

6 Jaotusvõrgu püsitalitluse arvutamine

Elektrivõrgu talitluse all mõistetakse ajas kulgevat protsessi – süsteemi seisundite ajalist järgnevust. Talitlust iseloomustavad seisundiparameetrid ehk -muutujad (pinge, pingektorite nurgad, võimsusvood, vool, koormused, genereerivad võimsused jm), mis muutuvad üleminekul ühest seisundist teise talitluse käigus. Kuna püsitalitluses võib seisundiparameetrid suhteliselt pika aja jooksul lugeda küllaldase täpsusega konstantseks, siis taandub püsitalitluse analüüs enamasti püsiseisundite arvutamiseks.

Jaotusvõrgu püsitalitluse arvutamise eesmärgid ja võimalik lähteinfo erinevad ennekõike ajalisest aspektist. Talitluse plaanisel perspektiiviga 4...10 aastat on lähteinfoks koormuste pikaajalised prognoosid ja orienteerivad andmed elektrivõrgu ja toitealajaamade kohta. Arvutused võimaldavad võrrelda erinevaid projektlahendusi. Plaanisel perspektiiviga mõnest päevast kuni aastani kavandatakse seadmete remonte, valitakse operatiivskeemi ning automaatregulaatorite ja releekaitse sätteid. Võrgu operatiivjuhtimise käigus on arvutused vajalikud, kui tekivad kõrvalekalded plaanitud talitlusest (suured koormushälbed, seadmete avariid jm). Tagada tuleb võrgu talitluskindlus ja elektri kvaliteet. Talitluse retrospektiivne analüüs osutab, mida tuleks edaspidi arvestada talitluse edukaks plaanamiseks ja juhtimiseks, aga ka näiteks võrgu projekteerimisel.

Püsitalitluse arvutamiseks tuleb moodustada võrgu aseskeem ning koostada ja lahendada võrguvõrrandid. Arvutuste üheks eesmärgiks on talitluse optimeerimine, mis jaotusvõrgus tähendab enamasti võrgukadude minimeerimist. Talitluse analüüsimist, prognoosimist ja imiteerimist võib vaadelda talitluse ühtse seiretoiminguna. Erijuhtumiks on talitluse estimeerimine, kus talitlusparameetrite leidmise kõrval kontrollitakse ja täpsustatakse mõõteandmeid.

6.1 Elektrivõrgu aseskeem

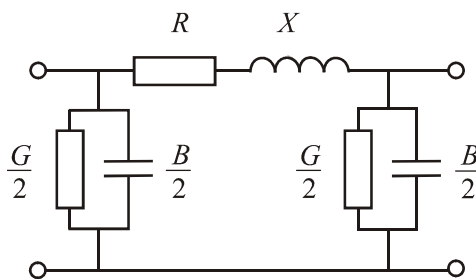
Elektrivõrgu aseskeem koostatakse tema elementide aseskeemidest, mis ühendatakse nende tegeliku omavahelise ühendusskeemi kohaselt. Seega on võrgu aseskeem määratud võrgu topoloogiaga, elementide aseskeemidega ja nende parameetritega.

Elektrivõrgu elemendid võib jaotada passiivseteks ja aktiivseteks. Põhilised **passiivelemendid** on elektriliinid, trafod, põikreaktorid ja -kondensaatorpatareid. Põhivõrk võib sisaldada ka pikireaktoreid ja -kondensaatorpatareid, alalisvoolu ülekandeliine muundusalajaamadega jm. **Aktiivelemendid** on genereerivad allikad (generaatorid) ja koormused. Aktiivelemente nimetatakse ka **injektsioonideks**.

Enamiku püsitalitluse arvutuste puhul eeldatakse, et kolmefaasilise süsteemi seisund on sümmeetriline ja seisundiparameetrid muutuvad siinuseliselt. See võimaldab kolmefaasilise süsteemi analüüsil piirduda ühe faasi parameetritega ning kasutada ühejoonelist aseskeemi. Tulemused on laiendatavad kõigile kolmele faasile.

6.1.1 Elektriliinid

Elektriliine kujutatakse tavaliselt Π -kujulise aseskeemina (joonis 6.1), mille parameetriteks on liini summaarne näivtakistus $\underline{Z} = R + jX$ ja näivjuhtivus $\underline{Y} = G + jB$. Kui liini pikkus $l < 300$ km, võib need parameetrid leida liini ühe



Joonis 6.1 Elektriliini aseskeem

kilomeetri näivtakistuse ja -juhtivuse kaudu

$$\underline{Z} = (r_0 + j\omega L_0)l = (r_0 + jx_0)l$$

$$\underline{Y} = (g_0 + j\omega C_0)l = (g_0 + jb_0)l$$

Kilomeetri aktiivtakistus x_0 (Ω/km) on leitav juhi margi järgi käsiraamatutest või tootekataloogidest. Takistuse, mis vastab enamasti temperatuurile $\vartheta_0 = 20$ °C,

võib vajaduse korral ümber arvutada temperatuurile ϑ valemiga

$$r_\vartheta = [1 + 0,004(\vartheta - \vartheta_0)]$$

Liini reaktiivtakistus on induktiivne ning määratud faasijuhtide paiknemise ja geomeetriliste mõõtmetega. Kui eeldada, et liini faasijuhid paiknevad sümmeetriliselt (pika õhuliini puhul faasijuhid transponeeritakse), siis võib õhuliini kilomeetri induktiivtakistuse määramiseks kasutada ligikaudset valemit, mis, tõsi küll, ei arvesta kaitsetrosside ja liini rööpahelate mõju

$$x_0 = 0,144 \log \frac{D_k}{r_j} + 0,0157 \quad \Omega/\text{km}$$

kus $D_k = \sqrt[3]{D_{AB}D_{BC}D_{CA}}$ – faasidevaheline keskmine geomeetiline kaugus
 r_j – faasijuhtme raadius samades mõõtühikutes.

Liini induktiivtakistus on suhteliselt tuntetu mõõtmete D_k ja r_j suhtes, mistõttu ligikaudsete arvutuste puhul võib keskpinge-õhuliinidele võtta $x_0 = 0,4$ Ω/km ja kaabelliinidele $x_0 = 0,1$ Ω/km .

Liini aktiivjuhtivus G vastab isolatsiooni ebatäiuslikkusest ja koroonast tingitud aktiivvõimsuskadudele. Isolatsioonis esinev vooluleke on aga tühine ja sellele vastav juhtivus jäetakse tavaliselt arvestamata. Koroonakadude ja neile vastava aktiivjuhtivuse arvestamise praktiline vajadus tekib alates 330 kV.

Liini mahtvusjuhtivus B on tingitud mahtvusest faasijuhtide endi ning juhtide ja maa vahel. Eeldades, et liini faasijuhid paiknevad sümmeetriliselt, võib õhuliini ühe kilomeetri keskmise mahtvusjuhtivuse määrata valemiga

$$b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{D_k}{r_j}} \text{ S/km}$$

Ligikaudselt $b_0 = 3 \cdot 10^{-6}$ S/km. Kaabelliini mahtvusjuhtivus on suhteliselt suur. Vajalikud andmed leiab tootekataloogidest.

Jaotusvõrkude liiniparameetrite tüüpilisi näiteid on tabelis 6.1, kus induktiivtakistus on esitatud ligikaudselt. Keskpingevõrkudes sageli kasutatavate AC-tüüpi juhtmetega õhuliinide eritakistuste täpsemad väärtused on tabelis 6.2.

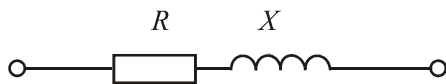
Tabel 6.1 Liinide parameetreid

Liini tüüp	Nimipinge	Faasijuht	r	x
	U_N (kV)	Al/Fe (mm ²)	Ω/km	Ω/km
Õhuliin	0,4	50/0	0,64	0,28
Õhukaabel	0,4	35/0	0,87	0,1
Maakaabel	0,4	120/0	0,25	0,07
Õhuliin	10	50/0	0,64	0,4
Maakaabel	10	185/0	0,16	0,08
Õhuliin	20	54/9	0,54	0,4
Maakaabel	20	120/0	0,25	0,11
Õhuliin	110	242/39	0,12	0,4

Tabel 6.2 Terajuhtmetega õhuliinide parameetrid

Juhe AC	Ø	r	x Ω/km					
Al/Fe	d	Ω/km	vastavalt D_k väärtustele m					
mm ²	mm		0,9	1,1	1,4	2	2,4	3
35/6,2	8,4	0,790	0,354	0,366	0,386	0,403	0,418	0,430
50/8	9,6	0,603	0,345	0,358	0,378	0,396	0,409	0,421
70/11	11,4	0,429	0,335	0,347	0,367	0,385	0,399	0,410
95/16	13,4	0,306	0,324	0,336	0,356	0,374	0,388	0,400

Keskpingeliinide ($U_n \leq 35kV$) põikjuhtivused võib jätta arvestamata, mistõttu liini aseseem lihtsustub (joonis 6.2). Ka võib väikese ristlõikega kaabelliinidel



Joonis 6.2 Keskpingeelektriliini tavaline aseskeem

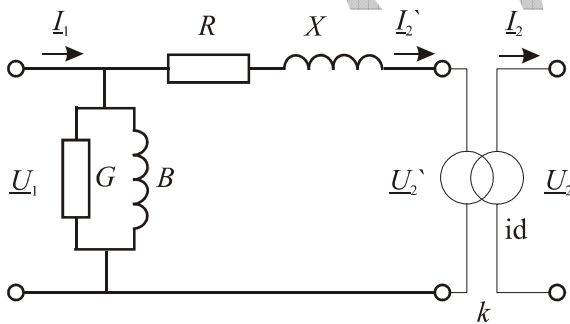
($U_n \leq 10$ kV) jätta arvestamata induktiivtakistuse. Erandina tuleb püsitalitluse arvutamisel kõne alla pikkade 35 kV kaabelliinide mahtuvusjuhtivuse arvestamine. Küll peab mahtuvust arvestama neutraali maandamismoodustest tulenevate probleemide lahendamisel, näiteks rikkevoolude arvutamisel.

6.1.2 Trafod

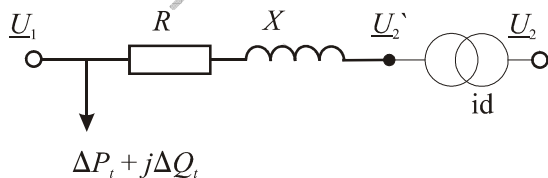
Trafode modelleerimise vajadus jaotusvõrgu arvutamisel sõltub ülesandest. Trafod võivad kuuluda võrgu arvutusskeemi koosseisu, võivad sinna aga ka mitte kuuluda, kui näiteks toiteallikaks loetakse toitealajaama sekundaarpoole etteantud pingega latte.

Trafode modelleerimise teeb keerukaks kahe või enama nimipingega mähise olemasolu. Ka tuleb tähele panna trafo lülitusgruppi ja võimalikku ristreguleerimist, mis muudavad trafo ülekandesuhte kompleksseks. Tõsi, kuna paralleeltööle võib lülitada vaid sama lülitusgrupiga trafosid, tohib jaotusvõrgus piirduda reaalse ülekandesuhtega.

Trafo täpsel esitamisel kasutatakse T-aseskeemi. Aseskeemi piki- ja põikharu parameetrite suure erinevuse tõttu tagab piisava täpsuse ka lihtsam Γ -aseskeem (joonis 6.3). Trafo modelleerimiseks jaotusvõrgu arvutamisel võib aseskeemi veelgi lihtsustada, vaadeldes vaid pikiahela aktiiv- ja reaktiivtakistust, ning põikahel asendada konstantse tühijooksukoormusega (joonis 6.4).



Joonis 6.3 Trafo aseskeem



Joonis 6.4 Trafo lihtsustatud aseskeem

Esitatud aseskeemides on sekundaarpoolel kujutatud ideaaltrafo, mille juurde kuulub ülekandesuhe. Trafo parameetrid on taandatud primaarpoolele. Ideaaltrafo võib põhimõtteliselt asetseda ka trafo primaarpoolele, kusjuures trafo parameetrid taandatakse sekundaarpoolele.

Skeemidel (joonis 6.3 ja 6.4) kujutavad R ja X trafomähiste summaarset aktiiv- ja puisteinduktiivtakistust, kusjuures sekundaarmähise takistus on taandatud primaarpoolele

$$R = R_1 + R'_2 = R_1 + \left(\frac{U_{1n}}{U_{2n}}\right)^2 R_2$$

$$X = X_1 + X'_2 = X_1 + \left(\frac{U_{1n}}{U_{2n}}\right)^2 X_2$$

Suurused U'_2 ja I'_2 on trafo primaarpoolele taandatuna sekundaarpinge ja -vool

$$U'_2 = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} U_2, \quad I'_2 = \frac{U_{2n}}{U_{1n}} I_2$$

Erinevate firmade käsiraamatud ning trafokataloogid esitavad trafode tehnilisi andmeid mitmeti. Kui koos trafo nimivõimsusega S_n ning primaar- ja sekundaarmähise nimipingetega U_{1n} ja U_{2n} on antud trafo tühijooksukadu ΔP_t , lühiskadu ΔP_k , tühijooksuvool protsentides nimivoolust $I_t\%$ ja lühispinge protsentides nimipingest $u_k\%$ või sellega võrdne lühistakistus protsentides $Z_k\%$. Siis

$$R = \frac{\Delta P_k U_n^2}{S_n^2}$$

$$X = \frac{u_k\% U_n^2}{100 S_n} = \frac{Z_k\% U_n^2}{100 S_n}$$

$$G = \frac{\Delta P_t}{U_n^2}$$

$$B = \frac{I_t\% S_n}{100 U_n^2}$$

Siin on U_n trafo selle poole nimipinge, millele vastav parameeter taandatakse. Näiteks on aseskeemide 6.3 ja 6.4 parameetrid taandatud primaarpingele $U_n = U_{1n}$.

Trafo tühijooksuvõimsused loetakse konstantseks ja aktiivvõimsuse osa võrdseks tühijooksukaoga ΔP_t . Tühijooksu reaktiivvõimsus määratakse valemiga

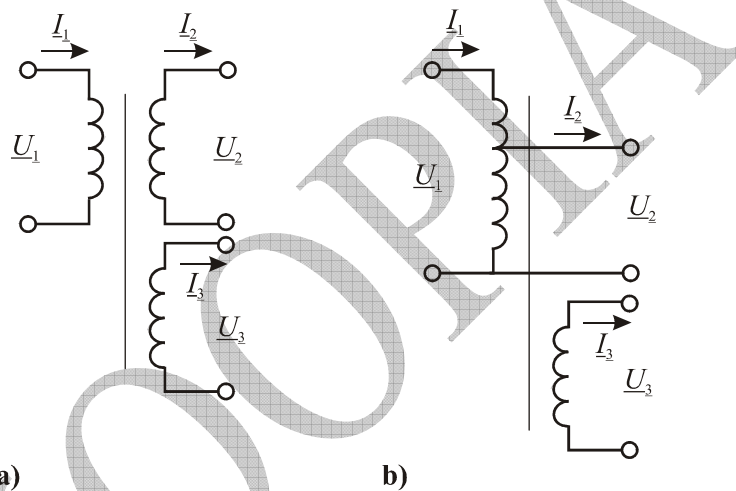
$$\Delta Q_t = \frac{I_t\% S_n}{100}$$

Trafo ühendusrühma m arvestava trafo kompleksülekanandesuhte \underline{k} või vastava reaalsuuruse k võib leida valemiga

$$\underline{k} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} e^{-jm\frac{\pi}{6}} \quad \text{või} \quad k = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}$$

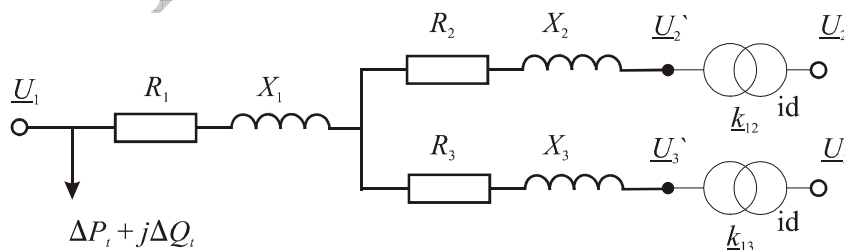
Tänapäeval tuuakse trafode kataloogides ja käsiraamatutes sageli ära R , X , ΔP_i ja ΔQ_i väärtused.

Kolme erineva nimipingega puhul on otstarbekas kasutada kolmemähiselisi trafosid, kus kolm erineva pingega mähist on samal magnetsüdamikul (joonis 6.5a). Kolm nimipinget on ka autotrafodel (joonis 6.5b), sest tähtühenduses olevate põhimähiste kõrval on vajalik kolmas kolmnurka ühendatud kompensatsioonimähis. See on tavaliselt alampingemähis, mis on ette nähtud kolmandate harmoonikute summutamiseks ja kohalike tarbijate toiteks.



Joonis 6.5 Kolmemähiseline trafo (a) ja autotrafo (b)

Kolmemähiseliste trafode ja autotrafode puhul võib kasutada tähekujulist askeemi, kus põikjuhtivusharud on lülitatud tähe keskpunkti. Nii nagu kahe-mähiselise trafo korralgi võib põikjuhtivuse tuua mähise klemmidele või piirduda konstantse talitluspingest sõltumatu tühijooksukao arvestamisega (joonis 6.6).



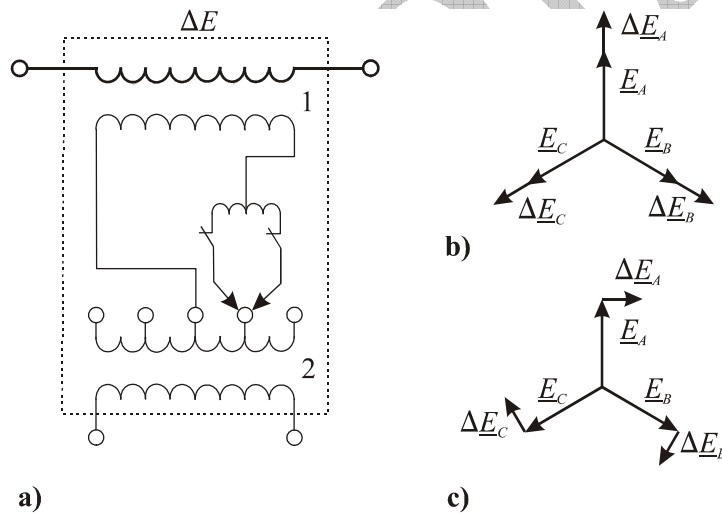
Joonis 6.6 Kolmemähiselise trafo lihtsustatud askeem

Kolmemähiselise trafo kataloogiandmeteks on nimivõimsus S_n , mähiste nimipinged U_{1n}, U_{2n}, U_{3n} , tühijooksukadu $\Delta P_t, \Delta I_{t\%}$, lühiskaod ja lühispinged mähispaaride kohta $\Delta P_{k12}, \Delta P_{k13}, \Delta P_{k23}$ ja $u_{k\%12}, u_{k\%13}, u_{k\%23}$. Lühiskadudele ja lühispingetele vastavad takistused R_{12}, R_{13}, R_{23} ja X_{12}, X_{13}, X_{23} leitakse nii nagu kahemähiseliste trafodegi puhul. Arvestades, et $R_{12} = R_1 + R_2$, $X_{12} = X_1 + X_2$ jne, saab aseseemi harude takistused leida valemitega

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

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

Põikjuhtivused G ja B ning reaktiivvõimsuskadu ΔQ_i leitakse samal viisil kui kahemähiselistel trafodel. Trafo takistused ja reaktiivvõimsuskadu võivad olla antud ka kataloogides.



Joonis 6.7 Lisapingetrafo skeem (a) ning vektordiagrammid (b ja c)

Nii põhi- kui jaotusvõrgus võidakse kasutada lisapingetrafosid (buustertrafosid), mille üks mähis lülitatakse pinge muutmiseks ahelasse jadamisi. Lisapingetrafo (joonis 6.7a) koosneb jadatrafo 1 ja toitetrafo 2. Kui toitetrafo primaarmähist toita sama faasi pingega, millesse jadatrafo põhimähis kuulub, saavutatakse pinge pikireguleerimine (joonis 6.7b). Kui toita aga ülejäänud faaside vahelise pingega, siis ristreguleerimine (joonis 6.7c). Põhivõrgus, kus tegemist on silmusskeemiga, võimaldab selline lülitus reguleerida pinge kõrval ka võimsusvoogusid vastavalt pingevektori nurga muutumisele. Radiaalskeemiga jaotusvõrgus rakendatakse pinge täiendavaks muutmiseks pikireguleerimist.

6.1.3 Kondensaatorpatareid ja reaktorid

Piki- ja põikmahtuvusi ja põikreaktoreid kasutatakse elektrivõrkudes pinge reguleerimiseks, pikireaktoreid lühisvoolude piiramiseks. Üldjuhul pole püsi- seisundi arvutamisel teada, kas kondensaatorpatareid ja põikreaktorid on sisse või välja lülitatud, sest see sõltub pingerežiimist. Tulemus saadakse iteratiivsel teel.

Põikmahtuvused või -reaktorid esitatakse aseskeemis põikjuhtivustena, kusjuures tavaliselt võetakse aktiivjuhtivus nulliks

$$\underline{Y} = 0 + jB, \quad B = -\frac{Q_n}{U_n^2}$$

kus Q_n – kondensaatorpatarei ($Q < 0$) või reaktori ($Q > 0$) nimireaktiivvõimsus
 U_n – võrgu nimipinge.

Pikimahtuvused ja -reaktorid esitatakse aseskeemis pikitakistustena, mille aktiivkomponent võetakse tavaliselt samuti null. Reaktiivtakistus on kondensaatoritel

$$X_C = -\frac{10^6}{\omega C}$$

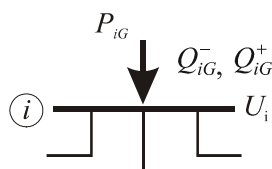
ja reaktoritel

$$X_L = \frac{U_n x_{\%}}{100 \sqrt{3} I_n}$$

kus C – kondensaatori mahtuvus μF
 $x_{\%}$ – reaktori reaktants protsentides
 U_n, I_n – reaktori nimipinge ja -vool.

6.1.4 Aktiivelemendid

Aktiivelementideks on genereerivad allikad – generaatorid ja sünkroonkompensaatorid ning koormused. Püsi seisundis generaator genereerib aktiivvõimsust P_G , sünkroonkompensaator aga tarbib kadude jao. Generaator või kompensaator toodab või tarbib sõltuvalt ergutuse nivoost ka reaktiivvõimsust Q_G . Reaktiivvõimsus vastab automaatse pingeregulaatori sättepingele U_G .



Joonis 6.8 Generaatorsõlme kujutamine aseskeemis

Elektrijaam või sünkroonkompensaator esitatakse aseskeemis injeksioonina, mille jaoks on teada aktiivvõimsus P_{iG} ja pingemoodul U_i (joonis 6.8). Aktiivvõimsuse P_{iG} määrab generaatoritel elektriturg või tehakse seda muudel kaalutlustel. Vaadeldavas sõlmes i on otsitava teks pingenuurk δ_i ja reaktiivvõimsus Q_{iG} , mis on vajalik pingemooduli U_i kindlustamiseks. Et

tagada arvutustulemuste kasutatavus, peab Q_{iG} rahuldama tingimust

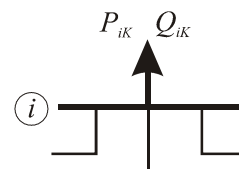
$$Q_{iG}^- \leq Q_{iG} \leq Q_{iG}^+$$

kus Q_{iG}^- ja Q_{iG}^+ on genereeritava reaktiivvõimsuse vähim ja suurim väärtus ehk genereeritava reaktiivvõimsuse tehnilised piirid. Selliselt esitatud genereerivate allikatega sõlmi nimetatakse **generaatorsõlmedeks** ehk **PU-sõlmedeks**.

Erandjuhtudel võivad väikese võimsusega elektrijaamad (nt väike koostootmisjaam, väike otsevooluhüdroelektrijaam jm) olla antud aktiivvõimsusega P_{iG} ja reaktiivvõimsusega Q_{iG} . Otsitavaiks on sel juhul pingnurk δ_i ja pingemoodul U_i . Selliseid genereerivate allikatega sõlmi nimetame edaspidi tinglikult **koormussõlmedeks** nende sarnasuse tõttu sõlmedega, kus koormus on antud.

Põhvõrgu arvutamisel peab võrgus alati olema üks **balansisõlm**, mille sisendvõimsust juhitakse nii, et see võrduks kõigi ülejäänud sõlmede võimsuste ja võrgu aktiivvõimsuskadude summaga. Reaalses süsteemis on selliseks sõlmeks sagedust või vahetusvõimsust reguleeriva elektrijaama latid, jaotusvõrgu arvutustel aga toitealajaama latid, otsitavaks on aktiivvõimsus P_{iG} . Mis tahes võrgu (süsteemi) arvutusel tuleb valida üks **baassõlm**, mille pingvektori fikseeritud faasinurga suhtes mõõdetakse ülejäänud seisundimuutujate vektorite nurki. Kuna nimetatud faasinurga fikseeritud väärtuse võib valida meelevaheldiselt, on kõige mugavam väärtus $\delta_b = 0$. Tavaliselt balansisõlm ja baassõlm ühitatakse – sellist sõlme nimetatakse **tugisõlmeks**. Seega on tugisõlmes antud suurusteks pingnurk δ_o ja -moodul U_b ehk teisisõnu kompleksne pinge \underline{U}_b on **baaspinge**. Otsitavateks on tugisõlmes genereeritav aktiivvõimsus P_b , mis kindlustab võimsuste balansi, ja reaktiivvõimsus Q_b , mis tagab etteantud pingemoodul. Ühtlasi peavad olema ette antud ka reaktiivvõimsuse tehnilised piirid Q_b^-, Q_b^+ . Aktiivvõimsuse piire ette ei anta, kuna tugisõlmeks valitakse piisava aktiivvõimsusvaruga sõlm, mis tagab võimsuste balansi. Põhimõtteliselt võib võrgus olla ka teisi sõlmi, mis osalevad aktiivvõimsuste balansseerimisel. Sel juhul peab neis sõlmedes olema antud pingnurk ning ka pingemoodul. Selliseid sõlmi nimetatakse **jäiksõlmedeks**. Seega osaleb aktiivvõimsuse balansseerimises tugisõlm, reaktiivvõimsuse balansseerimises aga nii tugisõlm kui ülejäänud genereerivad sõlmed.

Koormusi näidatakse aktiiv- ja reaktiivvõimsuse väljavooludena P_{iK} ja Q_{iK} (joonis 6.9). Otsitavateks on siin pingemoodul U_i ja -nurk δ_i . Koormused saadakse prognoosimise ning imiteerimise teel või antakse ette muudel kaalutlustel kas konstantsetena või staatiliste karakteristikute $P_{iK}(U_i)$ ja $Q_{iK}(U_i)$ kaudu. Selliseid sõlmi nimetatakse **koormussõlmedeks**.



Joonis 6.9 Koormussõlme näitamine asesseemis

Kui sõlmes on korruga nii genereeriv kui koormusvõimsus, siis näidatakse ase-
skeemis sellist sõlme võimsuse injektsioonina, kusjuures

$$P_i = P_{iG} - P_{iK}$$

$$Q_i = Q_{iG} - Q_{iK}$$

Kui sõlmes on antud pingemoodul, jäävad otsitavateks Q_{iG} ja ka Q_i ning
tegemist on generaatorsõlmega (või tugisõlmega). Sel juhul rakenduvad
võimsusele Q_i reaktiivvõimsuse kitsendused kujul

$$Q_{iG}^- - Q_{iK} \leq Q_i \leq Q_{iG}^+ - Q_{iK}$$

Tabel 6.3. Elektrivõrgu aseskeemi sõlmetüübid

Sõlmetüüp	Iseloomustus	Antud	Otsitavad
Generaatorsõlm ehk PU -sõlm	Elektrijaamad, reaktiiv- võimsuse allikad	$P_i, U_i,$ Q_i^-, Q_i^+	δ_i, Q_i
Tugisõlm (nii baas- kui balansisõlm)	Sagedust või vahetus- võimsust reguleeriv jaam, jaotusvõrgu toitealajaam	$\delta, U_b,$ Q_b^-, Q_b^+	P_b, Q_b
Koormussõlm ehk PQ -sõlm	Koormused, väikesed elektrijaamad	P_i, Q_i või $P_i(U_i), Q_i(U_i)$	δ_i, U_i
Passiivsõlm	Puudub nii koormus kui genereerimine (sisuliselt koormussõlm)	$P_i = 0, Q_i = 0$	δ_i, U_i
Jäiksõlm	Sageduse või vahetus- võimsuse reguleerimises osalev jaam, jaotusvõrgu toitealajaam	$\delta_i, U_i,$ Q_i^-, Q_i^+	P_i, Q_i

Aseskeemis võib olla ka sõlmi, milles puudub nii genereerimine kui koormus –
neid nimetatakse **passiivsõlmedeks**. Selliseid sõlmi vaadeldakse koormussõl-
medena, sest ka nendes on antud nii aktiiv- kui reaktiivvõimsus $P_i = 0, Q_i = 0$,
otsitavaiks on aga pingemoodul ja -nurk.

Ühendades võrguelementide aseskeemid, nagu võrguskeem ette näeb, ning
tehes vajalikud lihtsustused (rööpharude ühendamise, injektsioonide leidmine
sõlmedes jm), saadakse elektrivõrgu aseskeem, mis koosneb sõlmedest ja neid
ühendavatest harudest ning injektsioonidest sõlmedes. Harusid sõlme ja maa
vahel nimetatakse põikharudeks, harusid sõlmede vahel aga pikiharudeks.
Kokkuvõtte aseskeemi sõlmetüüpidest on tabelis 6.3.

6.2 Püsiseisundi arvutusviisid

Elektrivõrgu seisundite (talitluse) arvutused nõuavad võrgu kujutamist matemaatilise mudelina. Mudeliks on elektrivõrgu võrrandid, mis koostatakse võrguga ekvivalentse askeemi alusel.

6.2.1 Elektrivõrgu võrrandid

Elektrivõrgu ülesannete lahendamisel jagunevad seisundiparameetrid sõltuvalt lahendatavast ülesandest antuteks ja otsitavateks. Otsitavate parameetrite koosseis võib üldjuhul olla suur: pingemoodulid ja -nurgad, aktiiv- ja reaktiivvõimsusvood elementide alguses ja lõpus, voolud elementides, aktiiv- ja reaktiivvõimsuskaod ning pingelangud elementides jm. Otsitavad seisundiparameetrid jagunevad sõltumatuteks ja sõltuvateks. Sõltumatud parameetrid on arvutatavad sõltumatute elektrivõrguvõrrandite süsteemi lahendamise teel. Kõikvõimalikud sõltuvad parameetrid on arvutatavad ilmutatult sõltumatute parameetrite kaudu lihtsate elektrotehnikast tuntud seoste (Ohmi seadus, Kirchhoffi seadused jm) abil. Sõltumatute parameetrite koosseis oleneb lahendamiseks valitud sõltumatutest võrguvõrranditest. Ka vastupidi – sõltumatute parameetrite valik määrab lahendamisele tulevate sõltumatute võrguvõrrandite koosseisu.

Tänapäeval on üldlevinud võrguvõrranditeks **sõlmepingevõrrandid (sõlmevõrrandid)**, millele vastavalt on sõlmedes sõltumatuteks seisundiparameetriteks pingemoodulid ja -nurgad. Võrreldes sõlmepingevõrrandeid teiste tuntud võrranditega – kontuurvooluvõrranditega, on esimestel palju eeliseid.

- Põhiline lähteinfo (koormused, genereerivad aktiivvõimsused, pingemoodulid) on antud sõlmede, mitte kontuuride jaoks.
- Sõlmevõrrandite kasutamisel kirjeldab võrku sõlmejuhtivuste maatriks, mis võrgu etteantud konfiguratsiooni puhul on koostatav üheselt. Kontuurvõrrandite puhul kirjeldab võrku kontuurtakistuste maatriks, mis pole üheselt määratud, vaid sõltub sõltumatute kontuuride valikust.
- Skeemi muudatuste puhul on sõlmejuhtivuste maatriksit modifitseerida lihtne, kontuurtakistuste maatriks tuleb aga koostada uuesti.
- Sõlmevõrrandite kasutamisel on lihtne arvestada trafode mittenominaalseid (tegelikke) ülekandesuhteid, kontuurvõrrandite puhul on see palju keerukam.
- Põikjuhtivuste arvestamine ei muuda sõlmevõrrandite arvu, küll aga lisab iga põikjuhtivus täiendava kontuurvõrrandi.

Tuletame sõlmevõrrandid kahes etapis. Esmalt vaatleme lihtsat kahe sõlmega süsteemi ja siis üldistame tulemused mitme sõlmega võrgule. Kahesõlmeline süsteem on joonisel 6.10, selle askeem joonisel 6.11 ning lihtsustatuna joonisel 6.12. Formaliseerimise hõlbustamiseks on askeemides kasutusel

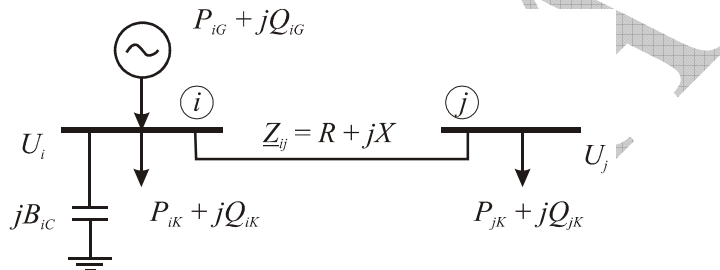
juhtivused, mida tähistatakse väiketähtedega, suurtähed on jäetud üldistatud juhtivuste jaoks. Asekeemidel on niisiis

$$P_i + jQ_i = P_{iG} - P_{iK} + j(Q_{iG} - Q_{iK})$$

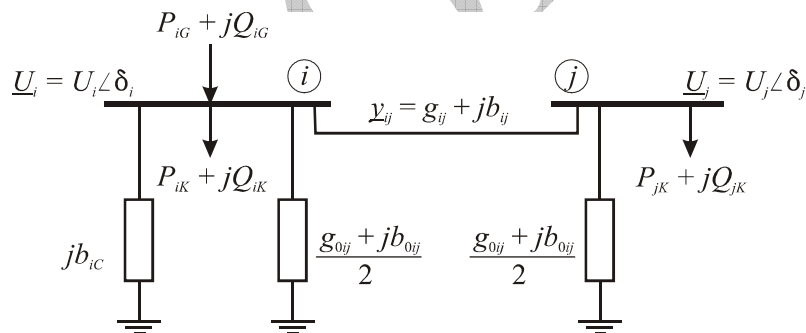
$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} = \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} - j \frac{X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2}$$

$$g_{i0} + jb_{i0} = \frac{g_{0ij}}{2} + j \left(\frac{b_{0ij}}{2} + b_{iC} \right)$$

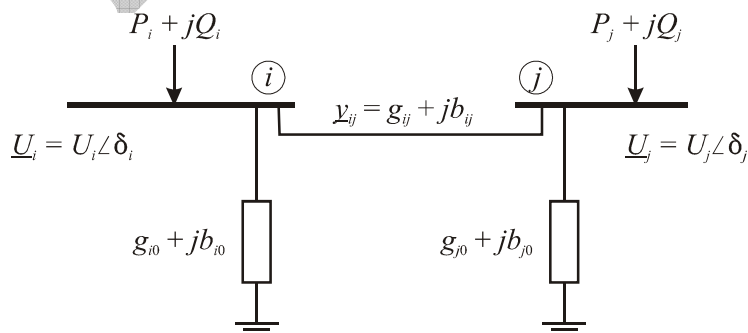
$$g_{j0} + jb_{j0} = \frac{g_{0ij}}{2} + j \frac{b_{0ij}}{2}$$



Joonis 6.10 Kahesõlmeline süsteem



Joonis 6.11 Kahesõlmelise süsteemi asekeem



Joonis 6.12 Kahesõlmelise süsteemi lihtsustatud asekeem

Tuletame esmalt süsteemile sõlmevõrrandid voolubalansi kujul. Kirjutame sõlme i jaoks Kirchhoffi esimese seaduse

$$\sum_{j \in \bar{u}(i)} \underline{I}_{ij} - \underline{J}_i = 0 \text{ ehk } \sum_{j \in \bar{u}(i)} \underline{I}_{ij} = \underline{J}_i$$

kus \underline{J}_i on sõlme i **sõlmevool**

$$\underline{J}_i = \underline{J}'_i + j\underline{J}''_i = \frac{S_i^*}{\underline{U}_i} = \frac{P_i - jQ_i}{\underline{U}_i - j\underline{U}_i} \quad (6.1)$$

Siin tähistab $\bar{u}(i)$ kõigi sõlme i ühendatud sõlmede hulka ehk sõlme i ümbrust. Valemis 6.1 ja edaspidi kasutatakse voolu arvutuslikku väärtust, mis on voolu tegelikust väärtusest $\sqrt{3}$ korda suurem.

Joonisel 6.11 oleva skeemi järgi

$$\underline{I}_{ij} + \underline{I}_{i0} = \underline{J}_i$$

ehk

$$(\underline{U}_i - \underline{U}_j) \underline{y}_{ij} + \underline{U}_i \underline{y}_{i0} = \underline{J}_i$$

Avades sulud ja ümber korrastades, saame

$$(\underline{y}_{ij} + \underline{y}_{i0}) \underline{U}_i - \underline{y}_{ij} \underline{U}_j = \underline{J}_i$$

Tähistame **sõlmejuhtivused**

$$\underline{Y}_{ij} = -\underline{y}_{ij} \quad \text{– sõlmede } i \text{ ja } j \text{ vastastikune juhtivus}$$

$$\underline{Y}_{ii} = \underline{y}_{ij} + \underline{y}_{i0} \quad \text{– sõlme } i \text{ omajuhtivus.}$$

Sõlmevõrrand vaadeldava kahesõlmelise võrgu i -nda sõlme jaoks

$$\underline{Y}_{ii} \underline{U}_i + \underline{Y}_{ij} \underline{U}_j = \underline{J}_i \quad (6.2)$$

Samasugune on võrrand sõlme j jaoks

$$\underline{Y}_{ji} \underline{U}_i + \underline{Y}_{jj} \underline{U}_j = \underline{J}_j$$

Võrrandid (6.1) ja (6.2) ongi vaadeldava võrgu sõlmevõrrandid.

Meelevaldse võrgul puhul on mis tahes i -s sõlm ühendatud paljude sõlmedega, mis moodustavad sõlme i ümbruse $\bar{u}(i)$. Seega võib kogu võrgu jaoks kirjutada

$$\underline{Y}_{i1} \underline{U}_1 + \underline{Y}_{i2} \underline{U}_2 + \dots + \underline{Y}_{i(i-1)} \underline{U}_{i-1} + \underline{Y}_{ii} \underline{U}_i + \underline{Y}_{i(i+1)} \underline{U}_{i+1} + \dots + \underline{Y}_{in} \underline{U}_n = \underline{J}_i$$

$$i = 1 \dots n$$

kus n on sõlmede arv võrgus. Sama võrrand maatrikskujul

$$\underline{YU} = \underline{J}$$

kus $\underline{Y} = \underline{G} + j\underline{B}$ – sõlmejuhtivuste maatriks

$\underline{U}, \underline{J}$ – sõlmepingete ja sõlmevoolude vektor.

Seejuures

$$\underline{J} = (\underline{U}_d^*)^{-1} \cdot \underline{S}^*(\underline{U})$$

kus \underline{U}_d on sõlmepingete diagonaalmaatriks.

Nagu nähtub, on sõlmejuhtivuste maatriksi \underline{Y} elementideks

- sõlme i ja j vastastikune juhtivus – nende sõlmedevahelise haru juhtivus vastandmargiga $\underline{Y}_{ij} = -\underline{y}_{ij}$. Kui sõlme i ja j vahel haru puudub, siis $\underline{Y}_{ij} = 0$
- sõlme i omajuhtivus – kõigi sõlmega i ühendatud harude (k.a põikharud) juhtivuste summa $\underline{Y}_{ii} = \sum_{j \in \bar{u}(i)} \underline{y}_{ij}$.

Eelnevast võib tuletada reaalvõrrandid võimsuste balansi kujul

$$P_i = U_i^2 G_{ii} + U_i \sum_{j \in \bar{u}(i)} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$$

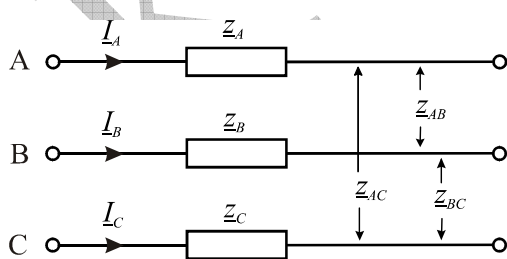
$$Q_i = -U_i^2 B_{ii} + U_i \sum_{j \in \bar{u}(i)} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij})$$

$$i = 1 \dots n$$

kus $\underline{Y}_{ii} = G_{ii} + jB_{ii}$ ja $\underline{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$

Seni oleme vaadelnud sümmeetrilist talitlust, mille puhul võib kõiki kolme faasi lugeda olevaks ligikaudu võrdsetes tingimustes ja seega laienevad ühe faasi kohta tehtud arvutused ka teistele faasidele. Siiski on talitus vahel ka asümmeetriline ning tekib vajadus vastavateks arvutusteks. Asümmeetria põhjused võivad olla mittetäisfaasiline talitus (kõrgepingeliini rikke või remondi korral), asümmeetriline koormus (võimsad ühefaasilised tarbijad, nt kaarahjud), võrgu ebasümmeetrilised elemendid (nt transponeerimata või puuduliku transpositsioonitsükliga elektriliinid).

Asümmeetrilise seisundi arvutuse võib sooritada faasikoordinaatides või sümmeetriliste komponentide meetodil. Vaatleme lähemalt arvutust faasikoordinaatides. Joonisel 6.13 toodud võrguelemendi sümmeetrilise talitluse ühe võrrandi, mis kehtib kõigi kolme faasi jaoks,



Joonis 6.13 Võrguelement asümmeetrilise talitluse puhul

$$\underline{\Delta U} = \underline{zI}$$

asemel võib kasutada võrrandi-süsteemi

$$\left. \begin{aligned} \underline{\Delta U}_A &= \underline{z}_A \underline{I}_A + \underline{z}_{AB} \underline{I}_B + \underline{z}_{AC} \underline{I}_C \\ \underline{\Delta U}_B &= \underline{z}_{AB} \underline{I}_A + \underline{z}_B \underline{I}_B + \underline{z}_{BC} \underline{I}_C \\ \underline{\Delta U}_C &= \underline{z}_{AC} \underline{I}_A + \underline{z}_{BC} \underline{I}_B + \underline{z}_C \underline{I}_C \end{aligned} \right\}$$

ehk maatrikskujul

$$\underline{\Delta U} = \underline{zI}$$

Taolised seosed saadakse võrgu kõigi elementide ja sõltumatute sõlmede jaoks, mille tulemusel võrguvõrrandite arv kolmekordistub. Seetõttu pole arvutus faasisuurustes eriti levinud.

Laiemalt on kasutusel sümmeetriliste komponentide meetod, mille puhul kolmefaasilised asümmeetrilised suurused esitatakse kolme sümmeetrilise komponendi – päri-, vastu- ja nulljärgnevuskomponendi summana. Üldjuhul on sümmeetriliste komponentide meetod sama töömahukas kui arvutus faasi-koordinaatides. Siiski on meetodil suuri eeliseid praktiliselt olulisel juhtumil, kui asümmeetria on tingitud ainult koormustest, kuid elektrivõrk ja selle elemendid on sümmeetrilised, s.t. Sel juhul saab ühe võrguelemendi pingelangu avaldada sümmeetriliste komponentide abil

$$\Delta \underline{U} = \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 & 0 & 0 \\ 0 & z_2 & 0 \\ 0 & 0 & z_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \underline{I}_1 \\ z_2 \underline{I}_2 \\ z_0 \underline{I}_0 \end{bmatrix}$$

Siin tähistavad indeksid 1, 2 ja 0 päri-, vastu- ja nulljärgnevuskomponente. Seega lõheneb kolmest võrrandist koosnev süsteem kolmeks sõltumatuks võrrandiks. Järelikult võib keerulise võrgu puhul koostada aseskeemid ja sõlmevõrrandid ning lahendada need eraldi päri-, vastu- ja nulljärgnevuskomponendi jaoks. Arvutuste maht on tunduvalt väiksem, võrreldes arvutusega faasikoordinaatides. Tegelikud faasisuurused leitakse sümmeetriliste komponentide summana.

Kui võrku lülitatud objektide hulgas on palju türistoralaldeid või muid mitte-lineaarse voltamperkarakteristikuga tarviteid või muutuvkiirusega elektrituulikuid, võib voolude ja pingete kju muutuda märgatavalt erinevaks siinuselisest, s.t voolude ja pingete kõverad sisaldavad kõrgemaid harmoonikuid. Mittesiinusetalitlust arvutatakse superpositsiooniprintsiibil: seisund saadakse erinevatele harmoonikutele vastavate seisundite summeerimisel. Summaarne pinge avaldub valemiga

$$U = \sqrt{\sum_{h=1}^n U_h^2}$$

Mingile harmoonikule vastavad võrguvõrrandid sarnanevad siinuselise talitluse võrranditega. Näiteks sõlme pingete võrrand voolude balansi kujul

$$\underline{Y}_h \underline{U}_h = \underline{J}_h$$

Erinevatele harmoonikutele vastavate aseskeemide koostamisel tuleb elementide parameetrid ümber arvutada

$$x_h = hx_{50}, \quad b_h = hb_{50}, \quad r_h = k_h r_{50}$$

Siin tähistab indeks 50 vastavat suurust võrgusagedusel, h on harmooniku järjenumbr ja k_h tegur, mis arvestab pinnaefektist tingitud aktiivtakistuse muutust.

6.2.2 Võrguvõrrandite lahendamisviisid

Elektrivõrgu püsitalitluse arvutus seisneb sõltumatute seisundiparameetrite, sõlmepingete ja pingnurkade leidmises võrguvõrrandite lahendamise teel. Kuna võrguvõrrandid on mittelineaarsed, lahendatakse need iteratiivsetel meetoditel, andes ette pingete ja nurkade alglahendid. Alglähendeiks kasutatakse mõne lähedase seisundi varasema arvutuse tulemusi või lamedat alglahendit, kus pingete moodulid loetakse võrdseks nimipingetega, nurgad aga nulliga. Otsitavate kompleksuuruste \underline{U}_i , ($i = 2, \dots, n$) ja lahendamisele kuuluvate komplekssete sõlmvõrrandite arv võrdub sõltumatute sõlmede arvuga $n - 1$. Arvutuskiiruse huvides on kompleksvõrranditelt eelistatav üle minna reaalsele. Siis on otsitavateks $2(n - 1)$ reaalselt muutujat, mille leidmiseks tuleb lahendada $2(n - 1)$ reaalsvõrrandist koosnev süsteem. Sõltuvaks sõlmeks on tugisõlm, mille jaoks on ette antud pingemoodul ja -nurk, genereeritav aktiiv- ja reaktiivvõimsus aga määratakse võimsuse balansiga. Kuna sõlmede numeratsioon on põhimõtteliselt meelevaldne, tähistame tugisõlme indeksiga 1. Kui sõltumatud seisundiparameetrid on teada, siis ülejäänud seisundiparameetrid (võimsusvood, voolud, võimsus- ja pingekaod jms) on leitavad lihtsate seoste alusel, mis tulenevad Ohmi ja Kirchhoffi seadustest. Sõltuvate seisundiparameetrite koosseis on arvutuse eesmärgist.

Kasutusel on rida püsiseisundi arvutusviise, mis erinevad arvutuste mahu, koonduvuskiiruse ja vajaliku mälu mahu poolest. Olulised on ka lahenduskindlus, tundlikkus alglahendi suhtes, algoritmi keerukus ning ühilduvus muude arvutustega. Lahenduskindluse all peetakse silmas meetodi võimet leida lahend (iteratsiooniprotsess koondub) ka raskete võrkude või raskete talitluste puhul. Ühilduvus muude arvutustega on oluline, kui püsiseisundi arvutus on ulatuslikumate arvutuste (nt seisundi optimeerimine, stabiilsuse analüüs vms) koostisosa.

Praktiliselt kasutatakse kõige enam Gaussi-Seideli ja Newtoni-Raphsoni meetodeid ning nende modifikatsioone. **Gaussi-Seideli meetod** on lihtne ja kaua kasutusel olnud meetod, mis seisneb voolude balansi kujul esitatud sõlmvõrrandite süsteemi

$$\underline{\mathbf{Y}}\underline{\mathbf{U}} = \underline{\mathbf{J}}$$

ja sõlmevoolude avaldiste

$$\underline{\mathbf{J}} = (\underline{\mathbf{U}}_d^*)^{-1} \cdot \underline{\mathbf{S}}^*(\underline{\mathbf{U}})$$

iteratiivses lahendamises järgmise skeemi kohaselt:

$$\underline{U}_i^{(k)} = f(\underline{U}_1^{(k)}, \underline{U}_2^{(k)}, \dots, \underline{U}_{i-1}^{(k)}, \underline{U}_{i+1}^{(k-1)}, \dots, \underline{U}_n^{(k-1)}), \quad i = 2, \dots, n$$

Siin arvutatakse k -ndal iteratsioonil järjekordse pinge $\underline{U}_i^{(k)}$ täpsustatud väärtus varem leitud pingete alusel. Samal viisil leitakse ülejäänud pingete väärtused. Iteratsioone korratakse, kuni on täidetud koonduvustingimus

$$\max_i \left| \underline{U}_i^{(k)} - \underline{U}_i^{(k-1)} \right| \leq \underline{\varepsilon}_U$$

kus $\underline{\varepsilon}_U$ on pingete etteantud arvutustäpsus.

Peale pingete arvutuse koondumist arvutatakse tugisõlme võimsus

$$\underline{S}_1 = \underline{U}_1 \underline{J}_1^* = \underline{U}_1 \sum_{j \in \Pi(1)} \underline{Y}_{1j}^* \underline{U}_j^*$$

Kui eesmärgiks oli ainult pingete leidmine, on arvutus lõppenud, kui aga pingete alusel tahetakse arvutada ka muid seisundiparameetreid, tuleb sõlmedes kontrollida võimsuste balansse

$$\max_i \left| \Delta \underline{S}_i \right| = \max_i \left| \underline{S}_i(\underline{U}_i) - \sum_{j \in \Pi(i)} \underline{Y}_{ij}^* \underline{U}_j^* \right| \leq \underline{\varepsilon}_S$$

kus $\underline{\varepsilon}_S$ on võimsuste balansi etteantud täpsus. Kui see tingimus on täidetud, on sõltumatute parameetrite (pingete) arvutus lõppenud, vastasel korral suurendatakse pingete arvutuse vajalikku täpsust

$$\underline{\varepsilon}_U = \frac{\underline{\varepsilon}_U}{l}$$

kus l on arv 2...10, ja pöördatakse tagasi pingete arvutuse juurde.

Tavaliselt rakendatakse Gaussi-Seideli meetodi puhul koonduvuse kiirendamist, mis seisneb selles, et enne järjekordselt väljaarvutatud pingelähendi kasutamist järgmiste pingete arvutamiseks korrigeeritakse seda järgmiselt:

$$\underline{U}_i^{(k)} = \underline{U}_i^{(k-1)} + \omega \cdot (\underline{U}_i^{(k)} - \underline{U}_i^{(k-1)}), i = 2 \dots n$$

kus ω on kiirendustegur, mille väärtuseks võetakse 1,3...1,7. Kiirendusteguri optimaalne väärtus sõltub võrgu iseloomust ja see leitakse tavaliselt proovimise teel. Kiirenduse kasutamine võimaldab tõsta koonduvuskiirust kuni kaks korda.

Gaussi-Seideli meetodi eelised:

- väike mälu mahu vajadus
- väike arvutuste maht ühel iteratsioonil
- koonduvuskiirus ja lahendikindlus ei sõltu pinge alglähendist
- lihtne algoritm
- võimaldab jälgida mittekoondumise põhjusi ja probleemseid võrguosi.

Meetodi puudusteks on

- aeglane koonduvus – vajaliku täpsuse saavutamine võib nõuda sadu iteratsioone eriti staatilise stabiilsuse piiri lähedal
- vajalike iteratsioonide arvu kasv võrgu sõlmede arvu suurenemisel
- suhteliselt pikk arvutusaeg, seda just aeglase koonduvuse tõttu
- suhteliselt halb lahendikindlus eriti staatilise stabiilsuse piiri lähedal.

Meetod ei luba ka negatiivseid jadajuhtivusi ega väikese impedantsiga harusid.

Lihtsuse tõttu leiab Gaussi-Seideli meetod tänapäeval küll kasutamist, kuid tema kasutusala aheneb. Et koonduvuskiirus ja lahendikindlus ei sõltu pinge alglähendist, kasutatakse Gaussi-Seideli meetodit vahel koos Newtoni-Raphsoni meetodiga pinge alglähendi esialgseks lähendamiseks lahendile.

Newtoni-Raphsoni meetod ja selle modifikatsioonid on tänapäeval tunnustatud tõhusateks ning need on laialt levinud. Vaatleme mittelineaarset võrrandisüsteemi

$$\mathbf{b} = \mathbf{f}(\mathbf{x})$$

kus \mathbf{b} ja \mathbf{x} – n -mõõtmelised antud ja otsitavate parameetrite vektorid

\mathbf{f} – n -mõõtmeline vektorfunktsioon.

Võib ka kirjutada

$$b_i = f_i(x_1, \dots, x_n) \quad i = 1, \dots, n$$

Olgu $\tilde{\mathbf{x}}$ võrrandi lahend ja $\mathbf{x}^{(0)}$ selle lähend. Olgu $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ diferentseeritav lahendi $\tilde{\mathbf{x}}$ ümbruses, nagu see elektrivõrgu ülesannete puhul tegelikult on. Sel juhul võib võrrandisüsteemi $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ arendada punktis $\mathbf{x}^{(0)}$ Taylori ritta

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(0)}) + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}^{(0)}} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(0)}) + \text{kõrgemad liikmed.}$$

Tähistame võrrandisüsteemi osatuletiste maatriksi ehk **jakobiaani**

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}$$

mis laotatud kujul on

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

Jättes arvestamata kõrgemad liikmed, saame lineariseeritud ülesande

$$\mathbf{b} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(0)}) + \mathbf{A}(\mathbf{x}^{(0)})(\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(0)})$$

Kuna tegelikult on ülesanne mittelineaarne, defineerime vektori $\mathbf{x}^{(1)}$ nii, et

$$\mathbf{b} = \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(0)}) + \mathbf{A}(\mathbf{x}^{(0)})(\mathbf{x}^{(1)} - \mathbf{x}^{(0)})$$

Kui $\mathbf{A}(\mathbf{x}^{(0)})$ on mittekõrdunud, s.t $\det \mathbf{A}(\mathbf{x}^{(0)}) \neq 0$, siis

$$\mathbf{x}^{(1)} = \mathbf{x}^{(0)} + [\mathbf{A}(\mathbf{x}^{(0)})]^{-1} [\mathbf{b} - \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(0)})]$$

ehk üldjuhul

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + [\mathbf{A}(\mathbf{x}^{(k)})]^{-1} [\mathbf{b} - \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(k)})], \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

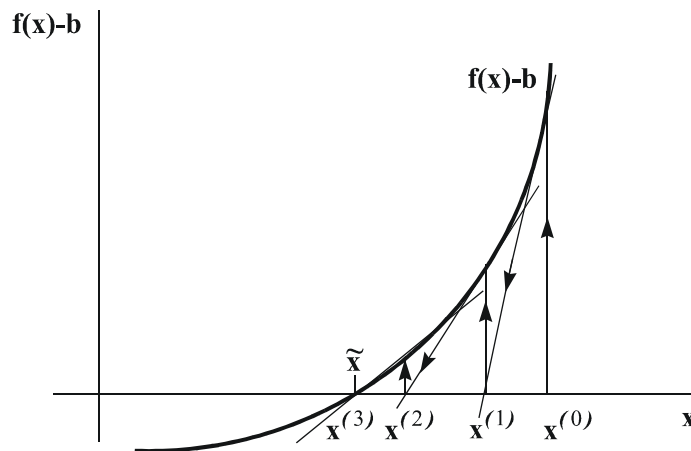
Teisisõnu

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \Delta \mathbf{x}^{(k)}$$

kus parandus $\Delta \mathbf{x}^{(k)}$ leitakse lineaarvõrrandisüsteemi

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}^{(k)}) \Delta \mathbf{x}^{(k)} = \mathbf{b} - \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(k)})$$

lahendamisega. Meetodi olemust illustreerib joonis 6.14.



Joonis 6.14 Newtoni iteratsiooniprotsess

Koondumise kontrolliks kasutatakse sõlmede võimsusbalansi tingimusi

$$\max_i |P_i^a - P_i| \leq \varepsilon_P \quad \text{ja} \quad \max_i |Q_i^a - Q_i| \leq \varepsilon_Q$$

kus $\varepsilon_P, \varepsilon_Q$ on aktiiv- ja reaktiivvõimsusbalansside etteantud arvutustäpsused (tavaliselt 0,01...0,1 MW ja MVar).

Newtoni-Raphsoni meetodi eelisteks on

- väga kiire koonduvus – vajalik täpsus saavutatakse vähem kui viie, sageli ühe kuni kolme iteratsiooniga; koonduvuskiiruselt on meetod parim tänapäeval kasutatavaist
- võrgu mõõtmetest sõltumatu koonduvuskiirus
- küllalt suur arvutuste kiirus – seda just väga kiire koonduvuse tõttu
- hõredustehnika rakendamise tõttu suhteliselt väike mälu mahu vajadus, mis on siiski suurem kui Gaussi-Seideli meetodil
- tundvalt kõrgem lahenduskindlus kui Gaussi-Seideli meetodil
- hea ühilduvus optimeerimisarvutustega
- negatiivsete järjestikjuhtivuste arvestamise võimalus.

Meetodi puudustena tuleks nimetada

- väga suurt arvutuste mahtu ühel iteratsioonil, sest igal iteratsioonil tuleb

- uuesti arvutada jakobiaani elemendid ja lahendada lineaarvõrrandisüsteem tundlikkust pinge algühendi suhtes.

Newtoni-Raphsoni meetodi omapäraks on veel jakobiaani suur nullelementide arv tulenevalt sellest, et võrgu mingi sõlm on seotud vaid paari muu sõlmega, mitte aga võrgu kõigi ülejäänud sõlmedega, nagu jakobiaan seda võimaldab. Maatriksit, mis sisaldab hulgaliselt nullelemente, nimetatakse hõredaks maatriksiks. Selliste maatriksite rakendamine ülesannete lahendamiseks nõuab suurt arvuti mälu mahtu ja palju aega kulub triviaalseteks teheteks nullidega. Arvutamise efektiivsust võimaldab tõsta **hõredustehnika**, mis muudab aga keeruliseks arvutuste algoritmi. Vaatamata nimetatud puudustele on Newtoni-Raphsoni meetod üks paremaid. Tänapäeval on levinud Newtoni-Raphsoni meetodi modifikatsioonid. Nii Gaussi-Seideli kui Newtoni-Raphsoni meetodid sisalduvad programmpakettides *Xpower* ja *PSS/E*.

Newtoni-Raphsoni meetodi üheks modifikatsiooniks on **kiire lõhestusmeetod**. Meetodi lähtekohaks on tõsiasi, et põhivõrgu elektriliinide ja trafode aktiivtakistused on palju väiksemad reaktiivtakistustest. Ka on nurkade erinevused elektriliinide ja trafode otsasõlmedes väikesed ega ületa 30° , enamikul juhtudel jäävad alla $10...15^\circ$. Seetõttu võib võrguvõrrandeid lihtsustada nii, et need lõhestuvad kaheks iseseisvaks võrrandisüsteemiks. Iteratsiooniprotsessi kiirendamiseks rakendatakse veel muidki võtteid. Tulemusena saadakse Newtoni-Raphsoni baasmeetodiga võrreldes tunduvalt efektiivsem algoritm. Selle puuduseks on sobimatus kesk- ja madalpingevõrkudega, kus meetodi aluseks olevad tingimused pole täidetud.

Kui täiendava lihtsustusena eeldada, et kõik aktiivjuhtivused on tühised ja kõik pinged on võrdsed nimipingetega, on tulemuseks püsiseisundi **lineaarne** ehk **alalisvoolumudel**, kus aktiivvõimsused avalduvad pingeturkade kaudu lineaarselt. Reaktiivvõimsusi ei vaadelda. Püsiseisundi alalisvoolumudelit kasutatakse aktiivvõimsuste jagunemise ülikiireks ligikaudseks arvutamiseks näiteks häiringu-kindluse analüüsil, variantide võrdlemisel projekteerimis- ja eriti plaanimis-arvutustes ja mujal.

Nüüdisaegsed püsiseisundite arvutusprogrammid püüavad automaatselt tagada ka seisundi lubatavuse, s.t koondumise lahendiks, mille puhul on täidetud kõik kitsendused. Näiteks trafode väljavõtted reguleeritakse nii, et võrgu kontrollpunktides on pinged tagatud etteantud piires. Kui iteratsiooniprotsessis pinge mõnes kontrollpunktis lubatud piiridest väljub, siis muudetakse igal iteratsioonil kontrollpunktile lähima reguleeritava trafo väljavõtet, kuni kontrollpunkti pinge jääb etteantud piiridesse. Generaatorsõlmedes arvutatakse peale igat iteratsiooni reaktiivvõimsus. Nendes sõlmedes, kus see ületab lubatud piire, fikseeritakse reaktiivvõimsus ületatud piiril ja vabastatakse pingemoodul, mis muudab sõlme oma iseloomult koormussõlmeks, kus on antud aktiiv- ja reaktiivvõimsus ning otsitavateks pingemoodul ja -nurk. Kui tugisõlmes ületab lubatud piire

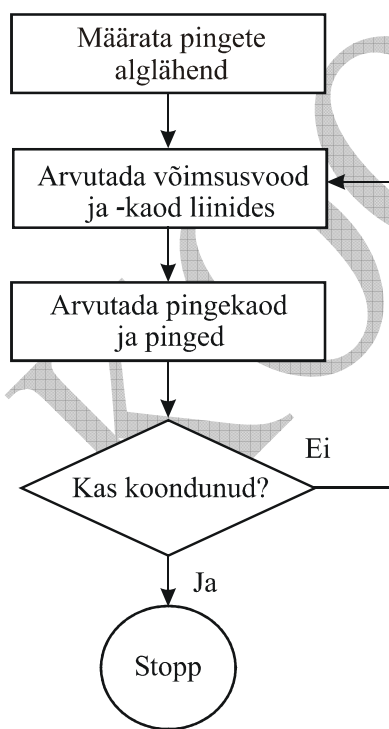
aktiivvõimsus, siis jagatakse võimsuse ülejääk või puudujääk ülejäänud sõlmede vahel ning jätkatakse iteratsioone, kuni tugisõlmes saavutatakse lubatud piires aktiivvõimsus. Kui lubatud piire ületab tugisõlmes reaktiivvõimsus, siis asendatakse tugisõlm mõne teise generaatorsõlmega, muudetakse lubatud piirides tugisõlme etteantud pinget või suurendatakse reaktiivvõimsuse genereerimist või reaktiivkoormust vastava kondensaatorpatarei või põikreaktori sisselülitamisega. Seega püüab professionaalne programm modelleerida nüüdisaegsete elektrisüsteemide automaatikaseadmeid, et saavutada kõiki kitsendusi rahuldav talitus. Alati pole see võimalik. Siis on täiendavaks analüüsiks vaja inseneride sekkumist.

6.2.3 Jaotusvõrgu püsiseisundi arvutamine

Sageli on keskpingejaotusvõrgud välja ehitatud suletud võrkudena, kuid talitlevad avatuna. Jaotusvõrgu talitlust arvutatakse enamasti avatud võrgule, kuid vaja läheb ka suletud võrgu arvutusi näiteks optimaalsete lahutuskohtade otsingul. Suletud keskpingevõrgu arvutuseks sobivad Gaussi-Seideli ja Newtoni-Raphsoni meetodid. Samas ei sobi keskpingevõrkudele kiire lõhestusmeetod ja

alalisvoolumudeli meetod, kuna on täitmata nende meetodite rakendamise põhieeldus – võrguelementide reaktiiv- ja aktiivtakistuste suur suhe $X/R \gg 1$.

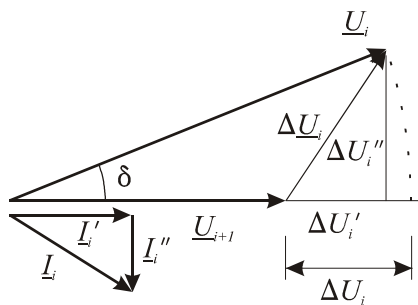
Radiaalsete jaotusvõrkude püsitalitluse arvutus konventsionaalse Newtoni-Raphsoni või Gaussi-Seideli meetodiga pole efektiivne. Otstarbekam on rakendada lihtsat kahekäigulist iteratsiooniprotsessi, milles esmalt arvutatakse võimsuskaod ja võimsusvood liinides, alustades fiidri lõpust ja seejärel pinged sõlmedes, alustades toitealajaama lattedest, kus pinge loetakse teada olevaks (joonis 6.15). Pingete algglähendiks võib olla nimipinge, aga võivad olla ka mõne varasema lähedase seisundi teada olevad pinged. Selline arvutus koondub tavaliselt 2...5 iteratsiooniga, kuid arvestades lähteandmete ligikaudsust, piisab sageli ühest iteratsioonist eriti madalpingevõrgu arvutustel. Ligikaudsetes arvutustes jäetakse võimsuskaod arvestamata.



Joonis 6.15 Radiaalvõrgu püsiseisundi arvutamise plokk skeem

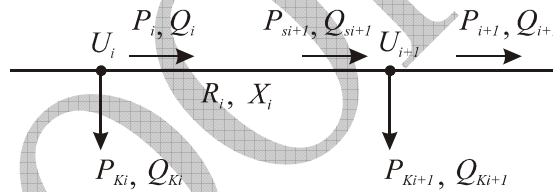
Keskpingevõrkude aseseemide koostamisel tehakse tavaliselt järgmised lihtsustused:

- ei arvestata liinide põikjuhtivusi
- ei arvestata trafode põikjuhtivusi; trafode rauaskadusid arvestatakse ainult võrgu aktiivkadude ja energiakadude määramisel
- kaabelliinide puhul ei arvestata tavaliselt ka nende induktiivtakistusi.



Joonis 6.16 Pingelang ja pingekadu elektrivõrgu elemendis

Kuna jaotusvõrgu mis tahes elemendi sisend- ja väljundpinge vektorite vaheline nurk δ on väike (joonis 6.16), siis ei arvestata pingete arvutamisel pingelangu ΔU_i ristkomponenti $\Delta U_i''$ ja pingekadu loetakse võrdseks pingelangu pikikomponendiga $\Delta U_i = \Delta U_i'$. Kui i -nda liinilõigu (joonis 6.17) kohta on teada pinge U_i ning aktiiv- ja reaktiivvõimsus P_i ja Q_i i -nda liini alguses (toitepunkti poolt lugedes), samuti liini takistused R_i ja X_i , siis pingelang



Joonis 6.17 Liinilõigu arvutuse juurde

$$\Delta \underline{U}_i = \underline{I}_i \underline{Z}_i = (\underline{I}'_i - j \underline{I}''_i)(R_i + jX_i) = (I'_i R_i + I''_i X_i) + j(I'_i X_i - I''_i R_i)$$

mille reaalosa võetakse võrdseks pingekaoga

$$\Delta U_i \cong (I'_i R_i + I''_i X_i)$$

Korrutades ja jagades tulemust pingega U_i , saame valemi võimsustega

$$\Delta U_i = U_i - U_{i+1} \cong \frac{P_i R_i + Q_i X_i}{U_i}$$

Vastukäigul, kui antud on pinged ja otsitakse võimsusvooge, leitakse võimsuskadod i -ndas liinilõigus kui

$$\Delta P_i = \frac{P_{s i+1}^2 + Q_{s i+1}^2}{U_{i+1}^2} R_i, \quad \Delta Q_i = \frac{P_{s i+1}^2 + Q_{s i+1}^2}{U_{i+1}^2} X_i$$

ning võimsus liinilõigu alguses

$$P_i = P_{s i+1} + \Delta P_i, \quad Q_i = Q_{s i+1} + \Delta Q_i$$

Siin on võimsused $P_{s\ i+1}$ ja $Q_{s\ i+1}$ sõlmest $i + 1$ väljuvate harude võimsuste ja koormuse summa.

Trafoharu korral on arvutus analoogiline, sest rauaskadusid ei pruugi pingete arvutamisel arvesse võtta. Küll aga arvestatakse nendega võrgu aktiivkadude ja energiakadude kindlaksmääramisel.

Jaotusvõrgu talitluse arvutusprogrammid pakuvad nii nagu põhivõrgu korralgi mitmesuguseid lisavõimalusi. Ennekõike kindlustatakse vajalik pingetase kontrollpunktides trafode ülekandesuhete ja kondensaatorpatareide mahtuvuse valiku teel. Kaitseseadmete sätete valikuks arvutatakse püsitalitluse kõrval ka rikketalitluse lühis- ja maaihendusvoole. Arvutusi võib teha nii interaktiivselt kui järjestikarvutustena pikema ajavahemiku, näiteks aasta kohta. Koormuste muutusi kirjeldatakse seejuures tüüpgraafikute või koormuse lihtsustatud mudelite (p 5.4.3) abil. Laiemaid võimalusi pakub koormuse täppismudel. Võimalik on koostada ka talitusparameetrite dünaamikamudeleid (p 6.3.4), mis võimaldavad talitusparameetreid nii prognoosida kui analüüsida, arvestades nende ajalisi muutusi, temperatuurisõltuvust ja stohhastikat.

Kadusid käsitletakse jaotusvõrgus sageli talitusarvutustest lahus. Nii ei pruugi võrgu talitluse arvutamisel trafode tühijooksukadusid ja muid väiksemaid kadusid üldse arvesse võtta. Ka on lähteinfo sageli puudulik, mis ei luba kadusid elektriliste seoste alusel adekvaatselt hinnata. Seetõttu on kadude hindamiseks välja töötatud rida meetodeid, lähtudes kao koostisosast, võrgu iseloomust ja kasutada olevast informatsioonist.

Tehnilised kaod jaotusvõrkudes:

- koormuskaod liinides ja trafodes
- tühijooksukaod trafodes
- kaod reaktorites
- kaod kompenseerimisseadmetes
- kaod mõõtetrafodes, sekundaarahelates, arvestites
- alajaamade omatarve.

Peamised elektrivõrkude tehnilised kaod on põhielementides – elektriliinides ja trafodes, ülejäänud kaod on suhteliselt väikesed. Tehnilised kaod võib jagada koormusest sõltumatuteks **püsikadudeks** ja koormusest sõltuvateks **koormus-** ehk **muutuvkadudeks**. Põhilised püsikaod on elektriseadmete tühijooksukaod. Koormuskaod esinevad võrguelementide aktiivtakistustes (elektriliinide juhtmetes, trafomähistes jm).

Vajaliku info suure mahu ja selle puudulikkuse tõttu on eriti keerukas leida koormuskadusid. Mida madalam on võrgu pingeklass, seda suurem on tema elementide hulk ja puudulikum võrgutalitluse kohta kättesaadav lähteinfo. Seetõttu ei saa jaotusvõrkudes sageli kasutada samu kadude arvutusmeetodeid kui ülekandevõrkudes. Siiski on jaotusvõrkudes tänapäeval võetud suund

lähteinfo mahu suurendamisele mõõtesüsteemi laiendamise ja koormuste täpsema modelleerimise alusel. Täpsemad meetodid põhinevad võimsuskadude määramisel püsiseisundi arvutustulemuste järgi.

Kui on leitud haru (liini, trafot) läbiv vool I või võimsus P ja Q , saab leida koormusest sõltuva aktiivvõimsuskao takistusel R valemiga

$$\Delta P = I^2 R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R \approx \frac{P^2 + Q^2}{U_N^2} R$$

Trafo rauaskadu loetakse tavaliselt võrdseks trafo tühijooksukaoga. Võrgu aktiivvõimsuskadu on võrguelementide aktiivvõimsuskadude summa.

Energiakadude järgi võib elektrivõrkude koormuskadude arvutusmeetodid liigitada sõltuvalt kasutada oleva info mahust järgmiselt:

- *Arvutus elementide kaupa* – arvutatakse võimsuskadud üksikutes elementides teada olevate koormusvoolude või võimsusvoogude alusel ja energiakaod piisavalt lühikeste ajavahemike jaoks, mille vältel võib võimsused (voolud) lugeda konstantseks (nt 0,5...1 tundi). Selline arvutus nõuab elemendi koormuse operatiivset telemõõtmist. Meetodid sobivad kadude arvutuseks üksikutes liinides või trafodes (nt süsteemidevahelistes liinides, tähtsamates ülekandeliinides jm).
- *Iseloomulike seisundite meetodite* puhul leitakse võrgu püsiseisundi arvutuse (või estimateerimise) teel võimsuste jagunemine ja summaarsed võimsuskadud. Mingi ajavahemiku energiakaod leitakse, korrutades iga seisundi võimsuskadud seisundi esinemise kestusega vaadeldaval ajavahemikul. Summeerides aasta iseloomulike seisundite arvutustulemused, saadakse summaarsed aasta energiakaod. Piisavalt lühikeste intervallide puhul on need meetodid kõige täpsemad. Parimad tulemused saadakse operatiivarvutustega, kui on kasutada talitusparameetrite piisava mahuga telemõõtmiste andmed. Meetodeid rakendatakse üldiselt süsteemidevahelistele sidemetele ja süsteemi põhivõrgule (Eestis võrgule 110–330 kV).
- *Iseloomulike ööpäevade meetodid* eeldavad kontrollmõõtmisi kõigis võrgu sõlmedes vaadeldava ajavahemiku (tavaliselt aasta) iseloomulikel ööpäevadel. Nende alusel koostatakse iseloomulikud koormusgraafikud ja arvutatakse energiakaod, lähtudes antud iseloomuliku päevaga samasuguste päevade arvust vaadeldaval perioodil. Meetodeid kasutatakse põhiliselt ülekandevõrgus, kus kontrollmõõtmiste tulemused sõlmedes on kättesaadavad.
- *Ekvivalentse takistuse meetodid* põhinevad kogu võrgu esitamisel ekvivalentse takistusena ning lähtuvad pealõigu keskmisest koormusest ja koormusgraafiku iseloomust. Need meetodid sobivad eelkõige keskpinge jaotusvõrkudele, aga ka madalpingevõrkudele, kus liinide ja jaotustrafode arv on suur, mõõdetav info aga piirdub tavaliselt võrku siseneva energia

mõõtmistulemustega. Siiski on ka nende meetodite kasutatavus piiratud, kuna need eeldavad fiidrisse siseneva energia mõõtmist.

- *Statistilised meetodid* põhinevad kadude regressioonsõltuvustel, mis arvestavad võrgu skeemi ja talitlust iseloomustavaid üldistatud näitajaid, nagu liinide kogupikkus, liinilõikude arv, pealiini ristlõige jms. Regressioonsõltuvused koostatakse piiratud arvu võrkude ja talitluste eelneva arvutuse abil ning saadud tulemused üldistatakse teistele võrkudele. Meetodid sobivad eelkõige kadude arvutamiseks madalpinge-, aga ka keskpinge võrkudes, kus liinide ja koormuste arv on suur, kättesaadava info maht aga väga piiratud.

Vahel rakendatakse nende meetodite kombinatsioone. Erinevate meetodite analüüs näitab, et Eesti keskpingejaotusvõrkudes on praeguses infoga varustatuse olukorras sobivaimaks ekvivalentse takistuse meetod või statistilised meetodid.

6.3 Elektrivõrgu talitluse estimateerimine

6.3.1 Talitluse estimateerimise põhimõtted

Enamasti saadakse elektrivõrgu talitluse juhtimiseks vajalikud andmed andme- hõive- ja andmeedastussüsteemide vahendusel. Sellisel teel hangitud mõõte- andmed võivad sisaldada küllaltki suuri vigu või on andurite, sidekanalite jm häirete ning rikete tõttu ebapiisavad. Jämedatest vigadest võimaldab andmeid osaliselt puhastada mõõtetulemuste eeltöötlus: etteantud piirides oleku kontroll, haru otstes mõõdetud võimsusvoogude võrdlemine, Kirchhoffi esimese seaduse täidetuse kontroll üksikutes sõlmedes, haru võimsusvoo ja võimsuslülitite asendisignaalide võrdlemine jne. Eeltöötlus aitab selgitada ka võrgu konfigu- ratsiooni ning esile tuua muid talitlusega seonduvaid seiku.

Suurema usaldusväärsusega andmete saamiseks on mõõtetulemusi vaja **estimateerida**. Estimateerimine tähendab elektrivõrgu matemaatilisel mudelil põhinevate andmete käsitlemist, et puhastada mõõtetulemused vigadest ja suurtest häiretest ning arvutada (hinnata) mõõtmata jäänud suurusi. Olenevalt elektrisüsteemi talitluse dünaamika arvestamise tasemest eristatakse staatilist estimateerimist, mis toimub ühe hetke andmete alusel, ja dünaamilist estimateerimist, mis kasutab ära ka varem saadud tulemused, ning nende vahevormi – jälgivestimateerimist.

Staatilise estimateerimise eesmärk matemaatilises mõttes on leida oleku põhipara- meetrite vektori \mathbf{x} hinnang $\hat{\mathbf{x}}$, minimeerides jääkide vektorit

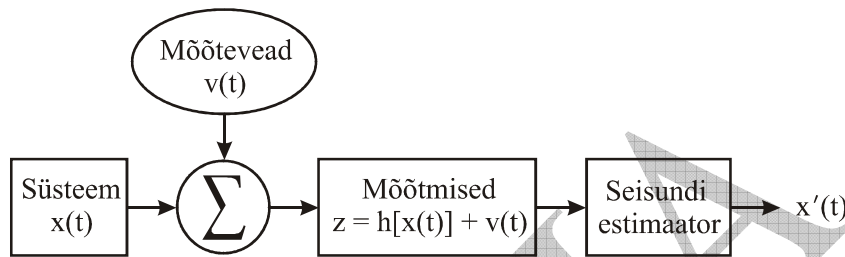
$$\mathbf{r} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})$$

kus \mathbf{z} – mõõdetavate suuruste vektor, mille komponentideks on tavaliselt aktiiv- ja reaktiivvõimsusvoogude ning sõlm võimsuste (injektsioonide) ning pingete mõõtmised

\mathbf{x}' – seisundi põhiparameetrite vektor, mille komponentideks on pinged ja -moodulid

$\mathbf{h}(\mathbf{x})$ – Kirchhoffi seadustest tulenevate võrguvõrrandite vektorfunktsioon, mis seob vektoreid \mathbf{z} ja \mathbf{x} .

Olgu märgitud, et funktsioon $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ sõltub nii võrgu struktuurist kui mõõtmiste koosseisust. Seisundi estimateerimist illustreerib joonis 6.18.



Joonis 6.18 Seisundi estimateerimine

Jääkide \mathbf{r} minimeerimiseks kasutatakse enamasti kaalutud vähimruutude meetodit, mille kohaselt minimeeritakse sihifunktsiooni

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}') = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}')]^T \mathbf{Q}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}')] = \min$$

Siin tähistab \mathbf{Q} mõõtevigate kovariatsioonimaatriksit, millest arvestatakse ainult diagonaalelemente, s.o mõõtevigate dispersioone. Nendele vastavad standardhälbed on leitavad näiteks kujul $b \cdot TS$, kus TS on mõõteriista skaala ulatus ja b on konstant.

Esitatud tingimusele vastab mittelineaarne vektorvõrrand

$$\nabla J = \frac{\partial J}{\partial \mathbf{x}} = 2\mathbf{H}^T(\mathbf{x}')\mathbf{Q}^{-1}[\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}')] = 0$$

kus

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \left. \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}'}$$

on vektorfunktsiooni $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ jakobiaan.

Saadud võrrandisüsteem lahendatakse iteratiivse protseduuriga

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^{(k+1)} &= \mathbf{x}^{(k)} + \Delta \mathbf{x}^{(k)} \\ \mathbf{G}^{(k)} \Delta \mathbf{x}^{(k)} &= \mathbf{b}^{(k)} \end{aligned}$$

kus \mathbf{G} on kasvumaatriks ja \mathbf{b} vabaliikmete vektor. Lineariseerides funktsiooni $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ punktis $\mathbf{x}^{(k)}$ Taylori ritta arenduse teel, mille juures säilitatakse kaks esimest liiget, ning asendades tulemuse vaadeldavas võrrandisse, saame Newtoni tüüpi protseduuri, nn baasalgoritmi, mille puhul

$$\begin{aligned} \mathbf{G}^{(k)} &= \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(k)})\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{H}(\mathbf{x}^{(k)}) \\ \mathbf{b}^{(k)} &= \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(k)})\mathbf{Q}^{-1}[\mathbf{P} - \mathbf{H}(\mathbf{x}^{(k)})] \end{aligned}$$

Estimeerimise põhimõtet ja probleeme võib illustreerida lihtsa näite varal. Olgu $m = 6$ korda mõõdetud mingit sõltuvust $y = f(x)$ ja saadud andmed x_i, \tilde{y}_i ($i = 1, \dots, 6$). Samuti olgu teada, et seda sõltuvust kirjeldab ruutfunktsioon

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2$$

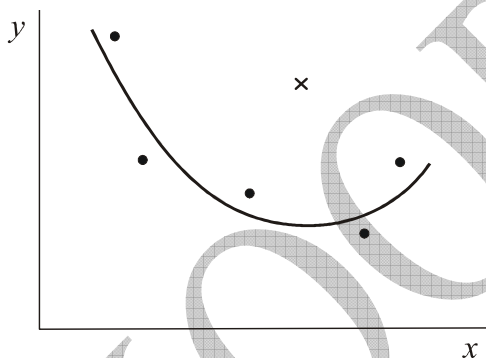
Leiame $n = 3$ tundmatut parameetrit a_0, a_1 ja a_2 vähimruutude meetodil

$$S = \sum_{i=1}^m [\tilde{y}_i - (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2)]^2 = \min$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_j} = 2 \sum_{i=1}^m [\tilde{y}_i - (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2)] x_i^j = 0 \quad (j = 0, \dots, 2)$$

mis annab otsitavate parameetrite a_0, a_1 ja a_2 leidmiseks lineaarse võrrandisüsteemi

$$a_0 \sum_{i=1}^m x_i^j + a_1 \sum_{i=1}^m x_i x_i^j + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^2 x_i^j = \sum_{i=1}^m \tilde{y}_i x_i^j \quad (j = 0, \dots, 2)$$



Joonis 6.19 Ruutfunktsiooni estimeerimine

Näidet illustreerib joonis 6.19. Joonisel on üks mõõdetulemustest (tähistatud \times -ga) osutunud sobimatuks. (Mittesobivate andmete leidmise võtteid siinkohal ei vaadelda.) Andmeliiasus, mis esialgu oli $6/3 = 2$, kahanes selle tulemusena $5/3 = 1,7$ -ni. On selge, et andmeliiasus, mis iseenesest on estimeerimisel hädavajalik, ei taga veel usaldatavaid tulemusi. Kui kõik m mõõtmist

oleksid tehtud kitsas x -telje vahemikus (vastab elektrivõrgu talitluse halvale vaadeldavusele), võinuks estimeerimise tulemused olla hoopis teised.

Staatilisel estimeerimisel lähtutakse ainult hetke andmetest. Kasutamata jäävad nii varasemad andmed kui estimeerimistulemused. Varasemate andmete ära kasutamine tähendaks dünaamilist estimeerimist, mis eeldab süsteemi talitluse dünaamikamudeli olemasolu. Staatilise ja dünaamilise estimeerimise vahetvormiks on jälgivestimeerimine, mis põhineb eeldusel, et olekvektor \mathbf{x} muutub kahe järjestikku ajaintervalli vahel vähe. Kuigi jälgiv ja dünaamiline estimeerimine on põhimõtteliselt täiuslikumad kui staatiline estimeerimine, näitavad kogemused, et jälgiv- ja dünaamiline estimaator teevad suuremaid vigu kui staatiline estimaator seda eriti süsteemi seisundi järsul muutumisel, aga ka süstemaatiliste mõõtevigade korral. Seetõttu kasutatakse praktikas enamasti staatilisi estimaatoreid.

Lisaks põhimõtteliste raskustele tuleb estimateerimise käigus lahendada selliseid probleeme nagu

- võrguvõrrandite koostamine
- vaadeldavuse analüüs
- halbade andmete kindlakstegemine
- mudeli vigade avastamine
- halbade ja puuduvate andmete asendamine.

Võrguvõrrandid $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ peavad vastama võrgu konfiguratsioonile ja mõõtmiste koosseisule. Praktiliselt koostatakse võrrandid esmalt suuremale võrgule ja mõõtmiste koosseisule ning korrigeeritakse seejärel vastavalt olukorrale. Elektrivõrgu jooksva skeemi koostamine on konfiguratori ülesanne. Konfiguraator on algoritm, mis telesignaali ja käsitsi sisestatud info alusel koostab võrgu jooksva skeemi, kontrollides seda telemõõtmiste järgi. Efektiivne konfigurator põhineb võrgutopoloogia loogilisel käsitlemisel. Võrguvõrrandite lahendamise põhiliseks arvutuslikuks probleemiks on kasvumaatriksi \mathbf{G} suured mõõtmed ja selle ümberarvutamise vajadus igal iteratsioonil.

Vaadeldavuse analüüsi ülesanne on selgitada, kas mõõtmiste hulk on küllaldane elektrivõrgu oleku hindamiseks ja kui mitte, siis milliste võrguosade olekut on võimalik hinnata (tuleb leida vaadeldavad piirkonnad). Matemaatiliselt seostub vaadeldavuse analüüs jakobiaani astaku määramisega.

Halvad andmed töödeldavate mõõteandmete hulgas võivad muuta estimaadi ebakvaliteetseks ja isegi kõlbmatuks. Mõõtmistulemuste vigade kõrval võivad väärad olla ka telesignaalid, mis põhjustavad normaalvõrrandite struktuurivigu. Suured ja ilmsed vead avastatakse eeltöötlemise käigus. Halbade andmete, s.o mõõtevigade ja valede telesignaalide avastamiseks tuleb neid esmalt detekteerida, s.t kindlaks teha, kas neid üldse esineb. Jaatava vastuse korral tuleb vead identifitseerida – üles leida kõik vigased andmed. Olgu märgitud, et kõik halvad andmed pole detekteeritavad. Nii ei ole detekteeritavad kriitilised mõõtmised, s.o mõõtmised, mille eemaldamine mõõtesüsteemist muudab süsteemi vaadeldamatuks.

Estimeerimisvigade üks põhjus võib olla võrgu tegelike parameetrite ja võrrandite koostamisel kasutatud parameetrite erinevus, aga ka võrguskeemi ehk struktuuri vead. Suuri vigu põhjustavad trafode valed ülekanadesuhted (astmed). Pika liini korral võib oluliseks saada põikjuhtivuse ilmastikusõltuvus (nt korona).

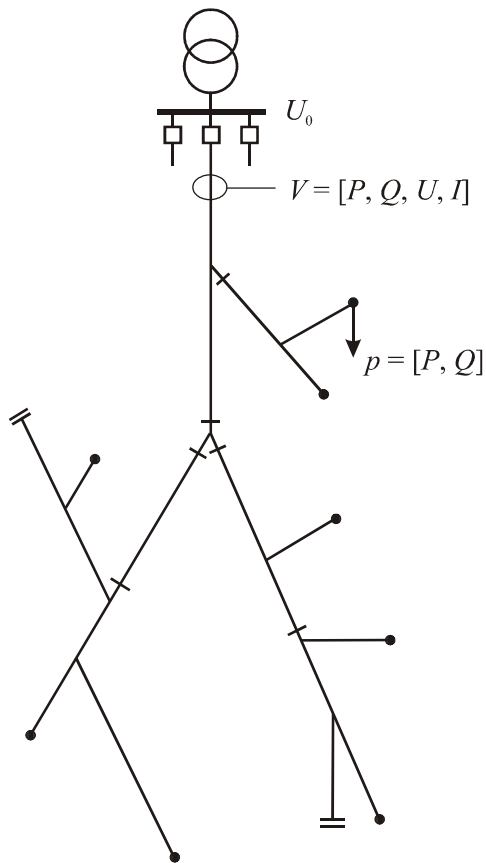
Peale halbade andmete detekteerimist ja identifitseerimist tuleb need eemaldada ja korrata estimateerimist või asendada enne estimateerimise jätkamist arvatavalt sobiva väärtusega. Esimesel juhul koostatakse uuesti kasvumaatriks, kusjuures halveneda võib selle tingitus või osutub süsteem vaadeldamatuks. Halbu andmeid saab asendada pseudomõõtmistega, mille all mõistetakse seisundi-parameetrite prognoositud väärtusi.

6.3.2 Jaotusvõrgu talitluse estimeerimine

Jaotusvõrgu võib operatiivsete mõõteandmete kättesaadavuse seisukohalt jaotada jälgitavaks ja mittejälgitavaks osaks. Jaotusvõrgu operatiivselt jälgitavas osas on andmete edastamise ja salvestamise tarvis dispetšisüsteem (EE jaotusvõrgus *MicroSCADA*). Lisaks dispetšisüsteemile on jaotusvõrgus teiseks mõõteandmete saamise võimaluseks kommertsmõõtesüsteem (EE jaotusvõrgus *Enermet AIM*), mille vahendusel toimub 0,4 kV mõõtmiste registreerimine, edastamine ja arhiveerimine. Kahjuks võimaldab kommertsmõõtesüsteem koguda vaid üksikuid mõõtetulemusi ja seda küllaltki suure viitega, kuna mõõteandmeid reaajas ei edastata.

Dispetšisüsteemi kaudu hangitud mõõteandmed võivad sisaldada suuri vigu või on andurite, sidekanalite jm häirete ning rikete tõttu ebapiisavad. Suurema

usaldusväärsusega andmete saamiseks on mõõtetulemusi vaja estimeerida. Jaotusvõrgu talitluse estimeerimist takistab aga asjaolu, et erinevalt põhivõrgust ei ole jaotusvõrgus vajalikku andmeliiasust. Selle tõttu pole võimalik tavapäraste estieerimismeetodite otsene rakendamine jaotusvõrgu talitluse estimeerimiseks. Täiendava informatsiooni saamiseks tuleb kasutada koormusmudeleid.



Joonis 6.20 Jaotusvõrgu fiidri skeem

Keskpinge jaotusvõrku võib kujutada toitealajaamast väljuvate fiidritena (joonis 6.20), mis koosnevad liinilõikudest ja piirnevad jaotusalajaamadega. Fiidri skeemi võib muuta lahklülite ümberlülitamisega lahtuspunktides. Fiidrisse võivad kuuluda veel vahelajaamad (nt 35/10 kV) ja pingereguleerimisseadmed. Keskpingefiidri koormuse moodustavad jaotusalajaamade aktiiv- ja reaktiivvõimsused. Koormus saadakse jaotusalajaama madalpingefiidrite võimsuste summana, millele liituvad kaod jaotustrafodes.

Jaotusvõrgu talitusparameetreid mõõdetakse operatiivselt toite- ja vaheala-jaamades. Mõõdetavad suurused võivad olla aktiiv- ja reaktiivvõimsused, pinged ja voolud fiidri erinevates punktides. Enamasti mõõdetakse fiidri toitepinget ja summaarset võimsust ning pingeid ja voole jaotusalajaamades. Mõõtmiste sagedus dispetšisüsteemis (SCADA) on suurusjärgus üks kord minutis. Edasiseks käsitlemiseks väljaspool dispetšisüsteemi esitatakse andmed tunni või selle osa keskmiste väärtustena.

Jaotusvõrgu fiidri talitusparameetrid on arvutatavad võrguvõrrandite alusel toitepinge ja sõlmekoormuste kaudu, mis moodustavad talitluse põhiparameetrid

$$V_j(U_0, p_1, p_2, \dots, p_n)$$

Tähis p_i vastab siin nii aktiiv- kui reaktiivkoormustele, mille tõttu koormuste koguarv n on võrdne sõlmede kahekordse arvuga. Fiidri talitlusel on seega $n + 1$ põhiparameetrit $U_0, p_1, p_2, \dots, p_n$. Olgu vaadeldava momendi kohta m talitluse mõõtmist \tilde{V}_j (P, Q, U või I). Mõõtmistele vastavad täpsustatud talitusparameetrid ehk mõõteparameetrid V_j leiab tingimusest

$$\sum_j [\tilde{V}_j - V_j]^2 = \min, \quad j = 1 \dots m$$

Kuna jaotusvõrgus enamasti puudub vajalik andmeliiasus – mõõtmiste arv m ei ületa oluliselt talitluse põhimuutujate arvu $n + 1$ või on sellest koguni väiksem, tuleb ülesande lahendamiseks rakendada lisatingimust, mis nõuab, et talitusparameetrite juurdekasvud oleksid võimalikult väikesed

$$\sum_i \Delta^2 p_i = \min, \quad i = 1 \dots n$$

Teisisõnu, nõutakse, et võrgu talitus oleks võimalikult lähedane koormusmudelile alusel prognoositule.

Vaatleme võrguvõrrandeid lineariseerituna talitluse põhiparameetrite suhtes, tähistades $p_0 = U_0$

$$\Delta V_j = \beta_{0j} \Delta p_0 + \beta_{1j} \Delta p_1 + \beta_{2j} \Delta p_2 + \dots + \beta_{nj} \Delta p_n$$

kus

$$\beta_{ij} = \frac{\partial V_j}{\partial p_i}, \quad i = 0 \dots n$$

Maatrikskujul

$$\mathbf{\Lambda} = \mathbf{B}\mathbf{\Delta}$$

kus

$$\mathbf{\Lambda} = [\Delta V_0, \Delta V_1 \dots \Delta V_m] - \text{talitluse mõõteparameetrite juurdekasvuvektor}$$

$$\mathbf{\Delta} = [\Delta p_0, \Delta p_1 \dots \Delta p_n] - \text{talitluse põhiparameetrite juurdekasvuvektor}$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \beta_{10} & \beta_{11} & \dots & \beta_{1n} \\ \beta_{20} & \beta_{21} & \dots & \beta_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \beta_{m0} & \beta_{m1} & \dots & \beta_{mn} \end{pmatrix} - \text{tundlikkusmaatriks (jakobiaan).}$$

Juurdekasvud Δp_i leitakse siin koormuse ooteväärtuste (lühiajaline prognoos ennetusajaga 1) suhtes. Mudeli võib koostada ka toitepingele U_0 . Lihtsustuse korras võib rakendada triviaalmudelit, kus pinge matemaatiline ootus ja ruutvälve on konstantsed, pingehälvet aga kirjeldatakse *Boxi-Jenkinsi* mudeliga.

Vaatleme mõõtmiste laiendatud juurdekasvuvektorit

$$\tilde{\mathbf{A}}_0 = [\Delta\tilde{V}_1, \Delta\tilde{V}_2 \dots \Delta\tilde{V}_m, 0, 0 \dots 0]$$

millel n viimast komponenti on nullid. Moodustame maatriksi \mathbf{B}_0 , milles on $n+1$ veergu ning esimesed m rida moodustavad tundlikkusmaatriksi \mathbf{B} elemendid, järgnevad n rida aga koosnevad nullvektorist ja ühikmaatriksist.

$$\mathbf{B}_0 = \begin{pmatrix} \beta_{10} & \beta_{11} & \dots & \beta_{1n} \\ \beta_{20} & \beta_{21} & \dots & \beta_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \beta_{m0} & \beta_{m1} & \dots & \beta_{mn} \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Ülaltoodud tingimused on korruga rahuldatud, kui

$$(\tilde{\mathbf{A}}_0 - \mathbf{B}_0 \mathbf{\Delta})^T (\tilde{\mathbf{A}}_0 - \mathbf{B}_0 \mathbf{\Delta}) = \min_{\mathbf{\Delta}}$$

Siit tuleneb lineaarne võrrandisüsteem juurdekasvuvektori $\mathbf{\Delta}$ suhtes

$$\mathbf{B}_0^T \mathbf{B}_0 \mathbf{\Delta} = \mathbf{B}_0^T \tilde{\mathbf{A}}_0$$

Juurdekasvuvektori $\mathbf{\Delta}$ võimaldab täpsustada talitluse põhiparameetreid, mille kaudu võib arvutada nii täpsustatud mõõteparameetrid (estimaadid) kui mis tahes muud talitusparameetrid.

Tundlikkusmaatriksi \mathbf{B} elemente saab leida arvutuslikult. Selleks tuleb kordamööda ette anda juurdekasvud $\Delta p_0 \dots \Delta p_n$ ja arvutada lineariseerimata võrguvõrrandite alusel vajalike talitusparameetrite juurdekasvud ΔV_j . Tulemuseks on

$$\beta_{ij} = \frac{\Delta V_j}{\Delta p_i}, \quad i = 0 \dots n, j = 1 \dots m$$

Estimeerimise käigus on võimalikud järgmised olukorrad:

- mõõtmised on korrektsed
- esineb halbu andmeid
- koormusjuhtumite vaheldumine
- erandlik talitus.

Estimeerimistulemused on usaldatavad, kui puuduvad halvad mõõteandmed (eksitused) ja tegemist ei ole erandliku seisundiga. Halbade mõõteandmete leidumisel tuleb need kõrvaldada ja estimeerimist korrata. Koormusstsenaariumitest oli eespool juttu (p 5.3.2). Eksitused mõõteandmetes võivad olla üksteisega seotud näiteks häirete tõttu sidekanalites. Erandlike olukordade tunnused rajanevad koormushälvete ja tundlikkusmaatriksi elementide ulatuse hindamisel. Erandlikke seisundeid võib üritada ka lähemalt kindlaks määrata. Kui olukorda usaldatavalt fikseerida ei õnnestu, jääb vaadeldava hetke talitus estimeerimata. Estimeerimise jätkamisel selle hetke mõõtmisi ei kasutata. Tulemusena suureneb teatud määral talitluse lühiajalise prognoosi hajuvus, kuid põhimõtteliseks takistuseks estimeerimise jätkamisele see ei ole.

Jaotusvõrgu talitluse estimeerimise edukus sõltub koormuse matemaatilise mudeli adekvaatsusest. Mudeli paremaks vastavusse viimiseks tegelikkusega tuleb mudeli parameetreid redigeerida. Koormusmudeli parameetrid on põhimõtteliselt muutumatud, kui koormuse iseloom ei muutu. Mudeli parameetrite täpsustamine redigeerimisel väljendab miisiis koormuse iseloomu muutusi. Samuti on võimalik, et parameetrid vajavad täpsustamist selle tõttu, et mudeli lähtekujuks oli valitud tüüpmodel.

Vaatleme sõlmekoormusi p_i mudeli parameetritega $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ir}$ hetkel t_k

$$p_i(t_k, a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ir}), \quad i = 1 \dots n$$

kus r on estimeeritavate parameetrite arv mudelis. Esitame talitluse mõõteparameetreid kirjeldavad võrguvõrrandid

$$V_j = V_j(U_0, p_1, p_2, \dots, p_n)$$

koormusmudeli parameetrite kaudu

$$V_{jk} = F_{jk}(a_1, a_2, \dots, a_l), \quad j = 1 \dots m$$

kus $l = nr$ haarab kõigi koormusmudelite parameetreid. Funktsioon F_{jk} vastab siin hetkele t_k , millest sõltuvad nii koormuse väärtused kui toitepinge.

Mudeli parameetrid saab leida tingimusest

$$\sum_j \sum_k [\tilde{V}_{jk} - V_{jk}]^2 = \min$$

kus \tilde{V}_{jk} tähistab mõõtmist hetkel k .

Võrguvõrrandid lineariseerituna koormusmudelite parameetrite suhtes

$$\Delta V_{jk} = \alpha_{1,jk} \Delta a_1 + \alpha_{2,jk} \Delta a_2 + \dots + \alpha_{l,jk} \Delta a_l$$

kus

$$\alpha_{sjk} = \frac{\partial V_{jk}}{\partial a_s}, \quad s = 1 \dots l$$

Maatrikskujul

$$\mathbf{\Lambda}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{\Delta}$$

kus

$$\mathbf{A}_k = [\Delta V_{1k}, \Delta V_{2k} \dots \Delta V_{mk}]$$

on talitluse mõõteparameetrite juurdekasvuvektor,

$$\mathbf{\Delta} = [\Delta a_1, \Delta a_2 \dots \Delta a_l]$$

on mudeli parameetrite juurdekasvuvektor,

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} \alpha_{11k} & \dots & \alpha_{1lk} \\ \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{m1k} & \dots & \alpha_{mlk} \end{bmatrix}$$

on tundlikkusmaatriks (jakobiaan).

Kui tähistada mõõtmishälvete vektorit

$$\tilde{\mathbf{\Lambda}}_k = [\Delta \tilde{V}_{1k}, \Delta \tilde{V}_{2k} \dots \Delta \tilde{V}_{mk}]$$

siis võib mudeli parameetrite juurdekasvud leida tingimusest

$$\sum_k (\tilde{\mathbf{\Lambda}}_k - \mathbf{A}_k \mathbf{\Delta})^T (\tilde{\mathbf{\Lambda}}_k - \mathbf{A}_k \mathbf{\Delta}) = \min_{\mathbf{\Delta}}$$

mis annab lineaarse võrrandisüsteemi vektori $\mathbf{\Delta}$ suhtes

$$\sum_k (\mathbf{A}_k^T \mathbf{A}_k) \mathbf{\Delta} = \sum_k \mathbf{A}_k^T \tilde{\mathbf{\Lambda}}_k$$

Võrguvõrrandite lineariseerimise lähtekohaks on mudeli alusel leitud koormuse ooteväärtused. Samade väärtuste suhtes leitakse ka mõõtehälbed. Lineariseerimine on vastuvõetav, kui mõõtehälbed ei ole ülearu suured. Vastasel juhul tuleb korraldada iteratsiooniprotsess, kus leitud juurdekasvud lisatakse mudeli parameetritele ning arvutatakse uued talitusparameetrid ja mõõtehälbed. Lineariseerimist (uue tundlikkusmaatriksi arvutamist) ei ole seejuures tingimata vaja korrata, vaid võib jätkata esialgse maatriksiga. Tundlikkusmaatriksi elemendid leitakse arvutuslikult

$$\alpha_{sjk} = \frac{\Delta V_{jk}}{\Delta a_s}, \quad s = 1 \dots l, j = 1 \dots m$$

Mõõtmisi peab olema rohkem kui mudeli estimeeritavaid parameetreid. Kui vaadeldavas fiidris on koormusi näiteks 10 (5 jaotusalajaama), parameetreid 10 ja mõõtmisi 10, siis kokku on otsitavaid $l = 100$ ning mõõtetunde on vaja enam kui 10. Seega võib juba ühe päeva mõõtmisandmetel saada arvutuslikult tulemusi. Iseasi on tulemuste usaldatavus. On arusaadav, et vaid ühe või ka mõne päeva andmete kohandatud mudel ei sobi pikemaks ajavahemikuks.

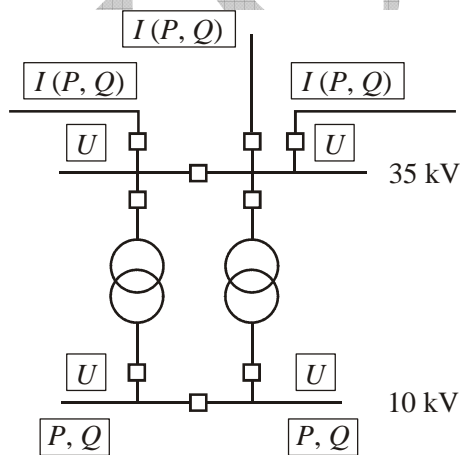
Tuleb tähele panna, et koormuse talvised andmed ei mõjutaks koormuse muutumise seaduspärasusi suvel. Üldisemalt võttes on tegemist adapteerimisprobleemiga, mis tuleb lahendada mudeli parameetrite sisulisest tähendusest lähtudes.

Lahendatava lineaarvõrrandisüsteemi järk on suur (üalloodud näites 100), mis lisaks arvutuste mahule võib tähendada võrrandisüsteemi halba määratletust. Väljapääsuks on talitluse estimeerimistulemuste ära kasutamine. Eespool esitatud estimeerimismeetodi kohaselt leitakse alati sõlmekoormuste väärtused sõltumata sellest, milline on mõõdetavate talitusparameetrite koosseis. Koormuste väärtused saab seega teada ja mudeli parameetreid võib redigeerida üksikute koormuste kaupa. võttes $m = 1$ ja $l = r$, saab

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_k &= |\alpha_{1k} \dots \alpha_{rk}| \\ \Delta &= [\Delta a_1, \Delta a_2 \dots \Delta a_r] \\ \tilde{\Lambda}_k &= [\Delta \tilde{V}_k] = \tilde{p}_k \\ \sum_k (\mathbf{A}_k^T \mathbf{A}_k) \Delta &= \sum_k \tilde{p}_k \mathbf{A}_k^T \end{aligned}$$

kus \tilde{p}_k on vaadeldava koormuse estimeeritud väärtus hetkel k . Lahendatava võrrandisüsteemi järk on nüüd r ehk üalloodud näite kohaselt 10, mis ei tekita arvutuslikke probleeme.

Jämedatest vigadest võimaldab andmeid osaliselt puhastada mõõtetulemuste eeltöötlus. Vaatleme näitena jaotusvõrgu 35/10 kV vahealajaama (joonis 6.21), kus esineb mõõteandmete liiasust, mistõttu on võimalik tavaestimeerimine talitluse seisundite kaupa. Estimeerimine toimub Kirchhoffi esimesest seadusest lähtuva kontrolli alusel alajaama 35 kV lattidel. Eesmärgiks on alajaamade



Joonis 6.21 Operatiivselt jälgitava jaotusvõrgu vahealajaama skeem

mõõteandmete kontroll, eriti alajaama koormuse hindamine, mis moodustub trafode aktiiv- ja reaktiivvõimsuste summana. Koormusmudelite tõepäraseks estimeerimiseks on oluline kindlaks teha, millised koormusandmed on usaldatavad, millised mitte. Lisaks on võimalik hinnata lülitite asendeid ja trafode ülekandesuhteid. Alajaama mõõteandmeteks on siin volud või võimsused elektriliinides, pinged 35 kV ja 10 kV latiseksioonidel ning trafode võimsused 10 kV poolel. Kasutatakse ära mõõteandmed liinide mõlemas otsas. Estimeerimine toimub kahes etapis, kus

esmalt kontrollitakse mõõteandmeid elementide kaupa ja seejärel voolude bilanssi 35 kV lattidel. Mõõteandmete kontroll esimeses etapis seisneb andmete tõepärasuse hindamises ja keskendamises seal, kus see on võimalik. Kesken-dada võib voole liini alguses ja lõpus ning latiseksioonide pingeid. Selles etapis selguvad ka lülite asendid. Teisel etapil kontrollitakse voolude bilanssi 10 kV lattidel. Selleks arvutatakse voolud trafode primaarpoolel ja kui liinidel on mõõdetud võimsused, siis ka liinide voolud. Tehakse järeldusi eksituste puudumiste kohta mõõteandmetes.

Eeltöötuse põhitulemusteks on koormuse väärtused 35 kV lattidel ja 10 kV kummalgi latiseksioonil. Nende tulemuste alusel estimeeritakse edaspidi koormusmudelid, mis on aluseks jaotusvõrgu talitluse seirel, sisaldades ka kogu võrgu talitluse estimeerimist. Koormuse väärtused saadakse kas trafovõimsuste alusel või märgitakse puudevaks, kui trafovõimsused on hinnatud ekslikeks. Kui liinidel on mõõdetud voolude asemel aktiiv- ja reaktiivvõimsusi, on trafode mõõteandmeid võimalik ka täpsustada.

6.3.3 Keskpingevõrgu optimaalne talitus

Elektrivõrgu ülesanne on toita tarbijaid kvaliteetse elektrienergiaga minimaalsete kulude juures. Talitluse optimeerimisel lähtutakse tavaliselt vaid võrgukadude miinimumi kriteeriumist. Siiski on olulised ka kvaliteedinõuded ja elektri-varustuskindlus.

Võrgukadude vähendamise meetmeid võib liigitada kolme rühma:

- tehnilised meetmed
- kommertsmeetmed
- korralduslikud meetmed.

Tehnilised meetmed on seotud uute objektide rajamisega või olemasolevate rekonstrueerimisega, seega täiendavate investeeringutega. Tehnilistest meetmetest on tõhusamad need, millel on väiksem tasuvusaeg. Tehniliste meetmete rakendamise kriteeriumiks pole otseselt kadude miinimum, vaid kadude optimaalne tase, lähtudes kulude miinimumi kriteeriumist. Enamiku tehniliste meetmete rakendamise primaarne eesmärk pole niivõrd kadude vähendamine, kui võrgu läbilaskevõime ja süsteemi töökindluse suurendamine. Tähtis on tõsta talitluse häiringukindlust ning pingekvaliteeti. Kadude vähenemine on seejuures kaasnev nähtus. Olulisemad tehnilised meetmed on võrgu pingestamete korrastamine, liinijuhtmete ja trafode asendamine või täiendav ülesseadmine ja reaktiivvõimsuse kompenseerimine.

Kommertsmeetmed on suunatud elektrienergia mõõte- ja arveldussüsteemide täiustamisele ja hõlmavad mitmesuguseid tegevusi, alates müügiinspektorite kontrollreididest kuni pingetrafode kaitsmete rakendussignalisatsiooni paigaldamiseni alajaamades.

Korralduslikud meetmed on seotud võrgu skeemi ja talitluse optimeerimisega ning võrgu käiduga. Need meetmed ei nõua täiendavaid investeeringuid. Efektiveamad korralduslikud meetmed on

- elektrivõrgu pingeniivo reguleerimine
- võrgu lahutuskohtade optimeerimine
- trafode talitluse optimeerimine.

Võrgukadusid aitavad vähendada veel elektrienergia kulu vähendamine alajaamade omatarbeks, koormuste sümmetreerimine madalpingevõrkudes, kõrgemate harmoonikute mõju vähendamine, tarbimise juhtimine, tehnilise hoolduse ja remontide täiustamine jm.

Pingenivoo all mõeldakse ühe pingestme võrgu või selle osa keskmist pinget. Kuna võimsuskadude põhiosa – koormuskaod on pöördvõrdelised pingesuurevusega, nõuab võimsuskadude miinimumi kriteerium suurima lubatud pingeniivo kasutamist. Ligikaudu vähendab pingeniivo tõstmise 1% võrra võrgukadusid umbes 2%. Pingeniivo tõstmist piiravad ühest küljest nõuded isolatsioonile, teisest küljest vajadus tagada tarbijaile kvaliteetne pinge. Pingeniivo optimeerimine seisneb toitealajaamas koormuse all reguleeritavate trafode reguleerimisseaduste optimeerimises ja mittereguleeritavatele trafodele sobivate astmete valikus. Kondensaatorpatareide olemasolul lisandub veel nende väljavõtete optimeerimine. Lähtutakse pingehälvete lubatavusest tarbijate juures maksimaal- ja minimaalkoormustel. Selleks peab toitealajaama pinge olema maksimaalne maksimaalkoormuste puhul ja minimaalne minimaalkoormuste puhul, mis on tuntud kui vastureguleerimine. Jaotusvõrkude pingeniivo reguleerimissüsteemi häälestamist alustatakse tavaliselt pingete optimeerimisega 6...15 kV võrkudes, seejärel aga 20...35 kV võrkude toitealajaamades, kusjuures konkreetne tegevus sõltub sellest, kas trafod on koormatult reguleeritavad või mitte.

Jaotusvõrkudes, mis küll töökindluse mõttes on ehitatud suletud konfiguratsiooniga, kuid töötavad avatuna, saab valida lahutuskohtad nii, et võrgu käit oleks optimaalne. Kui arvestada, et tarbijate elektrivarustuskindlus, pingekvaliteet ja võrgu käidukulud ei sõltu lahutuskohtadest, taandub ülesanne energiakadude minimeerimisele. Sõltuvalt talitlusest võivad optimaalsed lahutuskohtad ajas muutuda. Praktikas muudetakse lahutuskohti aga suhteliselt harva, enam-vähem sarnaste koormuste puhul aga üldse mitte. Ülesande lahendamiseks kasutatakse kaht põhimõtteliselt erinevat meetodikat. Esimesel juhul arvutatakse erinevatele lahutuskohtadele vastavad energiakaod, kusjuures optimaalseks loetakse minimaalsetele kadudele vastav variant. Selleks on välja töötatud mitu jaotusvõrkude optimaalsete lahutuskohtade määramise algoritmi ja arvuti-programmi, mis nihutavad lahutuskohti teatava strateegia järgi (näiteks diskreetse languse meetod). Teiseks võimaluseks on arvutada võrgu optimaalne talitlus silmusvõrgule, mis moodustub, kui võrgu kõik lahutuskohtad sulgeda. Võib tõestada, et optimaalne talitlus saadakse, kui võrgu püsiseisundi arvutamisel

arvestatakse ainult aktiivtakistusi. Seejärel valitakse lahutuspunktid nii, et avatud võrgu tegelik talitus erineks võimalikult vähe varem leitud optimaalsest. Lahutuskohtade optimeerimisest saadav efekt on suurem linnavõrkudes, kus koormusgraafikute iseloom ja seega ka optimaalsed lahutuskohad on püsivamad. Maavõrkudes, kus koormused on sesoonse iseloomuga, tuleks lahutuskohti sageli muuta.

Teatavasti on enamikus jaotusvõrkude toitealajaamades ja paljudes vahealajaamades üles seatud kaks või enam trafot. Sellistes alajaamades saab energiat oluliselt kokku hoida, kui lülitada väikestel koormustel osa trafosid välja. Tulemusena väheneb trafode summaarne rauaskadu. Samas kasvavad aga koormuskadod (vaseskaod) töösse jäänud trafode suurema koormatuse tõttu. Seega on väljalülitamine otstarbekas, kui rauaskadude vähenemine ületab koormuskadude suurenemise. Tavaliselt koostatakse mitme trafoga alajaamale kriitiliste võimsuste rida, mille alusel trafosid välja või sisse lülitatakse. Väljalülitamist vähem kui kaheks tunniks ei peeta otstarbekaks. Praktika näitab, et ühe MVA trafovõimsuse väljalülitamine ööpäevaste koormusgraafikute järgi annab ühe tunni kohta energiasäästu 35 kV alajaamades keskmiselt 1 kWh ja 6...10 kV alajaamades 3 kWh. Sesonsete väljalülitamiste puhul moodustab energiasääst aga vastavalt 1,4 ja 4 kWh ühe tunni kohta.

6.3.4 Jaotusvõrgu talitluse seire

Elektrivõrgu talitluse seire all mõistame võimalust hinnata, missugused on võrgu talitusparameetrid olnud või oleks võinud olla minevikus ning mida võib oodata tulevikus. Teiste sõnadega haarab seire talitluse analüüsi, prognoosimist ja imiteerimist. Omaette toiming moodustab talitluse estimateerimine, mille eesmärgiks on mõõteandmete kontroll ja täpsustamine.

Talitluse seire aluseks on koormuse matemaatiline mudel. Mudeli struktuur on kõigile koormustele sama. Selleks et mudel kirjeldaks vaadeldavate koormuste omadusi, tuleb mudeli parameetreid estimateerida nende koormuste kohta teada olevatel andmetel, milleks võrgu madalamal tasemel on näiteks kommerts-mõõteandmed ja kõrgemal tasemel dispetsisüsteemis käsitletavat andmed.

Analüüsimisel leitakse talitusparameetrite väärtusi ja muid suurus (nt võrgukadu) mineviku andmetel. Võimalik on tegelike koormuste ümberarvutamine välisõhu normaaltemperatuurile või erandlikule ilmastikuolukorrale. Lühiajalisel prognoosimisel (ennetusajaga kuni üks nädal) lähtutakse temperatuuri meteoroloogilisest prognoosist. Pikaajalisel prognoosimisel võib temperatuuritingimusi imiteerida. Imiteerimine kuulub nii talitluse analüüsimise kui prognoosimise juurde. Välisõhu temperatuuri kõrval võib imiteerida muidki koormuse kujunemise tingimusi.

Talitluse estimateerimine, kus kontrollitakse mõõteandmeid, on võimalik vaid võrgu operatiivselt jälgitava osa kohta. Kuna vajalik andmeliiasus jaotusvõrgus

enamasti puudub, tugineb estimateerimine koormusmodelile. Tõsi, võib ette tulla erandlikke seisundeid, mida sel teel piisava kindlusega kontrollida ei õnnestu. Estimateerimine selgitab välja, kas mingi seisund on kooskõlas koormusmodeliga, s.t kuulub võrgu regulaarse talitluse juurde või mitte. Regulaarse talitluse korral selgitatakse välja ka halvad andmed (eksitused) ja täpsustatakse mõõtetulemusi. Võrgu talitluse estimateerimise käigus täpsustatakse (redigeeritakse) ka koormusmudeleid ning edasisi seiretulemusi.

Matemaatiline mudel kirjeldab jaotusvõrgu sõlmekoormuste regulaarseid muutusi, sõltuvust välisõhu temperatuurist ja talitusparameetritest (pinge, sagedus) ning stohhastilisust. Lisaks võivad elektrivõrgu sõlmekoormused muutuda hüppeliselt, kusjuures koormuse muutunud tase ja iseloom säilib pikema ajavahemiku jooksul. Selliseid olukordi vaadeldakse koormusjuhtumitena, mis võivad olla tingitud näiteks ümberlülitustest madalama taseme võrgus, suurte elektritarbijate (tehaste) käikulaskmisest või nende töö lõpetamisest, reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmete sisse- või väljalülitamistest jm. Juhul kui talitluse mõõtetulemuste kõrvalekalded ületavad lubatud piire, selgitatakse talitluse estimateerimisel halbade andmete kõrval välja ka võimalike koormusjuhtumite vaheldumine.

Koormusmodelite lähtekujud (mudeli parameetrite lähteväärtused) võib saada keskpingejaotusvõrgu andmetele põhinevate koormusuuringute tulemusena. Lihtsustuse korras võib lähtuda ka tüüpmodelitest (mudeli parameetrite tüüpilistest komplektidest). Eelistada tuleks siiski keskpingevõrgu koormusmodelite tuletamist madalpingevõrgu koormusmodelite alusel. Sel teel on võimalik saada usaldatavamaid tulemusi, milles muuhulgas sisalduvad ka võimalikud koormusjuhtumid.

Kui mõõtmiste hälbed on lubatud piirides, pakuvad estimateerimise tulemused mõnevõrra täpsemat talitlust. Mõõtmiste vähesuse ja jaotusvõrgu talitluse stohhastilisuse tõttu ei ole sellisel täpsustusel siiski praktilist tähendust. Olulisem on tõdemus, et võrgu talitus kulgeb ettenähtud raamides ja mõõteandmeid võib kasutada muudes rakendustes. Üksikute mõõtmiste suured hälbed viitavad eksitustele mõõtmistes. Tüüpjuhtumiks on vead mõõteandurite ja sidekanalite töös. Sageli jätab SCADA sellised juhtumid tähele panemata, sest üksikult võetuna on kõik talitusparameetrid lubatud piirides. Seetõttu võivad vead säilida andmetes pikka aega.

Jaotusvõrgu talitluse seire kvaliteet sõltub koormuse matemaatilise mudeli täpsusest. Täpsemaid ja mitmekülgsemaid tulemusi on võimalik saada koormuse täppismudelit rakendades, kuid ka lihtsustatud mudelid (p 5.4.3) võivad olla kasutuskõlblikud. Talitluse ja ühtlasi ka koormusmodelite estimateerimise seisukohalt lähtudes võib eristada reaajas toimivat sidusseiret ning vallasseiret. Sidusseire tugineb dispetšisüsteemi andmetele ning hõlmab võrgu jälgitavat osa. Jaotusvõrgu operatiivselt mittejälgitava osa kohta saadakse

andmeid ennekõike energia mõõtesüsteemi kaudu. Mõlemal juhul hinnatakse võrgu kõigi vaadeldavate koormuste mudeleid, mille alusel võib talitlust nii analüüsida kui prognoosida ja imiteerida. Võrgu jälgitava osa kohta on koormusmudelid vaid täpsemad ja seiretulemused võimaldavad talitlust efektiivsemalt juhtida.

Jälgitava võrgu kohta saab välja selgitada talitusparameetrite tõenäosed väärtused ja tõdeda, kas talitus on oodatud, regulaarne või mitte. Mitteregulaarse talitluse korral võib tegemist olla avariijuhtumitega või erandlike koormustega. Avariilised olukorrad kajastuvad SCADA-s. Erandlike koormusi võib uurida selgitamiseks välja seni fikseerimata koormusjuhtumid. Oluline on, et analüüsimise käigus toimuks nii talitluse estimateerimine kui koormusmudelite redigeerimine. Tulemusena vastavad mudelid alati tegelikule olukorrale jaotusvõrgus ja nende alusel on võimalik tulemuslikult arvutada, ennustada ja analüüsida võrgu talitlust nii lühema kui ka pikema ajavahemiku kohta.

Fiidri konfiguratsiooni muutused ei takista talitluse seiret, kui võrgu tegelik või oodatav skeem on teada. Võimalikud skeemimuutused fikseerib dispetšisüsteem ja seda kontrollitakse talitluse estimateerimisel. Madalpingevõrgus toimuvad skeemimuutusi dispetšisüsteem ei jälgi. Tulemuseks võivad olla keskpinge- võrgu sõlmekoormuste järsud muutused, mida vaadeldakse koormusjuhtumitena. Koormusjuhtumid seonduvad vaid plaaniliste muutustega. Avariijuhtumid siia ei kuulu. Nii nagu põhivõrgu ja jaotusvõrgu vahel kujundatakse jaotusvõrgu jälgitava osa koormused võrgu mittejälgitaval tasemel. Mudeli tegurite täpsustamine erinevate koormusjuhtumite kohta võib toimuda ka võrgu jälgitava osa andmetel.

Operatiivselt mittejälgitava jaotusvõrgu talitluse arvutamine ei erine arvutustest jaotusvõrgu jälgitavas osas. Tegemist on radiaalskeemiga ning vajalik teave koormuste kohta saadakse samalaadsetest koormusmudelitest kui jaotusvõrgu kõrgemal tasemel. Probleeme võib tekkida mudeli estimateerimisel vajalike koormusandmete saamisega. Ometigi toimivad ka mittejälgitavas jaotusvõrgus infosüsteemid, mille kaudu koormusandmeid on võimalik saada. Ennekõike on sellisteks energia kommerts mõõtesüsteem (*energy meter reading, EMR*). Kommerts mõõtmisi tunniandmete tasemel on juba pikemat aega tehtud suuremate elektritarbijate puhul. Väiketarbijate puhul on mõõtmised seni enamasti jäänud kuu- või aastaenergiate tasemele. Viimasel ajal on siiski levinud ka väiketarbijate tunniandmete mõõtmised. Nii on Põhjamaades ja Eestiski seatud eesmärgiks kõigi elektritarbijate tunnikoormuste mõõtmine lähiaastatel muuhulgas selleks, et vaba elektrituru bilansiselgitus oleks õiglane. Koormuste mõõtmine toimub veel kvaliteedimõõtesüsteemides, aga ka sihtotstarbeliste mõõtmistena koormuse tüüpgraafikute saamiseks. Sihtotstarbelised on kontrollmõõtmised, mida korraldab jaotusvõrgu personal. Kontrollmõõtmiste tulemusena saadakse koormusandmeid aasta mõne iseloomuliku päeva ulatuses.

Koormuste üldandmeid ning vajaduse korral ka üksikandmeid (kuu- või aasta-energiad jm) saab kliendiinfosüsteemist.

Jaotusvõrgu talitlust käsitletakse enamasti pikema ajavahemiku kohta, et välja selgitada talitusparameetrite muutumise vahemikud. Võimalik on ka välisõhu temperatuuri, koormuse juhuslikkust ja koormusjuhtumite ning võrgu skeemi varieerida. Talitusarvutuste traditsioonilise korra kohaselt tuleb selleks arvutada erinevatel lähteandmetel suur hulk võrgu seisundeid ja seejärel tulemusi vajalikul viisil töödelda.

Tiheda sõltuvuse tõttu sõlmekoormustest muutuvad võrgu talitusparameetrid samal viisil kui koormusedki. Võib täheldada perioodilisusi, temperatuuri-sõltuvust, stohhastilisust jm. On arusaadav, et talitusparameetrite muutumine on kirjeldatav samalaadse dünaamikamudeliga kui koormuski. Vaja on vaid mudeli parameetreid talitusandmete kohaselt estimeerida.

Estimeerimisel võiks lähtuda talitluse mõõteandmetest ja leida mudeli parameetrid samal viisil kui koormustelegi. Kahjuks ei mõõdetata kaugelki kõiki vaadeldavaid talitusparameetreid. Tähele tuleb panna ka talitusparameetrite võrguvõrrandite kohast seost. Väljapääsuks on talitusparameetrite väärtuste arvutamine (imiteerimine) koormuste kaudu.

Koormusmudelite estimeerimisel (p 5.4.1) käsitletakse mudeli komponente (koordinaate) ja tegureid eraldi. Mudeli komponendid võib estimeerida teatud hulga koormuste kohta ühistena, tegurid on aga enamasti koormusekohased. Kui mõningase ligikaudsusega eeldada, et kõik jaotusvõrgu sõlmekoormused on mingi fiidri osas estimeeritud samas koordinaadistikus, siis on arusaadav, et selles koordinaadistikus on kirjeldatavad ka fiidri talitusparameetrid ning estimeerida tuleb vaid mudeli tegureid.

Mudeli tegurid moodustuvad matemaatilise ootuse, ruuthälbe ja temperatuuri-sõltuvuse normi kujuteguritest. Vaatleme olukorda matemaatilise ootuse korral, mis avaldub kujul

$$E(t, h, l) = \mathbf{M}^T(h) \sum_r (a_{lr} \mathbf{G}_r) \mathbf{N}(t)$$

Kuna eelduste kohaselt koordinaatfunktsioonid $\mathbf{M}(h)$ ja $\mathbf{N}(t)$ ning kujukoordinaadid \mathbf{G}_r on teada (samad, mis koormustelgi), jäävad iga vaadeldava talitusparameetri kohta otsitavaks kujutegurid a_{lr} ($l = 1 \dots NTP$, $r = 0 \dots NSC$). Siin päevatüüpide arv $NTP = 7$ (kui eeldada, et erandpäevakomponente käsitletakse omaette) ja kujukoordinaatide järk $NSC = 10 \dots 12$. Andes ette koormuste matemaatilise ootuse mingil hetkel ning arvutades fiidri talitluse, saab talitusparameetrite matemaatiliste ootuste väärtused vaadeldava hetke kohta. Seega on talitusparameetrite kujutegurite hindamiseks vaja arvutada $NTP \times (1 + NSC)$ fiidri seisundit. Pandagu tähele, et samade arvutuste tulemusena saadakse lähteandmed fiidri kõigi vaadeldavate talitusparameetrite estimeerimiseks.

Lähteandmed, fiidri seisundid, tuleb ilmselt leida momentidel, mil matemaatiline ootus sõltub kõige enam kujuteguritest. Vaadeldava kujuteguri a_{lr} puhul on selleks moment, kus tuletise

$$\frac{d}{da_{lr}} E(t, h, l) = \mathbf{M}^T(h) \mathbf{G}_r \mathbf{N}(t)$$

absoluutväärtus on suurim. Tähistades päevasisest aega h_{lk} ja aastasisest aega t_{lk} ($k = 0 \dots NCS$), võib nüüd koostada lineaarse võrrandisüsteemi kujutegurite leidmiseks päevatüüpide $l = 1 \dots NTP$ kaupa

$$\mathbf{D}_l \mathbf{A}_l = \mathbf{E}_l$$

Siin on \mathbf{A}_l kujutegurite ja \mathbf{E}_l matemaatilise ootuse väärtuste vektor

$$\mathbf{A}_l = \begin{bmatrix} a_{l0} \\ \dots \\ a_{lNCS} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_l = \begin{bmatrix} E(t_{l0}, h_{l0}, l) \\ \dots \\ E(t_{lNCS}, h_{lNCS}, l) \end{bmatrix}$$

ning \mathbf{D}_l maatriks, mille elementideks on

$$d_{lkr} = \mathbf{M}^T(h_{lk}) \mathbf{G}_r \mathbf{N}(t_{lk})$$

Pöörame tähelepanu sellele, et maatriks \mathbf{D}_l sõltub üksnes mudeli koordinaatidest, sest ka iseloomulikud momendid h_{lk} ja t_{lk} on määratud koordinaatide alusel. Seetõttu on maatriks \mathbf{D}_l , mida võib nimetada mudeli koordinaatmaatriksiks, aluseks kõigi talitusparameetrite kujutegurite estimateerimisel.

Talitusparameetrite ruuthälve ja norm on mudelis kirjeldatud matemaatilise ootusega analoogne, vaid kujutegurite a_{lr} asemel on vastavalt tegurid b_{lr} või c_{lr} . Kokku võttes on jaotusvõrgu talitluse modelleerimiseks vaja esmalt estimateerida koormusmudelid fiidrikohastes koordinaatides. Seejärel tuleb imiteerida koormusi iseloomulikel hetkedel, arvutada iga fiidri kohta umbes 200 seisundit ning hinnata talitusparameetrite dünaamikamudeli tegurid. Kuna fiidri talitluse arvutamine ei nõua märkimisväärset arvutiressurssi, siis ei ole ka jaotusvõrgu talitluse modelleerimisel ette näha arvutustehnilisi piiranguid. Tõsi, eeltoodu kehtib jaotusvõrgu talitluse kohta, mis on leitud etteantud tingimuste kohaselt. Arvesse võetakse koormusjuhtumid, võrgu skeem, pinge ja reaktiivvõimsuse regulaatorite sätteid jm. Mainitud tingimuste muutumisel tuleb modelleerimist korrata, mis suurendab arvutuste kogumahtu.

Modelleerimine pakub talitusparameetrite käsitlemiseks samalaadseid võimalusi kui koormuste korral. Etteantud tingimustel on võimalik talitusparameetrid prognoosida, analüüsida ja imiteerida. Tulemused saadakse mis tahes ajavahemiku kohta, mitte ainult üksikute seisundite kaupa nagu traditsioonilistes arvutustes. Talitusparameetrite modelleerimist võib rakendada ka valikuliselt näiteks võimsusvoo kirjeldamiseks fiidri mõnes huvipakkuvas lõikes.

Talitluse seire realiseerimiseks on vaja rakendusprogramme. Koormuste käsitlemiseks võib muidugi koostada autonoomseid programme ning koormus-

näitajaid edastada talitusprogrammidesse lähtefailide kaudu. Otstarbekam on nii koormuse kui jaotusvõrgu talitluse seire sama programmi piirides integreerida. Eeskujuks võib tuua programmpaketi *Xpower*, kus, tõsi küll, käsitletakse koormusi lihtsustatud mudeli alusel.

KOOPIA