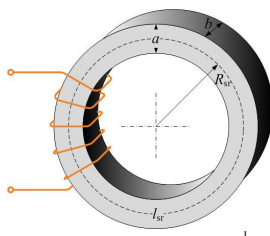
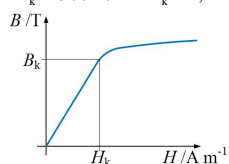


Magnetni krogi I

Izračunajte magnetilni tok dušilke. Dušilka je navita na toroidno jedro iz feromagnetnega materiala. Dušilka deluje v linearnem delu magnetilne krivulje. Predpostavimo, da je magnetni pretok po jedru enakomerno porazdeljen. Podatki so naslednji:

$$\begin{aligned} a &= 40 \text{ mm} & N &= 1200 \\ b &= 25 \text{ mm} & U &= 220 \text{ V} \\ R_{\text{sr}} &= 0,4 \text{ m} & f &= 50 \text{ Hz} \\ H_k &= 300 \text{ A/m} & B_k &= 1,4 \text{ T} \end{aligned}$$



1

Magnetni krogi I

1. Inducirati se mora protinapetost
2. Spreminjati se mora fluks
3. Zato mora fluks sploh biti
4. Povzročitelj fluksa je tok

$$U_i = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} B S_{\text{Fe}} N f$$

$$B = \frac{\sqrt{2} U_i}{2\pi S_{\text{Fe}} N f} = \frac{\sqrt{2} U_i}{2\pi a b N f}$$

$$B = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{2\pi \cdot 0,04 \cdot 0,025 \cdot 1200 \cdot 50} = 0,82529 \text{ T}$$

2

Magnetni krogi I

Delamo v linearnem delu magnetilne krivulje, zato velja:

$$B = \mu H$$

$$\mu = \frac{B_k}{H_k} = \frac{1,4}{300} = \frac{7}{1500} \approx 0,004666667$$

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{0,82529}{0,004666667} = 176,848 \text{ A/m}$$

Uporabimo Amperov zakon za izračun toka:

$$H l_{\text{sr}} = I_{\text{max}} N$$

$$I_{\text{max}} = \frac{H l_{\text{sr}}}{N} = \frac{H 2\pi R_{\text{sr}}}{N} = \frac{176,848 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,4}{1200} = 0,370389 \text{ A}$$

3

Magnetni krogi I

Izračunamo efektivno vrednost:

$$I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{0,370389}{\sqrt{2}} = 0,262 \text{ A}$$

Izračunamo induktivnost:

$$X_L = \frac{U}{I}$$

$$X_L = 2\pi f L$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{U}{2\pi f I} = \frac{220}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,261905} = 2,6738 \text{ H}$$

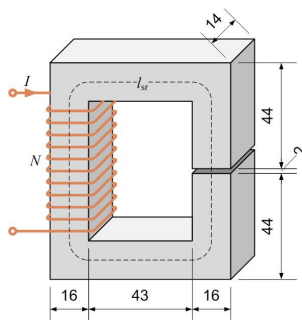
4

Magnetni krogi II

Izračunajte magnetno upornost (reluktanco) za narisani magnetni krog. V magnetnem krogu je zračna reža skozi katero mora teči magnetni pretok. Relativna permeabilnost jedra znaša:

$$\mu_r = 2000$$

Dimenzije so podane v mm.



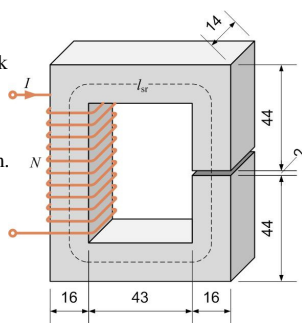
5

Magnetni krogi II

Magnetna upornost ni odvisna od magnetne napetosti, zato tok I in število obojev N nista potrebna. Izhajamo iz analogije z električnim ohmovim zakonom.

$$R = \frac{U}{I}$$

$$R_m = \frac{\frac{U_m}{I N}}{\Phi}$$



6

Magnetni krogi II

Izračunamo magnetni pretok. Izhajamo iz magnetno poljske jakosti:

$$H_j l_j + H_\delta \delta = I N$$

Ker vzdolž cele poti teče enak magnetni pretok, in je tudi presek kanala enak, mora biti povsod enaka gostota magnetnega pretoka:

$$B_j = B_\delta$$

$$\mu_r \mu_0 H_j = \mu_0 H_\delta \Rightarrow H_\delta = \frac{\mu_r \mu_0 H_j}{\mu_0} = \mu_r H_j$$

$$H_j l_j + \mu_r H_j \delta = I N$$

$$H_j = \frac{I N}{l_j + \mu_r \delta}$$

7

Magnetni krogi II

Gostota magnetnega pretoka v jedru znaša:

$$B = \mu_0 \mu_r H_j = \mu_0 \mu_r \frac{I N}{l_j + \mu_r \delta}$$

Magnetni pretok:

$$\Phi = B S = \mu_0 \mu_r \frac{I N}{l_j + \mu_r \delta} S$$

Magnetna upornost:

$$R_m = \frac{I N}{\Phi} = \frac{I N}{\mu_0 \mu_r \frac{I N}{l_j + \mu_r \delta} S}$$

8

Magnetni krogi II

Enačbo uredimo:

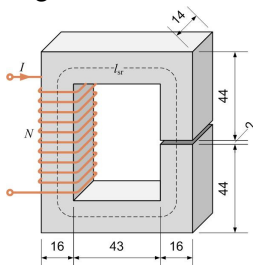
$$R_m = \frac{l_j + \mu_r \delta}{\mu_0 \mu_r S}$$

Magnetni upornost razdelimo na dva dela:

$$R_m = \frac{l_j + \mu_r \delta}{\mu_0 \mu_r S} = \frac{l_j}{\mu_0 \mu_r S} + \frac{\mu_r \delta}{\mu_0 \mu_r S}$$

$$R_m = \underbrace{\frac{l_j}{\mu_0 \mu_r S}}_{\text{Upornost jedra}} + \underbrace{\frac{\delta}{\mu_0 S}}_{\text{Upornost zračne reže}}$$

$$l_j = \frac{2 \cdot 43 + 2 \cdot 58 - 2 + 2 \pi 8}{1000} = 0,25027 \text{ m}$$



9

Magnetni krogi II

$$S = 16 \cdot 14 \cdot 10^{-6} = 224 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$R_m = \underbrace{\frac{0,25027}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2000 \cdot 224 \cdot 10^{-6}}}_{\text{Upornost jedra}} + \underbrace{\frac{0,002}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 224 \cdot 10^{-6}}}_{\text{Upornost zračne reže}}$$

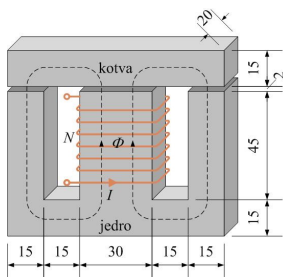
$$R_m = \underbrace{444550}_{\text{Upornost jedra}} + \underbrace{7105131}_{\text{Upornost zračne reže}}$$

$$R_m = 7549681 \frac{\text{A}}{\text{Vs}}$$

10

Sila v magnetnem polju

Izračunajte pritezno silo, s katero jedro privlači kotvo. Širina srednjega stebra označite z a . Stranska stebra imata polovično širino srednjega stebra. Debelina paketa d znaša 20 mm. Debelina zračne reže δ znaša 2 mm. Navitje ima $N=1000$ obojev. Skozi navitje teče tok $I=3$ A. Predpostavljamo, da je permeabilnost jedra in kotve neskončna.



11

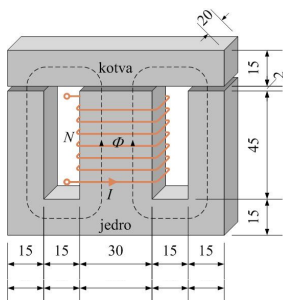
Sila v magnetnem polju

Sila na enoto površine znaša:

$$f_m = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

Potrebno je izračunati gostoto magnetnega pretoka v reži. Uporabimo Amperov zakon:

$$H_j l_j + H_\delta \delta + H_k l_k + H_\delta \delta = I N$$



12

Sila v magnetnem polju

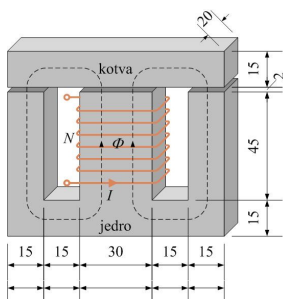
Ker je permeabilnost jedra in kotve neskončna, je magnetno poljska jakost enaka 0. Zato velja:

$$H_{\delta}\delta + H_{\delta}\delta = I N$$

$$2 H_{\delta}\delta = I N$$

$$H_{\delta} = \frac{I N}{2\delta}$$

$$B = \mu_0 \frac{I N}{2\delta}$$



13

Sila v magnetnem polju

Ob upoštevanju geometrijskih razmer znaša sila na enoto površine:

$$f_m = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\left(\mu_0 \frac{I N}{2\delta}\right)^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0^2 (I N)^2}{4\delta^2 \cdot 2\mu_0} = \frac{\mu_0 (I N)^2}{8\delta^2}$$

Celotna sila:

$$F_m = f_m S = \frac{\mu_0 (I N)^2}{8\delta^2} S$$

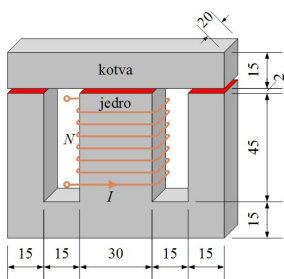
14

Sila v magnetnem polju

Površina S:

$$S = (2 \cdot 15 + 30) \cdot 20 \cdot 10^{-6}$$

$$S = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$



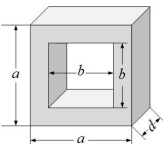
$$F_m = \frac{4\pi 10^{-7} (3 \cdot 1000)^2}{8 (2 \cdot 10^{-3})^2} 1,2 \cdot 10^{-3} = \frac{4\pi (3)^2}{8 (2)^2} 1,2 \cdot 10^2 = 424,1 \text{ N}$$

15

Izračun transformatorja

Transformatorsko jedro ima naslednje dimenzije: $a=300$ mm, $b=200$ mm, $d=50$ mm in faktor polnjenja $f_{Fe}=0,85$.

- a) Izračunajte število primarnih obojev N_1 , da bo pri pritisnjeni napetosti $U_1=230$ V, $f=50$ Hz, maksimalna gostota magnetnega pretoka v jedru znašala $B=1,4$ T!
- b) Izračunajte število obojev sekundarnega navitja tako, da bo v prostem teku sekundarna inducirana napetost $U_2=24$ V!
- c) Kolikšna je nazivna moč transformatorja, če je faktor polnjenja transformatorskega okna $f_{Cu}=0,3$ in je navitje obremenjeno z gostoto toka $\Gamma=2$ A/mm²?
- d) Kolikšen dodatni tok je potreben za magnetenje zračne reže $d=0,5$ mm?



16

Izračun transformatorja a

- a) Izračunajte število primarnih obojev N_1 , da bo pri pritisnjeni napetosti $U_1=230$ V, $f=50$ Hz, maksimalna gostota magnetnega pretoka v jedru znašala $B=1,4$ T! Velja transformatorska enačba:

$$U_{1i} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} B S_{Fe} N_1 f$$

$$N_1 = \frac{\sqrt{2} U_{1i}}{2\pi B S_{Fe} f}$$

$$S = \frac{a-b}{2} d$$

$$S_{Fe} = S \cdot f_{Fe} = \frac{a-b}{2} d \cdot f_{Fe}$$

$$N_1 = \frac{\sqrt{2} U_{1i}}{2\pi B \frac{a-b}{2} d \cdot f_{Fe} f} = \frac{\sqrt{2} U_{1i}}{\pi B (a-b) d \cdot f_{Fe} f}$$

17

Izračun transformatorja a

Vstavimo podatke:

$$N_1 = \frac{\sqrt{2} U_{1i}}{\pi B (a-b) d \cdot f_{Fe} f} = \frac{\sqrt{2} \cdot 230}{\pi \cdot 1,4 \cdot (0,3 - 0,2) \cdot 0,05 \cdot 0,85 \cdot 50}$$

$$N_1 = 348$$

18

Izračun transformatorja b

- b) Izračunajte število obojev sekundarnega navitja tako, da bo v prostem teku sekundarna inducirana napetost $U_2=24\text{ V}$!

Število sekundarnih obojev izračunamo s prestavo transformatorja:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1}$$

$$N_2 = N_1 \frac{U_2}{U_1} = 348 \frac{24}{230} = 36$$

19

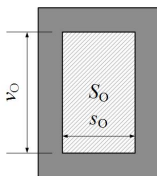
Izračun transformatorja c

- c) Kolikšna je nazivna moč transformatorja, če je faktor polnjenja transformatorskega okna $f_{Cu}=0,3$ in je navitje obremenjeno z gostoto toka $\Gamma=2\text{ A/mm}^2$?

Pri izračunu nazivne moči izhajamo iz količine uporabljenega prostora v oknu:

Površina okna znaša:

$$S_O = v_O s_O = b^2$$



20

Izračun transformatorja c

Faktor $f_{Cu}=0,3$ je razmerje, med površino vsega bakra S_{Cu} v oknu in površino okna S_O :

$$f_{Cu} = \frac{S_{Cu}}{S_O} \Rightarrow S_{Cu} = f_{Cu} S_O = f_{Cu} b^2$$

Primarno navitje zaseda približno polovico vsega prostora v oknu:

$$S_{Cu1} = \frac{S_{Cu}}{2} = \frac{f_{Cu} b^2}{2}$$

Presek primarnega vodnika znaša:

$$S_{Cu1} = \frac{S_{Cu}}{2} = \frac{f_{Cu} b^2}{2} \Rightarrow \frac{S_{Cu1}}{N_1} = \frac{f_{Cu} b^2}{2 N_1}$$

21

Izračun transformatorja c

Tok v primarnem navitju:

$$I_{1n} = S_{Cu1} \Gamma = \frac{f_{Cu} b^2}{2 N_1} \Gamma = \frac{0,3 \cdot 0,2^2}{2 \cdot 348} 2 \cdot 10^6 = 34,48 \text{ A}$$

$$S_n = U_{1n} I_{1n} = 230 \cdot 34,48 = 7931 \text{ VA}$$

22

Izračun transformatorja d

- d) Kolikšen dodatni tok je potreben za magnetenje zračne reže $d=0,5 \text{ mm}$?

Dodatni tok ΔI_μ , ki je potreben izračunamo z Amperovim zakonom. Paziti moramo na dejstvo, da iščemo efektivno vrednost toka, gostota magnetnega pretoka pa je temenska.

$$\Delta I_\mu N_1 \sqrt{2} = \delta H = \delta \frac{B}{\mu_0}$$

$$\Delta I_\mu = \frac{\delta B}{\mu_0 N_1 \sqrt{2}} = \frac{0,0005 \cdot 1,4}{4 \pi 10^{-7} 348 \sqrt{2}} = 1,132 \text{ A}$$

23

Izgube v transformatorju I

Enofazni transformator ima naslednje podatke: nazivna moč $S_n=50 \text{ kVA}$, prestava $p=6$, nazivna frekvenca $f=42 \text{ Hz}$, primarna nazivna napetost $U_1=2400 \text{ V}$, izgube v prostem teku pri nazivni napetosti $P_0=300 \text{ W}$, upornost toplega primarnega navitja $R_1=0,76 \Omega$ in upornost toplega sekundarnega navitja $R_2=0,006 \Omega$. Izračunajte celotne izgube v nazivnem obratovalnem stanju! Kolikšne so izgube pri nazivni primarni napetosti in frekvenci $f'=50 \text{ Hz}$? Ali lahko transformator obratuje pri novi frekvenci?

24

Izgube v transformatorju I

Izgube prostega teka so enake izgubam v železu:

$$P_{\text{Fe}} = P_0$$

Izgube v bakru izračunamo z enačbo, ki sicer ni priporočljiva, vendar nimamo na voljo drugih podatkov:

$$P_{\text{Cu}} = I_{1n}^2 R_1 + I_{2n}^2 R_2$$

Ker velja prestava:

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_{2n}}{I_{1n}} \Rightarrow I_{2n} = p I_{1n}$$

$$P_{\text{Cu}} = I_{1n}^2 R_1 + (p I_{1n})^2 R_2$$

25

Izgube v transformatorju I

Primarni tok izračunamo iz napetosti:

$$S_n = U_{1n} I_{1n} \Rightarrow I_{1n} = \frac{S_n}{U_{1n}}$$

$$P_{\text{Cu}} = \left(\frac{S_n}{U_{1n}} \right)^2 R_1 + \left(p \frac{S_n}{U_{1n}} \right)^2 R_2$$

$$P_{\text{Cu}} = \left(\frac{S_n}{U_{1n}} \right)^2 (R_1 + p^2 R_2) = \left(\frac{50000}{2400} \right)^2 (0,76 + 6^2 \cdot 0,006) = 423,6 \text{ W}$$

$$P_{\text{izg.}} = P_{\text{Cu}} + P_{\text{Fe}} = 423,6 + 300 = 723,6 \text{ W}$$

26

Izgube v transformatorju I

V novih razmerah pričakujemo, da bodo izgube v bakru enake, ker bo transformator obratoval pri enaki moči, torej tudi pri enakem toku.

$$P'_{\text{Cu}} = P_{\text{Cu}} = 423,6 \text{ W}$$

Izgube v železu pa bodo vsekakor drugačne. Nazivne izgube v železu znašajo:

$$P_{\text{Fe}} = k_{\text{Fe}} \frac{f}{50} B^2 m_{\text{Fe}}$$

$$P'_{\text{Fe}} = k_{\text{Fe}} \frac{f'}{50} B'^2 m_{\text{Fe}}$$

Enačbi delimo med sabo in dobimo:

27

Izgube v transformatorju I

$$\frac{P'_{Fe}}{P_{Fe}} = \frac{f' B'^2}{f B^2}$$

$$P'_{Fe} = P_{Fe} \frac{f' B'^2}{f B^2}$$

Za izračun odvisnosti frekvence in gostote magnetnega pretoka uporabimo transformatorsko enačbo:

$$U_1 = U'_1$$

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

$$B f = B' f'$$

28

Izgube v transformatorju I

Iz dobljenega izraza izračunamo B' :

$$B' = \frac{B f}{f'}$$

Izraz vstavimo v enačbo za izračun izgub:

$$P'_{Fe} = P_{Fe} \frac{f' \left(\frac{B f}{f'} \right)^2}{f B^2} = P_{Fe} \frac{f' B^2 f^2}{f B^2 f'^2} = P_{Fe} \frac{f}{f'} = 300 \frac{42}{50} = 252 \text{ W}$$

Celotne izgube znašajo:

$$P'_{izg.} = P'_{Cu} + P'_{Fe} = 423,6 + 252 = 675,6 \text{ W}$$

Odgovor: Transformator lahko obratuje v novem režimu, saj so celotne izgube manjše od nazivnih izgub.

29

Izgube v transformatorju II

Transformator se pri nazivni obremenitvi segreje na nadtemperaturo $\vartheta=60 \text{ K}$. V prostem teku smo transformatorju izmerili $P_0=200 \text{ W}$ izgub. V kratkem stiku pa $P_k=600 \text{ W}$ izgub. Do kakšne nadtemperature se bo segrel transformator, če bo obremenjen s polovično močjo?

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

$$\vartheta' = k(P'_{Cu} + P_{Fe})$$

Spodnjo enačbo delimo z zgornjo, da se znebimo konstante k .

$$\frac{\vartheta'}{\vartheta} = \frac{k(P'_{Cu} + P_{Fe})}{k(P_{Cu} + P_{Fe})} = \frac{P'_{Cu} + P_{Fe}}{P_{Cu} + P_{Fe}}$$

$$\vartheta' = \vartheta \frac{P'_{Cu} + P_{Fe}}{P_{Cu} + P_{Fe}}$$

30

Izgube v transformatorju II

Izračunamo odvisnost izgub od obremenitve:

$$P'_{Cu} = P_{Cu} b^2 = P_{Cu} \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 = P_{Cu} \left(\frac{S_n}{2S_n} \right)^2 = \frac{P_{Cu}}{4}$$

Vstavimo v enačbo za izračun nadtemperature:

$$\vartheta' = \vartheta \frac{\frac{P_{Cu}}{4} + P_{Fe}}{P_{Cu} + P_{Fe}}$$

Upoštevamo, da so izgube prostega teka enake izgubam v železu, in da so kratkostične izgube enake izgubam v bakru:

$$\vartheta' = 60 - \frac{4}{60 + 200} = 26,25 \text{ K}$$

31

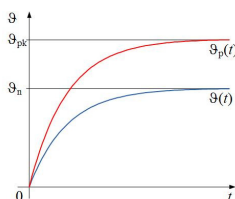
Segrevanje transformatorja

Transformator ima časovno konstanto segrevanja $T=3000$ s. Vsak dan obratuje $t_o=2000$ s časa. Za koliko odstotkov ga lahko preobremenimo v tem času, če znaša razmerje izgub $P_{Cu}/P_{Fe}=\xi=3$?

Za rešitev problema uporabimo funkcijo časovnega poteka segrevanja homogenega telesa:

$$\vartheta(t) = \vartheta_n \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

Preobremenjeni transformator se segreva po enakem časovnem zakonu, vendar do višje končne nadtemperature ϑ_{pk} . Indeks p je za "preobremenjeni".



32

Segrevanje transformatorja

$$\vartheta_p(t) = \vartheta_{pk} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

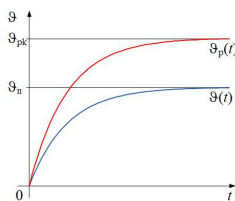
Ko transformator doseže končno temperaturo, doseže s tem stacionarno stanje. Za stacionarno stanje velja:

$$\frac{\vartheta_{pk}}{\vartheta_n} = \frac{P_{Cup} + P_{Fe}}{P_{Cu} + P_{Fe}}$$

$$P_{Cup} = P_{Cu} b^2$$

Kjer je b faktor obremenitve:

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



33

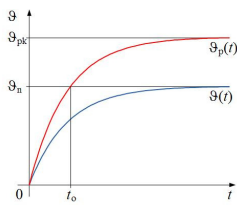
Segrevanje transformatorja

Dobimo:

$$\frac{\vartheta_{pk}}{\vartheta_n} = \frac{P_{Cu}b^2 + P_{Fe}}{P_{Cu} + P_{Fe}}$$

Za rešitev problema moramo najti obremenitev, zaradi katere bi se transformator v času obratovanja t_o , segrel do nazivne temperature ϑ_n .

$$\vartheta_p(t_o) = \vartheta_n = \vartheta_{pk} \left(1 - e^{-\frac{t_o}{T}} \right)$$



34

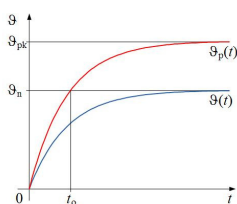
Segrevanje transformatorja

Dobljeno enačbo vstavimo v enačbo za izračun temperature stacionarnega stanja:

$$\frac{\vartheta_{pk}}{\vartheta_n} \left(1 - e^{-\frac{t_o}{T}} \right) = \frac{P_{Cu}b^2 + P_{Fe}}{P_{Cu} + P_{Fe}}$$

Izračunati moramo b . Vidimo, da se nadtemperatura pokrajša.

$$\frac{1}{\left(1 - e^{-\frac{t_o}{T}} \right)} = \frac{P_{Cu}b^2 + P_{Fe}}{P_{Cu} + P_{Fe}}$$



35

Segrevanje transformatorja

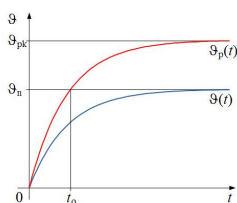
Zamenjamo levo in desno stran:

$$\frac{P_{Cu}b^2 + P_{Fe}}{P_{Cu} + P_{Fe}} = \frac{1}{\left(1 - e^{-\frac{t_o}{T}} \right)} \cdot (P_{Cu} + P_{Fe})$$

$$P_{Cu}b^2 + P_{Fe} = \frac{P_{Cu} + P_{Fe}}{\left(1 - e^{-\frac{t_o}{T}} \right)}$$

$$P_{Cu}b^2 = \frac{P_{Cu} + P_{Fe}}{\left(1 - e^{-\frac{t_o}{T}} \right)} - P_{Fe}$$

$$b^2 = \frac{P_{Cu} + P_{Fe}}{\left(1 - e^{-\frac{t_o}{T}} \right) P_{Cu}} - \frac{P_{Fe}}{P_{Cu}}$$



36

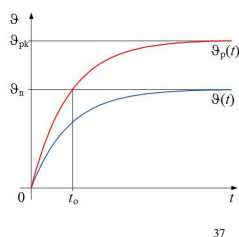
Segrevanje transformatorja

$$b = \sqrt{\frac{1 + \frac{P_{Fe}}{P_{Cu}}}{1 - e^{-\frac{t_0}{T}}}} - \frac{P_{Fe}}{P_{Cu}}$$

Upoštevajmo razmerje izgub (podatek):

$$\frac{P_{Cu}}{P_{Fe}} = 3 \quad \frac{P_{Fe}}{P_{Cu}} = \frac{1}{3}$$

$$b = \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{3}}{1 - e^{-\frac{2000}{3000}}}} - \frac{1}{3} = 1,551$$



37

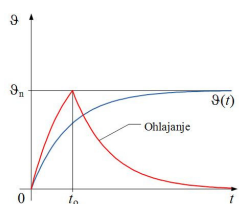
Segrevanje transformatorja

Faktor obremenitve znaša 1,551, kar pomeni, da transformator lahko preobremenimo za 55,1 %.

Po preteku časa t_0 transformator izključimo in se začne ohlajati. Za ohlajanje velja enačba:

$$\Theta(t) = \Theta_n e^{\frac{(t-t_0)}{T}}$$

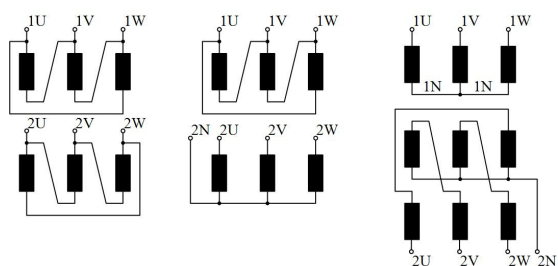
Za domačo vajo izračunajte čas po vklopu, ko se bo transformator ohladil na nadtemperaturo 1 K, če znaša nazivna nadtemperatura 80 K. (Odg: 4 h 12 min 26 s)



38

Trifazni transformator I

Določite vrsto vezave in fazno številko za trifazne transformatorje, ki so zvezani po naslednjih shemah!



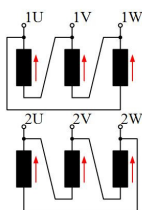
39

Trifazni transformator I

Najprej rešimo prvo vezavo. Vidimo, da sta obe navitji vezani v trikot, kar pomeni, da je oznaka vezalne skupine Dd. Ugotoviti moramo še fazno številko.

Za ugotovitev fazne številke je potrebno narisati kazalčni diagram primarnih in sekundarnih napetosti.

Pri risanju si pomagamo s pomožnimi puščicami, ki predstavljajo smer induciranih napetosti.



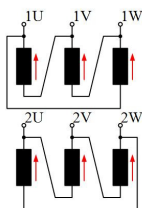
40

Trifazni transformator I

Če so vse tuljave navite v isto smer, narišemo tudi vse puščice v isto smer.

Pri risanju kazalčnega diagrama primarnih napetosti izhajamo dejstva, da so vse medfazne napetosti enake, kar pomeni, da so medsebojne razdalje točk v kazalčnem diagramu enake.

Točke zato tvorijo oglišča enakostraničnega trikotnika.

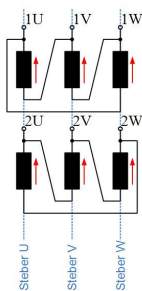


41

Trifazni transformator I

Napetosti med sponkami so določene, ne vemo pa še, kakšna je napetost v posameznih tuljavah.

Na tem mestu si pomagamo s pomožnimi puščicami. Vidimo da puščica pri tuljavi U kaže od sponke 1V k sponki 1U. To pomeni, da je na stebru U napetost, ki kaže od točke 1V, k točki 1U. Enako velja za ostala dva stebra.

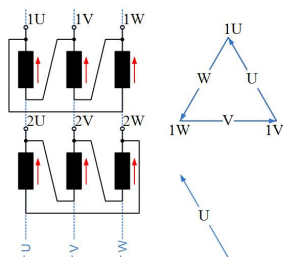


42

Trifazni transformator

Napetosti na posameznih stebrih so določene. Sedaj lahko narišemo kazalčni diagram sekundarnih napetosti.

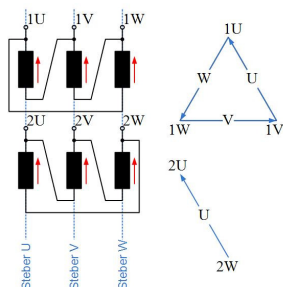
Vemo, da je v celem stebru U isti fluks, kar pomeni, da je tudi smer inducirane napetosti v vseh tuljavah istega stebra enaka. Napetost v sekundarni tuljavi stebra U ima kazalec U , zato ga translatorno premaknemo navzdol, ker je takšna napetost tudi v sekundarni tuljavi stebra U .



43

Trifazni transformator

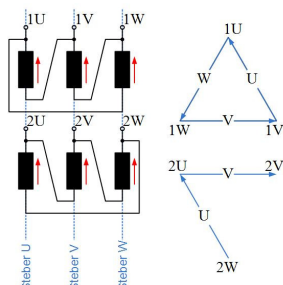
Spet si pomagamo s pomožno puščico sekundarne tuljave stebra U . Konica pomožne puščice kaže k sponki $2U$, rep pa k sponki $2W$. Zato ob konico kazalca U dodamo oznako sponke $2U$ in na rep oznako sponke $2W$.



44

Trifazni transformator I

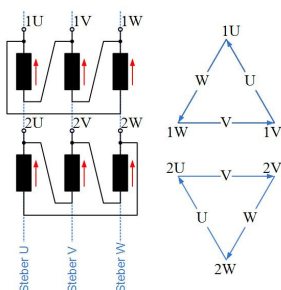
V sekundarni tuljavi stebra V je kazalec inducirane napetosti V . Zato ga translatorno premaknemo navzdol tako, da je rep kazalca v točki $2U$. To pa zato, ker je rep pomožne puščice te tuljave vezan v sponko $2U$. Na konici tega kazalca pa je točka $2V$.



45

Trifazni transformator I

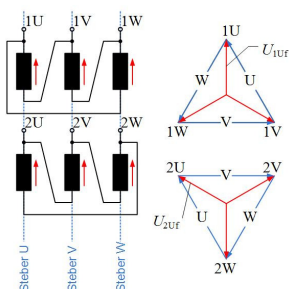
Točke sekundarnih sponk so s tem določene, vseeno pa dodamo še kazalec U. Glede na pomožno puščico ob tuljavi U, ga moramo dodati tako, da konica kaže v točko 2W, rep pa v točko 2V. Kazalca ne smemo obračati, premakniti ga moramo transaltorno. Če kazalec ne kaže v prave točke pomeni, da smo se nekje zmotili.



46

Trifazni transformator I

Fazna številka je določena s fazno napetostjo, zato moramo v trikotnikih skonstruirati fazne napetosti.



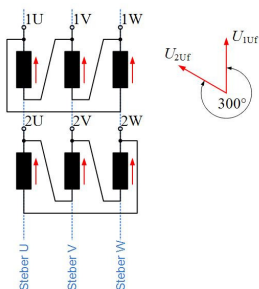
47

Trifazni transformator I

Poglejmo kot med napetostjo U_{1UF} in U_{2UF} :

Fazna številka je enaka kotu med kazalcema, ki ga delimo s 30° . V tem primeru znaša 10.

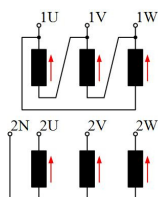
Transformator ima vezalno skupino Dd10.



48

Trifazni transformator I

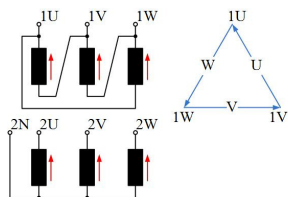
Narišemo pomožne puščice.



49

Trifazni transformator I

Narišemo kazalčni diagram primarnih napetosti.

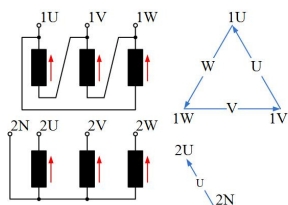


50

Trifazni transformator I

V sekundarni tuljavi stebra U je napetost, ki jo predstavlja kazalec U, zato ga transaltorno prenesemo navzdol.

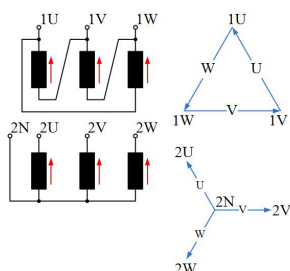
Na konici pomožne puščice je sponka 2U, na repu pa 2N. Ti dve oznaki dodamo tudi kazalcu.



51

Trifazni transformator I

Na enak način dodamo še ostala kazalca sekundarnih napetosti.

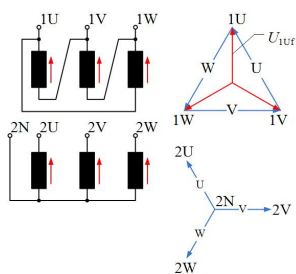


52

Trifazni transformator I

V kazalčnem diagramu primarnih napetosti skonstruiramo fazne napetosti.

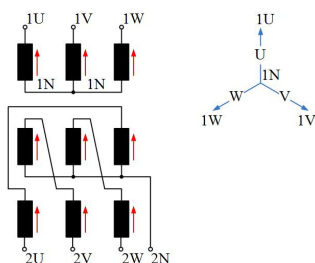
Kot med primarno fazno napetostjo U_{1UF} in sekundarno fazno napetostjo je 330° , kar pomeni, da je fazna številka 11. Odgovor se glasi: Dyn11.



53

Trifazni transformator I

Pri naslednji vezavi narišemo pomožne puščice in kazalčni diagram primarnih napetosti.

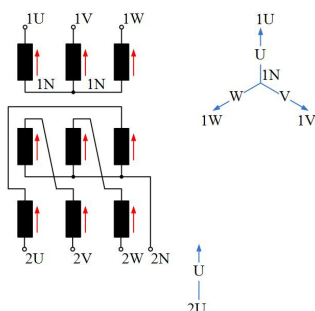


54

Trifazni transformator I

Narišemo še kazalčni diagram sekundarnih napetosti.

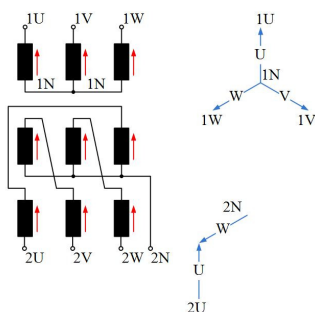
Na stebru U je tuljava s sponko 2U. V njej se inducira napetost, ki jo predstavlja kazalec U. Sponka 2U je na repu pomožne puščice.



55

Trifazni transformator I

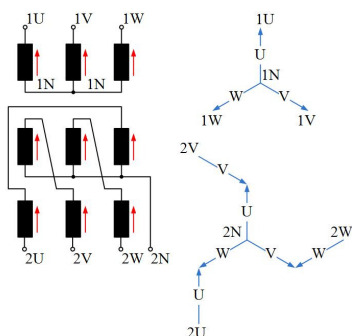
Od tod poteka povezava na zgornjo sekundarno tuljavo stebra W. Zato se prejšnji napetosti prišteje še napetost te tuljave (kazalec W). Konici obeh kazalcev sta staknjeni skupaj, ker sta z vezjo povezani tudi konici pomožnih puščic. Na repu slednjega kazalca je sekundarno ničlišče 2N.



56

Trifazni transformator I

Ostala dve napetosti začnemo risati s sekundarnega ničlišča.

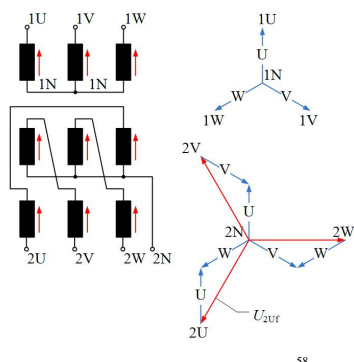


57

Trifazni transformator I

Narišemo še sekundarne fazne napetosti.

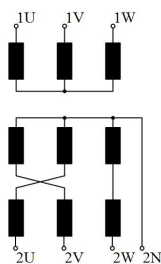
Kot med primarno fazno in sekundarno fazno napetostjo je 210° . Odgovor se zato glasi Yzn7.



58

Trifazni transformator II

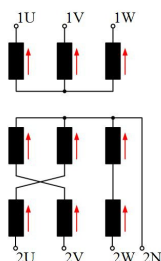
Trifazni transformator $S_n=100$ kVA, $U_{1n}=10$ kV, $U_{2n}=600$ V in vezave Yzn5, je na sekundarni strani spojen tako kot je prikazano na sliki. Na primarni strani je priključen na nazivno napetost. Kakšne so medfazne sekundarne napetosti?



59

Trifazni transformator II

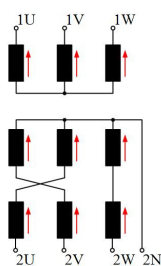
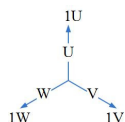
Narišemo kazalčni diagram napetosti. V ta namen narišemo pomožne puščice.



60

Trifazni transformator II

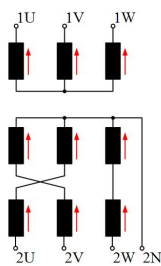
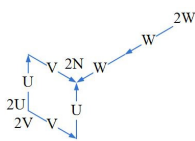
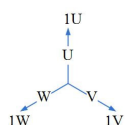
Najprej narišemo primarne napetosti:



61

Trifazni transformator II

Na enak način kot pri prejšnjih nalogah narišemo še kazalčni diagram sekundarnih napetosti:



62

Trifazni transformator II

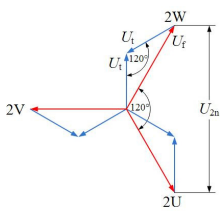
Sedaj je potrebno izračunati dolžino posameznega sekundarnega kazalca. Izhajamo iz dejstva, da bi bila pri pravilno zvezanem sekundarnem navitju sekundarna napetost $U_{2n}=600$ V. Pravilni kazalčni diagram je sledeči:

Vrišemo fazne napetosti in znane kote.

Izračunamo odnos med fazno napetostjo U_f in napetostjo ene tuljave U_t . Za izračun uporabimo kosinusni izrek:

$$U_f^2 = U_t^2 + U_t^2 - 2 U_t U_t \cos(120^\circ)$$

$$U_f^2 = 2 U_t^2 (1 - \cos(120^\circ))$$



63

Trifazni transformator II

$$U_f^2 = 2U_i^2 \left(1 - \left(-\frac{1}{2} \right) \right)$$

$$U_f^2 = 3U_i^2$$

$$U_i = \frac{U_f}{\sqrt{3}}$$

Ker velja:

$$U_i = \frac{U_{2n}}{\sqrt{3}}$$

Dobimo:

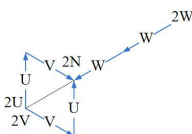
$$U_i = \frac{U_f}{\sqrt{3}} = \frac{U_{2n}}{\sqrt{3}\sqrt{3}} = \frac{U_{2n}}{3} = \frac{600}{3} = 200 \text{ V}$$

64

Trifazni transformator II

Sedaj moramo le še izračunati razdalje med točkami v kazalčnem diagramu.

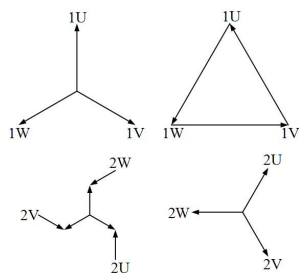
Vidimo, da točki 2U in 2V sovpadeta, razdalja med njima je 0, zato je tudi napetost U_{2U-2V} enaka 0 V. Ti dve točki sta enako oddaljeni od točke 2W, ker pa je so do točke 2W tri napetosti tuljave v ravni smeri, velja: $U_{2U-2W} = U_{2V-2W} = 600 \text{ V}$.



65

Trifazni transformator III

K transformatorju s podatki $S_{n1}=100 \text{ kVA}$, $u_{k1}=4 \%$, $U_{11}=10 \text{ kV}$, $U_{12}=400 \text{ V}$ in vezave Yz5, priključimo transformator $S_{n2}=200 \text{ kVA}$, $u_{k2}=8 \%$, $U_{21}=10 \text{ kV}$, $U_{22}=400 \text{ V}$ in vezave Dy1. Transformatorja sta obremenjena z močjo $S_b=300 \text{ kVA}$. Določite kako se porazdeli moč na oba transformatorja! Ali je tako obratovanje dopustno?



66

Trifazni transformator III

Transformatorje vzporedno vežemo zaradi naraščanja porabe električne energije. Ko bi bil obstoječi transformator preobremenjen, dodamo vzporedni transformator, ki prevzame del bremena. Obstajata dve vrsti paralelnega obratovanja:

1. Toga povezava preko zbiralk, ko transformatorja stojita drug ob drugem.
2. Ohlapna povezava, ko sta transformatorja vzporedno vezana preko energetskega omrežja.

Potrebno je, da imata transformatorja na sponkah vsak trenutek enake napetosti, tako po fazi, kakor tudi po velikosti. Morebitne razlike napetosti bi pognale izenačevalne toke ali pa transformatorja obremenitve ne bi prevzemala enakomerno.

67

Trifazni transformator III

Napetosti so enake, če transformatorja izpolnjujeta naslednje zahteve:

1. Transformatorja morata imeti enake nazivne napetosti, kar pomeni, da imata enaki prestavi.
2. Imeti morata enaki fazni številki, kar zagotavlja, da so koti med napetostmi iste faze enaki.

Če ne bi bili izpolnjeni ti dve zahtevi, bi se že v prostem teku pojavili veliki izenačevalni tokovi. Izpolnjevanje naslednjih zahtev pa zagotavlja enakomerno prevzemanje obremenitve:

3. Kratkostični napetosti obeh transformatorjev morata biti enaki.
4. Transformatorja morata imeti enaka kota kratkega stika ϕ_k .

68

Trifazni transformator III

Iz ekonomskih razlogov je postavljena še zahteva:

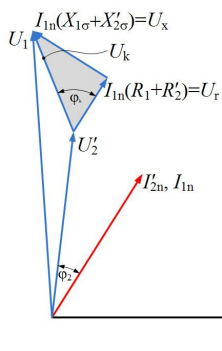
5. Razmerje nazivnih moči transformatorjev sme biti največ 3:1.

Popolno izpolnjevanje zahtev ni mogoče. Predpisi določajo dopustne tolerance. Kratkostični napetosti se smeta razlikovati največ za 10 %. Če ima prvi transformator kratkostično napetost 14 %, mora imeti vzporedni transformator kratkostično napetost v območju od 12,6 % do 15,4 %. Dopustno odstopanje prestave lahko znaša največ 5 % kratkostične napetosti. Če ima prvi transformator kratkostično napetost 14 %, sme znašati odstopanje prestave $\pm 0,7$ %.

69

Trifazni transformator III

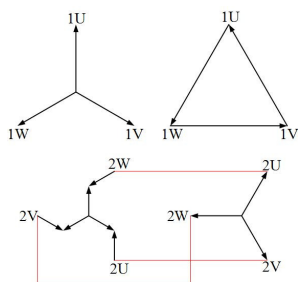
Kratkostični kot iz 4. zahteve, je kot med celotnim padcem napetosti (kratkostično napetostjo) in ohmskim padcem napetosti



70

Trifazni transformator III

Transformatorja iz naše naloge izpolnjujeta 1. in 5. zahtevo. O 4. zahtevi nimamo podatkov, medtem, ko 3. zahteve ne izpolnjujeta. Očitno ne izpolnjujeta 2. zahteve o enakosti faznih števil, vendar se izkaže, da v tem primeru, to ne predstavlja ovire. Kadar se fazni številki razlikujeta za mnogokratnik števila 4 (120°), lahko transformatorja vseeno povežemo:



71

Trifazni transformator III

Namen naloge je ugotoviti, kaj se zgodi, če ni izpolnjena zahteva o enakosti kratkostičnih napetosti. Za izračun porazdelitve obremenitve na transformatorja, izhajamo iz dejstva, da mora biti seštevek moči obeh transformatorjev enak moči bremena:

$$S_1 + S_2 = S_b$$

Enačba ima dve neznanki, zato potrebujemo za enolično rešitev še eno enačbo.

Postaviti moramo še eno veljavno trditev, ki jo bomo lahko matematično zapisali.

72

Trifazni transformator III

Ta trditev pa je, da sta v obeh transformatorjih zagotovo enaka padca napetosti, saj imata transformatorja isto primarno in isto sekundarno napetost:

$$\Delta U_1 = \Delta U_2$$

Za vsakega od padcev napetosti velja, da je sorazmeren kratkostični napetosti in faktorja obremenitve:

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

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

Dobimo:

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

73

Trifazni transformator III

Dobili smo še drugo enačbo. Potrebno je le še rešiti sistem enačb:

$$S_1 + S_2 = S_b$$

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

$$S_1 = S_b - S_2$$

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

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

$$S_2 \left(\frac{u_{k2}}{S_{n2}} + \frac{u_{k1}}{S_{n1}} \right) = u_{k1} \frac{S_b}{S_{n1}}$$

74

Trifazni transformator III

Rezultat znaša:

$$S_2 = \frac{u_{k1} \frac{S_b}{S_{n1}}}{\frac{u_{k2}}{S_{n2}} + \frac{u_{k1}}{S_{n1}}} = \frac{4 \frac{300000}{100000}}{\frac{8}{200000} + \frac{4}{100000}} 150000 \text{ VA} = 150 \text{ kVA}$$

$$S_1 = S_b - S_2 = 300000 - 150000 = 150 \text{ kVA}$$

Odgovor: Transformatorja ne smeta obratovati v takem režimu, ker je prvi transformator preobremenjen. Večji delež obremenitve vedno prevzame transformator z manjšo kratkostično napetostjo (manjšo notranjo impedanco).

75

Primer izpitne naloge I

Primarno navitje velikega transformatorja se hladi ločeno od ostalih navitij, ker ima hladilni kanal. Trenutno je navitje navito z žico debeline $d=2$ mm. Pri nazivni obremenitvi se navitje segreje na nadtemperaturo $\vartheta=60$ K. S kakšno žico bi lahko navili navitje, če se navitje lahko segreje na nazivno nadtemperaturo $\vartheta_n=70$ K. Predpostavite, da se hladilni pogoji ob spremembi debeline žice ne spremenijo.

Nadtemperatura navitja je sorazmerna z izgubami. Tako lahko zapišemo:

$$\frac{\vartheta_n}{\vartheta} = \frac{P_{izg.n}}{P_{izg.}}$$

76

Primer izpitne naloge I

V navitju so le izgube v bakru:

$$\frac{\vartheta_n}{\vartheta} = \frac{P_{izg.n}}{P_{izg.}} = \frac{P_{Cun}}{P_{Cu}} = \frac{I_n^2 R_n}{I_n^2 R} = \frac{R_n}{R}$$

$$\frac{\vartheta_n}{\vartheta} = \frac{R_n}{R} = \frac{\frac{\rho l}{S_n}}{\frac{\rho l}{S}} = \frac{S}{S_n}$$

$$S_n = \frac{\pi d_n^2}{4}; \quad S = \frac{\pi d^2}{4}$$

77

Primer izpitne naloge I

Združimo enačbe:

$$\frac{\vartheta_n}{\vartheta} = \frac{S}{S_n} = \frac{\frac{\pi d^2}{4}}{\frac{\pi d_n^2}{4}} = \frac{d^2}{d_n^2}$$

Izračunamo d_n :

$$\frac{d_n^2}{d^2} = \frac{\vartheta}{\vartheta_n}$$

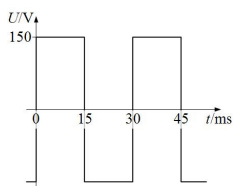
$$\frac{d_n}{d} = \sqrt{\frac{\vartheta}{\vartheta_n}}$$

$$d_n = d \sqrt{\frac{\vartheta}{\vartheta_n}} = 2 \sqrt{\frac{60}{70}} = 1,852 \text{ mm}$$

78

Primer izpitne naloge II

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 $B=1,25 \text{ T}$!

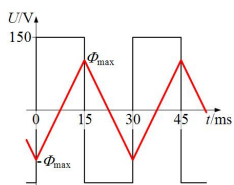


79

Primer izpitne naloge II

Za izračun ne moremo uporabiti transformatorske enačbe, ker napetost ni sinusna. Skladno s Faradayevim zakonom velja za časovni potek magnetnega pretoka naslednja enačba:

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



Napetost je v času polperiode konstantna, integral konstante je linearna funkcija, zato magnetni pretok v času prve polperiode linearno narašča. Ker je bil transformator pred trenutkom $t=0$ priključen na napetost, začnemo z magnetnim pretokom v točki $(0, -\Phi_{\max})$ in končamo v točki $(15 \text{ ms}, \Phi_{\max})$. V negativni polperiodi magnetni pretok upada.

80

Primer izpitne naloge II

Potrebno je izračunati enačbo:

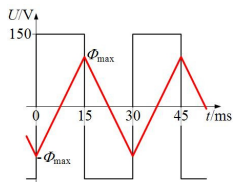
$$\Phi_{\max} = \frac{1}{N_1} \int_0^{\frac{T}{2}} U(t) dt$$

Ali pa enačbo:

$$2 \Phi_{\max} = \frac{1}{N_1} \int_0^{\frac{T}{2}} U(t) dt$$

Rešimo slednjo enačbo:

$$2 \Phi_{\max} = \frac{1}{N_1} \int_0^{\frac{T}{2}} U(t) dt = \frac{1}{N_1} \int_0^{0,015} 150 dt = \frac{1}{N_1} 150 t \Big|_0^{0,015} = \frac{150 \cdot 0,015}{N_1}$$



Primer izpitne naloge II

Enačba se glasi:

$$2 \Phi_{\max} = \frac{2,25}{N_1}$$

Iz enačbe izrazimo N_1 :

$$N_1 = \frac{2,25}{2 \Phi_{\max}} = \frac{1,125}{\Phi_{\max}}$$

Upoštevamo, je $\Phi_{\max} = B S$ in dobimo:

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

82

Sinhronski stroj - navitja

Izračunajte faktor navitja in narišite vezalno shemo enoplastnega navitja za dvopolni ($2p=2$), trifazni ($m=3$) sinhronski stroj, ki ima na statorju $N=12$ utorov. Širina tuljavice znaša $s=\tau_p$. Navitje je vezano v zvezdo. Vsaka tuljavica ima 4 ovoje ($z=4$). Izračunajte medfazno napetost, če znaša maksimalna gostota magnetnega pretoka na obodu izvrtine $B=0,9$ T, premer rotorja znaša $D=0,6$ m, dolžina statorja znaša $l=0,8$ m. Stroj ima nazivno frekvenco $f=50$ Hz.

83

Sinhronski stroj - navitja

Shematski prikaz stroja:

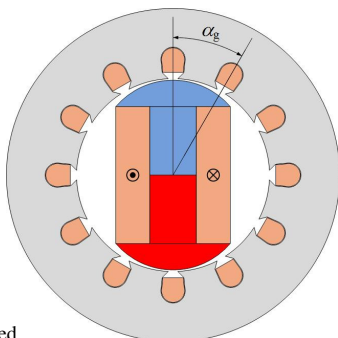
Izračun faktorja navitja izvedemo čisto rutinsko:

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

Fizikalni pomen geometričnega kota α_g je prikazan na sliki.

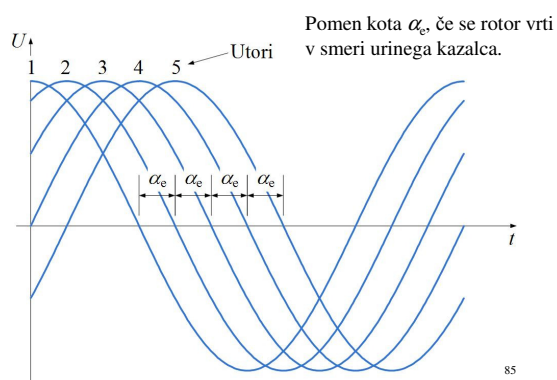
$$\alpha_e = p \alpha_g = 1 \cdot 30^\circ = 30^\circ$$

Električni kot α_e je kot med napetostma dveh sosednjih tuljavic.



84

Sinhronski stroj - navitja



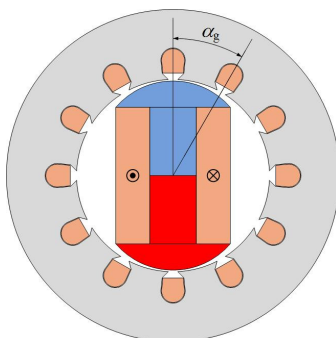
Sinhronski stroj - navitja

Število utorov pod enim polom:

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

Število utorov, ki po enim polom pripadajo eni fazi (število utorov v pasu):

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



Sinhronski stroj - navitja

Pasovni faktor:

$$f_p = \frac{\sin\left(q \frac{\alpha_e}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{\alpha_e}{2}\right)} = \frac{\sin\left(2 \frac{30^\circ}{2}\right)}{2 \sin\left(\frac{30^\circ}{2}\right)} = 0,965926$$

Faktor skrajšanja: širina tuljavnice je enaka τ_p , kar pomeni, da navitje ni skrajšano. Takšne tuljavnice imenujemo premerske tuljavnice:

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

Faktor navitja:

$$f_n = f_p f_s = 0,965926$$

87

Sinhronski stroj - navitja

Na podlagi znanega kota med induciranimi napetostma v sosednjih utorih lahko narišemo kazalčni diagram napetosti v utorih. Ta kazalčni diagram imenujemo utorovna zvezda. S tem diagramom si pomagamo pri razporejanju tuljavic po utorih.

Ker je kot med dvema kazalcema 30° , je vseh kazalcev:

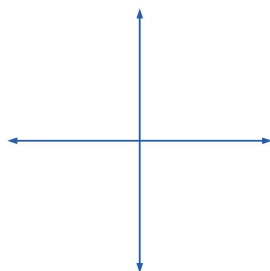
$$\frac{360^\circ}{30^\circ} = 12$$

Za risanje kazalcev uporabimo posebno tehniko, ker ne moremo narisati npr. 24 kazalcev enega za drugim, da bi se nam pri risanju izšlo.

88

Sinhronski stroj - navitja

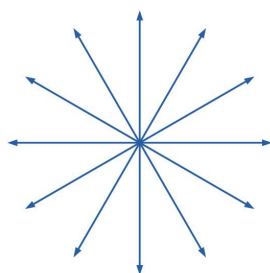
Zato narišemo najprej križ, s čemer narišemo štiri kazalce od dvanajstih.



89

Sinhronski stroj - navitja

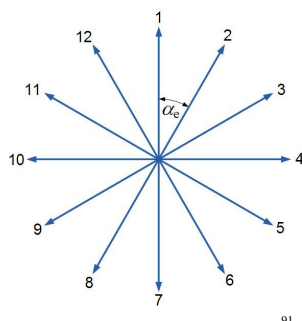
Med dva narisana kazalca moramo vrisati še dva kazalca:



90

Sinhronski stroj - navitja

Kazalce oštevilčimo:



91

Sinhronski stroj - navitja

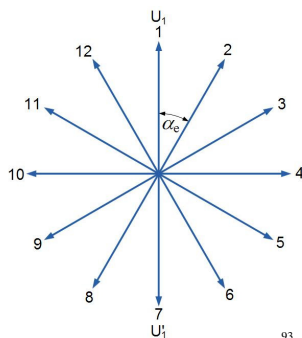
Tuljavnice razporedimo po utorih z upoštevanjem naslednjih pravil:

1. Inducirane napetosti v navitjih posameznih faz morajo biti enake. To najlažje dosežemo, če so tuljavnice navitij vseh faz enako razporejene.
2. Napetosti morajo biti premaknjene za 120° . Če so tuljavnice 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.

92

Sinhronski stroj - navitja

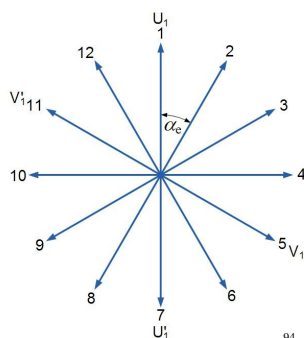
V utor 1 in v utor 7 namestimo prvo tuljavico navitja faze U:



93

Sinhronski stroj - navitja

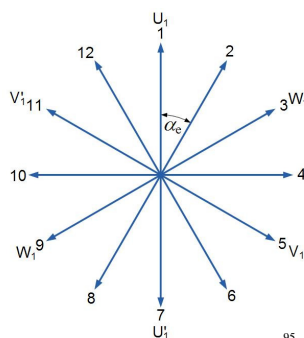
120° za prvo tuljavico navitja faze U vstavimo prvo tuljavico faze V, kar pomeni, da jo vstavimo v utor 5 in 11:



94

Sinhronski stroj - navitja

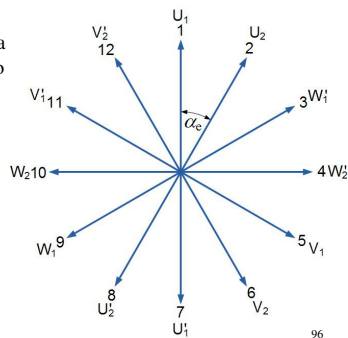
120° za prvo tuljavico navitja faze V vstavimo prvo tuljavico faze W, kar pomeni, da jo vstavimo v utor 9 in 3:



95

Sinhronski stroj - navitja

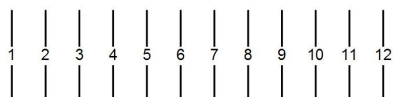
Polovico utorov je še prostih, zato dodamo za navitje vsake faze še po eno tuljavico.



96

Sinhronski stroj - navitja

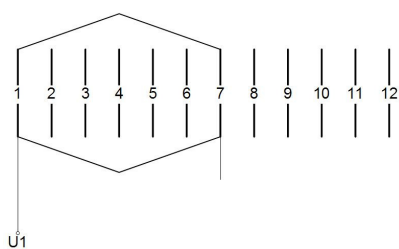
Navitja običajno upodabljamo tudi z razvito shemo. To je tako, kot da bi stator prerezali med utoroma 1 in 12, in ga razgrnili. Najprej narišimo razgrnjene uture:



97

Sinhronski stroj - navitja

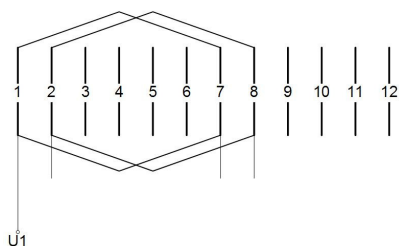
Vrišimo prvo tuljavico navitja faze U, ki poteka skozi utora 1 in 7. V utoru 1 se tudi začneja navitje faze U. Priključno sponko označimo z U1.



98

Sinhronski stroj - navitja

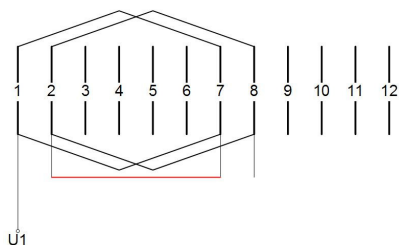
Dodajmo še drugo tuljavico navitja faze U:



99

Sinhronski stroj - navitja

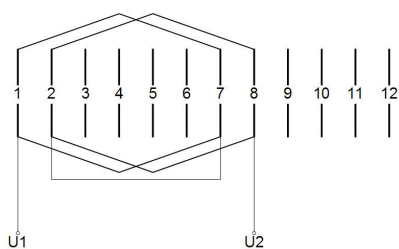
Oba konca druge tuljavnice sta še prosta. Obe tuljavici vežemo zaporedno, tako, da konec prve tuljavnice povežemo z začetkom druge tuljavnice:



100

Sinhronski stroj - navitja

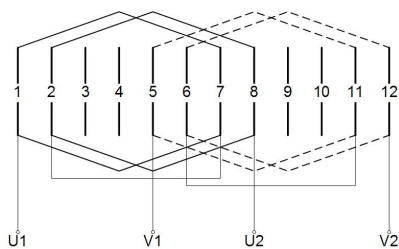
Konec druge tuljavnice je konec navitja faze U, ki ga označimo z U2:



101

Sinhronski stroj - navitja

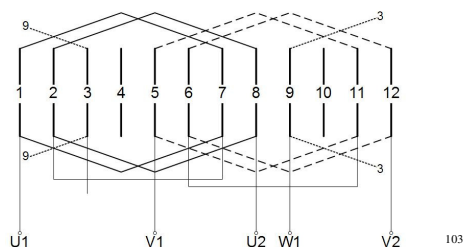
Navitje faze V začnemo v utoru 5, in končamo v utoru 12:



102

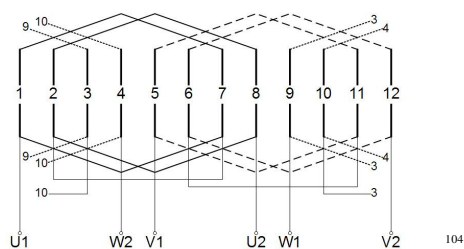
Sinhronski stroj - navitja

Prvo navitje faze W se začne v utoru 9 in konča v utoru 3:



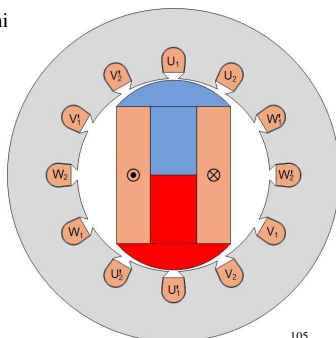
Sinhronski stroj - navitja

Druga tuljava navitja faze W se začne v utoru 10 in konča v utoru 4:



Sinhronski stroj - navitja

Utori so z navitji zasedeni tako, kot je prikazano na sliki:



Sinhronski stroj - navitja

Izračunajmo še napetost generatorja. Temenska vrednost inducirane napetosti v eni stranici ovoja znaša:

$$e_{\max} = B l v$$

Gostota magnetnega pretoka B je znana, znana je tudi dolžina statorja l . Obodno hitrost vrtilnega magnetnega polja v pa moramo izračunati. V splošnem velja izraz iz mehanike:

$$v = \omega_m r$$

ω_m je mehanska krožna hitrost, r pa je polmer izvrtine stroja, kjer velja:

$$r = \frac{D}{2}$$

106

Sinhronski stroj - navitja

Mehanska in električna krožna hitrost sta povezani preko dejstva, da pri vsakem vrtljaju rotorja dobimo toliko period napetosti, kolikor polovih parov p ima stroj. Če naj dobimo v eni sekundi f period napetosti, se mora rotor v eni sekundi zavrteti p -krat manj:

$$f_m = \frac{f}{p}$$

$$\omega_m = 2\pi f_m = 2\pi \frac{f}{p}$$

Obodna hitrost tako znaša

$$v = \omega_m r = 2\pi \frac{f}{p} \frac{D}{2} = \frac{\pi D f}{p}$$

$$e_{\max} = B l \frac{\pi D f}{p} = \frac{\pi B D f l}{p} = \frac{\pi 0,9 \cdot 0,6 \cdot 50 \cdot 0,8}{1} = 67,858 \text{ V}_{107}$$

Sinhronski stroj - navitja

Efektivna vrednost inducirane napetosti v eni stranici ovoja znaša:

$$e = \frac{e_{\max}}{\sqrt{2}} = 47,983 \text{ V}$$

Aritmetično fazno napetost dobimo tako, da dobljeno napetost e pomnožimo s številom vseh stranic:

$$U_{fa} = e \frac{N}{m}$$

Število stranic

Geometrično sešteta fazna napetost znaša:

$$U_f = e \frac{N}{m} z f_n$$

108

Sinhronski stroj - navitja

Ker je generator vezan v zvezdo, ima medfazna napetost vrednost

$$U = U_f \sqrt{3} = \sqrt{3} e \frac{N}{m} z f_n = \sqrt{3} \cdot 47,983 \frac{12}{3} 4 \cdot 0,965926 = 1284 \text{ V}$$

109

Sinhronski stroj - navitja

Izračunajte faktor navitja in narišite razvito shemo za naslednje navitje: $N=24$, $2p=4$, $s=\tau_p$ in $m=3$

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

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

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

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

110

Sinhronski stroj - navitja

Pasovni faktor:

$$f_p = \frac{\sin\left(q \frac{\alpha_e}{2}\right) \sin\left(2 \frac{30^\circ}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{\alpha_e}{2}\right) 2 \sin\left(\frac{30^\circ}{2}\right)} = 0,965926$$

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

Faktor navitja:

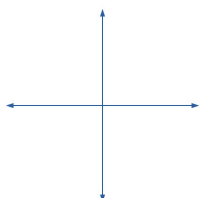
$$f_n = f_p f_s = 0,965926$$

111

Sinhronski stroj - navitja

Narišimo utorovno zvezdo! Ker je električni kot $\alpha_c 30^\circ$, je tudi v tem primeru 12 kazalcev.

Postopek risanja je enak kot pri prejšnji nalogi. Najprej narišemo križ (štiri kazalce).

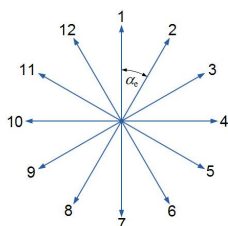


112

Sinhronski stroj - navitja

Med vsakim parom kazalcev narišemo še dva kazalca in kazalce oštevilčimo:

Utorov je 24, kazalcev pa le 12! Kaj to pomeni? Zakaj je tako?

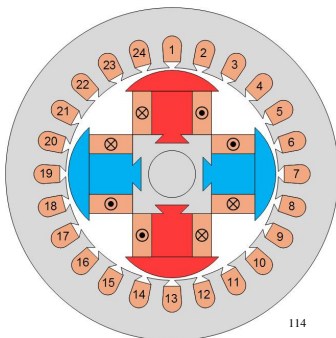


113

Sinhronski stroj - navitja

Odgovor je na sliki!

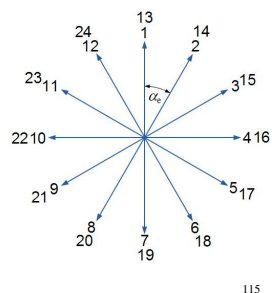
Vidimo, da so protiležni utori v enakem magnetnem položaju. Utora 1 in 13 sta točno na južnem magnetnem polu, zato je v njima enaka napetost. Kazalca napetosti v teh dveh utorih se prekrivata.



114

Sinhronski stroj - navitja

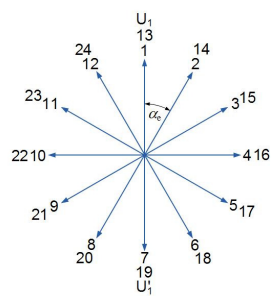
Podobno velja tudi za vse ostale uture. Na kazalčni diagram dodamo le številke.



115

Sinhronski stroj - navitja

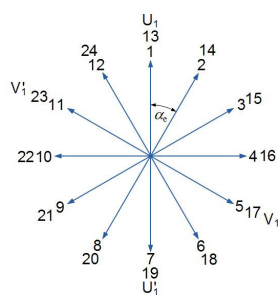
V utor 1 in v utor 7 namestimo prvo tuljavico navitja faze U:



116

Sinhronski stroj - navitja

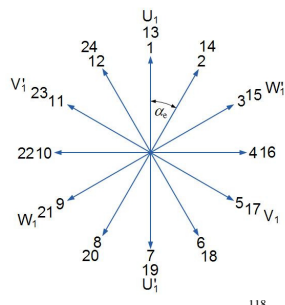
V utor 5 in v utor 11 namestimo prvo tuljavico navitja faze V:



117

Sinhronski stroj - navitja

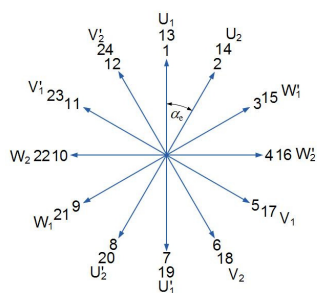
V utor 9 in v utor 15
namestimo prvo
tuljavico navitja faze W:



118

Sinhronski stroj - navitja

Dodamo navitjem vseh
faz še drugo tuljavico:

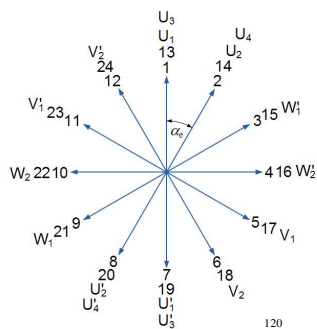


119

Sinhronski stroj - navitja

Polovica utorov je še
vedno prosta, čeprav
tega na kazalčnem
diagramu ne opazimo na
prvi pogled. Dejansko še
nismo uporabili utorov:
3, 4, 13, 14, 17, 18, 19,
20, 21, 22, 23 in 24.

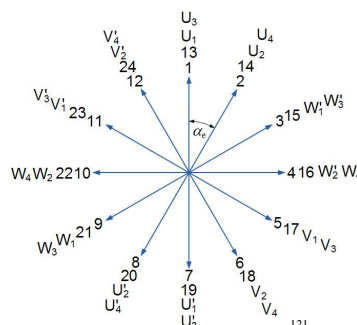
V utora 13 in 19 dodamo
tretjo tuljavico navitja
faze U, ter v utora 14 in
20 še četrto tuljavico
navitja faze U.



120

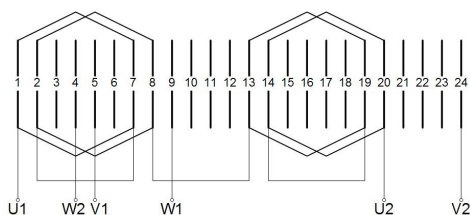
Sinhronski stroj - navitja

Podobno storimo s
tuljavicami ostalih dveh
faz:



Sinhronski stroj - navitja

Narišimo še razvito shemo navitja:



Sinhronski stroj - kazalčni diagram

Sinhronski turbogenerator ima naslednje posatke: $S_n=6,3$ MVA, $U_{2n}=10$ kV, $f=50$ Hz, $I_{1n}=50$ A, $\cos(\varphi_{2n})=0,7$, $X_{st}=1,2$. Izračunajte vzbujačni tok potreben za moč $S=S_n/4$, če je $\cos(\varphi_2)=\cos(\varphi_{2n})$!

Za izračun uporabimo dejstvo, da sta si vzbujačni tok I_1 in fiktivna napetost E_0 sorazmerna, kar velja za nazivno in tudi za vsa ostala obratovalna stanja. Zato velja:

$$E_0 = k I_1$$

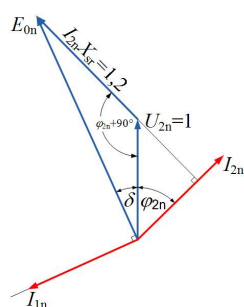
$$E_{0n} = k I_{1n}$$

Konstante k se znebimo tako, da enačbi delimo med sabo in izrazimo tok novega obratovalnega stanja I_1 :

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

Sinhronski stroj - kazalčni diagram

Izračunati moramo fiktivno napetost za nazivno obratovalno stanje E_{0n} in fiktivno napetost za novo stanje E_0 . Za izračun skicirajmo kazalčni diagram:

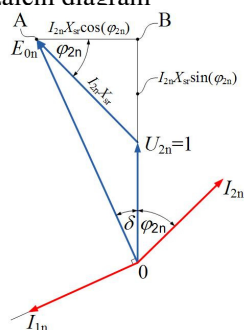


Načeloma bi za izračun E_{0n} lahko uporabili kosinusni izrek:

$$E_{0n}^2 = U_{2n}^2 + (I_{2n} X_{sr})^2 - 2 U_{2n} I_{2n} X_{sr} \cos(\varphi_{2n} + 90^\circ) \quad 124$$

Sinhronski stroj - kazalčni diagram

Bolj običajno pa je, da si pri izračunu pomagamo s pomožni trikotnikom, ki ga vrtimo na kazalčni diagram:



Za izračun napetosti E_{0n} uporabimo Pitagorov izrek na trikotniku z oglišči OAB:

$$E_{0n} = \sqrt{(I_{2n} X_{sr} \cos(\varphi_{2n}))^2 + (U_{2n} + I_{2n} X_{sr} \sin(\varphi_{2n}))^2} \quad 125$$

Sinhronski stroj - kazalčni diagram

Vstavimo podatke:

$$E_{0n} = \sqrt{(1 \cdot 1,2 \cdot 0,7)^2 + (1 + 1 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{1 - 0,7^2})^2} = 2,03812$$

Tok novega obratovalnega stanja izračunamo iz moči:

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

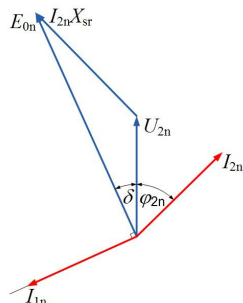
$$\overbrace{U_{2n} I_2}^S = \overbrace{U_{2n} I_{2n}}^{S_n} \cdot \frac{1}{4}$$

Okrajšamo napetost U_{2n} , in dobimo:

$$I_2 = \frac{I_{2n}}{4} = \frac{1}{4} = 0,25 \quad 126$$

Sinhronski stroj - kazalčni diagram

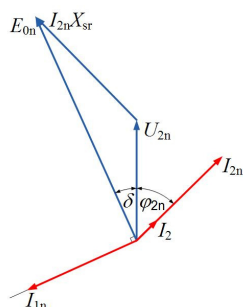
Novo obratovalno stanje narišemo kar v obstoječi kazalčni diagram.



127

Sinhronski stroj - kazalčni diagram

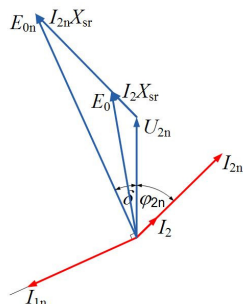
Najprej narišemo tok I_2 , ki ima četrtno dolžine toka I_{2n} in isto smer, ker je faktor moči $\cos(\varphi_2)$ nespremenjen.



128

Sinhronski stroj - kazalčni diagram

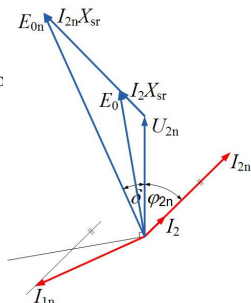
Od izhodišča kazalčnega diagrama do konice padca napetosti $I_2 X_{sr}$ narišemo fiktivno napetost E_0 :



129

Sinhronski stroj - kazalčni diagram

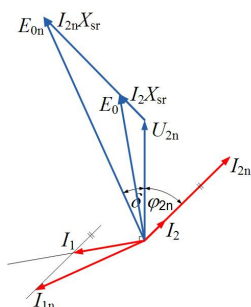
Vzbujalni tok I_1 konstruiramo tako, da narišemo pravokotnico na kazalec E_0 skozi izhodišče kazalčnega diagrama in vzporednico na tok I_{2n} skozi konico toka I_{1n} .



130

Sinhronski stroj - kazalčni diagram

Vzbujalni tok I_1 poteka od izhodišča kazalčnega diagrama do presečišča pravokotnice in vzporednice:



131

Sinhronski stroj - kazalčni diagram

Za izračun fiktivne napetosti E_0 uporabimo isto formulo, kot smo jo uporabili za izračun E_{0n} , le, da vstavimo ustrezní tok I_2 .

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

$$E_0 = \sqrt{(0,25 \cdot 1,2 \cdot 0,7)^2 + (1 + 0,25 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{1 - 0,7^2})^2} = 1,23227$$

Izračunamo še vzbujalni tok I_1 :

$$I_1 = I_{1n} \frac{E_0}{E_{0n}} = 50 \frac{1,23227}{2,03812} = 30,23 \text{ A}$$

V zadnji enačbi smo hkrati uporabili absolutno vrednost toka I_{1n} in normirani vrednosti fiktivnih napetosti. To smemo storiti, ker sta normirani vrednosti brezdimenzijski.

132

Sinhronski stroj - kazalčni diagram

Sinhronski turbogenerator s podatki $S_n=6,3$ MVA, $U_{2n}=10$ kV, $f=50$ Hz, $I_{1n}=50$ A, $\cos(\varphi_n)=0,7$, in $X_{sr}=1,2$, 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 ?

Vse količine tega obratovalnega stanja so v okviru dovoljenih vrednosti:

1. Napetost indukta $U_2=U_{2n}$
2. Tok indukta $I_2=I_{2n}$
3. Vzbujalni tok $I_1 < I_{1n}$, ker je stroj vzbujen za prosti tek

Preveriti moramo še, če je kolesni kot manjši od 90° .

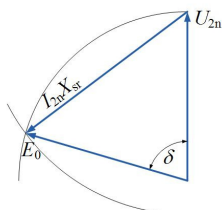
133

Sinhronski stroj - kazalčni diagram

Za preverjanje kolesnega kota narišemo kazalčni diagram, v katerega vrišemo znane fizikalne vrednosti:

1. Napetost indukta $U_2=U_{2n}=1$
2. Tok indukta $I_2=I_{2n}=1$, kar pomeni, da je znan padec napetosti na sinhronski reaktanci, ki znaša $I_{2n}X_{sr}=1,2$
3. Če je stroj vzbujen za prosti tek, je $E_0=U_{2n}=1$.

Znane so stranice trikotnika napetosti, kar pomeni, da trikotnik napetosti lahko narišemo:



134

Sinhronski stroj - kazalčni diagram

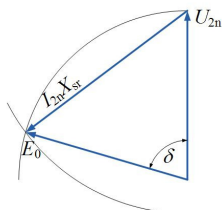
Iz slike, ki je narisana v merilu vidimo, da je kolesni kot manjši od 90° , kar pomeni, da generator lahko obratuje v tem režimu.

Kljub temu pa izračunajmo številčno vrednost kolesnega kota. Za izračun uporabimo kosinusni izrek:

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

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

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



135

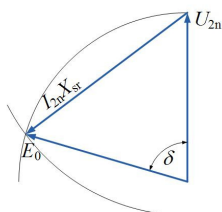
Sinhronski stroj - kazalčni diagram

$$\delta = \arccos\left(\frac{E_0^2 + U_{2n}^2 - (I_{2n} X_{sr})^2}{2 E_0 U_{2n}}\right)$$

Vstavimo številčne vrednosti

$$\delta = \arccos\left(\frac{1^2 + 1^2 - (1 \cdot 1,2)^2}{2 \cdot 1 \cdot 1}\right)$$

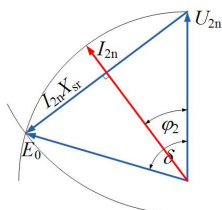
$$\delta = \arccos\left(\frac{2 - 1,44}{2}\right) = 73,745^\circ$$



136

Sinhronski stroj - kazalčni diagram

Kot med tokom in napetostjo φ_2 dobimo z upoštevanjem dejstva, da je ima padec napetosti na sinhronski reaktanci induktivni značaj, kar pomeni, da prehiteva tok I_2 za 90° :



137

Sinhronski stroj - kazalčni diagram

Narišimo pomožni kot za izračun α :

Ker je vsota notranjih kotov trikotnika 180° , velja:

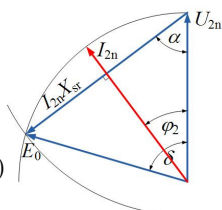
$$\alpha + \varphi_2 + 90^\circ = 180^\circ$$

$$\varphi_2 = 90^\circ - \alpha$$

Kot α izračunamo s kosinusnim izrekom:

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

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



138

Sinhronski stroj - kazalčni diagram

$$\alpha = \arccos\left(\frac{(I_{2n} X_{sr})^2 + U_{2n}^2 - E_0^2}{2 I_{2n} X_{sr} U_{2n}}\right)$$

Vstavimo podatke:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{(1 \cdot 1,2)^2 + 1^2 - 1^2}{2 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 1}\right)$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{1,44}{2,4}\right) = 53,1301^\circ$$

$$\varphi_2 = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 53,1301^\circ = 36,87^\circ$$

Izračunajmo še faktor moči:

$$\cos(\varphi_2) = 0,8 \text{ kap.}$$

139

Sinhronski stroj - kazalčni diagram

Izračunajmo še omahno moč generatorja v tem režimu!

Generator doseže omahno moč pri kolesnem kotu 90° . Narišimo kazalčni diagram v tem obratovalnem stanju!

Ker je navidezna moč sorazmerna padcu napetosti na sinhronski reaktanci, velja:

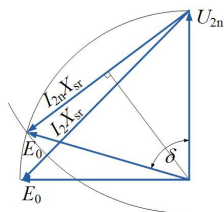
$$S_{om} = k I_2 X_{sr}$$

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

Sledi:

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

140



Sinhronski stroj - kazalčni diagram

Padec napetosti na sinhronski reaktanci pri omahni moči izračunamo s pitagorovim izrekom:

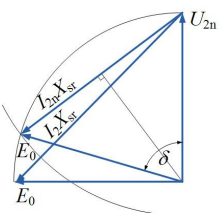
$$I_2 X_{sr} = \sqrt{E_0^2 + U_{2n}^2}$$

Vstavimo v enačbo za omahno moč:

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

$$S_{om} = 6,3 \cdot 10^6 \frac{\sqrt{1^2 + 1^2}}{1 \cdot 1,2} = 7,425 \text{ MVA}$$

141



Asinhronski stroj

Asinhronski motor z nazivno močjo $P_n = 50 \text{ kW}$, nazivno napetostjo $U_n = 380 \text{ V}$, nazivno frekvenco $f_n = 50 \text{ Hz}$, nazivnim tokom $I_n = 100 \text{ A}$, 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!

Če naj motor še zmore vrteti breme, mora biti največji navor motorja večji, ali pa kvečjemu enak navoru bremenjena M_b . Največji navor, ki ga zmore motor je omahni navor M_{om} .

$$M_{om} \geq M_b$$

142

Asinhronski stroj

Navorna karakteristika asinhronskega stroja je znana. Vemo, da podaja odvisnost navora od hitrosti vrtenja $M(n)$, oziroma slipa $M(s)$. V našem primeru se motorju spreminja napetost, zato moramo premisliti, kakšna je odvisnost navora od napetosti.

Ugotovimo kar, kakšna je navorna karakteristika pri različnih napetostih. V ta namen je potrebno izračunati navor pri določeni hitrosti vrtenja, če se spreminja napetost. Za navor velja:

$$M \propto \Phi I_2 \cos(\varphi_2)$$

Pri neki določeni hitrosti vrtenja in različnih napetostih bo rotorska frekvenca konstantna, zato je konstantna tudi rotorska reaktanca X_2 , kar pomeni, da bo faktor moči $\cos(\varphi_2)$ konstanten.

$$M \propto \Phi I_2$$

143

Asinhronski stroj

Rotorski tok I_2 je sorazmeren inducirani napetosti v rotorju, ki pa je, skladno s transformatorsko enačbo, sorazmerna magnetnemu pretoku v stroju. Rotorski tok je zato sorazmeren magnetnemu pretoku v stroju, kar vsekakor velja le pri neki določeni hitrosti vrtenja:

$$I_2 \propto \Phi$$

Po upoštevanju tega sorazmerja dobimo:

$$M \propto \Phi \Phi = \Phi^2$$

Ker mora biti vedno izpolnjeno napetostno ravnovesje mora biti inducirana napetost v statorju enaka statorski napetosti, zato je Skladno s Faradayevim zakonom, magnetni pretok v stroju sorazmeren napetosti na statorju U_2 :

$$\Phi \propto U_2$$

144

Asinhronski stroj

Končno dobimo:

$$M \propto U^2$$

Dobljeni izraz preprosto pomeni, da bi se navor pri določeni hitrosti zmanjšal za devetkrat, če bi se napetost zmanjšala za trikrat.

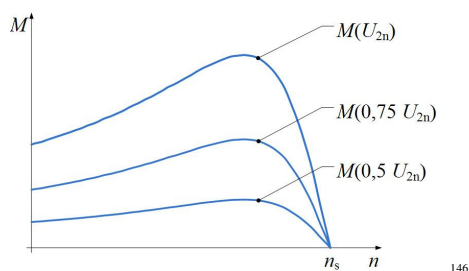
Pri navedeni izpeljavi smo zanemarili ohmski in induktivni padec v statorju. Zanemarili pa smo tudi vpliv nasičenja stroja na rotorsko reaktanco. Kljub zanemaritvi je dobljeni izraz zelo uporaben.

Če upoštevamo še vpliv napetosti, dobimo za navorno karakteristiko družino krivulj.

145

Asinhronski stroj

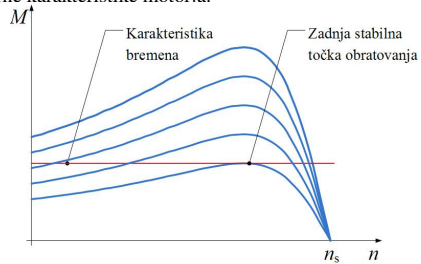
Navorne karakteristike:



146

Asinhronski stroj

Ko se napetost na statorju znižuje, upada tudi hitrost vrtenja rotorja, ki je določena s presečiščem navorne karakteristike bremena in navorne karakteristike motoria.



147

Asinhronski stroj

Motor obratuje pri tisti hitrosti obratovanja, kjer je navor motorja enak navoru bremena:

$$M_{\text{motorja}} = M_{\text{bremena}}$$

Za zadnjo stabilno točko velja:

$$M_{\text{omz}} = M_{\text{b}}$$

Velja:

$$M_{\text{om}} = \text{konst. } U_{2n}^2$$

$$M_{\text{omz}} = \text{konst. } U_2^2$$

Izrazimo M_{omz} :

$$M_{\text{omz}} = M_{\text{om}} \frac{U_2^2}{U_{2n}^2}$$

148

Asinhronski stroj

$$M_{\text{om}} \frac{U_2^2}{U_{2n}^2} = M_{\text{b}}$$

Upoštevamo še podatka: $M_{\text{om}}/M_{\text{n}} = 2$ in $M_{\text{b}} = 0,8 M_{\text{n}}$

$$2 M_{\text{n}} \frac{U_2^2}{U_{2n}^2} = 0,8 M_{\text{n}}$$

$$2 \frac{U_2^2}{U_{2n}^2} = 0,8$$

$$\frac{U_2^2}{U_{2n}^2} = 0,4$$

$$U_2^2 = 0,4 U_{2n}^2$$

$$U_2 = U_{2n} \sqrt{0,4} = 380 \sqrt{0,4} = 240 \text{ V}$$

149

Asinhronski stroj

Trifazni asinhronski motor ima naslednje podatke:

$P_{\text{n}} = 22 \text{ kW}$; $U_{\text{n}} = 380 \text{ V}$; $f = 50 \text{ Hz}$; $n_{\text{n}} = 2935 \text{ min}^{-1}$; $I_{\text{n}} = 42 \text{ A}$;
 $\cos(\varphi_{\text{n}}) = 0,88$; $I_{\text{z}}/I_{\text{n}} = 5,5$; $M_{\text{z}}/M_{\text{n}} = 1,7$; $M_{\text{om}}/M_{\text{n}} = 2,6$. Podatki so za vezavo trikot. Pri zagonu mora razviti navor vsaj $M_{\text{z min}} = 34 \text{ Nm}$.
 Izračunajte minimalno napetost pri zagonu, če je motor vezan v zvezdo! Izračunajte zagonski tok pri znižani napetosti v vezavi Y!

Pri težkih zagonih motorje pogosto zaganjamo z zvezda-trikot stikali, ker na ta način dosežemo znatno manjše zagonске toke. Pri konkretnem problemu imamo opravka z dvema znižanjema napetosti:

1. Zaradi vezave zvezda se napetost na navitju zmanjša za kvadratni koren števila 3. Navorna karakteristika se zniža za 3 krat.
2. Znižanje napetosti zaradi npr. padca napetosti na kablu.

150

Asinhronski stroj

Ob zagonu v vezavi zvezda, pri znižani napetosti mora motor razviti vsaj $M_{z \min}$:

$$M_{z \min} = M_{zY} \frac{U_2^2}{U_{2n}^2}$$

Zaradi znižanja napetosti na navitju zaradi vezave zvezda, je znižan tudi zagonski navor:

$$M_{zY} = M_z \left(\frac{U_{2n}}{\sqrt{3} U_{2n}} \right)^2 = M_z \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^2 = \frac{M_z}{3}$$

Dobimo:

$$M_{z \min} = \frac{M_z}{3} \frac{U_2^2}{U_{2n}^2}$$

151

Asinhronski stroj

Upoštevamo razmerje med zagonskim in nazivnim navorom $M_z/M_n = 1,7$:

$$M_{z \min} = \frac{1,7 M_n U_2^2}{3 U_{2n}^2}$$

Nazivni navor izračunamo iz podatkov stroja:

$$M_n = \frac{60 P_n}{2 \pi n_n}$$

Dobimo:

$$M_{z \min} = \frac{1,7 \cdot 60 P_n U_2^2}{3 \cdot 2 \pi n_n U_{2n}^2} = \frac{17 P_n U_2^2}{\pi n_n U_{2n}^2}$$

152

Asinhronski stroj

Iz enačbe izrazimo znižano statersko napetost:

$$\frac{17 P_n U_2^2}{\pi n_n U_{2n}^2} = M_{z \min}$$

$$U_2^2 = \frac{M_{z \min} \pi n_n U_{2n}^2}{17 P_n}$$

$$U_2 = \sqrt{\frac{M_{z \min} \pi n_n U_{2n}^2}{17 P_n}}$$

$$U_2 = U_{2n} \sqrt{\frac{M_{z \min} \pi n_n}{17 P_n}} = 380 \sqrt{\frac{34 \pi 2935}{17 \cdot 22000}} = 347,9 \text{ V}$$

153

Asinhronski stroj

V vezavi zvezda, je tok v dovodnem kablu trikrat nižji. Do tega zaključka pridemo z naslednjim sklepanjem:

1. Napetost na navitju vsake faze je pri vezavi zvezda za kvadratni koren iz 3 manjša, kot je v vezavi trikot, zato je tudi tok v navitju faze manjši za kvadratni koren iz 3.
2. Dovodni vodnik pri vezavi trikot napaja dve navitji, zato je tok za kvadratni koren iz 3 večji, kot je pri vezavi zvezda.

$$I_{zY} = \frac{I_z}{3}$$

Zaradi znižanja napetosti, je zagonski tok manjši še za razmerje napetosti:

$$I_{zY \min} = I_{zY} \frac{U_2}{U_{2n}} = \frac{I_z U_2}{3 U_{2n}}$$

154

Asinhronski stroj

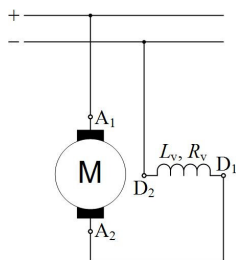
Upoštevajmo še razmerje med zagonskim in nazivnim tokom:

$$I_{zY \min} = \frac{5,5 I_n U_2}{3 U_{2n}} = \frac{5,5 \cdot 42 \cdot 347,9}{3 \cdot 380} = 70,5 \text{ A}$$

155

Kolektorski stroj

Enosmerni kolektorski motor s serijskim vzbujanjem: $P_n = 1 \text{ kW}$; $U_n = 220 \text{ V}$; $n_n = 800 \text{ min}^{-1}$; je nazivno obremenjen z bremenom katerega navor se spreminja s kvadratom hitrosti vrtenja $M_b = k n^2$. Določite hitrost vrtenja, če napajalna napetost pade na $U = 180 \text{ V}$. Predpostavite, da motor pri nazivni obremenitvi še ni v nasičenju.



156

Kolektorski stroj

Pri serijskem motorju se v stroju ob vsaki spremembi spremeni skorajda vse. Še zlasti to velja pri konkretni nalogi, kjer se s hitrostjo vrtenja spreminja tudi navor. Različne vrste bremen imajo tudi različne navorne karakteristike, takšno karakteristiko, kot je podana pri tejle nalogi je značilna za ventilatorje, nekatere vrste črpalk in električni avtomobil.

V takem primeru nalogo rešimo tako, da napišemo ravnovesne enačbe za navor in za napetost za obe obratovalni stanji. Navor motorja ima v vsakem obratovalnem stanju iznos:

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

157

Kolektorski stroj

Navor bremena pa:

$$M_b = k n^2$$

Upoštevamo ravnovesje navorov:

$$M_m = M_b$$

$$k_{MS} I^2 = k n^2$$

Enačbo ravnovesja navorov zapišemo za obratovalno stanje, ko je motor priključen na znižano napetost in za nazivno obratovalno stanje:

$$k_{MS} I^2 = k n^2$$

$$k_{MS} I_n^2 = k n_n^2$$

158

Kolektorski stroj

Enačbi dobimo med sabo, da se znebimo neznane konstante k_{MS} :

$$\frac{k_{MS} I^2}{k_{MS} I_n^2} = \frac{k n^2}{k n_n^2}$$

$$\frac{I^2}{I_n^2} = \frac{n^2}{n_n^2}$$

Iz enačbe izrazimo tok pri znižani napetosti:

$$I^2 = I_n^2 \frac{n^2}{n_n^2}$$

$$I = I_n \frac{n}{n_n}$$

159

Kolektorski stroj

Zapišimo še enačbe za napetostno ravnovesje. Privzamemo, da je inducirana napetost enaka pritisnjeni napetosti, kar pomeni, da zanemarimo padce napetosti na upornosti rotorskega in statorskega navitja in padec na ščetkah. Drugačne izbire, kot, da zanemarimo padce tudi nimamo, saj upornosti in padec na ščetkah niso podani. Za inducirano napetost velja:

$$U_i = k_E \Phi n$$

Upoštevamo, da je magnetni pretok sorazmeren toku:

$$U_i = k_E k I n$$

$$U_i = k_{ES} I n$$

Ker je inducirana napetost enaka priključeni napetosti velja:

$$U = k_{ES} I n$$

160

Kolektorski stroj

Dobljeno ravnovesno enačbo za napetosti (Kichoffov zakon) zapišemo za obe obratovalni stanji:

$$U = k_{ES} I n$$

$$U_n = k_{ES} I_n n_n$$

Enačbi delimo med sabo, da se znebimo neznane konstante k_{ES} :

$$\frac{U}{U_n} = \frac{k_{ES} I n}{k_{ES} I_n n_n}$$

$$\frac{U}{U_n} = \frac{I n}{I_n n_n}$$

161

Kolektorski stroj

Vstavimo enačbo za tok, ki smo jo dobili iz ravnovesja navorov:

$$\frac{U}{U_n} = \frac{I_n \frac{n}{n_n} n}{I_n n_n}$$

$$\frac{U}{U_n} = \frac{n^2}{n_n^2}$$

Izračunamo hitrost vrtenja n :

$$\frac{n}{n_n} = \sqrt{\frac{U}{U_n}}$$

$$n = 800 \sqrt{\frac{180}{220}} = 723,6 \text{ min}^{-1}$$

162

Kolektorski stroj

Enosmerni kolektorski generator s paralelnim vzbujanjem ima pri hitrosti vrtenja $n_n = 700 \text{ min}^{-1}$ karakteristiko prostega teka, ki je podana v tabeli. Upornost vzbujačnega navitja znaša $R_v = 38 \Omega$, dodatna upornost v vzbujačnem navitju $R_{vd} = 7 \Omega$ in upornost rotorja (indukta) $R_i = 0,025 \Omega$.

I_v/A	U_{iv}/V
0,5	35,0
1,0	62,0
1,5	88,0
2,0	110,0
2,5	124,0
3,0	135,0
3,5	144,0
4,0	150,0

- a) Določite napetost prostega teka U_0 , če je v vzbujačni tokokrog vključena celotna upornost $R_{vc} = R_v + R_{vd} = 45 \Omega$!
- b) Kolikšno upornost je treba vključiti v vzbujačni tokokrog, če se hitrost vrtenja poveča za 10%, da ostane inducirana napetost nespremenjena?

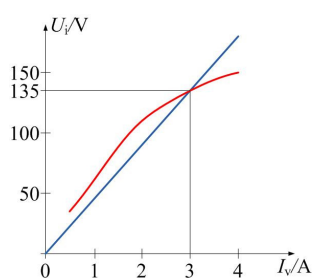
163

Kolektorski stroj

Izhajamo iz dejstva, da je napetost na vzbujačnem tokokrogu enaka inducirani napetosti:

$$U_i(I_v) = I_v R_{vc}$$

Nalogo moramo rešiti grafično, ali pa uporabimo kakšno od numeričnih metod. Pri grafičnem reševanju iščemo presečišče dveh krivulj.

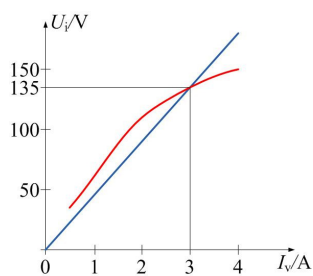


164

Kolektorski stroj

Vidimo, da se karakteristika prostega teka seka s premico padca napetosti na vzbujačnem navitju pri napetosti $U_0 = 135 \text{ V}$, kar je odgovor na prvo vprašanje.

Za odgovor na drugo vprašanje moramo imeti v mislih, da ima stroj pri zvišani hitrost vrtenja drugo karakteristiko prostega teka, ki jo moramo izračunati.



165

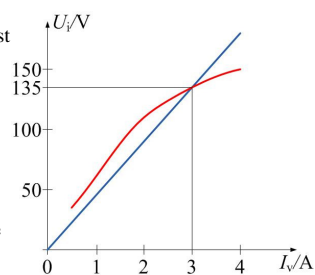
Kolektorski stroj

Pri izračunu upoštevamo enačbo za inducirano napetost stroju:

$$U_i = k_E \Phi n$$

Vidimo, da je inducirana napetost sorazmerna le hitrosti vrtenja, če magnetnega pretoka (vzbujalnega toka) ne spreminjamo. Točke nove karakteristike prostega teka izračunamo z enačbo:

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



166

Kolektorski stroj

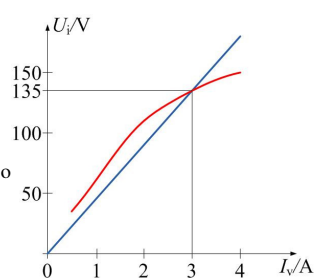
U_{in} so tabelirane napetosti karakteristike prostega teka, ki so bile izmerjene pri nazivni hitrosti vrtenja.

Ko upoštevamo podatke, dobimo za izračun karakteristike prostega teka naslednjo enačbo:

$$U_i = U_{in} \frac{1,1 n_n}{n_n}$$

$$U_i = 1,1 U_{in}$$

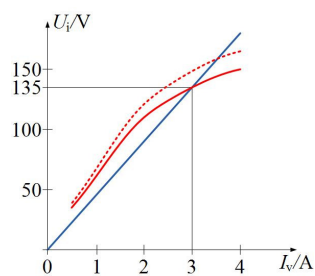
V prvotno tabelo karakteristike prostega teka bomo dodali še tretji stolpec:



167

Kolektorski stroj

I_v/A	U_{in}/V	U_i/V
0,5	35,0	38,5
1,0	62,0	68,2
1,5	88,0	96,8
2,0	110,0	121,0
2,5	124,0	136,4
3,0	135,0	148,5
3,5	144,0	158,4
4,0	150,0	165,0



Novo karakteristiko vrišemo v graf s črtkano krivuljo.

168

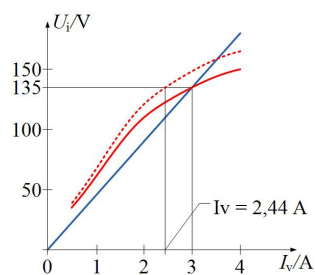
Kolektorski stroj

Na grafu odčitamo vzbujalni tok, ki je na novi karakteristiki potreben za inducirano napetost 135 V.

Vidimo, da potrebujemo 2,44 A vzbujalnega toka. Vzbujalna veja mora imeti takšno upornost, da bo pri 135 V, znašal vzbujalni tok 2,44 A.

$$I_v (R_{vc} + R_x) = U_0$$

$$R_{vc} + R_x = \frac{U_0}{I_v}$$

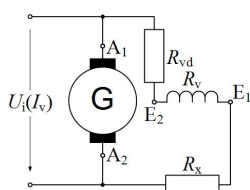


169

Kolektorski stroj

Vrednost upora R_x znaša:

$$R_x = \frac{U_0}{I_v} - R_{vc} = \frac{135}{2.44} - 45 = 10.3 \, \Omega$$



170