

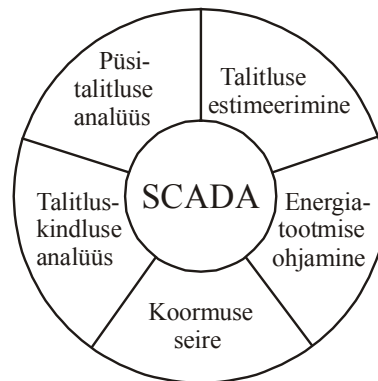
7 Põhivõrgu juhtimise tugi

Elektrivõrgu operatiivjuhtimisel lahendatavad ülesanded on matemaatiliselt küllaltki elementaarsed ega nõua keerulisi arvutusi. Elektrivõrgu talitluse analüüsimiseks ning selle töökindluse, ökonoomsuse ja elektrienergia kvaliteedi tagamiseks vajalikud keerukad arvutused tehakse talitluse planeerimisel vallastöötlusena. Planeeritud talitlust püütakse operatiivjuhtimise käigus realiseerida. Kuna aga tegelikkus kaldub alati kõrvale prognoosidest (koormuse hälbed, avariid, ilmastikuolud jm), tuleb arvutusi operatiivjuhtimise ajal korrata või planeeritud talitlust korrigeerida. Programmikompleksi, mis toetab põhivõrgu juhtimist, nimetatakse **talitluse tugisüsteemiks** (*Energy Management System, EMS*)

Talitluse tugisüsteemi funktsioone:

- püsitalitluse analüüs
- talitluse estimeerimine
- talitluskindluse analüüs
- energiatootmise ohjamine
- koormuse seire.

Joonisel 7.1 on mainitud tegevusi kujutatud skemaatiliselt. Olenevalt olukorrast võib dispetšisüsteemi (*SCADA*) lugeda üheks energia ohjesüsteemi komponendiks või iseseisvaks kompleksiks. Igal juhul on nendevaheline tihe side elektrivõrgu operatiivjuhtimisel vältimatu.



Joonis 7.1 Talitluse tugisüsteem

7.1 Püsitalitluse analüüs ja estimeerimine

7.1.1 Püsitalitluse arvutamine

Talitluse all mõistetakse protsessi – süsteemi **seisundite** ajalist järgnevust. Talitlust iseloomustavad **seisundiparameetrid** (pinge, pingvektorite nurk, võimsusvoog, vool, koormus, genereeriv võimsus jne), mis talitluse käigus lähevad ühest seisundist teise. Talitluse analüüsil rakendatakse alati ühe kindla ajahetke, s.t seisundi arvutusmeetodeid. Talitluste liigitus sõltuvalt seisundiparameetrite muutumise kiirusest ja ulatusest on järgmine.

- *Püsitalitus*. Seisundiparameetrid muutuvad suhteliselt väikestes piirides ja suhteliselt aeglaselt. Siia kuuluvad normaal-, kriitilised ja avariijärgsed talitlused. Elektrisüsteem viibib põhilise osa ajast püsitalitluses. Kuna püsitalitluses võib seisundiparameetreid lugeda suhteliselt pika aja jooksul konstantseks, siis räägitakse püsitalitluse analüüsi asemel sageli püsiseisundi analüüsist.

- *Siirdetalitlust* iseloomustab parameetrite kiire muutumine suurtes piirides. Siirdetalitlustest pakuvad praktilist huvi avariitalitlused kui raskeimad. Avariitalitluste kestus on suhteliselt lühike.

Püsiseisundite arvutus on üks sagedamini sooritata vaid arvutusi energiasüsteemi talitluse juhtimisel ja analüüsil, hõlmates 50...60 % operatiivarvutuste kogumahust. Püstalitlust arvutatakse nii iseseisvalt kui teiste ülesannete (talitluse optimeerimise, talitluskindluse analüüsi, staatilise stabiilsuse analüüsi) koostisosana. Tal on oluline koht planeerimis- ja projekteerimisarvutustes. Püsiseisundite arvutuse rakendusi on kirjeldatud tabelis 7.1.

Tabel 7.1 Püsiseisundite arvutamise eesmärgid

Rakendus	Kirjeldus
Talitluse planeerimine	Seisundi lubatavuse kontroll ja viimine lubatud piirkonda
Talitluskindluse (häiringute) analüüs	Liinide, trafode ja generaatorite väljalülitimise mõju uurimine häiringute analüüsi käigus
Pinge ja reaktiivvõimsuse analüüs	Pinge reguleerimis- ja kompenseerimisseadmete efektiivsuse analüüs
Edastusvõime analüüs	Süsteemidevaheliste sidemete edastusvõime ja vahetusvõimsuse analüüs
Talitluse optimeerimine	Seisundi lubatavuse kontroll ja viimine lubatud piirkonda optimeerimisülesande koostisosana
Staatilise stabiilsuse analüüs	Raskendatud seisundi arvutus stabiilsuse analüüsi koostisosana
Sidusjuhtimine, talitluskindluse tõstmine	Korrigeerivate meetmete analüüs häiringute mõju leevendamiseks
Kadude analüüs	Seisundiparameetrite arvutus võimsus- ja energiakadude hindamiseks
Projekteerimine ja arengu planeerimine	Võimsuse jagunemise, pingeniivoode ja pingelangude arvutus

Seisundiparameetrid võib sõltuvalt konkreetsest ülesandest jagada

- sõltumatuteks ehk antud parameetriteks
 - juhitud parameetrid (nt genereerivad võimsused, pinged)
 - mittejuhitavad parameetrid (nt koormused)
- sõltuvateks ehk otsitavateks parameetriteks.

Sõltuvate parameetrite koosseis on ülesandest ja võib olla üsna suur (pingemoodulid ja -nurgad, aktiiv- ja reaktiivvõimsusvood elementide alguses ja lõpus, vool elementides, aktiiv- ja reaktiivvõimsuskad elementides, pingelangud elementides jne).

Erilisel on kohal suurused, mis on arvutatavad ainult elektrivõrguvõrrandite süsteemi lahendamise teel ja mille alusel leitakse ülejäänud sõltuvad parameetrid. Nimetame neid **seisundi põhiparameetreiks**. Olles arvutanud põhiparameetrid, on muud sõltuvad parameetrid arvutatavad lihtsate elektrotehnikas tuntud seoste (Ohmi seaduse, Kirchhoffi seaduste jne) abil. Seega on enamiku võrguülesannete lahendamisel põhiprobleem, kuidas arvutada seisundi põhiparameetrid, mille koosseis sõltub lahendamiseks valitud võrguvõrranditest (ka vastupidi – põhiparameetrite valik määrab võrguvõrrandid).

Talitluse arvutamisel on tüüpiline olukord, kus etteantud sõlmekoormuste, genereerivate võimsuste ning toitesõlmede etteantud pingetaseme juures on vaja leida ülejäänud sõlmede pinged, aktiiv- ja reaktiivvõimsuse vood ning voolud liinides ja trafodes, võrgukaod jm seisundiparameetrid. Matemaatiliselt taandub talitluse arvutamine kõrget järku mittelineaarse algebralise võrrandisüsteemi lahendamisele. Lisaks võrrandisüsteemi lahendusmeetodi valikule kerkib esile rida probleeme, nagu lahendi olemasolu, lahendite kvaliteet (missugusel mitmest võimalikust lahendist on füüsikaline mõte), võrrandite struktuuri kvaliteet (võrrandisüsteemi tingitus), võrrandite hõredus.

Talitluse arvutused nõuavad süsteemi esitust matemaatilise mudelina, milleks on võrgu ekvivalentse aseskeemi kohta koostatud elektrivõrgu võrrandid. Elektrivõrgu aseskeem koostatakse tema elementide aseskeemidest. Elektrivõrgu elemendid võib jaotada passiivseteks ja aktiivseteks.

- Passiivseteks elementideks on elektriliinid, trafod, põikreaktorid ja -kondensaatorid. Vahel võib võrk sisaldada ka selliseid elemente nagu pikireaktoreid ja -kondensaatoreid, alalisvoolu ülekandeid muundusjaamadega jm.
- Aktiivseteks elementideks on genereerivad allikad (generaatorid ja sünkroonkompensaatorid) ning koormused.

Ühendades passiivsete elementide aseskeemid võrguskeemi kohaselt ning tehes vajalikud lihtsustused (rööpjuhtivuste kokkuliitmine, sõlmvõimsuste leidmine jne), saadakse elektrivõrgu aseskeem, mis koosneb sõlmedest ja neid ühendavatest harudest ning sõlmvõimsustest. Harusid sõlme ja maa vahel nimetatakse põikharudeks, harusid sõlmede vahel aga pikiharudeks.

Tänapäeval on üldlevinud võrguvõrranditeks **sõlmepingevõrrandid** võimsuste balansi kujul (edaspidi **sõlmvõrrandid**). Seisundi põhiparameetriteks on pingemoodulid ja -nurgad sõlmedes. Otsitavaks on niisiis kompleksuurused $\underline{U}_i$ ($i = 1, \dots, n$), kus n on sõltumatute sõlmede arv. Arvutuskiiruse huvides on eelistatav kompleksvõrranditelt üle minna reaalsele. Siis on otsitavateks $2n$

reaalset muutujat¹, mille leidmiseks tuleb lahendada $2n$ võrrandist koosnev süsteem.

Sõlmevõrrandite üldkuju on järgmine:

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

$$Q_i = -U_i^2 B_{ii} + U_i \sum_{j \in \bar{u}(i)} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad i = 1 \dots n$$

kus P_i ja Q_i – sõlme summaarne aktiiv- ja reaktiivvõimsus,

U_i ja δ_{ij} – sõlme pingemoodul ja pingetevaheline nurk ($\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$),

G_{ij} ja B_{ij} – üldistatud sõlmejuhitavused.

Võrguvõrrandid võib esitada üldistatult kujul

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \mathbf{f} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\delta} \\ \mathbf{U} \end{bmatrix}$$

kus

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\delta} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix}$$

Tabel 7.2 Elektrivõrgu aseskeemi sõlmede tüübid

Sõlme tüüp	Sõlme iseloomustus	Antud	Otsitavad
Generaator-sõlm ehk PU-sõlm	Elektrijaamad, reaktiivvõimsuse allikad	$P_i, U_i,$ Q_i^-, Q_i^+	δ_i, Q_i
Tugisõlm	Sagedust või vahetusvõimsust reguleeriv jaam, jaotusvõrgu toitealajaam	$\delta_b = 0, U_b$ Q_b^-, Q_b^+	P_b, Q_b
Koormus-sõlm 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 koormussõlme erijuhtum)	$P_i = 0, Q_i = 0$	δ_i, U_i

¹ Kuna ühe sõlme pingemoodul ja -nurk tuleb ette anda, on sõltumatuid muutujaid tegelikult $2(n-1)$. Selle ja muud üksikasjad jätame siinkohal tähele panemata.

Jäiksõlm	Sageduse või vahetusvõimsuse reguleerimises osalev jaam, jaotusvõrgu toitealajaam	$\delta_i, U_i, Q_i^-, Q_i^+$	P_i, Q_i
----------	---	-------------------------------	------------

Asjaolu, et seisundi põhiparameetrite alusel saab leida ülejäänud seisundiparameetrid, võib kirja panna järgmiselt:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x})$$

kus $\mathbf{z}$ – seisundiparameetrite vektor,

$\mathbf{x}$ – seisundi põhiparameetrite (nt sõlmepingete) vektor,

$\mathbf{h}(\mathbf{x})$ – Kirchhoffi seadustest tulenevate võrguvõrrandite vektorfunktsioon.

Kui aseskeemi harusid iseloomustavad enamasti vaid juhtivused (trafodel ka ülekandetegurid), siis sõltuvad sõlmedes etteantud ja otsitavad suurused sõlme tüübist (tabel 7.2). Võrrandisüsteemi määratlemiseks on vajalik üks sõltuv ehk tugisõlm, mille jaoks on teada pingemoodul ja -nurk, genereeritav aktiiv- ja reaktiivvõimsus on aga määratud võimsuse balansiga.

Kuna võrguvõrrandid on mittelineaarsed, lahendatakse nad iteratiivsetel meetoditel, lineariseerides võrrandid igal iteratsioonil. Üks lihtsamaid on **Gaussi-Seideli** meetod. Tänapäeval on siiski kõige efektiivsemaks tunnustatud **Newtoni-Raphsoni** meetod ja selle modifikatsioonid ning seetõttu on need ka kõige enam levinud. Newtoni-Raphsoni meetodi kohaselt saadakse lahend järjekordsel iteratsioonil seosest

$$\begin{bmatrix} \delta^{(k+1)} \\ \mathbf{U}^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ \mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(k)} \\ \Delta \mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix}$$

kus parandused $\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(k)} \\ \Delta \mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix}$ leitakse lineaarvõrrandisüsteemi

$$\mathbf{A}(\delta^{(k)}, \mathbf{U}^{(k)}) \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(k)} \\ \Delta \mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} - \mathbf{f} \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ \mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix}$$

lahendamisel

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(k)} \\ \Delta \mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix} = (\mathbf{A}(\delta^{(k)}, \mathbf{U}^{(k)}))^{-1} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} - \mathbf{f} \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ \mathbf{U}^{(k)} \end{bmatrix} \right)$$

Siin $\mathbf{A}(\delta^{(k)}, \mathbf{U}^{(k)}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \delta} \\ \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{U}} \end{bmatrix}_{\delta = \delta^{(k)}, \mathbf{U} = \mathbf{U}^{(k)}}$ on võrrandisüsteemi osatuletiste maatriks ehk

jakobiaan

$$\mathbf{A}(\delta, \mathbf{U}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \delta} & \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{U}} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \delta} & \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{U}} \end{bmatrix}$$

Tänapäeval kasutatakse Newtoni-Raphsoni meetodi modifikatsioone, eriti nn **kiiret lõhestatud meetodit**, mis lihtsustuste tõttu kindlustab arvutuse kiire koonduvuse tunduvalt väiksema arvutuste mahu juures.

Radiaalvõrkude püsitalitluse arvutus konventsionaalse Newtoni-Raphsoni või kiirel lõhestatud meetodil ei ole efektiivne. Otstarbekam on rakendada lihtsat kahekäigulist iteratsiooniprotsessi, mille vastukäigul arvutatakse võimsuskaod ja võimsusvood liinides, alustades fiidri lõpust, pärikäigul aga arvutatakse pinge sõlmedes, alustades toitealajaama lattidest, kus pinge on teada. Kuna jaotusvõrkudes on liini otsasõlmede pingevektorite vaheline nurk väike, siis nurki tavaliselt ignoreeritakse ja pinge sõlmedes arvutatakse pingekao alusel.

Kuna jaotusvõrgud on välja ehitatud suletud võrkudena, tekib mõnikord vajadus suletud võrgu arvutuseks (nt optimaalsete lahutuskohdade leidmisel). Siis on kasutatavad konventsionaalsed suletud võrkude arvutusmeetodid – Gaussi-Seideli või Newtoni-Raphsoni meetod. Kiire lõhestatud meetod jaotusvõrkudele ei sobi, sest nendes pole täidetud üks meetodi põhieeldusi, et võrgu elementidele $X/R \gg 1$. Siiski on ka jaotusvõrkudele välja töötatud rida lõhestatud algoritme.

Püsitalitluse arvutustes eeldatakse enamasti, et kolme faasilise süsteemi talitus on sümmeetriline ning pinge ja vool muutuvad siinuseliselt. See võimaldab kolme faasilise süsteemi analüüsil piirduda ühe faasi suurusetega ning esitada süsteem ühejoonelise aseskeemina. Tulemused on laiendatavad kõigile kolmele faasile. Siiski võib vahel esineda ka mittesümmeetriline talitus ning tekkida vajadus selle arvutamiseks. Mittesümmeetria põhjusteks võivad olla mittetäisfaasiline talitus (kõrgepingeliinide rikete või remontide korral), mittesümmeetriline koormus (võimsad ühefaasilised tarbijad, nt kaarahjud), võrgu mittesümmeetrilised elemendid (nt transponeerimata või puuduliku transpositsioonitsükliga elektriliinid).

Mittesümmeetrilise seisundi arvutuse võib teha faasisuurustes, kuid laiemalt on kasutusel **sümmeetriliste komponentide meetod**, mille puhul kolme faasiline mittesümmeetriliste suuruste süsteem esitatakse kolme sümmeetrilise komponendi, pari-, vastu- ja nulljärgnevuskomponendi summana. Üldjuhul ei ole sümmeetriliste komponentide meetod vähem tõõmahukas kui arvutus faasikoordinaatides, kuid tal on suuri eeliseid praktiliselt olulisel juhul, kus elektrivõrk ja tema elemendid on sümmeetrilised, s.t kui mittesümmeetria on tingitud ainult koormusest.

Kui võrku lülitatud tarbijate hulgas on palju türistoralaldeid või muid mittelineaarse voltamperkarakteristikuga tarviteid, muutub voolu ja pinge kuju märgatavalt erinevaks siinuselisest, s.t voolu ja pinge kõverad sisaldavad

kõrgemaid harmoonikuid. Mittesiinuselise talitluse arvutus toimub **superpositsiooni printsiibil** – seisund saadakse erinevatele harmoonikutele vastavate seisundite summeerimisel. Mingile antud harmoonikule vastavad võrguvõrrandid on siinuselise talitluse võrrandid.

7.1.2 Talitluse estimeerimine

Elektrivõrgu operatiivjuhtimiseks vajalikud andmed saadakse enamasti andmehõive ja andmeedastussüsteemide vahendusel. Sel teel hangitud (mõõte)andmed võivad sisaldada küllaltki suuri vigu või on andurite, sidekanalite jne 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 võimsuslülite asendisignaalide võrdlemine jne. Eeltöötlus aitab selgitada ka võrgu konfiguratsiooni ning esile tuua muid talitlusega seotud seiku.

Suurema usaldusväärsusega andmete saamiseks on mõõtetulemusi vaja **estimeerida**. Estimeerimine tähendab elektrivõrgu matemaatilisel mudelil baseeruvat andmete käsitlemist, mille eesmärk on puhastada mõõtetulemused vigadest ja suurtest häiretest ning arvutada (hinnata) mõõtmata jäänud suurusi. Olenevalt elektrisüsteemi talitluse dünaamika arvestamise tasemest eristatakse **staatilist estimeerimist**, mis toimub ühe ajahetke andmete alusel, ja **dünaamilist estimeerimist**, mis kasutab ära ka varem saadud tulemused, ning nende vahevormi – **jälgivestimeerimist**.

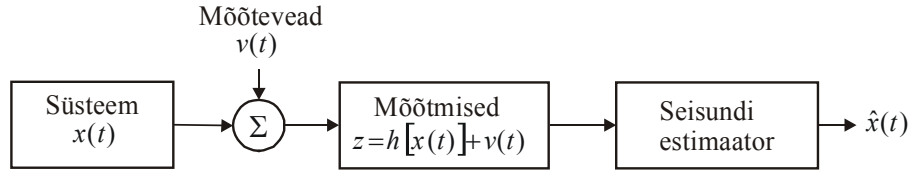
Staatilise estimeerimise eesmärk matemaatilises mõttes on leida oleku põhiparameetrite vektori $\mathbf{x}$ hinnang $\hat{\mathbf{x}}$, minimeerides jääkide vektorit

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

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

$\mathbf{x}$ – seisundi põhiparameetrite vektor, mille komponentideks on pingete nurgad 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 estimeerimist illustreerib joonis 7.2.



Joonis 7.2 Seisundi estimateerimise protseduur

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

$$\mathbf{J}(\hat{\mathbf{x}}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})]^T \mathbf{Q}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})] = \min$$

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 konstant.

Esitatud tingimusele vastab mittelineaarne vektorvõrrand

$$\nabla \mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \mathbf{x}} = 2 \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}) \mathbf{Q}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})] = 0$$

kus

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

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 nn kasvumaatriks ja $\mathbf{b}$ vabaliikmete vektor. Lineariseerides funktsiooni $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ punktis $\mathbf{x}^{(k)}$ Tayloriga 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 tehtud mingi sõltuvuse $y = f(x)$ $m = 6$ mõõtmist ja saadud tulemuseks andmed $x_i, \tilde{y}_i$ ($i = 1, \dots, 6$). Samuti olgu teada, et seda sõltuvust kirjeldab ruutfunktsioon

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$$

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

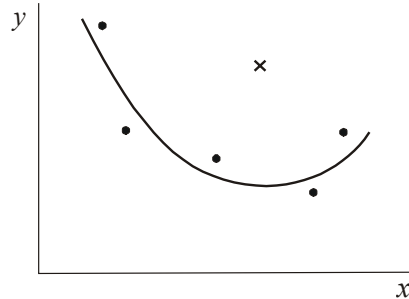
$$S = \sum_{i=1}^m [\tilde{y}_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2)]^2 = \min$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_j} = 2 \sum_{i=1}^m [\tilde{y}_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2)] x_i^j = 0, \quad (j = 0, \dots, 2)$$

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

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

Näidet illustreerib joonis 7.3. Siin on üks mõõtetulemustest (joonisel tähistatud $\times$ -ga) osutunud mittesobivaks. (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 andmeliigsus, mis iseenesest on estimateerimisel hädavajalik, ei taga veel usaldatavaid tulemusi. Kui kõik m mõõtmist oleksid tehtud kitsas x -telje vahemikus (vastab elektrivõrgu talitluse halvale vaadeldavusele), võinuks estimateerimise tulemused olla hoopis teised.



Joonis 7.3 Ruutfunktsiooni estimateerimine

Staatilisel estimateerimisel lähtutakse ainult ajahetke andmetest. Kasutamata jäävad nii varasemad andmed kui estimateerimistulemused. Varasemate andmete ärakasutamine tähendaks dünaamilist estimateerimist, mis eeldab süsteemi talitluse dünaamikamudeli olemasolu. Staatilise ja dünaamilise estimateerimise vahevormiks on jälgiv estimateerimine, mis põhineb eeldusel, et olekvektor $\mathbf{x}$ muutub kahe järjestikku ajaintervalli vahel vähe. Kuigi jälgiv ja dünaamiline estimateerimine on põhimõtteliselt täiuslikumad kui staatiline estimateerimine, 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 põhimõttelistele 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 olukorra kohaselt. Elektrivõrgu jooksva skeemi koostamine on **konfiguraatori** ülesanne. Konfiguraator on algoritm, mis telesignaali ja käsitsi sisestatud info alusel koostab võrgu jooksva skeemi, kontrollides seda telemõõtmiste järgi. Efektiivne konfiguraator põhineb võrgutopoloogia loogilisel käsitlemisel. Võrguvõrrandite lahendamise põhiliseks arvutuslikuks probleemiks on kasvumaatriksi $\mathbf{G}$ suured mõõtmised 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 nn 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 nn kriitilised mõõtmised, s.o mõõtmised, mille eemaldamine mõõtesüsteemist muudab süsteemi mittevaadeldavaks.

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

Peale halbade andmete detekteerimist ja identifitseerimist tuleb need eemaldada ja korrata estimeerimist või asendada enne estimeerimisprotsessi jätkamist arvatavalt sobiva väärtusega. Esimesel juhul koostatakse uuesti kasvumaatriks, kusjuures halveneda võib selle tingitus või süsteem osutub mittevaadeldavaks. Halvad andmed saab asendada **pseudomõõtmistega**, mille all mõistetakse seisundiparameetrite prognoositud väärtusi. Pseudomõõtmiste kasutamine väldib mõõtmiste eemaldamisest põhjustatud raskusi.

7.1.3 Talitluse arvutusprogrammid

Nüüdisaegsed püsiseisundite arvutusprogrammid püüavad automaatselt tagada ka seisundi lubatavuse, s.t koondumise lahendiks, mille puhul on täidetud kõik kitsendused või vähemalt enamik neist.

- Sõlmedes, milles reguleeritakse pinget (tugisõlm või koormussõlm), antakse ette pinge lubatud kõrvalekalded. Kui võrrandisüsteemi lahendamise mingil

iteratsioonil on pinge piiridest väljas, muudetakse lähima reguleeritava trafo astet seni, kuni pinge on taas lubatud piirides.

- Generaatorsõlmedes antakse ette aktiiv- ja reaktiivvõimsuste piirid. Kui mõne generaatori reaktiivvõimsus ületab etteantud piiri, siis fikseeritakse reaktiivvõimsus sellel piirväärtusel ja seda sõlme käsitletakse edaspidi kui koormussõlme, mille pinge on muutuv.
- Kui etteantud piiri ületab aktiivvõimsus, jagatakse liigne võimsus ülejäänud generaatorite vahel.
- Kui pinge või reaktiivvõimsus ei ole ettenähtud piirides, vaatamata eespool mainitud abinõudele, muudetakse kondensaatorpatareide ja reaktiivvõimsuse kompensaatorite lülitusi saavutamaks vastuvõetav tulemus.
- Ühendsüsteemis püüab iga alamsüsteem hoida vahetusvõimsust etteantud tasemel. Kui vahetusvõimsus on kaldunud ettenähtust kõrvale, tuleb seda hiljem muuta tagamaks energiyavahetuse ettenähtud tase.

Operatiivpersonal (dispetšerite) tarvis koostatakse sageli talitluse arvutamise eriprogramm (*operator load flow*), mille võimalused on küll piiratud kui talituse planeerimisel kasutatavatel programmidel, kuid toimivad see-eest kiiremini ja väljastavad operatiivpersonalile vajalikku teavet. Operatiivjuhtimisel kontrollitakse ennekõike elektrivõrgu jooksvat seisundit pinge, voolu ning aktiiv- ja reaktiivvõimsusvoogude lubatavuse (etteantud piirides püsimise) seisukohalt. Kontrollida on vaja ka võimsuslülitite asendit (võrgu skeemi) ja trafoastmeid. Saabuvate seisundite osas on vaja püstitada mitmesuguseid hüpoteese, veendumaks süsteemi töökindluses võimalike häiringute ja muutuste olukorras. Nähakse ette vajalikud meetmed pinge, sageduse ja vahetusvõimsuse reguleerimiseks. Arvutustes lähtutakse talitluse planeeritud väärtustest, võttes arvesse jooksvat seisundit.

7.2 Talitluskindluse analüüs

Kogu elektrisüsteemide eksisteerimise ajaloo vältel on üks tähtsam probleem olnud elektritoite katkematuse kindlustamine. Nüüdisaegne ühiskond on muutunud elektrienergiast sedavõrd sõltuvaks, et ulatuslikumate elektrikatkestuste tagajärjed on võrreldavad loodusõnnetusega. Kuna elektrikatkestused tekivad suuremate või väiksemate häiringute tagajärjel, on nii elektrisüsteemi projekteerimisel kui käidu planeerimisel ja realiseerimisel olnud esmaseks nõudeks tagada elektrivarustuse häiringukindlus.

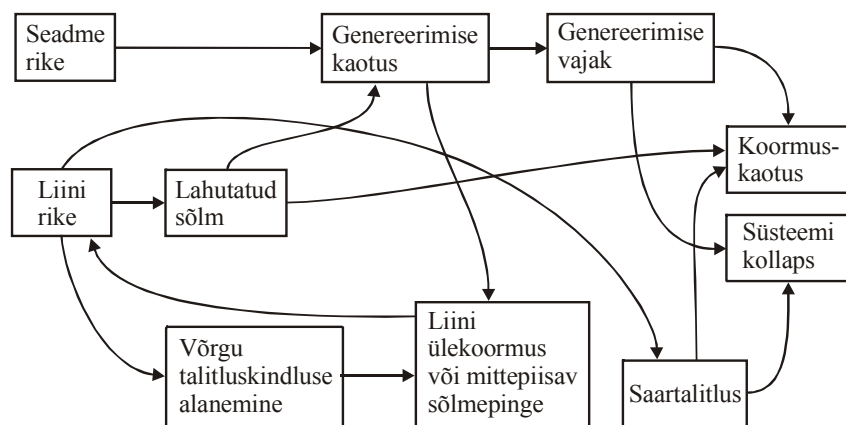
Elektrisüsteemi **talitluskindluse** all mõistetakse süsteemi võimet vastu seista ettenägematutele, kuid tõenäolistele häiringutele vähimate toitekatkestustega ja vähima kvaliteedi halvenemisega. Häiringu all mõistetakse siin elektrisüsteemi mõne põhielemendi – elektriliini, trafo või generaatori väljalülitumist. Tähele tuleb panna ka võimalikke väiksemaid häiringuid, näiteks elektrisüsteemi koormuse ettenägematut kasvu.

Püsitalitluse talitluskindlus on olukord, kus peale häiringut ja järgnevaid siirdeprotsesse ning automaatikaseadmete toimet kujuneb välja normaaltalitus. Seega võivad normaaltalitluse tingimused (parameetrite lubatud piirid) olla rikutud ainult lühikeseks automaatikaseadmete korrigeeriva tegevuse ajaks. Kui korrigeeriv tegevus polnud võimeline kujundama normaaltalitlust, on häiringueelne seisund mittetalitluskindel. Siirdetalitluse häiringukindluseks nimetatakse olukorda, kus siirdeprotsessis säilib talitluse stabiilsus.

Arengu planeerimisel analüüsitakse elektrisüsteemi töökindlust. Talitluskindlust võib käsitada kui töökindluse analoogi jooksva käidul. Töökindluse analüüsil on teada süsteemi konfiguratsioon ja tema elementide avariide jaotusseadused. Arengu planeerimine seisneb elementide (generaatorite, elektriliinide, trafode) lisamises või elektrivõrgu skeemi muutmises, et tagada töökindlusnõuete täitmine. Kuna planeeritakse ennetavalt, on meetmete rakendamiseks piisavalt aega. Talitluskindluse analüüs seisneb seevastu süsteemi haavatavuse hindamises võimalike häiringute tagajärjel reaalajas. Kuna süsteemi käidutingimused erinevad alati varem planeerituist remondivajaduste, avariiliste väljalülimate ja koormuse muutumise tõttu, on süsteemi käit ja seega ka tema talitluskindlus pidevas muutumises. Talitluskindluse tõstmiseks saab rakendada kiiresti toimivaid meetmeid (võimsuste ümberjaotamine, operatiivreservi kasutuselevõtt, abi naabersüsteemidest jms).

7.2.1 Püsitalitluse häiringuanalüüs

Veendumaks, et elektrisüsteemi talitus ei ole häiringute tagajärjel hädaohus, tuleb uurida süsteemi seisundeid generaatorite, kompensaatorite, liinide ja teiste elementide väljalangemise korral. Joonisel 7.4 on illustreeritud elektrisüsteemi elementide rikete võimalikke tagajärgi.



Joonis 7.4 Rikete tagajärgi

Püsitalitluse häiringuanalüüsi (*contingency analysis*) eesmärk on ennustada püsiseisund, mis kujuneb välja peale selliseid sündmusi (häiringuid) nagu elektriliini, trafo või generaatori väljalülitumine. Väljalülitumine võib olla

- kavatsuslik, s.t tahtlik lülitamine (remondi otstarbel, võimsuste jagunemise või pingelukorra parandamiseks vms)
- sundlülitumine (ülekoormuse korral, et vältida elemendi vigastusi või automaatselt rikete puhul).

Sõltumata väljalülitumise iseloomust ja põhjusest on dispetšeril vaja teada selle mõju talitlusele. Kergem on olukord ettekavatsetud väljalülitamiste puhul, siis on väljalülitatav element teada ning piisab ainult selle väljalülitamise mõju analüüsist. Sundväljalülitumised toimuvad ootamatult ning seetõttu tuleb häiringukindluse analüüsil vaadelda kõikvõimalike väljalülitumiste tagajärgi. Sundväljalülitamiste tõenäosused on väikesed ja sõltuvad ilmastikust. Kuna suurema tõenäosusega toimuvad ühekordsed väljalülitumised, siis üldjuhul piirdataksegi nende analüüsiga. Siiski on rasketes ilmastikuoludes võimalik ka mitme elemendi üheaegne väljalülitumine, eriti kaheaheelaliste liinide puhul. Tavaliselt piirdatakse raskete ilmastikutingimuste korral kahekordsete häiringutega.

Püsitalitluse häiringuanalüüs taandub püsiseisundite arvutusele. Analüüsi põhivahenditeks on püsiseisundi arvutuse kiired meetodid. Kasutusel on ka püsiseisundi ülikiired arvutusmeetodid, mis põhinevad alalisvoolumudelil. Vaatamata meetodite efektiivsusele nõuab häiringute arvestamine siiski mahukaid arvutusi. Näiteks tuleb 300 sõlme ja 500 haruga võrgu häiringukindluse analüüsil töödelda umbes 500 väljalülitumise (häiringu) juhtumit. Isegi kui ühe juhu töötlemine nõuab 0,5 sekundit, on häiringuseeria töötlemise koguaeg 250 sekundit ehk umbes 4 minutit. Arvutusaja vähendamiseks tuleb piirata vaadeldavate häiringute hulka ja ka häiringukindluse analüüsi sagedust.

Häiringute hulka võib piirata käsitsi või automaatselt. Käsitsi piirab dispetšer. Nimelt pole kõik häiringud kriitilised. Tavaliselt teab süsteemi dispetšer kogemuste põhjal hästi, millised potentsiaalsed häiringud võivad põhjustada raskusi. Seega võib ta piirata analüüsitavate häiringute hulka mõistliku väärtuseni. Siiski säilib oht, et kogemused pole piisavad eriti võrgu konfiguratsiooni või koormuste struktuuri hiljutiste muutuste puhul. Kindlam ja objektiivsem oleks automaatne häiringute valiku protseduur.

Üheks automaatse valiku võimaluseks on kasutada tunduvalt kiiremat alalisvoolumudelit, et välja sõeluda häiringud, mille puhul võimsusvood ei ületa kriitilisi piire. Kriitilistele juhtumitele rakendatakse täpsemat vahelduvvoolu analüüsi. Teiseks levinud mooduseks on häiringute reastamine **toimeindeksite** (*performance index*) suuruse järgi. Toimeindeksid hindavad häiringute tõsidust. Toimeindeksitena kasutatakse kõige enam järgmisi:

$$J = \sum_i (U_i - U_{iN})^2 w_k$$

$$J' = \sum_k \left(\frac{P_k}{P_k^+} \right)^2 w_k$$

kus U_i – i -nda sõlme pinge,

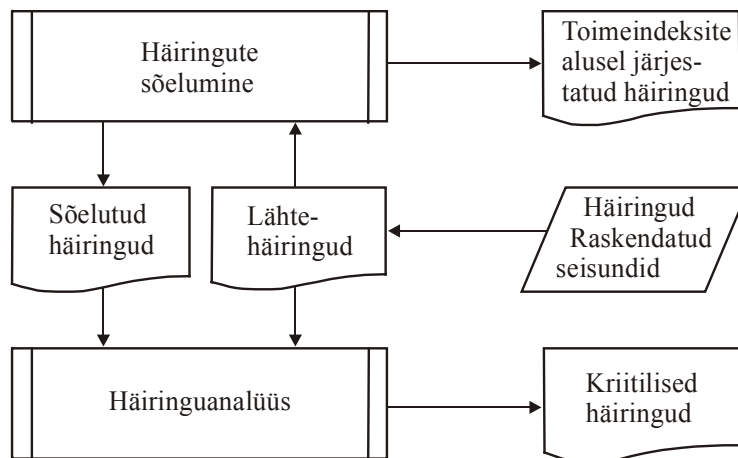
U_{iN} – i -nda sõlme nimipinge,

P_k – k -nda haru aktiivvõimsusvoog,

P_k^+ – suurim lubatud aktiivvõimsusvoog harus k ,

w_i , w_k – kaalutegurid, mis on seotud pinge või võimsusvoo kõrvalekalde või suhtelise tähtsusega sõlmes i või harus k . On välja töötatud efektiivsed meetodid toimeindeksite muutuste hindamiseks erinevate häiringute puhul. Täpsemalt analüüsitakse ainult neid häiringuid, mille toimeindeks ületab kriitilise piiri.

Firma *Siemens* talitluse tugisüsteem *SINAUT Spectrum* sisaldab joonisel 7.5 esitatud häiringukindluse hindamise (*contingency evaluation*) funktsiooni (tegevust), kus alul võimalikest häiringutest sõelutakse toimeindeksite alusel välja need, mis võivad osutuda ohtlikeks (*contingency screening*), ja seejärel analüüsitakse igat juhtumit nende häiringukindluse seisukohalt (*contingency analysis*).



Joonis 7.5 Elektrisüsteemi häiringukindluse hindamine

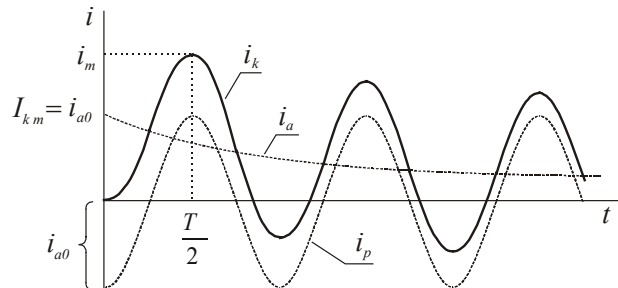
Tavaliselt on elektrisüsteem ühendatud teiste süsteemidega. Normaalselt avaldab häiring süsteemis tugevat mõju süsteemile endale. Siiski on juhtumeid, kus naaber-süsteemi häiring on süsteemis tuntav. Välissüsteemi häiringute mõju on raske ette ennustada, kuna välissüsteemi seire on üldjuhul puudulik. Seisundi estimeerimise tõttu on antud süsteemi võrgutopoloogia, sõlmede pinge, koormus ja genereerivad võimsused reaalajas teada. Väliste süsteemide kohta on sidustalitluses teada vaid vahetusvõimsused, peamiste liinide ja generaatorite staatus ja võib olla ka üksikute

elektrijaamade toodang. Ühendsüsteemi häiringueelse seisundi määramiseks oleks vaja teada kogu ühendsüsteemi püsiseisundit. Kuna aga välise süsteemide seisund pole täies ulatuses teada, tuleb teha lähendusi, mis on põhiliselt kahte tüüpi: ühed põhinevad tundlikkuse analüüsil, teised välise süsteemi ekvivalenteerimisel.

7.2.2 Lühisvoolud

Lühis on avariiline nullväärtusega või nullilähedase näivtakistusega juhtivus vooluahelas kahe või enama normaalselt erineva potentsiaaliga punkti (pooluse) vahel. Lühis vähendab järsult elektri ahela kogutakistust ja põhjustab elektrisüsteemis voolu ohtlikku suurenemist ja pinget ebanormaalselt alanemist. Eristatakse sümmeetrilisi ja ebasümmeetrilisi lühiseid. Sümmeetrilised on kolmefaasilised lühised. Ebasümmeetrilised on kahefaasilised lühised ning ühe- või kahefaasilised maalühised.

Lühis põhjustab elektrisüsteemis siirdeprotsessi, mille käigus lühisvool muutub algväärtusest kuni muutumatu püsilühisvooluni. Lühisvoolu muutumise iseloom sõltub põhiliselt generaatorite parameetritest, võrgu induktiivsusest ja lühisekoha elektrilisest kaugusest generaatoritest. Lühisvool i_k koosneb perioodilisest (sümmeetrilisest) i_p ja aperiioodilisest (asümmeetrilisest) i_a komponendist (joonis 7.6).



Joonis 7.6 Lühisvoolu komponendid

Lühise korral suureneb voolu perioodiline komponent hüppeliselt. Kuna induktiivahelas ei saa vool hüppeliselt muutuda, siis kompenseeritakse perioodilise komponendi hüpet aperiioodilise komponendiga. Suurim perioodilise komponendi hüpe tekib tühijooksul töötanud ahela lühistamisel voolu amplituudhetkel ja võrdub lühisvoolu perioodilise komponendi amplituudiga. Vastav aperiioodilise komponendi algväärtus on $i_{a0} = I_{km}$. Aperiioodiline komponent sumbub eksponentsiaalselt ajakonstandiga $T_a = X/\omega R$

$$i_a = i_{a0} e^{-\frac{t}{T_a}} = i_{a0} e^{-\frac{2\pi f R}{X} t}$$

Mehaanilise vastupidavuse seisukohalt pakub suurt huvi lühisvoolu suurim võimalik hetkväärtus – **löökvool** i_m . Löökvool tekib ligikaudu pool perioodi pärast lühise algust ($t = 0,01$ s) ja avaldub valemiga

$$i_m = I_{km} + i_{a0} e^{-\frac{0,01}{T_a}} = I_{km} \left(1 + e^{-3,14 \frac{R}{X}} \right) = \kappa I_{km}$$

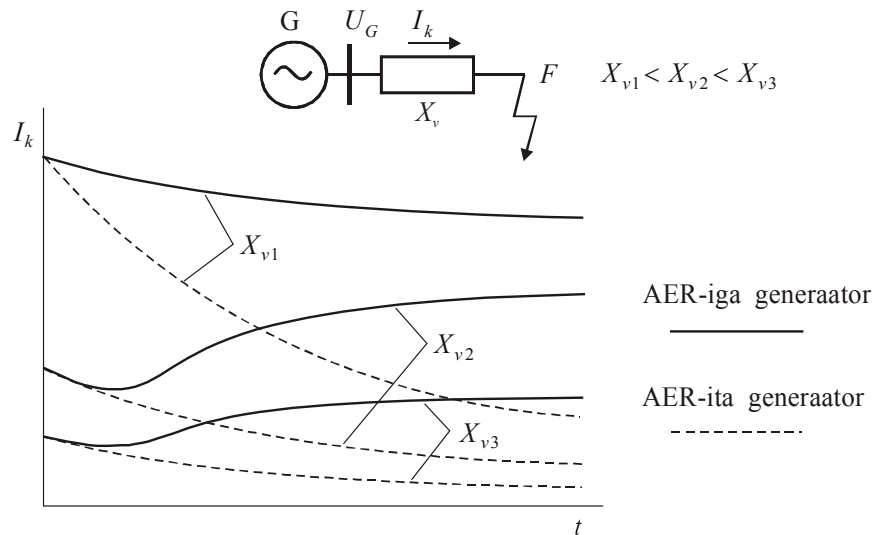
kus κ on löögitegur, mille väärtus on vahemikus $1 \leq \kappa \leq 2$ sõltuvalt ahela induktiivsusest. Puhtinduktiivses ahelas ($r = 0$) $\kappa = 2$ ja puhtaktiivses ahelas ($x = 0$) $\kappa = 1$.

Lühisvoolu perioodilise komponendi käitumine oleneb lühisekoha ja generaatori vahelisest elektrilisest kaugusest. Generaatorist kaugete lühiste korral on generaatori reaktsioon lühisele praktiliselt olematu ja perioodilise komponendi amplituud lühise käigus ei muutu. Lühis generaatori lähedal kutsub aga esile generaatori märgatava reaktsiooni ja perioodilise komponendi amplituudväärtus ei jää ajas konstantseks. Lühis suurendab järsult generaatori staatorivoolu, mille tulemusena suureneb ka staatori tekitatud magnetvoog. Rootori ergutusmähise suure induktiivsuse tõttu ei saa suurenenud staatori magnetvoog kohe tungida ergutusmähisesse, vaid sulgub algul väljaspool ergutusmähist staatori puisteteekonna kaudu. Sel teekonnal on induktiivsus suhteliselt väike ja nii kujunevad generaatoril lühise alghetkel normaalsest tunduvalt väiksemad piki- ja põiksuunalised ülimööduvad takistused x_d'' ja x_q'' . Siirdeprotsessi käigus tungib lühise tekitatud lisamagnetvoog järk-järgult ergutusmähisesse ja generaatori takistused suurenevad kuni tavaliste sünkroonväärtusteni x_d ja x_q . Generaatori takistuste muutumise kohaselt muutub ka lühisvoolu perioodilise komponendi amplituud ja efektiivväärtus ülimööduvast väärtusest I_k'' püsiväärtuseni I_k . Arvestades generaatori reaktsiooniga, teiseneb löökvoolu valem kujule

$$i_m = \kappa \sqrt{2} I_k''$$

Kui lühis paikneb generaatorist kaugel, siis generaator lühisele praktiliselt ei reageeri ja lühisvoolu perioodiline komponent jääb muutumatuks

$$I_k'' = I_k = I_{kt} = \text{const}$$



Joonis 7.7 Lühisvoolu perioodilise komponendi muutumine

Oluliselt mõjutab lühisvoolu perioodilise komponendi muutumist generaatori elektromotoorjõu muutmine automaatse ergutusregulaatori (AER) toimel. AERI üheks põhiülesandeks on normaalse pinge hoidmine generaatori klemmidel. Lühise korral generaatori klemmipinge langeb ja AER hakkab ergutusvoolu suurendamise abil suurendama generaatori elektromotoorjõudu. Elektromotoorjõu suurendamine lõpeb kas normaalse klemmipinge taastamisega või suurima võimaliku ergutusvoolu (lagiergutussvoolu) saavutamise. AERI mõjul kahaneb lühisvoolu siirdeprotsessi käigus vähem (generaatorile eriti lähedased lühised) või hakkab koguni kasvama (suhteliselt kauged lühised). Voolu muutumine peatub ergutuse reguleerimise lõppemisel püsitalitluse saabumisega (joonis 7.7).

Ülimõõduvat lühisvoolu arvutatakse kehtiva IEC-standardi (IEC 60909) kohaselt **Thevenini meetodil**, mille järgi kõik skeemis esinevad elektromotoorjõud asendatakse ühe ekvivalentse lühisepunkti ühendatud elektromotoorjõuga $\underline{E}_{ekv} = jcU_n$. Siin on U_n lühisepunkti nimipinge ja c pingetegur, mille väärtus kesk- ja kõrgepingevõrkudes suurima lühisvoolu leidmiseks on $c = 1,1$. Sünkroongeneraatorid, -kompensaatorid, ja -mootorid ning lühisvoolu oluliselt mõjutavad asünkroonmootorid võetakse arvutamisel arvesse ülimõõduvate näivtakistustega. Asünkroonmootoreid (või mootorite gruppi) arvestatakse, kui mootori (mootorite grupi) osavool ületab 5% kogu lühisvoolust. Kõiki teisi elemente arvestatakse tavaliste näivtakistustega. Täpsema tulemuse saamiseks korrigeeritakse generaatorite, jaamaplokkide ja võrgutrafode takistusi korrigeerimisega. Seejärel leitakse

lühisekoha suhtes ekvivalentne resulteeruv takistus $\underline{Z}_\Sigma = R_\Sigma + j X_\Sigma$. Ülimööduv lühisvool arvutatakse valemiga

$$\underline{I}_k'' = \frac{\underline{E}_{ekv}}{\sqrt{3} \underline{Z}_\Sigma''} = \frac{j c U_n}{\sqrt{3} \underline{Z}_\Sigma''}$$

ja selle absoluutväärtus valemiga

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_\Sigma''}$$

Kesk- ja kõrgepingevõrkudes (mitte kaabelvõrkudes) võib ülimööduva lühisvoolu arvutamisel loobuda aktiivtakistuse arvestamisest, kui resulteeruv reaktiivtakistus on üle kolme korra suurem resulteeruvast aktiivtakistusest $X_\Sigma > 3R_\Sigma$. Sellise lihtsustuse tulemusel tekkiv viga jääb tavaliselt alla 5%.

Löökvool i_m avaldub ülimööduva voolu I_k'' kaudu

$$i_m = \kappa \sqrt{2} I_k''$$

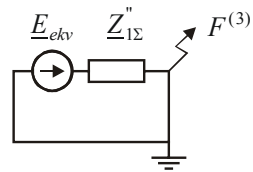
Löögitegurit κ arvutatakse praktiliseks kasutamiseks mugandatud valemiga

$$\kappa = 1,02 + 0,98 e^{-3R/X}$$

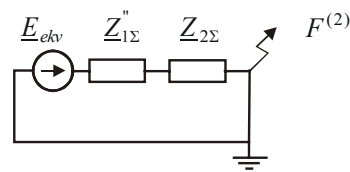
Suhte R/X leidmiseks on olemas erimeetodid. Esimeses lähenduses võib tavaliste kesk- ja kõrgepingevõrkude puhul kasutada löögitegurit $\kappa = 1,8$.

Ebasümmeetriliste lühiste arvutamiseks tuleb lisaks pärijärgnevustakistustele arvestada ka vastu- ja nulljärgnevustakistustega. Vastujärgnevustakistused võib generaatorist kaugete lühiste arvutamisel võrdsustada pärijärgnevustakistustega. Nulljärgnevustakistused erinevad oluliselt pärijärgnevustakistustest. Vastu- ja nulljärgnevustakistused jäävad lühise siirdeprotsessi käigus muutumatuks.

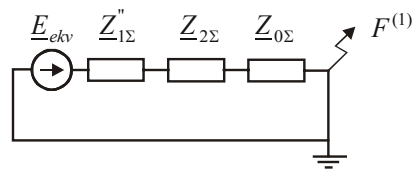
Vastujärgnevusaseskeemi struktuur ei erine pärijärgnevusaseskeemist, kuid nulljärgnevusaseskeemi kuuluvad ainult nulljärgnevusvoolude võimalikele teekondadele jäävad elemendid. Nulljärgnevusaseskeemi struktuur on oluliselt määratud trafode mähiste ühendusviisi ja maandatud neutraalide paiknemisega. Neutraalidesse ühendatud takistused lähevad resulteeruva nulljärgnevustakistuse arvutamisel arvesse kolmekordsena ($3\underline{Z}_N$). Ekvivalentset elektromotoorjõudu rakendatakse vaid pärijärgnevusaseskeemis. Aseskeemide alusel leitakse vastavad resulteeruvad takistused $\underline{Z}_{1\S}''$, $\underline{Z}_{2\S}$ ja $\underline{Z}_{0\S}$. Eri järgnevusega resulteeruvate takistuste omavaheline ühendamine sõltub lühise liigist (joonis 7.8). Nende ühendusskeemide alusel arvutatakse otseselt antud lühise liigi (n) pärijärgnevusvoolu $\underline{I}_{1k}^{(n)}$ (voolab läbi pärijärgnevustakistuse lühisepunkti suunas). Tegelikku lühisvoolu lühisekohas arvutatakse teguri $m^{(n)}$ abil $\underline{I}_k^{(n)} = m^{(n)} \underline{I}_{1k}^{(n)}$.



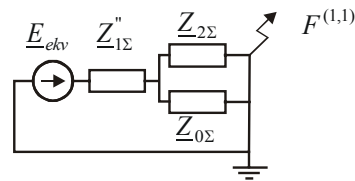
Kolmefaasiline lühis



Kahefaasiline lühis



Ühefaasiline lühis



Kahefaasiline maalühis

Joonis 7.8 Resulteeruvate takistuste ühendamine sõltuvalt lühise liigist

Lühisvoolude arvutatakse põhiliselt projekteerimisetapil elektriskeemide, -aparaatide, -juhtide, releekaitse- ja automaatikaseadmete valikuks ja nende sobivuse kontrollimiseks. Operatiivjuhtimise käigus võib tekkida vajadus kontrollida võimsuslülitite lahutusvõimet, ümber seadistada releekaitse- ja automaatikaseadmeid ning täpsustada tarbijate töötingimusi lühiste korral. Üldjuhul vaadeldakse kolmefaasilisi lühiseid, kuna nende tagajärjed on tavaliselt raskeimad.

7.2.3 Elektrisüsteemi stabiilsus

Stabiilsuse all mõistetakse elektrisüsteemi võimet jätkata normaalset tööd peale talituse häiringuid. Eristatakse **sünkroonset (nurga-)** ja **pingestabiilsust**. Süsteemi

võimet jätkata tööd peale väikesi häiringuid nimetatakse **staatiliseks stabiilsuseks**, peale suuri häiringuid (lühised, põhielementide kommutatsioon jm) **dünaamiliseks stabiilsuseks**. Väikeste häiringute poolt põhjustatud siirdeprotsess võib olla kas aperioidiline või perioodiline. Elektrisüsteemi stabiilsuse klassifikatsioon on joonisel 7.9.

Sünkroonset stabiilsust on võimalik illustreerida **lihtsaima elektrisüsteemiga**, mis koosneb ühest ekvivalentsest generaatorist, ülekandeseadmetest ja lõpmata võimsast energiat vastuvõtvast elektrisüsteemist, mida iseloomustab konstantne pinge U . Sellise süsteemi jaoks on lihtne tuletada seos

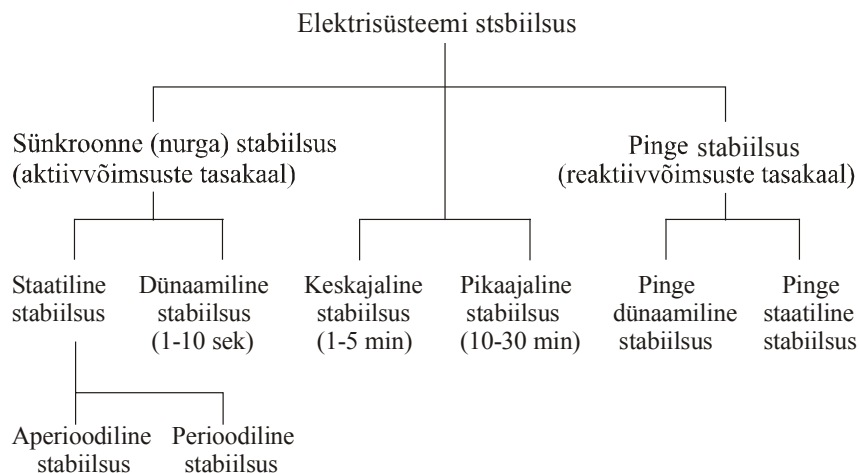
$$P = \frac{EU}{x} \sin \delta$$

kus P – ülekantav võimsus,

E – generaatori elektromotoorjõud,

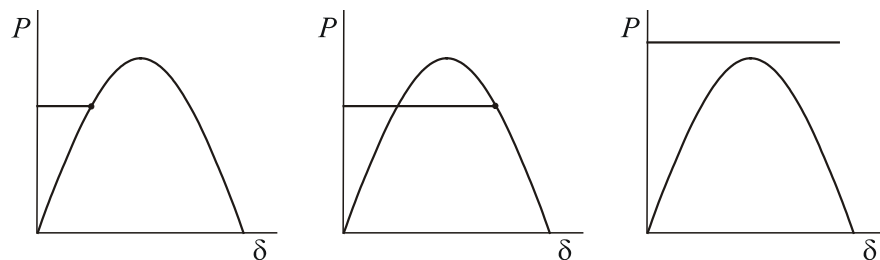
x – summaarne reaktiivtakistus (aktiivtakistusi ei arvestata),

δ – elektromotoorjõu ja pinge vaheline nurk.



Joonis 7.9 Elektrisüsteemi stabiilsuse klassifikatsioon

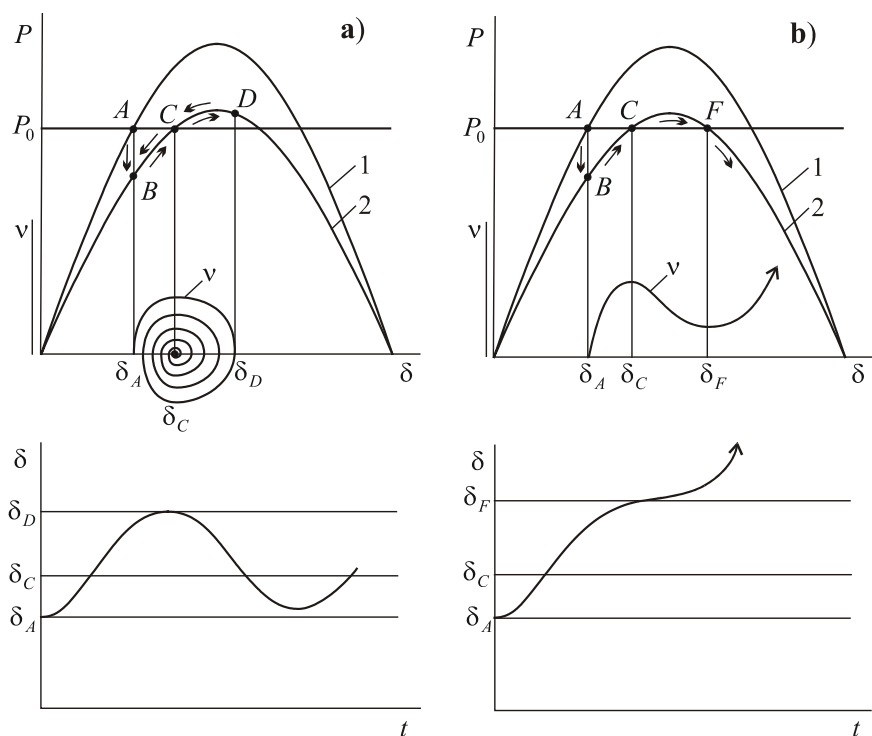
Kui elektromotoorjõud lugeda konstantseks (s.t puudub automaatne ergutuse reguleerimine), annab esitatud seos sõltuvuse $P = f(\delta)$ **nurkkarakteristiku** sinusoidina. Kui samas teljestikus vaadelda ka generaatori karakteristikut, mis ei sõltu nurgast, saame kaks võimalikku tasakaalu- ehk tööpunkti. Kolmandaks võimaluseks on tööpunkti puudumine (joonis 7.10). On lihtne näidata, et stabiilne on vaid vasakpoolne tööpunkt, kus $\delta < 90^\circ$.



Joonis 7.10 Võimalikud tulemused lihtsaima elektrisüsteemi seisundi määramisel

Tulemusi saab üldistada ka keerulisele elektrisüsteemile, kus nagu lihtsaimaski süsteemis võib esineda kolm olukorda:

- seisund on olemas (saab arvutada) ja stabiilne
- seisund on olemas, kuid mittestabiilne
- seisund puudub.



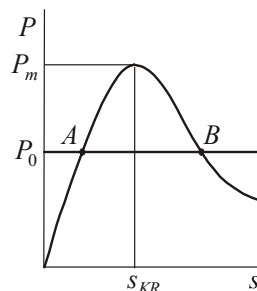
Joonis 7.11 Elektrisüsteemi stabiilne (a) ja mittestabiilne (b) siirdeprotsess

Dünaamilist stabiilsust võib lihtsaimas elektrisüsteemis vaadelda olukorras, kus häiringu tulemusena summaarne takistus suureneb ja nurkkarakteristiku amplituud vastavalt väheneb. Kuna elektromotoorjõu suund ühtib generaatori rootori põik-

teljega, ei saa nurk δ rootori inertsit tõttu hüppeliselt muutuda. Tekib siirdeprotsess, mis sumbub või lõpeb generaatori sünkronismist väljalangemisega (joonis 7.11).

Pinge stabiilsuse üheks alaliigiks on asünkroonkoormuse stabiilsus. Asünkroonmootori karakteristikut võib esitada võimsuse P ja libistuse s funktsioonina (joonis 7.12). Samas teljestikus saab näidata ka töomasina karakteristikut. Nagu lihtsaima elektrisüsteemi puhul saab jällegi kaks tööpunkti, millest vaid vasakpoolne on stabiilne. Karakteristiku maksimum avaldub seosega

$$P_m = \frac{U^2}{2(x + x_v)}$$



Joonis 7.12 Asünkroonmootori karakteristik

kus x on mootori ja x_v väline (mootori ja konstantse pingega lattide vaheline) takistus.

Pinge dünaamiline stabiilsus			Pinge pikaajaline stabiilsus		
Asünkroonmootorite dünaamika		Koormuste juurdekasv			
Gen ergutussüsteemide dünaamika		Trafode astmelülitid			
Turbiinide regulaatorid		Termostaatiline koormus			
Kondensaatorpatareid ja reaktorid	Ergutuse piiramine	Gaasiturbiinide käivit			
Koormuse alapingekaitse		Elektrijaamade operatiivpersonal			
Staat reaktiivvõimsuse allikad		Sageduse reguleerimine			
Gen elektromeh dünaamika		Katelde dünaamika	Liinide/trafode ülekoorm		
Alalisvooluülekanne		Süsteemi dispetšer			
Releekaitse, sh ülekoormuskaitse					
0,1 sek	1 sek	10 sek	1 min	10 min	1 tund

Joonis 7.13 Pingestabiilsuse olukordi

Kuna tegemist on ruutsõltuvusega, põhjustab toitepinge U mõningane vähenemine maksimaalvõimsuse tunduva langemise. Selles olukorras võib uus tööpunkt hoopiski puududa ja mootor seiskub. Pinge stabiilsusega seondub terve rida olukordi, mida on kirjeldatud joonisel 7.13

Näiteid pinge mittestabiilsusest ehk **kollapsist**.

- *Pinge dünaamiline stabiilsus.* Kui võrgupinge mingil põhjusel langeb (näiteks pikaajalisel lühisel), siis asünkroonmootorid pidurdavad ja tarbitav reaktiivvõimsus tõuseb. Tagajärjeks on pinge edasine langus ja teiste asünkroonmootorite pidurdumine, mis võib lõppeda kõikide asünkroonmootorite seiskumise ja pinge kollapsiga. Negatiivselt mõjuvad siis ka reaktiivvõimsust kompenseerivad kondensaatorid, mille võimsus muutub proportsionaalselt pinge ruuduga. Seega väheneb pinge langemisel järsult nende võimsus. Avarii vältimiseks varustatakse asünkroonmootorid alapingekaitsega, mis muist mootoreid pinge tunduval langemisel välja lülitab, võimaldades võrgupingel taastuda. Pinge langus vähendab ka võimsust, mida elektrisüsteemide vahel üle kantakse. Süsteemis, milles on võimsusdefitsiit, põhjustab see sageduse langust. Kui sagedusautomaadid osa koormusest välja ei lülita (nt ei reageeri madala pinge tõttu), kaob sünkroonne stabiilsus. Olukorda raskendab sageduse vähenemisest tingitud elektrijaamade katelde toitepumpade ja sellest põhjustatud turbiinide võimsuse langus. Protsessi kestus on umbes 10 sekundit.
- *Pinge häiringujärgne (keskajaline) stabiilsus.* Kirjeldatud siirdeprotsess võib kulgeda edukalt (ei põhjusta mittestabiilsust), kuid oht pole veel möödas. Kui genereeritav reaktiivvõimsus on häiringu tagajärjel oluliselt langenud (elektrijaama või ülekandeliini väljalülitamise tõttu), on ka koormuse pingetase madal ja trafode astmelülitid püüavad seda taastada. Kuna pingetaseme tõus on võimalik üksnes reaktiivvõimsuse kasvu arvel, on tulemuseks generaatorite ülekoormus nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsuse osas (pinge tõusmisel kasvab ka koormuse aktiivvõimsus). Mõne aja pärast rakenduvad ülekoormuskaitse (sh ergutussüsteemi ülekoormuskaitse), genereeritav reaktiivvõimsus väheneb ning tulemuseks on pinge kollaps, mis releekaitse ja muu automaatika toime tõttu võib haarata osa elektrisüsteemist. Kogu protsess kestab mõni minut.
- *Pinge pikaajaline stabiilsus.* Kui elektrisüsteemi koormuse või ülekantava võimsuse juurdekasv on kiire näiteks hommikuse või õhtuse tippkoormuse ajal, põhjustab see reaktiivvõimsuse defitsiiti, mis nõuab süsteemi dispetšeri sekkumist (täiendavate reaktiivvõimsuse allikate sisselülitamiseks, koormuse osaliseks väljalülitamiseks). Mõne aja möödudes (kümnekond minutit) lülituvad ülekoormatud liinid ja trafod välja ning tulemuseks on süsteemiavarii. Negatiivselt mõjuvad ka seadmed, mis püüavad säilitada tarbitavat energiat (näiteks termostaatilised seadmed).

Elektrisüsteemi stabiilsuse tagamine algab süsteemi projekteerimise ja talitluse pikaajalise planeerimise järgus. Nii mõjub suur genereeriva võimsuse (ka reaktiivvõimsuse) reserv positiivselt kõikidele stabiilsuse liikidele. See on aga kõige kulukam stabiilsuse tagamise moodus. Ka kõrge pingeniivoo hoidmine süsteemis on soodne nii sünkroonse stabiilsuse kui pingestabiilsuse seisukohalt. Kõige efektiivsemad vahendid stabiilsuse tagamiseks on automaadid. Esmane roll staatilise stabiilsuse tagamisel on ergutuse reguleerimisel tugevatoimeliste regulaatoritega ja nn **elektrisüsteemi stabilisaatoritega (PSS)**. Kiiretoimeline releekaitse on

otsustava tähtsusega dünaamilise stabiilsuse tagamiseks. Efektiiwsed on türistorjuhtimisega piki- ja põiklülituses kondensaatorite ja reaktorite regulaatorid. Sellised jõuelektroonikal baseeruvad **türistorjuhitavad kompenseerimisseadmed** (*FACTS*) on eriti perspektiivsed elektrisüsteemi ülekandevõime tõstmisel.

Mainitud abinõud on mõeldud ennekõike sünkroonse stabiilsuse tõstmiseks. Samad vahendid mõjuvad soodsalt ka pingestabiilsusele, seda enam, et neid stabiilsuse liike on sageli raske üksteisest eraldada. Pinge stabiilsusega seotud aeglaste protsesside juhtimiseks (muuhulgas operatiivpersonali poolt) on järgmised vahendid.

- Mobiilseks aktiivvõimsuse reserviks on hüdro- ja gaasiturbiinid, mis normaal- talitluses on välja lülitatud. Nende kiire käivitamine (mõne minuti jooksul) avariiolukorras väldib pinge kollapsi.
- Reaktiivvõimsuse reserv on oluline pingestabiilsuse tõstmise vahend. Kasutada võib nii mehaaniliselt kui elektroonselt juhitavaid kondensaatorpatareisid ning staatilisi reaktiivvõimsuse allikaid. Oluline on hoida reaktiivvõimsuse reservi generaatoritel, kus see on efektiivselt reguleeritav. Probleemiks on, kuidas vältida staatori ja rootori ülekoormuskaitse mittesoovitavat (stabiilsuse seisukohalt enneaegset) tegevust.
- Trafode astmelülitite mõju sõltub sellest, kuhu astmelülitid kuuluvad. Kõrge- pingetrafode astmelülitid säilitavad kõrget pingeniwood ja ka pinge stabiilsust. Jaotusvõrgu trafode astmelülitid püüavad häiringu tõttu langenud koormuse pinget aga tõsta, suurendades põhivõrgus ülekantavat aktiiv- ja reaktiiv- võimsust, mis omakorda kiirendab pinge alanemist. Selle tõttu on jaotusvõrgu trafode astmelülitid soovitatav põhivõrgu pinge languse ajaks blokeerida.
- Alalisvooluülekanne, kuigi tekitab stabiilsuseprobleeme, võib teisalt olla stabiilsuse tagamise vahend. Kui süsteemis on näiteks aktiivvõimsuse defitsiit, võib aktiivvõimsust alalisvooluülekande kaudu kiiresti lisada. Reaktiiv- võimsuse defitsiidi korral saab aga ülekantavat võimsust vähendada, mis vabastab alalisvooluülekandega seotud reaktiivvõimsuse allikad. Alalis- vooluülekandel võivad olla regulaatorid, mis püüavad summutada võnkumisi ja pinge muutusi vahelduvvooluvõrgus. Igal juhul ei edasta alalisvoolu- ülekanne teises süsteemis esinevaid talitluse häiringuid.
- Koormuse juhtimine, mis seisneb tarbijate osalises väljalülitamises alapinge- kaitse või operatiivpersonali poolt, on nii tehniliselt kui majanduslikult efektiivne. Kuigi see põhjustab toite katkestusi, võib väljalülitatavad tarbijad valida nii, et kahju oleks minimaalne. Näiteks elekterkütte, kliimaseadmete jms 5...10 minutiks väljalülitamine ei too kaasa negatiivseid tagajärgi. Teisalt on selline aeg piisav, et teha vajalikke ümberkorraldusi süsteemi talitluses.

7.3 Energia tootmise ohjamine

Püsiseisundite arvutusel on peale võrgu parameetrite ja sõlmede aktiiv- ja reaktiivkoormuste ette antud ka juhitavad parameetrid (elektrijaamade aktiivvõimsused ning pinged generaatorsõlmedes ja tugisõlmes, samuti trafode ülekandesuhted). Ette ei anta neid aga meelevaldselt. Esmaseks tingimuseks on seisundi lubatavuse kindlustamine (kõigi kitsenduste täitmine). Kuid parameetrite lubatud piirkonnas jääb nende väärtuste valikuks küllalt lai diapsoon. Seetõttu tuleks valik teha näiteks võrgukadude miinimumi või summaarsete tootmiskulude miinimumi või mõne kombineeritud kriteeriumi järgi, mis kajastab tootmiskulusid, töökindlust ja arvestab keskkonnakaitsetega.

Traditsiooniliselt lähtutakse ainult majanduslikust, võimsuste ökonoomse jagunemise kriteeriumist. Sellisel lähenemisel arvestatakse genereerivate võimsuste kitsendusi ja aktiivvõimsuskadusid, ignoreeritakse aga kitsendusi pinge ja võimsusvoogude osas. See tähendab, et tegemist on optimeerimise ühe lihtsa erijuhuga – aktiivvõimsuste staatilise (antud seisundi) optimeerimisega.

Staatilise optimeerimise üldjuhtum oleks seisundi kompleksne optimeerimine kõigi juhitavate parameetrite (genereeritavate aktiiv- ja reaktiivvõimsuste, pinge, trafode ülekandesuhte) järgi. Selline ülesanne on aga keerukas ja suure mahuga, mistõttu lahendatakse kahes etapis – esimesel etapil toimub aktiivvõimsuste optimeerimine, teisel etapil aga reaktiivvõimsuste, pinge ja trafode ülekandesuhte optimeerimine. Seda allülesannet nimetatakse **elektrivõrgu püsiseisundi optimeerimiseks**.

Tabel 7.3 Optimeerimisülesannete ajaline hierarhia

Ajanivoo	Juhtimisülesanne	Eesmärk
Sekundid	Võimsuste automaatreguleerimine	Tagada õige sagedus ja vahetusvõimsused
Minutid	Võimsuste jagunemise ja pinge ning trafode ülekandesuhte optimeerimine	Minimeerida tootmiskulud või muud näitajad (saastemäär)
Tunnid	Agregaatide koosseisu optimeerimine, hüdro- ja soojusjaamade koordineerimine	Minimeerida tootmiskulud või muud näitajad
Päevad, nädalad	Hüdro- ja soojusjaamade koordineerimine	Minimeerida tootmiskulud või muud näitajad
Kuud	Remontide optimeerimine, vahetusvõimsuste planeerimine	Minimeerida tootmiskulud, arvestades töökindlust
Aastad	Remontide optimeerimine, tootmise ja vahetusvõimsuste planeerimine	Minimeerida tootmiskulud ja investeeringud, arvestades töökindlust

Tunduvalt keerulisem on dünaamiline ülesanne, s.t optimeerimine üle teatud perioodi. Sel juhul tuleb arvestada selliseid aspekte nagu

- agregaatide optimaalne koosseis
- soojus- ja hüdroagregaatide töö koordineerimine
- elektri ja soojuse koostootmine
- remontide optimaalne planeerimine.

Iga toodud probleemi lahendamiseks on sobivad praktilised ajaintervallid

- agregaatide koosseisu optimeerimisel 48...72 tundi
- soojus- ja hüdrojaamade töö optimeerimisel päev, nädal, kuu, aasta
- remontide optimeerimisel 1...3 aastat.

Optimeerimisülesannete ajaline hierarhia on tabelis 7.3.

7.3.1 Püsitalitluse optimeerimine

Elektrivõrgu püsiseisundi optimeerimine (*Optimal Power Flow, OPF*) seisneb reaktiivvõimsuste, pingete ja trafode ülekandesuhete ja võrgu skeemi optimeerimises. Võrreldes tavalise püsiseisundi arvutusega on optimaalse püsiseisundi arvutamisel kaks põhierinevust:

- juhitavate parameetrite valik mingi kriteeriumi järgi (püsiseisundi tavalisel arvutusel eeldati need etteantuks)
- suure hulga võrratusekujuliste kitsenduste olemasolu genereeritavatele aktiiv- ja reaktiivvõimsustele, liinide ja trafode aktiiv- ja reaktiivvõimsusvoogudele, kontrollisõlmede pingetele, trafode ülekandesuhetele.

Elektrivõrgu püsiseisundi optimeerimise eesmärk on leida kõigi lubatud seisundite hulgast optimaalne, s.t kõigi seisundiparameetrite optimaalsete väärtuste määramine, arvestades tehnilisi kitsendusi. Tähistagu $\mathbf{x}$ seisundi põhiparameetrite (sõlme pingemoodulid ja -nurgad) vektorit, $\mathbf{u}$ aga juhitavate (reguleeritavate) parameetrite (üldjuhul elektrijaamade aktiivvõimsused², generaatorsõlmede pinged ja reaktiivvõimsused ning koormatult reguleeritavate trafode väljavõtted ehk ülekandesuhted) vektorit. Püsiseisundi optimeerimisülesande formuleerimine koosneb kolmest osast – võrrandikujuliste kitsenduste süsteemi koostamisest, võrratustekujuliste kitsenduste koostamisest ja optimeerimiskriteeriumi püstitamisest koos sihifunktsiooni koostamisega.

Võrrandikujulisteks kitsendusteks on püsiseisundi võrrandid (võrguvõrrandid), mis arvestavad ka vahetusvõimsuste kitsendusi

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{0}$$

Iga vektori $\mathbf{u}$ puhul on vektor $\mathbf{x}$ leitav sellest võrrandist püsiseisundi lahendamise teel. Vektori $\mathbf{x}$ alusel leitakse tugisõlme aktiivvõimsus

² Kui elektrijaamade võimsused optimeeritakse eelneval etapil, siis püsiseisundi optimeerimisel ei kuulu nad juhitavate parameetrite hulka, vaid on ette antud, v.a tugisõlme võimsus.

$$P_{G1} = P_{G1}(\mathbf{x})$$

Võrratusekujulised kitsendused

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq 0$$

käivad seisundi põhi-, juhitavate ja väljundparameetrite kohta ning nende ületamine pole lubatud või on lubatud ainult lühikest aega tulenevalt tehnilistest tingimustest. Üldiselt on võrratusekujulised kitsendused (ülaindeksid - ja + tähistavad vastavate suuruste vähimaid ja suurimaid lubatud väärtusi):

- kitsendused genereerivatele aktiivvõimsustele³

$$P_{Gi}^- \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^+, \quad i \in \mathfrak{I}_G$$

kus $\mathfrak{I}_G$ on genereerivate sõlmede indekse hulk

- kitsendused genereerivatele reaktiivvõimsustele

$$Q_{Gi}^- \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^+, \quad i \in \mathfrak{I}_G$$

- kitsendused generaatorsõlmede ja kontrollsõlmede (sõlmedele, mille pinget reguleeritakse koormatult reguleeritavate trafode abil) pingetele

$$U_i^- \leq U_i \leq U_i^+, \quad i \in \mathfrak{I}_U$$

kus $\mathfrak{I}_U$ on generaator- ja kontrollsõlmede indekse hulk

- kitsendused võimsusvoogudele elektrivõrgu elementides – elektriliinides ja trafodes (tavaliselt $P_k^- = -P_k^+$)

$$P_k^- \leq P_k \leq P_k^+, \quad i \in \mathfrak{I}_E$$

kus $\mathfrak{I}_E$ on elektrivõrgu harude (elektriliinide ja trafode) indekse hulk

- kitsendused koormatult reguleeritavate trafode ülekandesuhetele

$$K_l^- \leq K_l \leq K_l^+, \quad i \in \mathfrak{I}_T$$

kus $\mathfrak{I}_T$ on koormatult reguleeritavate trafode indekse hulk:

Optimeerimise **sihifunktsiooni** avaldised võivad erineda sõltuvalt optimeerimise kriteeriumist. Levinuimaks on majanduslik kriteerium, mille puhul on eesmärgiks minimeerida elektrienergia tootmiskulud

$$C = C_1(P_{G1}(\mathbf{x})) + \sum_{i \in \mathfrak{I}_G} c_i(P_{Gi})$$

kus $c_i(P_{Gi})$, $i \in \mathfrak{I}_G$ on elektriijaamade kulufunktsioonid (arvestavad ka võrgukadusid). Siin on rõhutatud, et tugisõlme aktiivvõimsus P_{G1} on väljundparameeter. Üldisem on kombineeritud majanduslik ja töökindluse kriteerium

³ Kui elektriijaamade võimsused on juba optimeeritud, siis käib kitsendus ainult tugisõlme aktiivvõimsuse kohta.

$$C = C_1(P_{G1}(\mathbf{x})) + w \sum_{i \in \mathfrak{S}_G} c_i(P_{Gi}) + \sum_{k \in \mathfrak{S}_E} T_k(P_k)$$

kus $T_k(P_k)$ on töökindluse trahvifunktsioon

$$T_k(P_k) = \begin{cases} 0, & \text{kui } |P_k| \leq P_k^+ \\ a_k(|P_k| - P_k^+)^2 & \text{muul juhul} \end{cases}$$

Siin määrab trahvitegur a_k trahvimäära. Kordaja w on kaalutegur, mis näitab tähtsuse vahet majandusliku ja töökindluse aspekti vahel.

Kui jaamade võimsused on varem optimeeritud, siis majanduslik kriteerium taandub summaarsete võrgukadude ΔP miinimumi kriteeriumiks

$$C = \Delta P = \sum_{k \in \mathfrak{S}_H} \Delta P_k$$

kus ΔP_k on aktiivvõimsuskaod k -ndas harus ja $\mathfrak{S}_H$ elektrivõrgu aseskeemi harude hulk või tugisõlmes genereeritava aktiivvõimsuse miinimumi tingimuseks

$$C = P_{G1} = \sum_{i \in \mathfrak{S}_K} P_{Ki}(U_i) + \Delta P - \sum_{i \in \mathfrak{S}_G} P_{Gi}$$

kus $\mathfrak{S}_K$ on koormussõlmede hulk. Viimane kriteerium on üldisem. Kui ei arvestata koormuste staatilisi karakteristikuid, siis miinimumid kummagi kriteeriumi järgi ühtivad, kuna $\sum_{i \in \mathfrak{S}_K} P_{Ki} = \text{const}$. Staatiliste karakteristikute arvestamisel on õigem rakendada viimast kriteeriumit.

Vahel osutub vajalikuks lähtuda keskkonna saastamise kriteeriumist

$$C = \sum_{i \in \mathfrak{S}_G} E_i(P_{Gi})$$

kus $E_i(P_{Gi})$ iseloomustab saastumisasetet sõltuvalt genereeritavast võimsusest.

Mõnikord pole võimalik rahuldada kõiki koormusi, sest tegemist on võimsuse defitsiidiga. Sel juhul muutuvad reguleeritavateks parameetriteks koormused P_{Ki} ja koormuste optimaalse piiramise tagab sihifunktsioon

$$C = \sum_{i \in \mathfrak{S}_K} \beta_i (P_{Ki} - P_{Ki}^0)^2$$

kus P_{Ki}^0 on koormused enne nende piiramist ja β_i kaalutegurid, mis määratlevad koormuste piiramise prioriteetid.

Püsitalitluse optimeerimiseks kasutatakse mitmesuguseid optimeerimismeetodeid, mis tavaliselt optimeerivad **Lagrange'i funktsiooni**

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\lambda}) = C(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$$

kus λ on Lagrange'i kordajate vektor. Võrratusekujulisi kitsendusi arvestatakse seejuures trahvifunktsioonide abil. Üheks efektiivsemaks optimeerimismeetodiks on üldistatud taandgradiendi meetod.

Vaatleme ühe olulise erijuhtumina koormusjaotuse optimeerimist soojuselektrijaamade vahel, tõlgendades esitatud avaldist nii, et komponent $C(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ esitab soojusjaamade kütusekulu ja $f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ aktiivvõimsuste balanssi, mis arvestab ka võrgukadusid. Leides osatuletised jaamade võimsuste järgi ning võrrutades need nulliga, saab tulemuse, mille võib üles kirjutada kujul

$$\frac{c_1}{1 - \sigma_1} = \frac{c_2}{1 - \sigma_2} = \dots = \frac{c_n}{1 - \sigma_n} = \lambda$$

Siin on c_i i -nda elektrijaama **marginaalkulu** (jaama kulutuste osatuletis tema võimsuse järgi) ja σ_i võrgukadude osatuletis i -nda elektrijaama võimsuse järgi. Kui võrgukaod jätta arvestamata, on tulemus veelgi lihtsam

$$c_1 = c_2 = \dots = c_n = \lambda$$

Selle kohaselt on koormuse jaotus soojuselektrijaamade vahel optimaalne, kui nende marginaalkulud (nimetatakse ka suhteliseks juurdekasvuks) on võrdsed. Siit järeldub, et elektrisüsteemi koormuse suurenemisel tuleb suurendada selle elektrijaama võimsust, mille marginaalkulu on hetkel minimaalne ja vastupidi – koormuse vähenemisel alandada suurima marginaalkuluga jaama koormust.

Sageli pole talitluse kompleksne optimeerimine pinge, reaktiivvõimsuse ja trafoastmete järgi võimalik reguleerimis- ja juhtimisseadmete puudumise tõttu, sest

- puudub reaktiivvõimsuse reserv
- pole piisavalt pingereguleerimisseadmeid
- puudub vajalikul hulgal koormatult reguleeritavaid trafosid või pole nende astmeümberlülitid piisavalt töökindlad (võimaldavad ainult piiratud arvu lülitamisi)
- puudub sobiv tark- või riistvara või vajalikud telekanalid.

Sellistes tingimustes on suure praktilise tähtsusega optimeerimise allülesanded:

- pingenivoo reguleerimine kogu võrgus või selle osas
- võimsusvoogude juhtimine võrgu mittehomogeensetes osades
- võrgu optimaalsete lahutuspunktide määramine
- reaktiivvõimsuste jagunemise optimeerimine
- talitluskindluse korrigeerimine.

Võimaluse korral tulemused superponeeritakse ja vajadusel korrigeeritakse. Tulemus on muidugi ebatäpsem kui kompleksel optimeerimisel.

Üheks oluliseks allülesandeks elektrivõrgu talitluse optimeerimisel on elektrivõrgu pingenivoo reguleerimine. Pingenivoo all mõeldakse ühe pingeastmega võrgu või selle osa keskmist pinget. Kuna võimsuskadude põhiosa, koormuskaod, on pöördvõrdelised pinge ruuduga, tuleb võimsuskadude minimeerimiseks kasutada võima-

likult kõrget lubatavat pingeniivood. Pingeniivoo tõstmine 1% võrra vähendab võrgukadusid umbes 2%. Seejuures tuleb aga 330 kV liinides arvestada koroonakadude suurenemisega. Pingeniivoo tõusuga vähenevad ka reaktiivvõimsuskad (umbes 2% pingeniivoo tõusu 1% kohta) ning suureneb elektriliinide poolt genereeritav reaktiivvõimsus. Olukord võib erineda aga madala tarbimistaseme puhul. Siis võib reaktiivvõimsuse tarbimine ja reaktiivvõimsuskadude summa osutada väiksemaks liinide mahtuvustes genereeritavast reaktiivvõimsusest, mistõttu elektrijaamade generaatorid on sunnitud töötama mahtuvuslikus talitluses. Märkimisväärse reaktiivvõimsusvooga võrgust toiteallikate suunas kaasnevad täiendavad võimsuskad ja võrgu pingeniivoo liigne tõus eriti väikeste koormuste perioodidel. Sellistel juhtudel tuleb kasutada reaktoreid, mis suurendavad reaktiivvõimsuse tarbimist ülekandevõrgus.

Võimsusvoogude reguleerimine suletud võrgus ja elektrivõrgu pingeniivoo reguleerimine on üldjuhul elektrivõrgu püsitalitluse kompleksse optimeerimise allüksanded, kuid praktikas vaadeldakse neid tihti iseseisvate ülesannetena.

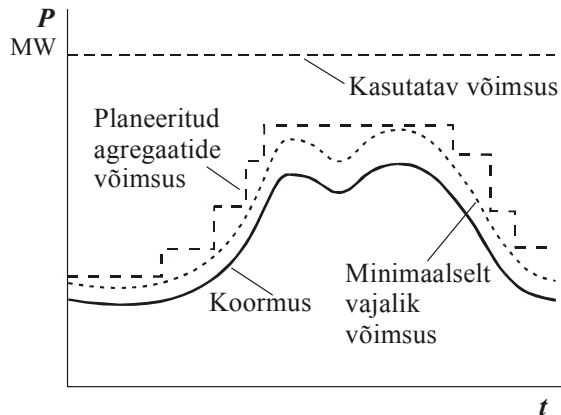
Elektrivõrgu talitluse optimeerimine vähendab mõnel juhul kadusid kuni 20%. Põhimõtteliselt annab ülekandevõrgu puhul suurimat majanduslikku efekti talitluse optimeerimine reaalajas, mille eelduseks on aga vajaliku riist- ja tarkvara olemasolu.

7.3.2 Talitluse planeerimine

Püsiseisundi optimeerimine on vaid üks elektrisüsteemi talitluse planeerimise aspektidest. Üldjuhul tuleb leida veel agregaatide optimaalne koosseis, koordineerida soojus-, hüdro- ja koostootmisjaamade tööd, planeerida remonte. Seejuures leitakse parim lahendus dünaamiliselt teatud perioodi kohta, kuna nii energiaressursside kasutamisel kui agregaatide sisse- ja väljalülitamistel on integraalsetest piirangutest ja muudest asjaoludest tingitud pikaajaline järelmõju. Omaette pitseri vajutab talitluse planeerimisele elektriturg, mis välistab elektrienergia tootjate otsese koostöö või vähemalt muudab selle vorme. Allpool vaatleme talitluse planeerimise küsimusi siiski traditsiooniliselt, sest see kajastab probleemi füüsikalist sisu, mida ühes või teises vormis tuleb arvestada ka elektriturul.

Elektrisüsteemi koormuse muutumine tingib vajaduse muuta ööpäeva vältel töös olevate agregaatide koosseisu. Tipptundideks tuleb peaaegu kõik agregaadid tööses lülitada ja öötundideks on otstarbekas liigsed agregaadid seisata. Siit tuleneb **agregaatide koosseisu planeerimise** (*unit commitment*) ülesanne. Joonisel 7.14, kus kõnealust ülesannet on illustreeritud, on ära näidatud ka reservi vajadus.

Agregaatide koosseisu optimeerimisel minimeeritakse kulutusi mingi ajavahemiku jooksul, võttes arvesse ka agregaatide käivituskulud. Seejuures tuleb arvestada



Joonis 7.14 Töösolevate agregaatide võimsuse muutumine ööpäeva kestel

kuumreservi (pöörlev reserv, reguleerimisreserv) vajadust, mis energiasüsteemi kohta peab olema 10...13%, ning järgida tehnilisi piiranguid:

- kui agregaat on töösse lülitatud, ei tohi teda kohe välja lülitada
- kui agregaat on seistatud, võib teda käivitada alles teatud aja pärast
- ühes elektrijaamas ei ole korraga võimalik käivitada mitut agregaat.

Agregaatide koosseisu planeerimine on matemaatiliselt mittelineaarne diskreetsete muutujatega ekstreemumülesanne. Ülesande lahendamiseks on kasutusel kolme liiki meetodeid:

- prioriteetide meetod
- dünaamilise programmeerimise meetod
- diskreetse programmeerimise meetod.

Lihtsaim on prioriteetide meetod, millega määratakse kindlaks reeglid agregaatide käivitamiseks ja seiskamiseks. Optimaalsed prioriteedid võib esimeses lähenduses määrata kütuse erikulu järgi. Esimesena tuleb käivitada agregaat, millel kütuse erikulu on minimaalne, seejärel teine jne. Agregaadid seisatakse vastupidises järjekorras. Töötavatest agregaatidest tuleb esimesena koormata seda, mille kütusekulu suhteline juurdekasv ehk kütuse marginaalkulu on kõige väiksem. Agregaaadi seiskamisel muutub tema kütusekulu nulliks. Töösolevad agregaadid peavad aga koormust suurendama ja nende kütusekulu kasvab. Seega on agregaaati kasulik seisata, kui tema kütusekulu on suurem kui süsteemi kütuse marginaalkulu. Seejärel korrigeeritakse kirjeldatud viisil määratud agregaatide koosseisu, arvestades käivituskulusid ja vajalikku reservi elektrisüsteemis.

Hüdrojaamade talitluse planeerimisel arvestatakse, et hüdroagregaaadi poolt genereeritav võimsus sõltub turbiini läbivast vooluhulgast, vee rõhust ja agregaaadi kasutegurist

$$P = 9,81 \times H \times Q \times \eta \quad (\text{kW})$$

kus H – survekõrgus (m),
 Q – vooluhulk (m^3/s),
 η – kasutegur.

Sama veehulgaga saab seda enam energiat, mida suurem on survekõrgus. Lisaks sõltub ka kasutegur nii vooluhulgast kui survekõrgusest.

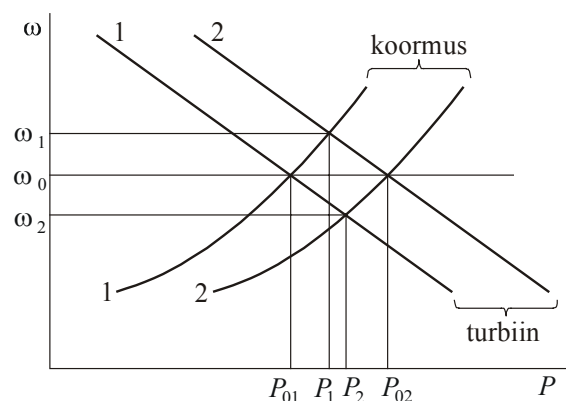
Hüdrojaamu on otstarbekas rakendada reguleerivaks ning tipu- ja reservvõimsuseks, arvestades, et baasvõimsuse annavad soojus- ja tuumajaamad. Kuna hüdroagregaatidel käivituskulud praktiliselt puuduvad, sobivad nad selleks otstarbeks hästi. Hüdrojaama efektiivsus on üldjuhul seda suurem, mida suurem on veehoidla maht.

Matemaatiliselt on hüdro- ja soojusjaamade talitluse koordineerimine keerukam kui soojusjaamade omavaheline koormusjaotus. Ülesanne muutub eriti keerukaks, kui tegemist on hüdrokaskaadiga. Tegemist on oluliselt dünaamilise ülesandega, sest arvestada tuleb ka veehulkade bilansitingimusi.

Elektrisüsteemi talitlust planeeritakse aasta, kuu, nädala ja ööpäeva kaupa. Aasta talitluse planeerimisel määratakse elektrijaamade aastatoodangud ja vajalikud ressursid, hüdroelektri jaamade pikaajalised koormusgraafikud, pikaajalised elektri ostu-müügilepingud ja koostöölepingud naabersüsteemidega, remondi- ja reservi-graafikud, elektrivõrgu skeemid, releekaitse- ja automaatikaseadmete sätted jm. Põhilisteks lähteandmeteks on seejuures süsteemi koormuse, kütuse- ja energiaturu ning veeressursside prognoosid. Kuu, nädala ja ööpäeva kaupa neid plaane korrigeeritakse ja detailiseeritakse täpsustatud prognooside alusel.

7.3.3 Võimsuste automaatreguleerimine

Elektrienergia tootmine ja tarbimine peavad igal ajahetkel olema tasakaalus. Tasakaalu rikkumine avaldub elektrisüsteemi sageduse kõrvalekaldena. Kui näiteks koormus süsteemis langeb, siis põhjustab jääkvõimsus, s.o genereeritava ja

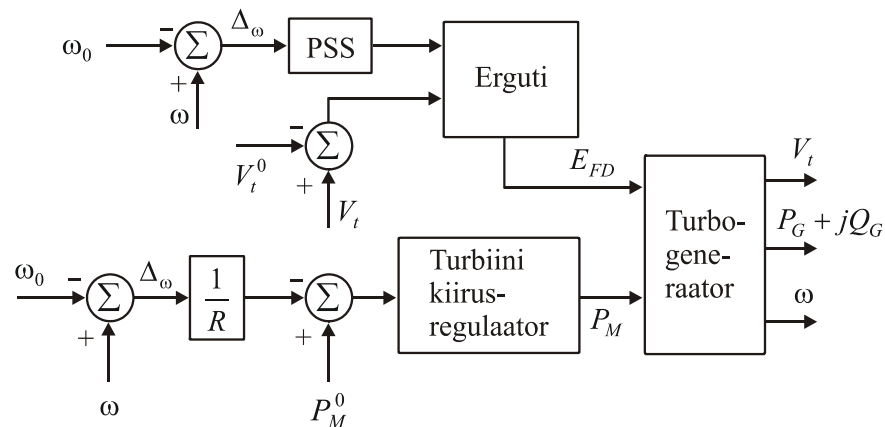


Joonis 7.15 Turbiini ja koormuse sageduskarakteristikud

sust. Kuna süsteemis töötab korraga suur hulk turbiine, siis vältimaks nende kooskõlastamata reguleerimist, seadistatakse kiirusregulaatorid tööle **statismiga**

tarbitava võimsuse vahe, kineetilise energia suurenemise ja generaatorite pöörlemiskiiruse ja sellega võrdeliselt ka sageduse tõusu. Sageduse ja seega ka pöörlemiskiiruse muutumisele reageerivad turbiinide kiirusregulaatorid, mis vähendavad auru või vee juurdevoolu ning ühtlasi ka turbiini ja generaatori võim-

(kaldkarakteristiku järgi). Teisalt tuleb arvestada ka koormuse sõltuvust sagedusest. Kokku võttes kujuneb sagedus süsteemis joonisel 7.15 toodud karakteristikute lõikepunkti järgi (ω tähistab sagedust ja P võimsust). Joonisel 7.16 on turbiini ja generaatori reguleerimise plokkskeem. Siin annab tegeliku nurksageduse ω ja sageduse sätevväärtuse ω^o vahe $\Delta\omega$ korrutatuna teguriga $1/R$ (statismi pöördväärtus) suuruse, mida võrreldakse etteantud võimsusega P_M^o . Tulemuseks on turbiini võimsus P_M . Niisamuti on generaatori pinge ja selle sätevväärtuse vahe $\Delta U = U - U^o$ sisendväärtuseks generaatori ergutile. Teiseks sisendiks on sageduse kõrvalekalle $\Delta\omega$, mida kasutatakse ära generaatori stabiliseerimiseks (PSS). Püsitalitluses, kus $\omega = \omega^o$, ka $U = U^o$ ja $P_M = P_G = P_M^o$. Siirdetailtluses sumbuvad nende suuruste kõrvalekalded toimeaja jooksul, mis ergutuse regulaatoritele on 10...50 ms ja turbiini kiirusregulaatoritele 5...10 s. Kirjeldatud **sageduse primaarreguleerimine**, milles osalevad süsteemi kõik turboagregaadid, ei kindlusta sageduse püsivat väärtust. Lisaks on vajalik **sageduse sekundaarreguleerimine**, mida teevad selleks ettenähtud elektrijaamad sagedusregulaatorite abil.



Joonis 7.16 Turbiini ja generaatori reguleerimise plokkskeem

Sageduse reguleerimine on tihedalt seotud vahetusvõimsuste reguleerimisega ühendsüsteemis. Mitmel põhjusel (liinide läbilaskevõime, optimaalne koormusjaotus, riikidevahelised kokkulepped jm) on alamsüsteemide vaheline võimsus ette määratud. Kui nüüd sageduse reguleerimine põhjustab planeeritud vahetusvõimsuste hälbeid, tuleb vahetusvõimsusi korrigeerida genereeritava võimsuse ümberjaotamisega nii, et sagedus ei muutuks. Näiteks kui ühes alamsüsteemis genereeriv võimsus avariiliselt väheneb, tekib seal võimsuse defitsiit, mille naabersüsteemid automaatselt korvavad. Selle alamsüsteemi ülesandeks on tõsta enda genereeriv võimsus endisele tasemele. Veelgi enam, mingi ajavahemiku vältel

peab genereeriv võimsus selles alamüsteemis olema isegi kõrgem, korvamaks vahepeal saadud lisaenergiat. Seega peab vahetusvõimsuse reguleerimisel olema nii proportsionaalne kui integraalne toime. Sageduse sekundaarreguleerimise ja vahetusvõimsuse reguleerimise automaate käsitletakse kui ühtset **genereeriva võimsuse automaatjuhtimise** (*Automatic Generation Control, AGC*) kompleksi. Selle kompleksi ülesanne on minimeerida (nullida) **piirkondlik reguleerimisviga** (*Area Control Error, ACE*)

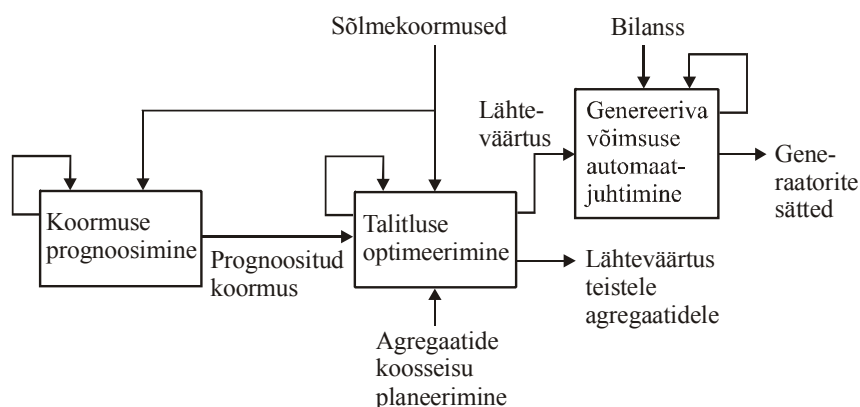
$$ACE = \beta \Delta f + \Delta P_T$$

kus β – sagedustegur,

Δf – sageduse hälve,

ΔP_T – vahetusvõimsuste summaarne hälve.

Siia liitub veel koormuse automaatne jaotamine elektrijaamade vahel, mille eesmärk on minimeerida kulutusi süsteemis (joonis 7.17).



Joonis 7.17 Võimsuse automaatjuhtimise plokkskeem

7.4 Põhivõrgu koormuse seire

Elektritarbijate koormused (aktiivvõimsus, reaktiivvõimsus või vool) on aluseks elektrivõrgu käidu- ja planeerimisülesannete lahendamisel. Koormust käsitletakse nii elektrisüsteemi kohta summaarselt kui ka elektrivõrgu üksikute sõlmede kaupa. Koormusi on vaja prognoosida lühema või pikema ennetusajaga (mõnest tunnist aastani ja enam), aga ka analüüsida ja imiteerida. Vajalike koormusandmete laad sõltub rakendusest. Pääaegu alati on tegemist matemaatilise ootusega koormuse pikaajalise prognoosi või mõne muu nimetuse all. Olenevalt ülesandest vastab matemaatiline ootus võimsuse või voolu keskväärtusele ajahetkel või energiale mingis ajavahemikus (tund, ööpäev, nädal, aasta). Sageli vajatakse ka koormuse tinglikku matemaatilist ootust ehk lühiajalist prognoosi. Lühiajalisse prognoosi (ennetusajaga mõni ööpäev) kuulub enamasti koormuse temperatuurisõltuvus.

Pikaajalise prognoosi ja koormuse analüüsi korral võib temperatuurisõltuvust ka imiteerida. Koormuse juhuslikkust kirjeldab tema ruuthälve. Rakendusest sõltuvalt võib vaja minna veel muidki suursi ehk **koormusnäitajaid**, mis kirjeldavad koormuste erinevaid omadusi.

7.4.1 Koormuste käsitlemine

Ülesande traditsioonilise püstituse korral leitakse koormuse prognoos, lähtudes otse koormusandmetest, mis enamasti on antud aegridade kujul. Kasutusel on hulk meetodeid, mis põhinevad regressioonanalüüsil, aegridade mudelitel, neurovõrkudel jm. Meetodi valik sõltub lähteandmete iseloomust (nt andmete hulgast) ja vajalike tulemustest (ennetusajast). Iseloomulik on, et põhitähelepanu on pööratud mingi formaalmatemaatilise meetodi rakendamisele olemasolevate lähteandmete ja vajaliku tulemuse kohaselt. Koormuse füüsikalisi omadusi võetakse arvesse vaid pinnapealselt.

Kuigi traditsiooniline lähenemine koormuse käsitlemisele annab praktikas kasutus- kõlblikke tulemusi, võib tunduvalt täpsemaid ja mitmekülgsemaid andmeid saada, kui esmalt koostada **koormuse matemaatiline mudel**. Sellise mudeli koostamisel püütakse välja selgitada koormuse füüsikalisi omadusi ja kirjeldada neid kvantitatiivselt. Niisiis kirjeldatakse mudelis otseselt koormust, mitte olemasolevaid algandmeid (aegridu) nagu traditsioonilise lähenemisviisi korral. Füüsikaliselt põhjendatud mudeli struktuur ei sõltu otseselt praktilistest tingimustest, nagu kasutada olevate andmete mahust ning rakendustes vajalikest koormusnäitajatest.

Matemaatilise mudeli rakendamiseks on vaja selle parameetreid **estimeerida**. Estimeerimine toimub ennekõike regulaarsete koormusandmete (aegridade) alusel. Kasutatakse ära ka muu kvantitatiivne ja kvalitatiivne teave. Estimeerimise põhi-etapp, esmane estimeerimine, toimub koormusuuringute käigus, kus käsitletakse mingi elektrivõrgu koormusi. Esmase estimeerimise tulemuseks on elektrivõrgu koormuste **tüüpmodelid**, mille all mõistetakse mudeli parameetrite tüüpilisi komplekte. Igale üksikkoormusele kinnistatakse sobiv tüüpmodel (sõltumata sellest, kas koormuse andmeid kasutati tüüpmodelite leidmisel või mitte), mis määrab enamiku üksikkoormuste modelite parameetritest. Vaadeldavate koormuste andmetel estimeeritakse täiendavalt lähteandmete hulgale vastav või muudel kaalutlustel sobiv arv parameetreid, mis kujundavad mudeli lõplikult. Seda estimeerimise etappi nimetatakse modelite **redigeerimiseks**. Vajaduse korral võib üksikkoormustel olla ka oma unikaalne tüüpmodel.

Estimeeritud kujul esindavad koormuse mudeli parameetrite komplektid (edaspidi üksikkoormuste modelid) neid koormusi, mille andmetel estimeerimine toimus. Mudelite ja lisaandmete (nt temperatuuri prognoosi) alusel on võimalik leida koormusnäitajaid. Eristatakse esmaseid ja tuletatud koormusnäitajaid. Esmased koormusnäitajad lähtuvad otseselt koormuse mudelist, tuletatud näitajad saadakse esmaseid näitajaid kombineerides. Sellekohases programmpaketis – **koormuse**

seiresüsteemis – on esmased näitajad ette antud. Tuletatud näitajaid võib aga seiresüsteemi kasutaja ise defineerida.

Koormuse omaduste väljaselgitamine ja matemaatilise mudeli struktuuri koostamine kuulub teadusliku uurimistöö raamidesse. Mudeli rakendamine koormuse seire eesmärgil koosneb järgmistest etappidest.

- Mudeli esmane estimateerimine tähendab koormusuuringuid vaadeldavas elektrivõrgus. Esmase estimateerimise lähteandmeteks on koormuste (mitte tingimata võrgu kõikide koormuste) ja temperatuuride mitme aasta tunniandmed. Tulemuseks on koormuste tüüpmodelid, täpsemalt, mudelite tüüpilised komponendid. Koormusuuringuid võrgus ei ole vaja korrata, kui koormuste iseloomus ei toimu suuri muutusi.
- Mudelid redigeeritakse kõigi vaadeldavate koormuste osas. Aluseks on esmasel estimateerimisel leitud tüüpmodelid. Täiendavalt estimateeritakse iga koormuse andmetele vastav või muudel kaalutlustel sobiv arv parameetreid. Minimaalselt on vajalik vaid üks lähtesuurus, näiteks aastase energiatarbe väärtus. Põhivõrgus, kus koormusandmeid on tavaliselt piisavalt, võib igale koormusele koostada unikaalse (tüüp)mudeli. Tüüpmodelite rakendamisele omaseid võtteid tuleb rakendada vaid uute koormuste korral või mingi koormuse iseloomu järsul muutusel. Mudelite redigeerimist on võimalik ka automatiseerida, mis sisuliselt tähendab mudelite adapteerimist.
- Koormuse jooksev seire seisneb värske (nt möödunud tunni või ööpäeva) koormuse- ja temperatuuriandmete sisestamises ja matemaatilise mudeli kohases töötlemises. Vajalikud koormusnäitajad (nt lühiajaline prognoos) väljastatakse automaatselt etteantud plaani kohaselt või rakendusprogrammide nõudmisel. Kuna koormusmodelid on estimateeritud juba varem (vallas-töötlusena), on arvutustööde maht jooksva seirel minimaalne. Jooksva seiretegevusega võib ühendada mudelite adekvaatsuse kontrolli ja redigeerimise (adapteerimise).

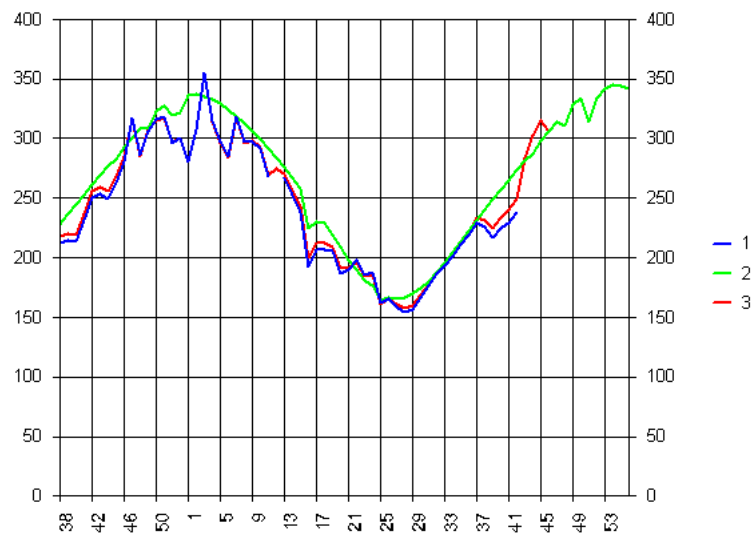
7.4.2 Koormusnäitajad

Lisas 1 kirjeldatakse koormuse matemaatilise mudeli mõningaid võimalusi koormusnäitajate määramisel. Vaatleme esmaseid näitajaid, võttes kasutusele veidi erineva tähistuse:

- A[P] – koormuseandmed
- E[P] – koormuse matemaatiline ootus
- S[P] – koormuse ruuthälve
- C[P] – koormuse deviatsioon (koormushälbe tinglik matemaatiline ootus)
- A[T] – temperatuuriandmed
- E[T] – temperatuuri matemaatiline ootus (norm)
- S[T] – temperatuuri ruuthälve
- Z[T] – imiteeritud temperatuur
- I[T,P] – temperatuuri mõju koormusele

$I[Z[T],P]$ – imiteeritud temperatuuri mõju koormusele.

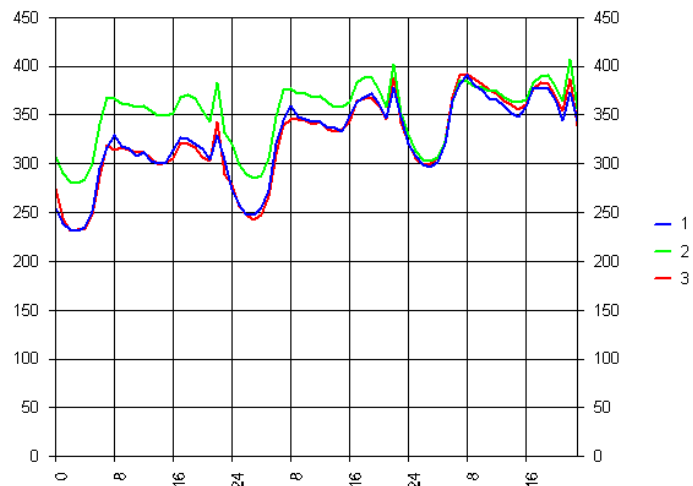
Koormuse matemaatiline ootus $E[P]$ on arvutatav mis tahes ajahetkele nii mineviku kui tuleviku suunas. Kaugema tuleviku matemaatiline ootus on tõlgendatav kui koormuse pikaajaline prognoos, mis vastab temperatuuri normile. Lähituleviku matemaatilist ootust võib nimetada ka eelprognoosiks, mis ei arvesta koormuse tegelikke hälbeid lähiminevikus. Koormuse lühiajaline prognoos ehk tinglik matemaatiline ootus $E[P] + C[P] + I[T, P]$ on pikaajalise prognoosi täpsustus, mis saavutatakse koormuse deviatsiooni ja temperatuurisõltuvuse lisamisega. Kuna deviatsioon on arvutatav (erineb nullist) vaid 5...10 ööpäeva ette ja ka temperatuuri meteoroloogiline prognoos ei ole sellest pikema ajavahemiku kohta usaldusväärne, ühtib pikema ennetusajaga prognoos matemaatilise ootusega. Koormuse analüüsi eesmärkidel võib tingliku matemaatilise ootuse arvutada ka möödunud ajavahemike kohta näiteks ennetusajaga 1 tund. Joonistel 7.18 ja 7.19 on koormusnäitajad nädala- ja tunnikeskmise tasemel.



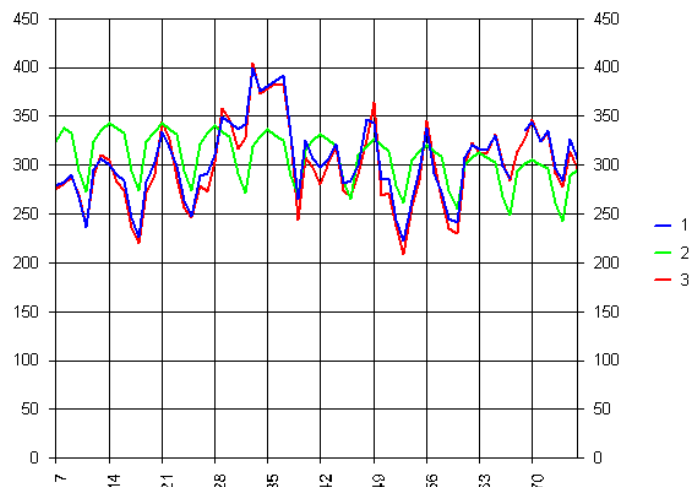
Joonis 7.18 Elektrisüsteemi piirkonna tegelik koormus (1), matemaatiline ootus (2) ja lühiajaline prognoos (3) nädalasuuruste tasemel, alates 17.09.1999

Koormuse pikaajalise prognoosi võib leida ka kujul $E[P] + I[P,T]$, kus matemaatilisele ootusele on lisatud temperatuurisõltuvus (joonis 7.20) Temperatuurisõltuvus on siin arvutatud tegeliku temperatuuri alusel. Kuna pikaajalisel prognoosimisel temperatuuri usaldatav prognoos puudub, võib selle asendada imiteeritud väärtustega, kasutades näiteks mõne varasema aasta tegelikke väärtusi. Sel teel võib selgitada, milline on prognoos aastaks 2002, kui temperatuur oleks

1987. aasta kohane (külm talv). Imiteerimise teiseks võimaluseks on võtta aluseks temperatuuri matemaatiline ootus ja lisada sellele mingi konstantne hälve. Suuruse



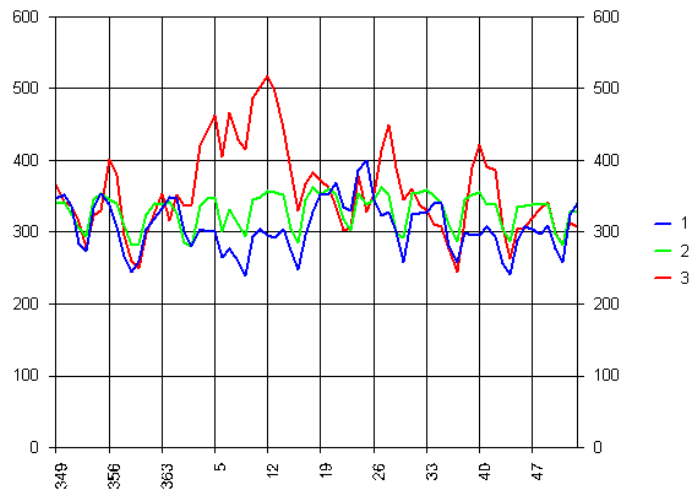
Joonis 7.19 Elektrisüsteemi piirkonna tegelik koormus (1), matemaatiline ootus (2) ja lühiajaline prognoos (3) tunnisuuruste tasemel, alates 17.01.2000



Joonis 7.20 Elektrisüsteemi piirkonna tegelik (1), normaliseeritud (2) ja imiteeritud (3) koormus päevasuuruste tasemel, alates 15.12.1999

$E[P] + I[P, T]$ ja tegelike koormusandmete hea kokkulangevus joonisel 7.20 näitab, et antud juhul on koormuse matemaatiline mudel adekvaatne. Seetõttu on usaldusväärne ka imiteeritud temperatuuri alusel arvatud prognoos.

Koormuse analüüsimisel võib lisaks matemaatilisele ootusele manipuleerida ka temperatuurisõltuvusega. Kui koormuse tegelikest andmetest temperatuurisõltuvus lahutada, saab normaliseeritud koormuse $A[P] - I[T,P]$, mis vastab temperatuuri normile. Sellele võib lisada imiteeritud temperatuuri mõju. Tulemus $A[P] - I[T,P] + I[Z[T],P]$ näitab, milline oleks koormus võinud olla, kui temperatuur oleks olnud 1987. aasta külma talve kohane (joonis 7.21).



Joonis 7.21 Elektrisüsteemi piirkonna tegelik (1), normaliseeritud (2) ja imiteeritud (3) koormus nädalasuuruste tasemel, alates 04.11.1998

Näited kinnitavad, et koormuse matemaatiline mudel võimaldab leida erinevaid koormusnäitajaid, kombineerides mudelist tulenevaid esmaseid näitajaid. Esmaseid näitajaid on kirjeldatud ka lisas 1.