

KOLMEFAASILISE AHELA ERIKÜSIMUSED

Ühefaasilise süsteemi (ühefaasilise ahela) puuduseks on suurtel võimsustel mõningane võimsuse võnkumine. Selle puuduse kõrvaldab mitmefaasiliste süsteemide (tavaliselt kolmefaasiliste) kasutamine. Neis mõjuvad võrdsed sagedusega, kuid üldjuhul erinevate algfaaside ja amplituudidega siinuselist elektromotoorjõudu (mittesümmeetriline toide). **Sümmeetrilise toite** korral on nende elektromotoorjõudude amplituudid võrdsed ja omavahelised faasinihked ühesugused. (Eristatakse päri- vastu- ja nulljärgnevusega sümmeetrilisi toitesüsteeme).

Koormus võib olla sümmeetriline või mittesümmeetriline. Kolmefaasilist ahelat (koormust) nimetatakse **sümmeetriliseks**, kui tema kõikide faaside komplekstakistused on võrdsed; vastasel korral on ahel **mittesümmeetriline**.

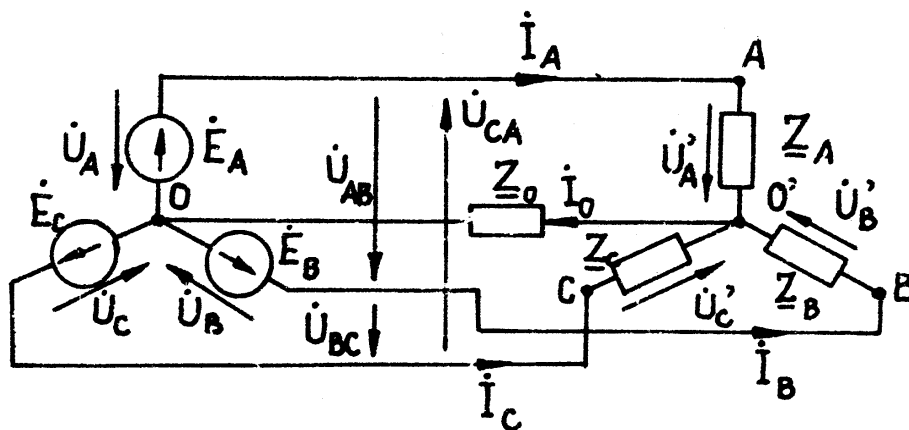
Tasakaalustatud kolmefaasilise süsteemi korral on ahelas summaarne hetkvõimsus konstantne. Harilikult kasutatakse seda süsteemi. Selleks peab olema sümmeetriline ahel, mida toidetakse sümmeetrilise päri- või vastujärgnevusega pingesüsteemiga. Kui ahel või toide ei ole sümmeetriline, siis on meil **tasakaalustamata** kolmefaasiline süsteem (ahel).

Kolmefaasilise süsteemi eeliseks on ka võimalus tekitada pöördmagnetvälja, millel baseerub elektrienergia muundamine mehaaniliseks energiaks (asünkroonmootorid).

On kaks põhilist kolmefaasiliste ahelate ühendus- e. lülitusviisi: **täht- ja kolmnurkühendus**, kusjuures toiteallika ja koormuse ühendusviisid võivad olla erinevad. Pingete ja voolude leppeliste suundade valikul on otstarbekas jälgida mõningaid reegleid. Alltoodud skeemidel on näidatud üks variant nii täht- kui ka kolmnurkühenduse korral.

0.1. Kolmefaasiline ahel tähtühenduses

Järgneval joonisel on näidatud üks võimalikest pingete ja voolude positiivsete (leppeliste e. referents-) suundade valikust.



Joonis 1

0.1.1. Sümmeetriline toide ja sümmeetriline koormus

Sümmeetrilise koormuse korral on tarbija faaside komplekstakistused võrdsed $Z_A = Z_B = Z_C = Z$. Sümmeetrilise toite puhul on faasielektromotoorjõudude (generaatori faasipingete) moodulid võrdsed $E_A = E_B = E_C = E$. Vool null- e. neutraaljuhtmes puudub ning koormuse faasipinged (joonisel märgitud primmiga) võrduvad generaatori vastavate faasipingetega. Faasivoolude (ühtlasi liinivoolude) moodulid on samuti võrdsed. Seepärast võime arvutada vaid ühe faasi voolu $I_f = I = E/Z$ ja selle alusel leida kõik ülejäänud voolud.

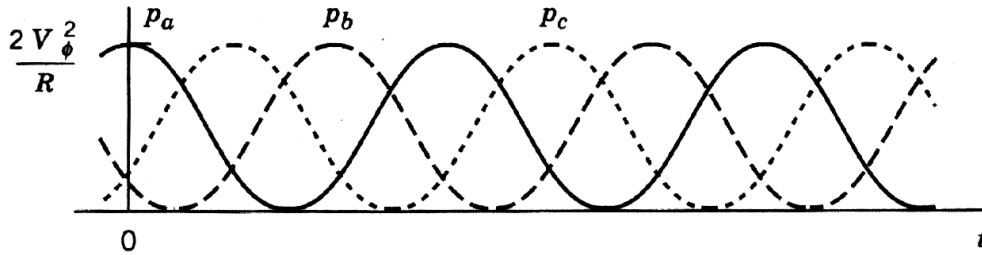
Niisugune kolme identse koormusharuga ahel on **tasakaalustatud** kolmefaasiline ahel (näiteks kolmefaasiline mootor).

Kuna tasakaalustatud koormuse korral nulljuhtme vool on null, siis võiks neutraaljuhtme ära jätta!

Aktiivkoormusel $\underline{Z} = R$ ja hetkvõimsus, mis antakse koormusele vooluga $i_a(t)$ on

$$p_a(t) = R i_a^2(t) = u_a^2(t)/R.$$

Joonisel on toodud selle ning ka $p_b(t) = u_b^2(t)/R$ ja $p_c(t) = u_c^2(t)/R$ lainekujud.



Joonis 2

Liites võimsused graafiliselt näeme, et summaarne generaatorilt koormusele antav hetkvõimsus on

$$p(t) = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t) = 3U_f^2/R$$

Summaarne hetkvõimsus on konstantne, kuigi ühe faasi võimsus on pulseeriv.

Viimane omadus tagab vibratsiooni ja mehaanilise mõju vähenemise generaatoritel ning ühtlasema võimsuse edastuse koormusele – nii nagu on kuuesilindrilisel mootoril eelised võrreldes ühesilindrilisega.

Koormuse summaarne hetkvõimsus on konstantne isegi siis, kui koormus sisaldab energiat salvestavaid elemente (L ja C). Tasakaalustustingimuste sümmeetria lihtsustab arvutusi, sest **kolmefaasilise tasakaalustatud tähtühenduses (samuti kolmnurkühenduses) koormusega ahela analüüsil võib kasutada ekvivalentahelat vaid ühe faasi kohta.**

Üldjuhul liinipinge tähtühenduse korral on avaldatav faasipingete kaudu (vt. joonis)

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A$$

Sümmeetria korral võime esitada faasorid (pingete kompleksväärtused) järgmisel kujul:

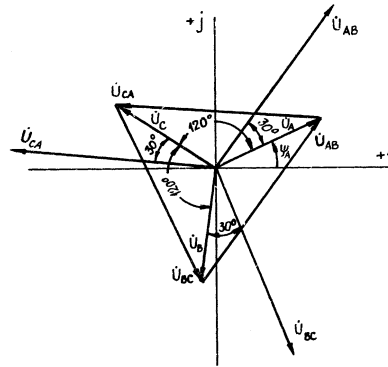
$$\underline{U}_A = U_f \angle 0^\circ \quad \underline{U}_B = U_f \angle -120^\circ \quad \underline{U}_C = U_f \angle 120^\circ, \text{ kus } U_f \text{ on faasipinge efektiivväärtus.}$$

$$\text{Liinipinge } U = |\underline{U}_{AB}| = |\underline{U}_A - \underline{U}_B| = \sqrt{3} U_f \approx 1.73 U_f$$

Sümmeetria tõttu on teistel liinipingetel sama efektiivväärtus, kuid nad on nihutatud $\pm 120^\circ$ pinge $\underline{U}_{AB}$ suhtes. Seega:

$$\underline{U}_{AB} = U \angle 30^\circ; \underline{U}_{BC} = U \angle -90^\circ; \underline{U}_{CA} = U \angle 150^\circ$$

Joonis näitab seoseid faasi- ja liinipingete vahel. On selge, et $\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA}$ võrdub nulliga, summa peab rahuldama Kirchhoffi pingeseadust, aga ka kolmefaasilise süsteemi sümmeetria nõudeid.



0.1.2. Sümmeetiline toide ja mittesümmeetiline koormus

Tasakaalustamata tähtühenduses koormuste korral on oluline neutraaljuhtme olemasolu või puudumine. Arvutused tuleb teha igale faasile eraldi. Selleks tuleb esmalt leida koormuse faasipinged, seejärel saame leida faasivoolud.

Esiteks vaatleme neljajuhtmelist ahelat. Neutraali ühendus on võimalik vaid tähtühenduses generaatori korral, aga see võib olla ka kaudne generaatori ja koormuse maaühenduse kaudu. Kui kõikide ühendusjuhtmete takistus on null, siis nulljuhtme tõttu $\underline{U}_{0'0} = 0$ ning vastav faasipinge on iga haru impedantsil. Seega

$$\underline{I}_A = \underline{U}_A / \underline{Z}_A \quad \underline{I}_B = \underline{U}_B / \underline{Z}_B \quad \underline{I}_C = \underline{U}_C / \underline{Z}_C \quad \text{ning nulljuhtme vool } \underline{I}_0 = (\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C),$$

Kui nulljuhtme takistus on $\underline{Z}_0$, siis leiame esmalt nullpunktide vahelise pinge (kahe sõlme meetodil) ja seejärel koormuse faasipinged:

$$\underline{U}_{0'0} = (\underline{U}_A / \underline{Z}_A + \underline{U}_B / \underline{Z}_B + \underline{U}_C / \underline{Z}_C) / (1/\underline{Z}_A + 1/\underline{Z}_B + 1/\underline{Z}_C + 1/\underline{Z}_0),$$

$$\underline{U}'_A = \underline{U}_A - \underline{U}_{0'0}, \quad \underline{U}'_B = \underline{U}_B - \underline{U}_{0'0}, \quad \underline{U}'_C = \underline{U}_C - \underline{U}_{0'0}$$

Nüüd saame leida voolud:

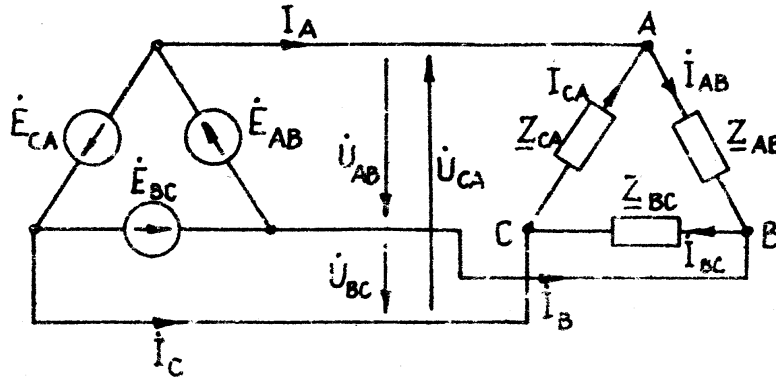
$$\underline{I}_A = \underline{U}'_A / \underline{Z}_A \quad \underline{I}_B = \underline{U}'_B / \underline{Z}_B \quad \underline{I}_C = \underline{U}'_C / \underline{Z}_C \quad \underline{I}_0 = \underline{U}_{0'0} / \underline{Z}_0$$

Kui nulljuhe puudub, siis võtame valemis $1/\underline{Z}_0 = 0$.

0.2. Kolmefaasiline ahel kolmnurkühenduses

Järgneval skeemil on näidatud üks võimalikest suundade valikut. Eeldame samuti sümmeetrilist toidet.

0.2.1. Sümmeetriline toide ja sümmeetriline koormus



Joonis 3

Kolmnurkühenduse korral on liinipinged võrdsed allika pingetega. Kolmnurkühenduses generaatoril ei ole füüsiliselt neutraalpunkti. Kuid ekvivalentne neutraalpunkt ja sellele vastavad faasipinged $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$ ja $\underline{U}_C$ on määratud samuti kui tähtühenduse korral. Kui $\underline{U}_{AB}$ võtta referentsiks (s.o. algfaasiga null), siis $\underline{U}_{AB} = U \angle 0^\circ$, $\underline{U}_{BC} = U \angle -120^\circ$, $\underline{U}_{CA} = U \angle 120^\circ$ (sümmeetriline pärijärgnevusega toide) ning $\underline{U}_A = (U / \sqrt{3}) \angle -30^\circ$ jne.

Kolmnurkühenduses generaator toimib väliselt just nagu kolmeklemmline tähtühenduses generaator, millel puudub neutraalpunkt ja on olemas kolmnurkne kontuur.

Teoreetiliselt võrdub generaatori sisemise kontuuri vool $\underline{I}_A$ nulliga, kuna $\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA} = 0$. Kuid igasugune kõrvalekalle sellest pingetingimusest võib tekitada suure ja soovimatu tsirkulatsioonivoolu. Seetõttu kasutatakse kolmnurkühenduses generaatoreid vaid erijuhtumitel.

Eeldame, et generaatorilt tulevad liinid on ideaalsed juhid.

Sümmeetrilise ahela korral faasi komplekstakistus $\underline{Z}_A = \underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA}$.

Faasivoolud on võrdsed $|\underline{I}_{AB}| = |\underline{I}_{BC}| = |\underline{I}_{CA}| = I_f = U_f / |\underline{Z}_A|$.

Liinivool $I = \sqrt{3} I_f$. Faasor(vektor)diagrammi joonestamisel tuleb loomulikult arvestada ka faasinihkkeid.

On selge, et voolud moodustavad sümmeetrilise kolmefaasilise süsteemi, sõltumata $\underline{Z}_A$ väärtusest.

Tasakaalustatud süsteemi korral on aktiiv- ja reaktiivvõimsus faasi kohta

$$P_f = \operatorname{Re}[\underline{Z}_A] I_f^2 = U_f I_f \cos \varphi \quad Q_f = \operatorname{Im}[\underline{Z}_A] I_f^2 = U_f I_f \sin \varphi$$

Summaarne aktiiv- ja reaktiivvõimsus generaatoril on

$$P = 3P_f = 3U_f I_f \cos \varphi = \sqrt{3} U I \cos \varphi$$

$$Q = 3Q_f = 3U_f I_f \sin \varphi = \sqrt{3} U I \sin \varphi$$

Summaarne näivvõimsus $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} U I$, millest $\cos \varphi = P/S$.

Tasakaalustamata süsteemi korral tuleb leida iga faasi võimsus eraldi ja siis summeerida:

$$P = P_A + P_B + P_C; \quad Q = Q_A + Q_B + Q_C; \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2} \neq \sqrt{3} U I.$$

0.2.2. Sümmeetriline toide ja mittesümmeetriline koormus

Kui kolmefaasiline ahel on tasakaalustamata, siis pole mingit lihtsustavat sümmeetriat. Ahel muutub mõnikord tasakaalustamatuks, kui generaatori pinged ei moodusta sümmeetrilist kolmefaasilist süsteemi. Kuid sageli on tasakaalustamatus tingitud koormustest, milles on mittevõrdsed impedantsid. Nii näiteks võib olla tegemist segakoormusega, kui kolmefaasiline allikas toidab ka ühefaasilisi koormusi koos tasakaalustatud kolmefaasiliste koormustega. Me nimetame sellist olukorda **segakoormusteks** (*composite loads*).

Kui juhtmete impedants oleks tähtsusetu, siis pinged kolmefaasilisel koormusel jääksid mõjutamata ühefaasilisest koormusest, ja vastupidi. Seepärast me võime kasutada eelmisi meetodeid voolude leidmisel. Summaarse aktiivvõimsuse P ja reaktiivvõimsuse Q arvutamisel liidetakse ühefaasilised võimsused kolmefaasiliste koormuste võimsustega.

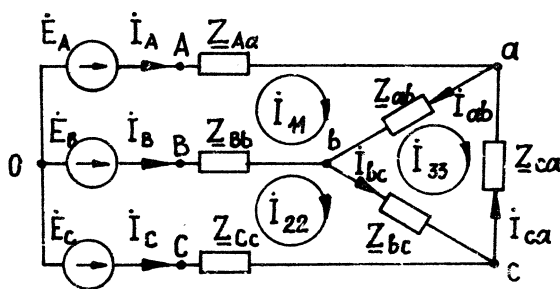
Tasakaalustamata kolmnurkühenduses koormustega ahelatel ei saa olla neutraali ühendust ja harude voolud (faasivoolud) saab leida lihtsalt, kui liinipinged on otse harude impedantsidel.

$$\underline{I}_{AB} = \underline{U}_{AB} / Z_{AB} \quad \underline{I}_{BC} = \underline{U}_{BC} / Z_{BC} \quad \underline{I}_{CA} = \underline{U}_{CA} / Z_{CA}$$

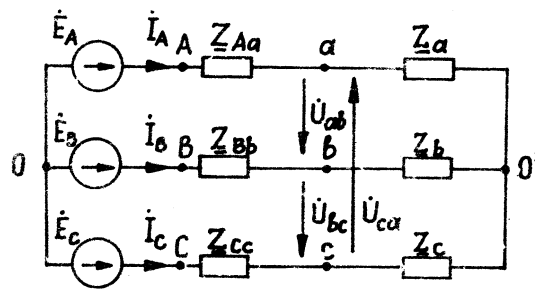
$$\text{ning } \underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA} \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB} \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC}$$

Ülesanne muutub palju keerulisemaks, kui generaatori ja/või liinijuhtmete impedantsid erinevad nullist. Siis me kasutame **kolmnurk-tähtteisendust**. Harude impedantsid **ekvivalentisel tähtühenduses koormusel** on

$$Z_a = Z_{ab}Z_{ca} / \Sigma Z; \quad Z_b = Z_{bc}Z_{ab} / \Sigma Z; \quad Z_c = Z_{ca}Z_{bc} / \Sigma Z, \quad \text{kus } \Sigma Z = Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}$$



Joonis 4



Joonis 5

Edasi lahendame nagu tähtühenduses ahelat, s.o. leiame nullpunktide vahelise pinge $\underline{U}_{0'0}$ ja selle kaudu faasipinged $\underline{U}_{A0'}$, $\underline{U}_{B0'}$, $\underline{U}_{C0'}$ ning nende järgi voolud $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$, $\underline{I}_C$. Koormuse liinipinged on: $\underline{U}_{ab} = \underline{I}_A Z_a - \underline{I}_B Z_b$, $\underline{U}_{bc} = \underline{I}_B Z_b - \underline{I}_C Z_c$, $\underline{U}_{ca} = \underline{I}_C Z_c - \underline{I}_A Z_a$. Lõpuks leiame voolud $\underline{I}_{ab}$, $\underline{I}_{bc}$, $\underline{I}_{ca}$.

Faasipinged $\underline{U}_{A0'}$, $\underline{U}_{B0'}$, $\underline{U}_{C0'}$ saab leida ka generaatori liinipingete kaudu.

0.3. Kolmefaasilise süsteemi sümmeetrilised komponendid

Iga mittesümmeetrilist kolmefaasilist pingete, voolude või elektromotoorjõudude süsteemi võib lahutada kolmeks sümmeetriliseks süsteemiks: päri- vastu- ja nulljärgnevusega süsteemiks. Seda võtet kasutatakse kolmefaasiliste masinate töö analüüsimisel ja eriti kolmefaasiliste ahelate lühisvoolude arvutamisel.

Olgu meil näitena mittesümmeetriline pingete süsteem $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$ ja $\underline{U}_C$. Lahutame need kolm vektorit kolmeks komponendiks

$$\underline{U}_A = \underline{U}_{A0} + \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2},$$

$$\underline{U}_B = \underline{U}_{B0} + \underline{U}_{B1} + \underline{U}_{B2},$$

$$\underline{U}_C = \underline{U}_{C0} + \underline{U}_{C1} + \underline{U}_{C2}.$$

Et nende võrduste paremate poolte 9 vektorit on allutatud ainult kolmele tingimusele, siis tuleb lisada veel kuus tingimust, mis määratakse järgmiselt:

1. Vektorid $\underline{U}_{A0}$, $\underline{U}_{B0}$ ja $\underline{U}_{C0}$ moodustavad nulljärgnevussüsteemi, s.o. $\underline{U}_{B0} = \underline{U}_{A0}$ ja $\underline{U}_{C0} = \underline{U}_{A0}$.
2. Vektorid $\underline{U}_{A1}$, $\underline{U}_{B1}$ ja $\underline{U}_{C1}$ moodustavad pärijärgnevussüsteemi, $\underline{U}_{B1} = a^2 \underline{U}_{A1}$ ja $\underline{U}_{C1} = a \underline{U}_{A1}$.

3. Vektorid $\underline{U}_{A2}$, $\underline{U}_{B1}$ ja $\underline{U}_{C1}$ moodustavad pärijärgnevussüsteemi, $\underline{U}_{B2} = a\underline{U}_{A2}$ ja $\underline{U}_{C2} = a^2\underline{U}_{A2}$. Kasutades äsjatoodud tingimusi, saame

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= \underline{U}_{A0} + \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2}, \\ \underline{U}_B &= \underline{U}_{A0} + a^2\underline{U}_{A1} + a\underline{U}_{A2}, \\ \underline{U}_C &= \underline{U}_{A0} + a\underline{U}_{A1} + a^2\underline{U}_{A2},\end{aligned}\quad (*)$$

s.t. iga mittesümmeetrilist süsteemi võib käsitada päri- vastu- ja nulljärgnevussüsteemi kogumina. Viimaseid nimetataksegi mittesümmeetrilise süsteemi $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$ ja $\underline{U}_C$ sümmeetrilisteks komponentideks. Sageli mõeldakse sümmeetriliste komponentide all nende süsteemide põhivektoreid, s.o. $\underline{U}_{A0}$, $\underline{U}_{A1}$ ja $\underline{U}_{A2}$

Nulljärgnevuskomponendi saamiseks liidame kolm võrdust avaldistes (*). Et $1 + a + a^2 = 0$, siis

$$\underline{U}_{A0} = (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C) / 3.$$

Pärijärgnevuskomponendi saame, kui avaldiste (*) teist võrdust korrutame a -ga ja kolmandat võrdust a^2 -ga ning summeerime võrdused. Saame

$$\underline{U}_{A1} = (\underline{U}_A + a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C) / 3.$$

Vastujärgnevuskomponendi leidmiseks on vaja avaldiste (*) teist võrdust korrutada a^2 -ga, kolmandat võrdust a -ga ning võrdused summeerida. Saame

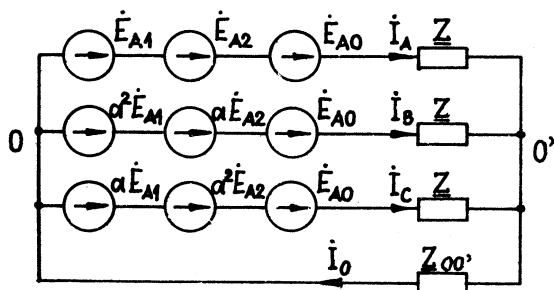
$$\underline{U}_{A2} = (\underline{U}_A + a^2\underline{U}_B + a\underline{U}_C) / 3.$$

Kui mittesümmeetrilise süsteemi kolme vektori summa on null, siis nulljärgnevuskomponent puudub. Seega liinipingete süsteem ja nulljuhtme puudumisel ka liinivoolude süsteem ei sisalda nulljärgnevuskomponenti, vaid võib sisaldada ainult päri- ja vastujärgnevuskomponenti.

Faasipingete mittesümmeetrilise süsteemi päri- ja vastujärgnevuskomponente saab leida ka liinipingete kaudu.

Sümmeetriliste komponentide meetodi kasutamine kolme faasiliste ahelate arvutamisel põhineb superpositsiooni printsiibil ja seda kasutatakse mittesümmeetriliste töörežiimide arvutamisel lineaarsetes kolme faasilistes ahelates (mittesümmeetriline toide, lühisrežiimid, faasijuhtme katkemine jms.). Mittesümmeetrilise süsteemi lahutamine sümmeetrilisteks komponentideks võimaldab määrata ahela töörežiimi kolme sümmeetrilise režiimi summana. Lihtsaimalt on see teostatav siis, kui e.m.j. süsteem on mittesümmeetriline, ahel aga sümmeetriline. Sümmeetrilise ahela korral on sümmeetrilised komponendid üksteisest sõltumatud.

Vaatleme kolme faasilist neljajuhtmelist sümmeetrilist ahelat, kus faasielektromotoorjõud $\underline{E}_A$, $\underline{E}_B$, $\underline{E}_C$ moodustavad mittesümmeetrilise süsteemi. Eeldame, et ahela faasitakistused on kõikidele komponentidele ühesugused. Leiame selle mittesümmeetrilise süsteemi sümmeetrilised komponendid $\underline{E}_{A1}$, $\underline{E}_{A2}$, $\underline{E}_{A0}$ eeltoodud valemitega ja esitame iga faasi elektromotoorjõu kolme elektromotoorjõu summana.



Joonis 6

Kui ahelas mõjuvad ainult pärijärgnevussüsteemi moodustavad elektromotoorjõud $\underline{E}_{A1}$, $a^2\underline{E}_{A1}$, $a\underline{E}_{A1}$, siis nende mõjul tekkivad voolud moodustavad samuti pärijärgnevussüsteemi. Vool nulljuhtmes puudub (ahel on sümmeetriline) ja A-faasi voolu pärijärgnevuskomponent $\underline{I}_{A1} = \underline{E}_{A1}/\underline{Z}_1$, kus $\underline{Z}_1 = \underline{Z}$ on ahela faasitakistus pärijärgnevussüsteemi vooludele.

Vastujärgnevussüsteemi moodustavate elektromotoorjõudude $\underline{E}_{A2}$, $a\underline{E}_{A2}$, $a^2\underline{E}_{A2}$ mõjul tekkivad voolud moodustavad vastujärgnevussüsteemi, nulljuhtme vool puudub ja A-faasi voolu vastujärgnevuskomponent

$$\underline{I}_{A2} = \underline{E}_{A2}/\underline{Z}_2,$$

kus $\underline{Z}_2 = \underline{Z}$ on ahela faasitakistus vastujärgnevussüsteemi vooludele.

Nulljärgnevussüsteemi elektromotoorjõudude mõjul saavad voolud tekkida vaid nulljuhtme olemasolul. Et kõikides faasides nulljärgnevussüsteemi voolud on võrdsed, siis nulljuhtmes on kolmekordne faasivool $I_0 = 3I_{A0}$,

$$I_{A0} = E_{A0}/Z_0,$$

kus $Z_0 = Z + Z_{00'}$ on ahela takistus nulljärgnevusvooludele.

Tegelikud faasivoolud saame leida vastavate sümmeetriliste komponentide liitmise teel:

$$I_A = I_{A0} + I_{A1} + I_{A2}$$

$$I_B = I_{A0} + a^2 I_{A1} + a I_{A2}$$

$$I_C = I_{A0} + a I_{A1} + a^2 I_{A2}.$$

Kui ahel sisaldab pöörlevaid masinaid, siis $Z_1 \neq Z_2 \neq Z$.

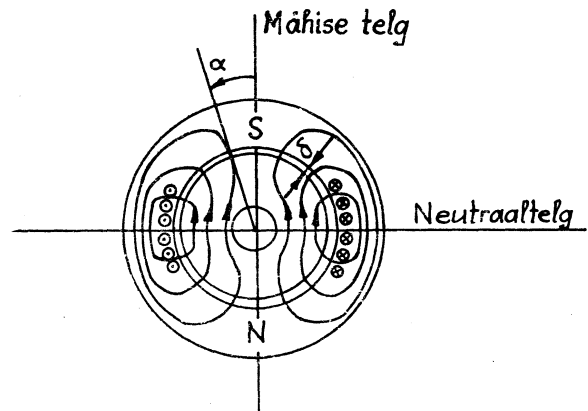
Sümmeetrilisi komponente võib katseliselt määrata nn. sümmeetriliste komponentide filtrite abil. Neid filtreid kasutatakse lülitustes, mis kaitsevad elektriseadmeid ebaõigete töörežiimide eest: vastav aparatuur lülitab seadme või selle osa välja, kui ühe või teise sümmeetrilise komponendi suurus ületab lubatud piiri.

0.4. Pulseeriv ja pöörlev magnetväli

Mitmefaasilise süsteemi üks oluline eelis on võimalus tekitada pöörlevat magnetvälja, millel põhineb vahelduvvoolu elektrimasinate töö.

Elektrimasina lihtsustatud mudeli magnetahel koosneb kahest koaksiaalsest teineteisest õhupiluga δ eraldatud silindrist, mis on valmistatud elektrotehnilisest terasest. Välimist silindrit nimetatakse staatoriks, sisemist (tavaliselt pöörlevat) aga rootoriks.

Staatori sisepinnal olevatesse uuretesse on asetatud nn. staatorimähis. Kui seda mähist läbib vool i , siis aheldub mähisega magnetvoog, mille magnetilise induktsiooni B jooned ehk magnetvälja jõujooned sulguvad läbi staatori, õhupilu ja rootori. Seejuures on jõujoonte suund ja voolu suund mähises seotud kruvi reeglga. Jõujoonte staatorist väljumise kohta võib käsitada kui põhjapoolust N , nende joonte staatorisse sisenemise kohta aga kui magnetvälja lõunapoolust S .



Joonis 7

Magnetilise induktsiooni B ja voolu i vahelise seose võime tuletada järgmiselt. Koguvoolu seaduse järgi

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = iw, \text{ kus } w \text{ on integreerimiskontuuriga } l \text{ haaratav keerdude arv. Et ferromagnetilise}$$

keskkonna suhteline magnetiline läbitavus on palju suurem kui õhul, siis magnetvälja tugevus ferromagnetilises keskkonnas on võrreldes magnetvälja tugevusega õhupilus väga väike.

Integreerides mööda mis tahes jõujoont ja eeldades, et magnetvälja tugevus õhupilu kõrguse ulatuses ei muutu, jõujoon on staatori ja rootori pinnaga risti ning uurde laius lõpmatult väike, saame

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = 2H\delta = iw.$$

Seega magnetiline induktsioon õhupilus $B = \mu_0 H = \mu_0 w i / 2\delta$ on võrdeline vooluga.

Magnetilise induktsiooni jaotumine piki staatori siseringjoont on astmelise kujuga, sest jõujoontega haaratav mähise keerdude arv saab muutuda ainult diskreetselt.

Uurete suure arvu korral läheneb see trapetsile. Seejuures magnetiline induktsioon jaotub sümmeetriliselt nii neutraal- kui ka mähise telje suhtes.

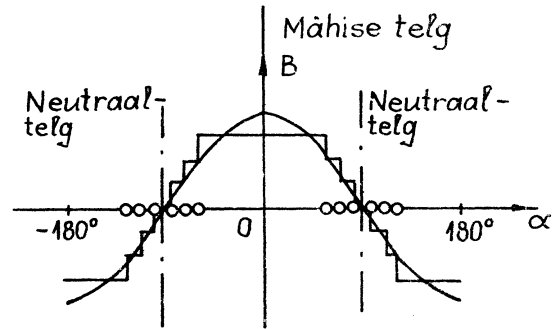
Lahutame magnetilise induktsiooni B perioodilise astmelise kõvera Fourier' ritta ja piirdume selle rea põhiharmoonilisega, s.o. oletame, et B jaotub piki staatori siseringjoont siinuseliselt

$B = B_0 \cos \alpha$, kus B_0 on magnetilise induktsiooni väärtus mähise teljel ja nurka α loetakse samuti sellest teljest. Kui mähist läbiv vool muutub ajas siinuseliselt nurksagedusega ω , siis ka induktsoon on siinuseline $B_0 = B_m \cos \omega t$ ja

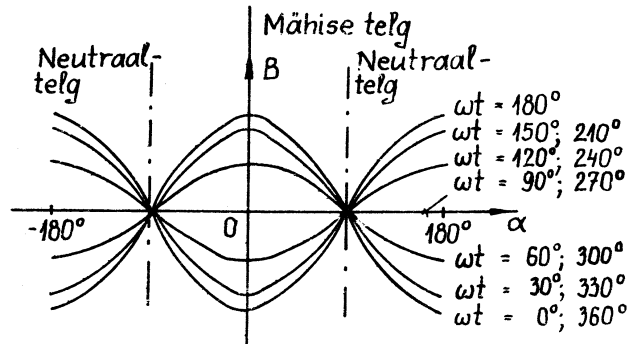
$$B = B_m \cos \omega t \cos \alpha.$$

Kuidas magnetiline induktsoon jaotub sellele valemile vastavalt erinevatel ajahetkedel, on näidatud kõrvaloleval joonisel. Näeme, et induktsiooni väärtus on suurim mähise teljel, ja neutraalteljel ($\alpha = \pm 90^\circ$) on see null.

Sellist välja nimetatakse pulseerivaks väljaks. Pulseeriv väli tekib voolu ajalisel muutumisel ja ühe mähise olemasolu korral.



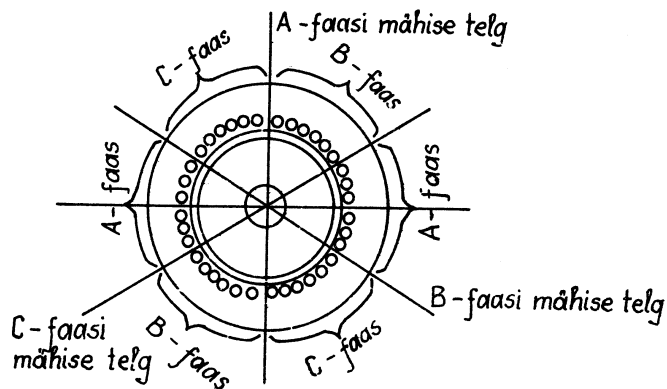
Joonis 8



Joonis 9

Vaatleme juhtumit, kui staatorile on paigutatud kolm mähist, mis on omavahel ruumis nihutatud 120° võrra ja millest igaüks hõlmab kolmandiku staatori siseümbermõõdust.

A-faasi mähise teljel $\alpha = 0$,
B-faasi teljel $\alpha = -120^\circ$ ja
C-faasi teljel $\alpha = 120^\circ$.
Kui nende mähiste voolud moodustavad pärijärgnevussüsteemi, siis ka nende voolude tekitatud magnetilise induktsiooni põhiharmoonilised B_{0A} , B_{0B} , B_{0C} moodustavad pärijärgnevussüsteemi.



Joonis 10

Mähiste tekitatud magnetilised induktsioonid sõltuvalt nurgast α on

$$B_A = B_{0A} \cos \alpha = B_m \cos \omega t \cos \alpha$$

$$B_B = B_{0B} \cos (\alpha + 120^\circ) = B_m \cos (\omega t - 120^\circ) \cos (\alpha + 120^\circ)$$

$$B_C = B_{0C} \cos (\alpha - 120^\circ) = B_m \cos (\omega t + 120^\circ) \cos (\alpha - 120^\circ).$$

Teisendame koosinuste korrutised poolsummadeks

$$B_A = \frac{1}{2} B_m [\cos (\omega t + \alpha) + \cos (\omega t - \alpha)],$$

$$B_B = \frac{1}{2} B_m [\cos (\omega t + \alpha) + \cos (\omega t - \alpha - 240^\circ)]$$

$$B_C = \frac{1}{2} B_m [\cos (\omega t + \alpha) + \cos (\omega t - \alpha - 120^\circ)].$$

Resulteeruv magnetiline induktsoon õhupilus

$$B = B_A + B_b + B_C = 1,5 B_m \cos (\omega t + \alpha).$$

Kui $\alpha = \text{const}$, siis B muutub ajas siinuseliselt. Kui $t = \text{const}$, siis B jaotumine õhupilus on samuti siinuseline. Punktis, mis liigub α negatiivses suunas (kellaosuti liikumise suunas) nurkkiirusega ω on magnetiline induktsoon $B = 1,5 B_m = \text{const}$.

Seega pöörleb siinuseline väljajaotus õhupilus kellaosuti liikumise suunas nurkkiirusega ω ja maksimaalne induksioon on $1,5B_m$ resuleeruva magnetvälja teljel.

Niisugust magnetvälja nimetatakse pöörlevaks magnetväljaks. Seega saame pöörleva magnetvälja kolme pulseeriva välja summeerimisel.

Muutes faaside järjestust, s.o. toites mähiseid vastujärgnevusvooludega, muutub välja pöörlemissuund vastupidiseks ja $B = 1,5B_m \cos(\omega t - \alpha)$.

Pulseerivat välja võib vaadelda kui kahe vastassuunas pöörleva magnetvälja summat.

Pöörlevat välja on võimalik saada ka kahefaasilise voolusüsteemi korral, kui faasinihe 1. ja 2. faasi voolude vahel on 90° ja nende faasimähiste teljed on ruumis nihutatud samuti 90° võrra.

0.5. Kõrgemad harmoonilised kolmefaasilises ahelas

Mittesiinuseline režiim elektri ahelas võib tekkida kas mittesiinuselise toite või mittelineaarse ahela korral. Vaatleme siin juhtumit, kus kolmefaasilises ahelas tekib mittesiinuseline režiim selle tõttu, et faasielektromotoorjõud on mittesiinuselised. Harilikult on faasielektromotoorjõud sümmeetrilised abstsisstelje suhtes generaatori sümmeetrilise konstruktsiooni tõttu ja seepärast puuduvad neis paarisharmoonilised. Eeldame, et ahel on sümmeetriline, s.t. kõikide faaside pinged ja voolud on ühesuguse kujuga, ainult faasis nihutatud $1/3$ esimese harmoonilise perioodi võrra.

Mittesiinuselised faasielektromotoorjõud võib lahutada Fourier' ritta. k -ndale harmoonilisele saame:

$$e_{Ak} = E_{km} \sin(k\omega t + \psi_{Ak})$$

$$e_{Bk} = E_{km} \sin(k\omega t + \psi_{Bk}) = E_{km} \sin(k\omega t + \psi_{Ak} - k \cdot 120^\circ)$$

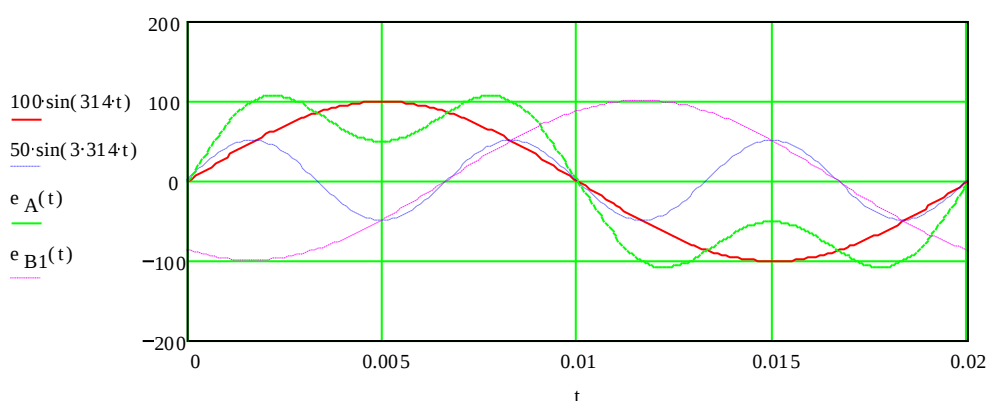
$$e_{Ck} = E_{km} \sin(k\omega t + \psi_{Ck}) = E_{km} \sin(k\omega t + \psi_{Ak} - k \cdot 240^\circ)$$

Faaside A, B, C elektromotoorjõudude harmoonilised on üksteisest nihutatud $k \cdot 2\pi/3$ ehk $k \cdot 120^\circ$ võrra. $k = 1$ puhul on tegemist esimese harmoonilise e. põhilainega, teiste k väärtuste puhul aga kõrgemate harmoonilistega, kusjuures paarisharmoonilised puuduvad.

Harmooniliste avaldiste uurimisel saame teha alljärgnevad järeldused.

1. Kõik harmoonilised, mille järjekorranumber jagub kolmega (jäägita) e. niinimetatud kolmandad harmoonilised langevad eri faasides A, B, C kokku ja moodustavad nulljärgnevusega sümmeetrilise süsteemi.

Joonisel on näitena toodud A -faasi elektromotoorjõu kõver $e_A(t) = 100\sin(314t) + 50\sin(3 \cdot 314t)$, mis sisaldab vaid 1. ja 3. harmoonilist, kusjuures nende algfaasid olgu nullid..



Joonis 11

Teiste faaside elektromotoorjõudude kõverad on samasuguse kujuga, kuid üksteisest nihutatud $1/3$ põhilaine perioodi võrra ehk 3-nda harmoonilise täisperioodi võrra. Joonisel on näidatud ka B faasi esimene harmooniline $e_{B1}(t)$. Näeme, et kolmandad harmoonilised langevad faasides A, B, C kokku, moodustades nulljärgnevussüsteemi. Üldjuhul

$$e_{Ak} = e_{Bk} = e_{Ck} = E_{km} \sin(k\omega t + \psi_k), \text{ kus } k = 3, 9, \dots$$

2. Kõik harmoonilised, mille järjekorranumber rahuldab tingimust $(k-1)/3 = n$, kus n on täisarv, moodustavad pärijärgnevussüsteemi, s.o. $k = 1, 7, 13, \dots$

3. Kõik harmoonilised, mille järjekorranumber rahuldab tingimust $(k+1)/3 = n$, moodustavad vastujärgnevussüsteemi, s.o. $k = 5, 11, \dots$

Neid sümmeetrilisi süsteeme ei tohi segi ajada eelpool vaadeldud kolmefaasilise ahela sümmeetriliste komponentidega siinusvoolu korral. Seal me jagasime mittesümmeetrilise pingete (voolude) süsteemi ühesuguse sagedusega päri-, vastu- ja nulljärgnevusega komponentideks. Nüüd aga on tegemist erineva sagedusega päri-, vastu- ja nulljärgnevussüsteemidega.

Vaatleme nüüd kõrgemate harmooniliste küsimust kolmefaasilistes sümmeetrilistes ahelates kolmnurk- ja tähtühenduse puhul. Eeldame, et kolmefaasilise generaatori (või trafo) elektromotoorjõud e_A, e_B, e_C on ühesuguse kujuga, kuid üksteisest nihutatud $1/3$ perioodi võrra, ja sisaldavad ainult paarituharmoonilisi.

0.5.1. Generaatori mähised on ühendatud kolmnurka

Harmoonilised 1, 7, 13, ... moodustavad sümmeetrilise pärijärgnevussüsteemi, nende summa kolmnurkühenduse korral võrdub nulliga ja nad ei tekita faasimähises voolu. Harmoonilised 5, 11, ... moodustavad sümmeetrilise vastujärgnevussüsteemi ning nende summa on samuti null.

Harmoonilised 3, 9, 15, ... moodustavad aga sümmeetrilise nulljärgnevussüsteemi, nende summa e_{RES} erineb nullist ja nad tekitavad kolmnurkühenduses olevates faasimähistes voolu.

$$e_{RES} = e_A + e_B + e_C = 3e_{A3} + 3e_{A9} + 3e_{A15} + \dots$$

e_{RES} mõjul tekib vool generaatori faasimähistes ka siis, kui generaator pole tarbijaga ühendatud. See vool tekitab faasimähistes pingelangu ning faasipingetes (ühtaegu liinipingetes) kolmega jaguvaid harmoonilisi ei ole. Seega:

- faasielektromotoorjõududes e_f on harmoonilised 1, 3, 5, 7, 9, ...
- faasi(liini)pingetes u on harmoonilised 1, 5, ...
- faasivooludes i on harmoonilised 3, 9, ...

0.5.2. Generaatori mähised on ühendatud nulljuhtmeta tähte.

Nüüd on olukord järgmine:

- faasielektromotoorjõududes e_f on harmoonilised 1, 3, 5, 7, 9, ...
- faasipingetes u_f on harmoonilised 1, 3, 5, 7, ...
- liinipingetes u on harmoonilised 1, 5, 7, 11, ...

Liinipingetes puuduvad alati kolmandad harmoonilised, sest iga liinipinge võrdub vastavate faasipingete vahetega, faasipingetes aga langesid kolmandad harmoonilised faasis kokku.

Selleks, et määrata, millised harmoonilised esinevad teistes (tarbija) pingetes ja vooludes, tuleb eraldi vaadelda nulljuhtmega ja nulljuhtmeta tähtühendust.

Nulljuhtmeta tähtühenduse korral on generaatori faasielektromotoorjõududes ja -pingetes kõik harmoonilised (1, 3, 5, ...) ning liinipingetes harmoonilised 1, 5, 7, Liinivooludes (ühtlasi faasivooludes) ning tarbija faasipingetes ei saa nulljuhtme puudumisel kolmandaid harmoonilisi olla, seega on neis vaid harmoonilised 1, 5, 7, Nullpunktide vaheline pinge sisaldab aga ainult kolmandaid harmoonilisi. Liini- ja faasipinge suhe on kõrgemate harmooniliste olemasolu korral väiksem kui $\sqrt{3}$.

$$\frac{U}{U_f} = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{U_1^2 + U_5^2 + U_7^2 + \dots}}{\sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + U_7^2 + \dots}} \leq \sqrt{3}$$

Nulljuhtmega tähtühenduse korral on kõik harmoonilised 1, 3, 5, 7, ... faasielektromotoorjõududes, generaatori ja tarbija faasipingetes ja liini-(faasi-)vooludes. Liinipingetes on harmoonilised 1, 5, 7, ... Nulljuhtme vool saab sisaldada ainult kolmandaid harmoonilisi (3, 9, ...).

LISA 1 Näidisülesandeid

Ülesanne 1. Sümmeetriline koormus on ühendatud generaatoriga, liinijuhtmete näivtakistus on $\underline{Z}_l$. Vaatleme kolmefaasilist ülekande- e. edastusliini, mis ühendab kõrgepinge generaatorit koormusega. Liini kõikidel faasidel on impedants $\underline{Z}_l$, ja koormus on tasakaalustatud tähtühenduses harude impedantsidega on $\underline{Z}$.

Olgu $|\underline{U}_{AB}| = 45 \text{ kV}$, $\underline{Z}_l = 0.5 + j3 \Omega$, $\underline{Z} = 4.5 + j9 \Omega$

Tuleb leida liinivool ja võimsused. Kuna koormus koos edastusliiniga kujutavad tasakaalustatud tähtühendust generaatorile, siis võime analüüsi lihtsustamiseks kasutada ekvivalentset ahelat ühele faasile.

Esiteks arvutame generaatori faasipinge, võttes $U = |\underline{U}_{ab}|$, saame $U_f = 45 \text{ kV} / \sqrt{3} \approx 26 \text{ kV}$

Teiseks võtame $\underline{U}_a$ referentsiks ja joonestame ekvivalentse faasi- a ahela. Summaarne faasi impedants on

$$\underline{Z}_Y = \underline{Z}_l + \underline{Z} = 5 + j12 \Omega = 13 \Omega \angle 67.4^\circ$$

ning vool $I = |\underline{I}_a| = 26 \text{ kV} / 13 \Omega = 2 \text{ kA}$.

Võimsused: $P = 3 \times 5 \Omega \times (2 \text{ kA})^2 = 60 \text{ MW}$

$$Q = 3 \times 12 \Omega \times (2 \text{ kA})^2 = 144 \text{ MVar}$$

Pange tähele, et võimsus tuleb *mega*-väärtustes, kui kasutame kilovolte, kiloampreid ja oome.

Generaatori poolt antavast 60 MW võimsusest jõuab koormuseni

$$P_L = 3 \times 4.5 \Omega \times (2 \text{ kA})^2 = 54 \text{ MW}, \text{ nii et}$$

$$P_L / P = 54 / 60 = 90\%$$

Kuigi see tundub olevat päris kõrge kasutegur, hajub edastusliinil ikkagi $P_L - P = 6 \text{ MW}$!

Raisatud võimsuse vähendamiseks võib kasutada võimsusteguri parandamist.

Ülesanne 2 Tarbija ja toide on ühendatud tähte (joon. 1). A-faasis on induktiivsus $L = 0,2 \text{ H}$, B-faasis mahtuvus $C = 10^{-3} \text{ F}$ ja C-faasis aktiivtakistus $R = 15 \Omega$. E.m.j.-d moodustavad pärijärgnevussüsteemi, mille liinipinge $\underline{U}_{AB} = 220 \angle 0^\circ \text{ V}$ ja nurksagedus $\omega = 100 \text{ 1/s}$.

Leida liinivoolud ja nulljuhtme vool $\underline{Z}_0 = 0$ puhul ja liinivoolud nulljuhtme puudumisel.

Arvutame faaside komplekstakistused

$$\underline{Z}_A = j\omega L = j20, \underline{Z}_B = -j/\omega C = -j10, \underline{Z}_C = R = j15 \Omega.$$

Generaatori faasipinged $\underline{U}_A = 127 \angle -30^\circ \text{ V}$, $\underline{U}_B = 127 \angle -150^\circ \text{ V}$ ja $\underline{U}_C = 127 \angle 90^\circ \text{ V}$. Nende pingete algfaaside määramisel võib kasutada p. 0.1.1. toodud vektordiagrammi abi.

Kui $\underline{Z}_0 = 0$, siis $\underline{U}_{00} = 0$ ja voolud $\underline{I}_A = 6,35 \angle -120^\circ \text{ A}$, $\underline{I}_B = 12,7 \angle -60^\circ \text{ A}$, $\underline{I}_C = 8,47 \angle 90^\circ \text{ A}$, $\underline{I}_0 = 8,63 \angle -68,4^\circ \text{ A}$ (vt. p. 0.1.2.).

Kui $\underline{Z}_0 = \infty$, siis $\underline{U}_{00} = 103,6 \angle -105,3^\circ \text{ V}$, tarbija faasipinged

$$\underline{U}'_A = 142 \angle 14,86^\circ \text{ V}, \underline{U}'_B = 90,3 \angle -156^\circ \text{ V} \text{ ja } \underline{U}'_C = 229 \angle 83,190^\circ \text{ V}.$$

Voolud $\underline{I}_A = 7,1 \angle -75,1^\circ \text{ A}$, $\underline{I}_B = 9,03 \angle 246^\circ \text{ A}$, $\underline{I}_C = 15,24 \angle 83,1^\circ \text{ A}$.

Ülesanne 3. Lahendada eelmine ülesanne, kui e.m.j.-d moodustavad vastujärgnevussüsteemi.

Generaatori faasipinged

$$\underline{U}_A = 127 \angle 30^\circ \text{ V}, \underline{U}_B = 127 \angle 150^\circ \text{ V} \text{ ja } \underline{U}_C = 127 \angle -90^\circ \text{ V}.$$

Kui $\underline{Z}_0 = 0$, siis voolud

$$\underline{I}_A = 6,35 \angle -60^\circ \text{ A}, \underline{I}_B = 12,7 \angle -120^\circ \text{ A}, \underline{I}_C = 8,47 \angle -90^\circ \text{ A}, \underline{I}_0 = 25,1 \angle -97,3^\circ \text{ A}.$$

Kui $\underline{Z}_0 = \infty$, siis nullpunktide vaheline pinge $\underline{U}_{00} = 302 \angle -134,2^\circ \text{ V}$

ja koormuse faasipinged $\underline{U}'_A = 426 \angle 41,1^\circ \text{ V}$, $\underline{U}'_B = 298 \angle 70,2^\circ \text{ V}$, $\underline{U}'_C = 229 \angle 23^\circ \text{ V}$

ning voolud $\underline{I}_A = 21,3 \angle -48,9^\circ \text{ A}$, $\underline{I}_B = 29,8 \angle 160,2^\circ \text{ A}$, $\underline{I}_C = 15,27 \angle 23^\circ \text{ A}$.

Ülesanne 4. Tarbija ja e.m.j.-d on ühendatud tähte. E.m.j.-d moodustavad pärijärgnevussüsteemi ja $\underline{E}_A = 100 \angle 0^\circ \text{ V}$. Leida voolud $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$ ja $\underline{I}_C$ ning tarbija faasipinged $\underline{U}'_A$, $\underline{U}'_B$ ja $\underline{U}'_C$ kolmel juhul: Tarbija on sümmeetriline, s.o. a) $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = 10 \angle 30^\circ \Omega$; b) tarbija A-faas on lühises ($\underline{Z}_A = 0$), $\underline{Z}_B = \underline{Z}_C = 10 \angle 30^\circ \Omega$; c) tarbija A-faasis on katkestus ($\underline{Z}_A = \infty$), $\underline{Z}_B = \underline{Z}_C = 10 \angle 30^\circ \Omega$.

Sümmeetrilise ahela puhul (p. 0.1.1) $\underline{U}'_A = \underline{E}_A = 100 \angle 0^\circ \text{ V}$, $\underline{U}'_B = \underline{E}_B = 100 \angle -120^\circ \text{ V}$, $\underline{U}'_C = \underline{E}_C = 100 \angle 120^\circ \text{ V}$. Voolud $\underline{I}_A = 10 \angle -30^\circ \text{ A}$, $\underline{I}_B = 10 \angle -150^\circ \text{ A}$, $\underline{I}_C = 10 \angle 90^\circ \text{ A}$.

Faasi A lühise korral tarbija A-faasi pinge $\underline{U}'_A = 0$, $\underline{U}'_B = -\underline{U}_{AB} = \sqrt{3} 100 \angle -150^\circ \text{ V}$, $\underline{U}'_C = -\underline{U}_{CA} = \sqrt{3} 100 \angle 150^\circ \text{ V}$. Leime voolud $\underline{I}_B = \sqrt{3} 10 \angle -180^\circ \text{ A}$, $\underline{I}_C = \sqrt{3} 10 \angle 120^\circ \text{ A}$ ja seejärel Kirchhoffi vooluseaduse järgi $\underline{I}_A = 30 \angle 150^\circ \text{ A}$.

Katkestuse korral A-faasis $\underline{I}_A = 0$ ja $\underline{I}_B = -\underline{I}_C$; seejärel leime Ohmi seaduse järgi $\underline{I}_B = \underline{U}_{BC} / (\underline{Z}_B + \underline{Z}_C) = \sqrt{3} 5 \angle -120^\circ \text{ A}$ ja faasipinged $\underline{U}'_B = \underline{I}_B \underline{Z}_B = \sqrt{3} 50 \angle -90^\circ \text{ V}$, $\underline{U}'_C = \underline{I}_C \underline{Z}_C = \sqrt{3} 50 \angle 90^\circ \text{ V}$ ja $\underline{U}_A = \underline{U}_{AB} + \underline{U}'_B = 150 \angle 0^\circ \text{ V}$.

Ülesanne 5. Tarbija ülesandes 2 on ühendatud kolmnurka (joonis 3) ($\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_A$, $\underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_B$, $\underline{Z}_{CA} = \underline{Z}_C$) samade liinipingete korral. Leida kõik faasi- ja liinivoolud.

Tarbija faasivoolud $\underline{I}_{AB} = -j11 = 11 \angle -90^\circ \text{ A}$, $\underline{I}_{BC} = 19,05 - j11,0 = 22 \angle -30^\circ \text{ A}$ ja $\underline{I}_{CA} = -7,34 + j12,70 = 14,67 \angle 120^\circ \text{ A}$.

Liinivoolud leime vastavate faasivoolude vahedena

$\underline{I}_A = 7,34 - j23,7 = 24,8 \angle -72,8^\circ \text{ A}$, $\underline{I}_B = 19,05 = 19,05 \angle 0^\circ \text{ A}$, $\underline{I}_C = -26,4 + j23,7 = 35,5 \angle 138,1^\circ \text{ A}$,

Ülesanne 6. Sümmeetrilise kolmefaasilise kolmnurkühenduses tarbija (joon. 4, $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}$) aktiivvõimsus $P = 30 \text{ kW}$, $\cos \varphi = 0,8$ ($\varphi > 0$). Tarbija liinipinged $\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{bc} = \underline{U}_{ca} = 380 \text{ V}$. Liinijuhtmete takistused $\underline{Z}_{Aa} = \underline{Z}_{Bb} = \underline{Z}_{Cc} = 0,1 + j0,2 \Omega$. Leida generaatori faasi- ja liinipinge ja võimsuskaod liinijuhtmetes.

Reaktiivvõimsus $Q = P \sin \varphi / \cos \varphi = 22,5 \text{ kvar}$. Tarbija kompleksvõimsus $\underline{S} = 30 + j 22,5 \text{ kVA}$, ühe faasi kompleksvõimsus $\underline{S}_f = 10 + j 7,5 = 12,5 \angle 36,9^\circ \text{ kVA}$.

Tarbija faasitakistus

$\underline{Z}_{ab} = \underline{U}_{ab} / \underline{I}_{ab} = U_{ab}^2 / (\underline{I}_{ab} \underline{U}_{ab}^*)$.

Et $\underline{U}_{ab}^* \underline{I}_{ab} = \underline{S}_f^* = 12,5 \angle -36,9^\circ$, siis $\underline{Z}_{ab} = 11,55 \angle 36,9^\circ = 9,24 + j6,93 \Omega$.

Ekvivalentse tähtühenduse (joon. 5) haru takistus sümmeetrilise ahela korral $\underline{Z}_a = \underline{Z}_{ab} / 3$,

A-faasi vool $\underline{I} = 380 \cdot 3 / (\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{ab}) = 57,0 \angle -36,9^\circ \text{ A}$.

Generaatori faasipinge $\underline{U}_f = | \underline{I}_A (\underline{Z}_a + \underline{Z}_{Aa}) | = 231 \text{ V}$ ja liinipinge $\underline{U} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_f = 400 \text{ V}$.

Võimsuskaod liinijuhtmetes $\Delta P = 3 I_A^2 \text{Re}[\underline{Z}_{Aa}] = 974 \text{ W}$.

Ülesanne 7. Leida mittesümmeetrilise pingesüsteemi null-, päri- ja vastujärgnevuskomponendid, kui $\underline{U}_A = 300 \text{ V}$, $\underline{U}_B = -j200 \text{ V}$, $\underline{U}_C = j200 \text{ V}$.

Vastavate valemite järgi (p. 0.3.) leime $\underline{U}_{A0} = 100 \text{ V}$, $\underline{U}_{A1} = 215 \text{ V}$, $\underline{U}_{A2} = -15 \text{ V}$. Kontrollida ka lahenduse õigsust, leides mittesümmeetrilise süsteemi vektorid sümmeetriliste komponentide kaudu!