrosti lahko odstopa od dejanske hitrosti vrtenja. Ni pa sporno, da se bo motor vrtel počasneje od nazivne hitrosti, zato je končni odgovor zagotovo pravilen.

4. Enosmerni tujevzbujani motor ima naslednje podatke: $P_n = 50 \text{ kW}$, $U_n = 500 \text{ V}$, $I_n = 108 \text{ A}$, $n_n = 3200 \text{ min}^{-1}$, upornost indukta $R_i = 0,2 \Omega$ in padec na ščetkah $\Delta U_{\text{šč}} = 2 \text{ V}$. Kolikšen je navor zavrti osi motorja, če ga priključimo na napetost $U = 30 \text{ V}$?

Ker imamo opraviti s tujevzbujanim motorjem, predpostavimo, da je magnetni pretok konstanten, saj naloga ne omenja kakšne spremembe vzbujanja. Zato je navor je sorazmeren le toku:

$$M = k I$$

$$M_n = k I_n$$

Sledi:

$$M = M_n \frac{I}{I_n}$$

Izračunati moramo tok, ki teče v motor pri zavrtem rotorju. V ta namen zapišemo enačbo za ravnovesje napetosti:

$$U = U_i + I R_i + \Delta U_{\text{šč}}$$

Ker je rotor zavrt, se v motorju ne inducira napetost:

$$U = I R_i + \Delta U_{\text{šč}}$$

$$I = \frac{U - \Delta U_{\text{šč}}}{R_i} = \frac{30 - 2}{0,2} = 140 \text{ A}$$

Potrebujemo še nazivni navor:

$$M_n = \frac{60 P_n}{2 \pi n_n} = \frac{60 \cdot 50000}{2 \pi \cdot 3200} = 149,2 \text{ Nm}$$

Izračunamo še končni rezultat:

$$M = M_n \frac{I}{I_n} = 149,2 \frac{140}{108} = \underline{\underline{193 \text{ Nm}}}$$

Primer novega (sedanjega) izpit iz predmeta OSNOVE ELEKTRIČNIH STROJEV

1. Premer okroglega stebra trifaznega transformatorja znaša 200 mm. Jedro ima faktor polnjenja 0,88. Ostali podatki transformatorja so naslednji: $U_1 = 10$ kV, $U_2 = 400$ V, $S_n = 1$ MVA, $f = 50$ Hz in vezava Yy0.

- a) Izračunajte maksimalno vrednost gostote magnetnega pretoka v jedru, če je število ovojev primarnih tuljav 3352!

Napetost na primarnih tuljavah U je za $\sqrt{3}$ manjša od medfazne napetosti, ker je primarno navitje vezano v zvezdo:

$$\frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} B S_{Fe} N_1 f$$

V enačbi je vrednost gostote B že tako ali tako maksimalna. Iz enačbe izrazimo B :

$$B = \frac{\sqrt{2} U_1}{2\pi\sqrt{3} S_{Fe} N_1 f}$$

Vstavimo presek železa:

$$B = \frac{\sqrt{2} U_1}{2\pi\sqrt{3} S_{Fe} N_1 f} = \frac{\sqrt{2} U_1}{2\pi\sqrt{3} S f_{Fe} N_1 f} = \frac{\sqrt{2} U_1}{2\pi\sqrt{3} f_{Fe} N_1 f}$$

Enačbo uredimo in vstavimo podatke:

$$B = \frac{2\sqrt{2} U_1}{\pi^2 \sqrt{3} D^2 f_{Fe} N_1 f} = \frac{2\sqrt{2} 10000}{\pi^2 \sqrt{3} 0,2^2 0,89 587 50} = 1,5835 \text{ T}$$

- b) Kolikšna je maksimalna vrednost magnetnega pretoka?

$$\Phi = B S_{Fe} = B \frac{\pi D^2}{4} f_{Fe} = 1,5835 \frac{\pi 0,2^2}{4} 0,89 = 0,0442749 \text{ Wb}$$

- c) Izračunajte število sekundarnih ovojev!

$$N_2 = N_1 \frac{U_{2t}}{U_{1t}} = N_1 \frac{U_2}{\frac{U_1}{\sqrt{3}}} = 287 \frac{400}{\frac{10000}{\sqrt{3}}} = 20$$

- d) Izračunajte presek primarne žice, če naj gostota toka J_1 znaša 3 A/mm²?

$$S_{Cu1} = \frac{I_1}{J_1} = \frac{\frac{S_n}{\sqrt{3} U_1}}{J_1} = \frac{\frac{10^6}{\sqrt{3} 10^4}}{3} = 19,245 \text{ mm}^2$$

- e) Izračunajte presek sekundarne žice, če naj gostota toka J_2 znaša 2,8 A/mm²?

$$S_{Cu2} = \frac{I_2}{J_2} = \frac{\frac{S_n}{\sqrt{3} U_2}}{J_2} = \frac{\frac{10^6}{\sqrt{3} 400}}{2,8} = 515,491 \text{ mm}^2$$

- f) Kolikšen mora biti presek okna transformatorja, če znaša faktor polnjenja okna $f_{Cu} = 0,4$? Transformator je trifazni!!

Za primarno in sekundarno tuljavo ene faze potrebujemo S_1 površine:

$$S_1 = \frac{N_1 S_{Cu1} + N_2 S_{Cu2}}{f_{Cu}}$$

Ker sta v oknu transformatorja primarni navitji in sekundarni navitji dveh faz potrebu-
jemo dvojno površino S_1 :

$$S = 2 S_1 = 2 \frac{N_1 S_{Cu1} + N_2 S_{Cu2}}{f_{Cu}} = 2 \frac{587 \cdot 19.245 + 20 \cdot 515.491}{0.4} =$$

$$= 108033 \text{ mm}^2 = 0,108 \text{ m}^2$$

2. Za prikazani transformator določite:

a) Vezavo primarnega navitja!

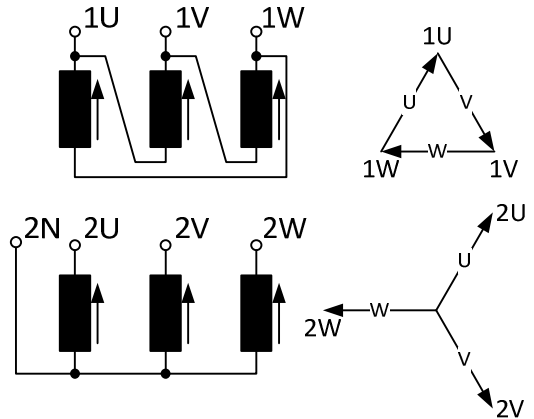
D

b) Vezavo sekundarnega navitja!

y

c) Fazno številko!

Fazna napetost faze 2U kaže na urini številčnici
na 1, torej je fazna številka 1!



3. Trifazni sinhronski turbogenerator s podatki

$S_n=300 \text{ MVA}$, $U_{2n}=25 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $X_{sr}=1,45$,

$\cos(\varphi_{2n}) = 0,78$ in $I_{1n}=340 \text{ A}$, je priključen na togo nazivno omrežje.

a) Izračunajte omahno moč pri nazivno vzbujenem stroju!

$$S_{om} = S_n \frac{I_2 X_{sr}}{I_{2n} X_{sr}} = S_n \frac{\sqrt{U_{2n}^2 + E_0^2}}{I_{2n} X_{sr}}$$

Najprej izračunamo nazivno vrednost fiktivne napetosti:

$$E_{0n} = \sqrt{(I_{2n} X_{sr} \cos(\varphi_{2n}))^2 + (U_{2n} + I_{2n} X_{sr} \sin(\varphi_{2n}))^2}$$

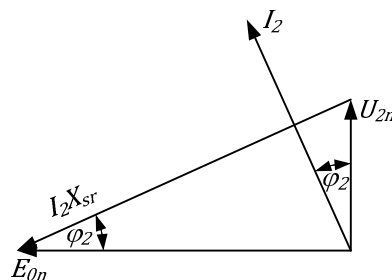
$$E_{0n} = \sqrt{(1 \cdot 1,45 \cdot 0,78)^2 + (1 + 1 \cdot 1,45 \sqrt{1 - 0,78^2})^2} = 2,2174897046595$$

Vstavimo podatke v enačbo za izračun omahne moči:

$$S_{om} = S_n \frac{\sqrt{U_{2n}^2 + E_{0n}^2}}{I_{2n} X_{sr}} = 300 \frac{\sqrt{1 + 2,2174897^2}}{1 \cdot 1,45} = 503,28455 \text{ MVA}$$

b) Kolikšna je jalova moč ko stroj obratuje pri omahni moči?

Najprej izračunamo kot φ_2 , pri čemer si pomagamo s skico:



$$\varphi_2 = \arctan\left(\frac{U_{2n}}{E_{0n}}\right) = \arctan\left(\frac{1}{2,2174897046595}\right) = 24,2734883066277^\circ$$

$$Q_{om} = S_{om} \sin(\varphi_2) = 503,28455 \sin(24,2734883066277) = 206,9 \text{ MW}$$

$$503,28455 \sin(24,2734883066277 \pi/180)$$

- c) Izračunajte kolesni, če stroj obremenimo z nazivno močjo!

Znana je dolžina vseh stranic trikotnika v kazalčnem diagramu, zato uporabimo kosinusni izrek za izračun kolesnega kota:

$$I_{2n}^2 X_{sr}^2 = U_{2n}^2 + E_0^2 - 2 U_{2n} E_0 \cos(\delta)$$

Iz zapisanega kosinusnega izreka izrazimo kolesni kot δ :

$$2 U_{2n} E_{0n} \cos(\delta) = U_{2n}^2 + E_{0n}^2 - I_{2n}^2 X_{sr}^2$$

$$\cos(\delta) = \frac{U_{2n}^2 + E_{0n}^2 - I_{2n}^2 X_{sr}^2}{2 U_{2n} E_{0n}}$$

$$\delta = \arccos\left(\frac{U_{2n}^2 + E_{0n}^2 - I_{2n}^2 X_{sr}^2}{2 U_{2n} E_{0n}}\right) = \arccos\left(\frac{1^2 + 2,2174897046595^2 - 1^2 1,45^2}{2 \cdot 1 \cdot 2,2174897046595}\right)$$

$$= 30,66^\circ$$

- d) Kolikšen vzbujalni tok je potreben za prosti tek?

$$I_1 = I_{1n} \frac{E_0}{E_{0n}} = 340 \frac{1}{2,2174897046595} = 153,3 \text{ A}$$

4. Enofazni asinhronski motor ima podatke: $P_n = 1 \text{ kW}$, $U_n = 230 \text{ V}$, $f_n = 50 \text{ Hz}$, $n_n = 1420 \text{ min}^{-1}$, $I_n = 5,62 \text{ A}$, $\cos(\varphi) = 0,86$. Zagoni tok je 5 krat večji od nazivnega toka.

- a) Izračunajte izkoristek motorja?

$$\eta = \frac{P_n}{P_e} = \frac{P_n}{U_n I_n \cos(\varphi)} = \frac{1000}{230 \cdot 5,62 \cdot 0,86} = 0,899575 = 89,9575 \%$$

- b) Izračunajte nazivni slip!

$$s = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1500 - 1420}{1500} = \frac{4}{75} = 0,05333333$$

- c) Koliko pólni je stroj?

Če bi bil stroj dvopolni, bi bila pri frekvenci 50 Hz njegova nazivna hitrost vrtenja nekoliko nižja od 3000 min^{-1} . Pri štiripolnem motorju pa je njegova nazivna hitrost vrtenja nekoliko nižja od 1500 min^{-1} , kar v našem primeru je, zato je stroj štiripolni.

$$2p = 4$$

- d) Kolikšna je napetost na motorju ob zagonu, če je motor priključen preko podaljška dolžine 20 m in preseka $S = 1,5 \text{ mm}^2$? Specifična upornost bakra znaša $\rho = 0,0175 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$. V vtičnici je napetost 230 V.

Napetost na motorju je enaka razliki med napetostjo na vtičnici in padcem napetosti na podaljšku:

$$U_m = U - I_z R$$

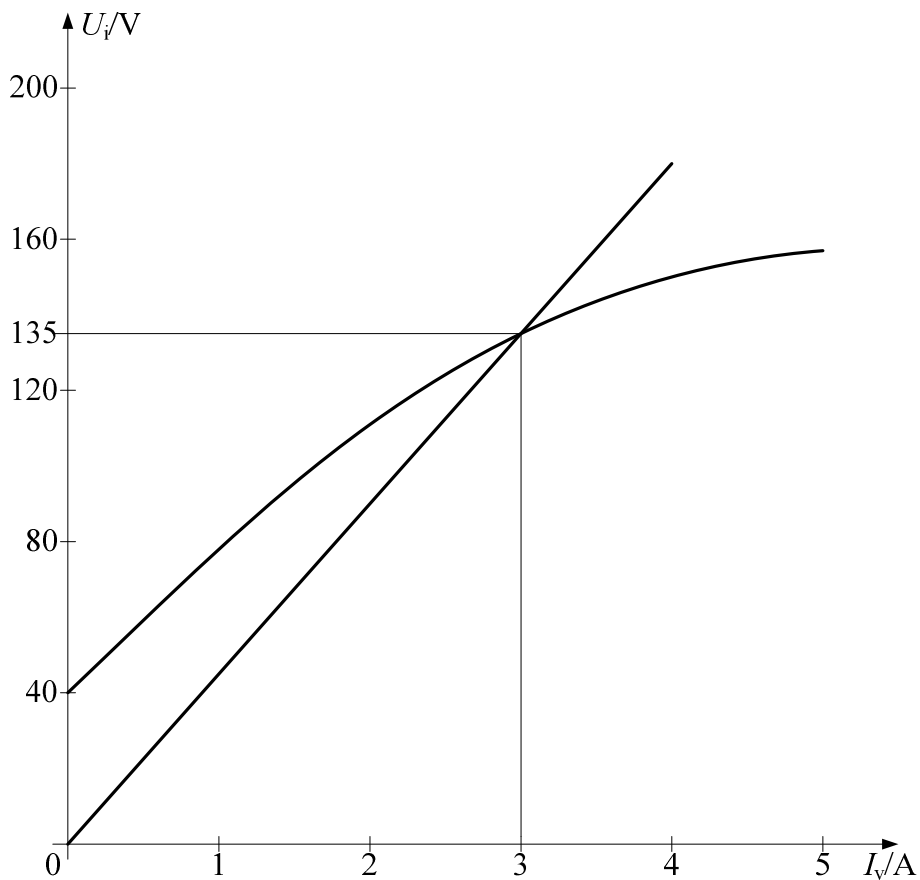
$$U_m = U - I_z \frac{\rho 2l}{S} = U - 5 I_n \frac{\rho 2l}{S} = 230 - 5 \cdot 5,62 \frac{0,0175 \cdot 2 \cdot 20}{1,5} = 216,9 \text{ V}$$

5. Enosmernemu paralelno vzbujanemu generatorju smo pri $n_m = 4000 \text{ min}^{-1}$ izmerili karakteristiko prostega teka, ki je podana v tabeli. Celotna upornost v vzbujalnem tokokrogu znaša $R_{VC} = 45 \Omega$.

- a) Na kolikšno napetost se stroj vzbudi?

I_v/A	U_i/V
0	40
1	78
2	111
3	135
4	150
5	157
6	160

Nalogo rešimo grafično, tako da najdemo presečišče med karakteristiko prostega teka in padcem napetosti na vzbujačnem navitju $I_v R_v$, ker sta veji vzbujačnega navitja in rotorja (indukta) vezani vzporedno, kar pomeni, da je napetost na obeh vejah enaka.



Presečišče je pri napetosti 135 V, kar je enako napetosti, na katero se generator vzbudi.

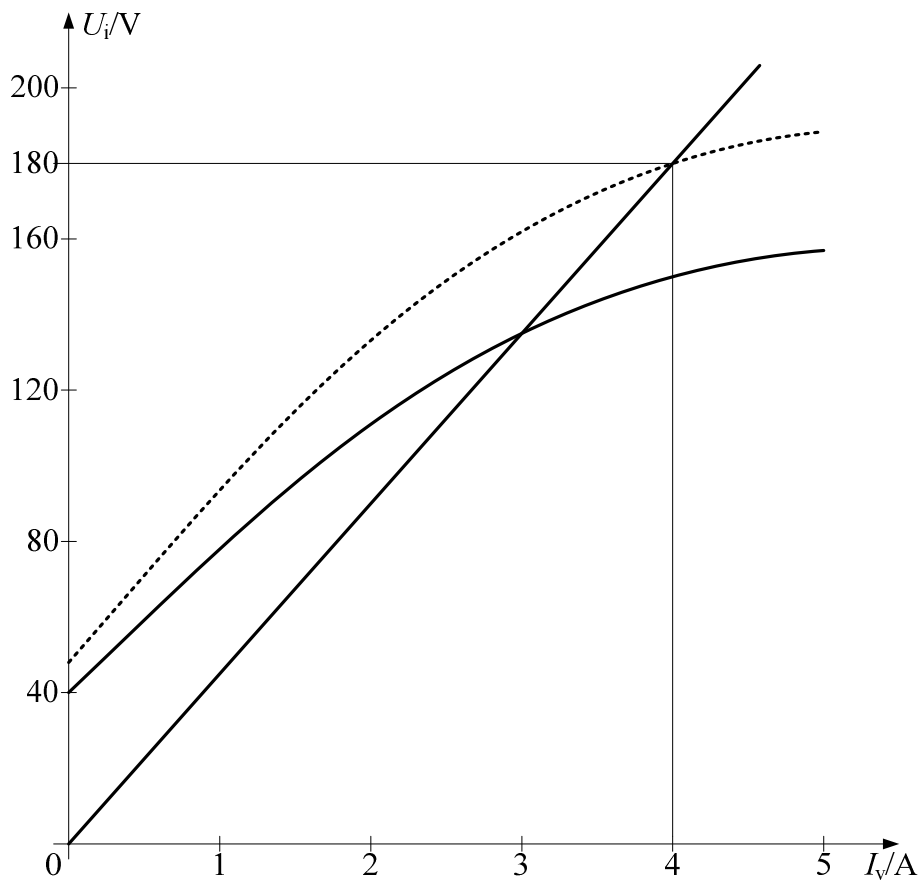
- b) Koliko moči se troši v vzbujačnem tokokrogu?

$$P = \frac{U^2}{R_{VC}} = \frac{135^2}{45} = 405 \text{ W}$$

- c) Na kakšno napetost bi se stroj vzbudil, če bi ga vrteli s hitrostjo $n=4800 \text{ min}^{-1}$?

Tudi v tem primeru rešimo nalogo grafično, tako da najdemo presečišče med preračunano karakteristiko prostega teka in padcem napetosti na vzbujačnem navitju $I_v R_v$. Ker se generator vrti hitreje, je inducirana napetost pri istem magnetnem pretoku (vzbujačnem toku) večja za razmerje hitrosti vrtenja, ki znaša $n/n_n = 4800/4000 = 1,2$.

I_v/A	U_i/V	U_{iv}/V
0	40	48,0
1	78	93,6
2	111	133,2
3	135	162,0
4	150	180,8
5	157	188,4
6	160	192,0



V tem primeru je presečišče pri napetosti 180 V.

Odgovori

Številka vprašanja		Odgovor	Vrednost odgovora
1	a	0,280458 T	3 %
	b	0,007754 Wb	4 %
	c	134	4 %
	d	19,245 mm ²	2 %
	e	515,491 mm ²	2 %
	f	0,6679 m ²	5 %
2	a	D	3 %
	b	y	3 %
	c	11	7 %
3	a	503.28455 MVA	7 %
	b	328,6 MW	7 %
	c	30.66°	7 %
	d	153.3 A	7 %
4	a	89,9575 %	4 %
	b	$\frac{4}{75} = 0.05333333$	3 %
	c	$2p = 4$	2 %
	d	216,9 V	10 %
5	a	135 V	7 %
	b	405 W	3 %
	c	180 V	10 %

Priimek in ime: