

**TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL**  
**ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT**

---

2008 - 10

**Mati Valdma**

**ENERGIASÜSTEEMID**  
**ELECTRIC POWER SYSTEMS**

**Loengukonspekt**

**Tallinn - 2008**

## EESSÕNA

Käesolev õppekursus AES3024 "Energiasüsteemid" kuulub elektroenergeetika eriala põhiõppe kohustuslike õppeainete hulka. Seda õppeainet on soovitatav õppida 3.-nda õppeaasta sügissemestril. Kursuse eesmärgiks on anda põhiteadmisi energiasüsteemidest (ES) ja ühendenergiastüsteemidest (ÜES), nende talitlusest ning talitluse analüüsist ning juhtimisest.

Käsitlemist leiavad järgmised probleemid:

- ES-i struktuur ja allsüsteemid
- ES-i talitluse matemaatilised mudelid,
- talitluse optimeerimise põhimõtted,
- talitluse reguleerimise põhimõtted ja energia kvaliteet,
- talitluse stabiilsuse hindamine,
- ES-i töökindlus ja selle tagamine,
- ES-i operatiivjuhtimine,

Mitmeid kursuses käsitletavaid probleeme on võimalik põhjalikumalt tundma õppida erikursustes. Tunde nädalas 6: loenguid - 4, harjutusi - 1, laboratoorseid töid - 1. Õppeaine lõpeb eksamiga.

Kirjandust energiasüsteemide kohta:

1. Elgerd, Olle I. Electric Energy Systems Theory. McGraw-Hill Publishing Company. New York. 1982.
2. Gross, Ch. A. Power System Analysis. John Wiley & Sons, New York, 1986.
3. Weedy, B. M. Electric Power Systems. John Wiley & Sons. 1991.
4. El-Hawary, M. E. Electrical Power Systems. Design and analysis. IEEE Press, New York, 1995.
5. Nasar, S.A., Trutt, F. C. Electric Power Systems. CRC Press, New York, 1998.
6. Weedy, B. M., Cory, B. J. Electric Power Systems. John Wiley & Sons. 2001.
7. Saccomanno, F. Electric Power Systems: Analysis and Control. IEEE Press, 2003.
8. Баринов, В. А., Совалов, С. А. Режимы энергосистем: методы анализа и управления. Энергоатомиздат, Москва, 1980.
9. Маркович, И. М. Режимы энергетических систем. Энергия, Москва, 1963. .
10. Mörsky, Jorma, Mörsky, Janne Voimalaitosten Yhteiskäytön Tekniikka. Otatieto, Hakapaino Oy, Helsinki 1994.

## **SISUKORD**

<b>EESSÕNA</b>		<b>2</b>
<b>SISUKORD</b>		<b>3</b>
<b>1. SISSEJUHATUS</b>		<b>5</b>
1.1. Energiasüsteemide ajaloost		5
1.2. Kaasaegsed energiasüsteemid ja nende ühendused		6
1.2.1. Maailma energiasüsteemid		6
1.2.2. Eesti energiasüsteem		8
1.2.3. Balti ühendsüsteem		10
1.2.4. Venemaa Ühtne Energiasüsteem		11
1.2.5. Euroopa suurim ühendsüsteem		13
1.3. Energiasüsteemide teadus		14
<b>2. ENERGIASÜSTEEMI ELEMENDID JA ALLSÜSTEEMID</b>		<b>19</b>
2.1. Energiasüsteemiga seotud mõisted		19
2.2. Energiasüsteemi allsüsteemid		22
2.3. Elektri jaamad		24
2.4. Tarbijad		27
2.5. ES-I talitlus		30
2.6. Talitluse valve ja juhtimine		36
<b>3. ENERGIASÜSTEEMI NORMAALTALITLUS</b>		<b>39</b>
3.1. Võimsuse edastamine		39
3.2. Püsitalitluse võrrandid		41
3.3. Talitluse dünaamika ja juhuslikud faktorid		44
3.4. Talitluse stohhastilised mudelid		47
3.5. Siirdeprotsessid		48
3.6. Kokkuvõte		48
<b>4. ENERGIASÜSTEEMI TALITLUSE OPTIMEERIMISE PÕHIMÕTTED</b>		<b>49</b>
4.1. Probleem		49
4.2. Aktiivkoormuste jaotuse optimeerimine soojuselektri jaamade vahel		51
4.3. Võimsuskadude suhtelise juurdekasvu määramine		57
4.4. Ülesande lahendusmeetodid		59
4.5. Reaktiivvõimsuste jaotuse optimeerimine		63
4.6. Talitluse kompleksne optimeerimine		64
4.7. Energiaagregaatide töökorra optimeerimine		66
4.8. Talitluse optimaalne planeerimine		69

<b>5.</b>	<b>ENERGIASÜSTEEMI TALITLUSE REGULEERIMINE</b>	<b>73</b>
5.1.	Talitluse reguleerimise põhimõtted	73
5.2.	Sagedus ja selle muutumise	
5.3.	Sageduse primaarne reguleerimine	76
5.4.	Sageduse ja vahetusvõimsuse sekundaarne reguleerimine	80
5.5.	Koormusjaotuse reguleerimine	83
5.6.	Reservid	84
5.7.	Pingete ja reaktiivvõimsuste reguleerimine	85
5.8.	Kokkuvõte	85
<b>6.</b>	<b>ENERGIASÜSTEEMI STABIILSUS</b>	<b>86</b>
6.1.	ÜLDIST	86
6.2.	Staatiline stabiilsus	86
6.3.	Dünaamiline stabiilsus	90
6.4.	Koormuse stabiilsus	91
6.5.	Kokkuvõte	91
<b>7.</b>	<b>ENERGIASÜSTEEMI TALITLUS- JA HÄIRINGUKINDLUS</b>	<b>92</b>
7.1.	Sissejuhatus	92
7.2.	Põhimõisted	93
7.3.	Teoreetilised alused	95
7.4.	Talitus- ja varustuskindluse kriteeriumid ja näitajad	102
7.5.	Energiasüsteemide talituskindlus EU maades	107
7.6.	Kokkuvõte	108
	<b>KOKKUVÕTE</b>	

# 1. SISSEJUHATUS

## 1.1. Energiasüsteemide ajaloost

Esimesteks jõumasinateks, mida hakati kasutama, olid vesi- ja tuuleveskid. Andmed esimese vesiveski kohta pärinevad aastast 65 e.m.a. ja tuuleveskite kohta - aastast 64 m.a.j. Seejärel möödus üle tuhande seitsmesaja aasta enne kui jõuti järgmise jõumasinani, milleks oli tööstuslik aurumasin. Aurumasin kergendas oluliselt tööd kaevandustes, metallitööstuses, tekstiilitööstuses ja mujal ning kiirendas tootmise ja transpordi arengut. Aurumasinate kõrgperioodiks oli XVIII - XIX-sajand.

Elektri kasutamine valgus- ja jõuallikana algas alles XIX-sajandi 80-ndatel aastatel. Alul kasutati alalisvoolu tehastes. Esimeseks avalikuks elektrijaamaks oli Pearl Streeti elektrijaam New Yorgis, mis anti käiku 1882. aastal. See oli alalisvoolu elektrijaam võimsusega 746 kW (1000 hj). Tarbijaid toideti 110 V alalisvooluliini kaudu. Alalisvoolu elektrijaamu ehitati ka Inglismaal, Saksamaal, Prantsusmaal jm. Alalisvoolu üks propageeriaid oli Thomas Edison. Alalisvoolu hakati kasutama ka transpordis. Kuid madalapingeline alalisvool võimaldas elektrienergiat üle kanda ainult paari kilomeetri kaugusele ja ka siis pidid juhtmed olema piisavalt jämedad..

Ühe- ja kahefaasilisi vahelduvvoolusüsteeme katsetati 1880-ndate aastate teisel poolel. Suure panuse vahelduvvoolu süsteemide kasutusele võtuks andsid Nikola Tesla, George Westinghouse ja Dolivo-Dobrovolski. Nende ja paljude teiste tööd tegid võimalikuks kolme-faasilise vahelduvvoolu kasutamise.

Kolme-faasilise vahelduvvoolu kasutamine algas 1890-ndate aastate alguses ja levis kiiresti üle maailma. Vahelduvvoolu eelisteks alalisvoolu ees oli pinge transformeeritavus, vahelduvvoolu generaatorite ja mootorite lihtsus võrreldes alalisvoolu masinatega, paralleeltöö stabiilsus ja kolmefaasiliste elektrimootorite suur käivitusmoment, mis tuleneb pöördmagnetväljast. Vahelduvvool avas suured võimalused üle kanda elektrienergiat kõrgetel ja ülikõrgetel pingetel suhteliselt väikeste vooludega ning tarbijate lähedal transformeerida elektrienergia jälle madal- või keskpingele vastavalt tarbijate vajadustele. Nüüd oli võimalik üle kanda elektrienergiat suurtele kaugustele suhteliselt peenikeste juhtmetega ja ülekandekaod muutusid suhteliselt väikeseks.

Esimene vahelduvvoolu liin pingega 1 kV ehitati Buffalosse (USA). Esimene mitme generaatoriga energiasüsteem loodi 1896. a. USA-s. XX sajandil jätkus maade elektrifitseerimine üha kiiremas tempos ja energiasüsteemid muutusid aina suuremaks. Energiasüsteemide keskujuhtimiseks hakati looma dispetšijuhtimiskeskusi. Võeti kasutusele turbiinide kiiruste automaatreguleerimine, elektrilises osas hakata kasutama relekaitset ja avariitõrje automaatikat. Selle tulemusena paranes võimsuste bilansi reguleerimine, tõusis energiasüsteemide töökindlus ning paranes energia kvaliteet. 1920-ndatel aastatel hakati looma üleriigilisi energiasüsteeme. 1930-ndatel aastatel loodi naaberenergiasüsteemide ühendamise teel esimesed ühendatud

energiasüsteemid. Koos energiasüsteemide arenguga arenes ka teadus energiasüsteemidest ja nende juhtimisest, arendati edasi side ja juhtimissüsteeme.

Vahelduvvoolu süsteemide loomisel tekkis standardse sageduse valiku probleem. Katsetati kümneid erinevaid sagedusi (10Hz, 16,66Hz, 25Hz, 40Hz, 50Hz, 60Hz jt.), enne kui kujunes välja kaks põhilist sagedust 50Hz ja 60Hz. Ameerikas võeti sageduse standardiks 60 Hz ja Euroopas kujunes standardseks sageduseks 50Hz. Tänapäeval on USA-s, Kanadas, Kuubas, Mehhikos, Brasiilias, Kolumbias, Peruus, Venezuelas, Saudi Araabias, Lõuna-Koreas, Taivanis, Filipiinidel ja ka mõnedes teistes maades sageduse standardiks 60Hz. Jaapanis on kasutusel nii 60 Hz. kui ka 50.Hz. Ida-Jaapanis (Tokio, Kawasaki, Sapporo) on sagedus 50 Hz ja Lääne-Jaapanis (Osaka, Kyoto, Nago) – 60 Hz. Euroopas, Venemaal, Hiinas, Austraalias, Argentiinas ja enamikes teistes maades on standardseks sageduseks 50Hz.

Elektroenergeetika arengut iseloomustab tänapäeval:

- tehnoloogia ja seadmete areng ning protsesside üha täiuslikum automatiseerimine;
- katelde, turbiinide, generaatorite, trafode jt. seadmete võimsuste kasv;
- elektrienergia ülekandevõrgu pingete kasv, ehitatakse üha võimsamaid ülekandeliine, merekaablite ja väga pikkade liinide puhul kasutatakse kõrgepingelisi alalisvoolu ülekandeliine;
- energiasüsteemide ühendamise üha suuremateks ühendenergiasüsteemideks
- energiasüsteemide juhtimise täiustamine, sealhulgas energiasüsteemide talitluse ja arengu optimeerimine, juhtimise automatiseerimine ja infotehnoloogia üha laialdasem kasutamine
- keskkonnakaitse hakkab üha enam mõjutama energeetikat
- turupõhimõtete üha laialdasem kasutamine.

Suurimate agregaatide võimsused ulatuvad tänapäeval üle 1000 MW ja kõrgeimad ülekandepinged üle 1000 kV. Kõik see on muutnud elektrienergia genereerimise, ülekandmise ja jaotamise ning tarbijate elektriga varustamise tohutult efektiivsemaks ja kvaliteetsemaks, kuid sellega on kaasnenud ka palju uusi probleeme. Tänapäeva energeetika rajaneb kõrgtehnoloogial ja küberneetilisel juhtimisel.

## **1.2. Kaasaegsed energiasüsteemid ja nende ühendused**

### **1.2.1. Maailma energiasüsteemid**

Energiasüsteemide ühendamise üha suuremateks ühendenergiasüsteemideks võimaldab tõsta energiasüsteemi häiringukindlust, parandada sageduse kvaliteeti ja muuta elektrienergia tootmine, ülekandmine ja jaotamine tunduvalt efektiivsemaks.

M. Valdma "Energiasüsteemid", 2008

Mida suurem on energiasüsteem, seda suurem on saavutatav efekt. USA spetsialistid arvavad, et energiasüsteemi ühendamisest saadav majanduslik efekt on aastas üle 20 miljardi \$.

Paljudes riikides on loodud ühtne rahvuslik energiasüsteem, mis sageli on ühendatud ka naaberriikide energiasüsteemidega.

Maailmas toodeti 2003. a. 15852,11 TWh elektrienergiat..

Maailma suurimad elektrienergia tootjad on:

	Aasta toodang 2003	Elektrijaamade summaarne installeeritud võimsus
1. USA	3891,72 TWh	932,83 GW
2. Hiina	1806,76 TWh	356,09 GW
3. Jaapan	1017,50 TWh	241,42 GW
4. Venemaa	883,35 TWh	214,42 GW
5. Saksamaa	558,14 TWh	119,76 GW

Nendes riikides on ka võimsaimad energiasüsteemid.

Maailma elektrijaamade installeeritud kogu võimsus 2003. a. lõpus oli 3625,70 GW.

Maailma soojuselektrijaamade installeeritud kogu võimsus 2003. a. oli 2475,465 GW.

Kõige enam soojuselektrijaamu on ehitanud need samad 5 riiki:

1. USA	736,728 GW
2. Hiina	265,547 GW
3. Jaapan	172,889 GW
4. Venemaa	147,213 GW
5. Saksamaa	79,162 GW

Maailma hüdroelektrijaamade summaarne installeeritud võimsus oli 2003. a. 719,928 GW.

Kõige suuremad hüdroelektrijaamade võimsused on järgmistes riikides:

1. Hiina	86,075 GW
2. USA	79,366 GW
3. Kanada	69,206 GW
4. Brasiilia	65,311 GW
5. Venemaa	44,828 GW

Maailma tuumaelektrijaamade summaarne installeeritud võimsus oli 2003. a. 368,123 GW.

Suurimad tuumaelektrijaamade võimsused on järgmistes riikides:

M. Valdma "Energiasüsteemid", 2008

1.	USA	98,794 GW
2.	Prantsusmaa	63,273 GW
3.	Jaapan	45,905 GW
4.	Saksamaa	23,405 GW
5.	Venemaa	22,30 GW

Alternatiivsete energiaallikatega elektrijaamade ((geotermiline, jäätmete põletamine, päike, tuul jm) summaarne installeeritud võimsus maailmas oli 2003. a. 62,188 GW.

Alternatiivsete energiaallikatega elektrijaamade installeeritud võimsus on kõige suurem järgmistes riikides:

1.	USA	17,9 GW
2.	Saksa	12,261 GW
3.	Hispaania	5,725 GW
4.	Taani	3,016 GW
5.	Itaalia	2,318 GW

Suurimateks ühendenergiasüsteemideks maailmas on:

- USA idaosa ühendsüsteem – genereerimisvõimsustega üle 650 GW
- Kesk-Euroopa Ühendenergiasüsteem UCTE üle 470 GW
- Jaapani ühendenergiasüsteem – üle 240 Gw
- Venemaa Ühtne Energiasüsteem üle 210 GW.

Kõrgeimateks pingeastmeteks on:

USA idaosa ühendsüsteem	765 kV
USA lääneosa ühendsüsteem	550 kV
Kesk-Euroopa ühendsüsteem UCTE	380 - 400 kV
Venemaa ühtne energiasüsteem	1150 kV
Jaapani ühendsüsteem	1000 kV
Balti ühendsüsteem	330 kV

Suurimad agregaatide võimsused erinevates energia ja ühendsüsteemides on järgmised:

USA ühendsüsteemides	1360 MW
Kesk-Euroopa ühendsüsteem UCTE	1400 MW
Venemaa ühtses energiasüsteemis	1200 MW
Jaapani ühendsüsteemis	1180 MW
Ühendsüsteemis NORDEL	1100 MW



Eesti energiasüsteem	200 MW
Leedu energiasüsteem	1300 MW

- UCTE - West European Union for the Co-ordination of Transport of Electric Power.
- IPS - Integrated Power Systems of Eastern Europe.
- UPS - United Power Systems.

Vt. Skeeme Euroopa sünkroonse sageduse piirkonnad ja Balti ringi projekt.

### 1.2.2. Eesti energiasüsteem

Eestis hakati elektrienergiat kasutama juba 19. sajandi 80-ndatel aastatel. Alul ehitati tehasesiseseid alalisvoolusüsteeme Wiegandi tehases, Kreenholmi Manufaktuuris jm. Esimesed üldkasutatavad elektrijaamad alustasid tööd XX sajandi alguses. Kuid peagi mindi üle 3-faasilisele vahelduvvoolule. Esimeseks üldkasutatavaks elektrijaamaks Eestis ja kogu Baltikumis oli 1907. a. valminud Pärnu Elektrijaam. Esimeseks kõrgepinge õhuliiniks oli Kunda – Rakvere liin pingega 15 kV, mis võeti kasutusele 1918. a. Aastal 1913 a. anti käiku Tallinna Elektrijaam võimsusega 498 kW, mis hakkas toitma Tallinna Elektrivõrku. See oli tollal suurim energiasüsteem Eestis.

1930 a. oli Eestis neli eraldi töötavat elektrisüsteemi või -võrku nagu tollal nimetati - Tallinna, Ellamaa-Tallinn-Haapsalu, Ulila-Tartu-Viljandi ja Virumaa süsteem. 1939 a. loodi Elektrikeskus, mille ülesandeks oli Eesti kavakindel elektrifitseerimine, elektrienergia tootmine ja tarbijaskonna varustamine elektrienergiaga. Kuid ühtse energiasüsteemi loomist segas sõda. Eesti suuremad elektrijaamad ühendati ühtsesse süsteemi alles 1951 a. kui anti käiku Ahtme-Tallinn 110 kV elektriliin.

Elektri tootmist põlevkivist hakati plaanipäraselt arendama 1950ndatel aastatel. Ehitati Kohtla-Järve koostootmisjaam, Ahtme koostootmisjaam, Narva hüdroelektrijaam ning alustati Balti Elektrijaama ehitamist. Järgnevatel aastakümneil jätkub elektrifitseerimine ja energeetika areng Eestis, kuid nüüd juba N. Liidu plaanide ja mallide järgi, kus Eesti energeetika kujutas ühte N. Liidu energeetika osa. Demonteeritakse või konserveeritakse väikesed elektrijaamad ning arendatakse ainult suurenergeetikat. Eesti võtab osa Narva Hüdroelektrijaama (HEJ) ehitamisest, mis läks käiku 1955 a.

Alates 1955 a. on Eesti ES ühendatud St. Peterburgi (tolleaegse Leningradi ES-iga. Eesti ja Läti ES-id ühendati 1960.a. Pihkva ES-iga ühendati Eesti ES 1968 a. kui valmis Tartu-Pihkva liin.

Järgnevatel aastail ehitatakse Eestisse maailma suurimad põlevkivielektrijaamad - Balti SEJ - 1435 MW, valmis aastail 1959 - 1965 ja Eesti SEJ - 1600 MW, mis alustas tööd

aastail 1969 - 1973. Põlevkivile määratakse fiktiivselt väga madal hind, mis viib selleni, et Eesti põlevkivielektrijaamu hakatakse intensiivselt koormama. Tugevdatakse sidemeid N. Liidu ühtse ES-ga ning Eestist saab elektrienergiat eksportiv piirkond. Selle tõttu suureneb keskkonna saastumine Ida-Eestis ning kiireneb elektrijaamade kulumine. Põlevkivielektrijaamade intensiivne kasutamine ja elektrienergia eksport üliodava hinnaga jätkus kuni Eesti taasiseseisvumiseni.

Eesti energiasüsteem on suhteliselt väike, selle installeeritud genereerimisvõimsus oli ~ 3300 MW. Elektrivõrk koosneb põhivõrgust (110, 220 ja 330 kV) ja jaotusvõrgust (alla 110 kV). Süsteemi koormusbilanssi saab reguleerida Narva Elektrijaamade abil, mis võivad töötada baas- ja pooltipukoormuse režiimis. Energiasüsteemis on piisavad võimsuse reservid, kuid puudub tippkoormuse reguleerimise elektrijaam või agregaat. Eesti energiasüsteem on ühendatud võimsate 330 kV kõrgepingeliinidega Läti (2 liini, 1200-1500 MW), Pihkva (2 liini, 900 MW) ja St. Peterburi (3 liini, 1000 MW) energiasüsteemidega. Läti energiasüsteem on ühendatud Eesti, Leedu ja Pihkva energiasüsteemidega ning Leedu energiasüsteem Läti, Valgevene ja Jantarenergoga.

2005. a. juulis suleti Balti EJ I-III järk – 18 katelt ja 8 turbiini. Praegu töötab Balti EJ 8 katelt ja 4 turbiini kogu võimsusega 700 MW. Eesti elektrijaamas töötab 8 energiablokki kogu võimsusega 1495 MW.

### 1.2.3. Balti ühendenergiasüsteem

Eesti (2300 MW), Läti (2100 MW) ja Leedu (4500 MW) energiasüsteemid moodustavad Balti Ühendenergiasüsteemi, mille juhtimiskeskus DC Baltia asub Riias.

Balti ühendsüsteemi summaarne installeeritud genereerimisvõimsus on ligi 9000 MW. Suurima agregaadivõimsus on 1300 MW. Installeeritud netovõimsused on tab. 1.1.

	Eesti	Läti	Leedu	Kokku
Installeeritud netovõimsus	2324	2108	4591	9023
SEJ				
Kondensatsioon	1960	0	1732	3692
Koostootmine	342	528	786	1656
Tuumajaamad	0	0	1183	1183
Hüdrojaamad	0	1553	90	1643
Pumpjaamad	0	0	800	800
Tuulejaamad	22	27	0	49

Tabel 1.1. Balti ÜES installeeritud netovõimsused (2005)

Elektri tarbimine Balti ÜES on järgmine:

Eestis 6,6 TWh

Lätis > 6,6 TWh

Leedus 9,5 TWh.

Eestis on suhteliselt palju reguleeritavat kondensatsioonvõimsust baas ja pooltippkoormuse katmiseks. Eesti ekspordib elektrienergiat Lätti.

Läti on defitsiitne süsteem. Läti ei suuda katta oma koormust ja seepärast peab osa elektrienergiat importima. Seejuures on Lätil üle 1500 MW hästi reguleeritavat hüdrojaamade võimsust. Hüdroelektrijaamad sobivad tippkoormuse katmiseks, kuid piisavate veeressursside korral võivad töötada ka koormusgraafiku pooltipu ja baaskoormuse osas.

Leedu on tuumajaama tõttu peamiselt baaskoormuse katja ja eksportija. Kuid tuumajaam koos pumpjaamaga suudavad ka reguleerida koormusgraafikut. Lrrdu ekspordib elektrienergiat Valgevenesse ja Lätti.

#### 1.2.4. Venemaa ühtne energiasüsteem

Venemaa Ühtne Energiasüsteem on üks maailma suurimaid (elektrijaamade installeeritud võimsus üle 190 GW). Venemaa Ühtse Energiasüsteemi Juhtimiskeskus asub Moskvas. Ühtsesse süsteemi kuulub 6 ühendsüsteemi (Kesk-osa, Loode-osa, Kesk-Volga, Põhja-Kaukaasia, Uurali ja Siberi ühendenergiasüsteemid. Sama juhtimiskeskus koordineerib ka 5 suveräänse riigi (Ukraina, Valgevene, Moldaavia, Kasahhi ja Taga-Kaukaasia) energiaühenduste tööd.

Balti Ühendenergiasüsteem on sünkroonses paralleeltöös Venemaa Ühtse Energiasüsteemiga ja SRÜ ühendsüsteemiga, kuid ei allu operatiivselt Juhtimiskeskusele Moskvas.

Sünkroonne paralleeltöö tähendab seda, et Eesti energiasüsteemis ja Balti ühendsüsteemis on sama vahelduvvoolu sagedus, mis Venemaa ja SRÜ ühendsüsteemis. Kuid tegemist on puht tehnilise seosega. Sageduse reguleerimise kvaliteedi määrab Venemaa Ühtne Energiasüsteem kui suurim selles ühenduses. Kui Venemaa süsteemis juhtub sageduse kollaps, eraldab automaatika Eesti ja teised Balti energiasüsteemid Venemaa süsteemist.

Seni ei ole Venemaa Ühtne Energiasüsteem suutnud pidevalt tagada seda sageduse kvaliteeti, mida hoitakse Lääne-Euroopa ühendsüsteemis UCTE ja Põhjamaade ühenduses NORDEL. Sisuliselt on asi selles, et Venemaa Ühtses Energiasüsteemis elektrijaamade summaarne võimsus ei suuda täpselt järgida selle hiiglasuure ja hajutatud süsteemi summaarset koormust, vaid jäävad koormuse muutumisest mõnevõrra maha. Kui sagedus on väiksem kui 50 Hz, tähendab see seda, et süsteemis

genereeritakse vähem kui oleks vaja 50 Hz tagamiseks ja kui sagedus on suurem kui 50 Hz, tähendab see ülegenereerimist.

Kesk-Euroopa ühendsüsteemis on nõue tagada normaaltalitluse korral, et sageduse hälved oleksid väiksemad kui  $\pm 0,1$  Hz. Venemaa Ühtses Energiasüsteemis kehtib nõrgem nõue. Sagedushälbed peavad olema piirides  $-0,2$  kuni  $+0,1$  Hz., kuid ka seda nõuet pidevalt ei täideta. Siiski on sageduse kvaliteet Venemaa Ühtses Energiasüsteemis ja ühtlasi ka Balti riikide energiasüsteemides viimasel aastakümnel paranenud. Sagedus oli lubatavates piirides: 1981 - 15 %, 1986 - 63%, 1990 - 98%, 1996 - 78%, 1994 - 96%, 1998 - 94% ajast.

Sünkroonne paralleeltöö Venemaa Ühtse Energiasüsteemiga ja SRÜ riikide ühendsüsteemiga annab Eestile ja kogu Balti ühendsüsteemile järgmist:

- suurendab meie suhteliselt väikeste energiasüsteemide häiringukindlust;
- Venemaa Ühtne Energiasüsteem reguleerib sagedust, kuigi mitte alati sageduse kvaliteet ei vastu Euroopa energiasüsteemide nõuetele;
- loob võimalused energia- ja teenustekaubanduseks, sealhulgas reservikaubanduseks.

Põhiline tähtsus selles paralleeltöös meile on häiringukindluse suurenemine, mis suurendab oluliselt ka tarbijate varustuskindlust.

Vaatleme, mis juhtuks kui langeb välja Ignalina tuumajaama 1300 MW plokk:

Kui Leedu töötaks sel ajal eraldi süsteemina, siis vähendaks sagedus 10 Hz ja selle tõkestamiseks tuleks Leedu süsteemis 50% tarbijaid sagedusautomaatide abil välja lülitada.

Kui Leedu töötaks Balti ühendsüsteemis, kuid lahus Venemaa energiasüsteemist, siis väheneks sagedus Balti ühendsüsteemis 6 Hz ja umbes 30% tarbijatest tuleks sagedusautomaatide abil välja lülitada.

Kui Balti ühendsüsteem on sel ajal paralleeltöös Venemaa ja Valgevene süsteemiga, väheneks sagedus selles ühenduses vähem kui 0,2 Hz ja sellist muutust üldse ei tajutaks.

Energiasüsteemidele esitatavatest põhinõuetest on esikohal töökindlus ja alles seejärel tuleb tähelepanu pöörata energiakvaliteedile. Tarbijate kahjumid sellest, et sageduse hälve 50 Hz on lühiajaliselt suurem kui 0,2% ei ole võrreldav sellega, mis juhtub siis, kui 30 või 50% tarbijatest mitmeks minutiks või isegi tunniks välja lülitatakse. Kuid ei tohiks teha järeldust, et sageduse kvaliteeti ei tuleks parandada.

### 1.2.5. Euroopa suurim ühendsüsteem UCTE

Euroopas ei ole ühtset vahelduvvoolu süsteemi, vaid seal on mitu sünkroonse sageduse piirkonda. Suurimaks ühendsüsteemiks on Kesk-Euroopa ühendsüsteem UCTE – Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity. Lisaks UCTE on

Euroopas veel Põhjamaade ühendüsteem NORDEL, mis on ühendatud UCTE-ga alalisvoolu liinide kaudu ja Inglismaa ning Iirimaa ühendüsteem. Nimetatud ühendüsteemid on ühendatud UCTE alalisvoolu ülekannete abil.

UCTE on eksisteerinud juba 50 aastat. Tal on liidri positsioon maailma ühendüsteemide seas, mis töötavad sünkroonse sagedusega. UCTE liikmeteks on 22 riigi energiasüsteemid. UCTE varustab elektrienergiaga ligi 450 milj. inimest. Aastane elektri tarbimine on selles ühendüsteemis ligi 2300 TWh.

Võimalikud variandid liitumiseks Euroopa energiasüsteemidega:

#### Variant A.

##### SRÜ ühendüsteem ühendatakse UCTE.

Koos sellega liituks ka Balti ühendüsteem UCTE-ga. Sageduse kvaliteet hakkaks vastama UCTE nõuetele. See variant ei nõuaks Balti energiasüsteemide lahutamist Venemaast ja Valgevenest, vaid ainult meie energiasüsteemide ettevalmistamist liitumiseks UCTE-ga. See on Eestile kõige parem variant. Suureneb häiringukindlus, paraneb sageduse kvaliteet. Suureneb elektriturg. Praegu käib eeluuring. Otsus ühinemise kohta tehakse arvatavasti 2007 – 2008 a.

Kui SRÜ ühendüsteemi ei liideta UCTE-ga. Siis on Eesti ES järgmised võimalused liitumiseks EL energiasüsteemidega.

#### Variant B.

##### Ühendada Balti riikide energiasüsteemid EL energiasüsteemidega alalisvooluliinide kaudu

Näiteks, Eesti energiasüsteem ühendatakse alalisvoolukaablite abil Soome süsteemiga, Leedu alalisvooluliini abil Poolaga ja Läti alalisvoolu kaabli abil Rootsiaga. .

Tagajärjed:

- 1) Säilivad elektri ekspordi võimalused Venemaale ja Valgevenesse ning elektri impordi võimalused nendest maadest
- 2) Balti energiaturg suureneb
- 3) Balti energiasüsteemidel avaneb võimalus osaleda Soome ja Skandinaavia elektriturul ning Poola ja Kesk-Euroopa elektriturgudel
- 4) Balti riikide energiasüsteemide töökindlus tõuseb

Kuid sageduse kvaliteet sellest ei parane. Majanduslikult on see variant palju kallim variandist A.

#### Variant C.

##### Lahutada Balti riikide energiasüsteemid Venemaa ja Valgevene elektrisüsteemidest ja ühendada Euroopa Liidu energiasüsteemidega vahelduvvoolu- või alalisvooluliinide abil, sõltuvalt sellest, mis on majanduslikult kasulik.

Loogiline oleks Eesti ühendada Soome elektrisüsteemiga alalisvoolukaabli kaudu ja Leedu Poola süsteemiga vahelduvvoolu liini abil.

Tagajärjed:

- 1) Balti ühendssüsteemis tagatakse hea sageduse kvaliteet ja piisavalt kõrge töökindlus võimsusebilansi häirete suhtes
- 2) Säilib Balti riikide elektriturg
- 3) Balti riikide energiasüsteemidel avaneb võimalus osaleda Euroopa Liidu elektriturgudel
- 4) Balti riikide ES-id kaotavad võimaluse osaleda Venemaa ja Valgevene elektriturul.

Variant D

Ühendada Balti riikide energiasüsteemid Venemaa ühendssüsteemiga, kuhu kuulub ka Valgevene energiasüsteem, vahelduv-alalis-vahelduv (VAV)-süsteemide kaudu, mis võimaldab Venemaa ühendssüsteemil ja Balti ühendssüsteemil töötada erinevate sagedustega ning ühendada Balti ühendssüsteem ühtseks sünkroonselt toimivaks süsteemiks UCTE-ga.

Tagajärjed:

- 1) Balti ühendssüsteemis tagatakse nõutav sageduse kvaliteet ja piisavalt kõrge töökindlus võimsusbilansi häirete suhtes
- 2) Säilib Balti elektriturg
- 3) Säilib võimalus osaleda Venemaa ja Valgevene elektriturgudel
- 4) Balti riikide energiasüsteemidel avaneb võimalus osaleda Euroopa Liidu elektriturgudel

Töökindluse tagamise seisukohast peaks uute süsteemide vaheliste sidemete läbilaskevõime olema vähemalt 600 - 800 MW.

Energiasüsteemide areng ja koos sellega ka nende suurenemine jätkub. Seda teed peab silmas pidama ka Eesti energiasüsteemi puhul. Probleem ühendustest Venemaa ja Euroopa ühendssüsteemidega, Balti ringi probleemid jm. vajavad kompleksseid uuringuid. Seejuures peame uurima ka Venemaa ja SRÜ riikide energeetika arenguvariante ja Euroopa Liidu ning UCTE ja NORDEL-i arengusuundi ning nõudeid. Enne liitumist UCTE süsteemiga tuleb Eesti energiasüsteem ja selle operatiivjuhtimissüsteem selleks tehniliselt ette valmistada. Liitumine Euroopa mõne ühendssüsteemiga on mõnes mõttes sarnane liitumisega Euroopa Liiduga.

### **1.3. Energiasüsteemide teadus**

Energiasüsteem kujutab endast väga keerukat pidevalt arenevat süsteemi. Seepärast vajab tema funktsioneerimine, juhtimine ja areng teaduslikku uurimist. Teadus energiasüsteemidest hakkas arenema koos energiasüsteemide tekkimisega, sest kohe tekkisid nn. süsteemsed probleemid, mida elektrotehnikas varem ei tuntud

(generaatorite paralleeltöö, energiasüsteemi juhtimine, stabiilsus, avariitõrje, töökindlus, häiringukindlus, ökonoomika küsimused jm.).

Energiasüsteemide teaduses on 2 üldist suunda:

- 1) füüsikalise-tehniline uurimissuund (uued kütused, uued materjalid ja uus tehnoloogia, uued seadmed ja materjalid, uued tehnilised süsteemid)
- 2) energiasüsteemide küberneetika (energoküberneetika) uurimissuund (energiaressursside kaevandamise ja kasutamise, elektri jaamade-, -võrkude ja energiasüsteemide struktuuri, talitluse ning arengu optimeerimine).

Põhieesmärgiks on luua optimaalselt funktsioneerivad ja arenevad energiasüsteemid.

Optimaalne energiasüsteem on selline, mis:

- 1) oma elementide ja struktuuri poolest võimaldab tarbijaid varustada elektrienergia ja soojusega ajaperioodis  $T$  minimaalsete kulutustega ja samal ajal vastab kõigile nõudmistele, mida energiasüsteemile esitatakse;
- 2) on dünaamiline ja muutub koos tegeliku olukorra ja nõudmiste muutumisega.

Lõppeesmärgiks peaks olema välja arendada optimaalne energeetika.

**Energiasüsteemide küberneetika** - energiasüsteemide funktsioneerimise ja arengu juhtimise (sihipärase mõjutamise) teadus.

Energiasüsteemide küberneetika põhiprobleemideks on energiasüsteemide ja neis toimivate protsesside modelleerimine, analüüs, seire ja prognoosimine ning optimeerimine. Optimaaljuhtimissüsteemide loomine ja probleemide mudelite ning lahendusmeetodite väljatöötamine, arvestades determineeritud, tõenäosuslikku, intervallis määramatut ja ebamäärast informatsiooni..

Seejuures tuleb erilist tähelepanu pöörata, et energeetika on keerukas tehniline süsteem, mille hindamisel ja arendamisel tuleb arvestada paljusid kriteeriume ja nõudeid nagu:

- 1) tarbijate energiaga varustamise kindlus
- 2) seadmete ja süsteemide ohutus ning töö- ja häiringukindlus
- 3) energia kvaliteet
- 4) protsesside ja tehnoloogiate energeetiline efektiivsus
- 5) käidu- ja investeerimiskulud
- 6) mõjud keskkonnale
- 7) kütuste ja energia hinnad.
- 8) energeetikaobjektide julgeolek jm.

Kuid ühtegi neist ei tohi absolutiseerida või jätta arvestamata, sest energeetikas on praktiliselt kõik kõigega seotud ning ühe näitaja paremaks muutmise võib teisi näitajaid halvemaks teha.

## Tähtsamad arendustöö ja teadusuuringute suunad

### 1. Alusuuringud

#### Energiasüsteemide küberneetika suund:

Keerukate automatiseeritud energiasüsteemide funktsioneerimise ja arengu optimaalse juhtimise aluste väljatöötamine arvestades keskkonnakaitse tingimusi, info mittetäielikkust ja turumajandust:

- elektri jaamade, -võrkude ja energiasüsteemide ning ühendenergiatsüsteemide talitluse modelleerimine, analüüs ja prognoosimine normaal- ja avariolukordades,
- elektri jaamade, -võrkude ja energiasüsteemide ning ühendenergiatsüsteemide talitluse optimeerimine ja juhtimine normaal- ja avariolukordades,
- elektri jaamade, -võrkude ja energiasüsteemide ning ühendenergiatsüsteemide arengu optimaalne planeerimine.

Kõigi ülalnimetatud ülesannete kohta tuleb välja töötada matemaatilised mudelid ja lahendusmeetodid deterministliku, tõenäosusliku, intervallilise määramatuse ja ebamäärase tasandi jaoks.

Rakendusuuringud toetuvad baasuuringutele. Rakendusuuringute eesmärgiks on välja töötada ratsionaalseid mudeleid, meetodeid, meetodikaid ja tarkvarasüsteeme teatud ülesannete gruppi lahendamiseks või ülesannete lahendamiseks konkreetse objekti jaoks.

Olulisemateks rakendusuuringuteks on:

1. Energiasüsteemi dispetšjuhtimise täiustamine:
  - dispetšjuhtimissüsteemi tehniline moderniseerimine;
  - talitluse optimaalse planeerimise meetodika täiustamine ja vastava tarkvara väljatöötamine;
  - releekaitse-, automaatika- ja sidesüsteemide edasiarendamine;
  - energiasüsteemide vahelise optimaalse koostöö põhimõtete, meetodika ja tarkvara väljatöötamine.
2. Elektri jaamade talitluse juhtimissüsteemi täiustamine:
  - talitluse operatiivjuhtimise süsteemi edasiarendamine;
  - energiaüksuste sisend-väljundkarakteristikute hindamine ja korrigeerimine;



- talitluse optimeerimissüsteemi loomine arvestades nii elektrilisi kui soojuskoormusi, omatarvet, keskkonnakaitse alaseid nõudeid ja tehnilisi kitsendusi;
  - releekaitse- ja automaatika ning operatiivjuhtimissüsteemi moderniseerimine.
3. Elektrivõrkude juhtimise ja arengu optimeerimine:
- jaotus- ja madalpingevõrkude info-, analüüsi- ning dispetšjuhtimissüsteemide täiustamine;
  - ratsionaalse pingetesüsteemi väljatöötamine Eesti energiasüsteemile;
  - uute pingereguleerimise, energiakvaliteedi analüüsi ja kompensatsioonisüsteemide loomine;
  - kesk- ja madalpingevõrkude optimaalse arengukontseptsiooni ja vastavate arengumudelite loomine;
  - uue elektrivõrkude projekteerimise metoodika väljatöötamine.
4. Elektrienergia tarbimise analüüs ja prognoosimine:
- Elektroenergeetika füüsikalised tehnilised uuringud:
- uute isolatsioonimaterjalide elektriliste karakteristikute määramine
  - kõrgepingealaste standardite ja normatiivide väljatöötamine, mis oleksid kooskõlas IEC ja teiste rahvusvaheliselt tunnustatud normidega;
  - uute seadmete täiustamine ja nende sobivusuuringud.
5. Energiamaajanduse riiklik järelevalve, energiaturu ja monopolide järelevalvesüsteemi väljatöötamine:
- elektrituru põhimõtete väljatöötamine arvestades Euroopa Liidu soovitusi;
  - riikliku järelevalvesüsteemi loomine elektrienergia tootmise, ülekande ja jaotamise ning monopolide tegevuse üle.
6. Energiasüsteemi arengu optimaalse planeerimissüsteemi väljatöötamine:
- arengumudelite analüüs ja ratsionaalse mudeli valimine;
  - energiasüsteemi andmebaasi loomine;
  - optimaalsete arengustrateegiate määramine arengumudeli alusel;
  - arengu optimaalse planeerimissüsteemi süntees.
7. Rahvusvahelise koostöö arendamine elektroenergeetika alal:
- Balti riikide energeetikaalase koostöö põhimõtete väljatöötamine ja vastava juhtimissüsteemi süntees
  - energiasüsteemide alase koostöö põhimõtted ja perspektiivid Venemaa, Soome ja teiste Euroopa maadega (Soome-Eesti merekaabel, Balti ring jm.)

M. Valdma "Energiasüsteemid", 2008

- Eesti liitumine rahvusvaheliste elektroenergeetika-organisatsioonidega CIGRE, UNIPED, CIRED jt.

Energiasüsteemide alaseid teaduslikke ajakirju on palju.

Neist tähtsaimad on:

- IEEE Transaction on Power Systems (USA).
- International Journal of Electrical Power & Energy Systems
- Journal of Electric Power Systems
- Известия АН России «Энергетика»
- Электричество
- 

Energeetika arengut mõjutavad tegurid:

- uus tehnoloogia, uued seadmed
- optimaaljuhtimine
- energiaressursside varud
- energiaturud ja monopolide reguleerimine
- keskkonnakaitse alased nõuded
- energiaressursside ja energia hinnad.

1.4. Kokkuvõte

## 2. ENERGIASÜSTEEMI ELEMENDID JA ALLSÜSTEEMID

### 2.1. Energiasüsteemiga seotud mõisted

Elektrienergia tootmine (genereerimine), edastamine, jaotamine ja tarbimine on ühtne protsess, kus toodetud elektrienergia praktiliselt samaaegselt ka tarbitakse, kuna elektronid liiguvad valguse kiirusega. Elektrienergiat ei ole võimalik toota, kui ei ole tarbimist ja ei ole võimalik tarbida kui ei ole samal ajal selle genereerimist, sest elektrienergiat ei saa lattu toota, nagu materiaalseid kaupu. Seepärast moodustavad elektrijaamad, -võrgud ja elektri tarbijad ühtse süsteemi, mida nimetatakse elektrisüsteemiks, energiasüsteemiks või ka elektrienergiasüsteemiks.

Mõistet "energiasüsteem" kasutatakse mitmes tähenduses. **Energiasüsteemi all laias mõttes** (inglisekeeles: "**energy system**") mõistetakse mõnikord kogu riigi või selle osa kütuse- ja energiamajandust. Seljuhul kuuluvad energiasüsteemi kütust tootvad või töötlevad ettevõtted, kütuse transpordi ettevõtted, elektrienergiat või soojust genereerivad jaamad, elektri-, soojuse- ja kütusevõrgud ning elektri, soojuse ja kütuse tarnijad.

Kitsamas mõttes mõistetakse energiasüsteemi all peamiselt elektrienergia tootmise, edastamise ja jaotamise süsteemi, mis hõlmab ka elektrienergia tootmiseks vajalikku soojust tootmist ning selleks vajalikke kütuseid ning muid energiaressursse.

Tavaliselt **energiasüsteem (ES)** (inglisekeeles: **power system (PS)**) tähendab elektrienergia tootmise, edastamise ja jaotamise süsteemi, mille moodustavad teatud territooriumil asuvad elektrijaamad ja neid omavahel ning tarbijatega, sageli ka naaberenergiasüsteemidega, ühendavad elektrivõrgud, aga samuti ka soojust väljastavaid elektrijaamu soojustarbijatega ühendavad soojusvõrgud koos vastavate juhtimis-, kaitse- ja sidesüsteemidega. Energiasüsteemil on ööpäevaringne kesk-dispetšjuhtimine.

Tarbijaid võib vaadelda ESi osana või ESi välismõjuritena. ESi põhieesmärgiks on teatud territooriumil asuvate tarbijate kvaliteetne varustamine elektrienergiaga. Samuti loob ES võimalused elektrienergia tootmiseks sellel territooriumil.

ES allsüsteemideks on:

- elektrisüsteem – energiasüsteemi elektriline osa
- soojussüsteemid – energiasüsteemi soojuslik osa koos kütustega.

**Elektrisüsteem (electric power system)** - elektri tootmise, edastamise ja jaotamise süsteem ilma soojusliku osata, mille moodustavad elektrigeneraatorid ning neid üksteisega ja tarbijatega ühendav elektrivõrk koos vastavate juhtimis-, kaitse- ja sidesüsteemidega.

**Soojussüsteem (heat power system)** - soojuse tootmise, edastamise ja jaotamise süsteem, mille moodustavad soojust tootvad energiaüksused (katlamajad, elektrijaamad) ning neid üksteisega ja tarbijatega ühendav soojusvõrk koos vastavate juhtimis-, kaitse- ja sidesüsteemidega.

Kuna soojuselektrijaamades toodetakse sageli nii soojust kui elektrit, ei tehta alati ranget vahet elektri- ja energiasüsteemi vahel.

Kui ESis on soojuse ja elektri koostootmisjaamu, tuleb mõnede küsimuste lahendamisel vaadelda koos elektrisüsteemi ja lokaalseid soojussüsteeme. ESi, mis sisaldab elektri ja soojuse koostootmisjaamu, ning kus vaadeldakse koos elektrisüsteemi ja koostootmisjaamadega ühendatud soojussüsteeme, nimetatakse ka **koostootmissüsteemiks (cogeneration power system (CPS))**.

Ülemaalist energiasüsteemi nimetatakse mõnikord **rahvuslikuks energiasüsteemiks**.

Kõik ülalmainitud süsteemid on teatud määral suhtelised ja nende mõistete tähendust tuleb igal konkreetsel juhul täpsustada. Analoogilisteks süsteemideks on gaaskütusesüsteemid ja vedelkütusesüsteemid.

ES-i majanduslikud ja tehnilised eelised on seda suuremad, mida suurem ja võimsam on ES. Seepärast ühendatakse piirkondlikud energiasüsteemid elektriliinide abil ja nii tekkivad energiasüsteemide ühendused ehk ühendenergiasüsteemid.

ESide ühendust nimetatakse **ühendenergiasüsteemiks (ÜES)**. ÜESil võib olla kesk-dispetšjuhtimine või mitte. Näiteks, Balti ÜESis on kesk-dispetšjuhtimine, kuid Balti ÜES ja SRÜ riikide ÜES moodustavad ühendsüsteemi, kus ühtne kesk-dispetšjuhtimine puudub.

Ühendenergiasüsteemi juhtimine võib olla:

- tsentraalne
- jaotatud osasüsteemide vahel
- detsentraalne.

Näiteks, Venemaa Ühendatud Energiasüsteem on tsentraalse juhtimisega, Kesk-Euroopa ühendenergiasüsteem – jaotatud juhtimisega, Balti ühendsüsteem – jaotatud juhtimisega, Venemaa ja Balti ühendsüsteem – detsentraalse juhtimisega.

ESi kui süsteemi iseärasused:

- ES on kaasajal kõige olulisem tehniline süsteem riigis, mis on kõigile vajalik ja mis peab katkematult toimima ja arenema, sest elu ja tegevus ilma elektrienergiata on tänapäeval kas suur kannatus või katastroof;
- ESis tuleb iga hetk reguleerida elektrienergia tootmist vastavalt tarbimisele ja kadudele, sest igal ajahetkel valitseb bilanss genereeritava võimsuse, tarbitava võimsuse ja kaovõimsuse vahel;
- ESi töö- ja häiringukindluse kohta on kehtestatud väga kõrged nõuded;

M. Valdma "Energiasüsteemid", 2008

- Energia kvaliteedi kohta on kehtestatud väga kõrged nõuded;
- ES reageerib häiringutele ning võib minna ühest seisundist teise murdosa sekundite jooksul ja sama kiiresti võivad süsteemis tekkida ning levida avariid;
- ES on väga kallis süsteem, mille arendamiseks tuleb teha suuri kulutusi 5-50 aastat ette.

Seega ES on mitmest seisukohast eriline süsteem ja energiafirmasid ei saa vaadelda kui tavalisi äriühinguid.

Kaasaegne energiasüsteem on keerukas hierarhilise juhtimisega kõrgtehnoloogiline küberneetiline süsteem, mis peab:

- tagama tarbijate katkematu varustamise elektrienergiaga stabiilses režiimis ning pikaajalises perspektiivis minimaalsete kuludega
- omama nõuetekohast töö- ja häiringukindlust
- tagama nõuetele vastava elektrienergia kvaliteedi sageduse ja pingete osas
- toimima, arvestades riigi ja tarbijate huve pikaajalises perspektiivis ning turu- ja konkurentsi vabaduse põhimõtteid.

ES saab olla seda efektiivsem, mida suurem see on. Suure ESi või ÜESi eelised väiksema ESi ees:

- suurem töö- ja häiringukindlus;
- sagedus püsib suures süsteemis lähemal nimiväärtusele kui väikses süsteemis;
- ESide ühendamine vähendab summaarse koormuse tippu ja suurendab koormusmiinimumi, kuna erinevate piirkondlike ESide koormusgraafikud on ajaliselt nihutatud;
- suures ESis on väiksemad summaarsed tootmiskulud ja väiksem energiaressursi kulu, kuna suurema süsteemi koormusgraafik on ühtlasem ning maksimaalne koormus väiksem ja minimaalne koormus suurem, võrreldes sellega kui vaadeldav süsteem koosneks väikestest piirkondlikest energiasüsteemidest;
- vähenevad summaarsed vajalikud genereerimisreservid (reguleerimisreserv, avariireserv ja remondireserv);
- suures energiasüsteemis on võimalik kasutada suurema nimivõimsusega seadmeid;
- on võimalik efektiivsemalt kasutada eritüübilisi elektrijaamu (tuumajaamu, hüdroelektriijaamu, pumphüdrojaamu jt.);
- uute elektrijaamade ehitamist on võimalik efektiivsemalt korraldada;
- suuremad võimalused energiasüsteemi talitluse optimeerimiseks;

M. Valdma "Energiasüsteemid", 2008

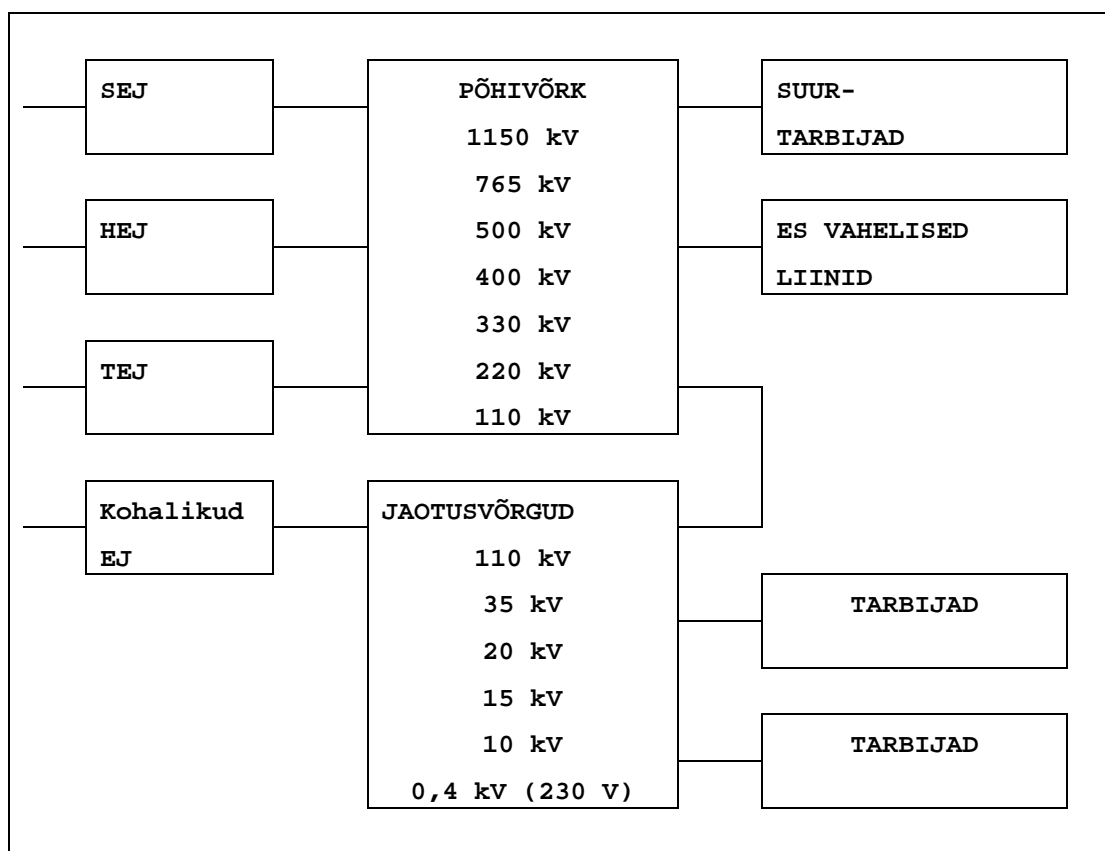
- suuremad võimalused minimeerida energiasüsteemi kahjulikku mõju keskkonnale;
- suuremad võimalused elektrikaubanduseks.

Käesolevaks ajaks on loodud suuri ES-e kõikides maades. Üle 95% tarbitud elektrienergiast saadakse suurtest ESidest.

Energiasüsteem talitleb. Muutujaid, millega iseloomustatakse energiasüsteemi talitlust ehk režiimi nimetatakse **talitluse muutujateks ehk talitluse parameetriteks**. Talitluse muutujad on pinged, voolud, seadmete koormused, võimsusvood ja energiad, energiaressursside vood jt.

## 2.2. ES allsüsteemid

Tarbijate varustamiseks elektriga kasutatakse 3-faasilist vahelduvvoolusüsteemi. Energiasüsteemis toimub elektri genereerimine ehk tootmine, edastamine ja jaotamine. Seega koosneb energiasüsteem eritüübilistest elektrijaamadest ja – võrkudest. Elektri genereerimine toimub suurtes elektrijaamades pingel 10,5-20 kV. Suured elektrijaamad ühendatakse pinget tõstvate trafode abil elektrisüsteemi põhivõrguga, mille pingeks on 220 kV, 330 kV, 400 kV, 500 kV, 765 kV, 1150 kV jne. Põhivõrgust läheb elektrienergia jaotusvõrkudesse ja mõnedele suurtarbijatele (vt. joon. 2.1). ÜESE moodustakse põhivõrkude ühendamise teel. Jaotusvõrgu pinged on 0,4 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV, 110 kV.



Joonis 2.1. Energiasüsteemi struktuur

**Põhivõrgu** all mõistetakse kõrgepingeelektrivõrku (tavaliselt pingega 110 kV ja enam), mis ühendab suuremaid elektrijaamu ja alajaamu ühtseks elektrisüsteemiks, edastab elektrit põhivõrguga ühendatud jaotusvõrkudele ja tarbijatele ning mille kaudu toimub elektri eksport-import ja koostöö teiste riikide elektrisüsteemidega.

Põhivõrgus on tavaliselt mitmeid suletud kontuure, mis normaalolukorras hoitakse suletuna. See võimaldab ühtlustada pingeid, vähendada kadusid ja tõsta võrgu töökindlust. Seejuures vajavad suletud võrgud keerukamat releekaitset.

Põhivõrku nimetatakse ka ülekandevõrguks või süsteemi moodustavaks võrguks.

Põhivõrgust läheb elekter jaotusvõrkudesse, kus toimub elektri jagunemine vastavalt tarbimisele.

**Jaotusvõrgu** all mõistetakse madal- ja kesk- või kõrgepingevõrku (tavaliselt pingega 110 kV ja vähem), mille põhiülesandeks on põhivõrgust või jaotusvõrguga ühendatud elektrijaamadest tuleva elektri jaotamine tarbijatele.

Jaotusvõrgud võivad olla:

- kõrgepingejaotusvõrgud (35 kV, 110 kV),
- keskpingejaotusvõrgud (6 kV, 10 kV, 20 kV),
- madalpingejaotusvõrgud (240 V, 0,4 kV).

Keskmise ja väikese võimsusega elektrijaamad ühendatakse tavaliselt otse antud piirkonna jaotusvõrguga.

Jaotusvõrgud ehitatakse nii avatud kui suletud võrkudena. Seejuures hoitakse suletud kontuurid võimsuskadude vähendamise eesmärgil tavaliselt avatuna.

Kõrgepingelised elektriülekanDED on suhteliselt efektiivsed, nende kasutegur on tavaliselt suurem kui 95%. Kaod elektrivõrkudes on tänapäeval 6-12%.

Seega on ES põhiosad:

- 1) elektrijaamad,
- 2) põhivõrk,
- 3) jaotusvõrgud.

### 2.3. Elektrijaamad

Elektrijaamade liike on väga palju, kuid põhilisteks elektrienergia tootjateks on: soojuselektrijaamad (ilma tuumajaamadeta) 66%, tuumajaamad – 11%, hüdroelektrijaamad – 22% ja muud elektrijaamad – 1%. Koos tuumajaamadega moodustab soojuselektrijaamade võimsus 77% kogu genereerivast võimsusest maailmas.

**Soojuselektrijaamade (SEJ) põhiliigid on:**

- 1) kondensatsioonielektrijaam (KEJ)
- 2) tuumajaam (TEJ)
- 3) gaasiturbiin elektrijaam (GTEJ)
- 4) koostootmisjaam (KTJ):



## 5) diiselektrijaam

### Kondensatsioonielektrijaam

Kondensatsioonielektrijaama põhiseadmeteks on aurukatlad, kondensatsiooniturbiinid koos turbogeneraatoritega, omatarbeseadmed ja jaotla. Kondensatsioonielektrijaama all mõtleme traditsioonilisi soojuselektrijaamu, mis kasutavad fossiilseid kütuseid ja kus on kondensatsiooniturbiinid. Kütuseks tavaliselt kivisüsi, põlevkivi või turvas. Reservkütuseks – kütteõli või maagaas. Tehnoloogiline skeem ühise aurumagistraaliga või plokktüüpi. Genereeritav võimsus on vabalt reguleeritav. Lubatav koormuse muutumise kiirus 3-5%/min. Kondensatsioonielektrijaam ehitatakse baaskoormuse (kasutusaeg aastas ~7000h) või vahekoormuse ehk pooltipu jaamana (kasutusaeg 2000-6000 h). Kasutegur tavaliselt 30-38%. Püütakse ehitada võimalikult suure võimsusega agregaat, kuna nende kasutamine tuleb majanduslikult odavam. Suurimaks kondensatsioonielektrijaamaks Soomes on Inkoo EJ (4x250 MW). Narva EJ on energiablokkide võimsuseks 100 ja 200 MW. Kondensatsioonielektrijaamad ehitatakse kohtadesse, kus kütus on lähedal või kuhu kütust on suhteliselt odav transportida. Turbiinide jahutussüsteemi jaoks vajatakse ka suurtes kogustes vett. Maailmas on kasutusel ka suurema võimsusega kondensatsiooniagregaat (300-900 MW). Tuumajaamades on energiablokkide võimsused sageli üle 1000 MW. Kondensatsioonielektrijaamade ehituskulud on suured, kütused – suhteliselt odavad.

### Tuumajaam

Tuumajaam on kondensatsioonielektrijaam, kus aurugeneraatoriteks on tuumareaktorid. Kütuseks on uraani isotoop U238 või looduslik uraan U235. Reaktorite tüübid:

- keevaveereaktorid ([Boiling water reactor \(BWR\)](#))
- rõhkveereaktorid ([Pressurized water reactor \(PWR\)](#)),
- rõhkraskevee reaktor (looduslik uraan U235) [Pressurised Heavy Water Reactor \(PHWR or CANDU\)](#)
- vesigrafiitreaktor ([Light water cooled graphite moderated reactor \(RBMK\)](#) jt.

Tuumajaamad on kahe- ja ühekontuurilised. Tuumajaamade koormust ei reguleerita. Seepärast on tuumajaamad baaskoormuse kandjad. Kapitalikulud on suured. Kütuse hind suhteliselt madal.

### Gaasiturbiinielektrijaam

Gaasiturbiinid on mõeldud reservvõimsuseks ja koormustippude katmiseks. Nende ehitamine on suhteliselt lihtne ja odav. Kütuseks on gaas või kütteõli. Kasutegur suhteliselt madal (20-40%). Gaasiturbiinid on kiiresti käivituvad (umbes 3 min). Väikese kasutustundide arvu juures (kuni 1500 h aastas) on nende kulud väiksemad baaskoormuse elektrijaamadest.

### Koostootmisjaamad

Koostootmisjaamu on kolme tüüpi:

- auru vaheltvõtuturbiinidega elektrijaamad
- vasturõhuturbiinidega elektrijaamad
- kombitsükliga koostootmisjaamad

Auru vaheltvõtuyirbiinidel 1-3 vaheltvõttu. Neist 2 on tööstusliku auru ja 3 küttevaheltvõtt. Vaheltvõtu turbiinidel on ka väike kondensatsiooni osa, mille elektriline koormus on reguleeritav sõltumatult soojuskoormustest.

Vasturõhuturbiinide elektriline koormus sõltub otseselt soojuskoormusest. Nende elektrilist koormust tavaliselt ei juhita. Kui on tekkinud aktiivvõimsuse defitsiit, siis on põhimõtteliselt võimalik ka koostootmisagregaatide elektrilist võimsust muuta. Kuid see on väga kallis.

Kombielektrijaama all mõeldakse elektrijaamu, kus on gaasiturbiin+generaator ja gaasiturbiin on ühendatud auruturbiiniga. See on nn kombitsükkel.

Koostootmisjaamades on tavaliselt ka kuumaveekatlaid soojuskoormuse katmiseks olukordades kui koostootmisagregaadid ei ole töös.

### **Hüdroelektrijaamad:**

Hüdroelektrijaamad on hästi juhitud. Nende käivitamine toimub kaugjuhtimise teel või automaatselt umbes 2 min. jooksul. Hüdrojaamu kasutatakse sageduse ja aktiivvõimsuse reguleerimisel. Sõltuvalt veeressursist võib hüdrojaam töötada koormusgraafiku baasosas või tippkoormuse reguleerimisel. Samuti sobivad hüdrojaamad avariireserviks. Põhilised turbiini tüübid: Pelton, Francis ja Kaplan.

Pumphüdroelektrijaam on hea energia akumulaator. Pumpjaamad sobivad tööle ESidesse, kus on tuumajaam.

Erinevate elektrijaama tüüpide põhiandmed on toodud tabelis 2.1.

**Elektrijaamade tüüpe iseloomustav tabel****Tabel 2.1**

Elektrijaama tüüp	Kasutegur	Koormuse muutumine ja reguleeritavus	Uue EJ hind, milj. \$/MW
SEJ			
Kondens	28-38%	Reguleeritav	1,0-1,5
Vasturõhu EJ	60-80%	Sõltub soojuskoormusest	
Aruvahelt.EJ	60-80%	Vähereguleeritav	
Kombi-EJ	45-50%	Sõltub soojuskoormusest	0,5-0,75
Gaasiturbiin EJ	20-60%	Hästireguleeritav	
HEJ	90%	Hästireguleeritav	1,0-7,0
Tuumajaam	30%	Mittereguleeritav	2,6-4,0
Tuulejaam		Juhuslik, sõltub ilmast	0,7-2,4
Päikese- EJ	<15%	Juhuslik, sõltub ilmast	

**2.4. Tarbijad**

Elektrisüsteemist või selle elemendist tarbitavat ehk väljuvat võimsust nimetatakse **koormuseks**: ES-i koormus, liini koormus, generaatori koormus, elektrijaama koormus jne.

ES-il on palju tarbijaid. Elektri tarbimine ES-ist kujutab endast juhuslikku protsessi. Seejuures on igal tarbijal ja tarbijate grupil ka teatud tarbimise seaduspärasused. Elektritarbijaid grupeeritakse Eesti Statistikaameti poolt järgmiselt:

		Elektrienergia tarbimine Eestis 2002.a. GWh	
1)	tööstus	1883	35,7%
2)	põllumajandus	198	3,8%
3)	Transport	97	1,8%
4)	Äri- ja avaliku teeninduse sektor	1510	28,6%
5)	Kodumajapidamine	1584	30,1%
-----			
Kokku:		5272	100%

Toodeti elektrienergiat 2002. a. 8527 GWh (koos tööstuse elektrijaamadega)

Täpsemates koormuse liigitustes eristatakse tarbimist tööstusharude ja transpordi liikide kaupa.

Elektrivõrgust tarbitakse aktiiv- ja reaktiivvõimsust. Elektrivõrgu koormused sõltuvad ajast, sagedusest ja pingetest:

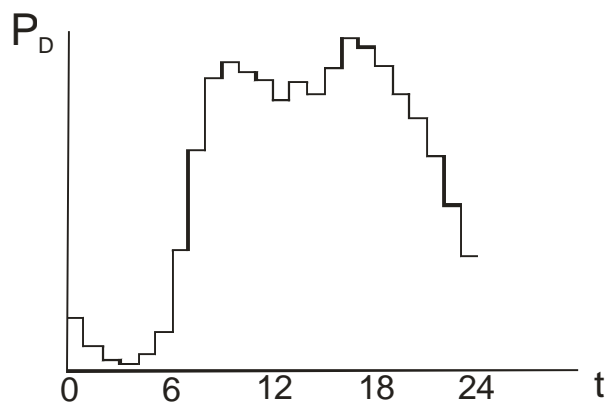
1) aktiivkoormus:

$$P_K = P_K(f, U, t) \quad (2.1)$$

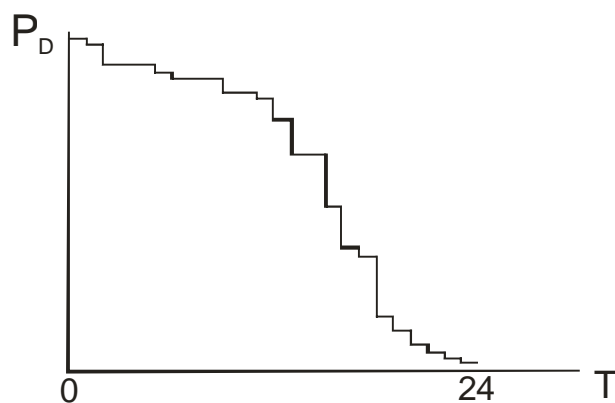
2) reaktiivkoormus:

$$Q_K = Q_K(f, U, t) \quad (2.2)$$

Koormuste sõltuvust ajast nimetatakse koormusgraafikuteks. Koormusgraafikuid koostatakse ööpäeva, nädala, kuu, kvartali ja aasta kohta.



Joonis 2.1. Ööpäevane koormusgraafik



Joonis 2.2. Ööpäevane koormuse kestuskõver

Lühimaks ajaintervalliks ööpäevaste ja nädalaste koormusgraafikute koostamisel on 1 tund või ½ tundi. Pikemaajaliste graafikute puhul on ajaintervalliks ööpäev, nädal või kuu.

Koormuste iseloomustamiseks kasutatakse järgmisi näitajaid:

maksimaalne koormus:	$P_{\max}$
keskmine koormus:	$P_{\text{kesk}}$
graafiku täitetegur:	$\epsilon = P_{\text{kesk}}/P_{\max}$
maksimaalkoormuse kasutusaeg:	$T_{\max} = W_T/P_{\max}$
minimaalkoormuse tegur:	$\alpha = P_{\min}/P_{\max}$

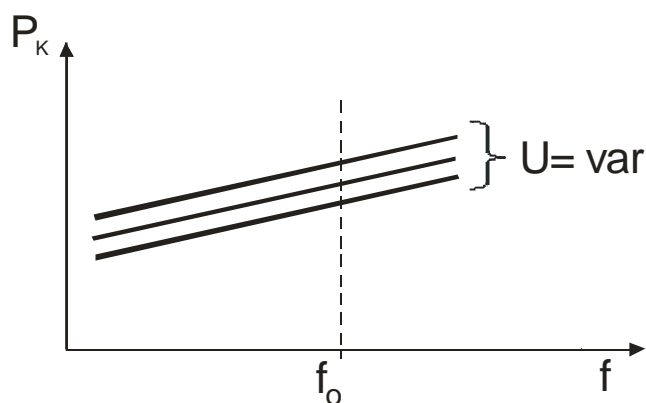
Tegelikult tuleks ES-i koormusi vaadelda kui juhuslikke protsesse, mis koosnevad keskvaartusest ehk determineeritud komponendist ja juhuslikust hälbest.

$$P_K = \bar{P}_K + \Delta\tilde{P}_K. \quad (2.3)$$

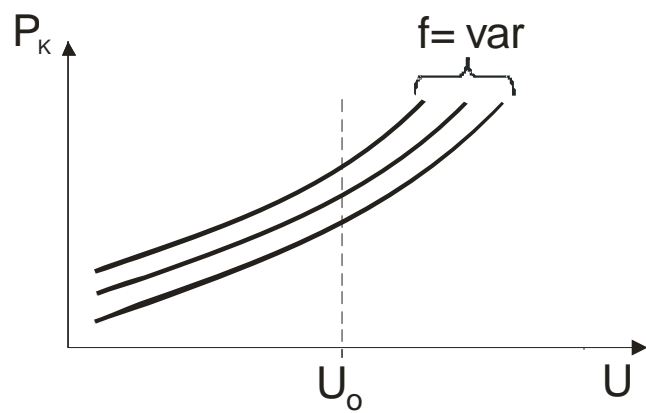
Vastavalt juhuslike protsesside teooriale võib koormusi kirjeldada sobivate tõenäosuskarakteristikute abil. Ette on võimalik prognoosida ainult koormuse tõenäosuskarakteristikuid.

Koormuste sõltuvusi sagedusest ja pingest püsiolukorras nimetatakse koormuste staatilisteks karakteristikuteks:

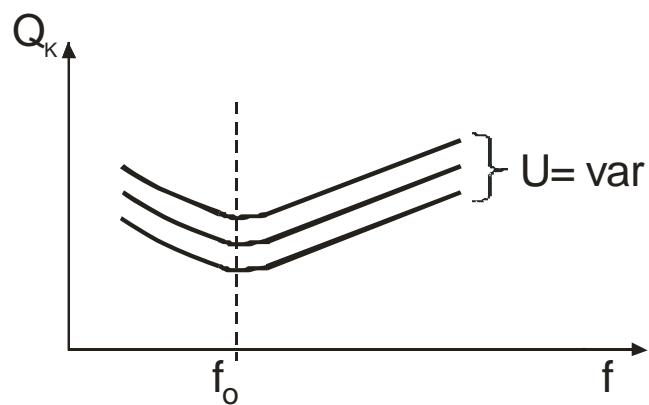
$$\begin{aligned} P_K &= P_K(f, U), \\ Q_K &= Q_K(f, U). \end{aligned} \quad (2.4)$$



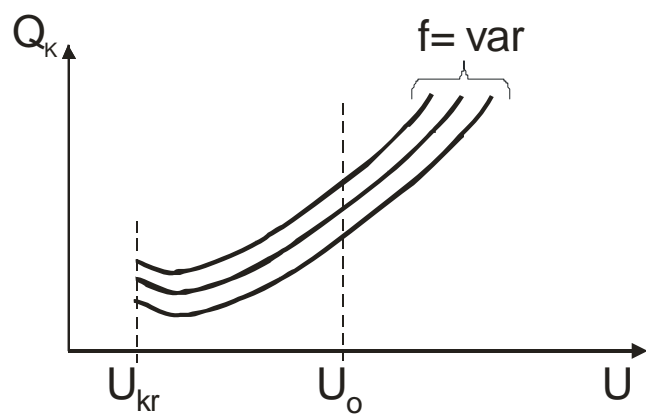
Joonis 2.3



Joonis 2.4



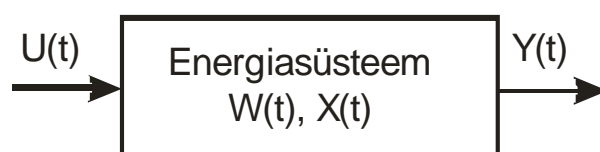
Joonis 2.5



Joonis 2.6

## 2.5. ES-i talitus

Üldisel kujul võib ESi kirjeldada süsteemina, millel on ajas muutuvad sisendid ( $U(t)$ ), väljundid ( $Y(t)$ ), olekumuutujad ( $X(t)$ ) ja süsteemi operaator ( $W(t)$ ) (Joon. 2.7).



Joonis 2.7. Energiasüsteemi üldine mudel

ES talitleb. Muutujad, milliseid kasutatakse talitluse kirjeldamiseks nimetatakse **talitluse muutujateks** või **talitluse parameetriteks**. Talitluse muutujateks üldises ESi mudelis on muutujad  $U$ ,  $X$ ,  $Y$ , kus igaüks neist on vektormuutuja.

Talitluse konkreetseteks muutujateks (parameetriteks) on sagedus, pinged, voolud, aktiiv- ja reaktiivkoormused, võimsusvood liinides, kütusekulu jne.

Talitlust mistahes ajahetkel iseloomustavad talitluse muutujate väärtused sellel hetkel. Talitlust mingis ajaperioodis  $T$  iseloomustavad talitluse muutujate muutumise protsessid selles ajaperioodis:  $U(t)$ ,  $X(t)$ ,  $Y(t)$ .

Millised muutujad on sisenditeks, väljunditeks ja olekumuutujateks, see sõltub sellest, millise eesmärgiga me ES modelleerime.

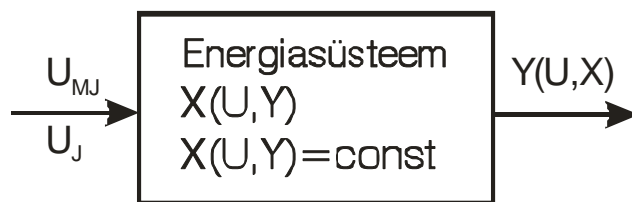
Tehnoloogilisest seisukohast võiks ESi vaadelda süsteemina, kus sisenditeks on energiaressursid ehk primaarenergia (kütused, veeenergia, tuuleenergia, päikeseenergia) ja väljundiks energiasüsteemi koormused või tarbitud elektrienergia. Kuid tegelikult energiasüsteemi talitlust ei juhitata ressurside abil vaid ressurside kulu ja piiranguid arvestades.

ES on osaliselt juhitav süsteem, kus mittejuhitavateks sisenditeks on energiasüsteemi tarbijapoolsed koormused. Juhitavateks sisenditeks on iga energiaploki olek (töös, mittetöös) või iga elektrijaama töösolevate agregaatide koosseis ning töösolevate energiaplokkide või elektrijaamade aktiiv- ja reaktiivkoormused ning reaktiivvõimsuse allikate genereeritavad võimsused jpm. Väljunditeks oleksid eesmärgid, mida juhtimisega tahame saavutada. Näiteks, kütusekulu minimaalsus ajaperioodis  $T$ , minimaalne keskkonna saastamine ajaperioodis  $T$ , võimsuste bilanss igal ajahetkel jm. Seejuures tuleb kõiki muid muutujaid vaadelda kui olekumuutujaid. Olekumuutujad on üldjuhul sisendite ja väljundite funktsioonid. Kui on vajalik vaadelda ESi, kus üks või mitu olekumuutujat on fikseeritud, siis tuleb, siis tuleb neid olekumuutujate võrrandeid vaadelda kui lisatingimusi süsteemi mudelile või vaadelda neid olekumuutujaid sõltumatute juhitavate sisenditena.

Arvestades ES juhitavust, tuleks lähtuda mudelist joonisel 2.8.

ES-i talitlust saab täpsemalt kirjeldada ainult matemaatiliste mudelite abil. Talitluse matemaatiline mudel koosneb:

- talitluse parameetritest ehk muutujatest,
- talitluse võrranditest,
- kitsendustest.



Joonis 2.8. ESi juhitavust kajastav mudel

Sõltuvalt talitluse muutujate muutumisest eristatakse järgmisi talitluse liike:

- püsi ehk statsionaarne talitus deterministlikus mõttes,
- muutuvtalitus.

Talitus võib olla statsionaarne:

- deterministlikus mõttes ehk olla staatiline - kui talitluse muutujad ei muutu,
- tõenäosuslikus mõttes - kui talitluse muutujate keskvärtused ja dispersioonid on konstantsed ning autokovariatsiooni funktsioonid sõltuvad ainult ajahetkede vahest  $\tau$ ,
- määramatuse mõttes - kui talitluse muutujate määramatuse intervallid ei muutu;
- ebamäärasuses mõttes - kui talitluse muutujate ebamäärasus karakteristikud ei muutu.

Muutuv talitus võib olla:

- perioodiliselt muutuv - talitluse muutujate väärtused korduvad kindla perioodi järgi;
- peaaegu perioodiliselt muutuv - talitluse muutujate väärtused ei kordu kindla perioodi järgi, kuid talitluse muutumise protsesse saab kirjeldada analoogiliste matemaatiliste valemite abil nagu perioodilisi protsesse;
- siirde- ehk üleminekutalitus - ES-i läheb ühest olekust teise.

Laiat kasutamist on leidnud järgmine talitluste liigitus:

- **normaalolukord ehk normaaltalitus** - kõik talitluse muutujad on lubatud piirides, ES on selle talitluse tarbeks projekteeritud ja loodud;



- **häireolukord** ehk **raskendatud talitus** ehk **peaaegu normaaltalitus** - mõned talitluse muutujad on väljaspool lubatud piire, avarii tõenäosus on suurenenud, kuid selline ES-i talitus on siiski lubatud;
- **avariiolukord** ehk **avariitalitus** - mitmed talitluse muutujad on järsult kõrvale kaldunud normaalväärtustest, avariitalitus tuleb võimalikult kiiresti likvideerida;
- **avariijärgne olukord** ehk **avariijärgne talitus** - talitus, millesse ES võib sattuda pärast avarii likvideerimist, avariijärgne talitus on lubatud ainult teatud ajaperioodi jooksul.

ES-i talitluse muutujate vahelisi seoseid kirjeldavad elementide sisend-väljund karakteristikud või süsteemi või selle elementide (osade) vahelised võrrandid.

Elementide põhikarakteristikuteks on:

- kulukarakteristik,
- erikulukarakteristik,
- marginaalkulukarakteristik.
- kasutegurikarakteristik.

Vaatleme elementi, mille sisendiks on  $U$  ja väljundiks  $Y$ :

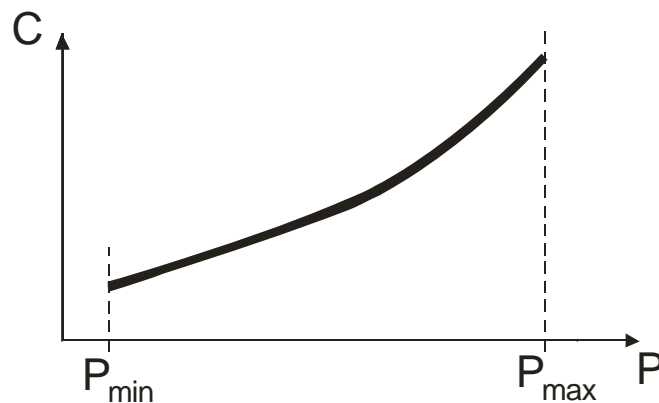


Joonis 2.9.

1. Kulukarakteristikuks nimetatakse sõltuvust:

$$C = C(P) \quad (2.5)$$

Kulukarakteristik näitab kulutuste sõltuvust sisendis elemendi koormusest ehk väljundist

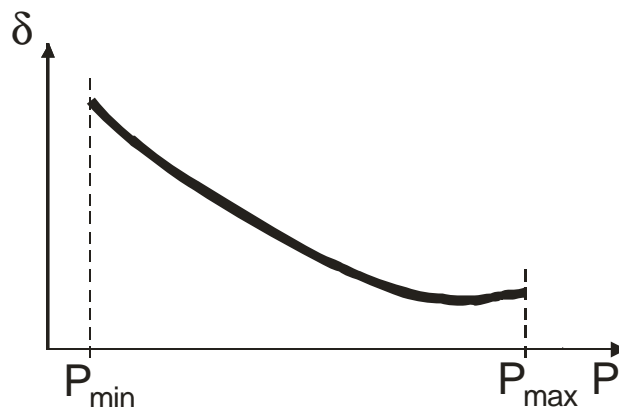


Joonis 2.10.

2. Erikulukarakteristikuks nimetatakse

$$\delta = \delta(P) = \frac{C}{P} \quad (2.6)$$

Erikulu karakteristik näitab

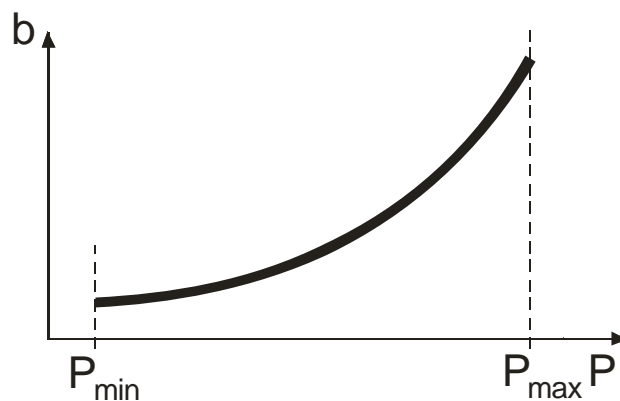


Joonis 2.11.

3. Marginaalkulu ehk kulude suhtelise juurdekasvu karakteristik näitab, kui palju muutuvad kulutused kui väljund muutub ühe ühiku võrra (joon. 2.12):

$$b = \frac{\partial C}{\partial P} \quad (2.7)$$

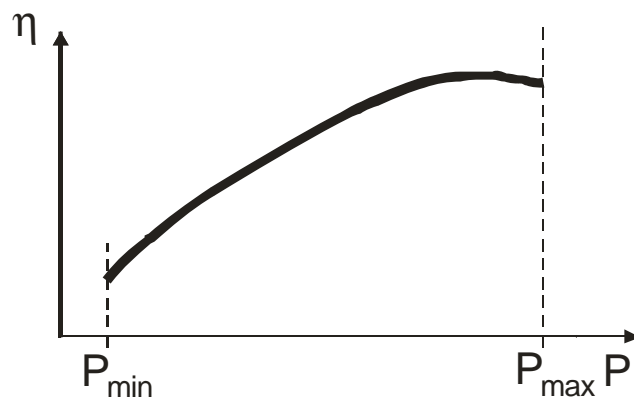
Marginaalkulu näitab kui palju muutuvad kulud sisendis kui väljundit suurendada ühe ühiku võrra.



Joonis 2.12.

4. Kasuteguri karakteristik, näitab kasuteguri sõltuvust koormusest ehk väljundist (joon. 2.13):

$$\eta = \eta(P) \quad (2.8)$$



Joonis 2.13.

Seosed elementide karakteristikute vahel on järgmised:

$$C(P) = C_0 + \int_{P_{0\min}}^P b(\xi) d\xi = \delta(P) \times P \quad (2.9)$$

$$b(P) = \frac{\partial \delta(P)}{\partial P} \times P + \delta(P) \quad (2.10)$$

$$\delta(P) = \frac{C_0 + \int_{Y_{0\min}}^Y b(\xi) d\xi}{P} \quad (2.11)$$

M. Valdma "Energiasüsteemid", 2008

ES-i elementide karakteristikud sõltuvad paljudest teguritest. Elementide karakteristikud arvutatakse teatud parameetrite järgi või määratakse eksperimentaalselt. Karakteristikud võivad ajas muutuda ja siis on tarvis neid korrigeerida.

Talitluse võrrandid määravad seosed talitluse muutujate vahel. Nimetatud seosed sõltuvad süsteemi skeemist ja elemente iseloomustavatest parameetritest.

Olgu  $Z$  - talitluse muutujate vektor ja  $W$  - mittejuhitavate suuruste vektor. Siis võib ES-i talitluse võrrandid kirjutada üldkujul selliselt:

$$F(Z, W) = 0, \quad (2.12)$$

kus  $F$  - vektorfunktsioon.

Süsteemi talitluse võrranditest iga võrrand määravad ühe muutuja kui sõltuva muutuja teistest. Seega  $n$  võrrandit määrab kindlaks  $n$  sõltuvat muutujat. Ülejäänud talitluse muutujad on sõltumatud muutujad.

Tähistades sõltuvad muutujad sümboliga  $X$  ja sõltumatud muutujad - sümboliga  $Y$ , võime süsteemi võrrandid kirjutada kujul:

$$F(X, Y, W) = 0 \quad (2.13)$$

või

$$X = X(Y, W). \quad (2.14)$$

Sõltuvused (2.12), (2.13) kujutavad endast üldjuhul ilmutamata funktsioone.

Kitsendusi esitatakse sageli võrratuste kujul. Näiteks:

$$G(X, Y, W) \leq 0 \quad (2.15)$$

või

$$\begin{aligned} X^- &\leq X \leq X^+ \\ Y^- &\leq Y \leq Y^+ \end{aligned} \quad (2.16)$$

Seega hetktalitluse matemaatilise mudeli saab avaldada kujul (2.13), (2.15) või (2.16).

## 2.6. Talitluse valve ja juhtimine

ES-le ja selle talitlusele esitatakse järgmisi nõudeid:

- 1) ES peab tagama tarbijate katkematu varustamine kvaliteetse elektri ja soojusega võimalikult väikeste kuludega nüüd ning tulevikus;
- 2) ES-i toimimine peab olema ohutu ja piisavalt kõrge töökindlusega;
- 3) ES-i talitus peab olema stabiilne ja vastama tehnilistele kitsendustele, keskkonnakaitse alaste nõuetele ning majanduslikele, sotsiaalsetele jt. kitsendustele.
- 4) avariolukordade kiire ja efektiivne likvideerimine.

Kuna energia tarbimine pidevalt muutub, tuleb vastavalt reguleerida elektrienergia ja soojuse genereerimist, edastamist ja jaotamist.

ES-i talitluse juhtimise ülesanne on väga keerukas optimeerimisprobleem, kus sihifunktsiooniks on energiafirma (energiafirmade) tootmiskulude minimeerimine või kasumi maksimeerimine piisavalt pika ajaperioodi jooksul, arvestades lisatingimustena eesmärgi (nõudeid) 1-4 ning teisi tehnilisi ja majanduslikke kitsendusi. Optimeerimisülesandes peab ajaperiood olema nii pikk, et selle suurendamine ei muuda praegusi otsuseid.

Juhtimise põhietapid on:

- 1) info hankimine ja ettevalmistamine,
- 2) optimaalsete plaanide koostamine ehk otsuste vastuvõtmine (optimeerimine),
- 3) otsuste realiseerimine,
- 4) tagasiside – analüüs ja otsuste korrigeerimine.

Globaalne ES-i talitluse juhtimise ülesanne on vaja jagada alamülesanneteks, moodustada nendest hierarhilisi süsteeme ning nende hierarhiliste süsteemide kaudu tagada ES-i talitluse optimaalne juhtimine.

Aja järgi jaotatakse juhtimisülesanded järgmistesse rühmadesse:

- 1) talitluse pikaajaline planeerimine - eelolevaks kuuks, aastaks;
- 2) talitluse lühiajaline planeerimine - eelolevaks ööpäevaks, nädalaks;
- 3) operatiivne planeerimine - eelolevaks tunniks (tundideks);
- 4) automaatjuhtimine ja talitluse reguleerimine reaalajas.

Objektide järgi eristatakse järgmisi ülesandeid:

- 1) üksiku agregaaadi juhtimine
- 2) paralleelselt töötavate agregaatide grupi või energiaploki juhtimine,
- 3) elektrijaama või elektrivõrgu juhtimine,

M. Valdma "Energiasüsteemid", 2008

- 3) energiasüsteemi juhtimine,
- 4) energiasüsteemide vahelise koostöö juhtimine.

Lisaks sellele liigitatakse juhtimisülesandeid veel juhitavate faktoreite järgi:

- 1) aktiivvõimsuste juhtimine,
- 2) agregaatide koosseisu juhtimine,
- 3) ühendusskeemi juhtimine,
- 4) reaktiivvõimsuste ja pingete juhtimine
- 5) reservide juhtimine
- 6) aktiiv- ja reaktiivvõimsuste ning pingete kompleksne juhtimine

Talitluse juhtimist nimetatakse ka dispetšijjuhtimiseks. See on väga vastutusrikas tegevus. Energiasüsteemi juhtimiseks on loodud vastavad juhtimiskeskused. Eestis on energiaseadusega loodud Eesti Elektrisüsteemi Juhtimiskeskus.

Eesti Elektrisüsteemi Juhtimiskeskus:

- 1) teostab koos elektrivõrkude ning -jaamade operaatoritega Eesti elektrisüsteemi talitluse ööpäevaringset valvet (seiret) ja operatiivjuhtimist ning korraldab operatiivselt elektrisüsteemis tekkinud häirete ja avariide likvideerimist;
- 2) planeerib Eesti elektrisüsteemi talitlust;
- 3) koordineerib ja korraldab koostööd (sealhulgas teabeedastuse ja töötalusalast) elektri- ja -võrkude, reguleerivate tarbijate ja teiste riikide elektrisüsteemidega;
- 4) koordineerib elektrisüsteemi kaitse- ja automaatikasüsteemide tööd elektri- ja -võrkudes, põhivõrgust toidetavate tarbijate juures ning kooskõlastab kaitse- ja automaatikasüsteemid teiste riikide elektrisüsteemidega.

Talitluse juhtimiskeskused on ka elektri- ja -võrkudes ja jaotusvõrkudes. Vaata vastavat skeemi.

**ES-ide ühenduse talitluse juhtimiseks** luuakse spetsiaalne ühendatud juhtimiskeskus või jaotatakse juhtimisfunktsioonid üksikute ES-ide juhtimiskeskuste vahel. Esimesel juhul on tegemist tsentraalse juhtimissüsteemiga ja teisel juhul – jaotatud funktsioonidega juhtimissüsteemiga.

Skeemid.



### 3. ENERGIASÜSTEEMI NORMAALTALITLUS

#### 3.1. Võimsuse edastamine

Elektriliin kujutab endast ühtlaselt jaotatud parameetritega elektriahelat, mida võib vaadelda neliklemmina. Neliklemmi võrrandid maatriks kujul:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ I_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_l \\ I_l \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

ehk lahti kirjutatult:

$$U_a = AU_l + BI_l \quad (3.1A)$$

$$I_a = CU_l + DI_l \quad (3.1B)$$

kus pinged  $U_a$ ,  $U_l$  faasidevahelised pinged liini alguses ja lõpus ning  $I_a$ ,  $I_l$  – voolud liini alguses ja lõpus.

Neliklemmi kordajad  $A$ ,  $B$ ,  $C$  ja  $D$  sõltuvad liini aseseemist. Homogeense liini neliklemmi kordajad (konstandid) on järgmised:

$$A = D = \cosh kl \quad (3.2)$$

$$B = Z_s \sinh kl \quad (3.3)$$

$$C = \frac{1}{Z_s} \sinh kl \quad (3.4)$$

$$AD - BC = 1. \quad (3.5)$$

Toodud valemities on kasutatud järgmisi tähiseid:

$k$  - levitegur:

$$k = \sqrt{ZY} = \alpha + j\beta \quad (3.6)$$

$Z_s$  - lainetakistus:



$$Z_s = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{r + jx}{g + jb}} \quad (3.7)$$

Tavaliselt kasutatakse elektriliini modelleerimiseks koondatud parameetritega lihtsustatud aseskeeme, mis on T-,  $\Pi$ -,  $\Gamma$ - kujulised. Neliklemmi konstandid erinevate aseskeemide jaoks on toodud raamatus E. Tiigimägi "Elektrivõrgud".

Kasutades  $\Pi$ -kujulist aseskeemi, võib liini alguse ja lõpu võimsused avaldada järgmisel kujul:

$$P_a = -\frac{U_a U_b}{Z} \cos(\theta + \delta) + \frac{U_a^2}{Z} \cos \theta + G_a U_a^2 \quad (3.8)$$

$$Q_a = -\frac{U_a U_b}{Z} \sin(\theta + \delta) + \frac{U_a^2}{Z} \sin \theta - B_a U_a^2 \quad (3.9)$$

$$P_b = -\frac{U_a U_b}{Z} \cos(\theta - \delta) - \frac{U_b^2}{Z} \cos \theta - G_b U_b^2 \quad (3.10)$$

$$Q_b = \frac{U_a U_b}{Z} \sin(\theta - \delta) - \frac{U_b^2}{Z} \sin \theta + B_b U_b^2 \quad (3.11)$$

Seejuures

$$S_a = P_a + jQ_a \quad - \text{on näivvõimsus liini alguses,}$$

$$S_b = P_b + jQ_b \quad - \text{näivvõimsus liini lõpus,}$$

$Z$ ,  $\theta$ - liini pikinäivtakistus ja selle nurk,  
 $\delta$  - liini alguse ja lõpu pingete vaheline nurk.

$$Y_a = G_a + jB_a \quad - \text{liini algusepoolne näivjuhtivus,}$$

$$Y_b = G_b + jB_b \quad - \text{liini lõpupoolne näivjuhtivus.}$$

Võimsuse edastamise küsimusi vaadeldakse sageli lihtsustatult. Jätame arvesse võtmata liini juhtivuse ja eeldame, et liini pikitakistuseks on ainult liini induktiivtakistus. Sel juhul neliklemmi kordajad  $A=D=1$ ,  $B=X$ ,  $C=0$ . Siis liini võimsuse avaldistest järgmise võrduse:

$$P_a = P_b = \frac{U_a U_b}{X} \sin \delta . \quad (3.12)$$

Joonistage selle funktsiooni graafik.

Seda nimetatakse võimsuse nurkkarakteristikuks. Siit saame läbilaskevõime:

$$P_a = P_b = \frac{U_a U_b}{X} \quad (3.13)$$

Nagu näha ei arvesta me nüüd aktiivvõimsuskadusid liinis. Tegelikult on liinis aktiiv- ja reaktiivvõimsuskaod:

$$\Delta S = \Delta P + j\Delta Q \quad (3.14)$$

kus

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R + \Delta P_{\text{koroonaa}} \quad (3.15)$$

$$\Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X - U^2 B \quad (3.16)$$

Võimsuskaod esinevad kõikides ES-i elementides.

### 3.2. Püsitalitluse võrrandid

Elektrivõrk koosneb paljudest harudest ja sõlmedest, millega on ühendatud generaatorid ja tarbijad. Võimsuste jagunemist elektrivõrgus ja kogu ES-i püsitalitlust kirjeldavad Kirchoff'I ja Ohmi seadused.

ES-i talitluse arvutusi tehakse selleks, et:

- määrata ES elementide koormused,
- määrata pinged elektrivõrgus,
- määrata kaod elektrivõrgu osades ja elementides,
- määrata reaktiivvõimsuse kompenseerimise tarve,
- määrata sobivaimad võrgu lahutuspunktid,
- määrata võrgu tugevdamise vajadused jpm.

Elektrivõrgu püsitalitlust arvutatakse nii talitluse juhtimisel, analüüsil kui ka projekteerimisel. Tegemist on ühe keerukama ülesandega, mille lahendamiseks on välja töötatud spetsiaalsed arvutiprogrammid.

Keerukate võrkude arvutamisel on vaja teha ratsionaalseid lihtsustusi.

Vaatleme keeruka elektrivõrgu  $i$ -ndat sõlme ja kirjutame selle kohta välja Kirchoffi I seaduse:

$$I_i = Y_{i0}U_i + \sum_j Y_{ij}(U_i - U_j), \quad (3.17)$$

kus

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}.$$

Võrduse (3.17) võib kirjutada järgmisel kujul:

$$I_i = (Y_{i0} + \sum_j Y_{ij})U_i - \sum_j Y_{ij}U_j \quad (3.18)$$

Kui võrrand (3.18) kirjutada kõikide sõlmede kohta, saadakse maatriksvõrrand:

$$I = YU. \quad (3.19)$$

Siit

$$U = Y^{-1}I, \quad (3.20)$$

kus  $Y^{-1}$  näivjuhtivuste maatriksi pöördmaatriks.

Esitatud võrrandid on lineaarsed ja seepärast on neid suhteliselt lihtne lahendada. Kuid probleem on selles, et tavaliselt ei teata koormuste voolusid vaid aktiiv- ja reaktiivvõimsusi:

$$S_i = P_i + jQ_i = U_i I_i^*. \quad (3.21)$$

Minnes üle voolude võrranditelt võimsuste bilansi võrranditele saame mittelineaarsed võrrandid:

$$P_i = (G_{i0} + \sum_j G_{ij})U_i^2 - \sum_j U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3.22)$$

$$Q_i = -(B_{i0} + \sum_j B_{ij})U_i^2 - \sum_j U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (3.23)$$

$i=1, \dots, M-1$ .

Siin juhtivuste summa on sõlme omajuhtivus ja sõlmede vahelised juhtivusi nimetatakse vastastikuseks juhtivuseks.

Elektrisüsteemis on M-1 sõltumatut sõlme. Ühte sõlme, kus on antud pinge vektor (moodul ja nurk), nimetatakse baassõlmeks.

Seega on igas sõlmes 4 muutujat  $P_i, Q_i, U_i, \delta_i$  ja neid seob 2 võrrandit.

Lihtne on sõlmevõrrandite lahendamine siis, kui U ja  $\delta$  on antud ja leida tuleb P ja Q. Sõlmevõrrandeid on keerukas lahendada siis, kui tuleb leida U ja  $\delta$  ning antud on P ja Q.

Reaalses süsteemis on:

- 1) baassõlm, kus on antud pinge vektor,
- 2) koormussõlmed, kus on antud P ja Q,
- 3) elektrijsõlmed, kus on P ja Q määratakse optimaalsuse tingimustes ning on sellisel juhul ette antud,
- 4) segasõlmed, kus on nii koormused kui elektrijsõlmed.

Üldjuhul

$$P_{gi} - P_{ki} = P_i(U, \delta), \quad (3.24)$$

$$Q_{gi} - Q_{ki} = Q_i(U, \delta).. \quad (3.25)$$

Püsiseisundi arvutamine võrrandite (3.22), (3.23) alusel kujutab endast mittelineaarse võrrandisüsteemi lahendamist, kus võrrandite arv võib ulatuda tuhandetesse.

Taolist ülesannet on võimalik lahendada vastavate iteratsioonimeetoditega:

- Gaussi meetod,
- Seideli meetod,
- Newtoni meetod.

Iteratsiooni meetodite puhul tekkivad probleemid meetodi koonduvusega. Suhteliselt kiiresti koondub Newtoni meetod. Enne kui hakata mingit meetodit kasutama, tuleb püüda välja selgitada, kas see meetod koondub.

ES püsioleku arvutamiseks on koostatud keerukaid arvutiprogramme, mis võimaldavad arvutada võrke 1000, 2000, 3000 jne sõlmega. Suurte võrkude arvutamisel tekib tulemuste analüüsi probleem. Ka see tuleks automatiseerida.

Kui täpsete võrguvõrrandite lahendamine osutub liiga keerukaks või võtab liiga palju aega, tuleks võrrandeid eelnevalt lihtsustada. Lihtsustamiseks on kaks põhilist moodust:

- võrrandite lineariseerimine,

- elektrivõrgu ekvivalenteerimine.

Talitluse võrrandite lineariseerimiseks arendatakse võrrandid (3.24) ja (3.25) Taylori ritta ja võetakse sealt 2 esimest liiget. Võrrandid lineariseeritakse fikseeritud baasseisundi suhtes, mille tähistame indeksiga 0. Baasseisund tuleb arvutada täpsete võrrandite alusel.

Lineariseeritud püsitalitluse võrrandid omavad järgmise üldkuju:

$$P_{gi} - P_{ki} = P_i(U_o, \delta_o) + \sum_j \frac{\partial P_i(U_o, \delta_o)}{\partial U_j} (U_j - U_{jo}) + \sum_j \frac{\partial P_i(U_o, \delta_o)}{\partial \delta_{ij}} (\delta_{ij} - \delta_{ijo}), \quad (3.26)$$

$$Q_{gi} - Q_{ki} = Q_i(U_o, \delta_o) + \sum_j \frac{\partial Q_i(U_o, \delta_o)}{\partial U_j} (U_j - U_{jo}) + \sum_j \frac{\partial Q_i(U_o, \delta_o)}{\partial \delta_{ij}} (\delta_{ij} - \delta_{ijo}), \quad (3.27)$$

kus  $i=1, \dots, M; j=1, \dots, M$  ning  $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ .

Lineaarsete seisundivõrrandite lahendamine on tunduvalt lihtsam, kuid saadav on ligikaudne.

### 3.3. Talitluse dünaamika ja juhuslikud faktorid

ES-i koormus pidevalt muutub. Koormuse muutused võib jagada 3 gruppi:

- 1) kiired ebaregulaarsed muutused väga väikese amplituudiga (0,1-0,5%) ja perioodiga 5-10 sekundit;
- 2) ebaregulaarsed muutused väikese amplituudiga (0,5-1,5%) ja perioodiga mõni minut;
- 3) aeglased koormuse muutused.

Koormuse muutusi, mis kuuluvad 1. gruppi, reguleerivad ja ka tekitavad sünkroniseerivad jõud. Sellised koormuse hälbed põhjustavad kiireid ja väga väikesi sageduse muutusi (0,05%). Seepärast neid hälbeid ei ole tarvis spetsiaalselt reguleerida ning neid võib talitluse arvutamisel mitte arvestada.

Teise gruppi kuuluvad koormuse muutused on tingitud tarbimise ebaregulaarsest muutumisest sõlmedes (elektritransport jm.). Need põhjustavad sageduse hälbeid 0,1-0,3%. Koormuse muutustele, mis põhjustavad sageduse hälbeid enam kui 0,2%, peavad reageerima talitluse reguleerimissüsteemid.

Kolmanda grupi moodustavad suhteliselt aeglasel koormuse muutused, mis on tingitud tehnoloogilistest ja elukondlikest põhjustest ning meteoroloogilistest tingimustest. Need mõjutavad otseselt ES-i sagedust ning vastavalt nendele koormuse muutustele tuleb tingimata reguleerida sagedust jt. talitluse parameetreid.

Summaarse koormuse muutumise kiirus ei ole ööpäeva jooksul ühesugune. Tippkoormustundidel võib koormus kasvada kuni 1,5% minutis. Ühes tunnis võib koormus enne tipptundi kasvada 5-6%. Koormuse vähenemine toimub veelgi suurema kiirusega. Näiteks keskööl võib koormus väheneda 2-3 korda suurema kiirusega kui seda on koormuse suurenemise kiirus.

Ülalvaadeldud koormuse muutused toimuvad ES-i normaaloleku puhul. Seejuures, alati kui süsteem läheb ühest olekust teise, toimub ka vastav siirdeprotsess. Kuid nn. normaalsed siirdeprotsessid avaldavad väikest mõju ES-i talitlusele. Seepärast võib normaaloleku dünaamikat kirjeldada ilma siirdeprotsesside arvestamiseta. Sel juhul on talitlust iseloomustavateks parameetriteks talitluse muutujate tunni keskmised väärtused ja talitluse dünaamikat kirjeldatakse püsiseisundi võrranditega, kuhu on sisse toodud aeg kui parameeter.

Ilma siirdeprotsesside arvestamiseta võib ES-i talitlust ajaperioodis  $T$  kirjeldada järgmiste võrrandite abil:

$$P_{gi}(t) - P_{ki}(t) = P_i(U(t), \delta(t), t), \quad (3.28)$$

$$Q_{gi}(t) - Q_{ki}(t) = Q_i(U(t), \delta(t), t), \quad (3.29)$$

kus

$$i=1, \dots, M \text{ ja } t=1, \dots, s.$$

Seega kirjeldavad talitluse muutumist ajaperioodis  $T$  talitluse muutujate protsessid  $P_{gi}(t), Q_{gi}(t), P_{ki}(t), Q_{ki}(t), U_i(t), \delta_i(t)$ , kus viimased on seotud omavahel võrrandite (3.28) ja (3.29) abil. Seejuures ajaperiood  $T$  vaadeldakse koosnevana  $s$  diskreetsest intervallist.

Talitluse arvutamiseks ajaperioodis  $T$  tuleb püsitalitluse võrrandeid lahendada iga ajaintervalli jaoks, see tähendab seda, et püsitalitluse arvutusi tuleb korrata  $s$  korda.

Talitluse muutujate muutusi analüüvides selgub, et märkimisväärset osa nende muutustes omavad juhuslikud faktorid. Juhuslik on kõigepealt sõlmekoormuste muutumine, mis muudab juhuslikuks kogu ES-i talitluse. Kuid ES-I talitlusele

mõjuvad ka mitmed teised juhuslikud faktorid nagu seadmetele mõjuvad juhuslikud häired, generaatorite rootorite vibreerimine, ilmastiku tingimused, personali vead jm.

Seepärast ei saa ES-i talitlust vaadelda kui puht deterministlikku protsessi, vaid kui keerukat juhuslikku ehk stohhastilist protsessi, mis võib koosneda paljudest eritüübilistest komponentidest. Üldjuhul võib ES-I talitlusele mõjuv välisfaktor või talitluse muutuja koosneda 4 põhikomponendist, millisteks on:

- 1) determineeritud komponent,
- 2) tõenäosuslik komponent,
- 3) intervallis määramatu komponent,
- 4) ebamäärane komponent.

Determineeritud komponendiks nimetatakse seda osa muutujas või protsessis, mis muutub regulaarselt ja mida on võimalik täpselt ette ennustada.

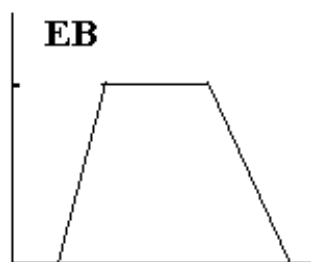
Tõenäosusliku komponendi all mõistame sellist juhuslikku komponenti, mille kohta on teada täpsed tõenäosuslikud karakteristikud. Teisiti öeldes, tõenäosusliku komponendi tõenäosuslikke karakteristikuid on võimalik täpselt ette ennustada.

Intervallis määramatu on see osa muutuja või protsessi väärtusest, mille kohta tõenäosuslikud karakteristikud on ebatäpsed või puuduvad üldse, kuid on täpselt teada intervallid, kus selle tõenäosuslikud karakteristikud või muutuja (protsessi) väärtused asuvad.

Ebamäärane on see osa muutuja (protsessi) väärtusest, mille kohta puuduvad täpsed väärtuste või tõenäosuslike karakteristikute intervallid. Ebamääraseid komponente kirjeldatakse eksistentsi- ehk ebamäärasusfunktsioonide abil.

Ebamäärasusfunktsioon määratleb ebamäärase hulga, kus ebamäärase komponendi väärtused arvatavasti võivad olla.

Näiteks:



Ebamäärasusfunktsioon  $EB=EB(P)$

Seega võib stohhastilisi muutujaid üldjuhul vaadelda järgmise summana:

$$\tilde{x}(t) = x_{\text{det}}(t) + \Delta x_m(t) + \Delta x_{m\Box\Box}(t) + \Delta x_{eb}(t). \quad (3.30)$$

kus

- $x_{\text{det}}(t)$  - mittejuhuslik, determineeritud komponent:  
 $x_{\text{det}}(t) = E\tilde{x}(t) = \bar{x}(t),$
- $\Delta x_m(t)$  - tõenäosuslik komponent,
- $\Delta x_{m\Box\Box}(t)$  - intervallis määratu komponent,
- $\Delta x_{eb}(t)$  - ebamäärane komponent.

Mittejuhitavate parameetrite väärtused tuleb tavaliselt nende mineviku alusel ette ennustada. Juhitavate parameetrite puhul determineeritud komponendid optimeeritakse talitluse juhtimise protsessis. Kuid nende stohhastilised komponendid prognoositakse.

Stohhastiliste faktorite prognoosimine baseerub matemaatilisel statistikal. Tänapäeval arvestatakse peamiselt determineeritud ja tõenäosuslikke komponente. Määramatute ja ebamääraste komponentide arvestamine on veel teadusliku uurimise tasemel.

### 3.4. Talitluse stohhastilised mudelid

Kuna ES-I talitlust mõjutavad mitmed juhuslikud faktorid, on kogu ES-I talitus teatud määral juhuslik. Juhuslikud faktorid tekitavad süstemaatilisi vigu talitluse arvutamisel ja planeerimisel. Seepärast tuleks juhuslikke faktoreid arvestada ka talitluse võrrandites.

Juhuslikkuse arvestamisel omandavad talitluse võrrandid järgmise kuju:

$$\tilde{P}_{gi}(t) - \tilde{P}_{ki}(t) = \tilde{P}_i(\tilde{U}(t), \tilde{\delta}(t), t), \quad (3.31)$$

$$\tilde{Q}_{gi}(t) - \tilde{Q}_{ki}(t) = \tilde{Q}_i(\tilde{U}(t), \tilde{\delta}(t), t), \quad (3.32)$$

kus märgib vastava muutuja juhuslikku iseloomu.

Neid ja sellest saadavaid modifikatsioone nimetatakse **talitluse stohhastilisteks võrranditeks**.

Võrrandid (3.29) ja (3.30) näitavad seda, et füüsikalised talitluse võrrandid kehtivad ka muutujate juhuslike väärtuste puhul. Siit tulenevad teatud deterministlikud seosed



juhuslike faktorite vahel. Võrrandid (3.29) ja (3.30) ei ole otseselt kasutatavad talitluse arvutamisel, kuid neist saab tuletada mitmeid olulisi modifikatsioone.

### Determineeritud ja tõenäosuslike komponentide arvestamine.

Võrranditest (2.31) ja (2.32) tuleneb, et vastavad sõlmede koormuste bilansivõrrandid kehtivad ka koormuste keskvaärtuste kohta. Keskvaärtusi siduvad võrrandid võib kirjutada kujul:

$$\bar{P}_{gi}(t) - \bar{P}_{ki}(t) = \bar{P}_i(\bar{U}(t), \bar{\delta}(t), t), \quad (3.33)$$

$$\bar{Q}_{gi}(t) - \bar{Q}_{ki}(t) = \bar{Q}_i(\bar{U}(t), \bar{\delta}(t), t), \quad (3.34)$$

kus kriips muutuja peal tähendab vastava suuruse keskvaärtust.

Lisaks sellele kehtivad vastavad võrrandid ka hälvete kohta:

$$\Delta \tilde{P}_{gi}(t) - \Delta \tilde{P}_{ki}(t) = \Delta \tilde{P}_i(\bar{U}(t), \bar{\delta}(t), t), \quad (3.35)$$

$$\Delta \tilde{Q}_{gi}(t) - \Delta \tilde{Q}_{ki}(t) = \Delta \tilde{Q}_i(\bar{U}(t), \bar{\delta}(t), t). \quad (3.36)$$

Intervallilise määramatuse ja ebamäärasuse arvestamisel saame analoogilised võrrandid ((3.33) - (3.36)), kuid nende tähendus on teine.

Määramatuse tingimustes on kindlateks suurusteks vastava komponendi minimaalne ja maksimaalne väärtus.

Ebamääruse tingimustes võib mittejhuslikena vaadelda ebamäärasusfunktsioone.

Matemaatiliselt on probleem intervallis määramatute ja ebamääraste argumentidega funktsioonide arvutamises ja vastavate võrrandite lahendamises.

ES-i püsiseisundi arvutamist arvestades määramatuid ja ebamääraseid komponente on veel suhteliselt vähe uuritud. Seepärast me neid küsimusi detailsemalt ei vaata.

## 3.5. Siirdeprotsessid

## 3.6. Kokkuvõte

## **4. ENERGIASÜSTEEMI TALITLUSE OPTIMEERIMISE PÕHIMÕTTED**

### **4.1. Probleem**

Optimeerimise all mõeldakse mistahes tegevuses teatud mõttes optimaalse ehk parima variandi leidmist. ES-i võimaluste maksimaalseks kasutamiseks tuleb optimeerida nii ES-i funktsioneerimine kui ka areng.

Ka siin kehtib tuntud tõde, et kõike, mida on võimalik optimeerida, tuleb optimeerida ja mida ei ole võimalik optimeerida, see tuleb teha optimeeritavaks.

ES-i olemasolu võimaldab optimeerida elektrienergia genereerimist, edastamist ja jaotamist. Genereerimise optimeerimiseks tuleb valida optimaalne töös olevate agregaatide koosseis ja optimeerida koormusjaotus elektrijaama agregaatide vahel, omatarbeseadmete töö ja koormusjaotus elektrijaamade vahel.

Elektrienergia edastamist ja jaotamist on võimalik optimeerida vastavalt põhivõrgu ja jaotusvõrgu skeemi sobiva valiku ja reaktiivvõimsusallikate ning pinge reguleerimise teel põhi- ja jaotusvõrkudes. Samuti on ES-is võimalik optimeerida reserveid suurust ja jaotust, koostööd naaberenergiasüsteemidega jpm.

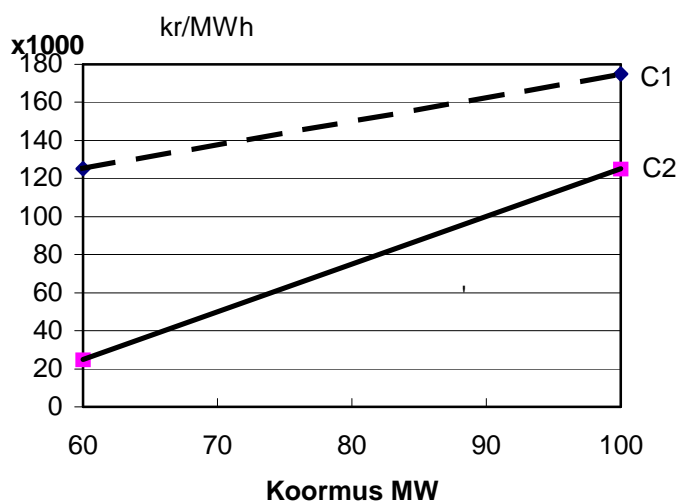
ES-i talitluse ehk funktsioneerimise optimeerimisel on kriteeriumiks talitlusest sõltuvate kulude miinimum. Kuna talitlusest sõltub peamiselt kütusekulu soojuselektrijaamades, siis valitakse optimumi kriteeriumiks soojuselektrijaamade kütusega seotud kulude summa miinimum energiasüsteemis või selle osas. Optimeerimisel peab arvestama ka kitsendusi ehk lisatingimusi ja mittejuhitavaid faktoreid. Lisatingimustena vaadeldakse energiakvaliteedi ja töökindluse nõudeid, tehnilisi piiranguid, keskkonnakaitse nõuded jt.

ES-i optimaalse funktsioneerimise tagamiseks tuleb optimaalseid otsuseid teha kõikidel juhtimise etappidel. Seega peavad olema optimaalsed: pikaajaline planeerimine, lühiajaline planeerimine, operatiivjuhtimine ja realiseerida optimaalsed plaanid ning operatiivjuhtimise otsused. Energiasüsteemide optimeerimine on üks keerukamaid optimeerimise probleeme üldse. Käesolevas kursuses tutvume ainult ES-i talitluse optimeerimise põhimõtetega. Põhjalikumalt käsitletakse optimeerimise

probleemi erikursuses "Energiasüsteemide optimaaljuhtimine" ja vastavates magistriõppe kursustes.

### Optimeerimisprobleemi näide 4.1

Vaatleme 2 genereerimisallikat, mille kulukarakteristikud on antud joonisel 4.1.



**Joonis 4.1.**

Kumba energiaüksust tuleb esimeses järjekorras koormata kui mõlemad energiaüksused töötavad minimaalkoormusel? Miks?

Koostame võimalikud koormamise stsenaariumid koormustele 60MW., 120MW ja 160MW. Tulemused on tabelis 4.1.

Tabel 4.1.

Summaarne koormus, PS MW	P1 MW	P2 MW	Kulud kokku: tuh.kr/h
60	60	0	125
60	0	60	25
120	60	60	150
160	60	100	250
160	100	60	200

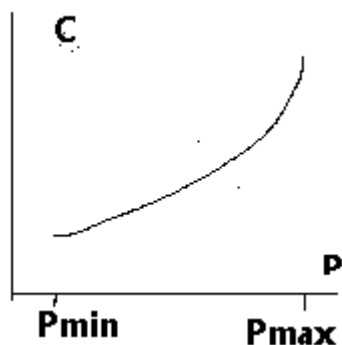
Kui mõlemad energiaüksused on töös, on optimaalne koormata esmalt 1. energiaüksust, seda selle kulude juurdekasv on väiksem.

Optimeerimine koormusel 160 MW võimaldab vähendada kulutusi 50 000 kr/h, mis antud juhul moodustab kogu kütusekulust 20 / 25%.

#### 4.2. Aktiivkoormuste jaotuse optimeerimine soojuselektrijaamade vahel

Vaatleme ES-i, kus töötab  $n$  soojuselektrijaama. Olgu iga SEJ kohta teada kütusekulu karakteristikud  $B_i = B_i(P_i)$ , kus  $i=1, \dots, n$ .

Kütusekulu karakteristikud allapoole rangelt kumerad funktsioonid.



Joonis 4.2. Energiaploki kütusekulu karakteristik.

Püstitame ülesande minimeerida summaarne kütusekulu ES-is lisatingimusel, et genereerimine vastaks tarbimisele ja elektrijaamade koormused oleksid lubatud piirides.

**Aktiivkoormuse optimeerimise ülesanne:**

$$\min \sum_{i=1}^n c_i B_i(P_i) \quad (4.1)$$

lisatingimustel, et

$$P_K + P_L(P) - \sum_{i=1}^n P_i = 0, \quad (4.2)$$

$$P_i^- \leq P_i \leq P_i^+, \quad i=1, \dots, n; \quad (4.3)$$

kus  $P_i, P_i^-, P_i^+$  - i-nda elektriijaama aktiivkoormuse ning selle minimaal- ja maksimaalväärtused;  $P_K$  - ES-i aktiivkoormus;  $P_L$  - aktiivvoimsuskaod elektrivõrgus.

Otsitavateks on elektriijaamade koormused. Aktiivvoimsuskaod sõltuvad elektrivõrgu ja elektriijaamade aktiivkoormustest. Tegemist on samuti allapoole kumera funktsiooniga.

### Optimaalsuse tingimused

Optimaalsuse tingimuste tuletamiseks moodustame Lagrange funktsiooni:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n C_i(P_i) + \mu(P_K + P_L - \sum_{i=1}^n P_i), \quad (4.4)$$

kus  $\mu$  on Lagrange kordaja. Nüüd on meil otsitavateks  $P_1, \dots, P_n, \mu$ .

Jätame arvesse võtmata võrratusekujulised lisatingimused (4.3) ning võtame Lagrange funktsioonist tuletised kõigi otsitavate järgi. Siis saame ülesandele (4.1) ja (4.2) järgmised optimaalsuse tingimused:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial P_i} = \frac{\partial C_i}{\partial P_i} + \mu \left( \frac{\partial P_L}{\partial P_i} - 1 \right) = 0, \quad i=1, \dots, n; \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \mu} = P_K + P_L - \sum_{i=1}^n P_i = 0. \quad (4.6)$$

Võrrandeid (4.5) nimetatakse koordinatsioonivõrranditeks ehk suhtelise juurdekasvu tingimusteks. Võrrand (4.6) kujutab endast aktiivvoimsuste bilansivõrrandit.

Arvestades võrratusekujulisi lisatingimusi (4.3), omandavad koordinatsioonivõrrandid järgmise kuju:

$$\frac{\partial C_i}{\partial P_i} + \mu \frac{\partial P_L}{\partial P_i} = \mu \quad \text{kui } P_i^- < P_i < P_i^+, \quad i=1, \dots, n; \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial P_i} + \mu \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \leq \mu \quad \text{kui } P_i = P_i^+, \quad i=1, \dots, n; \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial \mathcal{C}_i}{\partial P_i} + \mu \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \geq \mu \quad \text{kui } P_i = P_i^-, \quad i=1, \dots, n. \quad (4.9)$$

Seega arvestades ka võrratusekujulisi lisatingimusi on ülesande (4.1)-(4.3) lahendi optimaalsuse tingimused järgmised:

- 1)  $n$  suhtelise juurdekasvu ehk koordinatsiooni tingimust (4.7)-(4.9);
- 2) võimsuste bilansivõrrand

$$P_K + P_L - \sum_{i=1}^n P_i = 0, \quad (4.10)$$

3) lisatingimused:

$$P_i^- \leq P_i \leq P_i^+, \quad i=1, \dots, n. \quad (4.11)$$

Ülesande lahend on optimaalne siis ja ainult siis, kui on täidetud ülalnimetatud tingimused (4.7)-(4.11).

Avaldades võrranditest (4.5) Lagrange kordaja  $\mu$ , saame ülesandele (4.1), (4.2) järgmised optimaalsuse tingimused:

$$\frac{c_1}{1 - \sigma_1} = \dots = \frac{c_n}{1 - \sigma_n} = \mu, \quad (4.12)$$

$$P_K + P_L - \sum_{i=1}^n P_i = 0. \quad (4.13)$$

Siin

$$c_i = \frac{\partial \mathcal{C}_i}{\partial P_i},$$

$$\sigma_i = \frac{\partial P_L}{\partial P_i}.$$

Osatuletist  $c_i$  nimetatakse  **$i$ -nda elektrijaama kütusekulu suhteliseks juurdekasvuks ehk kütuse marginaalkuluks**. See näitab kui palju suureneb kütusekulu  $i$ -ndas jaamas, kui  $i$ -nda jaama koormust suurendada ühe ühiku võrra.

Osatuletis  $\sigma_i$  on **aktiivvõimsuskadude suhteline juurdekasv i-nda elektriijaama võimsuse järgi**. Viimane näitab kui palju muutuvad võimsuskadod elektrivõrgus kui I-nda elektriijaama koormust suurendada ühe ühiku võrra.

Osatuletise  $\sigma_i$  kohta kehtib järgmine võrratus:

$$-1 < \sigma_i < 1.$$

### Teoreem

Kui elektriijaamade kütusekulu karakteristikud on rangelt allapoole kumerad funktsioonid, siis aktiivkoormuse jaotus elektriijaamade vahel on optimaalne siis ja ainult siis, kui on täidetud järgmised tingimused:

1) koordinaatsioonitingimused:

$$\frac{\partial \mathcal{C}_i}{\partial P_i} + \mu \frac{\partial P_L}{\partial P_i} = \mu \text{ kui } P_i^- < P_i < P_i^+, \quad i=1, \dots, n; \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial \mathcal{C}_i}{\partial P_i} + \mu \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \leq \mu \text{ kui } P_i = P_i^+, \quad i=1, \dots, n; \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial \mathcal{C}_i}{\partial P_i} + \mu \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \geq \mu \text{ kui } P_i = P_i^-, \quad i=1, \dots, n; \quad (4.16)$$

2) võimsuste bilansitingimus:

$$P_K + P_L - \sum_{i=1}^n P_i = 0; \quad (4.17)$$

3) võrratusekujulised lisatingimused:

$$P_i^- \leq P_i \leq P_i^+, \quad i=1, \dots, n. \quad (4.18)$$

Tingimustes (4.14)-(4.16) tuleb Lagrange kordajale  $\mu$  valida selline väärtus, et oleks täidetud võimsuste bilansitingimus (4.17).

Võttes tuletise Lagrange funktsioonist ES-i koormuse järgi, saame:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial P_K} = \mu. \quad (4.19)$$

Seega  $\mu$  kujutab endast **ES-i marginaalkulu**. See näitab kui palju suureneb summaarne kütusekulu ES-is, kui ES-i summaarne koormus suureneb ühe ühiku võrra.

Kui jätame arvestamata võimsuskadod elektrivõrgus ( $\sigma_i=0$ ), siis muutuvad koordinaatsiooni võrrandid marginaalkulude võrdsuse tingimusteks ja vastavad võrratused - marginaalkulude võrratusteks.

### Teoreem

Kui elektriyaamade kütusekulu karakteristikud on rangelt allapoole kumerad funktsioonid ja kui me ei arvesta võimsuskadusid elektrivõrgus, siis aktiivkoormuste jaotus elektriyaamade vahel on optimaalne siis ja ainult siis, kui on täidetud järgmised tingimused:

1) koordinaatsiooningimused:

$$c_i = \mu, \quad \text{kui} \quad P_i^- < P_i < P_i^+, \quad i=1, \dots, n; \quad (4.20)$$

$$c_i \leq \mu, \quad \text{kui} \quad P_i = P_i^+, \quad i=1, \dots, n; \quad (4.21)$$

$$c_i \geq \mu, \quad \text{kui} \quad P_i = P_i^-, \quad i=1, \dots, n; \quad (4.22)$$

2) võimsuste bilansivõrrand:

$$P_K - \sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad (4.23)$$

3) võrratusekujulised lisatingimused:

$$P_i^- \leq P_i \leq P_i^+, \quad i=1, \dots, n. \quad (4.24)$$

Lihtsustatud juhtumil, kui me ei arvesta kadusid elektrivõrgus ja võrratusekujulisi kitsendusi, muutuvad koordinaatsiooningimused marginaalkulude võrdsuse tingimuseks:

$$c_1 = c_2 = \dots = c_n = \mu. \quad (4.25)$$

Selle tingimuse järgi tuleb elektriyaamu koormata nii, et nende marginaalkulud oleksid võrdsed. Marginaalkulude võrdsuse tingimuse võib sõnastada ka nii: elektriyaamu tuleb koormata marginaalkulude kasvamise järjekorras, s.t. esmalt tuleb koormata seda töösolevat jaama, mille marginaalkulu on kõige väiksem.



**Näide 4.2 . Koormusjaotuse optimeerimine ilma võimsuskadusid arvestamata**

Vaatleme ES-i, kus on 3 elektrijaama (vaata joon.4.2).

**Elektrijaam 1**

$$P_1^+ = 600MW \quad P_1^- = 150MW$$

$$B_1 = 510,0 + 7,2P_1 + 0,0014P_1^2 \quad (\text{MBtu/h})$$

**Elektrijaam 2**

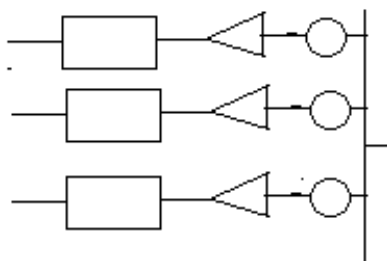
$$P_2^+ = 400MW \quad P_2^- = 100MW$$

$$B_2 = 310,0 + 7,85P_2 + 0,00194P_2^2 \quad (\text{MBtu/h})$$

**Elektrijaam 3**

$$P_3^+ = 200MW \quad P_3^- = 50MW$$

$$B_3 = 78,0 + 7,97P_3 + 0,00482P_3^2 \quad (\text{MBtu/h})$$



Joonis 4.3.

Oletame, et kütuse hinnad on järgmised:

M. Valdma "Energiasüsteemid", 2008

$$H_1 = 1,1 \text{ R/MBtu,}$$

$$H_2 = 1,0 \text{ R/MBtu,}$$

$$H_3 = 1,0 \text{ R/MBtu,}$$

kus R on tinglik rahaühik.

Siis elektri jaamade kütusekulu karakteristikud on järgmised:

$$C_1(P_1) = 1,1 \times B_1(P_1) = 561 + 7,92P_1 + 0,001562P_1^2 \quad \text{R/h}$$

$$C_2(P_2) = 1,0 \times B_2(P_2) = 310,0 + 7,85P_2 + 0,00194P_2^2 \quad \text{R/h}$$

$$C_3(P_3) = 1,0 \times B_3(P_3) = 78,0 + 7,97P_3 + 0,00482P_3^2 \quad \text{R/h}$$

Kasutades koordineerimistingimusi (4.20), saame järgmised optimaalsuse tingimused:

$$\frac{\partial C_1}{\partial P_1} = 7,92 + 0,003124P_1 = \mu$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial P_2} = 7,85 + 0,00388P_2 = \mu$$

$$\frac{\partial C_3}{\partial P_3} = 7,97 + 0,00964P_3 = \mu$$

$$P_1 + P_2 + P_3 = 850 \text{ MW}$$

Selle ülesande lahend on:

$$\mu = 9,148 \text{ R / MWh}$$

$$P_1 = 393,2 \text{ MW}$$

$$P_2 = 334,6 \text{ MW}$$

$$P_3 = 122,2 \text{ MW} .$$

Kõik lisatingimused on täidetud.

### 4.3. Võimsuskadude suhtelise juurdekasvu määramine

Aktiivvõimsuskadod liinis sõltuvad liinivõimsuse ruudust:

$$P_L = \frac{P_l^2 + Q_l^2}{U_l^2} r_l, \quad (4.26)$$

kus  $P_l, Q_l, U_l, r_l$  - liini aktiiv- ja reaktiivkoormus, pinge ja aktiivtakistus.

Eeldame, et liini reaktiivkoormus ja pinge ei sõltu generaatori aktiivkoormusest. Siis saame (4.26) alusel järgmise võrduse:

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_i} = \frac{2P_l}{U_l^2} r_l \frac{\partial P_l}{\partial P_i} \quad (4.27)$$

Võimsuskadude suhteline juurdekasv sõltub võimsuste balansspunkti valikust.

Vaatleme süsteemi joonisel 4.3.



Joonis 4.4.

$$\sigma_1 = \frac{\partial P_L}{\partial P_1} = \frac{2P_1}{U_1^2} r_i$$

$$\sigma_2 = \frac{\partial P_L}{\partial P_2} = 0.$$

Võimsuskadude suhtelise juurdekasvu arvutamiseks keerulistes võrkudes on välja töötatud mitmeid meetodeid. Levinud meetodiks on kaovalemite meetod, mis seisneb selles, et võimsuskadude suhteliste juurdekasvude arvutamiseks koostatakse sellised kaovalemid, kus kaod on avaldatud funktsioonina sõlmede võimsustest.

Kaovalem maatrikskujus:

$$P_L = P^T [B] P + P^T B_0 + B_{00}, \quad (4.28)$$

kus  $P$  - genereerivate sõlmede netovõimsuste vektor,  $B$  - kaovalemi kordajad.

Valemi (4.28) võib kirjutada ka kujul:

$$P_L = \sum_i \sum_j P_i B_{ij} P_j + \sum_i B_{i0} P_i + B_{00} . \quad (4.29)$$

Siit saame tuletise:

$$\sigma_i = 2 \sum_j B_{ij} P_j + B_{i0} . \quad (4.30)$$

Kaovalemid sõltuvad elektrivõrgu skeemist, pinge moodulitest ja nurkadest, sõlmede koormustest ja balansspunkti valikust. Kaovalemite määramist vaatleme erikursuses.

#### 4.4. Ülesande lahendusmeetodid

Optimeerimisülesannete lahendusmeetodid võib jaotada kahte gruppi:

- 1) kaudsed meetodid - lahend leitakse optimaalsuse tingimuste lahendamise teel;
- 2) otsesed meetodid - gradientmeetodid jt.

Vaatleme ühte enamlevinud kaudset meetodit, mida nimetatakse  $\mu$  -**iteratsiooni ehk suhteliste juurdekasvude meetodiks**.

Olgu antud ülesanne (4.1)-(4.3). Selle ülesande lahendi optimaalsuse tingimusteks on (4.7)-(4.11).

Leiame ülesande lahendi optimaalsuse tingimuste lahendamise teel. Lahenduskäik on järgmine:

1. Anname ette Lagrange kordaja  $\mu$  väärtuse.  $\mu_0$
2. Leiame optimaalsuse tingimustest  $\mu$  -le vastavad elektriyaamade koormused.
3. Kontrollime, kas võimsuste bilanss on täidetud? Kui ei ole, korrigeerime  $\mu$  väärtust ja kordame arvutust punktist 2.

Seda tsüklit korratakse seni, kuni on leitud selline  $\mu$  väärtus, mille puhul on täidetud võimsuste bilanss.

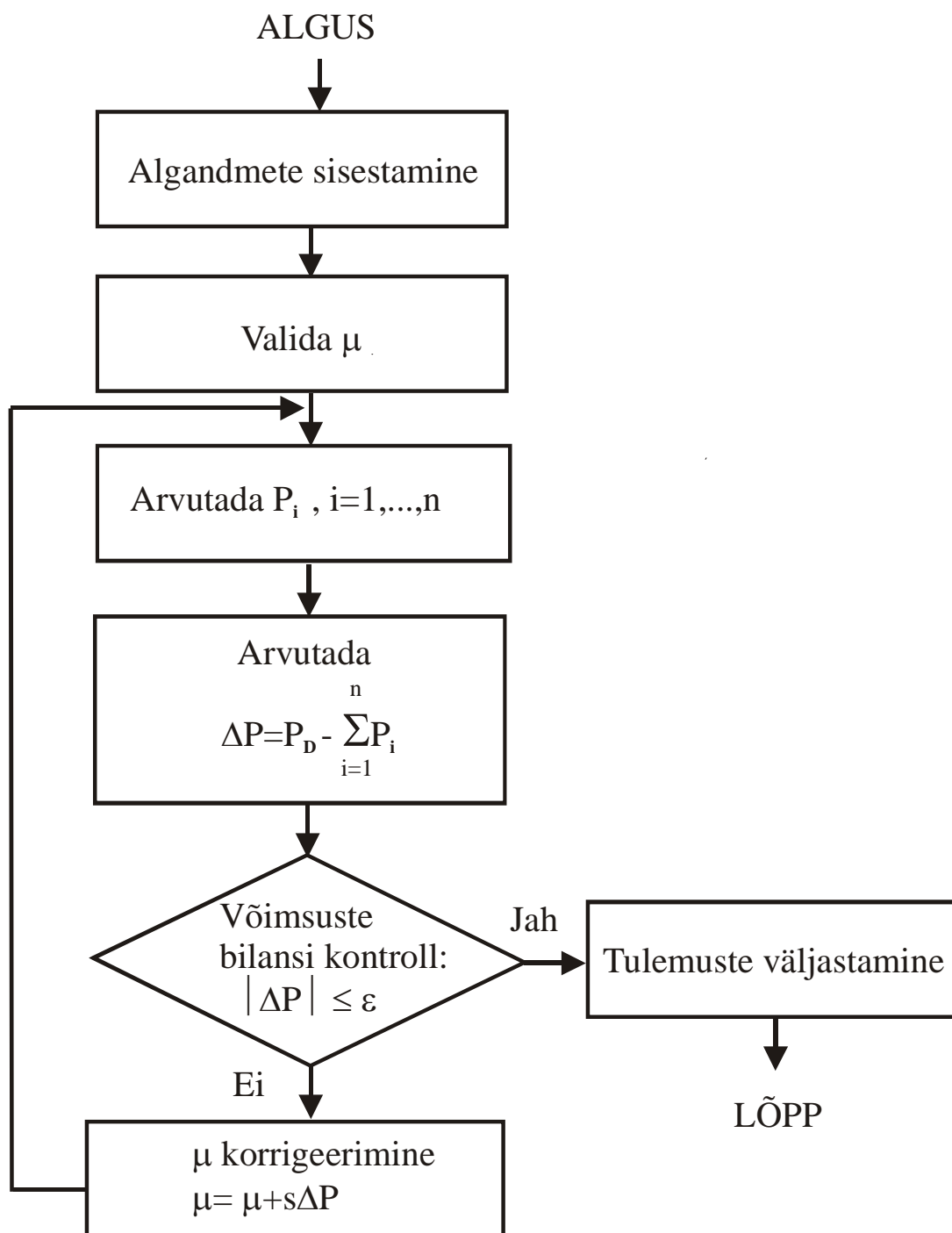
Ülesande lahendamise algoritmi plokskeem on esitatud joonisel 4.3.

Joonisel 4.3.  $\Delta P$  tähistab võimsuste eabilanssi:

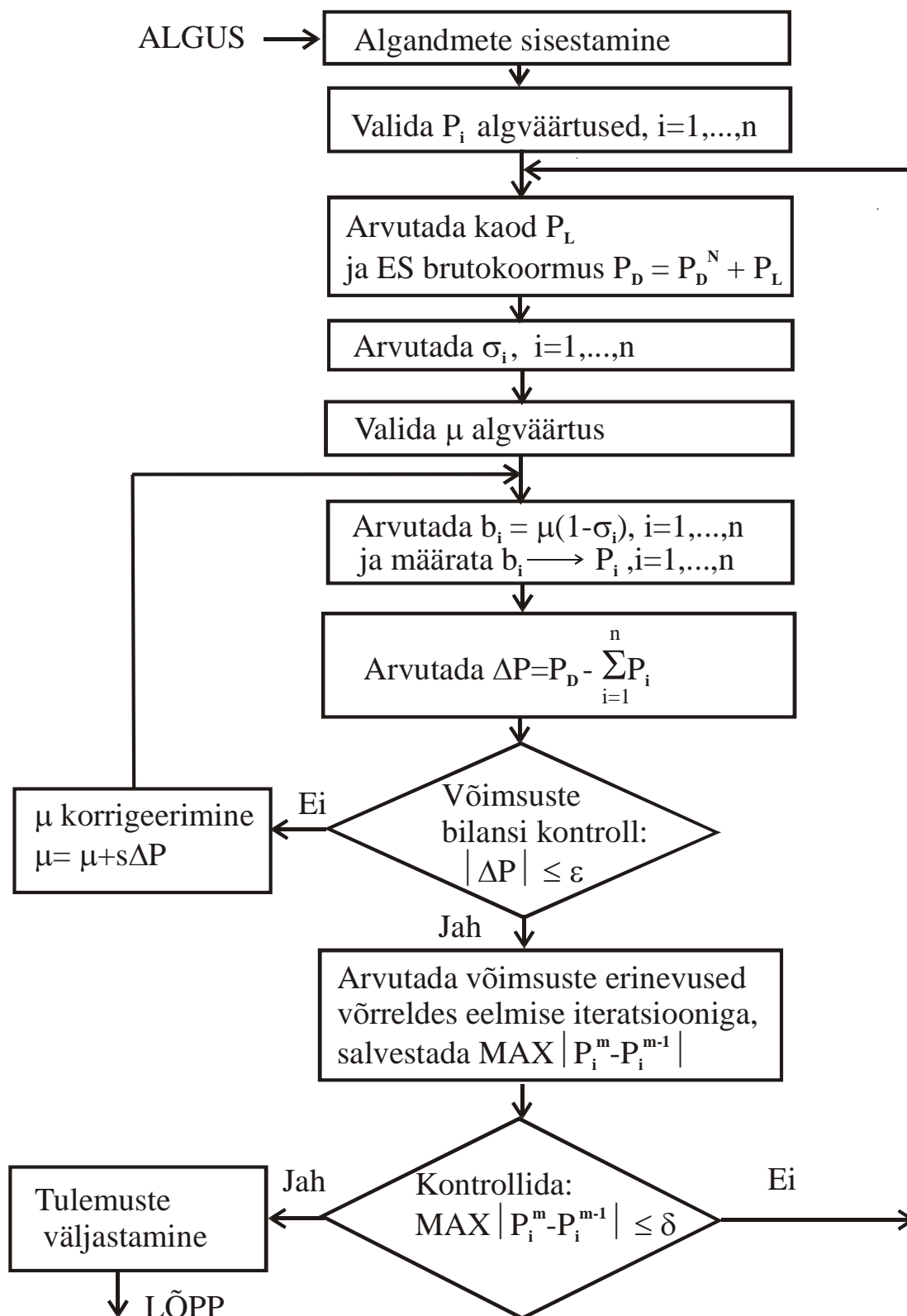
$$\Delta P = P_K + P_L - \sum_{i=1}^n P_i. \quad (4.30)$$

Ülesande lahendamiseks vajalikud algandmed:

1. Elektriyaamade kütusekulu- või kütusemarginaalkulu karakteristikud.
2. Energiasüsteemi koormus  $P_K$  või  $P_K + P_L$ . Viimased suurused prognoositakse.
3. Elektriyaamade koormuste maksimaalsed ja minimaalsed väärtused. Käesoleva meetodi puhul võib elektriyaamade koormuste maksimaalseid ja minimaalseid väärtusi arvestada elektriyaama sisend-väljund karakteristikutes.



Joonis 4.5. Koormusjaotuse optimeerimise algoritm  $\mu$ -iteratsiooni meetodil, kui kadusid ei arvestata



Joonis 4.6. Koormusjaotuse optimeerimise algoritm  $\mu$ -iteratsiooni meetodil arvestades kadusid elektrivõrkudes

#### 4.5. Reaktiivvõimsuste jaotuse optimeerimine

Reaktiivvõimsused mõjutavad elektriyaamade kütusekulu aktiivvõimsus-kadude kaudu. Seepärast võib reaktiivvõimsuste optimeerimisel võtta kriteeriumiks aktiivvõimsuskadude miinimumi:

$$\min P_L(P_1, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_v) \quad (4.31)$$

lisatingimustel

$$Q_{\Sigma K} + q(P_1, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_v) - \sum_{i=1}^v Q_i = 0 \quad (4.32)$$

$$|Q_i| \leq Q_i^+, \quad i=1, \dots, v, \quad (4.33)$$

kus  $q$  - reaktiivvõimsuskad süsteemis,  $v$  - reguleeritavate reaktiivvõimsuse allikate arv,  $Q_i^+$  - maksimaalselt võimalik allika reaktiivvõimsuse absoluutväärtus.

Optimumitingimuste tuletamiseks kasutame jälle Lagrange meetodit. Moodustame Lagrange funktsiooni:

$$\Phi = P_L + \varepsilon(Q_{\Sigma K} + q(P_1, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_v) - \sum_{i=1}^v Q_i), \quad (4.34)$$

kus  $\varepsilon$  - Lagrange kordaja.

Võttes Lagrange funktsioonist otsitavate järgi tuletised ja võrrutades need nulliga, saame optimumi tingimused:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Q_i} = \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} + \varepsilon \left( \frac{\partial q}{\partial Q_i} - 1 \right) = 0, \quad i=1, \dots, v; \quad (4.35)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \varepsilon} = Q_{\Sigma K} + q(P_1, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_v) - \sum_{i=1}^v Q_i = 0. \quad (4.36)$$

Avaldades võrranditest (4.35)  $\varepsilon$ , saame järgmised tingimused:

$$\frac{\frac{\partial P_L}{\partial Q_1}}{1 - q_1} = \dots = \frac{\frac{\partial P_L}{\partial Q_v}}{1 - q_v} = \varepsilon \quad (4.37)$$

Tingimused (4.36) ja (4.37) ongi antud ülesande optimumitingimused.



#### 4.6. Talitluse kompleksne optimeerimine

Selle ülesande lahendamiseks on 2 lähenemisviisi:

- lisatingimusteks on aktiiv- ja reaktiivvõimsuste bilansitingimused ES-i kohta,
- lisatingimusteks on ES-i (elektrivõrgu) püsitalitluse võrrandid.

#### Ülesanne ES-i aktiiv- ja reaktiivvõimsuste bilansitingimustega

Ülesande püstitus:

$$\min \sum_{i=1}^n B_i(P_i) \quad (4.38)$$

$$P_{\Sigma K} + P_{Losses} - \sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad (4.39)$$

$$Q_{\Sigma K} + q(P_1, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_v) - \sum_{i=1}^v Q_i = 0. \quad (4.40)$$

Koostame Lagrange funktsiooni:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n B_i(P_i) + \mu(P_{\Sigma K} + P_L - \sum_{i=1}^n P_i) + \varepsilon(Q_{\Sigma K} + q - \sum_{i=1}^v Q_i), \quad (4.41)$$

kus

Võtame funktsioonist (4.41) osatuletised otsitavate järgi:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial P_i} = \frac{\partial B_i}{\partial P_i} + \mu \left( \frac{\partial P_L}{\partial P_i} - 1 \right) + \varepsilon \frac{\partial q}{\partial P_i} = 0, \quad i=1, \dots, n; \quad (4.42)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Q_i} = \mu \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} + \varepsilon \left( \frac{\partial q}{\partial Q_i} - 1 \right) = 0, \quad i=1, \dots, v; \quad (4.43)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \mu} = P_{\Sigma K} + P_{Losses} - \sum_{i=1}^n P_i = 0; \quad (4.44)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \varepsilon} = Q_{\Sigma K} + q(P_1, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_v) - \sum_{i=1}^v Q_i = 0. \quad (4.45)$$

Ülesande optimaalne lahend peab rahuldama tingimusi (4.42)-(4.45).

Kui arvestame lisatingimustena ainult võimsuste bilansivõrrandeid terve süsteemi kohta, siis on väga keerukas arvestada liinivõimsuste ja pingete kitsendusi.

**Ülesanne, kus lisatingimusteks on elektrisüsteemi või elektrivõrgu püsitalitluse võrrandid (sõlmede bilansivõrrandid).**

Sõlmede aktiiv- ja reaktiivvõimsuse bilansivõrrandid võib avaldada kujul:

$$P_i = (G_{i0} + \sum_j G_{ij})U_i^2 - \sum_j U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (4.46)$$

$$Q_i = -(B_{i0} + \sum_j B_{ij})U_i^2 - \sum_j U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (4.47)$$

kus  $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ .

Vaatleme ülesannet üldisel kujul:

$$\min F[Z, D] \quad (4.48)$$

lisatingimustel

$$W(Z, D) = 0 \quad (4.49)$$

$$Z^- \leq Z \leq Z^+ \quad (4.50)$$

kus  $Z=(P,Q,U,\delta)$ .

Lahendame võrrandid (4.49) sõltuvate muutujate suhtes. Siis saame järgmise ülesande:

$$\min F[X(Y, D), Y, D] \quad (4.51)$$

lisatingimustel

$$X^- \leq X(Y, D) \leq X^+, \quad (4.52)$$

$$Y^- \leq Y \leq Y^+. \quad (4.53)$$

Selgitused:

Funktsiooni gradient on järgmine:

$$\nabla F = \frac{\partial F}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial Y} + \frac{\partial F}{\partial Y} \quad (4.54)$$

ehk

$$\nabla F = \left\langle \sum_{i=1}^m \frac{\partial F}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial y_j} + \frac{\partial F}{\partial y_j}, j = m+1, \dots, n-m \right\rangle \quad (4.55)$$

Ülesanne lahendatakse gradientmeetodil. Talitluse kompleksne optimeerimine on keerukas ülesanne.

#### 4.7. Energiaagregaatide töökorra optimeerimine

ES-i koormuse muutumine tingib vajaduse muuta ööpäeva vältel ka töösolevate agregaatide koosseisu. Tiptundideks tuleb peaaegu kõik agregaadid töösse lülitada ja öötundideks on otstarbekas liigsed agregaadid seistatada. Siit tuleneb tähtis optimeerimisülesanne: määrata kindlaks millal ja missugust agregaati tuleks käivitada või ja seistatada selleks, et kulutused elektri tootmiseks oleksid minimaalsed.

Seda ülesannet nimetati varem töösolevate agregaatide koosseisu optimeerimise ülesandeks. Inglise keeles on see ülesanne tuntud nime all "**unit commitment**". Vastavalt sellele võiks vaadeldavat ülesannet eesti keeles nimetada "**energiaüksuste töökorra optimeerimise ülesandeks**".

Energiaüksuste käivitamine ja seiskamine õigel ajal ja õiges järjestuses annab suurt majanduslikku säästu. Tehniliselt on energiaüksuste töökorra optimeerimine mittelineaarne diskreetsete muutujatega ekstreemumülesanne, mis ühe alamülesandena sisaldab koormusjaotuse optimeerimise ülesande.

Optimeerimise kriteeriumiks on kütusega seotud kulude miinimum ajaperioodis T:

$$\min \sum_{t=1}^s \sum_{i=1}^n (C_{it}(K_{it}, P_{it}) + C_{k\Box\Box\Box\Box}(K_{it}, \tau_{it})) \quad (4.56)$$

arvestades järgmisi lisatingimusi:

- võimsuste bilansitingimused:

$$P_{Kt} + P_{Lt} - \sum_{i=1}^n P_{it} = 0, \quad t=1, \dots, s; \quad (4.57)$$

- reservitingimused:

$$\sum_{i=1}^n (P_{it}^+ - P_{it}) \geq R_{\min} \quad t=1, \dots, s; \quad (4.58)$$

- energiaüksuste koormuste piirangud:

$$P_{it}^- \leq P_{it} \leq P_{it}^+ \quad i=1,\dots,n \quad t=1,\dots,s; \quad (4.59)$$

- energiaüksuste käivitamise piirangud:

- kui energiaüksus on töösse lülitatud, ei tohi seda kohe välja lülitada;
- kui energiaüksus on seisatunud, võib seda käivitada alles teatud aja pärast;
- ühes elektrijaamas ei ole võimalik samal ajal käivitada mitut energiaüksust.

Otsitavateks on energiaüksuse seisundid  $K_{it}=(0;1)$  ja koormused  $P_{it}$ .

Tähiste tähendused:

$C_{k_{it}}(K_{it}, P_{it}, \tau_{it})$  - i-nda energiaüksuse käivituskulud t-ndal tunnil,  $\tau$  - üksuse seisaeg,

$R_{\min}$  - minimaalne nõutav reserv ES-is.

Energiaüksuste töökorra optimeerimise ülesandeid võib lahendada järgmiste meetoditega:

- prioriteetide meetod,
- dünaamilise programmeerimise meetodid,
- diskreetse programmeerimise meetodid.

Neist lihtsaim on prioriteetide meetod. Oluliseks näitajaks energiaüksuste käivitamisel on kütuse erikulu. Üksusi tuleks käivitada erikulu kasvamise järjekorras ja seisatada erikulu vähenemise järjekorras. Seega ühe prioriteetsuse järjekorra saame kütuse erikulu järgi.

Vaatleme ES-i, kus töötab n plokki või energiaüksust. Kui me seisatame i-nda üksuse, siis väheneb kütuse kulu  $C_i$  võrra, kuid teised genereerivad energiaüksused peavad oma koormust vastavalt suurendama ja nende kütuse kulu kasvab. Seega energiaüksust on kasulik seisatada, kui on täidetud järgmine tingimus:

$$\Delta C_{\Sigma} = C_i - \mu \times P_i > 0, \quad (4.60)$$

kus  $C_i, \mu, P_i$  - i-nda üksuse kütuse kulu enne seisatamist, ES-i kütuse marginaalkulu, i-nda üksuse koormus enne seisatamist.

Siit saame

$$C_i > \mu \times P_i \quad (4.61)$$

ehk

$$\delta_i = \frac{C_i}{P_i} > \mu. \quad (4.62)$$

Seega energiaüksuse seiskamine annab majanduslikku kasu kui seisatitava üksuse erikulu on suurem kui ES-i marginaalkulu.

Energiaüksuste töökorda optimeeritakse sageli kahes osas: esiteks leitakse optimaalne töökord ilma käivituskuludeta ja seejärel korrigeeritakse lahendit arvestades ka käivituskulusid.

Näiteks, prioriteetide meetodil võib ülesannet lahendada järgmiselt:

1. Oletame, et kõik energiaüksused on töös.
2. Koormusjaotuse optimeerimine.
3. Arvutatakse energiaüksuste erikulud.
4. Järjestatakse energiaüksused erikulu kahenemise järjekorras.
5. Seisatakse suurima erikuluga üksus.
6. Kontrollitakse, kas seiskamine on otstarbekas tingimuse (4.38) alusel ja lubatav reservi tingimuse (4.34) seisukohast Kui jah, korratakse arvutusi punktist 2. Ei korral on ülesande lahend leitud.

Nii saadakse lahend, mida järgnevas etapis kontrollitakse.

Energiaüksuste käivitamisel peame kindlaks tegema, kui mitmeks tunniks üksus töösse jääb ja seiskamisel - kui mitmeks tunniks energiaüksus seisatakse.

**Kui ei arvestata energiaüksuste käivituskulusid, kehtib järgmine reegel:**

**Energiaüksuste käivitamisel tuleb esimeses järjekorras käivitada üksus, mille kütuse erikulu on kõige väiksem.**

**Töösolevatest energiaüksustest tuleb esimeses järjekorras koormata seda üksust, mille kütusekulu suhteline juurdekasv ehk kütuse marginaalkulu on kõige väiksem.**

Energiaüksuste töökorra optimeerimise ülesanne vajab edasisi uuringuid selleks, et välja töötada ratsionaalsed meetodid selle lahendamiseks.

Näiteid.

#### **4.8. Talitluse optimaalne planeerimine**

Energiasüsteemi elektrivõimsused jaotatakse kolme ossa:

- 1) põhi- ehk baasvõimsus,
- 2) reguleerimisvõimsus,
- 3) tipu- ja reservvõimsus.

Põhi- ehk baasvõimsuse moodustavad mittereguleeritavad hüdrovõimsused, tuumajaaamad, vasturõhu- ja vaheltvõtu-elektrivõimsused ning pikaajalistel lepingutel baseeruv eksporditav võimsus, millel on väikesed muutuvad kulud ja hea kasutatavus.

Reguleeritavateks võimsusteks on reguleeritavad hüdroelektrijaamad, reguleeritavad kondensatsioonielektrijaamad ja lühiajalistel lepingutel põhinev import. Nendega reguleeritakse võimsuste bilanssi, sagedust, energiasüsteemide vahelisi võimsusi, koormuse prognoosi vigu ja pingeid elektrivõrgus.

Tipu- ja reservvõimsustelt nõutakse kiiret käivitamist ja reageerimist koormuse muutustele. Tipu- ja reservvõimsusteks on gaasiturbiinid, diiselgeneraatorid ja väikese veevaruga hüdroelektrijaamad.

Elektri eksport või import põhineb pikaajalistel või lühiajalistel lepingutel. Peale selle müüakse reservelektrit, kui süsteem häire tõttu ei suuda tagada teatud piirkonna tarbijate normaalset varustamist elektriga. Koostöö naaber energiasüsteemidega parandab elektriga varustamise kindlust, võimaldab kasutusele võtta võimsamaid energiaüksusi ja vähendada tootmiskulusid.

Metoodiliselt jaotatakse talitluse optimaalne planeerimine 3 põhietappi:

- 1) pikaajaline planeerimine - 1 kuu kuni 1 või mitu aastat ette;
- 2) lühiaajaline planeerimine - 1 ööpäev kuni 1 kuu ette;
- 3) operatiivne planeerimine - 1 tund kuni 1 ööpäev ette.

Tegelikult koosneb ES-i talitluse planeerimine järgmistest etappidest:

- 1) aasta talitluse planeerimine,
- 2) kuu talitluse planeerimine,
- 3) nädala talitluse planeerimine,
- 4) ööpäeva talitluse planeerimine.

**Aasta talitluse planeerimisel** määratakse:

- 1) elektriyaamade aastatoodangud ja vajalikud ressursid,
- 2) hüdroelektriyaamade pikaajalised koormusgraafikud,
- 3) pikaajalised elektri ja soojuse ostu-müügilepingud,
- 4) pikaajalised koostöölepingud naaberenergiasüsteemidega,
- 5) elektriyaamade ja -võrkude põhiseadmete remondigraafikud,
- 6) ES-i energia ja võimsuse reservigraafikud ning aasta tippkoormuse ja miinimumkoormuse katmise kord,
- 7) tarbijate varustamiskindlus aasta jooksul,
- 8) põhivõrgu skeemid aasta põhiolukordadeks,
- 9) jaotusvõrkude skeemid aasta põhiolukordadeks,
- 10) releekaitse ja automaatikaseadmete sätted aasta põhiolukordadeks,
- 11) tariifid jm.

Põhilisteks lähteandmeteks on:

- 1) ES-i aasta koormuskestuskõvera prognoos,
- 2) ES-i aasta koormusgraafiku prognoos,

- 3) maksimaal- ja minimaalkoormuste prognoosid,
- 4) kütuse- ja energiaturu prognoosid,
- 5) veeressursside prognoosid,
- 6) avariistatistika jpm.

Paljud aastaplaani koostamise ülesanded lahendatakse koormuskestuskõverate alusel. Ülesannetes, kus lähteandmeteks on koormusgraafikud, valitakse diskreetse ajaintervalli ühikuks 1 nädal või kuu.

Plaani koostamisel tuleb arvestada võimalikke riske:

- 1) koormuse prognoosi vigu,
- 2) seadmete avariilisust,
- 3) juhuslikkusi kütuse- ja energiaturul,
- 4) ilmastiku mõju jm.

Aastaplaanide koostamine on keerukas ülesannete kompleks, mis sisaldab eelmiste aastate analüüsi, protsesside prognoosi ja optimaalset planeerimist. Optimeerimisel on eesmärgiks pikaajaliste kulude minimeerimine.

Aasta talitluse planeerimine vajab täiustamist ja automatiseerimist kaasaegsete arvutivõrkude baasil.

**Kuu talitluse planeerimise** eesmärgiks on täpsustada aastaplaani ja täpsustatud prognooside alusel lähima kuu tegevusplaani. Täpsustatakse seadmete hoolde- ja remondigraafikuid. Määratakse kindlaks optimaalsed hüdroelektrijaamade koormusgraafikud. Ajaühikuks kuu talitluse planeerimisel on nädal, ööpäev ning harva ka tund. Minimeeritakse ettevõtete muutuvad kulud.

**Nädala talitluse planeerimisel** on ajaühikuks 1 tund. Eesmärgiks on täpsustada kuuplaani ja täpsustatud prognooside alusel lähima nädala tegevusplaani. Põhiliseks ülesandeks on soojus- ja hüdroelektrijaamadele optimaalsete koormusgraafikute ja energiaüksuste töökorra määramine. Seejuures planeeritakse ka reservid ja vahetusvõimsuste graafikud teiste ES-idega.

**Ööpäeva talitluse planeerimisel** on eesmärgiks elektrijaamadele optimaalsete ööpäevaste koormusgraafikute ja energiaüksuste töökorra määramine. Nende graafikute abil toimub ES-i talitluse juhtimine. Antud etapp sisaldab ES-i koormusgraafikute prognoosi järgmiseks ööpäevaks. Talitluse optimeerimine toimub marginaalkulude ja erikulude alusel.



M. Valdma "Energiasüsteemid", 2008

Lähteinfo täpsustumisel on otstarbekas operatiivselt korrigeerida ööpäevaseid koormusgraafikuid ja energiaüksuste töökorda.

ES-i talitluse optimeerimine ööpäeva sees annab suurt majanduslikku efekti (1-5%).

Seejuures planeeritakse mitte ainult aktiivvõimsusi, nende reservi ja sageduse reguleerimist, vaid ka reaktiivvõimsusi ja pingete reguleerimist

Reaktiivvõimsust genereerivad elektrijaamad, sünkroonkompensaatorid, kondensaatorpatareid ja kõrgepingeliinid. Reaktiivvõimsuste jagunemist elektrivõrgus on võimalik reguleerida trafode transformatsioonitegurite muutmise teel. Reaktiivvõimsuste optimeerimine võimaldab vähendada kadusid elektrivõrkudes.

Lähemalt vaadeldakse talitluse planeerimisega seotud küsimusi erikursustes.

\*\*\*\*\*

## 5. ENERGIASÜSTEEMI TALITLUSE REGULEERIMINE

### 5.1. Talitluse reguleerimise põhimõtted

Tarbijaid tuleb varustada elektrienergiaga nimisageduse ja nimipingete juures. Seejuures peab 3-faasiline vahelduvvoolusüsteem olema sümmeetriline ja pinged faasides siinuselised. Lubatud hälbed nimiväärtustest, lubatud ebasümmeetria ja hälbed siinuskõverast on määratud standarditega. Kõiki ES talitluse muutujaid tuleb hoida lubatud piirides. Seepärast tuleb ES talitlust pidevalt reguleerida. Reguleerimine on talitluse juhtimise lõppetapiks, mis tavaliselt toimub automaatselt ja peaaegu reaalajas. ES talitluse reguleerimine on keerukas kompleksne ülesanne.

Põhilisi reguleerimisprobleeme on 2:

- 1) sageduse ja aktiivvõimsuste ehk koormuste reguleerimine, mis hõlmab ka pingektorite vaheliste nurkade reguleerimist
- 2) reaktiivvõimsuste ja pingete (pinge moodulite) reguleerimine.

### 5.2. Sagedus ja selle muutumine

Kõik generaatorid, mis on lülitatud ühtsesse vahelduvvoolusüsteemi pöörlevad sünkroonselt. See tähendab, et nende pöörlemise nurkkiirused on sellised, et pinged generaatorite klemmidel on sama sagedusega ja nende pinged on faasis.

Vahelduvvoolu sagedus  $f$  näitab seda, mitu siinuselise pinge või voolu muutumise perioodi mahub ühte sekundisse. Seega sagedus on perioodide arv sekundis ehk perioodi pikkuse pöördväärtus:

$$f = \frac{1}{T}, \quad (\text{Hz}) \quad (5.1)$$

kus  $T$  perioodi pikkus (s)

Pinge muutumine:

$$u(t) = U \sin(\omega \cdot t) = U \sin(2\pi f t) = U \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right), \quad (5.2)$$

kus  $\omega$  - nurkkiirus (nurksagedus) (rad/s)

Vahelduvvoolu sagedus ja generaatori pöörlemiskiirus on seotud järgmise valemi abil:

$$f = \frac{p}{2} \times \frac{n}{60} = \frac{p \cdot n}{120} \quad \text{Hz} \quad (5.3)$$

kus  $p$  – rootori pooluste arv ( $p \geq 2$ ),  $n$  – generaatori pöörlemiskiirus (p/min).

Turbogeneraatorid on tavaliselt 2 magnetpoolusega. Hüdrogeneraatoritel on poolusi rohkem.

Sageduse nominaalväärtuseks Euroopas ja paljudes väljaspool Euroopat asuvates riikides on 50 Hz. Põhja-Ameerikas, Lõuna-Ameerikas, Jaapanis (osaliselt), Saudi Araabias ja veel mõnedes maades on vahelduvvoolu sageduseks 60 Hz.

Sageduse kõrvalekalle nominaalväärtusest on kahjulik tarbijatele ja soojuselektrijaamadele (muutub mootorite pöörlemiskiirus, väheneb kasutegur, toimub võimsuste ümberjagunemine. Tänapäeva tipp tehnoloogiad nõuavad kõrget sageduse kvaliteeti.

Seepärast on sageduse kvaliteedinõuded paljudes maades väga kõrged:

$$f = 50 \pm \Delta f \text{ (Hz)}. \quad (5.4)$$

Nõuded kehtestatakse sageduse hälvetele  $\Delta f$  ja elektrilise aja hälvetele  $\Delta t_e$ .

Sageduse hälvete osas eristatakse kolme olukorda:

1.  $|\Delta f| \leq 50 \text{ mHz}$  – seda olukorda loetakse normaalseks, selliseid hälbeid ei pea reguleerima
2.  $50 \leq |\Delta f| \leq 150 \text{ mHz}$  – regulaatorid peavad olema valmisoleku režiimis
3.  $|\Delta f| \geq 150 \text{ mHz}$  – kõik võimalikud regulaatorid peavad alustama tegevust, on tekkinud oht, et automaatika vale toimimise tõttu võivad energiasüsteemid ühendsüsteemist eralduda.

Sageduse mõõtmise täpsus peab olema:

- primaarreguleerimisel parem kui 10 mHz
- sekundaarreguleerimisel peab mõõtmistäpsus olema 1 – 1,5 mHz
- tertsiaalreguleerimisel (koormusjaotuse reguleerimisel) piisab sageduse mõõtmistäpsusest 50 – 100 mHz.

Sünkroonaeg määratakse integraaliga:

$$t_e = \frac{1}{f_0} \int f(t) dt, \text{ kus } f_0 = 50 \text{ Hz} \quad (5.5)$$

ja sünkroonaja hälve

$$\Delta t_e = \frac{1}{f_0} \int \Delta f(t) dt, \text{ kus } \Delta f = f(t) - f_0. \quad (5.6)$$

Paljudes maades on kehtestatud nõue, et

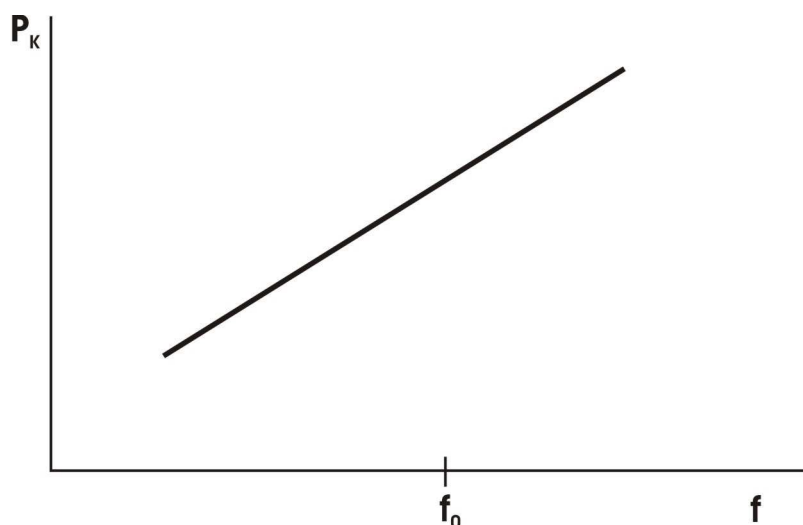
$$|\Delta f| \leq 0,1 \text{ :Hz ja } |\Delta t_e| \leq 30 \text{ s ööpäevas.} \quad (5.7)$$

Nõukogude Liidus oli sageduse hälve  $\pm 0,1$  Hz normaalne ja  $\pm 0,2$  Hz peaaegu normaalne. Tegelikult hoiti sagedust Venemaa ühtses energiasüsteemis ja sealhulgas ka Balti riikides kuni viimase ajani piirides 49,4 - 50,2 Hz.

Arenenud maade energiasüsteemides hoitakse sagedus piirides:

$$|\Delta f| \leq 0,05 \text{ Hz ja } |\Delta t_e| \leq 10 \text{ s ööpäevas.}$$

Sageduse väärtus sõltub sellest kui täpselt aktiivvõimsuse genereerimine vastab tarbimise muutumisele. Sagedust aitab hoida konstantsena ka asjaolu, et koormused sõltuvad sagedusest (vt. Joon. 5.1).



Joonis 5.1. Aktiivkoormuse staatiline karakteristik

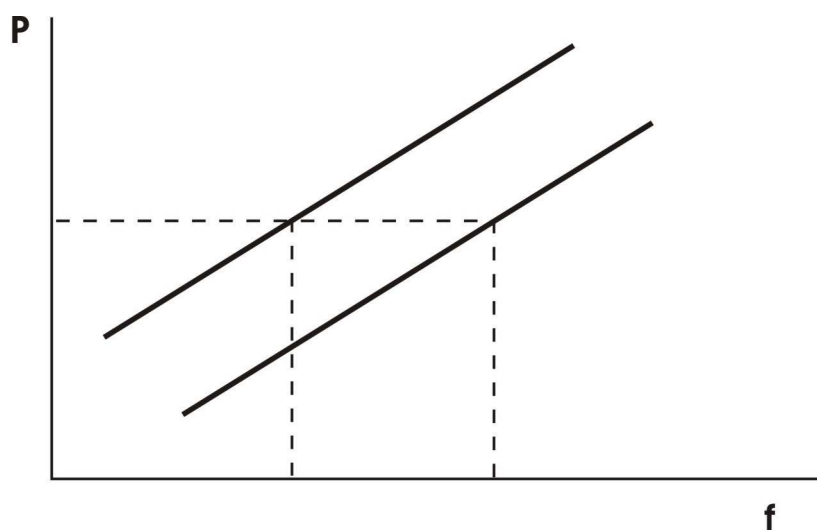
ES koormuse muutumine, mis on tingitud sageduse muutumisest avaldub valemiga

$$\Delta P_K = K_K \times \Delta f, \quad (5.8)$$

kus  $K_K$  - elektrivõrgu koormuse isereguleerimisvõime (MW/Hz).

Soome süsteemis on see kordaja 150-170 MW/Hz, NORDELis ligi 6 korda suurem. UCTE-is on see kordaja ligikaudu 18 000 MW/Hz.

Selleks, et sagedus oleks võrdne nimisagedusega peab genereerimine vastama tarbimisele ja kadudele (Joon. 5.2).

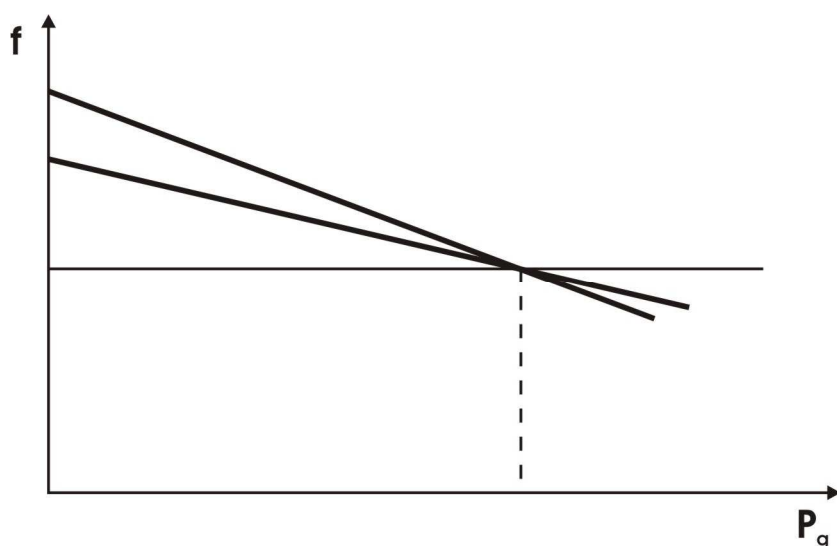


Joonis 5.2.

Ilma genereerimist reguleerimata võivad koormuse juhuslikud muutused tekitada mitme hertsiseid sageduse muutusi. Näiteks Soomes ES-is põhjustaks Olkiluoto EJ 710 MW ploki võrgust eraldamine kuni 4 Hz sageduse muutumise. Koormuste muutuste mõju vähendamiseks ühendatakse maade energiasüsteemid ühendsüsteemideks ja varustatakse tundlike reguleerimissüsteemidega.

### 5.3. Sageduse primaarreguleerimine

Sageduse reguleerimiseks on elektrijaamade turbiinid varustatud kiirusregulaatoritega, mis reguleerivad turbiini siseneva energiakandja (auru, vee) hulka. Need on tsentrifugaalregulaatorid, mis reguleerivad turbiini pöörlemiskiirust vastavalt regulaatori karakteristikule (Joon. 5.3.).



Joonis 5.3.

Turbiini regulaatori karakteristikute kallet iseloomustab järgmine tegur ehk statism:

$$\delta = \frac{df}{dP_g} = \frac{-\Delta f / f_0}{\Delta P_g / P_{gN}} \cdot 100 \% \quad (5.9)$$

Kui  $\delta = 0$ , siis on reguleerimise kriteeriumiks:

$$\Delta f = 0. \quad (5.10)$$

Sellist reguleerimist nimetatakse astaatiliseks.

Kahjuks ei ole võimalik mitme agregaadiga samaaegselt teostada astaatilist reguleerimist, kuna siis ei ole tagatud püsiv koormuste jaotus generaatorite vahel. Seepärast on tavaliselt kiirusregulaatorite karakteristikute statismid negatiivsed arvud. Näiteks, hüdroturbiinidel kuni  $-16\%$ , auroturbiinide statism on absoluutväärtuselt kuni 2 korda suurem. Absoluutväärtuselt väiksemaid statisme kui  $2\%$  ei kasutata.

Valemist (5.9) saame statismiga primaarreguleerimise võrrandi:

$$\Delta f + \delta \cdot \Delta P_g = 0. \quad (5.11)$$

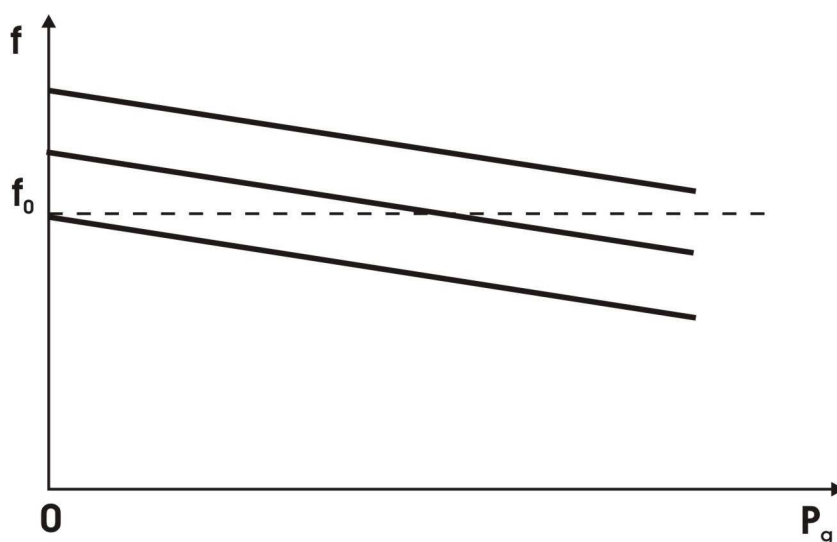
See on sageduse reguleerimise võrrand statismiga generaatori võimsuse järgi.

Generaatori reguleerimisvõimet iseloomustab regulaatori karakteristikute tõus:

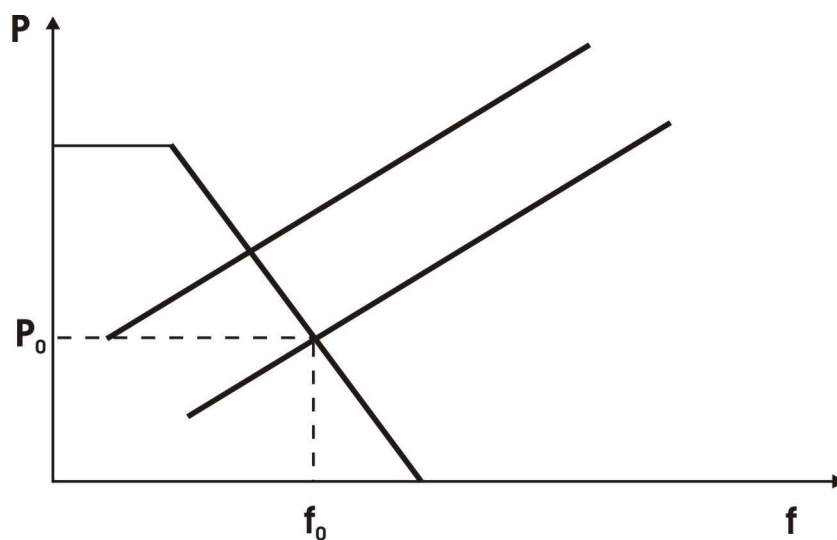
$$K_g = \frac{dP_g}{df} = \frac{1}{\delta} = \frac{\Delta P_g}{\Delta f} = \frac{P_{gN} \times 100}{f_0 \times \delta} = \frac{2P_{gN}}{\delta} \quad (5.12)$$

Kui turbiini juhtvõimsust muudetakse, siis nihkub regulaatori karakteristik paralleelselt iseendaga vastavalt kas üles või alla (Joon. 5.4).

ES-i koormuse muutumisel nihkub koormuse karakteristik paralleelselt iseendaga. Vaatleme süsteemi üks generaator ja üks tarbija. Sageduse primaarreguleerimise selgitamiseks vaatleme joon. 5.5.



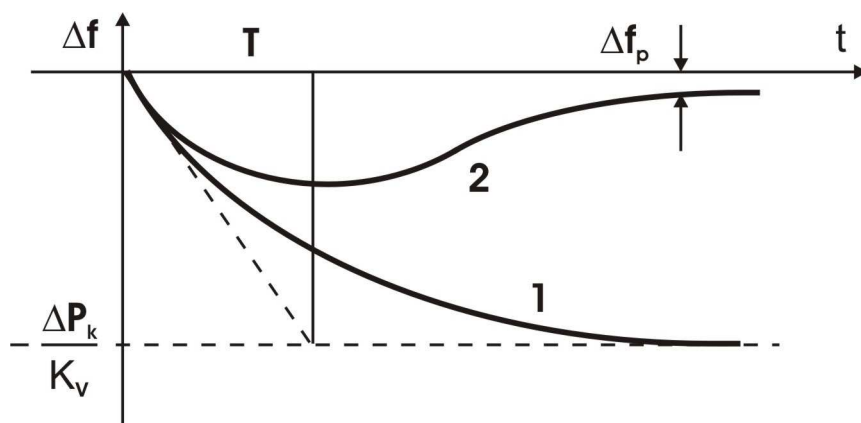
Joonis 5.4.



Joonis 5.5.

Sageduse reguleerimist turbiinide kiirusregulaatorite abil nimetatakse sageduse primaarreguleerimiseks. Selles osalevad kõik turbiinid, mis on varustatud kiirusregulaatoritega ja millel on reguleerimisreservi.

Primaarreguleerimine on kõige kiiretoimelisem statsimiga reguleerimine. Kiirusregulaatorid reageerivad turbiini pöõretearvu muutumisele suhteliselt väikese viivitusega (5-10 s) ja taastavad sageduse 50 Hz lähedale. Kuid primaarreguleerimine ei taga vajalikku sageduse kvaliteeti. Primaarreguleerimine peab olema kiiretoimeline, tundlik ja stabiilne.



Joonis 5.6. Sageduse kõrvalekalle ilma primaarreguleerimiseta (1) ja primaarreguleerimise korral (2).

ES-I summaarne reguleerimisvõime moodustub üksikute generaatorite reguleerimisvõimetest  $K_{gi}$  ja elektrivõrgu reguleerimisvõimest  $K_K$ :

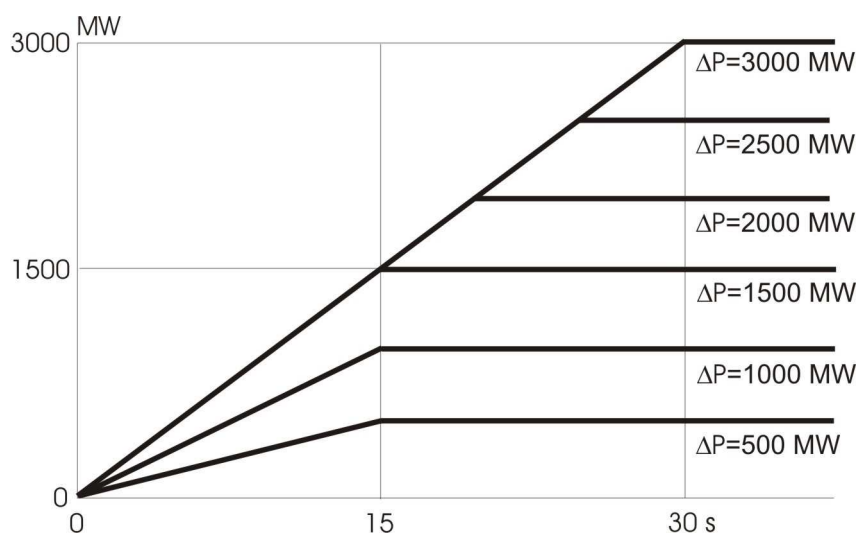
$$K_P = K_K + \sum K_{gi} . \quad (5.13)$$

Kui generaatoritel ei ole reguleerimisvõimet, muutub sagedus ES-is järgmiselt:

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{K_K} . \quad (5.14)$$

Primaarreguleerimiseks planeeritakse aktiivvõimsuse reserve 5-7%. See reserv peab olema kasutatav 15-30 s jooksul (Joon. 5.7). Primaarreguleerimise reserv peab olema kasutatav siis kui sagedus kaldub kõrvale 50 Hz.





Joonis 5.7.

#### 5.4. Sageduse ja vahetusvõimsuste sekundaarreguleerimine

Kuna turbiinide kiirusregulaatorid ei taga sageduse konstantsust, vaid nende tegevuse tulemusena jääb teatud sageduse hälve  $\Delta f$ . Seepärast on loodud veel üks reguleerimise aste, mida nimetatakse sekundaarseks reguleerimisesks.

Sekundaarreguleerimise ülesandeks on:

- Sageduse hälve kaotamine pärast primaarreguleerimist
- Piirkondlike energiasüsteemide vaheliste vahetusvõimsuste vastavusse viimine vahetusvõimsuste kokkulepitud plaanidega
- Sekundaarreguleerimine aktiveerib reservid ainult selles ES-is, kus võimsuste eabilanss tekkis.

Sekundaarreguleerimine on tsentraalne ja automaatne sageduse ja võimsuse reguleerimine, mis baseerub sekundaarreguleerimise reservil. Sekundaarreguleerimine seisneb turbiinide kiirusregulaatorite karakteristikute nihutamises eesmärgiga viia sageduse hälve nulli. Seejuures muudetakse genereerimist esmajoones selles süsteemis, kus eabilanss tekkis.

Sekundaarreguleerimine algab 30 s jooksul ja võib kesta kuni 15 min.

Sageduse hälve nulliviimiseks on tarvis muuta genereerivat võimsust järgmiselt:

$$\Delta P = K_f \cdot \Delta f, \quad (5.15)$$

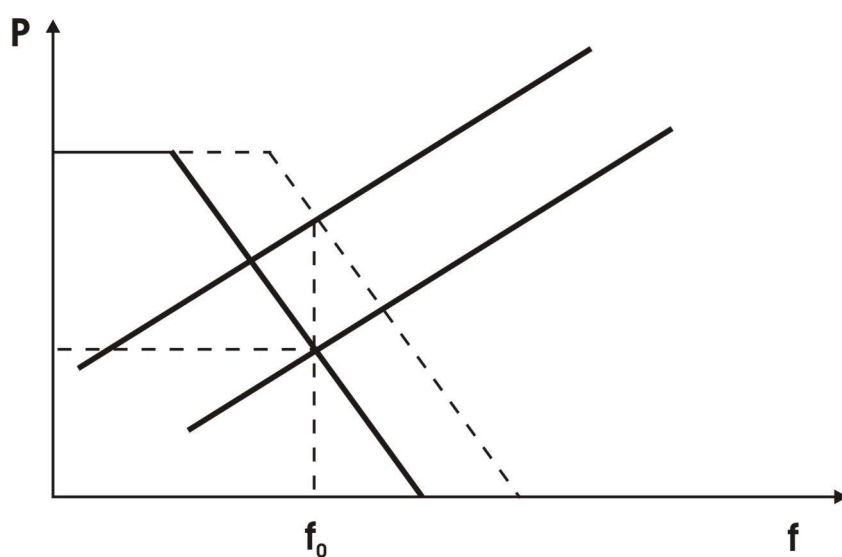
kus  $K_f$  on võrdetegur, mida nimetatakse sageduse reguleerimisvõimeks (MW/Hz).

Põhjamaades on see tegur umbes 8000 MW/Hz. Sageduse sekundaarset reguleerimist illustreerib joonis 5.8.

Kui energiasüsteemid olid väikesed, teostas sageduse sekundaarset reguleerimist üks elektrijaam, üks generaator. Seda nimetati juhtiva jaama meetodiks.

Reguleerimise kriteeriumiks oli

$$\Delta f = 0. \quad (5.16)$$



Joonis 5.8. Sageduse sekundaarreguleerimine

Suurte ES-ide puhul on tarvis sekundaarset reguleerimist teostada mitme elektrijaamaga korraga ja tagada seejuures sageduse ja vahetusvõimsuste astaatiline reguleerimine. Selleks on loodud mitmeid meetodeid.

### Näiva statisti meetod

Reguleerimise kriteeriumiks on:

$$\frac{\Delta f}{f_0} + \frac{P_i - \alpha_i \cdot \sum_i P_i}{P_{Ni}} \cdot \frac{1}{K_{Pi}} = 0, \quad (5.17)$$

kus  $0 \leq \alpha_i \leq 1$  ja  $\sum_i \alpha_i = 1$  ning  $\sum_i P_i$  on sagedust reguleerivate elektrijaamade tegelike koormuste summa. Kriteerium (5.17) tagab astaatilise sageduse reguleerimise, s.t., et reguleerimine lõpeb kui  $\Delta f = 0$ . Tõestus.

### Kombineeritud meetod

Integraalsete reguleerimismeetodite puhul on reguleeritavaks suuruseks elektriline aeg:

$$t_e = \frac{1}{f_0} \int_{t_0}^t f dt. \quad (5.18)$$

Seljuhul tuleb reguleerida nulliks elektrilise aja kõrvalekalle:

$$\Delta t_e = \int_{t_0}^t \frac{\Delta f}{f_0} dt = 0. \quad (5.19)$$

Kriteerium (5.19) tagab astaatilise sageduse reguleerimise. Kuid sellise reguleerimise puuduseks on see, et integraalne reguleerimine ei ole piisavalt tundlik, on liiga aeglane ja põhjustab ülereguleerimist.

Seepärast on kasutusele võetud mitmesugused kombineeritud reguleerimiskriteeriumid.

Näiteks selline kriteerium:

$$\frac{\Delta f}{f_0} + \frac{\Delta P}{P_0} \cdot \frac{1}{K_p} + \Delta t_e \cdot \frac{1}{K_t} = 0, \quad (5.20)$$

kus  $K_p, K_t$  - sobivalt valitud koefitsiendid.

Reguleerimine kriteeriumi (5.20) järgi on astaatiline, tundlik ja suhteliselt kiiretoimeline ning stabiilne. Kiiretoimelisus tuleneb sellest, et esimestel sekunditel, kui integraali väärtus on veel väike, reageerib regulaator sageduse hälbele nagu statismiga reguleerimine. Hiljem hakkab mõju avaldama la elektrilise aja hälve. Reguleerimine lõpeb siis, kui  $\Delta f = 0$ .

Kasutatakse ka mõnevõrra teistsuguseid kriteeriume.

UCTE võrgus toimub sekundaarreguleerimine järgmise kriteeriumi järgi:

$$\Delta P_{di} = -\beta_i \cdot G_i - \frac{1}{T_n} \cdot \int G \cdot dt, \quad (5.21)$$

$$\text{kus: } G_i = \Delta P_i + K_{ri} \cdot \Delta f \quad (5.22)$$

Siin:

$\Delta P_{di}$  - sekundaarreguleerimise aktiveerimise instruksioon piirkonnas  $i$ ;

$\beta_i$  - proportsionaalsuse tegur piirkonnas  $i$ ;

$T_{ri}$  - regulaatori integreerimise ajakonstant piirkonnas  $i$ ;

$G_i$  - piirkonna statismiga reguleerimise hälve;

$\Delta P_i$  - vahetusvõimsuse hälve piirkonnas I;

$K_{ri}$  - regulaatori parameeter

$\Delta f$  - sageduse hälve.

Tänapäeval kasutatakse palju tsentraalseid digitaaltüüpi reguleerimissüsteeme. Tavaliselt on need 3-4 nivoolised. Analoogreguleerimissüsteemid on kasutusel peamiselt reservsüsteemidena.

Kui ES-s on hüdroelektrijaamu, kasutatakse neid sagedust reguleerivate jaamadena.

Kui sagedus väheneb, hakkab generaatorite võimsus suurenema järgmise valemi järgi:

$$\Delta P = K_g (1 - e^{-t/T_1}) + K_f (1 - e^{-t/T_2}) \quad (5.23)$$

Primaarreguleerimise ajakonstant on 30-40 s. Sekundaarreguleerimise ajakonstant 100 s. Reguleerimisprotsesside kestus on ligikaudu 3T.

Ühendsüsteemides tuleb koos sagedusega reguleerida ka vahetusvõimsuste hälbeid. Süsteemide vaheline võimsusvoog sõltub kumbagi süsteemi võimsusbilansist. Iga süsteem peaks reageerima eelkõige oma süsteemis tekkivatele hälvetele.

Sageduse ja vahetusvõimsuste reguleerimiseks peavad süsteemides olema vastavad reservid.

Kui regulaatorid ei suuda sageduse langust vältida, hakatakse välja lülitama koormusi. Seda teostavad vastavad automaadid kindlaks määratud järjekorra alusel..

## 5.5. Koormusjaotuse reguleerimine

Sageduse ja vahetusvõimsuste reguleerimise tulemusena muutub ka koormuste jaotus elektrijaamade ja energiablokkide vahel. Seepärast on vaja korrigeerida koormusjaotust genereerivate üksuste vahel. Viimast nimetatakse **tertsiaalseks reguleerimiseks** ehk **võimsuste optimaalseks reguleerimiseks**.

Eesmärgiks on taastada optimaalne koormusjaotus ja tagada vajaliku reguleerimisreservi olemasolu.

Optimaalse koormusjaotuse reguleerimiseks kasutatakse koormusjaotuse optimeerimise koordineerimisvõrrandeid:

$$\frac{c_1}{1 - \sigma_1} = \frac{c_2}{1 - \sigma_2} = \dots = \frac{c_n}{1 - \sigma_n} = \mu \quad (5.24)$$

mille järgi energiaüksusi koormatakse vastavalt marginaalkuludele ja võimsuskadude suhtelistele juurdekasvudele.

Optimaalne võimsuste reguleerimine on veelgi aeglasem kui sageduse sekundaarne reguleerimine. Peaesmärgiks on reguleerida tunni keskmised koormused optimaalseks.

## 5.6. Reservid

Kuna energiasüsteemi talitlusele mõjuvad paljud juhuslikud faktorid, peavad energiasüsteemis olema vastavad reservid nii võimsuse kui ka energia osas, et juhuslike faktorite mõju kompenseerida. Reserv aitab tõsta energia kvaliteeti, energiasüsteemi töökindlust ja tarbija varustuskindlust.

Liiga väike reserv tekitab suurt kahju tarbijale, liiga suur reserv tekitab märgatavat kahju energiasüsteemidele. Optimaalne reserv määratakse nii, et tarbijate kahjumi ja energiasüsteemi kulude summa oleks minimaalne. Kuna tarbijate kahjumit ei ole võimalik täpselt määrata, siis määratakse reservid praktikas töökindlusindeksi või varustuskindlusindeksi alusel.

Reserve on kolme liiki:

- 1) normaaltalitluse reserv
- 2) avariireserv
- 3) remondireserv.

Normaaltalitluse reserv koosneb kolmest osast:

- 1) sageduse ja vahetusvõimsuste reguleerimisreserv (primaar- ja sekundaarreguleerimise reserv)
- 2) kiiresti kasutatav prognoosireserv
- 3) aeglaselt kasutatav prognoosireserv.

Normaaltalitluse reservi kasutatakse sageduse ja vahetusvõimsuste reguleerimiseks ning prognoosivigade kompenseerimiseks. Sageduse ja vahetusvõimsuste reguleerimisreserv arvestatakse pöörleva reservi hulka, mida saab momentaalselt kasutada. Siis, kui sageduse hälbed on veel piirides  $\pm 0,1Hz$ .

Kiiresti kasutatav prognoosivigade reserv peab olema kasutatav 15 min pärast. Sellist operatiivsust võimaldavad gaasiturbiinid.

Aeglane prognoosivigade reserv peab olema kasutatav 15 min kuni 4 tunni jooksul. Selliseks reserviks on soojuselektrijaamade kuumas olekus olevad agregaadid.

Avariireservi kasutatakse genereeriva võimsuse avariilise vähenemise kompenseerimiseks. Avariireservi kasutatakse stabiilsuse säilitamiseks, ülekoormuste likvideerimiseks ja võimsuste bilansi tagamiseks. Pöörlev avariireserv ehk momentaalne avariireserv on süsteemis olev aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse reserv, millest esimene peab olema kasutatav 30 s ja teine 5 sekundi jooksul. Pöörlev avariireserv peab olema võrdne vähemalt kõige suurema agregaadiga võimsusega.

Kiire avariireserv peab olema kasutatav 15 min jooksul ja aeglane avariireserv peab olema kasutatav 15 min kuni 4 tunni pärast.

Lisaks ülalmainitule vajatakse ka külma reservi. Külma reservi all mõeldakse reservi, mille kasutusele võtmiseks kulub üle 4 tunni. Külma reserv on ette nähtud normaalolukorra ja selleks vajalike reservide taastamiseks.

### **5.7. Pingete ja reaktiivvõimsuste reguleerimine**

Peale aktiivvõimsuse vajavad paljud tarbijad (mootorid, trafod, liinid jm.) elektromagnetvälja tekitamiseks ka reaktiivvõimsust. Reaktiivvõimsust genereerivad sünkroongeneraatorid ja –mootorid, kondensaatorpatareid, põikireaktorid, kõrgepingeliinid jm. Elektriliinid tarbivad ja genereerivad reaktiivvõimsust.

### **5.8. Kokkuvõte**

## 6. ENERGIASÜSTEEMI STABIILSUS

### 6.1. Üldist

Energiasüsteemi talitus on stabiilne, kui sagedus süsteemi eri osades on sama, pinged on konstantsed ja agregaatide ning liinide koormused püsivad. Energiasüsteemi talitus on ebastabiilne, kui generaatorid kaotavad sünkroontöö, pinged elektrivõrkudes on ebapüsivad või seadmete ja liinide koormused on ebastabiilsed.

Energiasüsteemi sagedus on määratud aktiivvõimsuste bilansiga ja pinged – reaktiivvõimsuste bilansiga. Tegelikult toimuvad energiasüsteemis pidevalt siirdeprotsessid, mille käigus energiasüsteem läheb ühest olekust teise. Siirdeprotsessid on kolme liiki:

- 1) laineprotsessid (liigpinged)
- 2) elektromagnetilised siirdeprotsessid (lühisvoolud)
- 3) elektromehaanilised siirdeprotsessid, mis on seotud energiasüsteemi stabiilsusega.

Energiasüsteemides eristatakse kolme liiki stabiilsust:

- 1) staatiline stabiilsus (stabiilsus väikeste häirete puhul)
- 2) dünaamiline stabiilsus (stabiilsus suurte häirete puhul)
- 3) pingestabiilsus.

Üldisi näiteid stabiilsuse kohta.

### 6.2. Staatiline stabiilsus

Staatiline stabiilsus tähendab süsteemi võimet tulla tagasi stabiilsesse tööpunkti pärast väikest juhuslikku häiret (1-5%) või minna uude stabiilsesse tööpunkti kui häire on püsiv.

Vaatleme generaatori paralleeltööd ES-ga.

Joonis 6.1.

Generaatori poolt võrku antav võimsus võrdub:

$$P = \frac{EU}{X_d + X_L} \sin \delta \quad (6.1)$$

kus  $X_d$  - generaatori pikireaktiivtakistus,  $X_L$  - liini reaktiivtakistus,  
 $\delta$  - E ja U vaheline nurk.

Maksimaalne edastatav võimsus:

$$P_{\max} = \frac{EU}{X_d + X_L}. \quad (6.2)$$

Joonis 6.2.



M. Valdma "Energiasüsteemid", 2008

Suurust  $\frac{dP}{d\delta}$  nimetatakse sünkroniseerivaks võimsuseks.

Võrdusest (6.1) saame:

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{EU}{X_d + X_L} \cos \delta. \quad (6.3)$$

ES-I talitus on stabiilne piirkonnas  $\frac{\partial P}{\partial \delta} > 0$ . Seega staatiline stabiilsus on tagatud kui  $\delta < 90^\circ$ .

Keeruka võrgu korral tuleks uurida sõlme bilansivõrrandeid:

$$P_i - y_{ii} U_i^2 \sin \alpha_{ii} - \sum_{j=1}^m y_{ij} U_i U_j \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) = 0, \quad (6.4)$$

$$Q_i - y_{ii} U_i^2 \cos \alpha_{ii} + \sum_{j=1}^m y_{ij} U_i U_j \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) = 0 \quad (6.5)$$

Võrrandite (6.4) ja (6.5) alusel on võimalik analüüsida talitluse tundlikkust nurkade hälvete suhtes üldisel kujul.

Kui soovime staatilist stabiilsust täpsemalt uurida peame modelleerima ka pöörlevad masinad. Pöörleva masina kineetiline energia avaldub kujul:

$$W_{kin} = \frac{1}{2} J \omega_m^2 \quad (6.6)$$

kus  $J$  – inertsmoment,  $\omega_m$  - nurkkiirus.

Kui turbiini võimsus ja generaatorist võrku antav võimsus erinevad teineteisest, hakkab pöörleva masina kineetiline energia muutuma:

$$\frac{dW_{kin}}{dt} = J \omega_m \frac{d\omega_m}{dt} = P_m - P_0 \quad (6.7)$$

Pöörleva masina nurkkiirus on pöörlemisnurga tuletis:

$$\omega_m = \frac{d\Theta_m}{dt}, \quad (6.8)$$

kus

$$\Theta_m = \omega_m t + \delta_m. \quad (6.9)$$

Siit saame võrrandi:

$$\frac{dW_{kin}}{dt} = J\omega_m \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_0 \quad (6.10)$$

ehk

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_0, \quad (6.11)$$

kus

$$M = \frac{4J\omega}{p^2} \quad (6.12)$$

$$\omega_m = \frac{2}{p} \omega. \quad (6.13)$$

Kuna staatilise stabiilsuse analüüsil peame arvestama väikeste häiretega, siis võib seda analüüsi teostada lineariseeritud talitluse võrrandite alusel (vaata (3.26), (3.27)).

Analüüsi meetodika on järgmine:

1. Koostatakse ES-I talitluse väikesi häireid kirjeldavad diferentsiaalvõrrandid, arvestades regulaatoreid
2. Uuritakse karakteristiklike võrrandite juures reaalosa märke.

Analüüs on keerukas. Seepärast tegelikult uuritakse sageli stabiilsust praktiliste kriteeriumide järgi:

- 1) kõigi generaatorite stabiilsust nurkade suhtes ( $\frac{dP}{d\delta} > 0$ )
- 2) kõigi asünkroonmootorite stabiilsust libistuse suhtes ( $\frac{dP}{ds} > 0$ )
- 3) pingete stabiilsust igas sõlmes ( $\frac{dQ}{dU} < 0$ , kus  $Q = Q_g - Q_k$ )
- 4) sageduse stabiilsust ühes sõlmes ( $\frac{dP}{df} > 0$ , kus  $P = P_k - P_g$ ).

Staatilise stabiilsuse tagamiseks hoitakse nurgad väiksemad kui 90\*.

Normaalolukorras peab olema generaatorite stabiilsusvaru 15-20%. Varud peavad olema kõikide kriteeriumide suhtes.

Staatilist stabiilsust suurendavad järgmised abinõud:

- 1) generaatorite ergutuse automaatreguleerimine
- 2) pinge langemise piiramine tähtsamates sõlmedes
- 3) generaatorite nihkenurkade piiramine

- 4) automaatne tarbijate väljalülitamine sageduse järgi
- 5) aktiiv- ja reaktiivvõimsuste reservide tagamine.

### 6.3. Dünaamiline stabiilsus

Dünaamilisestabiilsuse all mõistetakse süsteemi võimet taastada esialgne või sellele lähedane normaalne olukord pärast suurt häiret.

Suurteks häireteks on generaatorite või trafode tööst väljalangemine, lühised, juhtmete katkemised jm. järsud ning suured häired.

Vaatleme juhtumit, kui üks generaator annab võimsust süsteemi kahe paralleelliini kaudu. Oletame, et ühel liinil on 3-faasiline lühis.

Joonis

Dünaamiline nurkkarakteristik:

$$P = \frac{E'U}{X_d' + X} \sin \delta$$

Joonis

Joonis

Pindalade meetod.

#### Kriitiline nurk

Dünaamilise stabiilsuse analüüs seisneb võimalike suurimate häirete mõju hindamises. Seejuures tuleb uurida energiasüsteemi dünaamilisi võrrandeid ilma lineariseerimata. Selle juures kasutatakse numbrilisi integreerimismeetodeid.

Tähtsat osa dünaamilise stabiilsuse tagamisel omab releekaitse õige ja kiire toimimine. Lühised tuleb välja lülitada kiiremini kui 0,5 - 0,6 s., muidu võib süsteem kaotada stabiilsuse.

Dünaamilist stabiilsust suurendavad abinõud:

- 1) kaugete elektriyaamade reaktiivkoormuse suurendamine
- 2) pingeniivo tõstmine võrgus
- 3) kaugete elektriyaamade aktiivkoormuste piiramine
- 4) releekaitse töökiiruse tõstmine
- 5) taaslülitusautomaatika
- 6) ergutuse automaatreguleerimine
- 7) mehaanilise inertsi suurendamine
- 8) generaatorite pidurdamine jm.

M. Valdma "Energiasüsteemid", 2008

## **6.4. Koormuse stabiilsus**

## **6.5. Kokkuvõte**

## 7. ENERGIASÜSTEEMI TALITLUSKINDLUS

### 7.1. Sissejuhatus

Kõikide tehniliste seadmete ja süsteemide tähtsaimaks kvaliteedi näitajaks on töö- ehk talitluskindlus (*reliability*) ja häiringukindlus (*security*). Töökindlus laias mõttes näitab seadme või süsteemi võimet olla töökorras ja täita temale pandud funktsioone teatud aja jooksul. Häiringukindlus on süsteemi võime taluda häiringuid ja säilitada normaalne toimimine ka pärast suuri häiringuid.

Töö- ja häiringukindlusest sõltub toodete ja teenuste kasutatavus, efektiivsus ja hind ning konkurentsivõime. Mida kõrgema arengutaseme saavutab riik, seda suuremat tähelepanu tuleb pöörata tehniliste süsteemide töö- ja häiringukindluse tagamisele. Seadme töö- ja häiringukindluse suurendamine tõstab tootja kulutusi, kuid vähendab seadme kasutaja riske. Töö- ja häiringukindluse halvenemine tekitab toote kasutajale lisakulusid, mis sageli on kümneid ja sadu kordi kõrgemad toote hinnast.

Süsteemide töökindluse analüüs ja prognoos on tänapäeval omandanud väga suure praktilise tähtsuse. Aluse praktilisele analüüsile annab töökindlusteooria. Kaasaegne töökindlusteooria baseerub tõenäosusteoorial, matemaatilisel statistikal, intervallarvutustel ja ebamääraste hulkade teoorial.

Eriti oluline on seadmete ning süsteemide töö- ja häiringukindlus energeetikas, kus tarbijate energiavarustuse katkemisest tingitud kahjum võib ületada energiahinna isegi tuhat ja enam korda. Elektrivarustuse katkemine haiglates on paljudele eluohtlik. Elektrikatkestuste puhul katkeb transport ja teenindus, seiskuvad tehased. Suurte linnade ja maapiirkondade elektrita jäämisel on katastroofilised tagajärjed.

Seepärast tuleb energiasüsteemide juhtimisel, nende arengu planeerimisel ja energiaobjektide projekteerimisel koos ohutusnõuetega täita esmajärjekorras ka töö- ja häiringukindluse ning tarbijate varustuskindluse nõudeid. Töökindluse arvelt ei tohi kokku hoida.

Kaasaegsed energiasüsteemid on suhteliselt suure töökindlusega, kuid ikkagi juhtub neis ka avariisid. Enamikul juhtudel likvideeritakse energiasüsteemis tekkinud rikked sekundi murdosa jooksul ja energiasüsteem jätkab normaalset talitlemist. Kuid teatud olukordades ja mitme häiringu kokkusattumisel võib tekkida energiasüsteemis avariilaviin, millega võib kaasneda elektrijaamade väljalülitumine (*outage*) ja seiskumine ning kogu energiasüsteemi täielik kustumine (*blackout*). Selliste avariide korral võivad sajad miljonid inimesed jääda elektrita, kusjuures energiasüsteemi talitluse taastamine võib kesta kümneid tunde. Energiasüsteemi sünkroontöö lagunemisega ja soojuselektrijaamade seiskumisega seotud avariisid on maailmas olnud mitmeid (1965 New York, 1977 New York, 2001 California, 2003 New York,

2003 Itaalia, 2003 Rootsi jt). Ükski energiasüsteem ei ole selliste õnnetuste eest absoluutse kindlusega kaitstud. Kuid energiasüsteeme tuleb juhtida ja arendada nii, et avariisid esineks võimalikult vähe.

Energiaobjektide puhul, mis peavad pidevalt toimima (elektrijaamad, liinid, alajaamad, võrgud, energiasüsteemid jm), kasutame töökindluse asemel sageli sõna "talitluskindlus".

## 7.2. Põhimõisted

avarii – rikke tekkimine seadmes ja/või seadme ootamatu tööst väljalülitumine

avariilaviin – ühe seadme avarii tekitab või loob võimaluse järgmise avarii tekkeks

elektrijaama töötamine omatarbele – süsteemist lahutatud elektrijaam genereerib elektrienergiat vaid jaama omatarbeks

energiasüsteemi kustumine (*blackout*) – süsteemi elektrijaamades lakkab elektrilise võimsuse genereerimine

erikatkestuskulu (erikahjum) andmata jäänud energiaühiku kohta (kr/kWh) – elektriettevõttele on selleks saamata jääv müügitulu, klientidele aga kahjum seoses andmata jääva toodanguga, tööviljakuse langusega jms

häiring (*contingency*) – objekti talitlust häiriv faktor, mis muudab oluliselt objekti talitluse muutujaid või objekti töötingimusi

häiringukindlus (*security*) – objekti võime säilitada normaaltalitlus teatud suurte häiringute tingimustes teatud aja jooksul

jääkressurss – objekti keskmine eeldatav jääkkasutusiga, mille möödumisel on hädavajalik objekti ulatuslik renoveerimine või asendamine uue objektiga'

katkestuse erikulu (erikahjum) võimsuse ühiku kohta (kr/kW) – siia kuuluvad elektriettevõtte kulu toite taastamiseks ja klientide kahjum, mis on seotud seadmete ja materjalide rikkumisega

kustunud süsteemi taaskäivitamine (*black-start*) – energiasüsteemi kustumisele järgnev süsteemi talitluse taastamine. *Black-starti* teostamiseks vajatava elektrienergia allikaks võib olla kas a) töösse jäänud naabersüsteem või b) *black-startiks* sobiv elektrijaam süsteemis endas

lihtne Markovi protsess – juhuslik protsess, mille seisundite tõenäosused tulevikus sõltuvad ainult sellest, millises seisundis on objekt antud momendil ja ei sõltu sellest, kuidas objekt antud seisundisse jõudis

**mittetöökorras oleku tõenäosus ehk koefitsient  $q$**  – mittekorrasoleku tõenäosuse hinnang  $q$  (*forced outage rate FOR*).

**mittetöökorras objekt** – objekt, mis on rikkis või tõrgub töötamast mingi rikke tõttu või mida remonditakse selleks, et viia objekt töökorda

**mittetöösoleku tõenäosus** – mingi elemendi tõenäosus  $q(t)$ , mis näitab, et element on tööst välja langenud aja  $t$  jooksul

**objekti töökindlus** – tõenäosus, et see objekt on töökorras ja võib töötada ilma rikketa (tõrketa) ajaintervalli  $t$  jooksul

**optimaalne talitluskindlus** – talitluskindluse tase, mille juures energiasüsteemi talitluseks tehtavate kulutuste (investeeringud ja jooksvad kulud) ja energiavarustuse katkemiskahjumi summa on minimaalne

**pinge kollaps ehk pingestabiilsuse kaotus** – pinge järsk langus, mis muudab võimatuks elektrisüsteemi normaaltalitluse

**sageduse kollaps** – võrgusageduse ohtlik langemine, mis põhjustab elektriyaamade seiskumist ja sellest tulenevat sageduse edasist langemist

**talitluskindlus** – objekti võime talitleda normaaltingimustel teatud aja jooksul katkematult

**talitluskõlbmatuse ehk seisaku (outage)** – objekti (elektriliin, alajaam) või elemendi (trafo, jaotla või ka üksikaparaat) seisund, milles ta pole võimeline täitma oma funktsioone tänu mõnele temaga otseselt seotud sündmusele

**tarbija toitekatkestuse kestuse keskväärtuse indeks**  $\overline{T_{\text{Katkestus}}}$  – *customer average interruption duration index CAIDI*

**tarbija toitekatkestuste sageduse indeks**  $\overline{f_{\text{Katkestus}}}$  – *customer average interruption frequency index CAIFI*

**tarbijate varustuskindlus** on energiasüsteemi ja selle osade võime tagada tarbijate katkematu varustamine kvaliteetse elektrienergiaga teatud aja jooksul

**(rikke või avarii tõttu) tarnimata jäänud elektrienergia keskväärtus**  $\overline{\Delta A_{DEF}}$  – võimalike toitekatkestuste tagajärjel tarbijatele tõenäoliselt andmata jääv võimsus antud ajahetkel (koormusgraafiku antud punktis) (*expected power not served EPNS*)

**(rikke või avarii tõttu) tarnimata jäänud elektrilise võimsuse keskväärtus**  $\overline{\Delta P_{DEF}}$  – võimalike toitekatkestuste tagajärjel tarbijatele teatud perioodi (tavaliselt aasta) jooksul tõenäoliselt andmata jääv energiakogus (*expected energy not served EENS*)

**toitekatkestuste sagedus teenindatud tarbija või fiidri kohta** – *system average interruption frequency index SAIFI*

**tõrkesaeg (outage hours)** – aeg objekti või elemendi tõrke algushetkest hetkeni, mil objekt (element) on jälle võimeline täitma oma funktsioone

**tõrkesagedus  $\lambda$  (outage rate)** – tõrgete arv talitlusaja ühiku (tavaliselt aasta) kohta. Sageli määratletakse  $\lambda$  erinevate tõrkeliikide ja ilmastikutingimuste jaoks (nt tõrgete sagedus normaalilmastiku oludes)



**töökindlus** (*reliability*) – objekti (seade, võrk või süsteem) võime töötada teatud tingimustes teatud aja jooksul tõrgeteta või olla kasutatav tõrgeteta teatud arv kordi

**töökindluse (häiringukindluse) N–1 kriteerium** – nõue, et N elemendist koosnevas süsteemis oleks tagatud normaalitalitus ka pärast ühe mistahes elemendi väljalülitumist. Peale ühe elemendi avariilist väljalülitumist tuleb süsteemis nii kiiresti kui võimalik taastada olukord, mis taas vastaks N–1 nõudele

**töökindluseadus** – funktsioon, mis kirjeldab avariita töötamise tõenäosuse sõltuvust ajalõigu pikkusest.

**töökorras objekt** – objekt, mis töötab riketeta või on kasutatav teatud aja jooksul

**töökorras oleku tõenäosus** ehk  $p$  – korrasoleku tõenäosuse hinnang  $p$  (*availability*)

**varustuskindlus** – elektriijaama, elektrisüsteemi või selle osa võime tagada tarbijate häireteta varustamine kvaliteetse elektrienergiaga teatud aja jooksul

**võimsusdefitsiidi kestuse keskväärts**  $\bar{T}_{DEF}$  – ajalõigu keskväärts suhtelises ühikutes, mille jooksul esineb energiasüsteemis võimsuse defitsiit (*loss of load expectation LOLE*)

**võimsusdefitsiidi tõenäosus**  $P_{\Delta PDEF}$  – võimsusdefitsiidi tekkimise tõenäosus, mis võrdub ajalõiguga suhtelises ühikutes, mille jooksul aastas esineb võimsusedefitsiit (*loss of load probability LOLP*)

**ühendsüsteem** – energiasüsteemide ühendus, mis koosneb omavahel elektriliselt ühendatud territoriaalsetest energiasüsteemidest

### 7.3. Teoreetilised alused

**Töökindluse** all (laias mõttes) mõistetakse objekti (seade, võrk või süsteem) võimet töötada antud tingimustes teatud aja jooksul tõrgeteta või olla kasutatav tõrgeteta teatud arv kordi.

Töökindluse analüüsimisel eristatakse kahte objekti seisundit: 1) töökorras, 2) mittetöökorras (mittetöökölbulik).

**Töökorras objekt** – objekt, mis töötab riketeta või on kasutatav teatud aja jooksul. Töökorrasoleku aja hulka arvestatakse ka objekti hoolduse ja plaaniliste remontide teostamise aeg.

**Mittetöökorras objekt** – objekt, mis on rikkis või tõrgub töötamast mingi rikke tõttu või mida remonditakse ehk taastatakse selleks, et viia objekt töökorda.

Objekti riketest vaadeldakse töökindluse analüüsil juhuslikke rikkeid, st selliseid rikkeid, mis tekkivad ootamatult ja mis muudavad objekti töötamise võimatuks või tekitavad tõrkeid objekti töös. Pikaajalist pidevat objekti seisundi halvenemist töökindluse analüüsimisel tavaliselt ei arvestata. Objekti ealisi muutusi on võimalik arvestada eraldi.

**Häiring** – objekti talitlust häiriv faktor, mis muudab oluliselt objekti talitluse muutujaid või objekti töötingimusi (lühis, juhtme katkemine, stabiilsuse kaotused, seadmete rikked, koormuse ootamatu muutumine jms.). Häiringu tõttu võib katkeda objekti normaalne töö, võib tekkida rike või objekti talitus muutub anormalseks. Rike võib olla kõrvaldatav või mitte. Kuid häiring võib ka mitte mõjutada objekti tööd.

**Häiringukindluse** all mõistetakse objekti võimet säilitada normaaltalitus suurte häiringute tingimustes teatud aja jooksul.

Kui tavaline töökindlus tähendab süsteemi võimet täita temale pandud funktsioone normaalolukorras esinevate juhuslike häirete ja tõrgete tingimustes (siin võib näha teatud analoogiat süsteemi staatilise stabiilsusega), siis häiringukindlus tähendab objekti võimet vastu seista suurtele häiringutele (analoogia dünaamilise stabiilsusega). Suured häiringud võivad muuta objekti töötingimusi ja selle tulemusena ka talituskindlust või põhjustada objekti tööst väljalülitumise. Häiringu mõju sõltub häiringu suuruselt, asukohast ja objekti tundlikkusest.

Töökindlus ja häiringukindlus on erinevad mõisted.

**Talituskindlus** on objekti võime talitleda normaaltingimustel teatud aja jooksul katkematult. Objekti talituskindlus ja töökindlus on käesolevas töös samatähenduslikud sõnad.

Kuna energiasüsteem, elektriyaamad ja -võrgud peavad katkematult talitlema ja varustama tarbijaid kvaliteetse elektrienergiaga, siis eelistame käesolevas töös terminit "talituskindlus".

**Tarbijate varustuskindlus** on energiasüsteemi ja selle osade võime tagada tarbijate katkematu varustamine kvaliteetse elektrienergiaga teatud aja jooksul.

Varustuskindluse puhul räägitakse üksiku tarbija, liini (fiidri), jaotuspunkti või tarbija alajaama varustuskindlusest erinevatel pingeastmetel. Samuti võib määratleda energiasüsteemi tarbijate keskmise varustuskindluse. Energiasüsteemi talituskindlus hõlmab üldises mõttes ka tarbijate varustuskindlust, sest energiasüsteem talitleb normaalselt siis, kui on tagatud kõigi tarbijate varustamine kvaliteetse elektrienergiaga. Kuid arvestades iga tarbija varustuskindluse erakordset tähtsust, on siin tarbijate varustuskindlust käsitletud eraldi.

Energiasüsteemi talituskindlust, häiringukindlust ja tarbijate varustuskindlust on võimalik suurendada väga mitmel viisil:

kasutades elektriyaamades ja -võrkudes töökindlammaid materjale, seadmeid ja tehnoloogiaid

hajutades elektrienergia tootmist

suurendades tootmisreserve

ehitades uusi elektriliine ja alajaamu elektrivõrkude talituskindluse ja tarbijate varustuskindluse suurendamiseks

arendades edasi releekaitse- ja automaatikasüsteeme elektriyaamades, -võrkudes ja energiasüsteemi tasandil

ühendades piirkondlikke energiasüsteeme omavahel ühendenergiasüsteemideks ja erinevaid ühendenergiasüsteeme veelgi suuremateks ühendenergiasüsteemideks nii, et sellega kaasneb talitluskindluse tõus arvestades täiuslikumalt talitluskindluse ja tarbijate varustuskindluse nõudeid elektriyaamade ja -võrkude projekteerimisel arvestades veelgi täiuslikumalt energiasüsteemi talitluskindluse, häiringukindluse ja tarbijate varustuskindluse nõudeid elektriyaamade, -võrkude ja energiasüsteemi ning ühendenergiasüsteemi arengu planeerimise ja talitluse juhtimise teel. Energiasüsteemi talitluskindlust ja tarbijate varustuskindlust on võimalik lõpmatult suurendada, kuid kunagi ei muutu energiasüsteemid absoluutselt talitluskindlateks ja tarbijate energiavarustuse katkemine pole kunagi välistatud. See on sellepärast nii, et täielikult töökindlaid süsteeme pole olemas. Rikke tekkimine on juhuslik sündmus, mille toimumist ei ole võimalik ette ennustada. Tõenäosus, et objekt töötab tõrgeteta teatud aja  $t$  jooksul on alati väiksem kui üks.

**Objekti töökindluseks** (kitsas mõistes) nimetatakse tõenäosust, et see objekt on töökorras ja võib töötada ilma rikketa (tõrketeta) ajaintervalli  $t$  jooksul [4]. Tähistame selle tõenäosuse sümboliga  $p(t)$ . Funktsioon  $p(t)$  näitab tõrketeta töötamise ehk töökorras olemise ajaintervalli  $\tilde{T}_{TK}$  kui juhusliku suuruse tõenäosuste sõltuvust ajaintervalli pikkusest:

$$p(t) = P(\tilde{T}_{TK} > t). \quad (7.1)$$

Funktsiooni  $p(t)$  nimetatakse **töökindlusfunktsiooniks**. Ajaintervalli suurenedes funktsioon  $p(t)$  monotoonselt väheneb. Hetkel  $t=0$ ,  $p(t)=1$ .

Tähistame tõenäosuse, et objekt langeb ajaintervalli  $t$  jooksul tööst välja, sümboliga  $q(t)$ . Funktsioon  $q(t)$  näitab rikke ehk avarii tekkimise aja tõenäosuste jaotust. Ajaintervalli  $t$  suurenedes  $q(t)$  monotoonselt kasvab.

Kehtib võrdus:

$$q(t) = 1 - p(t). \quad (7.2)$$

Töökorras olemise ajaintervalli jaotusfunktsioon:

$$F_{TK}(t) = P(\tilde{T}_{TK} < t) = q(t) \quad (t > 0). \quad (7.3)$$

Töökindlusfunktsioon on avaldatav ka jaotusfunktsiooni kaudu:

$$p(t) = 1 - F_{TK}(t). \quad (7.4)$$

Jaotusfunktsiooni asemel kasutatakse praktikas tavaliselt töökorras olemise ajaintervalli jaotustihedust:

$$f_{TK}(t) = \frac{dF_{TK}(t)}{dt} = \frac{dq(t)}{dt}. \quad (7.5)$$

Suurust  $f_{TK}(t)dt$  tõlgendatakse kui tõenäosust, et suurus  $\tilde{T}_{TK}$  satub ajaintervalli  $(t, t+dt)$ .

Keskmine ajaperiood, mille jooksul objekt töötab riketeta, on määratav järgmiste valemite abil:

$$\bar{T}_{TK} = E(\tilde{T}_{TK}) = \int_0^{\infty} t f_{TK}(t) dt = \int_0^{\infty} t \frac{dq(t)}{dt} dt = - \int_0^{\infty} t p'(t) dt. \quad (7.6)$$

Suuruse  $\tilde{T}_{TK}$  võib avaldada ka töökindlusfunktsiooni kaudu [4]:

$$\bar{T}_{TK} = \int_0^{\infty} p(t) dt. \quad (7.7)$$

Seega keskmine tõrketa või avariita töötamise aeg võrdub objekti töökindlusfunktsiooni ja ajatelje vahelise pindalaga.

Analoogsete tõenäosusparameetritega on võimalik kirjeldada mistahes objekti talitluskindlust, häiringukindlust ja tarbijate varustuskindlust.

### Ekspontentsiaalne töökindluseadus

Esimeses lähenduses võib lugeda rikete intensiivsuse  $\lambda$  vaadeldaval ajaperioodil muutumatuks. Siis on töökindluse funktsiooniks eksponent (joon. 7.1).

Ekspontentsiaalne töökindlusfunktsioon avaldub valemiga:

$$p(t) = e^{-\lambda t}, \quad (7.8)$$

kus  $\lambda$  on objekti rikete intensiivsus – keskmine rikete arv ajaühikus (aastas).

Rikete intensiivsus näitab ka seda, kui pikk on riketeta töötamise keskmine ajaintervall  $\bar{T}_{TK}$ :

$$\bar{T}_{TK} = \frac{1}{\lambda}. \quad (7.9)$$

Objekti taastamisvoo intensiivsust iseloomustatakse suurusega  $\mu$ , mis näitab mitu taastamistsükli mahub ühte ajaühikusse (aastasse). Objekti mittetöökorras oleku keskmine ajaintervall  $\bar{T}_{MTK}$  võrdub:

$$\bar{T}_{MTK} = \frac{1}{\mu}. \quad (7.10)$$

Kui tõrke intensiivsus muutub ajas ( $\lambda(t)$ ), siis töökindlusfunktsioon ei ole eksponentfunktsioon.

Üldjuhul [4]

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)} \quad (7.11)$$

ja

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (7.12)$$

Eeldades, et töökindlusfunktsioon on eksponentfunktsioon, võib jaotusfunktsiooni avaldada järgmisel kujul:

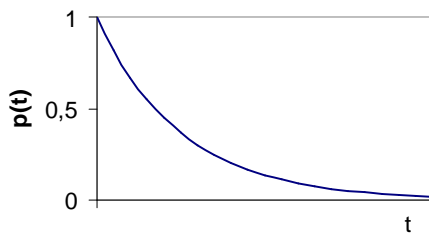
$$F_{TK}(t) = P(\tilde{T}_{TK} < t) = q(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (7.13)$$

M. Valdma "Energiasüsteemid", 2008

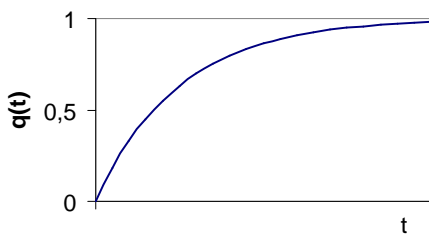
ja jaotustihedus avaldub valemina

$$f_{TK}(t) = \frac{dF_{TK}(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (7.14)$$

Funktsioonid  $p(t)$  ja  $q(t)$  on näidatud joonistel 7.1 ja 7.2.



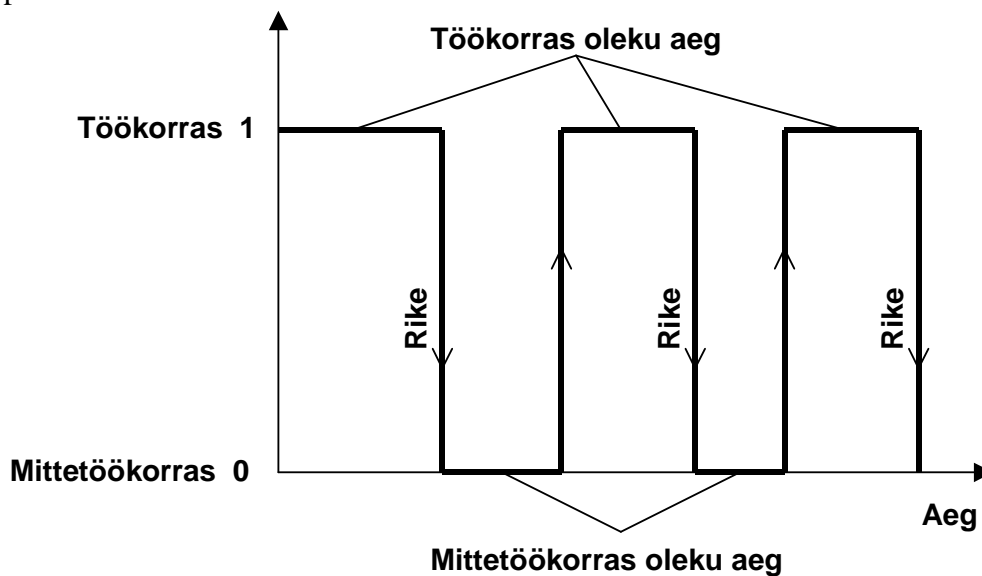
Joonis 7.1. Töökindlusfunktsioon  $p(t)$



Joonis 7.2. Avarii tekkimise tõenäosusfunktsioon  $q(t)$

Objekti seisundite muutumist vaadeldakse lihtsa Markovi protsessina. **Lihtne Markovi protsess** on juhuslik protsess, mille seisundite tõenäosused tulevikus sõltuvad ainult sellest, millises seisundis on objekt antud momendil ja ei sõltu sellest, kuidas objekt antud seisundisse jõudis. Seisundi muutumist illustreerib joonis 7.3. Töö

korras ja mittetöökorras oleku ajad on juhuslikud suurused. Neid ei ole võimalik täpselt ette ennustada.



Joonis 7.3. Objekti seisundite muutumise graafik (ilma plaaniliste seiskamisteta)

M. Valdma. *Energiasüsteemid. Loengukonspekt, TTÜ elektroenergeetika instituut, 2005.*

Olgu  $P(t)$  tõenäosus, et mingil hetkel  $t$  tulevikus objekt on seisundis “töökorras” (seisund 1) ja  $Q(t)$  tõenäosus, et mingil hetkel  $t$  tulevikus objekt on seisundis “mittetöökorras” (seisund 0).

Kui  $t \rightarrow \infty$ , siis need tõenäosused lähenevad piirile:

$$P(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = p \quad (7.15)$$

ehk

$$p = \frac{\bar{T}_{\text{töökorras}}}{\bar{T}_{\text{töökorras}} + \bar{T}_{\text{mittetöökorras}}} \quad (7.16)$$

ja

$$Q(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = q \quad (7.17)$$

ehk

$$q = \frac{\bar{T}_{\text{mittetöökorras}}}{\bar{T}_{\text{töökorras}} + \bar{T}_{\text{mittetöökorras}}} \quad (7.18)$$

Seejuures

$$P(t) + Q(t) = p + q = 1. \quad (7.19)$$

Siin  $p$  ja  $q$  on vastavalt objekti töökorras oleku ja mittetöökorras oleku tõenäosused mingil hetkel  $t$  tulevikus.

Süsteemi töökindlus sõltub otseselt süsteemi elementide (osade) töökindlusest ja elementide ühendusskeemist.

Jadaühenduse korral võib süsteemi tööindluse  $p_{\text{Süsteem}}$  ja mittetöökorras oleku tõenäosuse  $q_{\text{Süsteem}}$  määrata elementide töökindluste  $p_i$  alusel järgmiste valemite abil:

$$p_{\text{Jada}} = \prod_{i=1}^n p_i$$

$$q_{\text{Jada}} = 1 - \prod_{i=1}^n p_i \cdot$$

Elementide rööpühenduse korral on vastavad valemid järgmised:

$$p_{\text{Rööp}} = 1 - \prod_{i=1}^n q_i$$

$$q_{\text{Rööp}} = \prod_{i=1}^n q_i \cdot$$

Seega täiendavate elementide lisamine jadaühendustena vähendab süsteemi töökindlust ja täiendavate elementide lisamine rööpühendustena suurendab süsteemi töökindlust.

Ülaltoodud mõistetel ja seostel baseerub energiasüsteemi ja selle osade töökindluse analüüs. Töökindluse praktiliseks analüüsimiseks on välja töötatud mitmesuguseid kriteeriume ja näitajaid.

## 7.4. Talitus- ja varustuskindluse kriteeriumid ja näitajad

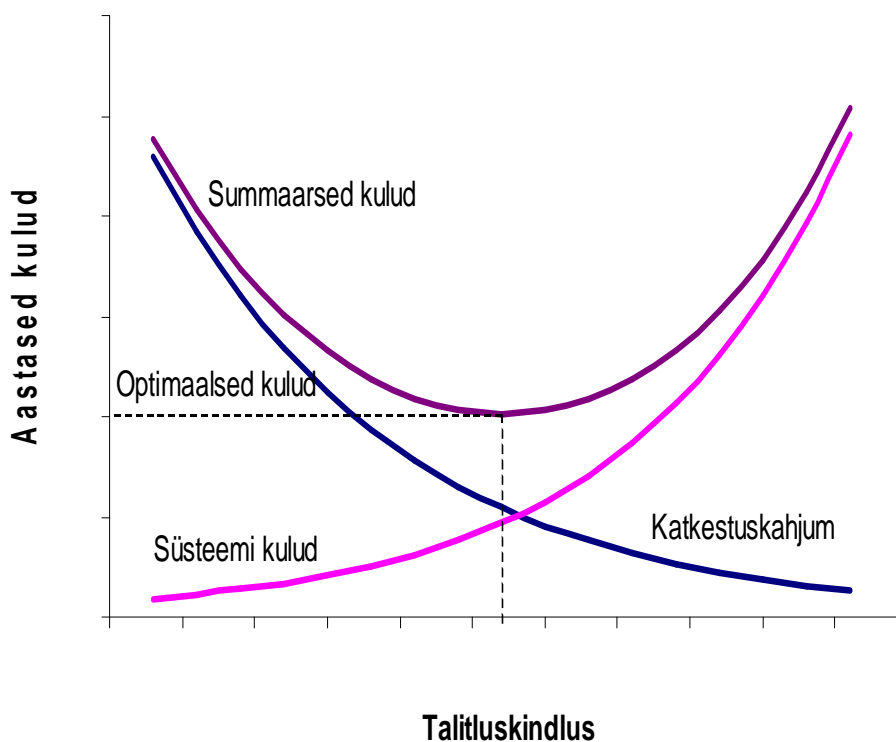
Täpsed kriteeriumid selle kohta, kui suur peaks olema energiasüsteemi talitus- ja tarbijate varustuskindlus, puuduvad. Talituskindluse suurendamiseks tuleb teha suuremaid investeeringuid elektrijaamadesse ja –võrkudesse, samuti suurenevad jooksvad kulud, kuna tuleb hoida suuremaid reserve. Seega talituskindluse tõstmine suurendab energia hinda. Kuid talituskindluse tõstmisel vähenevad tarbijate kahjumid, mis on tingitud energiavarustuse katkemisest. Seega põhimõtteliselt eksisteerib majanduslikult optimaalne talituskindluse tase (joon. 7.4).

### Optimaalne talituskindlus

Optimaalse talituskindluse all mõistetakse sellist talituskindluse taset, mille juures energiasüsteemi kulude ja katkemiskahjumi summa on minimaalne.

Energiasüsteemi kulude all mõistetakse siin elektrijaamade, elektrivõrkude jt energiafirmade kulusid, mis on seotud talituskindluse tagamisega.

Katkestuskahjum koosneb tarbijate kahjumist, mis on põhjustatud elektrivarustuse katkemisest ja energiafirmade kahjumist, mis tekib seoses avariide ning riketega, normaaltalitluse taastamisega ja müümata jäänud elektrienergiaga.

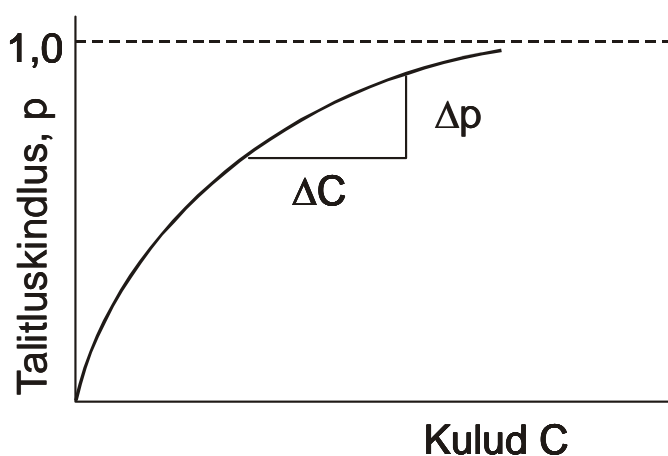


Joonis 7.4. Talituskindlusega seotud kulud



Kahjuks on see kriteerium ebamäärane, sest energiasüsteemi kulused ja tarbijate kahjumeid ei ole võimalik avaldada determineeritud funktsioonina talitluskindluse tasemest. Eriti suur on ebamäärus katkestuskahjumi funktsiooni määramisel. Katkestuskahjum kWh kohta võib tuhandeid kordi ületada elektrienergia hinna. Paljude tarbijate puhul (haiglad, riigiasutused, kultuuri- ja teadusasutused ning mitmed teised) ei ole energiakatkestuste kahjum üldse rahaliselt hinnatav. Seepärast tuleb optimaalse talitluskindluse probleemi käsitleda kui ebamäärast optimeerimisprobleemi ning sellisena seda ka edasi uurida. Talitluskindluse suhteliste juurdekasvude võrdlemine.

Talitluskindluse või varustuskindluse tõstmiseks tehtavate kulude otstarbekust näitab see, kui analüüsida erinevate energiaobjektide talitluskindluse sõltuvust tehtavatest kuludest (joon. 7.5).



Joonis 7.5. Töökindluse sõltuvus kuludest

Seejuures määratakse talitluskindluse suhtelised juurdekasvud:

$$p'_c = \frac{\partial p}{\partial C} \approx \frac{\Delta p}{\Delta C}. \quad (7.24)$$

Näitaja  $p'_c$  aitab otsustada, kas töökindluse tõstmiseks tehtavad kulutused on mõistlikud.

### Normatiivne talitluskindlus

Kuna vajaliku talitluskindluse taseme määramiseks puuduvad täpsed kriteeriumid, tuleb minimaalselt lubatav talitluskindluse tase kehtestada normatiivses korras. Energiafirmad peavad tagama, et tegelik talitluskindlus ei oleks väiksem kui normatiivne. Normid võidakse kehtestada kõikidele talitluskindluse ja varustuskindluse näitajatele. See on praktikas kõige enam levinud meetod talitluskindluse taseme reguleerimiseks. Normatiivsed talitluskindluse näitajad kehtestatakse standarditena või lepingulises korras. Lisaks sellele esineb nõue, et talitluskindlus ei tohi väheneda.

## N–1 kriteerium

N–1 kriteerium on talitluskindluse ja eriti häiringukindluse nõue, et energiasüsteem, elektriyaam ja elektrivõrk peab suutma täita oma põhiülesandeid ka pärast mistahes ühe elemendi tööst väljalülitumist. N–1 kriteerium on EL maades ja paljudes teistes maades üks põhilisemaid töökindluse kriteeriume. Peale ühe elemendi väljalülitumist tuleb võimalikult kiiresti taastada olukord, mis taas vastab kriteeriumile N–1.

Mõnedele objektidele kehtestatakse juba rangemad talitluskindluse nõuded, et objekti häiringukindlus peab vastama N-2 kriteeriumile või isegi n-3 kriteeriumile.

Avariide peamisteks tekitajateks energiasüsteemides on:

- vältumised
- seadmete rikked või väärtõimingud
- liigkoormused
- inimlikud eksimused.

Kõige sagedamini esinevad avariid on:

- lühised
- ahelate katkemised
- seadmete rikked.

Kõige ohtlikumateks avariideks on:

- stabiilsuse kaotused
- avariilaviinid ja elektriyaamade, energiasüsteemi või selle osade kustumine (*blackout*)
- sageduskollapsid
- pingekollapsid.

## Stabiilsuse kaotused

Elektriyaam või energiasüsteemi osa langeb liigkoormuse või ootamatu häiringu mõjul ülejäänud sünkronismist välja ja seisatakse või jäetakse ülejäänud süsteemi suhtes asünkroontalitlusele. Eristatakse staatilist stabiilsust – stabiilsust väikestele häiringutele ja dünaamilist stabiilsust – stabiilsust suurtele häiringutele.

Stabiilsuse kaotuse korral tuleb sünkronismist väljalangenud elektriyaamad ja energiasüsteemi osad võimalikult kiiresti sünkroniseerida ja lülitada taas rööptööle energiasüsteemiga.

## Avariilaviinid ja elektriyaamade ning energiasüsteemi kustumine

Väga ohtlikeks nähtusteks energiasüsteemides on avariilaviinid. Avariilaviin tekib siis, kui ühe seadme avarii tekitab või loob võimaluse teise avarii tekkeks. Avariilaviin võib levida sekundi murdosa või ka minutite ja tundide jooksul. Avariilaviin võib viia elektriyaamade eraldumiseni energiasüsteemist, energiasüsteemide eraldumiseni ühendenergiasüsteemist või elektriyaamade ja kogu energiasüsteemi kustumiseni.

Avariilaviinide tekkimise ja elektriyaamade kustumise vältimiseks:

- 1) tuleb väljalülitunud elemendi asemele võimalikult kiiresti lülitada töösse reservelement või kui see on võimalik, sama element tagasi lülitada;
- 2) eraldada avariitalitlusega süsteemi osad muust süsteemist ja võimaluse korral süsteemi osad võimalikult kiirest taas sünkroniseerida;
- 3) elektriyaamad peaksid olema suutelised töötama koormuse kadumise korral ainult omatarbe jaoks.

Enneavariilise olukorra kiire taastamine aitab enamikel juhtudel vältida avariilaviinide teket ja elektriyaamade kustumist.

### Sageduskollaps

Sagedus muutub ebastabiilseks ja hakkab kiiresti langema, mille tulemusena elektriyaamad lülituvad välja ja energiasüsteem lakkab toimimast. Sageduskollapsi vältimiseks tuleb sageduse langemisel suurendada aktiivvõimsuse genereerimist energiasüsteemis ja sageduse langemisel allapoole lubatavat väärtust algab tarbijate automaatne väljalülitamine.

### Pingekollaps

Pinge muutub ühes või mitmes elektrivõrgu sõlmes ebastabiilseks ja hakkab kiiresti langema. Pingekollapsi tulemusena seiskuvad elektrimootorid, pinge langeb nulli lähedale ja tarbijate varustamine elektrienergiaga selles piirkonnas katkeb. Pingekollapsi vältimiseks tuleb hoida pingeid kriitilisest väärtusest kõrgemal.

### Talituskindluse näitajad

Energiaobjektide talitus- ja häirekindluse analüüsil enamkasutatavad näitajad [5]:

1. Rikete intensiivsus  $\lambda$  – rikete arv ajaühikus (aastas).
2. Objekti taastamise intensiivsus  $\mu$  – võimalike taastamistsükli arv ajaühikus (aastas).
3. Riketeta töötssükli ehk töökorras olemise tsükli keskmine pikkus mõõdetuna aasta suhtes  $\bar{T}_{TK}$  :

Kehtib seos:

$$\bar{T}_{TK} = \frac{1}{\lambda}. \quad (7.25)$$

4. Objekti taastamistsükli ehk mittetöökorras oleku tsükli keskmine pikkus mõõdetuna aasta suhtes  $\bar{T}_{MTK}$  .

Kehtib seos:

$$\bar{T}_{MTK} = \frac{1}{\mu}. \quad (7.26)$$

5. Mittetöökorras oleku tõenäosus ehk koefitsient  $q$  ( $FOR$ ) :

$$q = FOR = \frac{T_{\Sigma MTK}}{T_{\Sigma TK} + T_{\Sigma MTK}} = \frac{\bar{T}_{MTK}}{\bar{T}_{TK} + \bar{T}_{MTK}} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}, \quad (7.27)$$

kus  $T_{\Sigma MTK}$ ,  $\bar{T}_{MTK}$  – vastavalt ajaintervallide summa ja keskmine ajaintervall, mille jooksul objekt on mittetöökorras,  $T_{\Sigma TK}$ ,  $\bar{T}_{TK}$  – vastavalt ajaintervallide summa ja keskmine ajaintervall, mille jooksul objekt on töökorras (töötab tõrgeteta).

*Tõenäosus*  $q$  näitab, kui suure osa vaadeldavast ajaperioodist objekt on mittetöökorras ehk millise tõenäosusega objekt on mittetöökorras. Tegelikult läheneb  $q$  tõenäosusele vaadeldava ajaperioodi pikenedes. Vastasel juhul  $q$  kujutab endast mittetöösoleku tõenäosuse hinnangut.

6. Töökorras oleku tõenäosus  $p$ :

$$p = 1 - U = 1 - q = \frac{T_{\Sigma TK}}{T_{\Sigma TK} + T_{\Sigma MTK}} = \frac{\bar{T}_{TK}}{\bar{T}_{TK} + \bar{T}_{MTK}} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}. \quad (7.28)$$

*Tõenäosus*  $p$  näitab kui suure osa vaadeldavast ajaperioodist objekt on töökorras ehk millise tõenäosusega objekt on tulevikus töökorras.

7. Elektriijaama kasutatava võimsuse jaotusrida: näitab, millise tõenäosusega on hetkel  $t$  tulevikus töökorras täpselt  $m$  agregaat ja mittetöökorras  $n-m$  agregaat, töökorras  $m-1$  agregaat ja mittetöökorras  $n-m+1$  agregaat jne, ning +millised on nendele agregaatide koosseisudele vastavad kasutatavad võimsused.
8. Elektriijaama mittetöökorras oleva võimsuse jaotusrida: näitab millise tõenäosusega on hetkel  $t$  tulevikus 0 agregaat mittetöökorras, 1 agregaat mittetöökorras, ... ,  $n$  agregaat mittetöökorras ning millised mittetöösoleku võimsused nendele agregaatide kombinatsioonidele vastavad. Seejuures kasutatava võimsuse jaotusrida määrab ära ka mittekasutatava võimsuse jaotusrea ja vastupidi.
9. Rikke või avarii tõttu tarnimata või tarbimata jäänud elektrienergia keskvärtus ehk energia defitsiidi keskvärtus  $\overline{\Delta A_{DEF}}$ .
10. Rikke või avarii tõttu tarnimata või tarbimata jäänud elektrilise võimsuse keskvärtus ehk võimsusdefitsiidi keskvärtus  $\overline{\Delta P_{DEF}}$ .
11. Võimsusdefitsiidi esinemise tõenäosus  $P_{\Delta PDEF}$ .
12. Võimsusdefitsiidi kestuse keskvärtus  $\bar{T}_{DEF}$ .
13. Tarbija toitekatkestuse kestuse keskvärtuse indeks  $\overline{T_{Katkestus}}$ .
14. Tarbija toitekatkestuse sageduse indeks  $\overline{f_{Katkestus}}$ .

Lisaks nimetatutele kasutatakse ka mõningaid teisi näitajaid.

## 7.5. Energiasüsteemide talitluskindlus Euroopa Liidu maades

Energiasüsteemi talitluskindlusele ja tarbijate varustuskindluse pööratakse kõikides maades järjest suuremat tähelepanu. Töökindluse suurendamise ja elektrituru laiendamise pärast ühendatakse energiasüsteeme üha suuremateks ühendenergiasüsteemideks. Euroopa Liidus on 3 suuremat ühendsüsteemi: Kesk-Euroopa ühendsüsteem UCTE, Põhjamaade ühendsüsteem NORDEL ja Suurbritannia ühendsüsteem. Omavahel on Euroopa ühendsüsteemid ühendatud alalisvooluliinide abil.

Kesk-Euroopa ühendsüsteem UCTE (*Union for the Coordination of Transmission of Electricity*) koosseisu kuulusid 2002. a järgmised energiasüsteemid: Portugal, Hispaania, Prantsusmaa, Belgia, Luksemburg, Holland, Taani, Saksamaa, Šveits, Austria, Itaalia, Horvaatia, Sloveenia, Tšehhi, Poola, Slovakkia, Ungari, Jugoslaavia ja Kreeka – kokku 20 riiki. UCTE liikmesriikide aastane energiatoodang 2001. aastal oli 2200 TWh. Sellest toodeti hüdroelektrijaamades 15,2 %, tuumaelektrijaamades 33,9%, tavalistes soojuselektrijaamades 50% ja muude taastuvate energiaallikate baasil 0,9%.

UCTE riikide energiasüsteemide summaarne ülesseatud võimsus on ~500 GW. UCTE varustab elektriga ühtekokku enam kui 450 miljonit inimest.

Töökindlus on kõikides ühendsüsteemides tähtsuset esikohal. Uute energiasüsteemide liitumiseks UCTE-ga on kehtestatud ranged nõuded liituvate energiasüsteemide ja nende talitluskindluse kohta. Energiasüsteemi talitluskindluse ja tarbijate varustuskindluse tagamiseks annab UCTE oma liikmetele soovitusi varustuskindluse, N–1 kriteeriumi, stabiilsuse ja lühisvoolude kohta.

Ühendatud süsteemi struktuur peab võimaldama tema talitlemist N–1 kriteeriumi järgi. Viimane tähendab seda, et kõigis talitlussituatsioonides mistahes ühe seadme (liini, trafo, jõujaama ploki, kompensatsiooniseadme jne) tööst väljalangemine ei tohi esile kutsuda ümbritsevas võrgus ei talitlusfunktsioonide piiramist (lubatud piirvoolude, pingete ületamine, stabiilsuse rikkumine) ega ka elektrivarustuse katkestust. Ühe tootmiselemendi väljalangemine ei tohi põhjustada talitluse katkemist ja süsteemi struktuur tuleb nii kiiresti kui võimalik viia sellisesse olukorda, et ta uuesti vastaks N–1 kriteeriumile. UCTE-s toimub avariiliste väljalülituste koordineerimine. Avariilaviinide tekkimist tõkestab vastav automaatika. Tarbijad nõuavad varustuskindluse pidevat suurendamist.

Analoogne olukord on Põhjamaade (Soome, Rootsi, Norra, Taani ja Island) ühendsüsteemis NORDEL ja Suurbritannia ühendsüsteemis.

## **7.6. Kokkuvõte**