

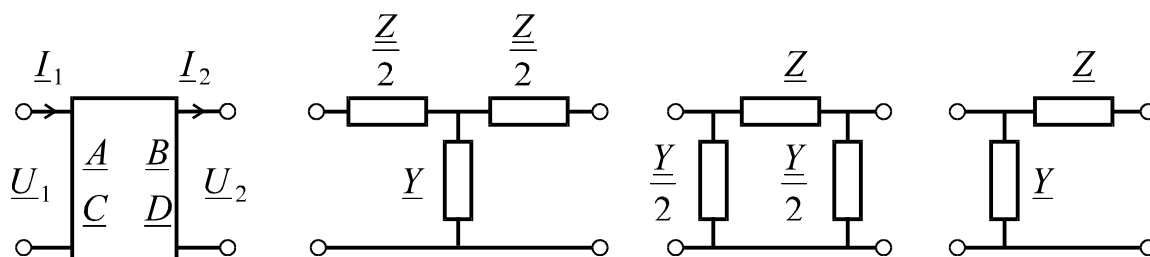
3 ELEKTRIVÕRGU ELEMENTIDE ASESKEEMID JA PARAMEETRID

3.1 ELEKTRIVÕRGU ELEMENTI KUJUTAMINE NELIKLEMMINA

Elektrisüsteemi või -võrgu **talitluses** eristatakse **normaal-, raskendatud, avarii- ja avariijärgset talitlust** või **seisundit**. Talitluse mingile ajahetkele vastav seisund on määratud **seisundimuutujatega**. Kõikide seisundite, välja arvatud avariiseisundid, arvutamisel loetakse elektrilisi protsesse tinglikult stacionaarseteks, kuna seisundi muutumine on suhteliselt aeglane. Selliste **stacionaarsete** ehk **püsiseisundite** matemaatiliseks modelleerimiseks kasutatakse algebralisi võrrandeid. Avariidega kaasnevad seisundimuutujate suhteliselt kiired muutused ajas nn **siirdeprotsessid** nõuavad üldjuhul diferentsiaalvõrrandeid.

Käesolevas kursuses käsitletakse ainult elektrivõrkude püsitalitlust ja püsiseisundeid. Lisaks stacionaarsusele eeldatakse veel kolmefaasilise süsteemi talitluse **sümmeetrilisust** nii elementide parameetrite kui ka seisundimuutujate osas. Niisugune eeldus võimaldab piirduda ainult ühe faasi arvutuskeemiga – **ühejoonelise aseskeemiga**, vaatamata sellele et arvutusvalemid ja arvutus vastavad kolmefaasilisele süsteemile.

Iga elemendi üht faasi saab kujutada **neliklemmina**, milleks lihtsamatel juhtudel võib olla elektrotehnikast tuntud sümmeetriline T -, Π - või ebasümmeetriline Γ -aseskeem (jn 3.1).



Joonis 3.1 Neliklemm ja selle T -, Π -, Γ -aseskeemid

Aseskeemi elementide parameetrite alusel (lühise ja tühijooksu katses) määratakse neliklemmi parameetrid ehk konstandid (tabel 3.1). Tabelis on ka

homogeensele (ühtlaselt jaotatud parameetritega) liinile vastava neliklemmi konstandid, kusjuures \underline{Z} tähistab kogu liini summaarset pikitakistust ja \underline{Y} summaarset põikjuhtivust.

Tabel 3.1 Neliklemmi konstandid

Aseskeem	\underline{A}	\underline{B}	\underline{C}	\underline{D}
T	$1 + \frac{\underline{ZY}}{2}$	$\underline{Z} \left(1 + \frac{\underline{ZY}}{4} \right)$	\underline{Y}	$1 + \frac{\underline{ZY}}{2}$
Π	$1 + \frac{\underline{ZY}}{2}$	\underline{Z}	$\underline{Y} \left(1 + \frac{\underline{ZY}}{4} \right)$	$1 + \frac{\underline{ZY}}{2}$
Γ	1	\underline{Z}	\underline{Y}	$1 + \underline{ZY}$
Homogeenne liin	$ch\sqrt{\underline{ZY}}$	$\sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}} sh\sqrt{\underline{ZY}}$	$\sqrt{\frac{\underline{Y}}{\underline{Z}}} sh\sqrt{\underline{ZY}}$	$ch\sqrt{\underline{ZY}}$

Neliklemmi võrrandid, mis seovad väljundsuurusi \underline{U}_2 ja \underline{I}_2 sisendsuurustega \underline{U}_1 ja \underline{I}_1 , võib ühefaasilisel juhul (\underline{U}_1 ja \underline{U}_2 on faasipinged) esitada kujul

$$\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}_2 + \underline{B}\underline{I}_2 \quad (3.1)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{C}\underline{U}_2 + \underline{D}\underline{I}_2 \quad (3.2)$$

ning kolmefaasilise süsteemi puhul (\underline{U}_1 ja \underline{U}_2 on faasidevahelised pinged)

$$\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}_2 + \sqrt{3}\underline{B}\underline{I}_2 \quad (3.3)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{C}}{\sqrt{3}}\underline{U}_2 + \underline{D}\underline{I}_2 \quad (3.4)$$

Selliste võrrandite abil saab põhimõtteliselt koostada kogu võrgu matemaatilise mudeli ja kasutada seda võrgu püsiseisundi arvutamiseks. Tänapäeval on elektrivõrkude arvutamisel siiski levinud rohkem meetodid ja valemid, mis põhinevad takistuste \underline{Z} ja juhtivuste \underline{Y} otsesel kasutamisel ilma neliklemmi konstantide määramiseta.

3.2 ELEKTRILIINI PARAMEETRID

Kuna liini pikkust mõõdetakse tavaliselt kilomeetrites, on otstarbekas vaadelda liini iseloomulike parameetrite väärtusi kilomeetri kohta.

Aktiivtakistus

Tingituna elektromagnetilisest pinnaefektist on elektrijuhi aktiivtakistus vahelduvvoolule veidi suurem takistusest alalisvoolule ja see sõltub juhi konstruktsioonist. Ka on köisjuhiks kokkukeerutatud traatide pikkus 1...2% võrra suurem juhi pikkusest. Seetõttu on arvutusteks praktilisem kasutada käsiraamatutes juhi margi antud kilomeetri aktiivtakistusi r (Ω/km), mis vastavad fikseeritud temperatuurile ϑ_0 (näiteks $+20\text{ }^\circ\text{C}$). Vajaduse korral võib takistust taandada mingile teisele temperatuurile ϑ valemiga

$$r_{\vartheta} = r[1 + 0,004(\vartheta - \vartheta_0)] \quad (3.5)$$

Terasjuhi takistus sõltub lisaks ristlõikele oluliselt veel juhti läbivast voolust.

Induktiivtakistus

Liini reaktiivtakistus on induktiivne ning on määratud faasijuhtide paiknemise ja geomeetriliste mõõtmetega. Eeldades liini faasijuhtide ligikaudselt sümmeetrilist paiknemist (pikema õhuliini puhul transponeeritud faasijuhid), võib kasutada õhuliini kilomeetri keskmise induktiivtakistuse määramiseks valemit

$$x = 0,144 \log \frac{D_k}{r_j} + 0,0157 \quad \Omega/\text{km} \quad (3.6)$$

kus $D_k = \sqrt[3]{D_{AB} D_{BC} D_{CA}}$ – faasidevaheline keskmine geomeetiline

kaugus

r_j – faasijuhtme raadius samades mõõtühikutes

See ligikaudne valem ei arvesta kaitsetrosside ja liini rööpapelate mõju.

Liini induktiivtakistus on suhteliselt tundetu D_k ja r_j suhtes. Vahel võimaldab see ligikaudsete arvutuste puhul, sõltumata õhuliini faasijuhtide paiknemisest ja juhtmete ristlõikest, võtta $x \approx 0,4 \Omega/\text{km}$.

Lõhisfaasijuhtide puhul võib induktiivtakistuse määramiseks kasutada (3.6) asemel valemit

$$x = 0,144 \log \frac{D_k}{r_{j\text{ ekv}}} + \frac{0,0157}{n} \quad \Omega/\text{km} \quad (3.7)$$

kus $r_{j\text{ ekv}}$ – faasijuhi ekvivalentne raadius, mis leitakse valemiga

$$r_{j\text{ ekv}} = \sqrt[n]{a_k^{n-1} r_j} \quad (3.8)$$

kus n – osajuhtmete arv lõhisfaasijuhis

a_k – osajuhtmetevaheline keskmine geomeetriline kaugus lõhisfaasijuhis

r_j – osajuhtme raadius

Eestis on 330 kV liinide faasid lõhestatud enamuses kaheks osajuhtmeks $n = 2$.

Aktiivjuhtivus

Õhuliini aktiivjuhtivus vastab aktiivvõimsuskadudele, mis on tingitud isolatsioon ebatäiuslikkusest ja **koroonast** (õhu ionisatsiooni juhtme pinnal). Isolatsioonis esinev vooluleke on aga tühiselt väike ja sellele vastav juhtivus jäetakse tavaliselt arvestamata.

Õhuliini ühe kilomeetri koroonakadude Δp_{kor} ligikaudseks hindamiseks kasutatakse käsiraamatuis toodud orienteerivaid andmeid. Koroonakaod sõltuvad liini pingest, juhtme diameetrist, õhurõhust ja väga oluliselt sademetest ning õhuniiskusest. Vajaduse korral leitakse siis ühe kilomeetri aktiivjuhtivus valemiga (lähtudes tabelist 1.2)

$$g = \frac{\Delta p_{kor}}{U_N^2} \quad \text{S/km} \quad (3.9)$$

Koroonakadude vähendamise oluliseks abinõuks on juhtme diameetri suurendamine. Seetõttu antakse ette sõltuvalt liini nimipingest ja lähtudes koroonakadude ning raadiohäirete vähendamise vajadusest juhtmete minimaalsed lubatud diameetrid või juhtme margid. Eestis on seni olnud minimaalselt lubatud juhtme margiks pingel 110 kV – AC 70 ja pingel 220 kV – AC 240. Teiseks koroonakadude vähendamise radikaalseks abinõuks kõrgematel pingetel on, alates tavaliselt 220 või 330 kV, lõhisfaasijuhtide kasutamine.

Elektrivõrkude arvutamisel tekib koroonakadude (ja neile vastava aktiivjuhtivuse) arvestamise praktiline vajadus alates pingest 330 kV. Madalamatel pingetel jäetakse aktiivjuhtivus enamasti arvestamata.

Mahtvusjuhtivus

Liini mahtvusjuhtivus on tingitud mahtvusest faasijuhtide endi ning juhtide ja maa vahel. Eeldades liini faasijuhtide sümmeetrilist paiknemist, võib õhuliini ühe kilomeetri keskmise mahtvusjuhtivuse määrata ligikaudselt valemiga

$$b = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{D_k}{r_j}} \quad \text{S/km} \quad (3.10)$$

Lõhisfaasijuhtide puhul tuleb valemis (3.10) kasutada juhtme raadiuse r_j asemel faasijuhi ekvivalentset raadiust $r_{j\text{ ekv}}$ (3.8).

Liini mahtvuses genereeritav reaktiivvõimsus on võrdeline pinge ruudu ja liini mahtvusjuhtivusega ($\Delta Q = U^2 B$, p 1.7). Mida kõrgem pinget ja pikem liin, seda suurem on mahtvusjuhtivuse osatähtsus aseskeemis. Õhuliinidel pingega $U_N \leq 35$ kV jäetakse mahtvusjuhtivus tavaliselt arvestamata.

Kaabelliinid

Kaabli mark koos ristlõikega määrab ära tema elektrilisi parameetreid mõjutavad tegurid. Seetõttu on kaabelliini parameetrid kaabli margiga üheselt määratud ning antud käsiraamatutes.

Kuna kaablite puhul on võrreldes õhuliinidega faasidevahelised kaugused väga väiksed, siis on kaabelliinide induktiivtakistus suhteliselt väike ja mahtvusjuhtivus suur. Seetõttu jäetakse väiksema ristlõikega kaabelliinidel ($U_N \leq 10$ kV) induktiivtakistus tihti arvestamata. Mahtvusjuhtivust tuleb aga sageli arvestada juba 35 kV kaablite puhul. Aktiivjuhtivust kaabelliinidel tavaliselt ei arvestata.

3.3 ELEKTRILIINI ASESKKEEMID

Liini põhiparameetriteks on summaarne komplekstavastus $\underline{Z} = R + jX$, mis leitakse liini ühe kilomeetri aktiivtakistuse r ja induktiivtakistuse x ning liini pikkuse l järgi

$$R = rl \quad X = xl \quad \underline{Z} = R + jX = (r + jx)l$$

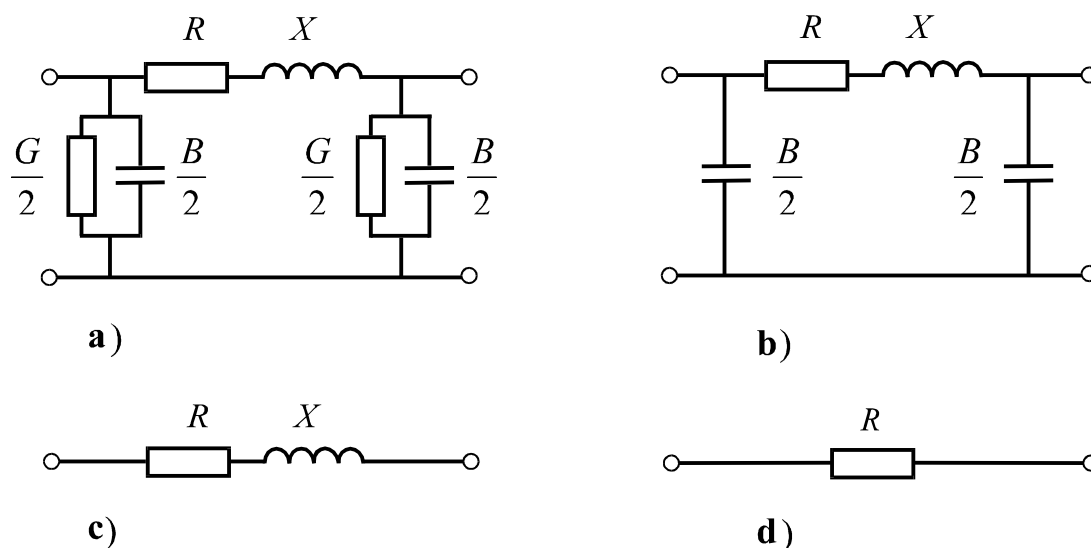
ja summaarne kompleksjuhtivus \underline{Y} , mis leitakse analoogiliselt

$$G = gl \quad B = bl \quad \underline{Y} = G + jB = (g + jb)l$$

Reaktiivjuhtivus on siin mahtuvuslik.

Suhteliselt täpselt modelleerivad elektriliini, mille parameetrid on tegelikult ühtlaselt jagunenud kogu liini pikkusele, homogeense liini võrrandid ehk neliklemmi võrrandid (3.3) ja (3.4) homogeensele liinile vastavate konstantidega (tabel 3.1).

Kui õhuliini pikkus ei ületa 200...250 km, võib praktikas piisava täpsusega kasutada liini modelleerimiseks koondparameetritega sümmeetrilist T - või Π -aseskeemi (jn 3.1). Modelleerimise täpsuselt ei saa eelistada üht skeemi teisele. Kuna aga T -aseskeemi puhul tekib võrreldes Π -skeemiga lisaõlm, kasutatakse praktikas tavaliselt Π -aseskeemi.

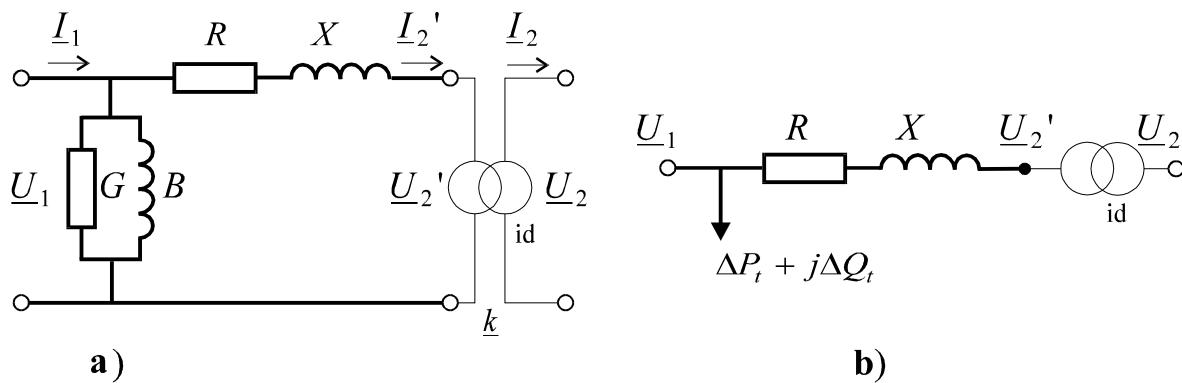


Joonis 3.2 Elektriliini koondparameetritega aseskeemid: a) täielik; b) õhuliin 110...220 kV; c) õhuliin $U_N \leq 35$ kV; d) kaabelliin $U_N \leq 10$ kV

Kui liini arvutuse puhul võetakse arvesse kõik p 3.2 vaadeldud parameetrid, peab ka aseskeem sisaldama kõiki elemente (jn 3.2a). Kui mõne parameetri arvestamisest loobutakse väikese osatähtsuse tõttu, võivad ka aseskeemis vastavad elemendid puududa (näited jn 3.2b, c, d).

3.4 KAHEMÄHISELISED TRAFOD

Elektrivõrkude arvutamisel tuleb sageli kokku puutuda suure hulga trafodega, mistõttu tekib vajadus kasutada võimalikult lihtsaid trafode aseskeeme. Seetõttu loobutakse tihti trafo klassikalisest T -aseskeemist. Aseskeemi piki- ja põikharu parameetrite suure erinevuse tõttu tagab piisava täpsuse ka lihtsam Γ -aseskeem, mida võib veel täiendada ideaalse (id) trafoga (jn 3.3a).



Joonis 3.3 Trafo aseskeem: a) juhtivustega; b) tühijooksuvõimsustega

Skeemis kujutab R trafo mähiste summaarset vahelduvvoolu aktiivtakistust, kusjuures sekundaarmähise takistus on taandatud primaarpoolele (primaarmähise keerdude arvule, primaarpingele)

$$R = R_1 + R_2' = R_1 + \left(\frac{U_{1N}}{U_{2N}} \right)^2 R_2$$

Suurus X on trafo primaarpoolele taandatud puisteinduktiivtakistus. Aktiivjuhtivus G vastab trafo rauaskaole ja reaktiivjuhtivus B magneetimisreaktiivvõimsusele. Suurused U_2' ja I_2' on sekundaarpinge ja -vool taandatuna trafo primaarpoolele

$$U_2' = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} U_2 \quad I_2' = \frac{U_{2N}}{U_{1N}} I_2$$

Erinevate maade ja firmade käsiraamatutes ning trafo kataloogides võivad trafode tehnilised andmed olla antud erineval moel. Lisaks trafo nimivõimsusele S_N ja primaar- ning sekundaarmähise nimipingetele (U_{1N} , U_{2N}) võib sealt leida näiteks tühijooksukao ΔP_t , lühiskao ΔP_l , tühijooksuvoolu protsentides

nimivoolust $I_t\%$ ja lühispinge protsentides nimipingest $u_l\%$. Vahel antakse viimase asemel numbriliselt võrdne suurus – lühistakistus $Z_{l\%}$.

Arvestades asjaolu, et elektrivõrkudes kasutatavate suhteliselt suure võimsusega trafode komplekstakistuste ja -juhtivuste reaktiivkomponendid on aktiivkomponentidest tavaliselt märksa suuremad, võib asesseskeemi parameetrite ligikaudseks arvutamiseks kataloogi andmete põhjal kasutada järgmisi valemeid:

$$R = \frac{\Delta P_l U_N^2}{S_N^2} \quad (3.11)$$

$$X = \frac{u_{l\%} U_N^2}{100 S_N} \quad (3.12)$$

$$G = \frac{\Delta P_t}{U_N^2} \quad (3.13)$$

$$B = \frac{I_t\% S_N}{100 U_N^2} \quad (3.14)$$

$$\underline{k} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} e^{-j m \frac{\pi}{6}} \quad (3.15)$$

kus U_N – trafo selle poole nimipinge, millele vastav parameeter taandatakse. Näiteks jn 3.3 toodud asesseskeemide puhul võetakse

$$U_N = U_{1N}$$

\underline{k} – trafo kompleks-ülekanadesuhe, mis arvestab ka trafo ühendusrühma m

Lihtsamate arvutuste puhul näiteks ühe nimipingega võrgus piisab sageli trafo ülekanadesuhtest reaalkujul ühendusrühma arvestamata $k = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$.

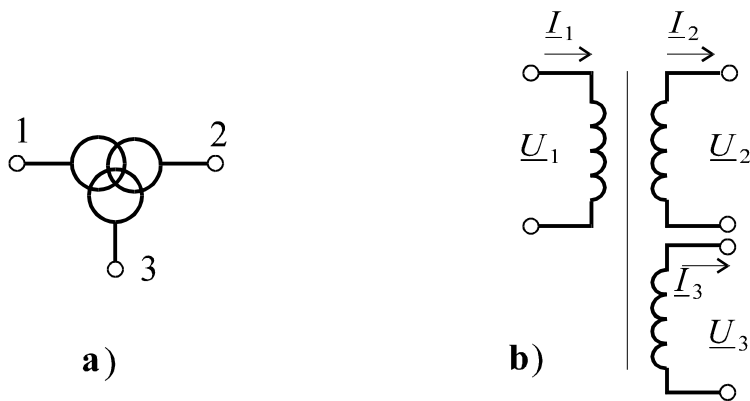
Joonisel 3.3b on kujutatud trafo lihtsustatud asesseskeem, kus tühijooksukaod võetakse konstantseteks, pingest sõltumatuteks. Sel juhul määratakse tühijooksu reaktiivvõimsuskadu valemiga

$$\Delta Q_t = \frac{I_t\% S_N}{100} \quad (3.16)$$

Tihti antakse kataloogides ja käsiraamatutes ka R , X ja ΔQ_t väärtused.

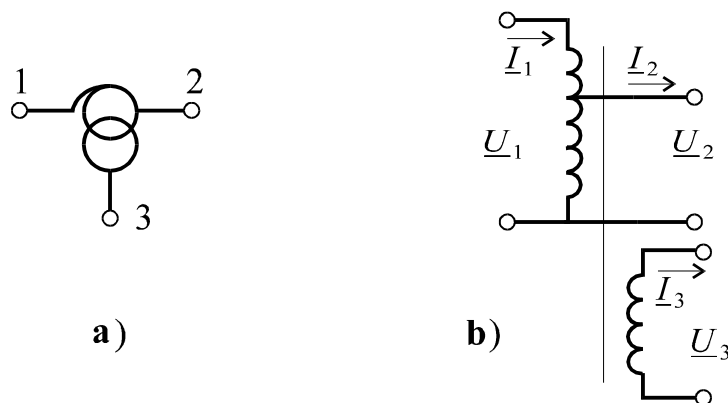
3.5 KOLMEMÄHISELISED TRAFOD JA AUTOTRAFOD

Kolme erineva nimipinge puhul on otstarbekas kasutada kolmemähiselisi trafosid, kus kolm erineva pingega mähist on samal magnetsüdamikul (jn 3.4).



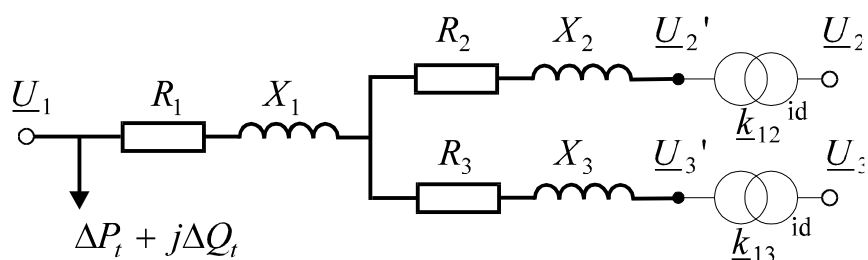
Joonis 3.4 Kolmemähiseline trafo: a) tingmärk; b) ühe faasi mähised

Veelgi ökonoomsemad on paljudel juhtudel autotrafod (jn 3.5). Autotrafodel on väiksem kaal ja gabariit, mis teeb nad ka odavamaks. Kuna autotrafo põhimähised saavad kolmefaasilises süsteemis olla vaid tähtühenduses, peab autotrafol olema ka kolmas kolmnurka ühendatud kompensatsioonimähis. See mähis on tavaliselt alampingemähis, mis valmistatakse trafo nimivõimsusest väiksema võimsusega ja on ette nähtud kolmandate harmoonikute summutamiseks ning ka kohalike tarbijate toiteks.



Joonis 3.5 Autotrafo: a) tingmärk; b) ühe faasi mähiste ühendusskeem

Kolmemähiseliste trafode (ka autotrafode) puhul võib kasutada tähekujulist aseskeemi, kus juhtivusharu on lülitatud tähe keskpunkti. Analoogiliselt kahemähiselise trafoga võib küllaldase täpsusega tuua juhtivuse aga ka näiteks primaarmähise klemmidele või piirduda konstantse, talitluspingest sõltumatu tühijooksukao arvestamisega (jn 3.6).



Joon.3.6 Kolmemähiselise trafo lihtsustatud aseskeem

Kolmemähiselise trafo kataloogiandmeteks võivad olla nimivõimsus S_N , mähiste nimipinged U_{1N} , U_{2N} , U_{3N} , tühijooksukadu ΔP_t , tühijooksuvool $I_t\%$, lühiskaad mähisepaaride kohta ΔP_{l12} , ΔP_{l13} , ΔP_{l23} ja lühispinged mähisepaaride kohta $u_{l\%12}$, $u_{l\%13}$, $u_{l\%23}$.

Lühiskadudele vastavad aktiivtakistused R_{12} , R_{13} , R_{23} leitakse nagu kahemähiselise trafo puhul valemiga (3.11) ja lühispingetele vastavad induktiivtakistused X_{12} , X_{13} , X_{23} valemiga (3.12).

Arvestades, et $R_{12} = R_1 + R_2$, $X_{12} = X_1 + X_2$ jne, saab leida aseskeemi harude takistused valemitega

$$R_1 = \frac{R_{12} + R_{13} - R_{23}}{2} \quad R_2 = \frac{R_{12} + R_{23} - R_{13}}{2} \quad R_3 = \frac{R_{13} + R_{23} - R_{12}}{2} \quad (3.17)$$

$$X_1 = \frac{X_{12} + X_{13} - X_{23}}{2} \quad X_2 = \frac{X_{12} + X_{23} - X_{13}}{2} \quad X_3 = \frac{X_{13} + X_{23} - X_{12}}{2} \quad (3.18)$$

Põikjuhtivused G ja B ning ΔQ_t leitakse samuti kui kahemähiselistel trafodel (3.13), (3.14), (3.16). Analoogiliselt valemile (3.15) leitakse ka kõigi mähisepaaride ülekandesuhted.

Kataloogides võivad olla ka trafode takistused ja ΔQ_t .

3.6 TARBIJATE KOORMUSED JA KOORMUSGRAAFIKUD

Tarbija koormuse all mõistetakse üldjuhul elektrivõrguga seotud elektritarvitite grupi summaarset koormust. Selline koormus, mida tavaliselt väljendatakse võimsusena, koosneb siis üksiktarvitite (asünkroon- ja sünkroonmootorite, valgustus- ja kütteseadmete, aladite jne) koormusest ning neid ühendava (toitava) võrgu kadudest. See koormus võib olla antud ka vaadeldavat kompleksi toitava alajaama ülempinge poolel ning on siis ülempingevõrgu suhtes **sõlmekoormus**.

Koormuste modelleerimine elektrivõrgu arvutusteks on küllalt keerukas ja selleks on kasutusel hulk meetodeid sõltuvalt ülesandest, kasutatavast informatsioonist jm.

Üldjuhul on tarbija koormuse kompleksuuruse $\underline{S} = P + jQ$ aktiiv- ja reaktiivkomponent ajas muutuvad ning süsteemi sagedusest ja sõlme pingest sõltuvad

$$P = P(t, f, U) \quad Q = Q(t, f, U)$$

Praktikas väärivad lihtsuse huvides tähelepanu koormuse sõltuvused igast mõjurist eraldi. Koormuse ajalist sõltuvust, eeldades seejuures sageduse ja pinge konstantsust, eriti aga selle graafilist esitust, nimetatakse **koormusgraafikuks** $P(t)$ ja $Q(t)$. Koormuse perioodilisuse (aasta, nädal, ööpäev) järgi nimetatakse ka koormusgraafikuid. Olulisemad neist on **ööpäeva-koormusgraafik** ja **aasta koormuskestusgraafik**.

Ööpäeva-koormusgraafik

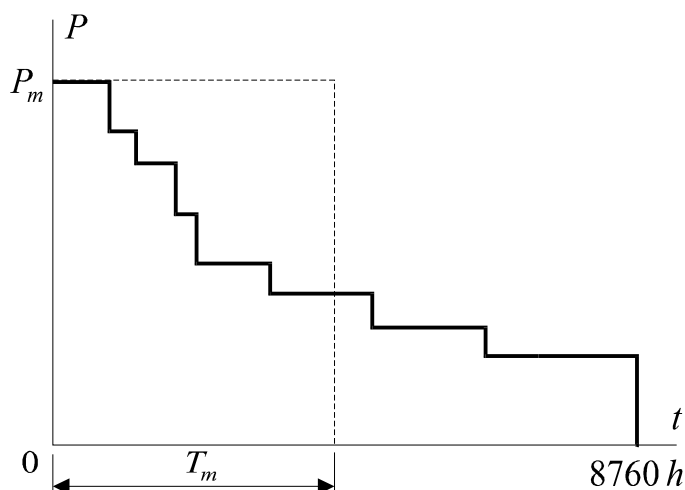
Ühe ja sama koormuse ööpäevagraafikud võivad olla tööpäevadel üsna sarnased, puhkepäevadel aga oluliselt erineva. Erinevad on tarbijagruppide (tööstus, kommunaaltarbija, koolid jne) ööpäeva-koormusgraafikud. Märkimisväärseid erinevusi on aastaegade ööpäeva-koormusgraafikutes. Käsiraamatutest leiab tarbijarühmade **tüüpkoormusgraafikuid** (suhtelistes ühikutes), mida saab arvutustes ja projekteerimisel kasutada.

Elektrisüsteemide ja -võrkude talitluse juhtimiseks on vaja võrgu sõlmede ja süsteemi summaarseid ööpäeva-koormusgraafikuid ka prognoosida. Matemaatiliselt on koormus mittestatsionaarne juhuslik protsess, mille prognoosimine on üsna keerukas.

Aasta koormuskestusgraafik

Kestusgraafik saadakse koormuse mõõmistulemuste kahaneva järjestamise teel (jn 3.7). See on graafik, mis näitab antud väärtusega võrdse või seda ületava koormuse kestust ajavahemiku (nt aasta) jooksul. Aasta kestusgraafiku all olev pindala vastab nagu tegeliku koormusgraafiku puhulgi aasta energiale

$$W = \int_0^T P dt \quad T \approx 8760 \text{ h}$$



Joonis 3.7 Aasta koormuskestusgraafik

Sageli pole piisavalt andmeid (eriti projekteerimisel) kestusgraafiku määramiseks. Siis kasutatakse ligikaudset meetodit aasta energia hindamiseks maksimaalkoormuse P_m ja maksimaalkoormuse kasutusaja T_m järgi (jn 3.7)

$$W = \int_0^T P dt = P_m T_m \quad (3.19)$$

Maksimaalkoormuse kasutusaja T_m all mõeldakse sellist fiktiivset aega, millele vastaks maksimaalkoormusega P_m talitlusel sama energia kui talitlusel tegeliku koormusgraafiku kohaselt kogu aasta jooksul (3.19). Ligikaudsed T_m väärtuse hinnangud võetakse tavaliselt käsiraamatutest, kus nad on antud keskmiste tüüpsuurustena sõltuvalt tarbijate liigist.

Teada on ainult aastas tarbitav energia

Väiksemate tarbijate puhul mõõdetakse sageli ainult energiat. Siis võib maksimaalkoormuse ligikaudset väärtust hinnata vastupidise tehtega

$$P_m = \frac{W}{T_m} \quad (3.20)$$

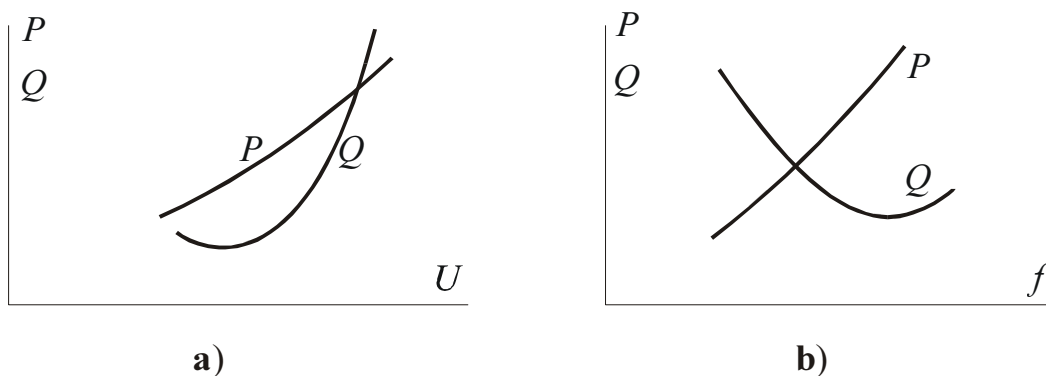
Kasutatakse ka teist ligikaudset moodust nn Velanderi valemit

$$P_m = k_1 W + k_2 \sqrt{W} \quad (3.21)$$

Kordajate k_1 ja k_2 väärtused sõltuvad suuresti kohalikest oludest ja tarbijatest.

3.7 KOORMUSTE STAATILISED KARAKTERISTIKUD JA MODELLEERIMINE PÜSITALITLUSE ARVUTUSEL

Elektrivõrkude püsitalitluse täpsemal arvutamisel tuleks lisaks ajale arvestada ka pinge ja sageduse mõju koormustele $P(U, f)$, $Q(U, f)$. Fikseeritud sageduse puhul saadakse ühemõõtmelised sõltuvused $P(U)$, $Q(U)$, mida nimetatakse aktiiv- ja reaktiivkoormuse **staatilisteks karakteristikuteks pinge järgi**. Fikseerides pinge väärtuse, saadakse analoogiliselt **staatilised karakteristikud sageduse järgi** $P(f), Q(f)$. Staatilised karakteristikud koormusel, milles valdava osa moodustavad asünkroonmootorid, on näidatud joonisel 3.8. Pinge või sageduse tõus suurendab aktiivkoormust. Normaaltalitluse piirkonnas suureneb reaktiivkoormus pinge suurenemisel ja väheneb sageduse suurenemisel.



Joonis 3.8 Koormuse staatilised karakteristikud: a) pinge järgi;
b) sageduse järgi

Staatiliste karakteristikute saamiseks on põhimõtteliselt järgmised võimalused:

- analüütiline meetod
- eksperimentaalne meetod
- üldistatud tüüpkarakteristikute kasutamine

Reaalselt on neist kasutatav ainult viimane. Üldistatud tüüpkarakteristikud on koostatud kas kõveratena või empiiriliste valemitena, mille kordajad antakse käsiraamatutes keskmise tüüpkoostisega koormuse jaoks. Näiteks võib käsiraamatus olla sellise koormuse tüüpkoostis järgmine:

- suured asünkroonmootorid – 15 %
- väikesed asünkroonmootorid – 35 %
- suured sünkroonmootorid – 9 %
- elektriahjud ja alaldid – 11 %
- valgustus ja elukondlik koormus – 22 %
- võrgukaod – 8 %

Sellise tüüpkoormuse jaoks koostatud staatilisi karakteristikuid saab lihtsuse mõttes kasutada üldjuhul, sõltumata konkreetse koormuse tegelikust koostisest.

Kui vaadelda elektrivõrgu talitlust olukorras, kus pinge ja sagedus ei erine oluliselt nimiväärtusest, võib staatilisi karakteristikuid selles piirkonnas ka lineariseerida ning pinge ja sageduse mõju koormusele iseloomustada aktiiv- ja reaktiivkoormuse **pinge-** ja **sagedustundlikkusega**

$$\frac{\partial P}{\partial U} \quad \frac{\partial Q}{\partial U} \quad \frac{\partial P}{\partial f} \quad \frac{\partial Q}{\partial f}$$

Need suurused nagu ka üldistatud tüüpkarakteristikud antakse käsiraamatutes suhtühikutes, et neid saaks kasutada sõltumata nimipingest ja koormusest.

Kuna sagedus on ühesugune kogu elektrisüsteemis ning võib nimisagedusest märkimisväärselt erineda ainult ülesüsteemiliste eriolukordade (avariide) puhul, pakuvad elektrivõrkudes rohkem huvi staatilised karakteristikud pinge järgi. Elektrivõrkude püsitalitluse arvutamisel on praktikas leidnud kasutamist mitmed sõlmekoormuse modelleerimise (kujutamise) moodused, mis arvestavad veidi erinevalt pinge mõju koormusele.

1. Koormused modelleeritakse vaadeldud staatiliste karakteristikutega. Meetod on ligikaudne, võrgu püsiseisundi arvutamise ülesanne (võrrandisüsteem) tuleb **mittelineaarne**.

2. Koormused loetakse pingest sõltumatuteks $\underline{S} = P + jQ = \text{const}$ ($P = \text{const}$, $Q = \text{const}$). Ka sel juhul on ülesanne **mittelineaarne** tingituna mitte-lineaarsest sõltuvusest sõlmepinge ja sõlmevoolu vahel

$$\underline{J} = \frac{\underline{S}^*}{\sqrt{3}\underline{U}^*}$$

Selline lihtne meetod, mis ei nõua staatiliste karakteristikute kasutamist, võimaldab küllalt hästi modelleerida kõrgepingevõrgu sõlmekoormusi, kui tarbijatena vaadeldakse koormuse all reguleeritavate trafode ja automaatpingeregulaatoriga alajaamu. Sel juhul muutub trafode sekundaarpinge primaarpoole pingest praktiliselt sõltumatuks ning primaarpoole sõlmepinge ei saagi koormust oluliselt mõjutada.

3. Koormused modelleeritakse pingest sõltumatute sõlmevooludena $\underline{J} = \text{const}$. See tähendab, et sõlmekoormus loetakse võrdeliseks sõlmepingega $\underline{S} = \sqrt{3}\underline{U}\underline{J}^*$. See ei vasta küll koormuse tegelikule staatilisele karakteristikule, kuid võimaldab koostada elektrivõrgu püsiseisundi arvutamiseks **lineaarsed** võrrandid, mille lahendamine on palju lihtsam.
4. Koormusi modelleeritakse konstantsete takistuste või juhtivustega. Seda meetodit, mis oli kasutusel elektrivõrkude arvutusmodelite juures, püsitalitluse arvutamisel tänapäeval tavaliselt enam ei kasutata.

3.8 TOITEALLIKATE KUJUTAMINE PÜSITALITLUSE ARVUTUSEL

Üldjuhul mõistetakse **toiteallika** all generaatorit, elektrijaama, alajaama või võrgu mistahes sõlme, millest toidetakse võrku või võrgu osa. Olenevalt konkreetsest olukorrast võib sellist toiteallikat modelleerida näiteks voolu- või pingeallikaga.

Elektrivõrgu püsitalitluse arvutamisel kujutatakse sellist toiteallikat tavaliselt **toitesõlmena** koos informatsiooniga tema pinge, voolu või võimsuse kohta. Kui toitesõlme kohta on antud ainult koormusvool või -võimsus, nimetatakse teda **generaatorsõlmeks**. Sellist generaatorsõlme võib võrgu püsitalitluse arvutamisel üldisemas mõttes pidada ka **koormussõlmeks**, kuna ta erineb tarbija koormussõlmest formaalselt ainult koormusvõimsuse või -voolu suunamärgi poolest. Kui sõlmekoormust pole antud, nimetatakse sellist sõlme **balansisõlmeks** ja tema vool või võimsus selgub alles arvutamisel. Sõlme,

millel on antud komplekspinge väärtus, nimetatakse **baassõlmeks**. Lõpmatu võimsuse ja etteantud pingega sõlme, mis on samal ajal balansi- ja baassõlm, nimetatakse **tugisõlmeks**.

Mingi talitusmuutuja (võimsuse, pinge) hoidmine kindlal väärtusel eeldab selles sõlmes tavaliselt automaatreguleerimist.

4 ELEKTRIVÕRGU ELEMENTIDE TALITLUS

4.1 HOMOGEENNE LIIN

Elektriliin on ühtlaselt jaotatud parameetritega elektriabel ehk **homogeenne liin**. Mida pikem on liin, seda enam tuleb arvestada tema parameetrite jaotatust. Lühemate liinide puhul (õhuliinid alla 200...300 km) kasutatakse tavaliselt lihtsamaid, koondatud parameetritega aseskeeme (p 3.3).

Lähtume kolmefaasilise homogeenne liini tuntud võrranditest

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} l + \sqrt{3} \underline{I}_2 \underline{Z}_\lambda \operatorname{sh} \underline{\gamma} l \quad (4.1)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} \underline{Z}_\lambda} \operatorname{sh} \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} l \quad (4.2)$$

kus \underline{U}_1 \underline{U}_2 \underline{I}_1 \underline{I}_2 – pinged ja voolud liini alguses ja lõpus

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{z}\underline{y}} = \sqrt{(r + jx)(g + jb)} \quad \text{– levitegur } 1/\text{km}$$

$$\underline{Z}_\lambda = \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} = \sqrt{\frac{r + jx}{g + jb}} \quad \text{– lainetakistus } \Omega$$

r x g b – liini parameetrid kilomeetri kohta Ω/km , S/km

l – liini pikkus km.

Sageli kasutatakse homogeenne liini talitluse keerukate protsesside tutvustamiseks lihtsustust, mis põhineb asjaolul, et liinidel pingega $U_N \geq 110$ kV on reaktiivparameetrid aktiivparameetritest palju suuremad. See võimaldab jätta liini väga ligikaudsel vaatlemisel aktiivtakistuse ja aktiivjuhtivuse arvestamata ($r=0$ ja $g=0$). Saadakse **kadudeta liin**.

Liini **naturaalvõimsuseks** nimetatakse võimsust, mida edastatakse liinis, kui tema lõpus oleva koormuse takistus on võrdne liini lainetakistusega \underline{Z}_λ . Seega on naturaalvõimsus määratud nimipinge puhul valemiga

$$\underline{S}_{nat} = \frac{U_N^2}{\underline{Z}_\lambda^*} \quad (4.3)$$

Kadudeta liini puhul saab lainetakistuseks reaalsuuruse $\underline{Z}_\lambda = Z_\lambda = \sqrt{\frac{x}{b}}$, millele vastav naturaalvõimsus on samuti reaalsuurus, seega aktiivvõimsus

$$P_{nat} = \frac{U_N^2}{Z_\lambda} \quad (4.4)$$

Õhuliinide puhul sõltub lainetakistus vähe liini parameetritest ning jääb tavaliselt piiridesse 250...400 Ω . Kaabelliinidel on lainetakistus enamasti 35...40 Ω . Siit tulenevad ligikaudsed naturaalvõimsuse keskmised väärtused on tabelis 4.1.

Tabel 4.1 Liinide naturaalvõimsused

Liini nimipinge U_N kV	Naturaalvõimsus P_{nat} MW	
	Õhuliin	Kaabelliin
10	0,3	3
35	3	30
110	30	300
220	135	
330	360	

Olgu vaadeldud homogeenne liini üht olulist ja omapärast seisundit – naturaalvõimsuse edastamist kadudeta liinis ($r=0$ $g=0$). Siis on leviteguri avaldiseks

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{zy}} = j\sqrt{xb} = j\omega \sqrt{L_0 C_0} \quad (4.5)$$

kus ω – nurksagedus

L_0 – liini ühe kilomeetri induktiivsus

C_0 – liini ühe kilomeetri mahtuvus

Kui tähistada $\omega \sqrt{L_0 C_0} l = \lambda$, siis on võrrandites (4.1) ja (4.2) $\underline{\gamma} l = j\omega \sqrt{L_0 C_0} l = j\lambda$ ning teades, et $ch j\lambda = \cos \lambda$ ja $sh j\lambda = j \sin \lambda$, saab võrrandid (4.1) ja (4.2) esitada kujul

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \lambda + j\sqrt{3} \underline{I}_2 Z_\lambda \sin \lambda \quad (4.6)$$

$$\underline{I}_1 = j \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} Z_\lambda} \sin \lambda + \underline{I}_2 \cos \lambda \quad (4.7)$$

Füüsikaliselt sisult on suurus λ **liini lainepikkus**, mis näitab, milline osa elektromagnetilisest lainest (radiaanides) mahub liini pikkusega l .

Kui liini koormuseks on naturaalvõimsus, siis $\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} Z_\lambda}$ ja $\underline{U}_2 = \sqrt{3} Z_\lambda \underline{I}_2$

ning võrrandid (4.6) ja (4.7) saavad kuju

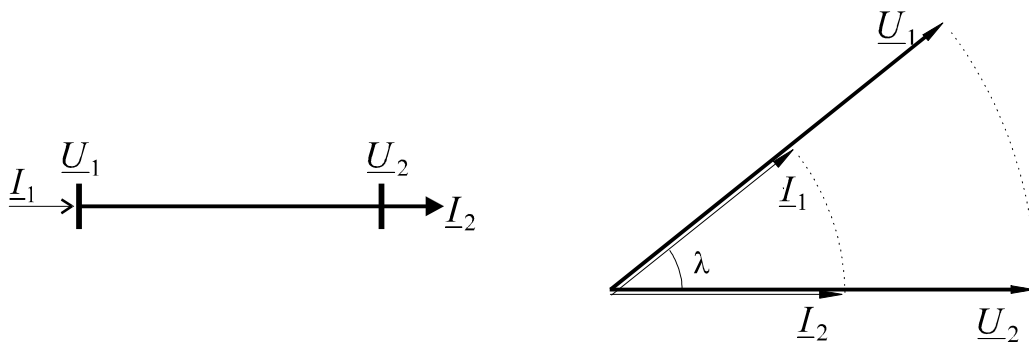
$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 (\cos \lambda + j \sin \lambda) = \underline{U}_2 e^{j\lambda} \quad (4.8)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 (\cos \lambda + j \sin \lambda) = \underline{I}_2 e^{j\lambda} \quad (4.9)$$

Kuna liini lainetakistus on reaalsuurus, siis on pinge ja voolu vektorid liini lõpus sama suunaga ning, kujutledes neid reaalteljel (jn 4.1), saab võrranditeks

$$\underline{U}_1 = U_2 e^{j\lambda} \quad (4.10)$$

$$\underline{I}_1 = I_2 e^{j\lambda} \quad (4.11)$$



Joonis 4.1 Naturaalvõimsuse edastamine kadudeta liinis

Eelnevast selgub ka, et naturaalvõimsuse ülekandmisel on pinge ja voolu moodulid kogu liini ulatuses (mis tähendab λ puhul) muutumatud ning pinge ja vool on igal pool faasis, mis tähendab seda, et liini mis tahes punktis edastatakse ainult aktiivvõimsust. Reaktiivvõimsuse puudumine seletub sellega, et naturaalvõimsuse edastamisel on liini mis tahes lõigus reaktiivvõimsuskaod liini induktiivtakistuses võrdsed liini sama lõigu mahtuvuses genereeritava reaktiivvõimsusega. Kui liinis edastatav võimsus aga näiteks suureneb,

suurenevad ka reaktiivvõimsuskaod ja tekib liini sisenev reaktiivvõimsus. See suurendab pinelangu ja liini pinge hakkab reaktiivvõimsuse suunas vähenema. Edastatava aktiivvõimsuse vähenemisel on kõik vastupidi. Seetõttu on naturaalgvõimsusel elektriliini talitluses oluline kvalitatiivne tähendus. Mida rohkem erineb pikas liinis edastatav võimsus naturaalsest, seda suuremad on reaktiivvõimsuse ja pinge reguleerimise probleemid.

4.2 HOMOGEENSE LIINI MODELLEERIMINE Π -ASESKEEMIGA

Arvestades, et $\underline{\gamma}l = \sqrt{\underline{ZY}}$ ja $\underline{Z}_\lambda = \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}}$, saab homogeense liini võrrandid (4.1) ja (4.2) esitada kujul

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \operatorname{ch}\sqrt{\underline{ZY}} + \sqrt{3}\underline{I}_2 \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}} \operatorname{sh}\sqrt{\underline{ZY}} \quad (4.12)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{\underline{Y}}{\underline{Z}}} \operatorname{sh}\sqrt{\underline{ZY}} + \underline{I}_2 \operatorname{ch}\sqrt{\underline{ZY}} \quad (4.13)$$

mis ühtib homogeense liini kui neliklemmi valemite ja konstantidega (p 3.1).

Kuna Eestis pole ka pikemate liinide pikkused võrreldavad elektromagnetilise laine pikkusega (6000 km), ei paku meile laineprotsessid liinide püsitalitluses praktilist huvi. Seetõttu võib lühema homogeense liini puhul edukalt kasutada ligikaudset ekvivalentset Π -aseskeemi, mille ekvivalentsete elementide parameetrid leitakse parandustegurite abil

$$R_e = k_R R \quad X_e = k_X X \quad G_e = k_G G \quad B_e = k_B B \quad (4.14)$$

Parandustegurid k_R , k_X , k_G ja k_B leitakse Π -aseskeemi ja homogeense liini kui neliklemmi konstantide võrrutamisel saadud võrrandisüsteemi lahendamise ja tulemuste matemaatilise lihtsustamise teel (arvesse võetakse ainult rittaarenduste esimesed liikmed). Nii saadakse parandusteguritele järgmised ligikaudsed valemid:

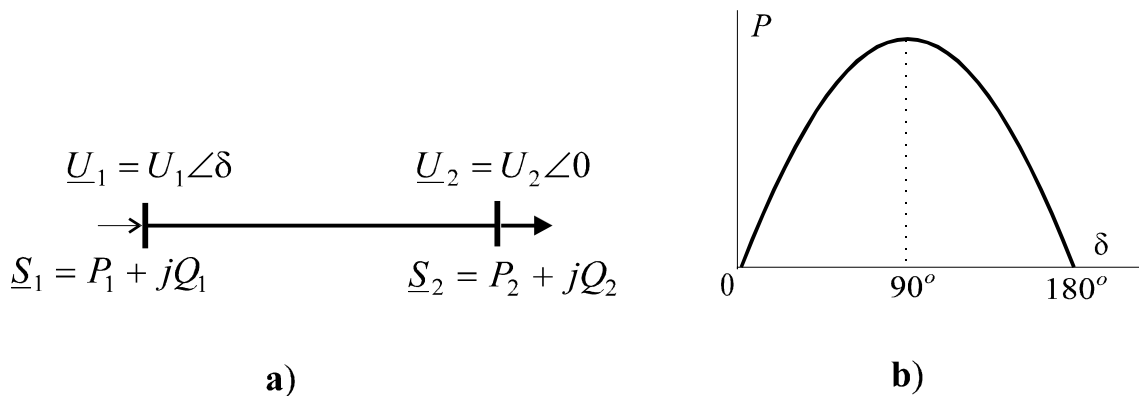
$$k_R = 1 - \frac{XB}{3} \quad k_X = 1 - \frac{XB}{6} \left[1 - \left(\frac{R}{X} \right)^2 \right] \quad k_B = 1 + \frac{XB}{12} \quad k_G = 0 \quad (4.15)$$

Π -aseskeemiga võib modelleerida rahuldava täpsusega kõiki kuni 2000 km pikkusi õhuliine, olles ekvivalentsete parameetrite saamiseks liini tegelikud parameetrid korrutanud parandusteguritega. Nagu eespool märgitud, pole aga liinidel pikkusega alla 200...300 km parandustegureid kasutada vaja.

4.3 LIINIS EDASTATAV VÕIMSUS

Elektroenergeetikas on kompleksuuruste kujutamiseks kasutusel kaks koordinaadisüsteemi – rist- ja polaarkoordinaadisüsteem. Kompleksvõimsuste kujutamiseks on sobivam ristkoordinaadistik, kus reaaltelg vastab aktiiv- ja imaginaartelg reaktiivvõimsusele. Pingete puhul sobib paremini polaarkoordinaadistik, kuna praktikas ei paku huvi pinge reaal- ja imaginaarkomponendid, vaid pinge moodulid ja vektoritevahelised nurgad.

Ülekandeliini talitluse või seisundi analüüsimiseks võib kujutada liini (jn 4.2a) neliklemmina (p 3.1).



Joonis 4.2 Võimsuse edastamine liinis: a) sisend- ja väljundmuutujad;
b) võimsuse nurkkarakteristik

Võimsused liini alguses ja lõpus võib avaldada kujul

$$\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1 = \sqrt{3} \underline{U}_1 \underline{I}_1^* \quad (4.16)$$

$$\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \sqrt{3} \underline{U}_2 \underline{I}_2^* \quad (4.17)$$

Kui on antud mõlemad pinged, saab võrranditest (3.3) ja (3.4), teades neliklemmi konstantidevahelisi seoseid ($\underline{AD} - \underline{BC} = 1$, $\underline{A} = \underline{D}$), avaldada voolud

$$\underline{I}_1 = \frac{A}{\sqrt{3}B} \underline{U}_1 - \frac{1}{\sqrt{3}B} \underline{U}_2 \quad (4.18)$$

$$\underline{I}_2 = \frac{1}{\sqrt{3}B} \underline{U}_1 - \frac{A}{\sqrt{3}B} \underline{U}_2 \quad (4.19)$$

Võttes näiteks liini lõpu pinge faasinurga võrdseks nulliga, võib liini alguse ja lõpu pinged kirjutada kujul $\underline{U}_2 = U_2 \angle 0^\circ$, $\underline{U}_1 = U_1 \angle \delta$. Samuti võib neliklemmi konstandid kujutada polaarkoordinaadistikus $\underline{A} = A \angle \alpha$, $\underline{B} = B \angle \beta$, $\underline{D} = \underline{A} = A \angle \alpha$ (sümmeetrilise neliklemmi puhul). Siis saab (4.18) ja (4.19) kirjutada kujul

$$\underline{I}_1 = \frac{A}{\sqrt{3}B} U_1 \angle(\alpha + \delta - \beta) - \frac{1}{\sqrt{3}B} U_2 \angle -\beta$$

$$\underline{I}_2 = \frac{1}{\sqrt{3}B} U_1 \angle(\delta - \beta) - \frac{A}{\sqrt{3}B} U_2 \angle(\alpha - \beta)$$

Pannes saadud avaldised valemitesse (4.16) ja (4.17), saab liini kompleksvõimsused kujul

$$\underline{S}_1 = \frac{A}{B} U_1^2 \angle(\beta - \alpha) - \frac{U_1 U_2}{B} \angle(\beta + \delta) \quad (4.20)$$

$$\underline{S}_2 = \frac{U_1 U_2}{B} \angle(\beta - \delta) - \frac{A}{B} U_2^2 \angle(\beta - \alpha) \quad (4.21)$$

ning viimastest aktiiv- ja reaktiivvõimsuste valemid liini alguses ja lõpus

$$P_1 = \frac{A}{B} U_1^2 \cos(\beta - \alpha) - \frac{U_1 U_2}{B} \cos(\beta + \delta) \quad (4.22)$$

$$Q_1 = \frac{A}{B} U_1^2 \sin(\beta - \alpha) - \frac{U_1 U_2}{B} \sin(\beta + \delta) \quad (4.23)$$

$$P_2 = \frac{U_1 U_2}{B} \cos(\beta - \delta) - \frac{A}{B} U_2^2 \cos(\beta - \alpha) \quad (4.24)$$

$$Q_2 = \frac{U_1 U_2}{B} \sin(\beta - \delta) - \frac{A}{B} U_2^2 \sin(\beta - \alpha) \quad (4.25)$$

Saadud valemid on aluseks liinide võimsusvoogude määramisel elektrivõrgu püsiseisundi arvutamisel, kus tänapäeval kasutatakse tavaliselt sõlmepingemeetodit. Esmalt arvutatakse sõlmepinged ja seejärel võimsused võrgu harudes.

Vahel kasutatakse liinis edastatava aktiivvõimsuse väga ligikaudseks hindamiseks ja füüsilise põhisisu ilmutamiseks eeldust, et liin kujutab endast ainult takistust (aseskeemi põikjuhtivust ei arvestata) ja et liini induktiivtakistus on märksa suurem aktiivtakistusest. Sel juhul võib võtta ka aktiivtakistuse nulliks ja neliklemmi konstantid avaldada liini induktiivtakistuse kaudu

$$\underline{A} = \underline{D} = 1 \angle 0^\circ \quad \underline{B} = X \angle 90^\circ$$

Võttes valemities (4.22) ja (4.24) $A = 1$, $B = X$, $\alpha = 0^\circ$ ja $\beta = 90^\circ$, saab liinis edastatava aktiivvõimsuse avaldiseks

$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta \quad (4.26)$$

Liinis edastatava võimsuse sõltuvus pingektorite vahelisest nurgast δ on graafiliselt joonisel 4.2b. Seda sõltuvust nimetatakse ka **võimsuse nurkarakteristikuks**. Sellest selgub liinis edastatava võimsuse võimalik maksimumväärtus, mida nimetatakse liini **läbilaske-** ehk **ülekandevõimeks**

$$P_{\max} = \frac{U_1 U_2}{X} \quad (4.27)$$

Seega sõltub liini ülekandevõime põhiliselt pingetest ja liini induktiivtakistusest. Mingis olemasolevas liinis on tegelikult edastatav võimsus ehk talitlusvõimsus seega põhiliselt määratud pingektorite vahelise nurgaga.

4.4 VÕIMSUSKAOD ELEKTRIVÕRGU ELEMENTIDES

Formaalselt võib defineerida võimsuskadu kui vaadeldavasse võrgu elementi (liin, trafo vm) siseneva ja elemendist väljuva võimsuse vahet $\Delta \underline{S} = \underline{S}_1 - \underline{S}_2$ (jn 4.2). Enamasti vaadeldakse praktilistes arvutustes aktiiv- ja reaktiivvõimsuskadu eraldi

$$\Delta \underline{S} = \Delta P + j \Delta Q \quad \Delta P = P_1 - P_2 \quad \Delta Q = Q_1 - Q_2$$

kusjuures näiteks liinide sisenevad ja väljuvad võimsused on määratud valemitega (4.22)...(4.25). Sageli näiteks lihtsate radiaalvõrkude puhul tekib vajadus leida sisenev või väljuv võimsus, teades võimsust vastaspoolel

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 + \Delta \underline{S} \quad P_1 = P_2 + \Delta P \quad Q_1 = Q_2 + \Delta Q$$

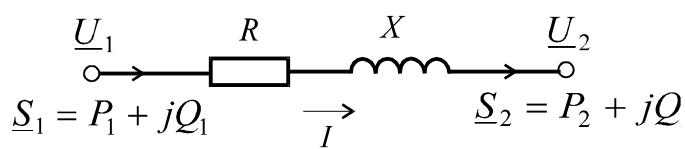
või

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_1 - \Delta \underline{S} \quad P_2 = P_1 - \Delta P \quad Q_2 = Q_1 - \Delta Q$$

Sel juhul tuleb võimsuskadu arvutada võimsuse või voolu ja vaadeldava elemendi aseskeemi alusel. Kui elemendi aseskeem koosneb mitmest harust, siis nende võimsuskadud summeeritakse.

Teades pikiharu aktiiv- ja reaktiivtakistust R , X ning neid läbivat voolu I (jn 4.3), on võimsuskadud leitavad (p 1.7) valemitega

$$\Delta P = 3I^2 R \quad \Delta Q = 3I^2 X \quad (4.28)$$



Joonis 4.3 Pikiharu

Sageli on lähtemuutujaks mitte vool, vaid võimsus. Siis avaldatakse vool harusse siseneva või harust väljuva võimsuse kaudu

$$I = \frac{S_1}{\sqrt{3}U_1} = \frac{S_2}{\sqrt{3}U_2} \quad (4.29)$$

Kasutades voolu avaldamiseks üldjuhul valemit

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} \quad (4.30)$$

ja pannes selle valemitesse (4.28), saab praktikas väga vajalikud ja tuntud valemid võimsuskadude arvutamiseks

$$\Delta P = \frac{S^2}{U^2} R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R \quad (4.31)$$

$$\Delta Q = \frac{S^2}{U^2} X = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X \quad (4.32)$$

Seejuures tuleb arvestada, et võimsused ja pinge peavad olema mõõdetud või antud ühes ja samas kohas (takistuse ees või taga).

Võimsuskad liinides

Liinide puhul lisanduvad kadudele pikiharus üldjuhul veel kaod aseskeemi põikharudes (koroona- ja mahtvuskad). Nii võib määrata liini summaarse aktiivkaod valemiga

$$\Delta P_L = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R + \Delta P_{kor} \quad (4.33)$$

Tingituna koroonakadude väiksusest ja hindamise raskusest jäetakse need praktikas paljudel juhtudel arvestamata.

Liini summaarne reaktiivvõimsuskadu arvutatakse valemiga

$$\Delta Q_L = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X - U^2 B \quad (4.34)$$

kus teine liige $U^2 B = \Delta Q_C$ on mahtvuskadu ehk liini mahtvuses genereeritud (induktiivne) reaktiivvõimsus. Õhuliinidel pingega $U_N \leq 35$ kV jäetakse see tavaliselt arvestamata.

Võimsuskad trafodes

Trafo aseskeemis (jn 3.3a) modelleerib pikitakistus R mähiste aktiivtakistust, millele vastab vaseskadu, ja X puistetakistust, millele vastab puistekadu. Põikjuhtivus G modelleerib trafo rauaskadu ning B magneetimiskadu.

Vaseskadu on kadu pikiharu elemendis, seda arvutatakse analoogiliselt valemiga (4.31)

$$\Delta P_{Cu} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{S^2}{U^2} R \quad (4.35)$$

Korrutades ja jagades saadud avaldist trafo nimivõimsuse ruuduga S_N^2 ning arvestades, et (3.11) kohaselt

$$\frac{S_N^2}{U^2} R \approx \frac{S_N^2}{U_N^2} R = \Delta P_l$$

saab vaseskao leida valemiga, mis näitab tema sõltuvust trafo koormatusest $\frac{S}{S_N}$

$$\Delta P_{Cu} = \Delta P_l \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 \quad (4.36)$$

Puistekao saab leida analoogiliselt valemiga (4.35)

$$\Delta Q_X = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X = \frac{S^2}{U^2} X \quad (4.37)$$

Rauaskao võib (tabel 1.3) määrata valemiga

$$\Delta P_{Fe} = U^2 G \quad (4.38)$$

või võtta ta, arvestades talitluspinge mitteolulist erinevust nimipingest,

$$\Delta P_{Fe} \approx \Delta P_t \quad (4.39)$$

nagu on tehtud joonisel 3.3b.

Magneetimiskadu leitakse analoogiliselt valemiga (4.38) või võetakse ligikaudu võrdseks tühijooksu vastava suurusega (3.16), nagu näeb jooniselt 3.3b

$$\Delta Q_B = U^2 B \approx \Delta Q_t = \frac{I_t \% S_N}{100} \quad (4.40)$$

Kokku võttes saab trafo summarse aktiivvõimsuskao määrata valemiga

$$\Delta P_T = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} = \frac{S^2}{U^2} R + U^2 G \approx \Delta P_l \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 + \Delta P_t \quad (4.41)$$

ning summaarse reaktiivvõimsuskao valemiga

$$\Delta Q_T = \Delta Q_X + \Delta Q_B = \frac{S^2}{U^2} X + U^2 B \approx \frac{S^2}{U^2} X + \frac{I_t \% S_N}{100} \quad (4.42)$$

4.5 ENERGIAKAOD

Sageli on elektrivõrgus ja selle elementides vaja arvutada aasta energiakadu eriti majanduslike võrdluste puhul. Võrgu energiakadu on võrgu üksikute elementide energiakadude summa. Elemendi energiakadu ΔW koosneb kahest osast: asekemi pikiharule vastavast energiakaost $\Delta W'$ ja põikharule vastavast energiakaost $\Delta W''$.

Aktiivvõimsuskadu põikharus $\Delta P''$ on määratud elemendi aktiivjuhtivuse ja temale rakendatud talitluspingega. Kuna viimane muutub ajas vähe, nimetatakse seda kadu sageli ka **püsikaoks** ja vastav energiakadu leitakse valemiga

$$\Delta W'' = \Delta P'' T \quad (4.43)$$

kus T – aasta talitlusaeg, mis võetakse tavaliselt 8760 h.

Elektriliinide puhul, nagu eespool mainitud, võetakse tavaliselt $\Delta P'' = 0$ ning järelikult ka $\Delta W'' = 0$. Trafodel, kui $\Delta P_{Fe} \approx \Delta P_t$, siis

$$\Delta W'' = \Delta P_{Fe} T \approx \Delta P_t T \quad (4.44)$$

Kuna elemendi pikiharu aktiivvõimsuskadu $\Delta P'$, mida võib arvutada valemiga (4.28) või (4.31), on koormuse muutumise tõttu ajas muutuv, siis nimetatakse teda ka **muutuvkaoks**. Vastav energiakadu leitakse üldjuhul valemiga

$$\Delta W' = \int_0^T \Delta P' dt = 3R \int_0^T I^2 dt = R \int_0^T \frac{S^2}{U^2} dt \approx \frac{R}{U_N^2} \int_0^T S^2 dt \quad (4.45)$$

Praktikas asendatakse integreerimine summeerimisega näiteks astmeliseks võetud koormuskestusgraafiku puhul

$$\Delta W' = \frac{R}{U_N^2} \sum_{i=1}^m S_i^2 \Delta t_i \quad (4.46)$$

Kui koormusgraafik pole teada, võib energiakadu hinnata ligikaudselt, kasutades selleks kaoaja mõistet. **Kaoaeg** τ on fiktiivne aeg, millele maksimaalkoormusega talitluses vastaks sama energiakadu kui talitlusel tegeliku koormusgraafiku järgi kogu aasta vältel. Siis saab aasta energiakao leida valemiga

$$\Delta W' = \Delta P_m' \tau \quad (4.47)$$

kus $\Delta P_m'$ – aktiivvõimsuskadu maksimaalkoormusel

See meetod on analoogiline energia määramisega p 3.6, valem (3.19).

Kaoaja leidmiseks kasutatakse mitut ligikaudset meetodit, näiteks käsiraamatus toodud graafikut $\tau = f(T_m, \cos \varphi)$ või kaoaja leidmist empiirilise valemiga

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_m}{10000} \right)^2 8760 \text{ h} \quad (4.48)$$

kus T_m – maksimaalkoormuse kasutusaeg (p 3.6)

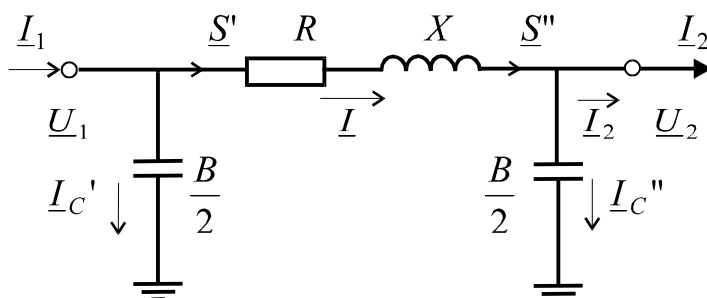
Trafo summaarse energiakao saab, lähtudes valemist (4.41), määrata valemiga

$$\Delta W_T = \Delta P_l \left(\frac{S_m}{S_N} \right)^2 \tau + \Delta P_t T \quad (4.49)$$

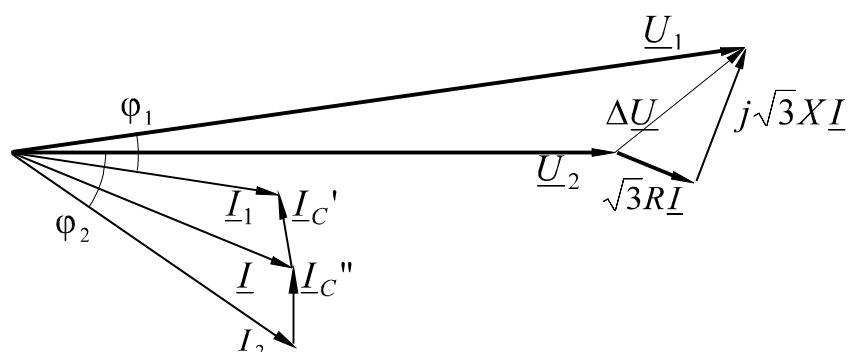
Kolmemähiseliste trafode puhul võib muutuvkaod leida iga mähise kohta eraldi ning tulemused liita.

4.6 PINGELANG JA PINGEKADU

Vaatleme elektrivõrgu kõige tüüpilisema elemendi – elektriliini talitlust. Olgu antud liini aseseemi parameetrid (jn 4.4) ja pinge \underline{U}_2 ning vool \underline{I}_2 liini lõpus. Leida tuleb pinge \underline{U}_1 ja vool \underline{I}_1 liini alguses.



Joonis 4.4 Elektriliini aseseem



Joonis 4.5 Elektriliini pingete ja voolude vektordiagramm

Teades pinget \underline{U} , saab Ohmi seaduse järgi leida voolu liini pooles juhtivuses

$$\underline{I}_C'' = j \frac{B}{2} \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}} \quad (4.50)$$

ning seejärel voolu aseseemi pikiharus $\underline{I} = \underline{I}_2 + \underline{I}_C''$. Vaadeldavat illustreerib vektordiagramm (jn 4.5). Nagu näha avaldisest (4.50), on vektor \underline{I}_C'' risti vektoriga \underline{U}_2 . Teades voolu takistuses \underline{Z} , saab leida pingelangu ning pinge liini alguses

$$\begin{aligned}\Delta \underline{U} &= \sqrt{3} \underline{Z} \underline{I} \\ \underline{U} &= \underline{U}_2 + \Delta \underline{U} = \underline{U}_2 + \sqrt{3} \underline{Z} \underline{I}\end{aligned}\quad (4.51)$$

Pannes pingelangu avaldisse takistuse kujul $\underline{Z} = R + jX$, saab kirjutada

$$\Delta \underline{U} = \sqrt{3}(R + jX)\underline{I} = \sqrt{3}R\underline{I} + j\sqrt{3}X\underline{I}\quad (4.52)$$

mille põhjal võib pingelangu kujutada vektordiagrammis voolusuunalise ja sellega risti oleva komponendi summana. Pärast pinget \underline{U} määramist leitakse vool pooles liini juhtivuses analoogiliselt (4.50)

$$\underline{I}_C' = j \frac{B}{2} \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3}}\quad (4.53)$$

millele vastav vektor on risti pingvektoriga \underline{U} . Nüüd saab leida ka liini siseneva voolu

$$\underline{I}_1 = \underline{I} + \underline{I}_C'$$

Vaadeldes saadud pingete vektordiagrammi eraldi (jn 4.6a) ning valides lähtepinget \underline{U}_2 vektori reaaltelje suunaliseks ($\underline{U}_2 = U_2$), võib pingelangu vektori lahutada lähtepinget suhtes piki- ja ristsuunaliseks komponendiks ΔU_p ja δU_r

$$\Delta \underline{U} = \Delta U_p + j\delta U_r\quad (4.54)$$

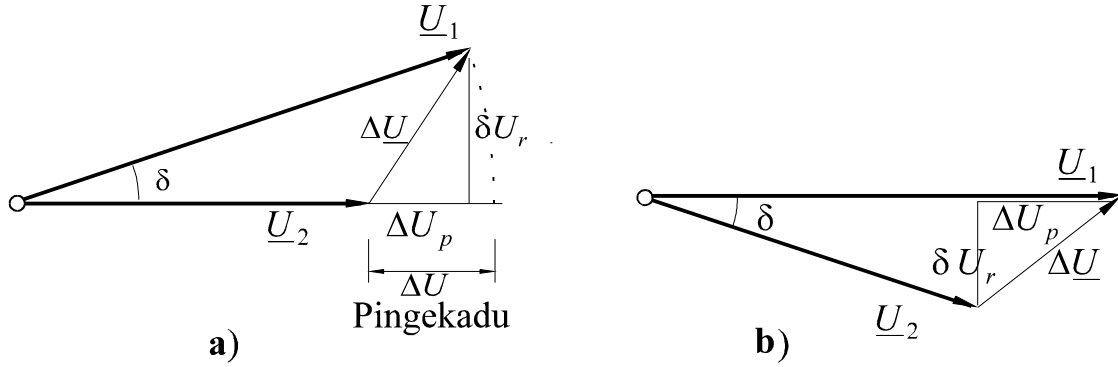
ning avaldada pinget liini alguses nende kaudu

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta \underline{U} = U_2 + \Delta U_p + j\delta U_r\quad (4.55)$$

Kuna praktikas pakuvad rohkem huvi pingete moodulid, siis võib **pingelangu piki-** ja **ristkomponendi** kaudu avaldada seose ka liini lõpu ja alguse pingemoodulite vahel (täisnurksest kolmnurgast jn 4.6a)

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_p)^2 + (\delta U_r)^2}\quad (4.56)$$

Kui pingete vektoriaalset vahet $\Delta \underline{U} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2$ nimetatakse **pingelanguks**, siis pingete aritmeetilist vahet ehk pingemoodulite vahet $\Delta U = U_1 - U_2$ **pingekaoks**. Nagu näha jooniselt 4.6a, **ei ole pingekadu pingelangu moodul** $\Delta U \neq |\Delta \underline{U}|$.



Joonis 4.6 Pingelang ja pingekadu elektrivõrgu elemendis

Kui lähtepinge on aga pingele liini alguses \underline{U}_1 , võib seda kujutada vektorina reaalteljel (jn 4.6b) ning avaldada pingele liini lõpus analoogiliselt (4.55)

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \Delta \underline{U} = U_1 - \Delta U_p - j\delta U_r \quad (4.57)$$

ning pingemooduli valemiga

$$U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U_p)^2 + (\delta U_r)^2} \quad (4.58)$$

Nagu eespoolgi võetakse pingelangu piki- ja ristkomponendi suunad lähtepinge vektori suhtes.

Saadud valemite kasutamiseks tuleb arvutada pingelangu piki- ja ristkomponent. Tuletame valemid nende määramiseks voolu või võimsuse järgi.

Olgu lähtepinge vektor võetud reaaltelje suunaliseks ($\underline{U} = U$) ning vaadeldavat takistust $\underline{Z} = R + jX$ läbiv vool $\underline{I} = I_p - jI_q = I \cos \varphi - jI \sin \varphi$. Siis on pingelang

$$\begin{aligned} \Delta \underline{U} &= \sqrt{3} \underline{I} \underline{Z} = \sqrt{3} (I_p - jI_q)(R + jX) = \\ &= \sqrt{3} (I_p R + I_q X) + j\sqrt{3} (I_p X - I_q R) \end{aligned} \quad (4.59)$$

Saadud reaali- ja imaginaarosad ongi pingelangu piki- ja ristkomponendid (4.54)

$$\Delta U_p = \sqrt{3} (I_p R + I_q X) \quad (4.60)$$

$$\delta U_r = \sqrt{3} (I_p X - I_q R) \quad (4.61)$$

Kui võrgu arvutamine toimub võimsuse alusel, siis võib valemis (4.59) avaldada voolu võimsuse ja pingele kaudu takistuse ees või taga (jn 4.4)

$$\underline{I} = \frac{\underline{S}'^*}{\sqrt{3}\underline{U}_1^*} = \frac{\underline{S}''^*}{\sqrt{3}\underline{U}_2^*}$$

Kirjutades lihtsuse mõttes

$$\underline{I} = \frac{\underline{S}^*}{\sqrt{3}\underline{U}^*}$$

ja lisades nõude, et võimsus ja pinge olgu antud ühes ja samas kohas, saab pingelangu piki- ja ristkomponendi valemid analoogiliselt (4.59)...(4.61) esitada kujul

$$\Delta\underline{U} = \sqrt{3}\underline{I}\underline{Z} = \frac{\underline{S}^*\underline{Z}}{\underline{U}^*} = \frac{\underline{S}^*\underline{Z}}{U} = \frac{(P-jQ)(R+jX)}{U} = \frac{PR+QX}{U} + j\frac{PX-QR}{U} \quad (4.62)$$

$$\Delta U_p = \frac{PR+QX}{U} \quad (4.63)$$

$$\delta U_r = \frac{PX-QR}{U} \quad (4.64)$$

Tavaliselt võib võrkudes nimipingega $U_N \leq 110$ kV (välja arvatud väga koor-
matud 110 kV liinid) lugeda $U \pm \Delta U_p \gg \delta U_r$ (pingevektorite vaheline nurk δ
on väga väike, jn 4.6). See võimaldab praktilistes arvutustes jätta pingelangu
ristkomponendi sageli arvestamata. Siis saavad avaldised (4.55) ja (4.57) kuju

$$U_1 = U_2 + \Delta U_p \quad U_2 = U_1 - \Delta U_p$$

millest ilmneb, et pingelangu pikikomponent on saanud pingekao tähenduse.
Seega võib ligikaudsetes arvutustes (tavaliselt pingetel kuni 110 kV) **võtta**
pingekao võrdseks pingelangu pikikomponendiga ja kasutada tema arvu-
tamiseks valemit

$$\Delta U = \sqrt{3}(I_p R + I_q X) = \frac{PR+QX}{U} \quad (4.65)$$

Ligikaudsete arvutuste puhul näiteks jaotusvõrkude arvutamisel võetakse
täiendava lihtsustamise eesmärgil sageli veel valemis (4.65) pinge võrdseks
nimipingega $U \approx U_N$.

5 LIHTSATE ELEKTRIVÕRKUDE PÜSISEISUNDI ARVUTAMINE

5.1 PÜSISEISUNDI ARVUTAMISE ÜLESANNE JA SELLE LIHTSUSTAMINE

Võrgu püsitalitluse mingile ajamomendile vastava seisundi arvutamise "klassikalise" ülesande lähteandmeteks on

- võrgu ühendusskeem
- võrgu elementide parameetrid
- sõlmekoormused
- pinge vähemalt ühes sõlmes

Üldjuhul tuleb arvutada kõik seisundimuutujad ehk seisundiparameetrid. Käesolevas raamatus vaadeldakse ainult "klassikalisi" ülesandeid.

Elektrivõrkude arvutamise aluseks on seosed (matemaatiline mudel), mis koostatakse elektrotehnika põhiseaduste põhjal. Tavaliselt on ülesanne mitte-lineaarne (p 3.7). Seda (enamasti võrrandisüsteemi) tuleks lahendada iteratsioonimeetodil (järkjärguliste lähenduste meetodil). Esimesel iteratsioonisammul võib kõik sõlmepinged võtta näiteks võrdseks nimipingega. Ligikaudsete arvutuste puhul piirduetaksegi sageli esimese iteratsiooniga ehk **arvutusega nimipinge järgi**. Vahel kasutatakse sellist arvutust, vaatamata tulemuste ligikaudsusele, elektrivõrkude projekteerimisel, jaotusvõrkude arvutamisel ning lihtsate elektrivõrkude püsiseisundi arvutamisel, mil ei kasutata arvuteid.

Lihtsateks nimetame tinglikult elektrivõrke, milles on suhteliselt vähe harusid (liine, trafosid) ja mis tavaliselt talitlevad avatult (radiaalskeem) või ainult mõne suletud kontuuriga. Kui keerukamate võrkude arvutamiseks kasutatakse tänapäeval arvuteid, siis lihtsaid võrke võib arvutada ka ilma nüüdisarvutite ja spetsiaalprogrammidega.

Käesolevas peatükis pööratakse peatähelepanu elektrivõrgu talitluse **füüsikalisele sisule**, ei eeldata arvutite kasutamist ega sellega kaasnevat ülesande formaliseerimist. Seega on oluliste lihtsustuste tegemine arvutustel paratamatu.

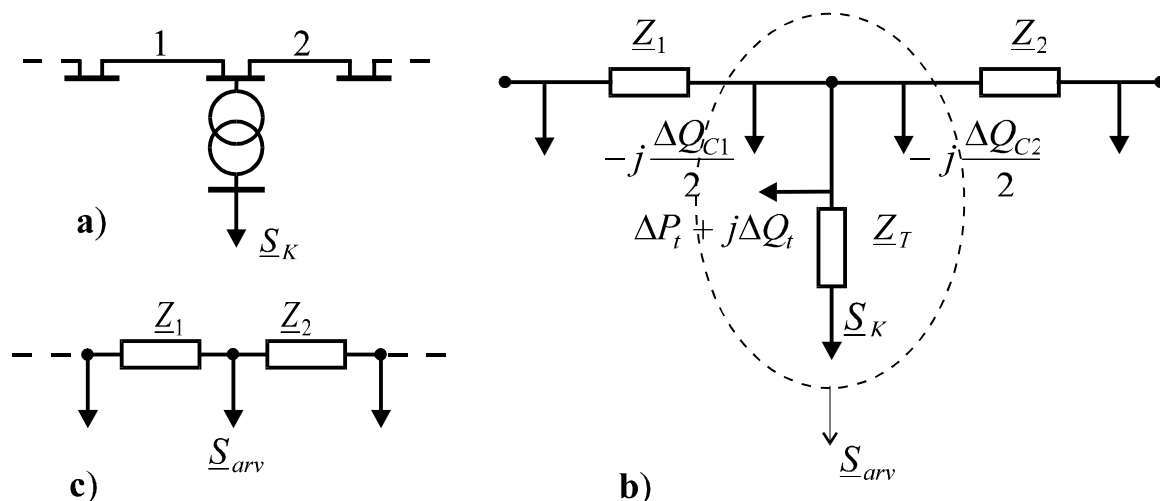
Üheks lihtsustusvõtteks on kasutada nn **arvutusliku koormuse** mõistet. Arvutuslik koormus on sõlmekoormus, mis sisaldab alajaama koormust (antakse tavaliselt alajaama sekundaarpoolel), võimsuskadu alajaama trafo(de)s ning

mahtvuslikke võimsusi vaadeldava sõlme ühendatud liinide pooltes juhtivustes. Olgu joonisel 5.1a kujutatud sõlme koormus \underline{S}_K antud alampinge pooltel. Siis leitakse sõlme arvutuslik koormus \underline{S}_{arv} tehtega

$$\underline{S}_{arv} = \underline{S}_K + \Delta\underline{S}_T - j \frac{\Delta Q_{C1} + \Delta Q_{C2}}{2} = \underline{S}_K + \Delta\underline{S}_T - j U_N^2 \frac{B_1 + B_2}{2} \quad (5.1)$$

kus $\Delta\underline{S}_T$ – võimsuskaod trafos (p 4.4), mis leitakse nimipinge alusel B_1, B_2 – liinide mahtvuslikud juhtivused

Arvutuslike koormuste kasutamine lihtsustab võrgu aseskeemi oluliselt, kuna alles jäävad ainult pikiharud (jn 5.1b, c). Lihtsustus toimub seetõttu, et kaod põikharudes ja trafos, mis ühendatakse sõlme koormusega, leitakse ligikaudselt nimipinge alusel.



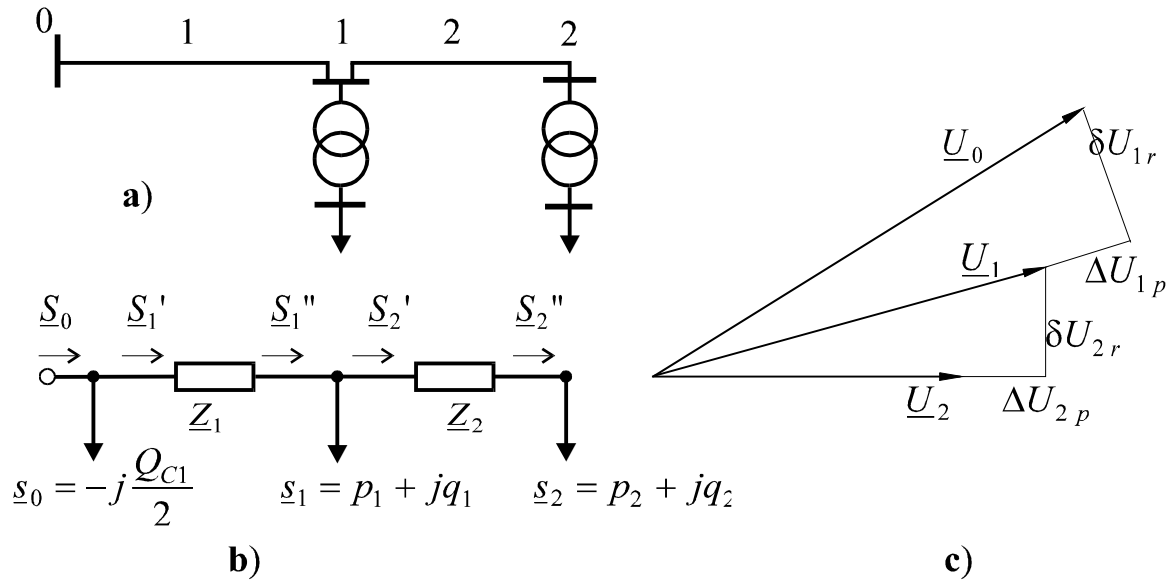
Joonis 5.1 Sõlme arvutuslik koormus: a) sõlme ümbruse skeem; b) aseskeem; c) aseskeem arvutusliku koormusega

5.2 RADIAALÜLEKANDEVÕRGU ARVUTAMINE

Vaatleme lihtsat avatud ehk radiaalülekandevõrku (jn 5.2a). Minnes üle arvutuslikele koormustele, saab aseskeemi (jn 5.2b) arvutuslike koormustega $\underline{s}_1 = p_1 + j q_1$, $\underline{s}_2 = p_2 + j q_2$. Edasine arvutuskäik sõltub sellest, millise sõlme pinge on antud. Tavaliselt on pinge antud toitesõlmes või võetakse see etteantuks võrgu lõpus näiteks eeldatavas madalaima pingega sõlmes.

Antud on sõlme 2 pinged

Arvutatakse liinide kaupa, alustades etteantud pingega sõlmest 2. Kõigepealt leitakse võimsuskad liinis 2 (4.29), (4.30)



Joonis 5.2 Radiaalülekandevõrgu arvutamine: a) võrgu skeem; b) aseskeem; c) pingete vektordiagramm

$$\Delta P_2 = \frac{(P_2'')^2 + (Q_2'')^2}{U_2^2} R_2 \quad \Delta Q_2 = \frac{(P_2'')^2 + (Q_2'')^2}{U_2^2} X_2 \quad (5.2)$$

Seejuures Kirchhoffi I seaduse kohaselt $P_2'' = p_2$, $Q_2'' = q_2$. Siis leitakse vastavalt (4.61) ja (4.62) pingelangu piki- ja ristkomponent liinis 2

$$\Delta U_{2p} = \frac{P_2'' R_2 + Q_2'' X_2}{U_2} \quad \delta U_{2r} = \frac{P_2'' X_2 - Q_2'' R_2}{U_2} \quad (5.3)$$

Valemi (4.56) järgi saab nüüd leida pinged sõlmes 1

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_{2p})^2 + (\delta U_{2r})^2} \quad (5.4)$$

Juhul kui pingelangu ristkomponenti ei arvestata, on (5.4) asemel $U_1 = U_2 + \Delta U_{2p}$. Siis saab avaldada võimsused liini 2 alguses ja liini 1 lõpus

$$P_2' = P_2'' + \Delta P_2 \quad Q_2' = Q_2'' + \Delta Q_2 \quad (5.5)$$

$$P_1'' = P_2' + p_1 \quad Q_1'' = Q_2' + q_1 \quad (5.6)$$

Edasi kordub kõik analoogiliselt (5.2)...(5.5) liiniga 1

$$\Delta P_1 = \frac{(P_1'')^2 + (Q_1'')^2}{U_1^2} R_1 \quad \Delta Q_1 = \frac{(P_1'')^2 + (Q_1'')^2}{U_1^2} X_1 \quad (5.7)$$

$$\Delta U_{1p} = \frac{P_1'' R_1 + Q_1'' X_1}{U_1} \quad \delta U_{1r} = \frac{P_1'' X_1 - Q_1'' R_1}{U_1} \quad (5.8)$$

$$U_0 = \sqrt{(U_1 + \Delta U_{1p})^2 + (\delta U_{1r})^2} \quad (\text{või } U_0 = U_1 + \Delta U_{1p}) \quad (5.9)$$

$$P_1' = P_1'' + \Delta P_1 \quad Q_1' = Q_1'' + \Delta Q_1 \quad (5.10)$$

Toitesõlmest 0 väljuv võimsus \underline{S}_0 erineb võimsusest \underline{S}_1' liini 1 poole mahtvusvõimsuse võrra

$$P_0 = P_1' \quad Q_0 = Q_1' - \frac{Q_{C1}}{2} = Q_1' - U_N^2 \frac{B_1}{2} \quad (5.11)$$

Võrgu pingete vektordiagramm on joonisel 5.2c.

Antud on toitesõlme pinged

Valemite (5.2), (5.3), (5.7) ja (5.8) puhul oli täidetud nõue, et võimsused ja pinged peavad olema võetud ühest ja samast kohast. Kui aga pinged on teada võrgu alguses ja võimsused ainult liini 2 lõpus, pole seda nõuet võimalik võimsuskadude ja pingelangu komponentide arvutamisel täita. Selleks et mitte hakata koostama ja lahendama mittelineaarseid võrrandeid, kasutatakse ligikaudset arvutust kahes etapis.

1. etapil leitakse nagu eespool näidatud, alates sõlmest 2, võimsuskadod ja võimsused, kuid valemitesse (5.2) ja (5.7) pannakse tegelike pingete asemele nimipinged (arvutus nimipinged järgi).

2. etapil leitakse, lähtudes toitesõlmest, sõlmepinged 1. etapil leitud võimsustega järgi. Nii leitakse pingelangu komponendid liinis 1 valemitega

$$\Delta U_{1p} = \frac{P_1' R_1 + Q_1' X_1}{U_0} \quad \delta U_{1r} = \frac{P_1' X_1 - Q_1' R_1}{U_0}$$

ja pinged sõlmes 1 valemi (4.58) kohaselt

$$U_1 = \sqrt{(U_0 - \Delta U_{1p})^2 + (\delta U_{1r})^2}$$

Korrates sama liini 2 puhul, leitakse ka pinge U_2 .

Soovides suuremat täpsust, võib korrata võimsuste arvutamise etappi äsja leitud pingetega ja siis pingete arvutamise etappi täpsustatud võimsustega.

Koormuste staatiliste karakteristikute ja põikharude täpsem arvestamine

Vaadeldud arvutuskäike on põhimõtteliselt võimalik kasutada ka võrgu täpsemaks arvutamiseks. Seejuures ei kasutata arvutuslikke koormusi ja võimsused iga sõlme põikjuhtivuses määratakse arvutuse käigus tegeliku pinge järgi. Staatiliste karakteristikute ja tegelike pingete alusel leitakse ka täpsemad sõlmekoormused.

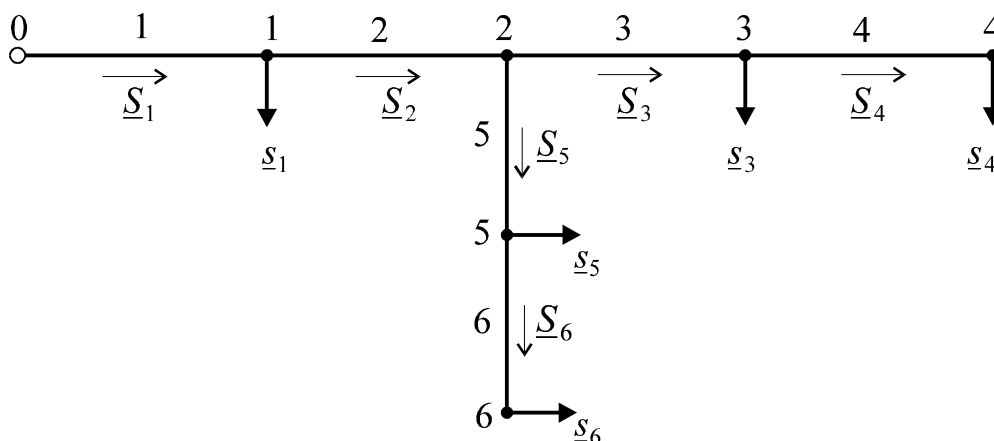
5.3 JAOTUSVÕRGU ARVUTAMINE

Jaotusvõrgud ($U_N \leq 35$ kV) talitlevad Eestis tavaliselt avatuina ehk radiaalvõrkudena. Jaotusvõrkudes on suhteliselt palju koormusi, informatsioon nende kohta on aga puudulik ja ebatäpne. Osaliselt seetõttu pole ka tarvidust täpsete arvutusmeetodite järele. Jaotusvõrkude arvutamisel tehakse tavaliselt järgmised lihtsustused:

- Ei arvestata liinide põikjuhtivusi. See lihtsustus ei kahjusta oluliselt jaotusvõrgu ($U_N \leq 35$ kV) seisundi arvutustulemusi.
- Ei arvestata trafode põikjuhtivusi. Trafode rauaskadusid arvestatakse ainult võrgu aktiivkadude ja energiakadude määramisel.
- Ei arvestata pingelangu ristkomponenti (p 4.6). Seega leitakse pingekadu kui pingelangu pikikomponent (4.65).
- Võimsus- ja pingekaod (4.31), (4.32), (4.65) arvutatakse nimipinge järgi.
- Harude võimsusvoogude arvutamisel ei arvestata võimsuskadusid.
- Kaabelliinide puhul ei arvestata nende induktiivtakistusi.
- Jaotusvõrkude arvutamisel ei arvutata kõigi sõlmede pingeid. Oluline on kontrollida ainult ekstreemsete (näiteks kõige kaugemate tarbijate) ja mõne tähtsama sõlme pinget.

Võrgu haruvõimsuste arvutamine

Kui võimsuskadusid ei arvestata, saab võimsused radiaalvõrgu harudes määrata antud koormusvõimsuste järgi Kirchhoffi I seaduse alusel. Näiteks leitakse joonisel 5.3 kujutatud jaotusvõrgus haruvõimsused järgmiselt:



Joonis 5.3 Radiaaljaotusvõrk

$$\underline{S}_4 = \underline{s}_4 \quad \underline{S}_3 = \underline{s}_3 + \underline{S}_4 = \underline{s}_3 + \underline{s}_4 \quad \text{jne}$$

ehk aktiiv- ja reaktiivvõimsused eraldi

$$\begin{aligned} P_4 &= p_4 & P_3 &= p_3 + p_4 & P_6 &= p_6 & P_5 &= p_5 + p_6 \\ P_2 &= p_3 + p_4 + p_5 + p_6 & P_1 &= p_1 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 \end{aligned} \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} Q_4 &= q_4 & Q_3 &= q_3 + q_4 & Q_6 &= q_6 & Q_5 &= q_5 + q_6 \\ Q_2 &= q_3 + q_4 + q_5 + q_6 & Q_1 &= q_1 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \end{aligned} \quad (5.13)$$

Soovi korral võib võimsuskadusid ka ligikaudselt arvestada, näiteks

$$P = p_3 + p_4 + p + p + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P + \Delta P$$

kus võimsuskadod leitakse nimipinge järgi, näiteks

$$\Delta P_3 = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_N^2} R_3$$

Pingete arvutamine

Olgu antud toitesõlme pinge ning kontrollida tuleb minimaalseid pingeid võrgus. Joonisel 5.3 näidatud võrgus on vaja leida pinged sõlmedes 4 ja 6

$$U_4 = U_0 - \Delta U_{04} \quad U_6 = U_0 - \Delta U_{06}$$

kus ΔU_{04} ΔU_{06} – summaarsed pingekaod indeksitega näidatud sõlmede vahel

Summaarne pingekadu kahe sõlme vahel leitakse kui neid sõlmi ühendavate harude pingekadude summa. Üldjuhul saab selle arvutada valemiga

$$\Delta U_{\Sigma} = \sum_i \frac{P_i R_i + Q_i X_i}{U_i} \approx \frac{1}{U_N} \left(\sum_i P_i R_i + \sum_i Q_i X_i \right) \quad (5.14)$$

kus i – vaadeldavaid sõlmi ühendavate harude indeks

Näites (jn 5.3) on pingekao ΔU_{04} puhul $i = 1, 2, 3, 4$ ja ΔU_{06} puhul $i = 1, 2, 5, 6$. Seega saab vajalikud pingekaod määrata valemiga (5.14) järgmiselt:

$$\Delta U_{04} = \frac{1}{U_N} (P_1 R_1 + P_2 R_2 + P_3 R_3 + P_4 R_4 + Q_1 X_1 + Q_2 X_2 + Q_3 X_3 + Q_4 X_4)$$

$$\Delta U_{06} = \frac{1}{U_N} (P_1 R_1 + P_2 R_2 + P_5 R_5 + P_6 R_6 + Q_1 X_1 + Q_2 X_2 + Q_5 X_5 + Q_6 X_6)$$

Kasutades Kirchhoffi I seadust haruvõimsuste määramiseks ja summaarse pingekao mõistet ning pingekao tuntud valemit kujul (4.65) või (5.14), saab lahendada mis tahes radiaaljaotusvõrgu pingete määramise ülesandeid.

5.4 ÜHTLASELT JAOTATUD KOORMUSEGA LIINI ARVUTAMINE

Madalpinge jaotusvõrkudes, kus liinil võib olla palju enam-vähem võrdseid koormusi peaaegu võrdsete vahekaugustega (linna tänavavalgustus), võib arvutamise lihtsustamiseks lugeda koormuse ühtlaselt jaotatuks liini või liiniosa ulatuses.

Võimsuskadu

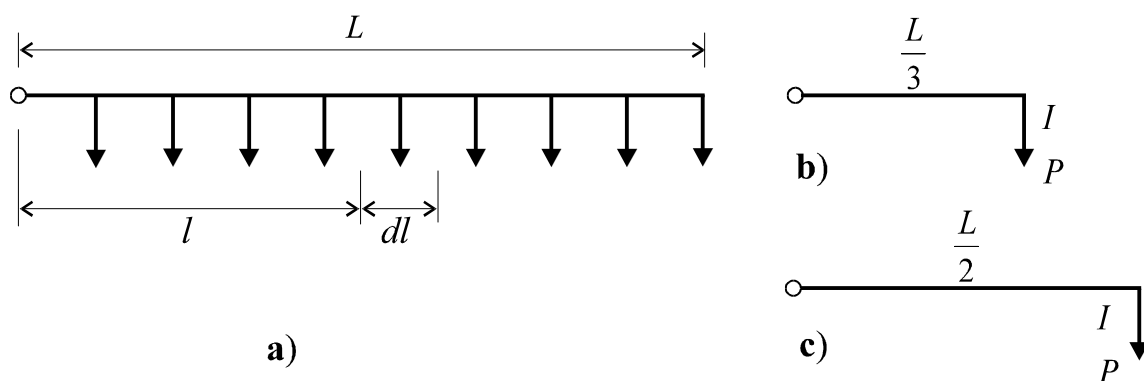
Vaatleme ühtlaselt jaotatud koormusega liini (jn 5.4a) pikkusega L (nt meetrites) ja erikoormusega i (A/m). Sellise teoreetiliselt ühtlase koormusega liini lõpus on vool 0, liini alguses $I = iL$ ja kaugusel l liini algusest $i(L-l)$. Kaugusel l olevas liinielemendis pikkusega dl on võimsuskadu

$$3[i(L-l)]^2 r dl$$

kus r – liini eritakistus (Ω/m).

Kogu liini võimsuskadu on siis leitav integreerimise teel

$$\Delta P = \int_0^L 3[i(L-l)]^2 r dl = -3ri^2 \frac{(L-l)^3}{3} \Big|_0^L = ri^2 L^3 = I^2 r L \quad (5.15)$$



Joonis 5.4 Ühtlaselt jaotatud koormusega liin

Võimsuskao poolest oleks ühtlase koormusega liiniga ekvivalentne liin (jn 5.4b), mille kogukoormus I on koondatud kaugusele $l = L/3$ liini algusest

$\Delta P = 3I^2 \left(r \frac{L}{3} \right) = I^2 r L$. Sama kehtib ka võimsusena antud koormuse puhul.

Pingekadu

Olgu liinil ainult ühtlaselt jaotatud aktiivkoormus p (W/m) ja summaarne koormusvõimsus liini alguses $P = pL$. Liini algusest kaugusel l on siis võimsus $p(L-l)$ ja liinielemendis pikkusega dl pingekadu

$$\frac{p(L-l)r dl}{U_N}$$

Pingekadu kogu liinis leitakse integreerimise teel

$$\Delta U = \int_0^L \frac{p(L-l)r dl}{U_N} = -\frac{pr}{U_N} \frac{(L-l)^2}{2} \Big|_0^L = \frac{pr L^2}{2U_N} = \frac{Pr L}{2U_N} \quad (5.16)$$

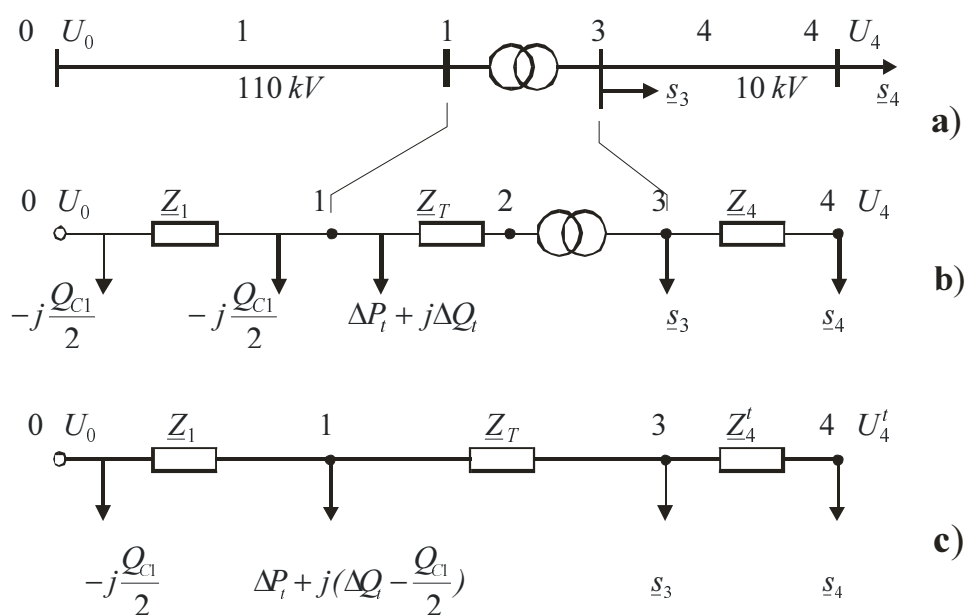
Siit ilmneb, et pingekao poolest oleks ühtlase koormusega liiniga ekvivalentne liin (jn 5.4c), mille kogu koormus P on koondatud liini keskele ($l = L/2$). See käib ka reaktiivkoormuse või vooluna antud koormuse kohta.

5.5 MITME NIMIPINGEGA VÕRGU ARVUTAMINE

Vahel tuleb arvutada võrke, mis koosnevad erineva nimipingega osadest. Sel juhul kasutatakse arvutamisel kaht erinevat lähenemist: 1) trafod kujutatakse ideaalset trafot sisaldavate aseskeemidena (p 3.4, jn 3.3); 2) võrgu kogu arvutuskeem taandatakse ühele baaspingele ning aseskeem ideaalseid trafosid ei sisalda.

Aseskeem sisaldab ideaalseid trafosid

Vaatleme näitena lihtsat radiaalvõrku, mis koosneb kahest erineva nimipingega liinist ja nendevahelisest trafost (jn 5.5a). Vastav aseskeem on joonisel 5.5b.



Joonis 5.5 Kahe nimipingega võrk: a) võrgu skeem; b) aseskeem ideaalse trafoga; c) 110 kV pingele taandatud aseskeem

Arvutuskäik on üldjoontes analoogiline p 5.2 ja 5.3 tooduga, kus arvutus toimus samm-sammult – harult harule ja sõlmelt sõlmele. Ainsaks erinevuseks on ideaalse trafo lisandumine sõlmede 2 ja 3 vahele (jn 5.5b). Ideaalsel trafol puudub võimsuskadu ja ideaalset trafot läbiv võimsusvoog ei muutu – võimsused ideaalse trafo sisendis ja väljundis on võrdsed. Sõlmede 4 ja 5 pinged on aga omavahel seotud trafo ülekandesuhtega

$$U_3 = \frac{U_2}{k} \quad U_2 = k U_3 \quad k = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$$

Muus osas ei erine arvutus millegi poolest p 5.2 ja 5.3 vaadeldust.

Arvutusskeem taandatakse ühele baaspingele

Kuigi baaspingeks võib olla põhimõtteliselt mis tahes pinge, on otstarbekas võtta selleks võrgu sellise osa nimipinge, mille puhul taandamisega seotud operatsioonide maht on minimaalne.

Joonisel 5.5c kujutatud skeemi puhul on 10 kV liini takistus ja sõlme 4 pinge taandatud 110 kV poolele

$$\underline{Z}'_4 = k^2 \underline{Z}_4 \quad U'_4 = k U_4$$

Sellega on kogu arvutusskeem taandatud pingele 110 kV ja edasine arvutus toimub nagu ühe nimipingega võrgus. Kui arvutuse tulemuseks on aga näiteks ka sõlme 4 pinge, siis saadakse see esialgu loomulikult taandatuna 110 kV-le

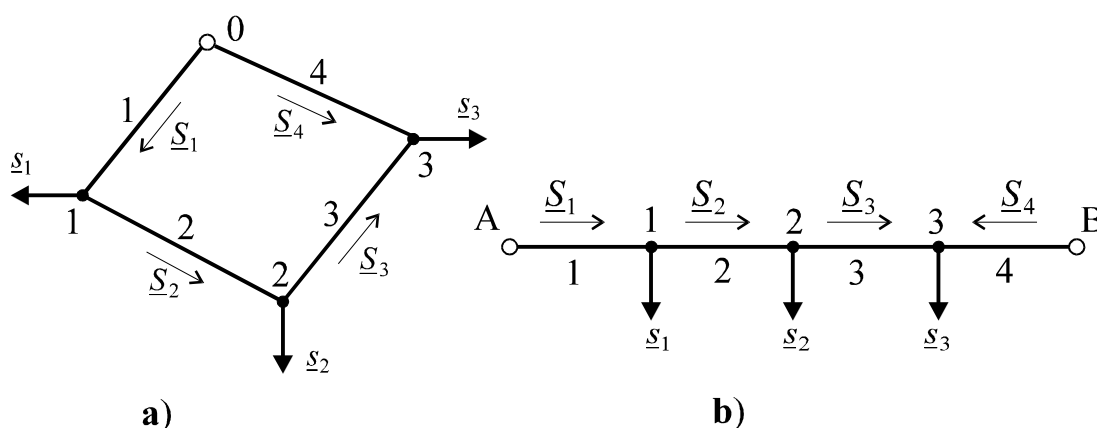
ning tegelik pinge leitakse seejärel tehtega $U_4 = \frac{U'_4}{k}$.

5.6 RINGLIINI ARVUTAMINE

Ringliiniks nimetatakse ühe suletud kontuuri ja ühe toitesõlmega võrku. See on lihtsaim suletud võrk. Joonisel 5.6a toodud ringliiniga elektrilises mõttes ekvivalentne on **kahepoolse toitega liin** toitesõlmede võrdsete pingete puhul $\underline{U}_A = \underline{U}_B = \underline{U}_0$ (jn 5.6b). See kahepoolse toitega liin saadi ringliini toitesõlme 0 mõttelise lõhestamise teel, mis ei muuda võrgu elektrilist seisundit.

Võimsuste jagunemise arvutamine

Vaadeldavas võrgus pole haruvõimsusi võimalik enam leida ainult Kirchhoffi I seaduse alusel nagu radiaalvõrgus (5.12), (5.13), kuna otsitavate haruvõimsuste arv on suurem võrrandite arvust. Abiks tuleb võtta ka Kirchhoffi II seadus, mis võimaldab koostada täiendava võrrandi – kontuurvõrrandi.



Joonis 5.6 Ringliin ja ekvivalentne kahepoolse toitega liin ($\underline{U}_A = \underline{U}_B$)

Valides esialgu tundmatute haruvoolude meelevaldsed positiivsed suunad joonisel 5.6a näidatud viisil, võib koostada kontuurvõrrandi

$$\sqrt{3}I_{\underline{1}}Z_{\underline{1}} + \sqrt{3}I_{\underline{2}}Z_{\underline{2}} + \sqrt{3}I_{\underline{3}}Z_{\underline{3}} - \sqrt{3}I_{\underline{4}}Z_{\underline{4}} = 0 \quad (5.17)$$

Et mitte lahendada tülikat mittelineaarset võrrandisüsteemi, on otstarbekas kasutada praktilist ligikaudset kaheetapilist arvutusmeetodit. Selle kohaselt leitakse esialgu võimsuste jagunemine nimipinge alusel, s.o võimsuskadusid arvestamata, ning arvutuse teisel etapil lisatakse võimsuskaod.

Võimsuste jagunemise ligikaudne arvutamine võimsuskadusid arvestamata

Korrutades (5.17) pooli nimipingega U_N ja võttes $\sqrt{3}I_j U_N = \underline{S}_j^*$, saab ligikaudse kontuurvõrrandi võimsuste kujul

$$\underline{S}_1^* Z_{\underline{1}} + \underline{S}_2^* Z_{\underline{2}} + \underline{S}_3^* Z_{\underline{3}} - \underline{S}_4^* Z_{\underline{4}} = 0$$

Minnes üle otsitavatele kompleksuurustele ja lisades sõlmevõrrandid, saab neljast kompleksvõrrandist koosneva võrrandisüsteemi nelja kompleksuuruse leidmiseks

$$\begin{aligned}
\underline{S}_1 \underline{Z}_1^* + \underline{S}_2 \underline{Z}_2^* + \underline{S}_3 \underline{Z}_3^* - \underline{S}_4 \underline{Z}_4^* &= 0 \\
\underline{S}_2 &= \underline{S}_1 - \underline{s}_1 \\
\underline{S}_3 &= \underline{S}_2 - \underline{s}_2 \\
\underline{S}_4 &= \underline{s}_3 - \underline{S}_3
\end{aligned} \tag{5.18}$$

Kasutades lahendamiseks asendusmeetodit võib leida võrrandisüsteemist (5.18) otsitava \underline{S}_1

$$\underline{S}_1 = \frac{\underline{s}_1(\underline{Z}_2^* + \underline{Z}_3^* + \underline{Z}_4^*) + \underline{s}_2(\underline{Z}_3^* + \underline{Z}_4^*) + \underline{s}_3 \underline{Z}_4^*}{\underline{Z}_1^* + \underline{Z}_2^* + \underline{Z}_3^* + \underline{Z}_4^*} = \frac{\underline{s}_1 \underline{Z}_{1-B}^* + \underline{s}_2 \underline{Z}_{2-B}^* + \underline{s}_3 \underline{Z}_{3-B}^*}{\underline{Z}_{A-B}^*} \tag{5.19}$$

kus \underline{Z}_{1-B} – summaarne takistus sõlmest 1 sõlmeni B jne.

Analoogiliselt leitakse toitesõlmest B väljuv võimsus \underline{S}_4 . Pole raske üldistada valemit (5.19) mis tahes arvu koormustega ringliinile või võrdsete toitepingetega kahepoolse toitega liinile ning saada valemid toitesõlmedest väljuvate võimsuste määramiseks

$$\underline{S}_A = \frac{\sum_i \underline{s}_i \underline{Z}_{i-B}^*}{\underline{Z}_{A-B}^*} \quad \underline{S}_B = \frac{\sum_i \underline{s}_i \underline{Z}_{A-i}^*}{\underline{Z}_{A-B}^*} \tag{5.20}$$

Valemities on murru lugejas sõlmekoormuste elektriliste momentide summa otsitavale võimsusele vastastoitesõlme suhtes ja murru nimetajas toitesõlmede vaheline summaarne takistus. Kõik takistused on valemities kaaskompleksidena. Kuna kadusid pole arvestatud, peab õigesti arvatud võimsuste summa olema võrdne sõlmekoormuste summaga

$$\underline{S}_A + \underline{S}_B = \sum_i \underline{s}_i \tag{5.21}$$

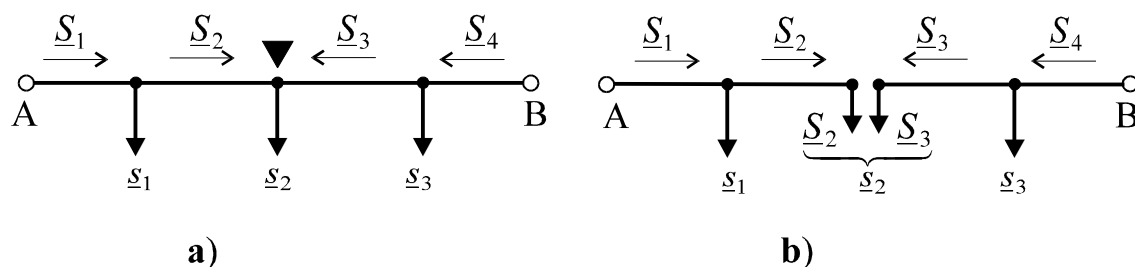
Kõigi ülejäänud harude võimsused leitakse toitesõlmedest väljuvate võimsuste kaudu Kirchhoffi I seaduse põhjal (vt nt (5.18)).

Kui on vaja leida täpsemat võimsuskadusid arvestavat võimsuste jagunemist, leitakse see arvutuse teises etapis.

Võimsuskadude ligikaudne arvestamine

Selleks võib kasutada järgmist korrektse teoreetilise tõestuseta meetodit, mis on end praktikas siiski õigustanud. Pärast võimsuste jagunemise ligikaudset määramist leitakse **võimsuste lahupunkt**. See on koormussõlm, kuhu võimsus

mõlemalt poolt suundub. Kui näiteks oletada, et vaadeldud ringliini või kahepoolse toitega liini võimsused ja nende tegelikud suunad, mis leiti võimsuskadusid arvestamata, vastavad joonisele 5.7a, siis on lahupunktiks sõlm 2. Lõhestame mõttes võrgu lahupunktis kaheks avatud (radiaal)osaks nii, et võrgu elektriline seisund ei muutu (jn 5.7b). Edasi leitakse saadud radiaalvõrkude harudes ligikaudselt võimsuskadod ja lisatakse need esialgsetele haruvõimsustele, nagu soovitati jaotusvõrgu haruvõimsuste määramisel (p 5.3).



Joonis 5.7 Kahepoolse toitega liini või ringliini “lõhestamine” võimsuste lahupunktis

5.7 KAHEPOOLSE TOITEGA LIINI ARVUTAMINE

Üldjuhul pole kahepoolse toitega liini toitesõlmede (näiteks eraldi alajaamade) pinged võrdsed $\underline{U}_A \neq \underline{U}_B$. Ligikaudsel arvutamisel kasutatakse siin võimsuste jagunemise leidmiseks **superpositsiooniprintsiipi**. Vastavalt sellele leitakse toitesõlmedest väljuvad võimsused osaliselt nagu eelmises punktis toitesõlmede võrdsete pingete puhul (5.20), ning liidetakse neile täiendav tasandusvõimsus. Toitesõlmede pingete erinevusest tingitud tasandusvool toitesõlme A poolt toitesõlme B suunas leitakse Ohmi seaduse järgi

$$\underline{I}_{tas} = \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_B}{\sqrt{3} \underline{Z}_{A-B}}$$

millele vastab ligikaudne tasandusvõimsus

$$\underline{S}_{tas} = \sqrt{3} U_N \underline{I}_{tas}^* = \frac{\underline{U}_A^* - \underline{U}_B^*}{\underline{Z}_{A-B}^*} U_N \quad (5.22)$$

Arvestades (5.20) ja (5.22), saab toitesõlmedest väljuvad võimsused avaldada valemitega

$$\underline{S}_A = \frac{\sum_i s_i \underline{Z}_{i-B}^*}{\underline{Z}_{A-B}^*} + \frac{\underline{U}_A^* - \underline{U}_B^*}{\underline{Z}_{A-B}^*} U_N \quad \underline{S}_B = \frac{\sum_i s_i \underline{Z}_{A-i}^*}{\underline{Z}_{A-B}^*} + \frac{\underline{U}_B^* - \underline{U}_A^*}{\underline{Z}_{A-B}^*} U_N \quad (5.23)$$

Võimsused teistes harudes leitakse nagu eespoolgi toitesõlmedest väljuvate võimsuste ja Kirchhoffi I seaduse järgi.

Ka valemid (5.23) ei arvesta võimsuskadusid. Täpsema tulemuse saamiseks võib võimsuskaod lisada p 5.6 vaadeldud ligikaudse meetodiga.

Võrreldes kahes viimases punktis saadud tulemusi, on näha, et valemid (5.20) kujutavad endast üldisemate valemite (5.23) erijuhtu, kus toitesõlmede pinged on võrdsed $\underline{U}_A - \underline{U}_B = 0$.

5.8 SILMUSVÕRGU ARVUTAMINE

Silmusvõrguks nimetatakse mitme suletud kontuuriga võrku. Sellise võrgu arvutamine on suhteliselt töömahukas ja nõuab arvutit (vt p 6).

Ilma arvuti ja elektrisüsteemi või -võrgu püsitalitluse arvutusprogrammiga on reaalne ainult mõnest kontuurist koosneva silmusvõrgu ligikaudne arvutamine, milleks on edukalt kasutatud **kontuurvõrrandite** või võrgu **teisendus-** ehk **transfiguratsioonimeetodit**.

Kontuurvõrrandite meetod

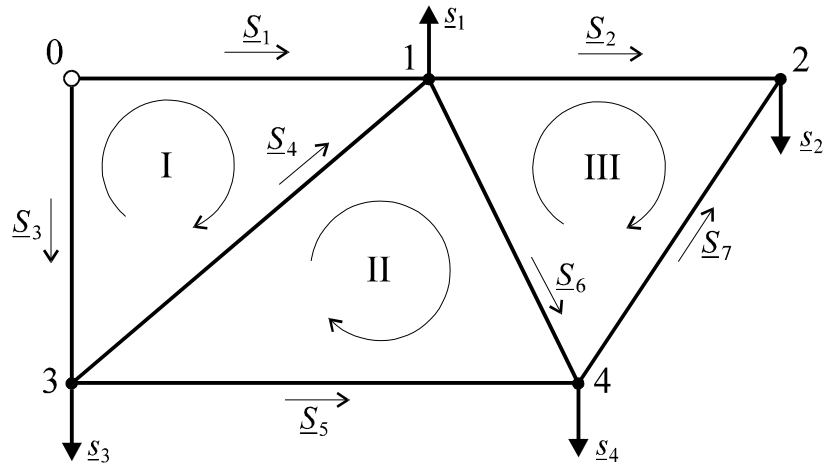
Ka siin nagu p 5.6 on otstarbekas kasutada ligikaudseid lineaarseid kontuurvõrrandeid, mis koostatakse Kirchhoffi II seaduse järgi võimsuste kujul. Joonisel 5.8 on kujutatud seitsme haru, nelja sõltumatu sõlme ja kolme sõltumatu kontuuriga silmusvõrk.

Elektrotehnika põhialustest on teada, et sõltumatute sõlmede arv n on ühe võrra väiksem skeemi kõikide sõlmede arvust N

$$n = N - 1 \quad (5.24)$$

ja sõltumatute kontuuride arv k on määratud harude arvu m ja sõltumatute sõlmede arvuga

$$k = m - n \quad m = n + k \quad (5.25)$$



Joonis 5.8 Silmusvõrk

Skeemis (jn 5.8) $k = 3$ ja $n = 4$, mis võimaldab koostada 3 kontuurvõrrandit ning 4 sõlmvõrrandit. Seega saab 7 otsitava haruvõimsuse leidmiseks koostada kokku $4 + 3 = 7$ võrrandit

$$\begin{aligned}
 \underline{S}_1 \underline{Z}_1^* - \underline{S}_4 \underline{Z}_4^* - \underline{S}_3 \underline{Z}_3^* &= 0 \\
 \underline{S}_4 \underline{Z}_4^* + \underline{S}_6 \underline{Z}_6^* - \underline{S}_5 \underline{Z}_5^* &= 0 \\
 \underline{S}_2 \underline{Z}_2^* - \underline{S}_7 \underline{Z}_7^* - \underline{S}_6 \underline{Z}_6^* &= 0 \\
 \underline{S}_1 - \underline{S}_2 + \underline{S}_4 - \underline{S}_6 &= \underline{s}_1 \\
 \underline{S}_2 + \underline{S}_7 &= \underline{s}_2 \\
 \underline{S}_3 - \underline{S}_4 - \underline{S}_5 &= \underline{s}_3 \\
 \underline{S}_5 + \underline{S}_6 - \underline{S}_7 &= \underline{s}_4
 \end{aligned} \tag{5.26}$$

Asendades sõlmvõrranditest 4 otsitavat kontuurvõrranditesse, saab kolm võrrandit kolme otsitavaga näiteks \underline{S}_1 , \underline{S}_2 , \underline{S}_5 . Vastavalt kontuurvõrrandite meetodile nimetatakse just neid võrrandeid **kontuurvõrranditeks** ja alles jäänud ehk elimineerimata otsitavaid **kontuurvõimsusteks**. Lahendades kontuurvõrrandite süsteemi ning pannes lahendid sõlmvõrranditesse, on leitavad kõik haruvõimsused.

Saadud võimsuste jagunemine ei arvesta võimsuskadusid. Võimsuskadusid on võimalik lisada leitud ligikaudsetele võimsustele alates lahupunktidest (vt p 5.6).

Võrgu teisendusmeetod

Teisendusmeetodi kohaselt toimub silmusvõrgu võimsuste jagunemise arvutamine kolmes etapis:

1. Esialgse võrguskeemi teisendamine lihtsamale kujule näiteks kahepoolse toitega liiniks. Selleks kasutatakse elementaarseid teisendusvõtteid nagu rööpharude ekvivalenteerimine, kolmnurga teisendamine täheks, tähe teisendamine kolmnurgaks ja koormuste ülekandmine teistesse sõlmedesse.
2. Võimsuste jagunemise leidmine lihtsas skeemis (kahepoolse toitega liinis, vt p 5.7).
3. Võimsuste jagunemise leidmine võrgu esialgses skeemis.

Meetod on ligikaudne, kuid sobiv käsitsi arvutuseks, kuna arvutuse etappe on võimalik samm-sammult kontrollida. Meetodit käsitletakse lähemalt mitmes (eriti vanemates) elektrivõrkude õpikus.

5.9 VÕRGU LIGIKAUDNE ARVUTAMINE LÕHESTUSMEETODIL

Silmusvõrgu kontuurvõrrandisüsteemi praktilisel lahendamisel minnakse tavaliselt kompleksvõrranditelt üle reaalkvõrranditele. Kompleksvõrrandeid (5.26) võib üldjuhul esitada kujul

$$\sum_i \underline{S}_i \underline{Z}_i^* = 0 \quad (5.27)$$

ehk

$$\sum_i (P_i + jQ_i)(R_i - jX_i) = \sum_i P_i R_i + \sum_i Q_i X_i - j \left(\sum_i P_i X_i - \sum_i Q_i R_i \right) = 0$$

ehk

$$\begin{aligned} \sum_i P_i R_i + \sum_i Q_i X_i &= 0 \\ \sum_i P_i X_i - \sum_i Q_i R_i &= 0 \end{aligned} \quad (5.28)$$

Seega saadakse igast kompleksvõrrandist kaks reaalkvõrrandit ja võrrandite arv võrrandisüsteemis kahekordistub. Samuti kahekordistub otsitavate arv – iga kompleksmuutuja \underline{S}_i asemele tulevad tema komponendid P_i ja Q_i .

Kui eeldada, et võrk koosneb juhtmete ühesuguse ristlõike ja paigutusega liinidest, siis on liinide eritakistused r , x kõikidel liinidel samad ning liinide takistused on võrdelised nende pikkustega

$$R_i = r l_i \quad X_i = x l_i$$

Pannes need avaldised võrranditesse (5.28), saab

$$\begin{aligned} r \sum_i P_i l_i + x \sum_i Q_i l_i &= 0 \\ x \sum_i P_i l_i - r \sum_i Q_i l_i &= 0 \end{aligned}$$

Neid võrrandeid rahuldab ainult tulemus

$$\begin{aligned} \sum_i P_i l_i &= 0 \\ \sum_i Q_i l_i &= 0 \end{aligned} \tag{5.29}$$

Võrreldes võrrandeid (5.29) võrranditega (5.28), näeb, et võrrandid (5.28) sisaldavad ühiseid otsitavaid ja neid tuleb lahendada koos. Võrrandid (5.29) aga ei sisalda ühiseid muutujaid ja neid saab lahendada sõltumatult. Mitme suletud kontuuriga võrgu kontuurvõrrandisüsteem lõheneb seega kaheks allsüsteemiks – üks aktiivvõimsuste, teine reaktiivvõimsuste jagunemise arvutamiseks. Kahe sellise allsüsteemi lahendamine on märksa väiksema töömahukusega kui ühe, kuid kaks korda suurema võrrandite arvuga võrrandisüsteemi lahendamine. Seetõttu kasutatakse sellist võrrandisüsteemi **lõhestusmeetodit** sageli võimsuste jagunemise kiireks ligikaudseks määramiseks ka mitteühtlikes võrkudes. Elektrivõrkude projekteerimisel, kus juhtmete ristlõigete valikuks on vaja teada võimsusvooge projekteeritavates liinides, võimaldabki lõhestusmeetod esialgselt hinnata võimsusi, lähtudes ainult liinide teadaolevatest pikkustest.

Tulemused polegi väga suure veaga, kuna tingituna liinide eritakistuse x väiksest tundlikkusest juhtme ristlõikele (p 3.2) ongi liinide induktiivtakistused ligikaudu võrdelised liinide pikkustega.

Vaadeldud lõhestusmeetod seisneb võrrandisüsteemi lõhestamises kaheks allsüsteemiks ja **pole mingil juhul võrrandisüsteemi enda lahendusmeetod**. Saadud allsüsteemide lahendamiseks tuleb kasutada võrrandisüsteemi tuntud lahendusmeetodeid.

Võrreldes võrrandeid (5.27) ja (5.29), märkab nende sarnasust. Seega saab eespool vaadeldud lahendusmeetodeid ja valemeid kasutada. Aktiivvõimsuste

jagunemise allülesandes tuleb kompleksvõimsuste asemel võtta aktiivvõimsused ja kaaskomplekstakistuste asemel liinide pikkused. Reaktiivvõimsuste jagunemise allülesandes asendatakse kompleksvõimsused reaktiivvõimsustega. Võrrandite koostamiseks ja lahendamiseks võib aga kasutada näiteks eespool vaadeldud kontuurvõrrandite meetodit. Allülesandeid lahendatakse edukalt ka teisendusmeetodil (p 5.8).