

Tehnilised õppevihikud.

V. 11.

Käsikirja
õigustega.

Keerdvoolu
seadused.

Elektrotehnika VIII.

Dipl.-ins. K. Grimm.

Autori kirjastus.
Tartus 1933.

TEHNILISED ÕPPEVIHIKUD.

Vihik 11.

Käeikirja

õigustega.

K E E R D V O O L U
S T A D U S E D.

Elektrotehnika VIII.

Dipl.-ins. K.Grimm.

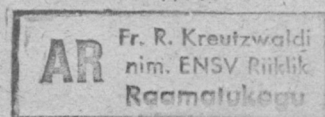
Autori kirjastus.

Tartus 1933.

K.Grimm i paljundus.

Tartus Tähe 20

Ar933
Grimm



21461

A. Grimm i palindromid.
Tartus Tõnis 20

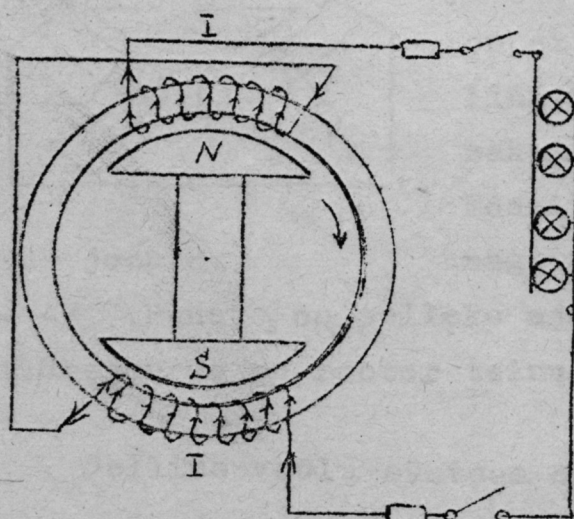
- II -

S i s u .

Keerdvoolu mõiste	lhp. 1
Kehefaasilise voolu pingelangus	7
Kolmefaasiline keerdvool	8
Kolmnurkühendus	14
Kolmefaasilise keerdvoolu võimsus	17
Keerdvoolu pingelangus	19
Keerdvoolu võimsuse mõõtmised	21
Aheldatud keerdvoolu tähtsus	28

K e e r d v o o l u m õ i s t e .

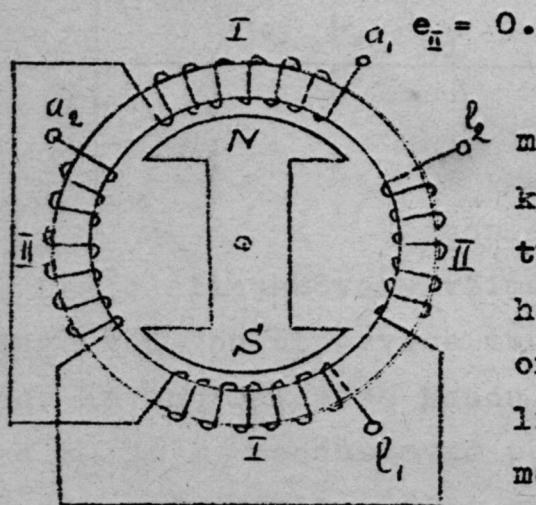
Vahelduva voolu tekitamiseks ehitatakse vahelduva voolu generaatorid. Nagu iga el.-voolu masin, koosneb ka vahelduva voolu generaator kahest peaosast: magnetvälja tekitajast /magnetpoolused ja masina mähisest, kus indutseerub el.-vool /ankur/. Enamasti ehitatakse vahelduva voolu generaatorid nii, et ankur on seisev osa - staator, ja magnetpoolused - tiirlev osa - rootor. Selline vahelduva voolu generaator on skemaatiliselt antud joon. 1. Tiirlevate pooluste N ja S magnetilised - tungjooned lõikavad ankru mähiste I - I juhtmeid ja indutseerivad neis vahelduvat voolu, mille voolamise sihti võime kindlaks teha parema käe reegli järgi.



joon. 1.

Generaatori raudosade paremaks ära kasutamiseks tekkis - mõte, mähkida kahe mähise asemel neli, mis paarikaupa oleksid järjestikku ühendatud /joon. 2/.

Seega saame generaatorilt üldiselt kaks iseseisvat vahelduvat voolu, s.t. tõstame generaatori võimsust kahekordselt. Nagu näha, on mõlemad voolud ühesuguse sagedusega ja järelikult ühise perioodi kestusega; väljaehituse tõttu on vooludevahel ainult nihkenurk $\varphi_{I-II} = 90^\circ$. Sellest järeldub, et indutseeritud pingete e_I ja e_{II} momentaansed suurused ei muutu korraga ühesuguselt, vaid kui $e_I = e_{Im} \sin \omega t$, siis e_{II} , mis temast, nagu näha mõlema voolu pingete siinuskõvera diagrammist, maha jääb 90° võrra võrdub nulliga.



joon.2.

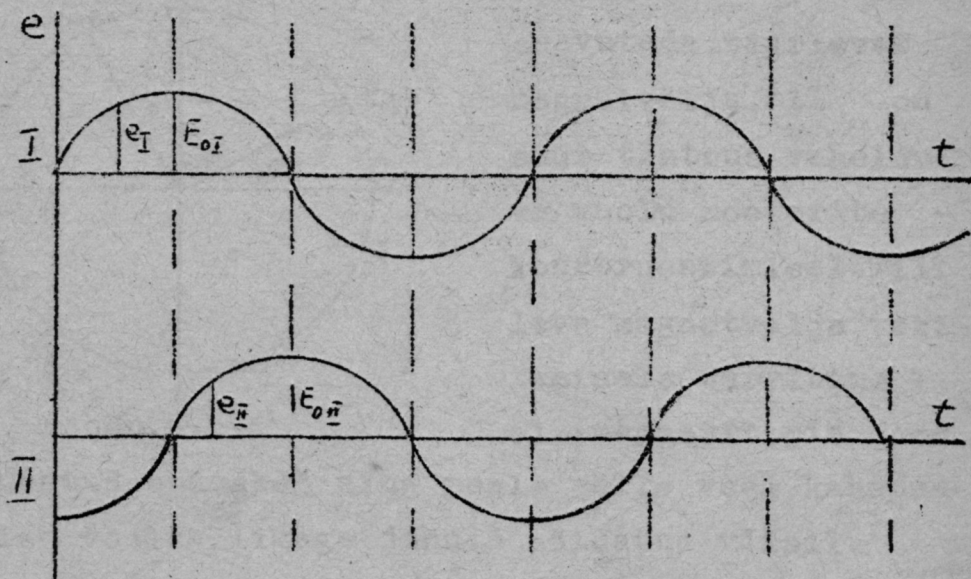
Rootori edasipöörlemisega kahaneb e_I ja kasvab e_{II} . Kui rootor satub oma pooluste keskkohaga mähis II vastu, e_I on siis kahanenud nullini, kuna e_{II} on jõudnud maksimumini, s.t. $e_{II} = E_{or}$. Edasi e_I hakkab kasvama negatiivses sihis, kuni

$e_I = -E_{or}$, kuna e_{II} on selleks ajaks kahanenud nullini. Seejuures on rootor teinud täpsalt poolpöörde.

Selline voolu süsteem on tuntud kahefaasilise voolu nime all. Harilikult on kahefaasili-

se generaatori mähised I ja II ehitatud ühesuguse keerdude arvuga, mille tõttu tekivad ka võrdsed momentaansed ja efektiivsed pinged :

$$E_{oI} = E_{oII} \quad \text{ja} \quad e_I' = e_{II}'$$



joon.3.

Peale siinuskõvera võime kahefaasilise voolu pinge või voolutugevuse muutumise seadust kujutada ka noolraadiuse kaudu. /joon.4/. Noolraadiused E_{oI} ja E_{oII} moodustavad püsiva nurga 90° ja tiirlevad kaasaegselt. Jälle on nende projektsioonid y-teljele vastavad momentaansed pinged e_I ja e_{II} , s.t. kui

$$e_{II} = E_{oII} \sin \alpha,$$

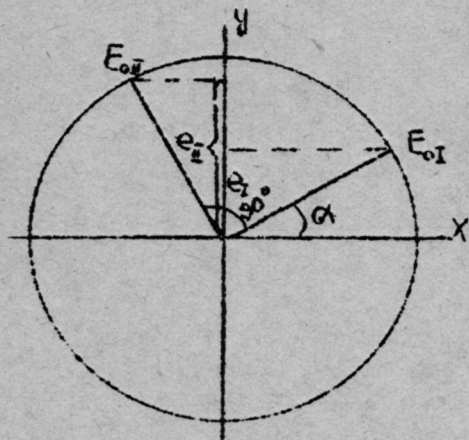
siis

$$e_I = E_{oI} \sin / \alpha + 90^\circ / = E_{oI} \cos \alpha$$

Samasuguse seaduse järgi muutuvad ka kahefaasilise voolu voolutugevused :

$$i_I = J_{oII} \sin \alpha \quad \text{ja}$$

$$i_{II} = J_{oII} \sin (\alpha + 90^\circ)$$



joon.4.

Kahefaasilise voolu abil on võimalik saavutada tiirlevat magnetvälja, mil on suur tähtsus vahelduva voolu mootorite - konstrueerimisel. Tiirleva magnetvälja tekitamiseks tarvitame 4. el.-magnetit, mis on

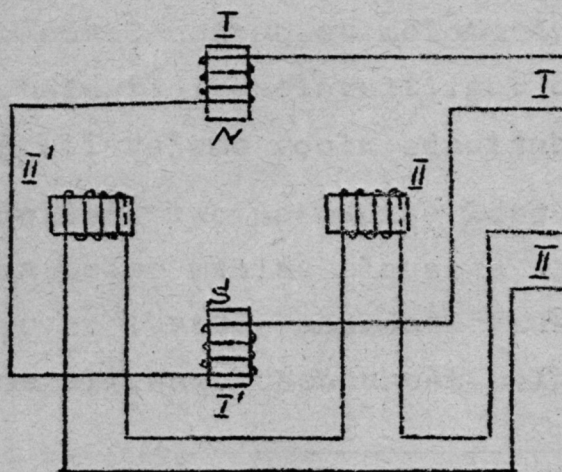
ühendatud omavahel ning peale selle veel kahefaasilise vooluallikaga joon.5 näidatud viisil.

Voolutugevuse muutumise tagajärjel on mähiste magnetvälja tugevused ka muutuvad suurused, sest nagu me teame, on

$$H = \frac{0,4\pi \sum i}{l}, \quad \text{kus } i \text{ on va-}$$

helduva voolu juhul mõeldud momentaanse voolutugevusena. Sellega koos iga magnetpooluse tugevus on ka muutuv suurus. Nii, kui $i_I = J_{oI}$, siis on magnetil I N poolus ja tema tugevus maksimaalne, I' on S ja ka maksimaalse tugevusega. Sel ajal on aga $i_{II} = 0$, magnetite II ja II' mähised vooluta - ja nende pooluste tugevused nullid. Edasi i_I hakkab kahanema ja temaga koos kahanevad ka magnetite I ja I' pooluste tugevused, selle vastu kas-

vab aga voolutugevus I ja magnetpooluste II ja II' tugevused. Siinjuures on II - N ja II' - S poolus. Kui magnetitel II ja II' pooluse tugevused -



joon.5.

hetab oma kohta, liikudes aga ikka samas sihis.

Sama teeb ka S poolus. Tekib nagu pöörlev pooluste paar ning seega tiirlev ehk pöörlev magnetväli. Kui sellisesse magnetvälja asetada magnetnõel, siis ta hakkab pöörlema, pöörleva magnetvälja nurkkiirusega.

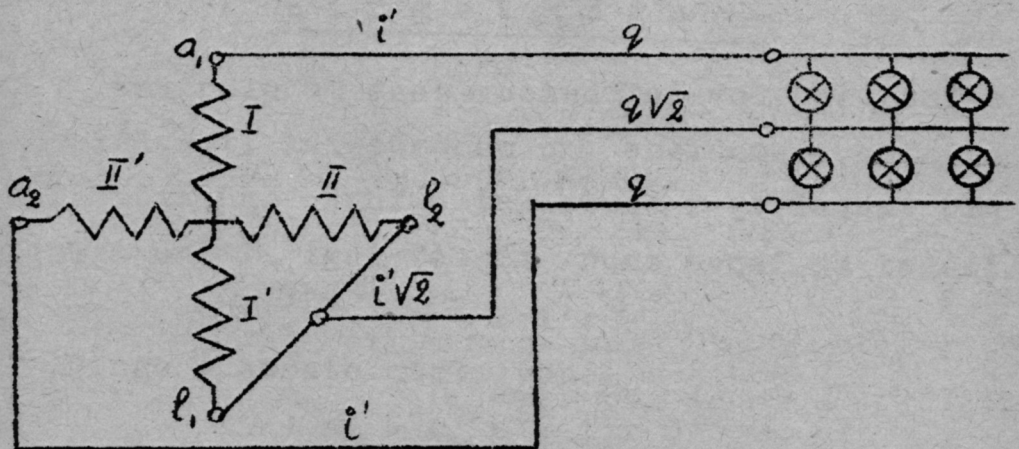
Ühefaasilise vahelduva vooluga ei saa erilise sisseseadeta üldse tiirlevat magnetvälja, kuna kahe-, kolme- rohkemafaasilisi vooli on kerge rakendada viimase saavutamiseks. Sellest omadusest on viimased saanud oma nime "keerdvoolud" ehk "pöörlevad voolud". Elektrotehnikas on põhimõtte-

on saanud maksimaalseteks, siis nad kaanevad edasi jälle nullini, kuni I ja I' pooluste tugevused kasvavad; nüüd aga on I-S ja I' -N poolus. Me näeme, et N poolus muutudes tugevuselt 4 korda perioodi jooksul, vahetab oma kohta, liikudes aga ikka samas sihis.

liselt iga voolu süsteem, mille läbi võib saada pöörlevat magnetvälja, keerdvool, olgu ta siis kahe-, kolme- või rohkemafaasiline. Praktikas aga harilikult nimetatakse keerdvooluks ainult kolme-faasilist voolu.

Joon.2 näitab, et mõlemaid vooli võib kasutada, täiesti iseseisvalt, iga oma välisaheliku tarvis. Nii vajame voolu edasijuhtimiseks 4. juhet.

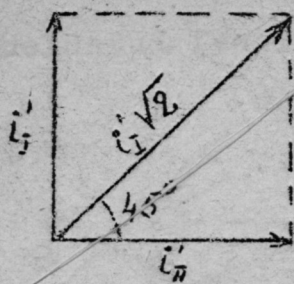
Esimese masina mähise lõppu on võimalik ühendada teise mähise algusega /joon.6/. Nii sugune süsteem on tuntud "aheldatud kahefaasilise voolu" nime all. Nagu ühendusest selgub, on sel juhul või-



joon.6.

malik läbi saada kolme juhtmega, kus keskmises voolab I ja II faasi voolutugevuste geomeetriline summa. Viimase leidmiseks ehitame voolutugevuste diagrammi /joon.7/. Et $i'_I = i'_{II}$ ja nende faasinurk masina mähise asendi tõttu on 90° , siis nad

moodustavad diagrammis ruudu küljed. Keskmises



joon.7.

juhtmes on voolutugevus nende
geomeetriline summa või graa-
filiselt arvutatult ruudu dia-
gonaal $i' = i'_I \sqrt{2} = 1,41 i'_I$.
Sellele vastavalt peab ka kesk-
mise juhtme ristlõikepind ole-
ma $\sqrt{2} = 1,41$ korda suurem; kui

kummagi äärmise juhtme lõikepind on $q_I = q_{II}$, siis
keskmise oma : $q = q_I \sqrt{2} = 1,41 q$.

K a h e f a a s i l l i s e v o o l u p i n g e l a n g u s .

Kui mõlemad faasivoolud leiavad kasutarnist
eraldi, s.t. kui süsteem on aheldamata, siis tä-
histades ühe juhtme takistuse r -ga, leiame pin-
gelanguse δ' igas faasis /juhe eadsi ja tagasi/:

$$\delta' = 2 i' r$$

Pinge juhtmete otste vahel :

$$e_I' = e_0' - 2 i' r ,$$

kus e_0' on ühes masina faasimähises indutseeritud
EMJ.

Aheldatud süsteemis on äärmistes juhtme-
tes pingelangus :

$$\delta_I' = \delta_{II}' = i_I' r_1$$

ja keskmises juhtmes :

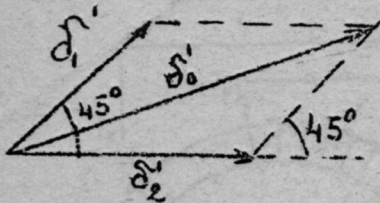
$$\delta_2' = i_I' r_2 \sqrt{2}$$

Pingelanguse nooled nooldiagrammis langevad ühte voolunooltega /joon.8/ ja kogu pingelangus ühes aheldatud faasis on :

$$\delta'_0 = \sqrt{\delta_1'^2 + \delta_2'^2 + 2\delta_1'\delta_2'\cos 45^\circ}$$

Kui r_2 on valitud nii , et

$$\delta_1' = \delta_2' \quad \text{ja} \quad \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} ,$$



siis on
$$\delta'_0 = \sqrt{2\delta_1'^2 + 2\delta_1'^2 \frac{\sqrt{2}}{2}} = \delta_1' \sqrt{2 + \sqrt{2}} \approx 1,85 \delta_1'$$

joon.8.

või asendades :

$$\delta'_0 = 1,85 \frac{1}{I} r_I$$

Et $\delta_1' = \delta_2'$, peab täidetud olema tingimus :

$$\frac{1}{I} r_1 = \frac{1}{I} r_2 \sqrt{2} \quad \text{või} \quad r_1 = r_2 \sqrt{2} .$$

s.t.

$$r_2 = \frac{r_1}{\sqrt{2}}$$

Et aga

$$r_1 = \frac{\rho_1}{g_1} \quad \text{ja} \quad r_2 = \frac{\rho_1}{q_2} .$$

siis on
$$g_2 = q_1 \sqrt{2} = 1,41 q_1 .$$

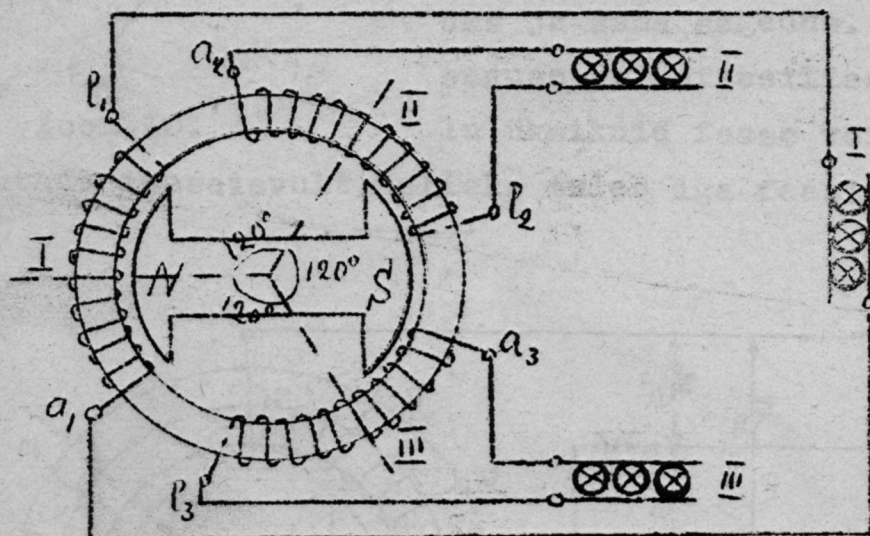
Kahefaasiline keerdvool tuleb praktikas harva ette.

K o l m e f a a s i l i n e k e e r d v o o l .

Joonisel 1 /lhk.1/ kujutatud masina võimsust on võimalik kolmekordselt suurendada tema kere mõõte muutmata, kui ehitame tema staatorile kolm iseseisvat mähist /joon.9/. Siinjuures moodustavad mähiste keskteljed omavahel 120° nurga ning

on valmistatud sama keerdude arvuga, mille taga -
järjel ka mähistes indutseeritud EMJ-d e' -d on
omavahel võrdsed :

$$e'_{oI} = e'_{oII} = e'_{oIII}$$



joon.9.

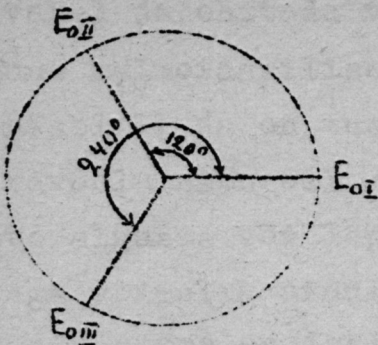
Korrutades iga e' -i $\sqrt{2}$ -ga, saame :

$$e'_{oI} \sqrt{2} = e'_{oII} \sqrt{2} = e'_{oIII} \sqrt{2} = E_{oI} = E_{oII} = E_{oIII},$$

s.t., et maksimaalsed pinged on ka omavahel võrd-
sed. Nende noolraadiuse diagramm on antud jooni -
sel 10. Et rootori poolus satub mähiste keskkoha
vastu iga $\frac{1}{3}$ tiiru pärast, siis ei teki ka mak-
simaalsed pinged mitte korruga, vaid on edasi ni-
hutatud üksteisest aja mõttes 120° võrra. Faasi -
devaheline nurk $\varphi = 120^\circ$. Teiste sõnadega : esime-

se faasi periood on edasi nihutatud teise faasi

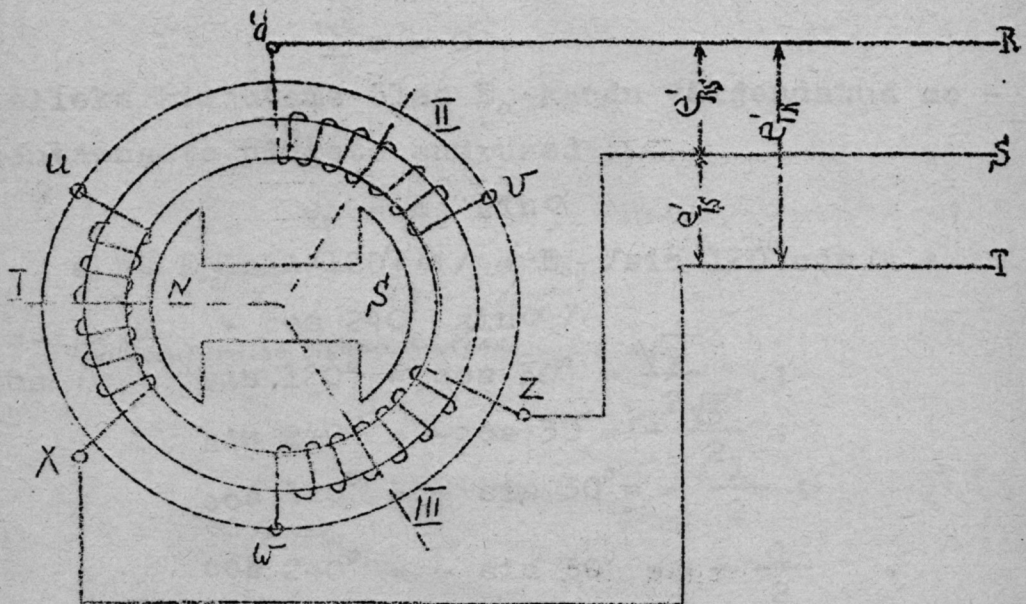
omast 120° ja kolmanda perioodist 240° võrra/joon .



joon.10.

11/.Et rootor /magnetid / on ühine, siis valitseb ka loomulikult igas mähises üks ja sama sagedus. Nii -

suguse kolmefaasilise voolu üksikuid faase võib ka-



joonis 11.

edasijuhtimiseks tõmmata kaks juhet, järelilikult terve generaatori kohta 6. Selline kolmefaasilise voolu võrk osutub aga kalliks, seepärast tekkiski

mõte ühendada masina mähiste algused või lõpud omavahel ja ehitada välisvõrk kolme juhtmega. Nii sugune kolmefaasilise voolu süsteem on näidatud joonisel 11 ja on tuntud tähtühenduses aheldatud keerõvoolu nime all /verkketteter Drehstrom/. Mähiste alguste või lõppude omavaheline ühendamine on aga võimalik ainult juhul, kui momentaansete pingete summa on igal silmapilgul null, s.t. :

$$e_I + e_{II} + e_{III} = 0$$

Kui eelpool-ülesseatud tingimused on täidetud, siis on võimalik tõestada, et :

$$\sum_1^3 e = 0 .$$

Selleks kirjutame üles E_0 kaudu väljendatud momentaansete pingete suurused :

$$e_I = E_{oI} \sin \alpha$$

$$e_{II} = E_{oII} \sin /120^\circ + \alpha / = E_{oII} / \sin 120^\circ \cos \alpha +$$

$$e_{III} = E_{oIII} \sin /240^\circ + \alpha / = E_{oIII} / \sin 120^\circ \cos \alpha +$$

kus : $E_{oIII} = \dots$ põhjendamise vigade hulgas.

$$\sin 120^\circ = \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} ;$$

$$\sin 240^\circ = -\cos 30^\circ = -\frac{\sqrt{3}}{2} ;$$

$$\cos 120^\circ = -\sin 30^\circ = -\frac{1}{2} ;$$

$$\cos 240^\circ = -\sin 30^\circ = -\frac{1}{2} .$$

Asendades ja liites saame :

$$e_I + e_{II} + e_{III} = E_{oI} \sin \alpha + E_{oII} / \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha - \\ - \frac{1}{2} \sin \alpha / + E_{oIII} / - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha - \frac{1}{2} \sin \alpha /$$

Et aga $E_{oI} = E_{oII} = E_{oIII} = E_0$, siis kirjutame :

$$e_I + e_{II} + e_{III} = E_0 \left[\frac{\sin \alpha}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha - \frac{1}{2} \sin \alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha - \frac{1}{2} \sin \alpha \right] /$$

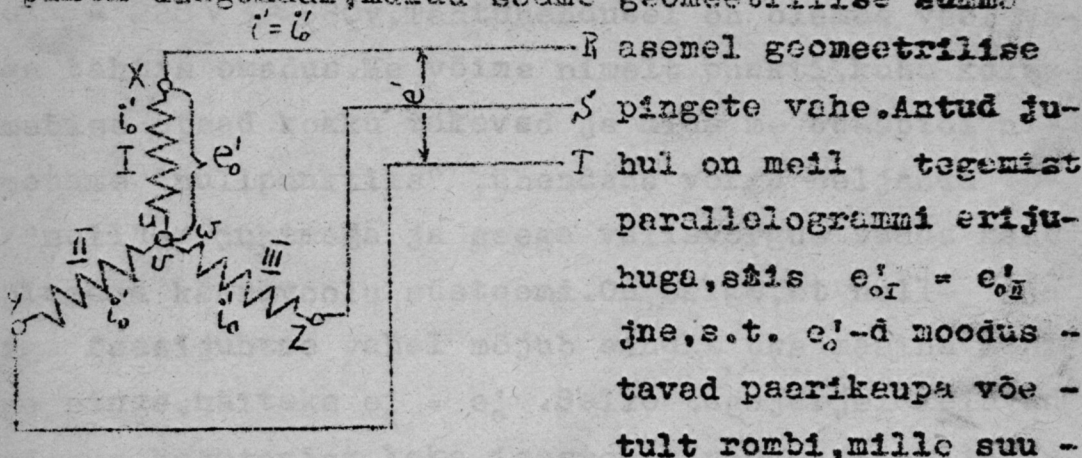
Nagu näha, koonduvad sarnaselt allakriipsutatud suurused ning kogu avaldis sulgudes võrdub nulliga. Kui aga üks tegureid on null, siis on ka korruktis null ja

$$e_I + e_{II} + e_{III} = 0$$

s.t., et kolmefaasiline keerdvool laseb ennast aheldada tähtühenduse süsteemi. Viimane on saanud oma nimetuse lihtsustatud skeemimärgist , mis kujutab enesest kolmesarvelist tähte.

Masina lülituskilbile tuuakse kõige kolme mähise otsad ja tähistatakse algused tähtedega u, v ja w, kuni lõpud on märgitud x, y, z-ga. Tähtühenduses aheldamiseks ühendame omavahel u, v, w ning x, y, z-st tõmbame juhtmed võrku, tähistades nad rahvusvahelise kokkuleppe põhjal RS ja T /v. joonis 11/. Masina mähiseid I, II, III nimetame "faasimähisteks" ja neis-indutseeritud pingeid e'_{oI} , e'_{oII} ja e'_{oIII} "faasipingeteks". Nagu näha lihtsustatud skeemist /joon. 12/, on faasipinged geomeetriliselt paarikaupa liidetud, mille tõttu juhtmetevahelised pinged e'_{RS} , e'_{ST} ja e'_{TR} on vastavalt e'_{oI} ja e'_{oII} , e'_{oII} ja e'_{oIII} , e'_{oIII} ja e'_{oI} resultantpinged. Nende saamiseks tuleb joon. 13 näidatud faasipinged parallelogrammi seaduse järgi paarikau-

pa liita, kus arvesse tuleb võtta parallelogrammi pikem diagonaal, muidu soame geomeetrilise summa



joon.12.

rema diagonaali pool:

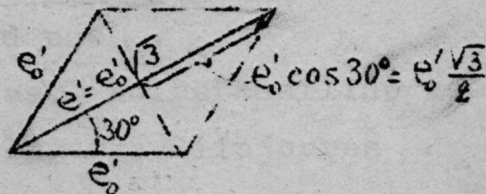
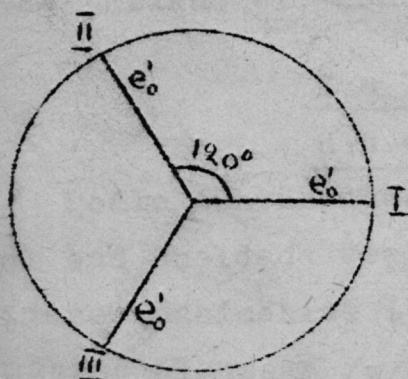
$$\frac{e'_R}{2} = \frac{e'_0 \cos 60^\circ}{2} = e'_0 \cos 30^\circ = e'_0 \frac{\sqrt{3}}{2}$$

ja terve diagonaal, mis antud juhul kujutab juhtmevahelist pinget :

$$e'_{RS} = e'_0 \sqrt{3}$$

Samuti $e'_{ST} = e'_0 \sqrt{3}$ ja $e'_{TR} = e'_0 \sqrt{3}$.

On näiteks ühes mähises indutseeritud faasipinge



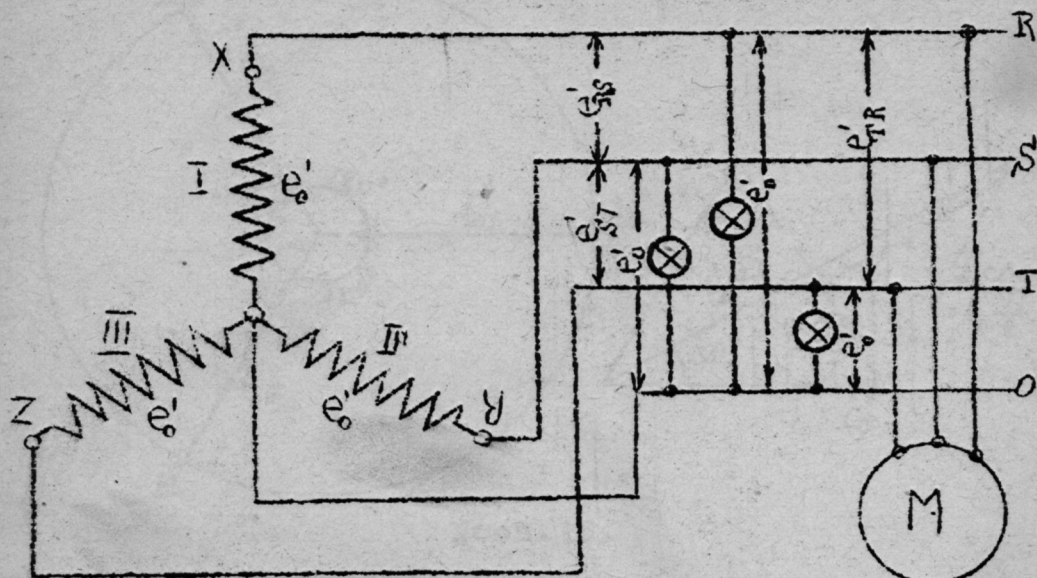
joon.13.

$e'_0 = 220$ v., siis on võrgus juhtmetevaheline pinge
 $e'_{RS} = 220\sqrt{3} \approx 380$ v. Tähtühendusel on olemas veel vä-
ga tähtis omadus. Me võime nimelt punkti, kuhu kolme
mähise otsad kokku tukevad ja mida me edaspidi ni-
metame "nullpunktiks", ühendada võrgu neljanda -
/"null"-/ juhtmeäga ja seega välisvõrgus saada kahe
pingega keerdvoolu süsteemi. On selge, et null- ja
iga faasijuhtme vahel mõjub ainult üks masina mähise
pinge, näiteks $e'_R = e'_0$. Selle tagajärjel leiavad
võrgus kasutamist kaks isesugust pinget : null- ja
faasijuhtme vahel madalam, näiteks Tartu linna vör-
gus, $e'_0 = 220$ v. ja faasijuhtmete vahel $e'_{Rr} = 380$ v. .
Esimest tarvitatakse el.-valgustuseks, hõõglampide
toitmiseks, kuna teine leiab rakendust el.-mootori-
tel /joon.14/. Nulljuhtmeta kolmefaasilise voolüsüs-
teem on tarvitusel puht jõuülekandel, s.t. võrkudes
kuhu on lülitatud ainult mootorid, ning peale selle
kaugematel liinidel; sel juhul enamasti kõrgepinge
ga. Ka üksikud el.-raudteed töötavad temaga.

K o l m n u r k - ü h e n d u s .

Peale tähtühendust laseb kolmefaasiline keerd-
vool end aheldada veel kolmnurka. Siinjuures on
esimese faasimähise lõpp /x/ ühendatud teise faa-
simähise algusega /w/ ja kolmanda lõpp /z/ esimese
algusega /u/. Niisugune aheldamisviis on teostatav

juhul, kui kolme faasi momentaansete voolutugevuste



joon.14.

summa on igal silmapilgul võrdne nulliga. Seda on kerge tõestada, arvesse võttes et

$$\frac{e}{r} = 1 \quad \text{ja} \quad e_I + e_{II} + e_{III} = 0, \text{ siis}$$

järelikult :

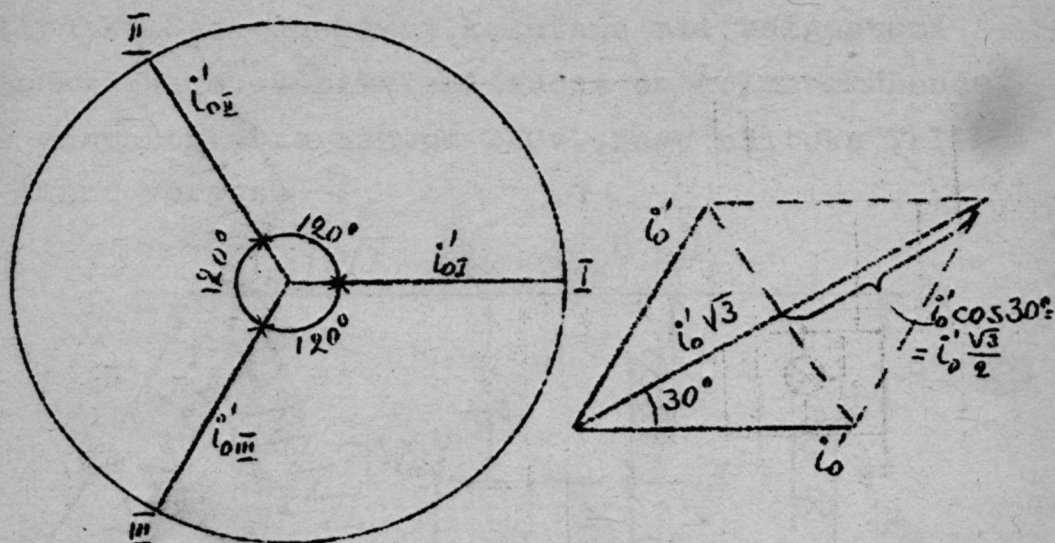
$$\frac{e_I}{r} + \frac{e_{II}}{r} + \frac{e_{III}}{r} = 0 \quad \text{või}$$

$$i_I + i_{II} + i_{III} = 0.$$

Kolmnurka sheldatud kolmefaasilise keerdvoolu skeemi kujutab joon.15. Skeemist helgub, et antud juhul ka iga kahe välisvõrgu juhtme vahel valitseb generaatori ühes mähises indutseeritud faasipinge e'_o .

S.t., süsteem laseb tarvitusele võtta ainult ühe pinge, näiteks $e'_{R's} = e'_o$ või jälle $e'_{T'R} = e'_o$.

Kuna tähtühenduses igas võrgu juhtmes, välja ar-



joon.15.

vatud nulljuhe, valitses mähise voolutugevus I_0' .
 siis on kolmnurkühenduses voolutugevus välisjuht -
 metes $\sqrt{3}$ korda mähise voolutugevusest suurem :

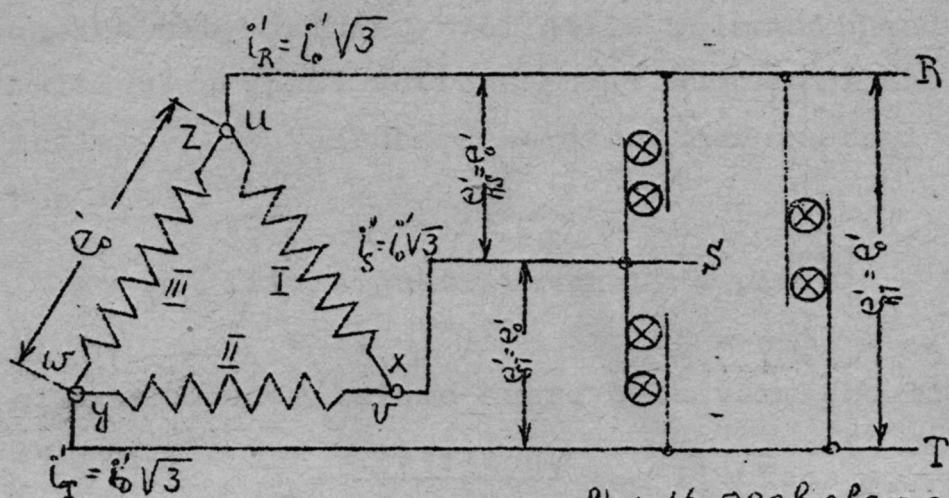
$$I_R' = I_0' \sqrt{3} .$$

Selle valemi saame kergesti ,koostades voolude
 nooldiagrammi /joon.16/. Välisvõrgu juhtme voolutu-
 gevus on kahe faasimähise voolutugevuste geomeetri-
 line summa. Voolutugevuste parallelogramm muutub rom-
 biks külgedega I_0' ja pikema diagonaaliga I_R' või I_2'
 või I_T' , mis võrdub :

$$I_R' = 2I_0' \cos 30^\circ = I_0' \sqrt{3} .$$

Võrreldes tähtühendusega saame seega suuremad
 voolutugevused ja keskmiselt ka $\sqrt{3}$ korda suurema

ristilõikepinnaga faasijuhtmed. Selle asemel aga vabaneme nulljuhtmest, sest kolmnurkühendusel puudub nullpunkt. Seda ühendust kasutame nii valgustami - seks kui ka mootoritel. Linnades on kolmnurkühenduses enamasti ette nähtud 220v., nagu näiteks Tallinna linna võrgus.



joon. 15.

Phk. 16 peab olema
joon 16! mitte 15!

K o l m e f a a s i l i s e k e e r d - v o o l u v ö i m s u s .

Vahelduva voolu teooriast on teada, et vahelduva voolu võimsus

$$W = e' i' \cos \varphi$$

Kui meil tegemist on kolme faasilise keerdvooluga, mille kõik faasid on ühtlaselt koormatud ning süsteem aheldamata, siis võrdub tema võimsus ühe faasi kolmekordse võimsusega:

$$W_3 = 3W = 3e'_0 i'_0 \cos \varphi$$

Kui aga iga faas on koormatud isesuguselt, siis on keerdvoolu koguvõimsus :

$$W_3 = W_1 + W_2 + W_3 = e'_1 i'_1 \cos \varphi_1 + e'_2 i'_2 \cos \varphi_2 + e'_3 i'_3 \cos \varphi_3$$

Tegelikult tarvitatakse kolmefaasilist keerdvoolu väga harva aheldatult, vaid peaaegu alati aheldatult, kas täht- või jälle kolmnurkühenduses. Esialgul arvesse võttes ainult sümmeetrilist koormamist, saame tähtühenduse juhul generaatori suhtes :

$$W_A = 3e'_0 i'_0 \cos \varphi$$

Et aga liinis juhtmetevaheline pinge

$$e' = e'_0 \sqrt{3} \quad \text{ja} \quad i'_0 = \frac{e'_0}{\sqrt{3}},$$

siis esendades leiame keerdvoolu võimsuse liini suhtes :

$$W_A = \frac{3e'_0 i'_0 \cos \varphi}{3} = e' i' \sqrt{3} \cos \varphi,$$

kus $i' = i'_0$ ja $e' = e'_0 \sqrt{3}$.

Sümmeetriliselt koormatud kolmnurkühendusega - kolmefaasiline keerdvool annab generaatori võimsuse valemi :

$$W_A = 3e'_0 i'_0 \cos \varphi$$

Liini suhtes aga :

$$W_A = e' i' \sqrt{3} \cos \varphi,$$

kus nüüd $i' = i'_0 \sqrt{3}$ ja $e' = e'_0$.

Ebasümmeetriliselt koormatud täht- või kolmnurkahelduse võimsuse valem omab eelpooltoodud valemi kuju :

$$W_{\lambda} = W_1 + W_2 + W_3 = e_1' i_1' \cos \varphi_1 + e_2' i_2' \cos \varphi_2 + e_3' i_3' \cos \varphi_3 ,$$

kus pingeid e_1' , e_2' ja e_3' tuleb lugeda vastava liinijuhtme ja nullpunkti vahelt. Kui viimane liinis - või masina juures ei ole kättesaadav, siis tuleb ta luua kunstlikult abitakistuste kaudu /v. joonis 19/

K e e r d v o o l u p i n g e - l a n g u s .

Sümmeetrilise koormamise jaoks saame pingelanguse ühes juhtmes, kui tema takistus on r_1 :

$$\delta_1' = i_1' r_1$$

Teise ja kolmanda juhtme pingelangused on võrdsed esimesega :

$$\delta_1' = \delta_2' = \delta_3' = i_1' r_1 = i_1' r_2 = i_1' r_3$$

Kogu pingelanguse leidmiseks tuleb üksikud pingelangused geomeetriliselt kahekaupa liita. Kahekaupa seepärast, et nad moodustavad kolm haru ning igas paralleelharus on pingelangused võrdsed. Nii leiame /v. joon. 17/ koosinuslause põhjal :

$$\delta_0' = \sqrt{\delta_1'^2 + \delta_2'^2 + 2\delta_1'\delta_2' \cos 60^\circ}$$

Et $\delta_1' = \delta_2'$, siis saame :

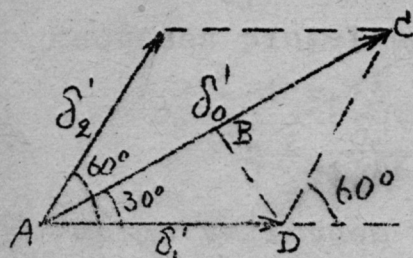
$$\delta_0' = \sqrt{2\delta_1'^2 + 2\delta_1'^2 \cos 60^\circ} , \text{ kus } \cos 60^\circ = 0,5$$

ja
$$\delta_0' = \sqrt{3\delta_1'^2} = \delta_1' \sqrt{3} .$$

Sama leiame täisnurksest kolmnurgast ABD :

$$\frac{\delta_0'}{2} = \delta_1' \cos 30^\circ = \delta_1' \frac{\sqrt{3}}{2} , \text{ kust } ' =$$

$$\delta'_0 = 2 \delta'_1 \frac{\sqrt{3}}{2} = \delta'_1 \sqrt{3}$$



joon.17.

Näide I.

Keerdvoolu mootor on ühendatud pealiiniga tähtühenduses. Iga ühendusjuhtme takistus on $r = 0,012$ oomi ja mootor tarvitab normaalkoormamisel voolutugevust $i' = 15$ amp. Küsitakse, kui suur on pingelangus ühendusjuhtmetes?

mamisel voolutugevust $i' = 15$ amp. Küsitakse, kui suur on pingelangus ühendusjuhtmetes?

$$\delta'_0 = \delta'_1 \sqrt{3} = i' r_1 \sqrt{3} = 15 \cdot 0,012 \cdot 1,73 \approx 3,12 \text{ volti.}$$

Näide II. Kolmnurkühenduses lülitatud mootor, mille võimsus on $W = 7,5$ kW, $\cos \varphi = 0,81$ ja kasukraad $\eta = 0,855$, on ühenduses pealiiniga, kus valitseb $e' = 220$ v. Ühendusjuhtme pikkus $l = 50$ m. Küsitakse, kui suur peab olema juhtme ristilõikepind, et pingelangus ei ületaks 3%?

Nagu näitest selgub, on siin esialgul otsitava voolutugevus. Tema leidmiseks arvutame enne välja eluliinilt saadud võimsuse:

$$W_s = \frac{W_a}{\eta} = \frac{7,5}{0,855} \approx 8,77 \text{ kW.}$$

Keerdvoolu võimsuse valemist

$$W = e' i' \sqrt{3} \cos \varphi$$

leiame voolutugevuse:

$$i' = \frac{W}{e' \sqrt{3} \cos \varphi} = \frac{8770}{220 \cdot 1,73 \cdot 0,81} \approx 28,5 \text{ amp.}$$

Nüüd arvutame lubatava pingelanguse voltides :

$$\delta'_0 = 0,03.220 = 6,6 \text{ volti.}$$

Asetades pingelanguse valemisse, saame :

$$\delta'_0 = 1'r\sqrt{3}, \text{ millest järeldub, et :}$$

$$r_1 = \frac{\delta'_0}{1'\sqrt{3}} = \frac{6,6}{28,5.1,73} \approx 0,1335 \text{ oomi.}$$

Juhtme takistuse valemist saame juhtme ristilõikepinna q :

$$q = \frac{\rho l}{r}, \text{ kus loeme } \rho = 0,018.$$

Leiame, et :

$$q = \frac{0,018.50}{0,1335} \approx 6,75 \text{ mm}^2$$

Võtame järgmise suurema ristilõikepinna $q = 10 \text{ mm}^2$

K e e r d v o o l u v ö i m s u s e m õ õ t m i s e d .

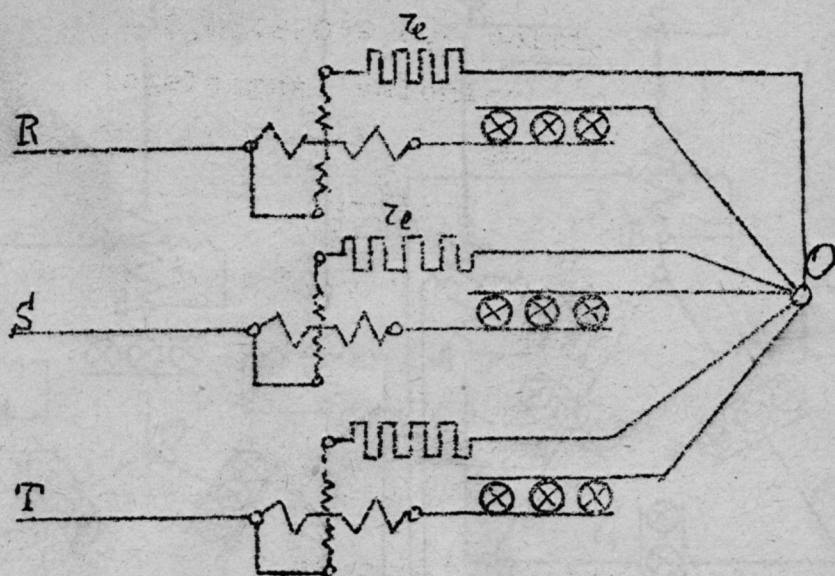
I. Üldine juht. Kõik kolm faasi on koormatud ebaühtlaselt ja keerdvool on aheldatud vabaltvõetud viisil, s.t. kas tähtühenduses nulljuhtmega või ilma, või jälle kolmnurkühenduses. Kui nullpunkt on vattmeetriga ühendamiseks kättesaadav, siis tarvitame kolme vattmeetrit, mille peamähised ühendame faasijuhtmetega järjestikku, harumähiste otsad aga vastava faasijuhtme ja nullpunktiga /joon.18/.

Kolme vattmeetri näitude summa moodustabki ^{Kogu} ~~nagu~~ keerdvoolu võimsuse :

$$W_{\Sigma} = W_1 + W_2 + W_3$$

Tihti on aga täht- ja kolmnurkaheldamisel null

punkt kättesaamatu. Sel juhul on keerdvoolu kogu -

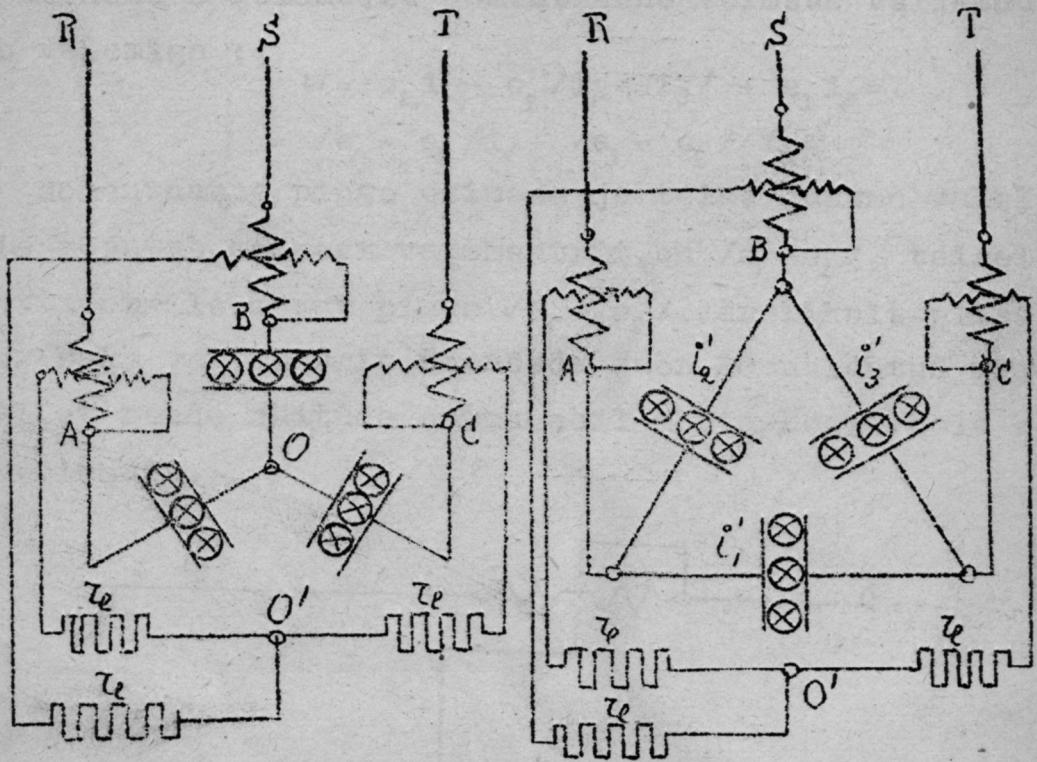


joon. 18.

võimsuse mõõtmiseks tarvis luua kunstlik nullpunkt mille saavutamise, ühendades omavahel kolme vattmeetri harumähiste lõpu, kuna mähiste algused ühenda - takse vastava faasiga, näiteks viies nad peamähise klemmi alla. /joon. 19/.

Tegelikult praktikas ei tarvitata keerdvoolu võimsuse mõõtmiseks kolme vattmeetri, vaid vatt - meetrite mähised on ehitatud näinaselt, nii et kolm harumähist on kinnitatud ühisel teljel, mis on va - rustatud ühe osutiga. Sel juhul on vattmeetri skaala gradueeritud nii, et ta kohe näitab kogu keerd -

voolu põimsust.



joon.19.

II.Ka kahe vattmeetriga võib mõõta keerdvoolu võimsust, arvesse võttes, et tegemist on tähtaheldamisega nulljuhtmeta, või kolmnurkaheldamisega. Sel juhul on momentaanne võimsus igal silmapilgul :

$$W = e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3$$

Teiselt poolt teame aga, et momentaansete voolutugevuste summa on null, s.t. :

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0.$$

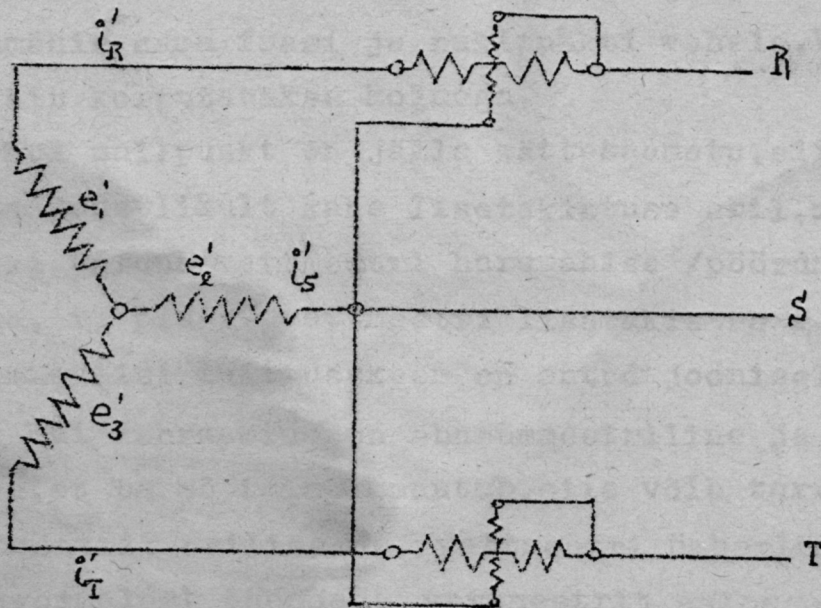
Sellest järeldeb, et näiteks :

$$i_2 = - /i_1 + i_3/$$

Asendades leiame, et momentaanne võimsus väljendub ka valemiga :

$$\begin{aligned} W &= e_1 i_1 - e_2 /i_1 + i_3/ + e_3 i_3 = \\ &= /e_1 - e_2 /i_1 + /e_3 - e_2 / i_3 \end{aligned}$$

Momentaanne pinge esimese ja teise juhtme vahel, mis mõjutab esimest vattmeetrit, on $/e_1 - e_2 /$, teisele vattmeetrile mõjuv pinge $/e_3 - e_2 /$. Järelikult piisab kui kaks vattmeetrit ühendada joon.20 näidatud viisil, et nende näitude summa abil mõõta keerdvoolu koguvõimsust.



joon.20.

Märkus. On selge, et vattmeetrid ei saa näidata momentaanseid võimsusi juba oma võrdlemisi suure

pöördmähiste inertsi tõttu ning näitavad mingisugust keskmist võimsust, mida me vahelduva voolu teoorias /v.vihik 8. "Vahelduva voolu seadused" III osa, lhk. 128 ja järgmised/ nimetatakse "tegevaks võimsuseks". või lihtsalt võimsuseks.

Selliste mõõtriste jaoks ehitatakse vattmeetrid kahe pöördmähisega ühisel teljel, jälle ühe osutiga ja ühe, kogu keerdvoolule gradueeritud skaalaga.

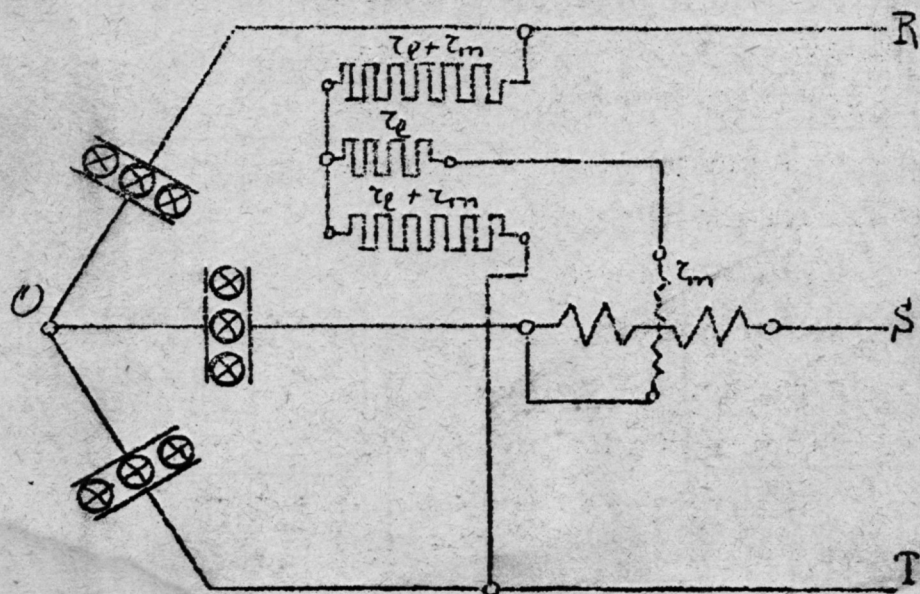
III. Keerdvoolu võimsust on võimalik mõõta ka ainult ühe vattmeetriga. Kui koormamine on sümmeetriline kõikides faasides, siis lülitatakse vattmeetri peamähis ükskõik missuguse faasiga järjestikku ja harumähis sama faasi ja nullpunkti vahele. Vattmeetri näit korrutatakse kolmega.

Kui nullpunkt on jälle kättesaamatu, siis luuakse ta kunstlikult kahe lisetakistuse abil, millest - kumbki võrdub vattmeetri harumähise /pöördmähise / omaga, r_m pluss vattmeetri lisatakistus r_c . Selle - mõõtmisviisi lülitusskeem on antud joonisel 21.

Kui koormamine on ebasümmeetriline ja ei ole karta, et ta mõõtmisel muutub, siis võib tarvitada - vattmeetrit erilise nn. vattmeetri ümberlüüjaga, mis võimaldab ühendada vattmeetrit esimese, teise või kolmanda faasiga; nii võime saada iga faasi - koormamise eraldi ja liites nad - ebaühtlaselt koor- matud keerdvoolu koguvõimsuse.

Siinjuures vattmeetri lülitamine ja ümberlülitamine võib oludele vastavalt sündida kas joon.18.või 20. põhimõtete järgi.

IV. Meie kitsastes oludes, välja arvatud suuremad

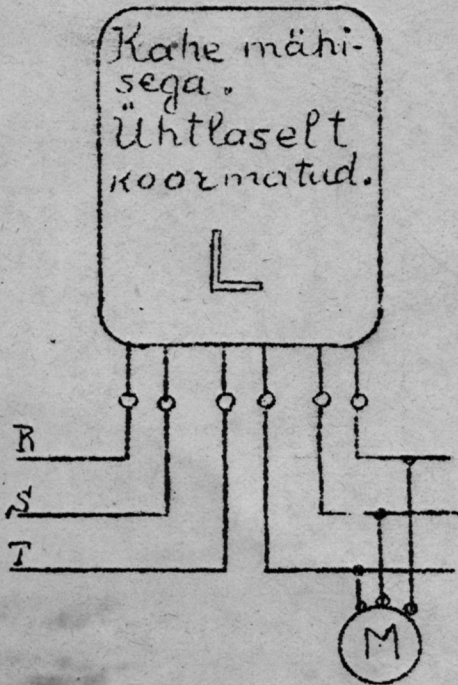


joonis 21.

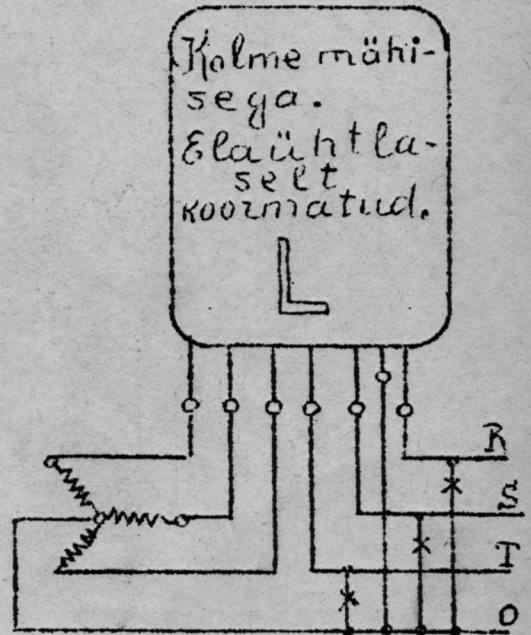
laboratooriumid ja el.-jaamad, tuleb tihti loobuda nii kallist ja raskesti-kättesaadavast riistast, nagu vattmeeter. Pean seepärast küllalt tähtsaks veel ühe keerdvoolu võimsuse mõõtmiseviisi nimetamist : s.o. keerdvoolu lugeja abil mõõtmine. Viimased on võrreldes vattmeetriga palju odavamad ja seejuures laialt ettetulevad riistad. Ka praktiliselt võib nende näiduga päris rahul olla.

Nagu teada, on voolulugejad õieti el.-voolu töö lugejad; et aga võimsus on töö ühe sekundi jooksu,

s.t. tööhulk jagatud ajaga, siis piisab aja /t/ ja tema jooksul voolulugeja ketta tiirude arvu /n/ mõõtmisest. Keerdvoolu lugejad on ehitatud kahe ja kolme pöördmähisega vattmeetrite põhimõttel. Võimsuse mõõtmisel on see tähtsuseta, küll aga oleneb sellest voolulugeja lülitus /v.joon.22 ja 23/.



joon.22.



joon.23.

Olgu voolulugeja kilbil märgitud konstant - C , loetud lugeja ketta tiirude arv - n ja loetlemise aeg - t/sek/. Siis on el.-voolu töö-hulk :

$$A = \frac{3600000n}{C} \text{ dž}$$

Võimsus vattides :

$$W = \frac{A}{t} = \frac{3600000n}{Ct} \text{ vatti}$$

võikW-des :

$$W = \frac{3600n}{ct} \text{ kW}$$

Näide. Keerdvoolu lugejal, mille konetant $C=750$, on koetud $t=120$ sek. jooksul $n=24$ ketta tiiru. Küsi - takse, kui suur võimsus oli voolul?

$$W = \frac{3600 \cdot 24}{750 \cdot 120} = 0,96 \text{ kW}$$

A h e l d a t u d k e e r d v o o l a t ä h t s u s .

Keerdvool on leidnud viimasel ajal väga laial-
daast tarvitamist tema õlge tähtsate omaduste tõttu.
Ta võimaldab esiteks pöörleva magnetvälija saamist -
ning seega kõlge lihtsamate, käitiskindlamate ja oda-
vamate mootorite ehitamist. Teiseks lubab lge
vahelduv vool end transformeerida laialdes piirides
ja jälle lihtsate aparaatide, transformatorite abil
mil puuduvad liikuvad osad ning mis töötavad harul-
daselt kõrge kasukraadiga /kuni 98%/. Kolmandaks
- tehnika uuemad saavutised võimaldavad keerdvoolu ot-
sekohe transformeerida alalisvooluks. Viimaseks keer-
dvoolu edasijuhtimiseks on võimalik tarvitada palju
kergemhäd ,s.t. väiksema ristilõikega juhtmeid, kui
teiste vooluliikide edasitoimetamisel.

Selle väite töestamiseks lähtume võimsusekaotus-
test liinis kõiksuguste vooluliikide juhtudel.

1/. Alalisvool - kaks juhet /edasi-tagasi/.

Võimsuse valem :

Võimsuse valem :

$$W = JV \quad , \quad \text{kust } J = \frac{W}{V}$$

Võimsusekaotus kahes juhtmes :

$$\omega_K = 2J^2 R_K = 2 \frac{W^2 R_K}{V^2}$$

2/. Sama saame ka ühefaasilise voolu kohta, seni kui $\cos \varphi = 1$.

3/. Kahefaasiline vool 4. juhtmega annab kaks haru; igas harus on voolutugevus 2 korda väiksem ning seetõttu on ka juhtme ristilõike kaks korda eelminest väiksem. 4 juhet järelilikult annavad jälle kokku sama ristilõike, nagu alalis- või ühefaasilisel voolul.

4/. Keerdvool kolmnurkaheldamises :

Võimsus :

$$W = e' i' \sqrt{3} \cos \varphi$$

Voolutugevus

$$i' = \frac{W}{e' \sqrt{3} \cos \varphi}$$

Kaotus kolmes juhtmes :

$$3i'^2 R_K = \frac{3W^2 R_K}{e'^2 3 \cos^2 \varphi} = \frac{W^2 R_K}{e'^2 \cos^2 \varphi}$$

Oletades induktsioonvaba koormamist, mille $\cos \varphi = 1$, saame võimsuse kaotuse lihtsustatud valemi :

$$3i'^2 R_K = \frac{W^2 R_K}{e'^2}$$

Arvates võrdsed kaotused alalis- ja keerdvoolule võttes aluseks võrdsed pinged, s.t. $v=e'$ ja meelepidades, et juhtmete ristilõiked suhtuvad vastuvõrde-

liselt takistustega, saame :

$$\frac{q_K}{q_a} = \frac{R_a}{R_K} = \frac{1}{2} ,$$

sest et

$$2 \frac{W^2 R_a}{v^2} = \frac{W^2 R_K}{e^2} \quad \text{ja} \quad \frac{R_a}{R_K} = \frac{1}{2}$$

Juhtmete kogukaalud olgu alalisvoolul K_0 ja keerdvoolul - K_K . Lelame ^{ühesuhtel} liini pikkusel:

$$\frac{K_K}{K_0} = \frac{3q_K}{2q_a} = \frac{3}{4} = 0,75.$$

S.t., et kolmnurgas aheldatud keerdvool nõuab ainult 75% alalisvoolu liini vasest .

Väljudes dünamomasina ankrupingest ja ühe-, kahe- ja kolme faasilise generaatori ühe faasimähise pingest, saaksime ühe ja sama võimsuse üleandmiseks võrdsete pingekaotuste juures iga voolu süsteemi jaoks tabelis näidatud juhtmete kogu ristlõigete suhted või neile proportsionaalsed vase kaalud :

T a b e l .

1. Alalisvoolu liin	q 100%
2. Ühefaasiline vahelduv vool	100%
3. Aheldanata, s.t. 4. juhtmega kahefaasiline vool	100%
4. Aheldatud 3. juhtmega/kahefaasiline vool	79%
5. Kolmnurgas aheldatud keerdvool	75%
6. Tähtühenduses aheldatud keerdvool + nulljuhtmega	50%

kus $q_0 = 0,5q$

153

1911

23

100

100

[Faint, illegible text]

Figure 1

25. 1. 1950

Ar 933
Grimm