

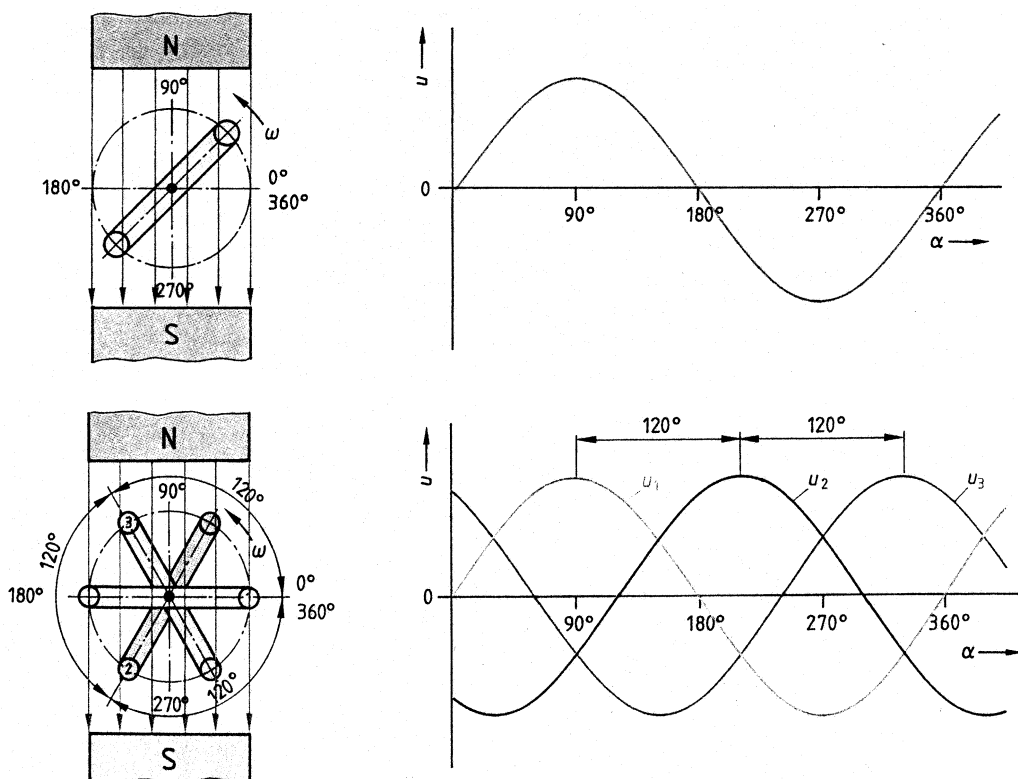
7 Kolmefaasiline vool

7.1 Kolmefaasilise voolu saamine

Tänapäeval töötavad elektrijaamad toodavad kolmefaasilist voolu. Kolmefaasilise voolu peamiseks eeliseks on lihtne pöörleva magnetvälja saamise võimalus. Pöörlev magnetväli ehk lihtsalt pöördväli on maailma lihtsaima ja töökindlaima mootori – asünkroonmootori (seda nimetatakse ka induktsioonmootoriks) – tööpõhimõtte aluseks. Kolmefaasilist voolu on lihtne toota ja ökonoomne üle kanda.

Kolmefaasiline vool on sisuliselt liitvool kolmest ühefaasilisest, mille elektromotoorjõud on teineteisest **ajas** kolmandikperioodi ehk 120° võrra nihutatud. Kolmefaasilisest elektrisüsteemist võib saada ühefaasilist voolu, mis ei erine millegi poolest ühefaasilise vahelduvvoolu generaatorist saadavast voolust.

Lihtsaim kolmefaasiline generaator on ehituselt sarnane ühefaasilise generaatoriga. Erinevus seisneb vaid selles, et mähiseid on ühe asemel kolm, nad on üksteise suhtes **ruumis** 120° võrra nihutatud ja neid nimetatakse nüüd **faasimähisteks**.



Kui pöörlemine toimub ühtlase kiirusega, siis indutseeritakse mähistes ühesuguse sageduse ja amplituudiga elektromotoorjõud, mis on üksteise suhtes faasis 120° võrra nihutatud.

Kui lugeda esimese faasimähise elektromotoorjõu e_1 perioodi algthetkel $t = 0$ nulliks, siis

$$e_1 = E_1 \sin \omega t.$$

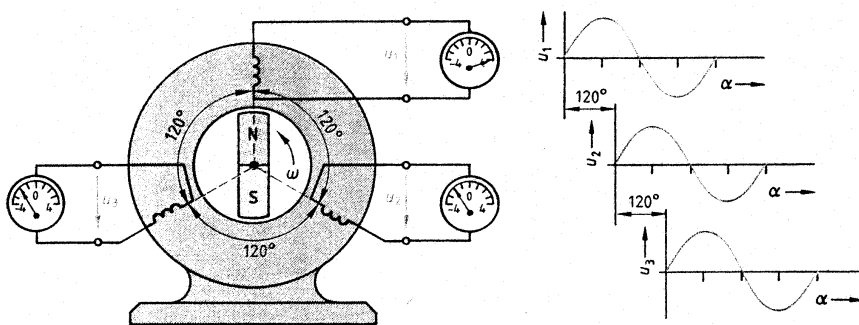
Teise faasimähise elektromotoorjõud e_2 jääb e_1 -st 120° võrra maha, seega

$$e_2 = E_2 \sin(\omega t - 120^\circ).$$

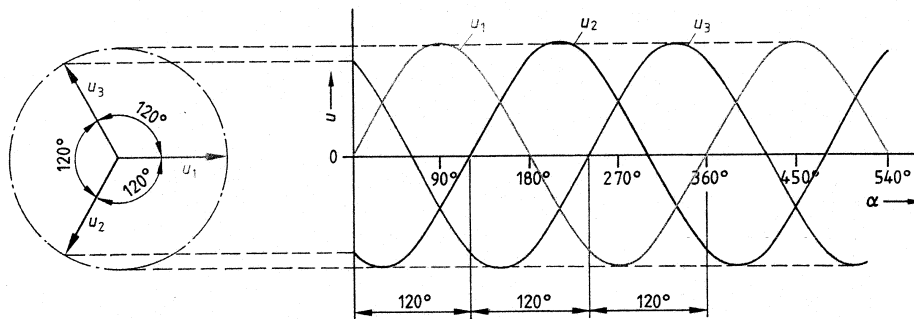
Kolmanda faasimähise elektromotoorjõud e_3 jääb e_2 -st 120° võrra maha, see tähendab, et ta on e_1 -st 120° võrra ees:

$$e_3 = E_3 \sin(\omega t + 120^\circ).$$

Nüüdisaegses elektrigeneraatoris on tavaliselt vastupidi: faasimähised on paigaldatud generaatori paigalseisvasse ossa – staatorisse, magnetväli tekitatakse aga ühtlase kiirusega pöörlevas rootoris.

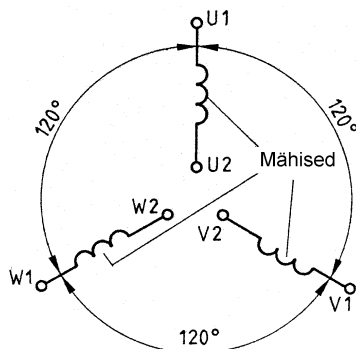


Kolmefaasilise pingete vektordiagramm ja siinuskõverad.



7.1 Generaatorimähiste ühendusviisid

Generaatori ja tarviti vaheliste ühendusjuhtmete arvu vähendamiseks võib nii generaatori kui tarviti mähised omavahel ühendada. Oluline on, kuidas seda teha. Igal mähisel on oma algus ja oma lõpp.

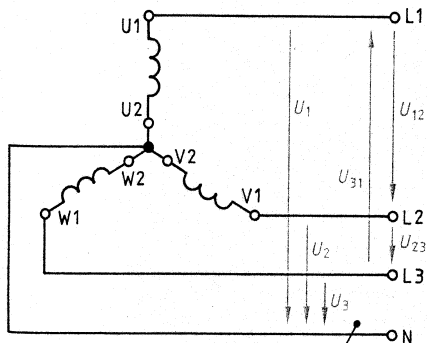


Praktikas on kasutusel kaks erinevat ühendusviisi:

- tähtühendus
- kolmnurkühendus

Tähtühendus

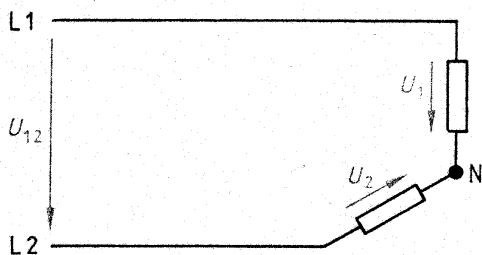
Generaatori mähiste tähtühendusel ühendatakse faasimähiste algused U1, V1 ja W1 liinijuhtmetega L1, L2 ja L3. Faasimähiste lõpud U2, V2 ja W3 ühendatakse kokku. Nii tekib neutraalpunkt. Neutraalpunktiga ühendatakse neutraaljuhe N. Kolme liinijuhtme ja ühe neutraaljuhtmega süsteemi nimetatakse neljajuhiliseks süsteemiks.



Faasimähise alguse ja lõpu vahelist pinget nimetatakse faasipingeks ning tähistatakse U_1 , U_2 ja U_3 , üldjuhul U_f . Iga liinijuhtme ja neutraaljuhtme vaheline pinge on faasipinge. Kui jätta arvestamata pingelang generaatori mähises, siis võib öelda, et faasipinge on võrdne faasimähise elektromotoorjõuga.

Faasimähiste alguste, seega ka liinijuhtmete vahelist pinget nimetatakse liinipingeks. Liinipinge tähisteks on U_{12} , U_{23} ja U_{31} , üldjuhul U_l .

Milline on liini- ja faasipingete omavaheline suhe?



Esimese faasimähise lõpp on ühendatud teise faasimähise lõpuga. Seetõttu on liinipinge võrdne faasipingete vahega

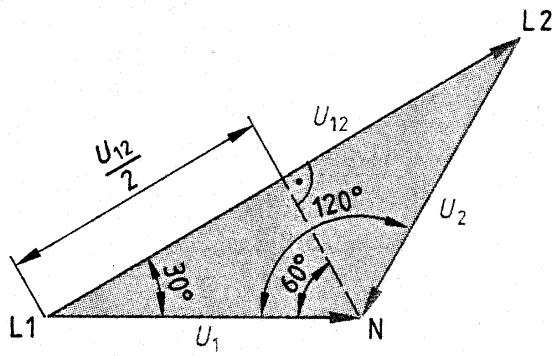
$$U_{12} = U_1 - U_2.$$

Analoogselt

$$U_{23} = U_2 - U_3,$$

$$U_{31} = U_3 - U_1.$$

Faasipingete vektorid on üksteise suhtes 120° võrra pööratud. Liinipinge saab määrata geomeetriliselt:



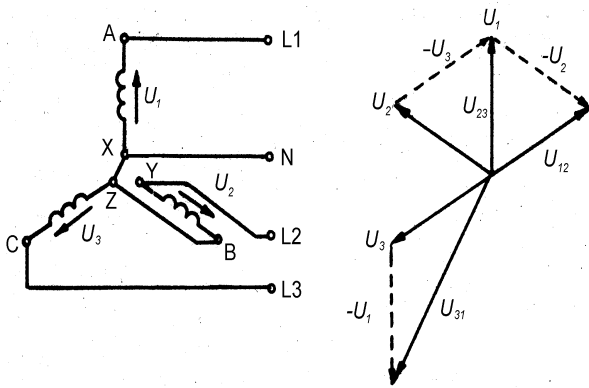
$$U_{12} = 2 \frac{U_{12}}{2} = 2U_1 \cos 30^\circ = 2U_1 \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}U_1$$

ehk üldisemalt

$$U_l = \sqrt{3}U_f.$$

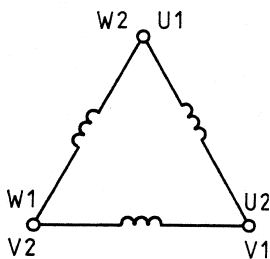
Jooniselt võib aru saada, et vektordiagrammil on liinipinge U_{12} 30° võrra faasipingest U_1 ees.

Oluline on silmas pidada, et generaatori või trafo mähised ühendatakse õigesti, see tähendab, mähiste algused liinijuhtmetega ja mähiste lõpud kokku. Kui üks mähis ühendada valesti, tekib mittesümmeetriline liinipingete süsteem. Seda illustreerib joonis, kus on näidatud faasipinged ja liinipinged kui mähis BY on ühendatud valesti. Liinipinged U_{12} , U_{23} ja U_{31} pole nüüd enam võrdsed ega moodusta ka sümmeetrilist süsteemi:



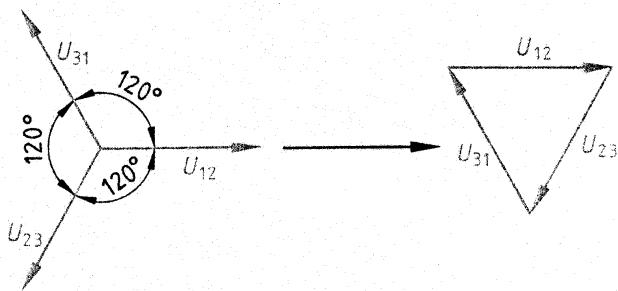
Kolmnurkühendus

Kolmnurkühenduseks ühendatakse esimese faasimähise lõpp U_2 teise faasimähise algusega V_1 , selle lõpp V_2 kolmanda mähise algusega W_1 ja kolmanda lõpp W_2 esimese mähise algusega U_1 .



Generaatori kolm faasimähist moodustavad nüüd väga väikese takistusega kinnise voluringi.

Lühisvoolu seal ei teki, sest elektromotoorjõudude summa võrdub nulliga.



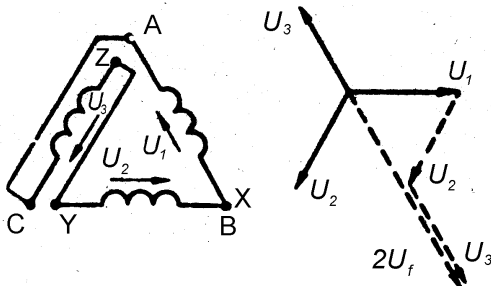
Liinipinged on kolmnurkühenduse korral võrdsed faasipingetega:

$$U_1 = U_{12}; U_2 = U_{23}; U_3 = U_{31}.$$

Üldisemalt:

$$U_f = U_1.$$

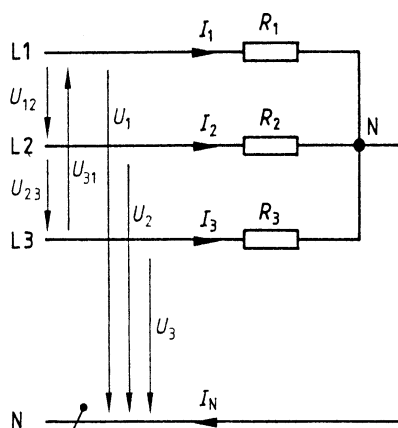
Oluline on silmas pidada, et generaatori või trafo mähised ühendatakse õigesti. Kui üks faasimähis on ühendatud vastupidi, siis elektromotoorjõudude summa vooluringis pole enam null, vaid võrdne kahekordse faasipingega.



Nii tekib suur vool ja olukord on lühisetaoline, sest mähiste takistus on väga väike.

7.3 Tarvitite tähtühendus

Olgu kolm tarvitit takistusega $r_1=R_1$, $r_2=R_2$ ja $r_3=R_3$ ühendatud liinijuhtmete ja neutraaljuhtme vahele. Neutraaljuhe tagab tarvitite klemmpinge ja generaatori faasipinge võrdsuse. Seega jäävad tarvitite töötingimused just samasugusteks kui nad on ühefaasilises ahelas.



Faasipinge

$$U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}}.$$

Liinivoolud on võrdsed vooluga tarvitites

$$I_l = I_f.$$

Vool tarvitis

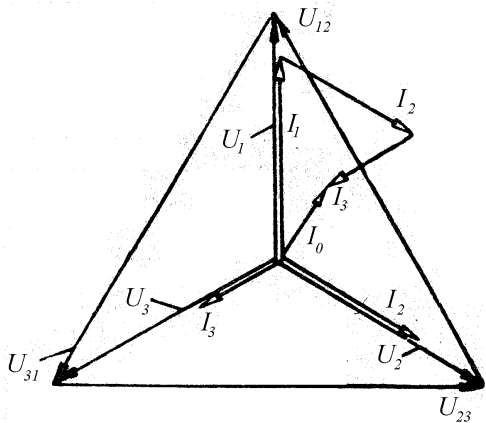
$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}; I_2 = \frac{U_2}{R_2}; I_3 = \frac{U_3}{R_3}.$$

Vool neutraaljhtmes on Kirchhoffi esimese seaduse kohaselt võrdne faasivoolude vektorite summaga

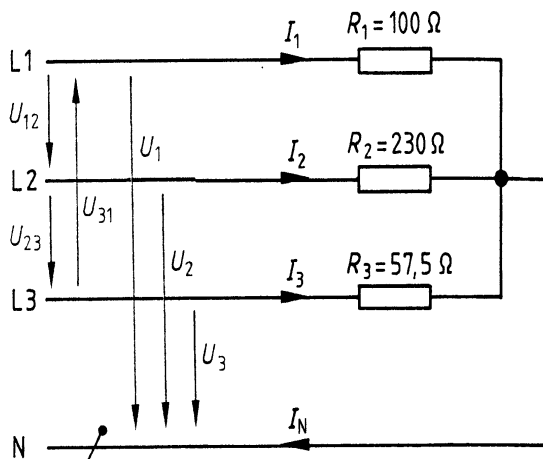
$$\vec{I}_N = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3.$$

Kui tarvitid R_1 , R_2 ja R_3 on võrdse takistusega (nn sümmeetriline koormus), siis on ka voolud I_1 , I_2 ja I_3 võrdsed ja vool neutraaljhtmes võrdne nulliga. Võiks isegi neutraaljhtme ära jätta. Seda saab teha ainult siis, kui on tagatud tõepoolest täiesti ühtlane koormus, näiteks kolmefaasiliste mootorite puhul.

Kui aga koormus pole sümmeetriline, see tähendab tarvitite takistused R_1 , R_2 ja R_3 pole võrdsed, tekib neutraaljhtmes vool.



Näide



Leida voolud tarvitites ja neutraaljhtmes.

$$U_1 = U_2 = U_3 = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230 \text{ V}$$

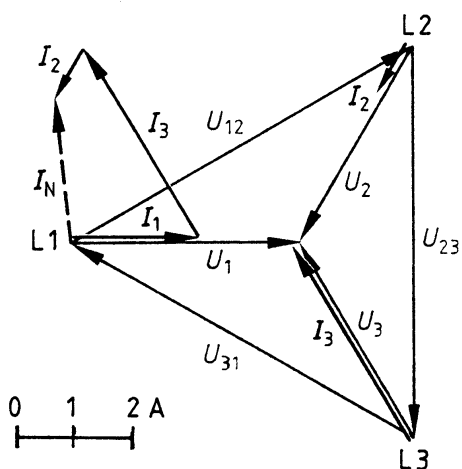
Tarvite voolud

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{230}{100} = 2,3 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{230}{230} = 1 \text{ A}$$

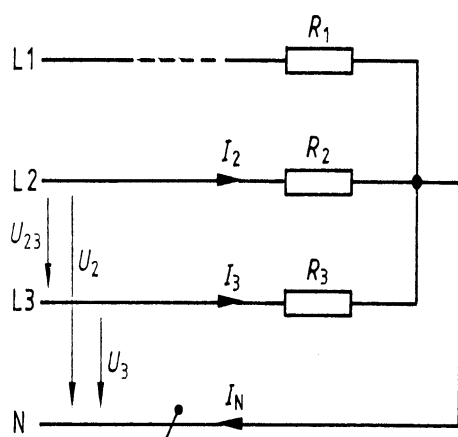
$$I_3 = \frac{U_3}{R_3} = \frac{230}{57,5} = 4 \text{ A}$$

Voolude geomeetriliseks liitmiseks kasutatakse vektordiagrammi.



Vektordiagrammil liitmise tulemusena saab neutraaljuhtme voolu väärtuseks $I_N = 2,5 \text{ A}$.

Mittesümmeetria erijuhuks on katkestus ühes faasis. See esineb näiteks ühe kaitsme läbipõlemisel.



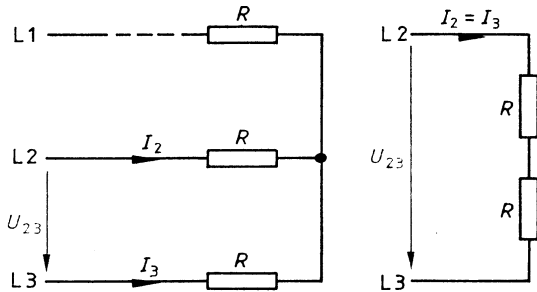
Kui neutraaljuht on terve, jääb katkestatud faas toidet. Teistes faasides jätkub töö normaalselt:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2}; I_3 = \frac{U_3}{R_3}.$$

Vool neutraaljuhtmes on võrdne voolude I_2 ja I_3 geomeetrilise summaga.

Neutraaljuhtmesse ei tohi paigaldada kaitsmeid, lüliteid ega muid seadmeid, mis võimaldaks või põhjustaks katkestust neutraaljuhtmes.

Kui süsteemis neutraaljuhti pole loob faasikatkestus sisuliselt ühefaasilise olukorra.

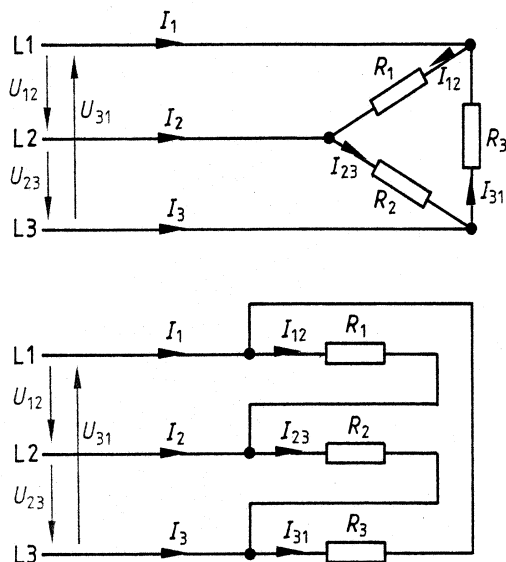


Tarvitid teises ja kolmandas faasis jäävad järjestikku ning

$$I_2 = I_3 = \frac{U_{23}}{2R}.$$

7.4 Tarvitite kolmnurkühendus

Tarvitid ühendatakse kolmnurka siis, kui nende nimipinge on võrdne liinipingega. Skeemidel on kasutusel kaks erinevat joonestusviisi – tarvitid kujutatakse üksteise suhtes kas 120° nurga all või paralleelselt:



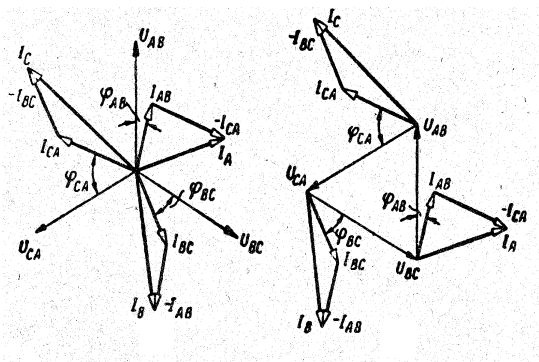
Kolmnurkühendusel on liinipinge võrdne faasipingega.

$$U_l = U_f.$$

Faasivoolud

$$I_{12} = \frac{U_{12}}{R_1}; \quad I_{23} = \frac{U_{23}}{R_2}; \quad I_{31} = \frac{U_{31}}{R_3}.$$

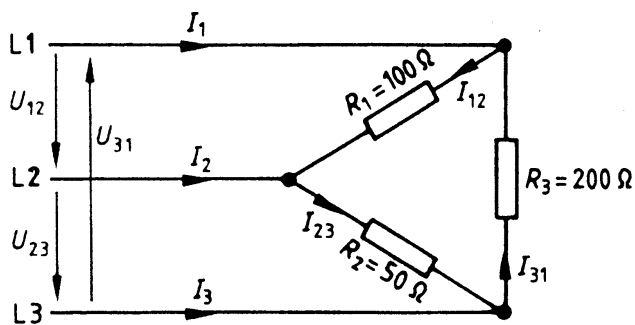
Ka vektordiagramme võib joonestada mitut moodi. Joonisel on vasakpoolsel diagrammil joonestatud vektorid ühisest alguspunktist, parempoolsel moodustavad aga pingektorid kolmnurga:



Sümmeetrilisel koormusel on voolud võrdsed ja vektordiagramm sümmeetriline. Mittesümmeetrilisel koormusel see nii ei ole.

Näide

3-400 V pingega võrku on ühendatud kolmnurka erineva takistusega tarvitid:



Faasivoolud

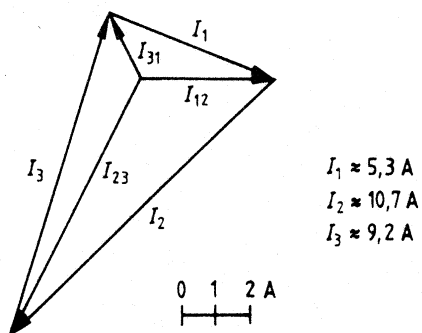
$$I_{12} = \frac{U_{12}}{R_1} = \frac{400}{100} = 4 \text{ A,}$$

$$I_{23} = \frac{U_{23}}{R_2} = \frac{400}{50} = 8 \text{ A,}$$

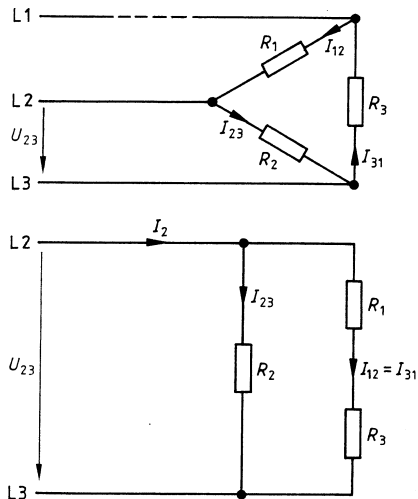
$$I_{31} = \frac{U_{31}}{R_3} = \frac{400}{200} = 2 \text{ A.}$$

Liinivoolud võib leida vektordiagrammist. Siia on mõõtkavas kantud arvatud faasivoolud ning geomeetrilisel liitmisel leitud liinivoolud

$$I_1 = 5,3 \text{ A, } I_2 = 10,7 \text{ A, } I_3 = 9,2 \text{ A.}$$



Mittesümmeetria erijuhuks on katkestus ühes liinis.



Siin on katkestus liinis L1. Nüüd jääb tarviti R_2 normaalselt töösse:

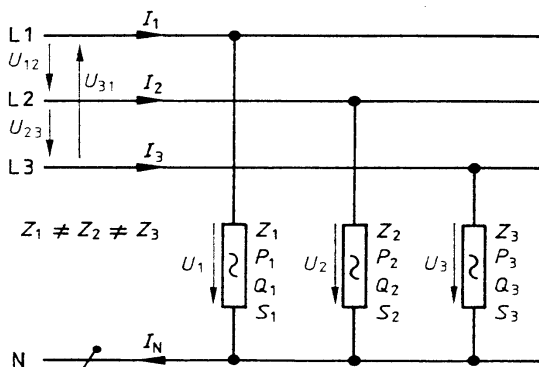
$$I_{23} = \frac{U_{23}}{R_2}.$$

Tarvitid R_1 ja R_3 on jäänud aga jadamisi ning neis on vool

$$I_{12} = I_{31} = \frac{U_{23}}{R_1 + R_3}.$$

Liinivool I_2 on I_{23} ja I_{12} geomeetriline summa.

7.5 Kolmefaasilise voolu võimsus



Mistahes ühendusel ja mistahes koormusel on kolmefaasilise voolu võimsus võrdne kolme faasi võimsuste summaga. Aktiivvõimsus

$$P = P_1 + P_2 + P_3,$$

kus P_1 , P_2 ja P_3 on faasivõimsused, mis on määratavad valemiga

$$P_f = U_f I_f \cos \varphi_f.$$

Analoogselt reaktiivvõimsus

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

$$Q_f = U_f I_f \sin \varphi_f.$$

Näivvõimsus

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Seejuures

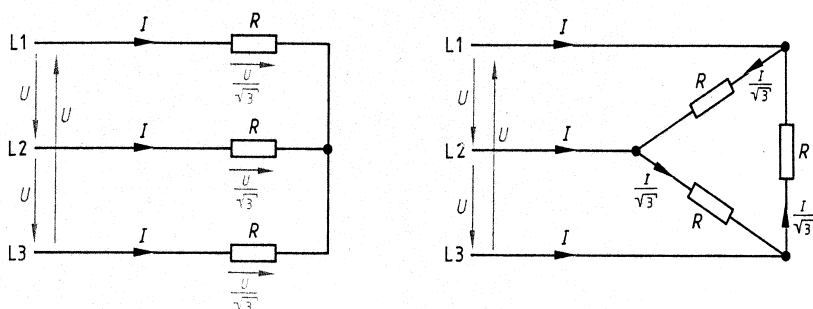
$$S \neq S_1 + S_2 + S_3.$$

Sümmeetrilisel koormusel,

näiteks kolmefaasiliste mootorite puhul, on faasivõimsused võrdsed. Siis

$$P = 3 P_f = 3 U_f I_f \cos \varphi_f.$$

Faasivoolude määramine on sageli üsna tülikas, mõõdetakse enamasti liinivoolu ja liinipinget. Seepärast arvutatakse kolmefaasilise voolu võimsust liiniväärtuste kaudu.



Tähtlülituses	Kolmnurklülituses
$U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}}$	$U_f = U_l$
$I_f = I_l$	$I_f = \frac{I_l}{\sqrt{3}}$
$P = 3 \frac{U_l}{\sqrt{3}} I_l \cos \varphi_f =$ $= \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi_f$	$P = 3 U_l \frac{I_l}{\sqrt{3}} \cos \varphi_f =$ $= \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi_f$

Tavaliselt liiniväärtustele indekseid ei kirjutata. Lihtsalt

$$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi,$$

$$S = \sqrt{3} U I$$

ning

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

NB! Ühesugustele valemitele vaatamata pole tarvis võimsus tähtühendusel võrdne võimsusega kolmnurkühenduses.

Näide

3–230 V vooluvõrku on ühendatud kolm elektriühikut, igaüks takistusega 53Ω .

Kui ahjud on kolmnurkühenduses, siis

$$U_f = U_l = 230 \text{ V},$$

$$I_f = \frac{U_f}{R_f} = \frac{230}{53} = 4,3 \text{ A},$$

$$I_l = \sqrt{3} I_f = \sqrt{3} \cdot 4,3 = 7,5 \text{ A ja}$$

$$P_\Delta = \sqrt{3} U I = \sqrt{3} \cdot 230 \cdot 7,5 = 3000 \text{ W} = 3 \text{ kW}.$$

Kui ahjud on tähtühenduses, siis

$$U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 133 \text{ V},$$

$$I_f = \frac{U_f}{R_f} = \frac{133}{53} = 2,5 \text{ A},$$

$$I_l = \sqrt{3} I_f = \sqrt{3} \cdot 2,5 = 4,3 \text{ A ja}$$

$$P_Y = \sqrt{3} U I = \sqrt{3} \cdot 230 \cdot 2,5 = 1000 \text{ W} = 1 \text{ kW}.$$

Selgub, et tähtühenduse korral on võimsus väiksem

$$\frac{P_\Delta}{P_Y} = \frac{3}{1} = 3 \text{ korda}.$$

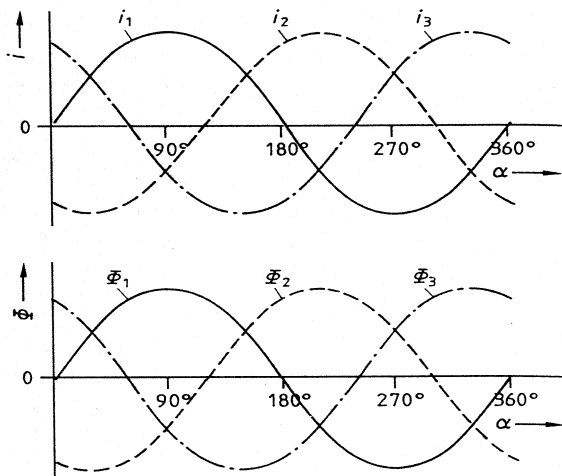
Seda asjaolu kasutatakse praktikas mõnikord võimsuse reguleerimiseks. Näiteks on asünkroonmootori käivitamisel kasutusel niinimetatud täht-kolmnurk-lülitid (Y/Δ -lülitid). Mootor ühendatakse algul tähte ja siis kolmnurka. Nii on käivitamisel voolutõuge (aga ka pöördemoment) kolm korda väiksem.

7.5 Pöördmagnetväli

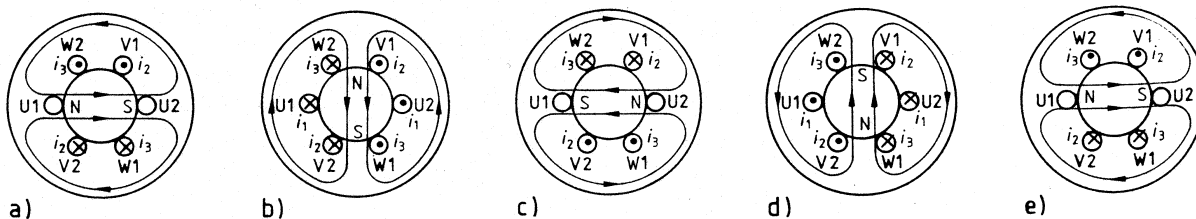
Kolmefaasilise voolu üheks tähtsamaks omaduseks on magnetvälja tekitamine, mis ruumiliselt pöörleb. Niisugust välja nimetatakse pöördmagnetväljaks ehk lihtsalt pöördväljaks.

Pöördmagnetvälja paigutatud juhe hakkab võimalusel väljaga kaasa pöörlema. Sellel nähtusel põhineb asünkroonmootori töö. Asünkroonmootor kujutab endast sümmeetrilist koormust. See tähendab, et voolud on omavahel faasis nihutatud täpselt 120° võrra, vaatamata sellele, missugune on võimsustegur $\cos \varphi$.

Iga mähise vooluga on võrdeline selle mähise tekitatud magnetvoog.



Alghetkel, kui $\alpha = 0^\circ$, on esimeses mähises U1-U2 vool $i_1 = 0$. Teises mähises on vool negatiivne, see tähendab, et ta on suunatud mähise lõpust V2 mähise alguse V1 poole. $i_2 = -0,866I_m$. Kolmandas mähises on samasuur vool, kuid positiivne, see tähendab, suunatud mähise algusest W1 mähise lõpu W2 poole. $i_3 = 0,866I_m$. Sel hetkel tekib magnetväli nii nagu on kujutatud joonisel (a) – suunaga paremale.



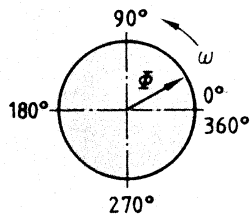
Veerandperioodi möödudes, kui $\alpha = 90^\circ$ on $i_1 = I_m$ ning kulgeb mähise algusest U1 mähise lõpu U2 poole. Ülejäänud kahes mähises on poole väiksem negatiivne vool $i_2 = i_3 = -0,5I_m$. I_2 kulgeb endiselt mähise lõpust V2 mähise alguse V1 poole, i_3 on vahepeal muutnud suunda ja voolab nüüd samuti mähise lõpust W2 mähise alguse W1 poole. Voolude magnetväljad liituvad nii, nagu näidatud joonisel (b). Summaarne magnetväli on suunatud allapoole.

Järgmise veerandperioodi möödudes, kui $\alpha = 180^\circ$, on esimeses mähises U1-U2 jälle vool $i_1 = 0$. Alghetkega ($\alpha = 0^\circ$) võrreldes on voolud teises ja kolmandas mähises muutnud suunda. Teises mähises kulgeb vool $i_2 = 0,866I_m$ algusest V1 mähise lõpu V2 poole, kolmandas aga on vool $i_3 = -0,866I_m$ mähise lõpust W2 mähise alguse W1 poole. Tekkiv magnetväli on vastassuunaline esialgsele (kui $\alpha = 0^\circ$).

Kui $\alpha = 270^\circ$ on negatiivse maksimaalväärtusega $i_1 = -I_m$, see tähendab, et kulgeb mähise lõpust U2 mähise alguse U1 poole. Ülejäänud kahes mähises on nüüd positiivne vool $i_2 = i_3 = 0,5I_m$, see tähendab, et vool on suunatud mähise algusest V1 ja W1 vastavalt mähise lõpu V2 ja W2 poole. Tekkiv magnetväli on jälle pöördunud 90° võrra ja on nüüd suunatud ülespoole (joonisel d).

90° pärast on $\alpha = 360^\circ$, see tähendab, et kõigis mähistes on täpselt samasugused voolud kui alghetkel ja magnetväli on nüüd jälle suunatud paremale (joonis e).

Võib näidata, et tekkiv magnetväli pöörleb vooluga sama sagedusega.



Niisuguses magnetväljas hakkab magnetnõel pöörlema.

