

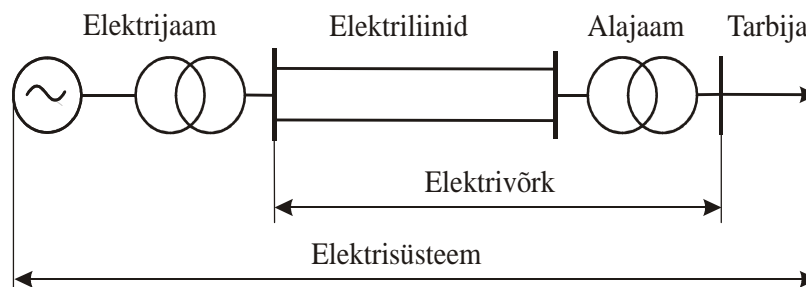
1. ELEKTRISÜSTEEM

Märkus. Käesoleva peatüki tekst põhineb raamatu „Jaotusvõrgud“ 1. peatükil.

1.1 Elektrisüsteemi üldisloomustus

Energiasüsteem on elektrijaamade, elektrivõrkude ja elektritarbijate (elektrisüsteemi koormuse) ühendus, kuhu lisanduvad elektrijaamadega seotud soojusvõrgud ja -tarbijad.

Energiasüsteemi elektriline osa on **elektrisüsteem**. Olulise osa sellest moodustab **elektrivõrk**.



Joonis 1.1 Elektrisüsteemi põhielemendid

Energiasüsteemid töötavad tänapäeval **suurte ühendsüsteemidena**, sest energiasüsteemi **majanduslikud ja tehnilised eelised** on seda suuremad, mida laiem ja võimsam on süsteem.

Ühendsüsteemidel on mitu eelist.

- Töökindluse suurenemine.
- Vajaliku reservi vähenemine.
- Agregaatide nimivõimsuse suurenemine.
- Elektrituru toimimine.

Energiasüsteemide ühendamine toob kaasa ka **probleeme**.

Nendest olulisim on, kuidas **säilitada süsteemi stabiilsus** (*generaatorite sünkroonne töö ja vajalik pingeniivo*). Probleemi tõsiduse mõistmiseks piisab, kui märkida, et energiasüsteemi kõigi **generaatorite rootorid peavad pöörlema sünkroonselt**, s.t generaatorite rootorite vaheline nurk, õigemini, elektromotoorjõudude faaside erinevus ei tohi ületada kindlat väärtust. Ühendsüsteemis võib avariisituatsioon kanduda ühest süsteemi osast teise, põhjustades avarii *laviinitaolise* laienemise.

Eristatakse järgmisi **laviinitaolisi protsesse**:

- staatilise ja dünaamilise stabiilsuse kadumine
- asünkroontalitluse teke,
- sageduslaviin
- pingelaviin.

Laviinitaolised protsessid levivad elektrisüsteemis sedavõrd kiiresti, et süsteemi operatiivpersonal **ei jõua vahele astuda**. Seetõttu seatakse avariide leviku tõkestamiseks üles **süsteemi-** ehk **avariitõrjeautomaatika**.

Elektrisüsteemi **talitluseks** nimetatakse elektrisüsteemi seisundi ajas muutumist, mis iseloomustab *elektrienergia tootmist, ülekandmist ja tarbimist* ning on määratud **seisundimuutujatega** (pinged, voolud, võimsused, nurgad jm).

Talitlused liigitatakse

- normaalseteks,
- raskendatuteks,
- avariilisteks,
- avarijärgseteks.

Normaaltalitlusel tagatakse tarbijatele toite töökindlus, elektrienergia kvaliteet (ettenähtud pinge ja sagedus) ning elektrivarustuse ökonoomsus. **Raskendatud talitlusel** on üks või mitu seisundimuutajat väljunud lubatud piiridest.

Avariitalitus ilmneb kas ootamatult (nt lühisel) või tuleneb raskendatud talitlusest. Avariitalitus tuleb võimalikult kiiresti likvideerida.

Avariijärgsesse talitluse satub energiasüsteem pärast avarii likvideerimist (nt peale lühistunud elektriliini väljalülitamist). Avariijärgne talitus on enamasti ka raskendatud talitus.

Elektrisüsteemi töö põhilised iseärasused tulenevad asjaolust, et energia akumulatsioonivõimaluste puudumise tõttu peab **toodetav ja tarbitav võimsus igal hetkel olema tasakaalus**.

Sellepärast peab süsteemis alati olema genereeriva **võimsuse reserv** avarii või tarbimise ettenägematu kasvu puhuks. Tuleb arvestada ka remontide ja muude asjaoludega, mis piiravad agregaatide kasutamist.

Kasutusel on järgmised mõisted:

- **üllesseatud (installeeritud) võimsus** – elektriijaamades käitusse antud agregaatide nimivõimsuste summa,
- **kasutatav võimsus** – agregaatide tegelik tootmisvõime, arvestades tehnilisi piiranguid,
- **töövõimsus** – kasutatav võimsus miinus reservagregaatide võimsus,
- **tegelik võimsus** – agregaatide tegelik koormus antud hetkel,
- **pöörlev ehk kuumreserv** – ühendatud võimsuse ja tegeliku võimsuse vahe,
- **operatiivreserv** – kuumreservi ja mobiilsete mittetöötavate agregaatide (nt hüdro- ja gaasiturbiinid) võimsuste summa,
- **külmreserv** – agregaatide võimsus, mille käikulaskmine võtab aega paarikümnest minutist mõne tunnini.

Elektrienergia tootmist ja tarbimist käsitledes tuleb tähele panna elektriijaamade *omatarvet, kadusid elektrivõrkudes ning elektrienergia ekspordi ja impordi* vahekorda.

Põhimõisted on järgmised:

- **elektrienergia brutotoodang** – elektriijaamade generaatoritest väljastatud energia,
- **elektriijaama omatarve** – osa brutotoodangust, mida elektriijaam kasutab tootmistüklis oma vajadusteks,
- **elektrienergia netotoodang** – energia, mida elektriijaam tegelikult väljastab (brutotoodangu ja omatarbe vahe),
- **eksport ja import** – energia, mis saadetakse teistesse riikidesse ja tuuakse sealt sisse,
- **netoeksport ja netoimport** – ekspordi ja impordi vahe või vastupidi,
- **kogutarbimine** – energia, mis väljastatakse elektriijaamadest riigi elektritarbimise katmiseks (netotoodangu ja netoeksporti vahe),
- **kasulik tarbimine** – energia, mida kasutab tarbija (leitakse tarbijate arvestinäitude summeerimise teel),
- **kaod** – kogutarbimise ja kasuliku tarbimise vahe.

1.2 Elektrienergia tootmine

Üldiseks mureks on *fossiilkütuste* ammendumisest, keskkonna saastumisest ning inimese tegevusest tingitud võimalik mõju kliimamuutustele.

Kütusevarud on **jaotunud** maailma riikide vahel **ebaühtlaselt**, mistõttu riigid või riikide rühmad võivad oma huvides dikteerida kütuste hindu ja esitada poliitilisi nõudmisi.

Maailma naftavarude ammendumist võib prognoosida juba *enne 21 sajandi lõppu*. Veidi kauem saab maailmas toota *maagaasi*, veel kauem aga *kivisiüt*. Fossiilkütustest kasutatakse veel *pruunsiüt, põlevkivi ja turvast*. Eesti energeetika põhineb *põlevkivil*, mille majanduslikult kasutuskõlblikke varusid arvatakse piisavat veel 30 aastaks, optimistlike hinnangute järgi 100 aastaks.

Hüdroelektrijaamades energiakandja ammendumise ning keskkonna saastumise probleeme pole. Koos hüdroelektrijaamaga tuleb rajada paisjärv, mis ujutab üle põllumajandusmaid, metsi, asulaid ja kultuurimälestisi. Seetõttu püütakse hüdroelektrijaamu ehitada väheasustatud piirkondadesse ja jõgedele, mille säng on kitsas ning sügav, langus aga suur. Sellised jõed on maailmas peaaegu kõik kasutusel. Märgetavaid hüdroressursse leidub veel vaid Hiinas, Aafrikas ja Venemaal.

Ka **tuumaelektrijaamades** toodetakse elektrienergiat ilma süsinikdioksiidi ja muude keskkonnakahjulike ainete emissioonita. Tuumakütuse vedu ei kujuta väikeste koguste tõttu probleeme. Suuremaks probleemiks peetakse nüüdisajal keskkonna *radioaktiivse saastamise ohtu* tuumareaktorite rikke korral, radioaktiivsete jäätmete lõppladude ebapiisavat töökindlust ning suuri kulutusi lõplikult seisma pandud tuumareaktorite lammutamisel.

Mitmekülgsed ohutusmeetmete rakendamine muudab tuumaelektrijaamad siiski *piisavalt ohutuks*, kuid ühtlasi ka kalliks ning suurendab nende rajamiseks kuluvat aega.

Uute tuumareaktorite püstitamist on alustatud USAs, Hiinas, Venemaal ja mujal. Soomes algas 2006. aastal ülitöökindla kolmanda (täpsemalt kolm pluss) põlvkonna survevesireaktori paigaldamine. See reaktor elektrilise võimsusega 1600 MW tagab varasematega võrreldes toodetava elektrienergia madalama omahinna ja tuumakütuse parema ärakasutamise.

Tuumaanergeetikute unistus on *termotuumareaktor*. Selline reaktor põhineb vesinikuaatomite ühinemisel heeliumiaatomiks, kusjuures osa ühinevate aatomituumade massist muutub energiaks. Et ühinemine oleks võimalik, peab vesinikutuumade soojusliikumise kineetiline energia olema nii suur, et ületataks tuumadevaheline tõukejõud. Selleks on vaja temperatuuri ligikaudu 10^8 K.

Tänases maailmas toodetakse peaaegu kogu elektrienergia fossiilkütuseid põletavates **soojuselektrijaamades, hüdrojaamades ja tuumajaamades**.

Eespool mainitud probleemide tõttu on tekkinud suur huvi **alternatiivsete elektrienergia allikate** vastu.

Nendeks on

- **tuuleenergia,**
- **geotermaalenergia,**
- **päikese kiirgusenergia,**
- **bioenergia,**
- **vesinikuenergeetika.**

Need energialiigid nagu traditsiooniline hüdroenergiagi on põhiliselt taastuvad ning ei ole seotud süsinikdioksiidi emissiooniga.

Eestis on taastuvatest elektrienergiaallikatest esikohal **tuuleenergia**. Vähesel määral rakendatakse ka biomass ja hüdroenergiat. Geotermaal- ja päikeseenergiat elektri tootmiseks ei ole meil laialdaselt kasutada võimalik.

Tuuleenergeetika on viimasel aastakümnel arenenud tunduvalt kiiremini kui muud energeetikaharud ennekoike massiivse poliitilise toetuse tõttu. Ka tõstab võimalus rajada suuri tuuleparke lühikese ajaga (1...2 aastaga) investeerijate huvi.

Tuuleolude poolest on soodsamas olukorras **mereäärsed riigid**, sest mandri sisealadel on tuule keskmine kiirus tuuleelektrijaamade jaoks enamasti ebapiisav. Kuna kõige soodsamad on tuuleolud merel, rajatakse võimsaid tuuleparke (võimsusega 500...1500 MW) rannikulähedasse merre, mandrilava madalikele. Ka ei häiri meres asuvad elektrituulikud elukeskkonda.

Sellistes jaamades on kasutusel suured elektrituulikud nimivõimsusega **3...10 MW**. Tuuleolude muutlikkus tingib tuuleelektrijaamade **kõikuva** ja sageli **kiiresti muutuva võimsuse**, mis raskendab energiasüsteemi teiste elektrijaamade talitlust, kuna need peavad suutma kompenseerida tuuleelektrijaamade võimsuskõikumisi. Seetõttu on tuuleelektrijaamade lubataval võimsusel energiasüsteemis piir, mis praegu arvatakse olevat **enimalt 20%**.

Elektrijaamaliikide **osatahtsus on riigiti erinev**.

Näiteks annavad **Norras üle 99% elektrienergiast hüdroelektrijaamad**.

Araabia maades saadakse kogu elektrienergia **vedelkütusega** või **maagaasiga** köetavatest elektrijaamadest.

Prantsusmaal on arenenud **tuumaenergeetika**, mis annab 78% kogu elektrienergiast.

Üle kahe kolmandiku maailma elektrienergiatarbest kaetakse fossiilkütuse põletamise teel. Ülejäänud kolmandik jaguneb peaaegu võrdselt **hüdro-** ja **tuumaelektrijaamade** vahel. Kuigi lähematel aastatel on oodata tuule- ja päikeseenergia kasutamise kasvu, jääb nende osatahtsus ikkagi ainult **mõne protsendi piiridesse**.

Ligi 90% kogu toodetavast elektrienergiast annavad **suured elektrijaamad** võimsusega **1000 MW ja enam**. Energiaplokkide võimsus suurtes soojuselektrijaamades on 100...1300 MW, hüdroelektrijaamades 100...800 MW.

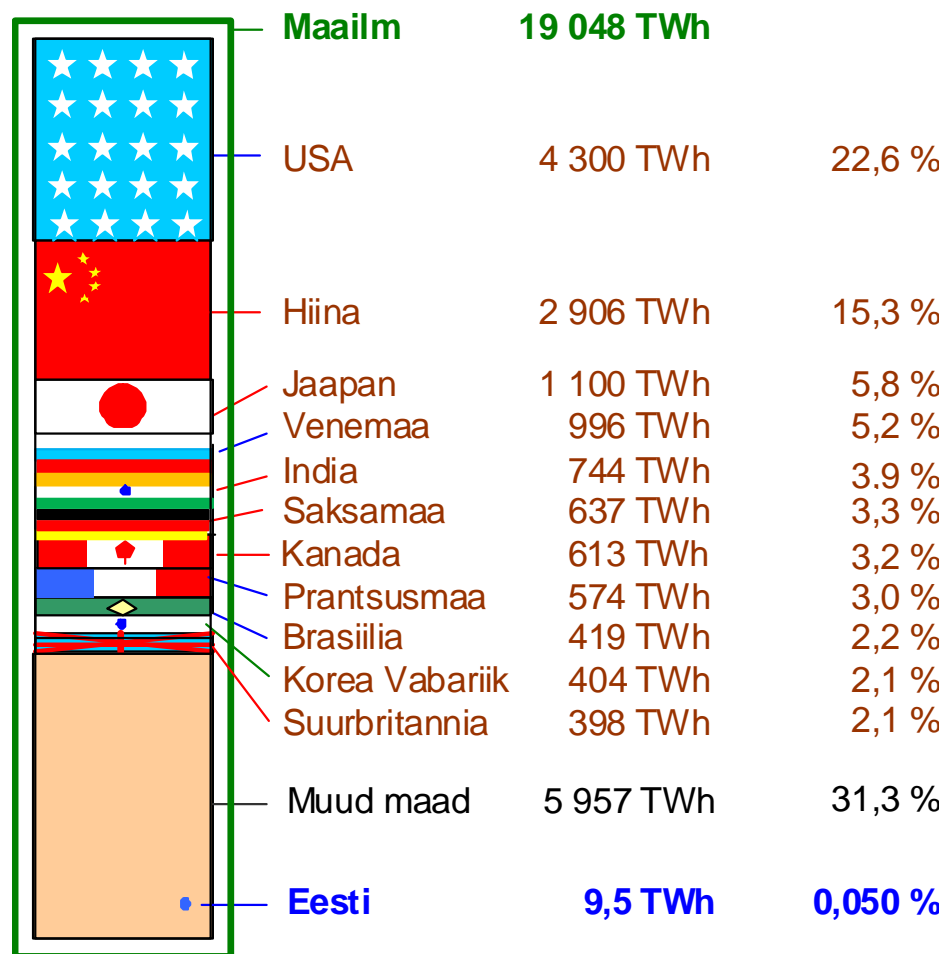
Maailma suurim

- *hüdroelektrijaam* on **Italpu** võimsusega $19 \times 700 = 13\,300$ MW Brasiilias,
- *tuumaelektrijaam* **Kashiwasaki-Kariwa** $5 \times 1100 + 2 \times 1356 = 8212$ MW Jaapanis ja
- *soojusjaam* **Surgut** $2\,6 \times 800 = 4800$ MW Venemaal.

Meil on suurimaks elektrijaamaks **Eesti Elektrijaam** võimsusega 1615 MW.

Maailma võimsamaks elektrijaamaks on kujunemas **Sanxia** hüdroelektrijaam Jangtse jõel Hiinas. Jaama tuleb 32 hüdroturbiinagregaati võimsusega 700 MW, kokku **22 400 MW**.

Eestis oli 2006. aasta lõpus üle 20 väikese hüdroelektrijaama koguvõimsusega 5,2 MW. Suurim neist on **Linnamäe** hüdroelektrijaam Jägala jõel võimsusega **1,152 MW**.



1.2 Maailma suurimad elektrienergia tootjad aastal 2006
(USAs netotoodang)

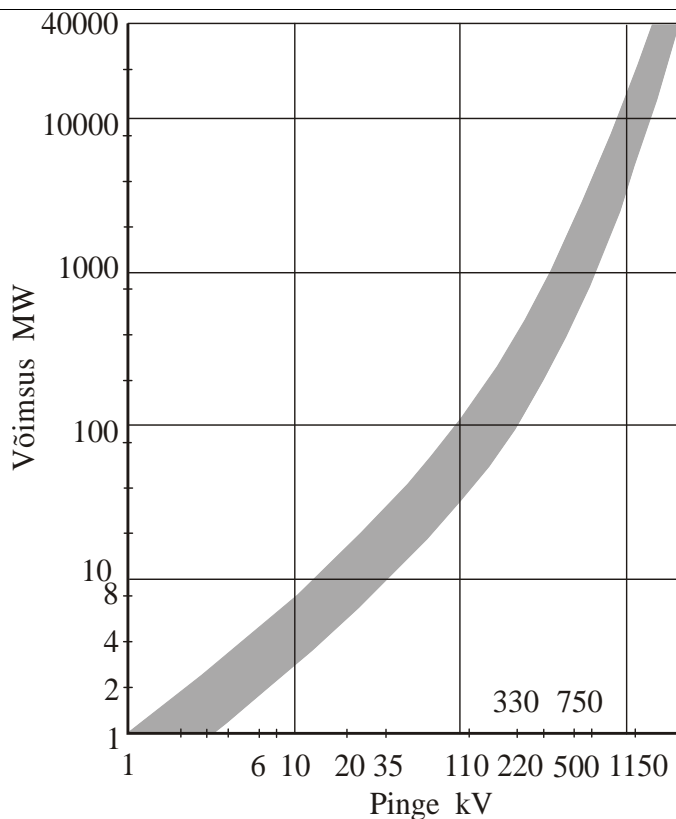
1.3 Elektri ülekanne ja jaotamine

Energiasüsteemi elektri jaamad on ühendatud süsteemi *põhivõrku*, mis tavaliselt talitleb pingel **220...500 kV** (Eestis **110...330 kV**).

Põhivõrgust saavad toite *suuremad elektritarbijad* ning keskpinge **6...35 kV jaotusvõrgud**, mis jaotusalajaamade kaudu varustavad elektritarbijaid enamasti 400 V (0,4 kV) madalpingel. Jaotusvõrguga võivad olla ühendatud ka kohalikud elektri jaamad, näiteks väiksemad hüdrojaamad, koostootmisjaamad jt.

Elektriliinide nimipinged ja muud tunnussuurused valitakse **tehnilis-majanduslike võrdlusarvutusega**, võttes arvesse nii investeeringuid kui käidukulusid ja koormuse kasvu tulevikus.

Kõrgepingeliinide keskmiselt edastatav võimsus olenevalt nimipingest on joonisel.



1.3 Kolmefaasilise elektriliini kaudu edastatava võimsuse sõltuvus nimipingest

Esimene 110 kV liin rajati aastal 1906 USA-s ning 380 kV liin aastal 1953 Rootsis.

Aastal 1986 ehitati esimene 900 km pikkune liin nimipingega 1150 kV Kasahstanis.

Eestis tuli pinge 110 kV kasutusele aastal 1951 ja pinge 330 kV aastal 1962.

Ilma lisaseadmeteta võib võimsust üle kanda kuni **500 km** kaugusele. Tänapäeval on lisaseadmetena kasutusel staatilised **türistorjuhitavad kompenseerimisseadmed**, mis koosnevad türistorjuhitavatest kondensaatorpataridest ja reaktoritest.

Kui on vaja edastada suuri võimsusi (mõni GW) suurele kaugusele (1000 km ja enam), võidakse kasutada **alalisvooluliine**. Alalisvoolu korral on nii õhu- kui kaabelliinid lihtsamad ja odavamad kui vahelduvvooluliinid, kuid nad nõuavad mõlemas otsas kalleid muunduralajaamu. Alalisvool on vajalik pikkade (nt merealuste) kaabelliinide korral, kus vahelduvvoolu kasutada pole kaablite suure mahtuvuse tõttu võimalik. Selliseid liine on Balti meres mitu, 2006. aastast alates ka Eesti ja Soome vahel.

Elektrivõrke liigitatakse ennekõike *nimipinge* alusel.

Elektrivõrgu nimipinge on pinge, millele võrk on ette nähtud ja millele viidates iseloomustatakse teatud talitlusomadusteid.

Kõige üldisemalt võib elektrivõrke jaotada *madal- ja kõrgepingevõrkudeks* vastavalt nimipingega $U_n \leq 1000 \text{ V}$ või üle selle.

Viimaseid jaotatakse omakorda *keskpingevõrkudeks* $6 < U_n \leq 35 \text{ kV}$,

kõrgepingevõrkudeks $35 < U_n \leq 220 \text{ kV}$ ja

ülikõrgepingevõrkudeks $U_n \geq 330 \text{ kV}$.

Eestis on madalpingevõrgud enamasti nimipingega **0,4 kV**, keskpingevõrgud **3...35 kV**, kõrgepingevõrgud **110...220 kV** ja ülikõrgepingevõrgud pingega **330 kV** (tabel 1.1).

Tabel 1.1 Eesti elektrivõrkude nimipinged

Elektrivõrgu liik	Nimipinge U_n kV	Seadme suurim lubatav kestevpinge (IEC 60038) U_{max} kV
Madalpingevõrgud	≤ 1 enamasti 230/400 V	–
Keskpingevõrgud	3	3,6
	6	7,2
	10	12,0
	15	17,5
	20	24,0
	35	40,5
Kõrgepingevõrgud	110	123,0
	220	245,0
Ülikõrgepingevõrgud	330	363,0

Maailmas kasutatakse keskpinge-jaotusvõrkudes **mitmesuguseid nimipingeid**. Standardi IEC 60038 kohased keskpingevõrgu nimipinged on tabelis 1.2. Jada

1 pingeid kasutatakse maades, kus sagedus on **50 Hz**, jada 2 pingeid aga sagedusel **60 Hz**. Jada 1 nimipinged on kahes loendis. **Eestis** on kasutusel **esimese jada teine loend**.

Tabel 1.2 Rahvusvaheliste standardite kohased nimipinged

Jada 1	3,3	6,6	11	22	33	
	3	6	10	15	20	35
Jada 2	4,16	12,5	13,2	13,8	24,9	34,5

Peale nimipinge iseloomustatakse võrke ka *talitluspingega*. Võimaliku tööpingevahemiku määravad kindlaks võrgus *lubatav suurim* ja *vähim talitluspinge*. Talitluspinge hulka ei loeta siirdepingeid ja pinge ajutisi kõikumisi.

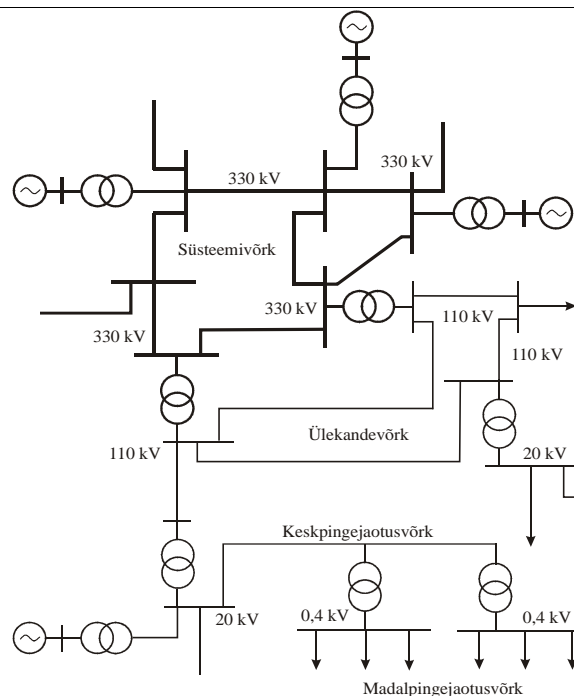
Seadme suurim lubatav kestevpinge on elektrivõrgu suurima talitluspinge selline väärtus, millel seadmeid veel lubatakse kasutada (tabel 1.1).

Otstarbe järgi võib elektrivõrke liigitada *süsteemi-, ülekande- ja jaotusvõrkudeks*.

Süsteemivõrk on tavaliselt *ülikõrgepingevõrk*, mis ühendab elektrisüsteeme ja suuri elektrijaamu.

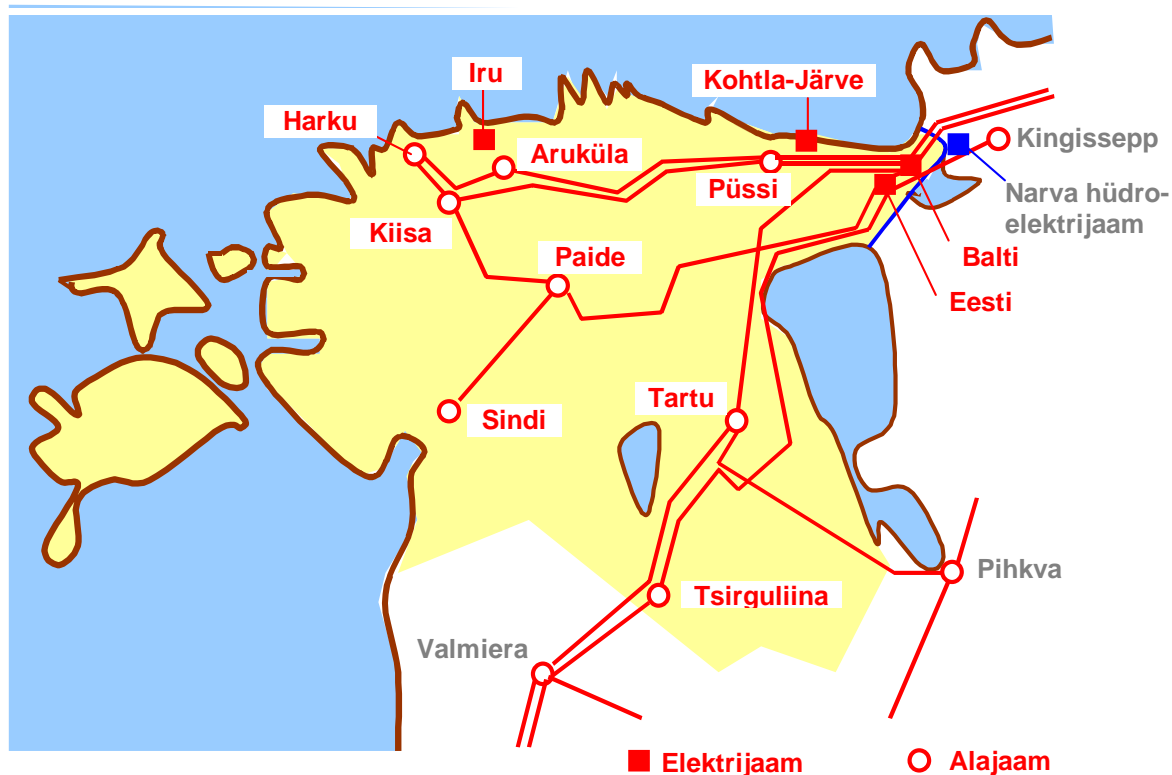
Ülekandevõrkude vahendusel kantakse elektrienergia üle suurematesse alajaamadesse (tarbimiskeskustesse).

Elektrienergia jaotamise funktsiooni täidavad **jaotusvõrgud**, mis edastavad elektrienergiat suurtest toitealajaamadest tarbijateni.



Joonis 1.4 Elektrisüsteemi skeem

Eesti energiasüsteemi elektrijaamade paigutus, põhivõrgu liinid pingega 330 kV ja nendega ühendatud alajaamad on näidatud joonisel. Süsteemi omapärasuseks võib lugeda seda, et selle **suurimad elektrijaamad** paiknevad **riigi kirdepiiri lähedal**, **suurimad tarbijad** (sealhulgas Tallinn) aga **riigi lääneosas**, mistõttu elektrienergiat tuleb edastada suhteliselt kaugele.



Joonis 1.5 Eesti energiasüsteemi suurimad elektrijaamad ja põhivõrgu liinid pingel 330 kV

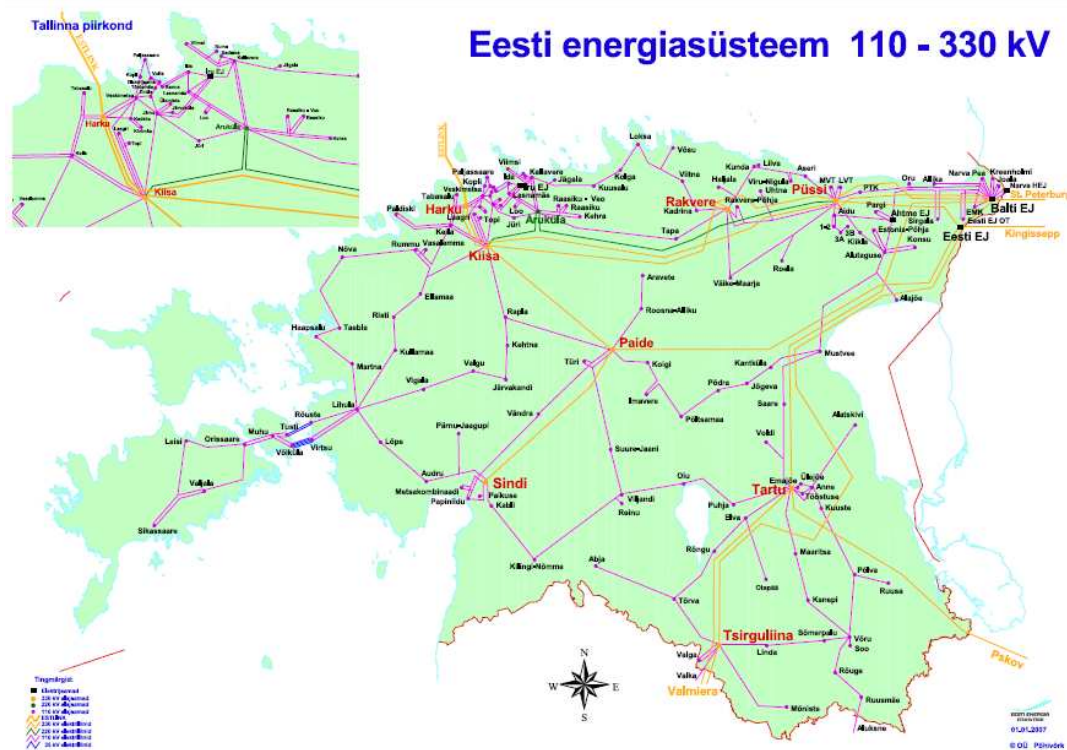
Suurimad elektrijaamad Eesti energiasüsteemis on

- Eesti elektrijaam **1610 MW,**
- Balti elektrijaam **839 MW,**
- Iru soojus- ja elektrijaam **190 MW,**
- Kohtla-Järve elektrijaam **39 MW.**

Elektrienergiat kannab Eestis üle ettevõtte **OÜ Elering** (endine OÜ Põhivõrk).

Elektrienergia jaotamisega tegeleb **OÜ Jaotusvõrgu** kõrval veel muidki ettevõtteid (*Fortum, Narva Elektrivõrgud* jt).

Eesti energiasüsteem on 330-kV liinide kaudu ühendatud Läti, Leedu ja Venemaa energiasüsteemiga. Venemaa, muud SRÜ riigid ja Balti riigid moodustavad omavahel sünkronismis talitleva energiasüsteemide kompleksi.



1.6 Eesti energiasüsteem 110 – 330 kV

Euroopas on veel kolm erisuguse sagedusreguleerimisega energiasüsteemide kompleksi:

- Euroopa mandriosa (väljaarvatult Skandinaavia maad),
- Skandinaavia (Soome, Rootsi, Norra ja osa Taanit),
- Suurbritannia ja Iirimaa.

Euroopa mandriosaga on sünkronselt ühendatud ka Türgi ja Marokko energiasüsteemid.

Eri sagedusreguleerimisviisiga energiasüsteemid on ühendatud alalisvooluliinide või alalisvoolumuundusjaamade kaudu.



1.7 Põhja-Euroopa energiasüsteemi kaart

Elektrienergiat **salvestada pole praktiliselt võimalik**, peab igal hetkel valitsema tarbitava ja genereeritava võimsuse tasakaal ehk **võimsusbilanss**. See kehtib nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsuste kohta.

Suuremad reaktiivvõimsuse tarbijad on **asünkroonmotorid, muundurid, induktsioonahjud** jm. Reaktiivvõimsuse kogutarbimisest moodustavad elektritarvitite kõrval olulise osa **reaktiivvõimsuskaod**, moodustades ligi 50% võrku antavast võimsusest. Peamised reaktiivvõimsuskadude tekitajad on **trafod**, kuna kõrgepingeliinid oma kaod enamasti kompenseerivad.

Generaator annab võrku reaktiivvõimsust, kui ta on üleergutatud ($E > U$).

Reaktiivvõimsuse allikateks on generaatorite kõrval veel reaktiivvõimsuse **kompenseerimisseadmed**.

Kuna nii aktiiv- kui reaktiivvõimsuse kadude tõttu pole märkimisväärne reaktiivvõimsuse edastamine otstarbekas, kasutatakse reaktiivvõimsuse kohalikku genereerimist ehk **reaktiivvõimsuse kompenseerimist**. Kompenseerimisseadmeteks on sünkroonkompensaatorid, kondensaatorpatareid, staatilised reaktiivvõimsuse allikad ja pöikreaktorid.

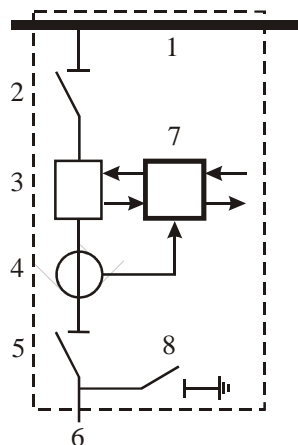
Oluline osa elektrienergia ülekandel ja jaotamisel on **alajaamadel**.

Alajaam on ette nähtud elektrienergia muundamiseks ja jaotamiseks. Alajaam sisaldab **sisenevate ja väljuvate liinide ühendusi, lülitusseadmeid, trafosid, juhtimisahelaid ning hooneid**. Alajaamas paikneb ka **kaitse- ja juhtimisaparatuur**. Alajaama, milles on küll lülitusseadmed ja kogumislaidid, kuid puuduvad jõutrafad, nimetatakse **lülituspunktiks**.

Alajaama osa, mis hõlmab jaotusseadmeid koos nende juurde kuuluvate juhtimis-, mõõte-, kaitse- ja reguleerimiseseadmetega, nimetatakse **jaotlaks**. Konstruktiivselt eristatakse **välis-** ja **sisejaotlaid**.

Alajaamad koosnevad enamasti **ülempingejaotlast, trafodest ja alampingejaotlast**.

Jaotlad jagunevad trafode arvu alusel (enamasti üks või kaks trafot) sektionideks. Sektionid jagunevad omakorda **lahtriteks**, kuhu on koondatud sektioniga ühendatud liini või trafo lülitus- ja kaitseaparaadid.



Joonis 1.8 Kõrgepingejaotla lahtri skeem

Kõrgepingelahter ühendab kogumislätte 1 liini või trafoga 6. Lahtri seadmete hulgas on tähtsaimal kohal võimsuslülitid 3, mille abil saab liini või trafot sisse ja välja lülitada ja mis peab suutma katkestada ka lühisvoolu. Püsiva katkestuse tegemiseks remondi- ja hooldustööde ajal on ette nähtud **lahklülitid** 2 ja 5, mis moodustavad kaitselahutuse. Ohutuse tagamiseks on veel **maanduslülitid** 8. Lahtrisse kuulub ka **juhtimis-, kaitse- ja mõõtesüsteem** 7, millega on ühendatud voolutrafo 4.

Lihtsamates paigaldistes kasutatakse lühisvoolude katkestamiseks võimsuslülitid asemel **kõrgepinge-sulavkaitsmeid**. Sel juhul toimuvad lülitused koormuslülitite abil.

Madalpingejaotlate lahtrites nähakse lühisvoolude katkestamiseks ette **kaitselülitid või sulavkaitsmed**.

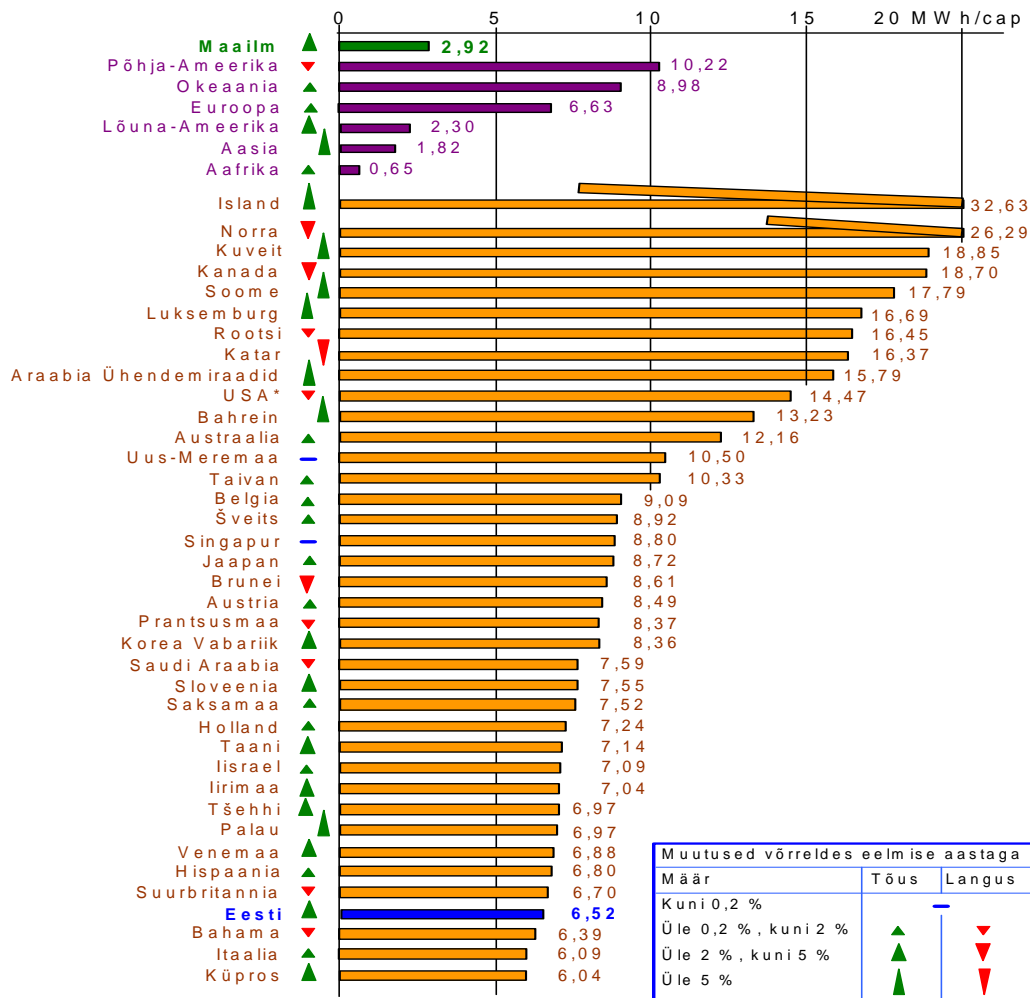
1.4 Elektri tarbimine

Elektrienergiat tarbiti maailmas 2006. aastal keskmiselt **2,92 MWh** inimese kohta. See näitaja oli Põhja-Ameerikas, Okeaanias ja Euroopas kaugelt kõrgem kui Lõuna-Ameerikas, Aasias ja Aafrikas.

Eriti kõrge on see maades, kus odavat, nt hüdrojaamadest saadavat elektrienergiat saab ulatuslikult kasutada mitte üksnes elektrimahukates tootmisprotsessides ja elektriraudteedel, vaid ka hoonete kütteks (Island, Norra, Kanada, Rootsi).

Euroopa Liidus (sealhulgas Eestis) ja muudes tööstuslikult arenenud regioonides ning naftat tootvates maades on elektritarbimine inimese kohta enamasti 2 kuni 6 korda kõrgem kui maailma keskmine.

38 riiki, milles elektrienergia tarbimine elaniku kohta oli aastal 2006 üle 2 korra kõrgem kui maailma keskmine, on esitatud joonisel.



Joonis 1.9 Elektrienergia tarbimine elaniku kohta aastal 2006

Esitatud on riigid, milles see näitaja on vähemalt kaks korda kõrgem kui maailma keskmine. * Ilma elektrienergia omatarbena

Elektrienergia kõrge eritarbimine võib olla tingitud

- elektrimahukatest tootmisprotsessidest tööstuses (elektrometallurgia, elektrokeemiatööstus jms),
- raudteede ja linnatranspordi ulatuslikust elektrifitseerimisest,
- kõigi rahvamajandusharude ja olme kõrge elektrifitseerimistasemest,
- elekterkütte ulatuslikust rakendamisest.

Elektrienergia eritarbimist võivad aga suurendada ka

- elektrienergia eksport, kuna elektrienergia selle tõttu suurenenud omatarve ja elektrienergia edastuskaod lähivad arvesse riigisisese elektritarbimisena,
- elektrienergia ebaratsionaalne kulutamine ja suured kaod.

Eestis on suhteliselt kõrge elektrienergia eritarbimine tingitud peamiselt kõigi rahvamajandusharude ja olme suhteliselt hästi arenenud elektrifitseerimistasemest.

Elektrit tarbivad ennekõike elektrimootorid või täpsemalt *elektrijamid*, kui silmas pidada ka juhtimis- ja reguleerimisseadmeid. Üldse tarbivad elektrijamid **2/3** kogu toodetavast elektrienergiast. Asünkroonmootorid on elektrivõrku ühendatud vahetult. Alalisvoolumootorid tarbivad elektrit läbi alaldite ja sünkroonmootorid vahetult või sagedusmuundurite kaudu.

Elekterkütte osakaal elektrienergia tarbimises võib olla küllaltki suur seal, kus elektrienergia on odav või muid kütuseid napib. Näiteks Lapimaal moodustas elektriküte külmade ilmade korral elektrivõrgu koormusest 50% ja enam. Elekterkütet saab realiseerida nii *otse- kui salvestuskiitena*..

Tööstuslikud elektrotehnoloogiaseadmed tarbivad ligikaudu 25% kogu tööstuses kasutatavast elektrienergiast.

Valgustuseks kulub maailmas ligikaudu **10%** elektrienergiast. Valgusallikateks on hõõglambid, lahenduslambid ja valgusdiodid.

Elektrisüsteemi talitluse plaanimisel ja juhtimisel lähtutakse **elektrivõrgu koormusest**, mõistes selle all elektritarvitite *summaarset aktiiv- ja reaktiivvõimsust*, millele lisanduvad kaod kohalikus elektrivõrgus. Koormus **muutub** regulaarselt ajas, **sõltub** ilmastikust, sagedusest süsteemis ja elektrivõrgu sõlmepingest ning on stohhastilise iseloomuga.

Koormust võib mõningal määral **juhtida**, kasutades muutuvaid tariife või koormuse sõltuvust talitusparameetritest (pinge, sagedus). Avariiohtlikes olukordades võib suuremad tarbijad välja lülitada releekaitse.

Praktikas vaadeldakse enamasti koormuse **keskväärtusi tunni või ka lühema ajavahemiku kohta**. Koormusi on vaja prognoosida lühema või pikema ennetusajaga (mõnest tunnist aastani ja enam), aga ka analüüsida ja imiteerida.

Elektrisüsteemi talitlust vaadeldakse ka pikemas (nt aastases) perspektiivis. Vaja on plaanida *kiituseressursse* ning sõlmida *elektri ostu-müügilepinguid*.

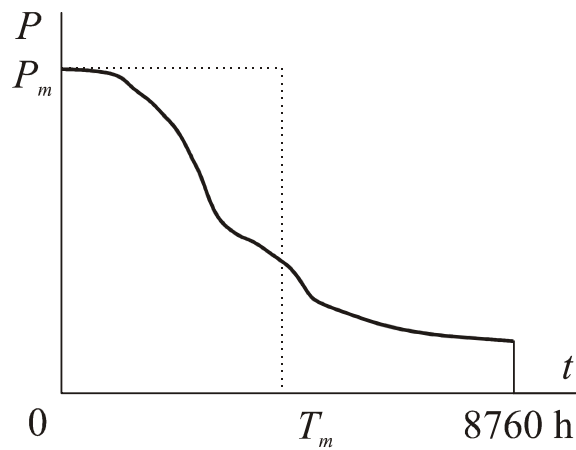
Aluseks on koormuse väärtused mitmesugustes ilmastikuoludes ning koormuse kasvu (trendi) variandid.

Koormuse **pikaajalise prognoosi** korral võivad asjatundjad arvesse võtta ka regiooni majandusliku arengu perspektiive ja oodatavaid tehnilisi muutusi

Elektrivõrgu projekteerimisel lähtutakse **koormuse maksimaalväärtustest**, mida rajatavad elektriliinid ja alajaamade seadmed peavad taluma.

Kasutusel on mitmesugused meetodid, mis võimaldavad maksimaalkoormusi hinnata **tarbijatüüpide** (nt tööstus-, põllumajandus-, kommunaaltarbijad jm) **kaupa**.

Üheks lähtekohaks on aasta **koormuskestusgraafik**, mis näitab antud väärtusega võrdse või seda ületava koormuse kestust mingi ajavahemiku (aasta) jooksul.



Joonis 1.10 Aasta koormuskestusgraafik

Ligikaudselt võib maksimaalkoormust P_m hinnata **tippkoormuse kasutusaja** T_m ja **aastaenergia** W järgi, arvestades, et

$$W = \int P dt = P_m T_m$$

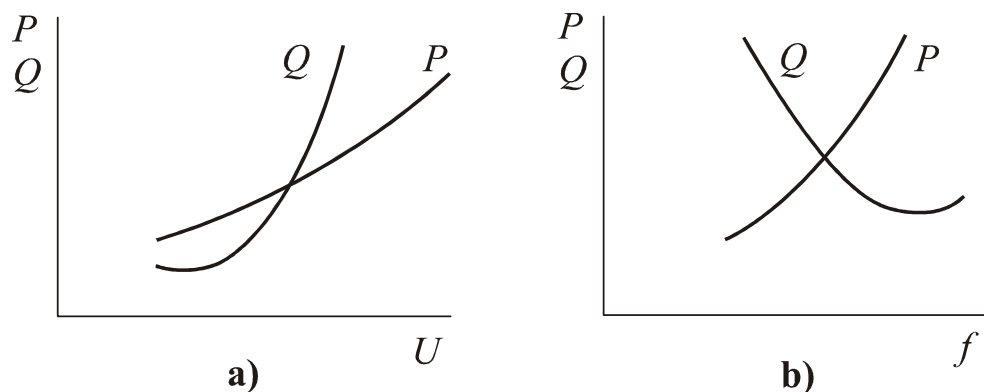
Veidi täpsema tulemuse annab Velanderi valem

$$P_m = k_1 W + k_2 \sqrt{W}$$

Nii maksimaalkoormuse kasutusaeg T_m kui Velanderi valemi kordajad k_1 ja k_2 sõltuvad tarbija liigist.

Talitluse reguleerimis- ja stabiilsusülesannete lahendamisel on vaja teada koormuse **staatilisi karakteristikuid** – sõltuvust sagedusest ja pingest.

Fikseeritud olukorras iseloomustab pinge ja sageduse mõju aktiiv- ja reaktiivkoormuse **pinge-** ja **sagedustundlikkus**.



Joonis 1.11 Koormuse staatilised karakteristikud pinge (a) ja sageduse (b) järgi

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

Elektri tarbimisega liitub **elektri kvaliteedi** nõue. Elektritarvitid on projekteeritud nii, et nende töö on optimaalne talitluse nimiparameetrite (pinge, sagedus) korral. Elektriijaamast väljastatud elektrienergia kvaliteeti rikuvad *pingekaod* elektrivõrgus, *ühefaasilised* ning *mittelineaarseid* elemente sisaldavad tarvitid jm.

Elektri kvaliteedi all mõeldakse *üldjuhul elektritarbijate elektrivarustuskindlust ja talitusparameetrite vastavust nimisuurustele*. Kvaliteedinõuded võivad erineda sõltuvalt tarbijast. **Elektrivõrk peab andma** tarbijale kvaliteetset elektrit, kuid ka tarbija ei tohi oma seadmetega võrku saastata, sest üks olulisem halva kvaliteedi põhjustaja on tarbija ise.

1.5 Elektrisüsteemi talitus

Elektrisüsteemi töö plaanimise ja juhtimise objektiks on elektrisüsteemi **talitus**. Talitluse all mõistetakse ajas kulgevat protsessi – süsteemi **seisundite ajalist järgnevust**.

Talitlust iseloomustavad **seisundiparameetrid** ehk – muutujad (pinge, pingevektorite nurgad, voolud, võimsusvood, koormused, genereerivad võimsused jm), mis muutuvad üleminekul ühest seisundist teise talitluse käigus.

Püsitalitluses muutuvad seisundiparameetrid suhteliselt väikestes piirides ja küllaltki aeglaselt. Püsitalitlusesse kuuluvad normaal-, kriitilised ja avariijärgsed talitlused.

Siirdetalitlusi iseloomustab parameetrite kiire muutumine suurtes piirides. Siirdetalitlustest pakuvad praktilist huvi avariitalitlused kui raskeimad.

Avariitalitluste kestus on suhteliselt lühike.

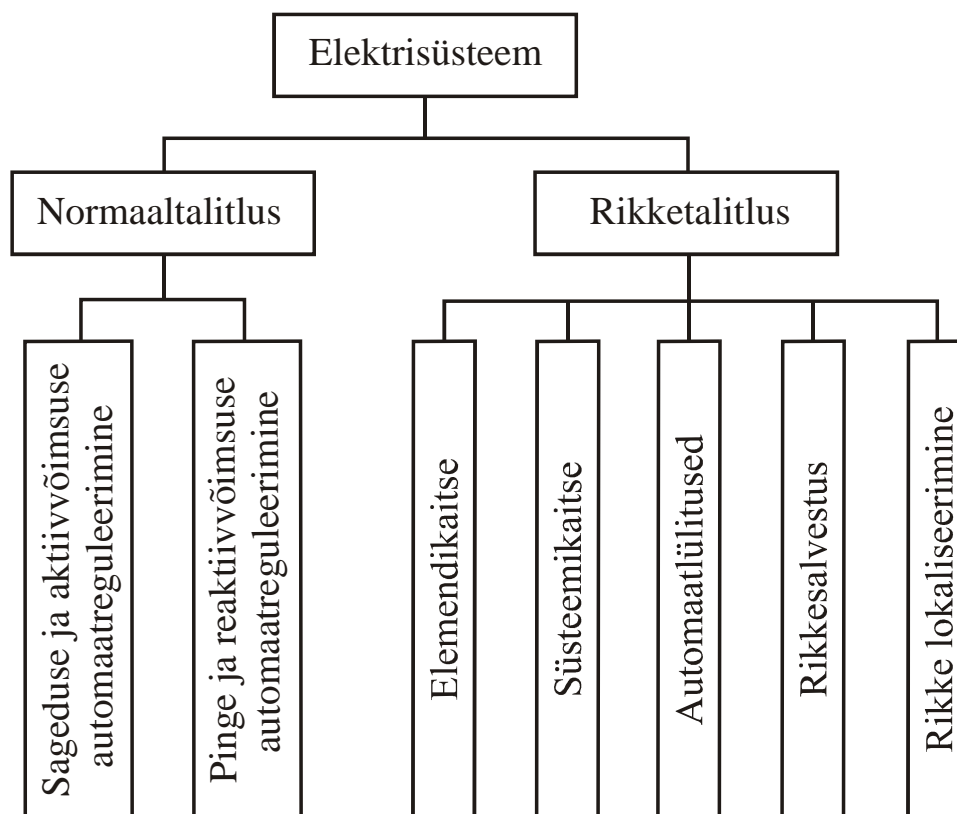
1.5.1 Talitluse reguleerimise ja juhtimise vahendid

Elektrisüsteemi talitlust jälgitakse ja juhitakse **dispetšisüsteemi** vahendusel.

Vajaduse korral, eriti avariitalitluse vältimiseks või likvideerimiseks teevad dispetšerid muudatusi elektrivõrgu skeemis, lülitavad sisse reservagregaate jms. Inimese tegevus algab siiski mõni minut peale vahelesegamist nõudva olukorra tekkimist.

Kiiremini reageerivad mitmesugused automaatikaseadmed, ennekõike releekaitse, mis lülitab avariilised seadmed välja isegi mõne millisekundi jooksul. Ka rutiinsed tegevused, nagu pinge ja sageduse reguleerimine, on automaatide ülesanne).

Enam kasutatavate automaatide hulka kuuluvad *releekaitseadmed, reservilülitusautomaadid, taaslülitusautomaadid ja koormuse sagedusautomaadid*. Elektrienergia kvaliteedi tagavad sageduse ja pingega automaatregulaatorid.



Joonis 1.12 Elektrisüsteemi automaatjuhtimine

Releekaitse peab vähendama kahjusid avarii kiire likvideerimise ja selle laienemise vältimise teel. Releekaitse *ei hoia avariid ära!* Ta **avastab** elektriseadmete rikked, enamasti isolatsioonirikked, nendest põhjustatud suure lühisvoolu või küllaltki väikese maahendusvoolu järgi ja **lülitab** vigastatud elektriseadmed kiiresti ning selektiivselt **välja**.

Kiired ülikõrgpingeliini kaitseseadmed rakenduvad 5 ms jooksul.

Kui releekaitse avastab talitlushäiringu (nt ülekoormuse), mis on mõne aja jooksul lubatav, antakse ainult sellekohane signaal.

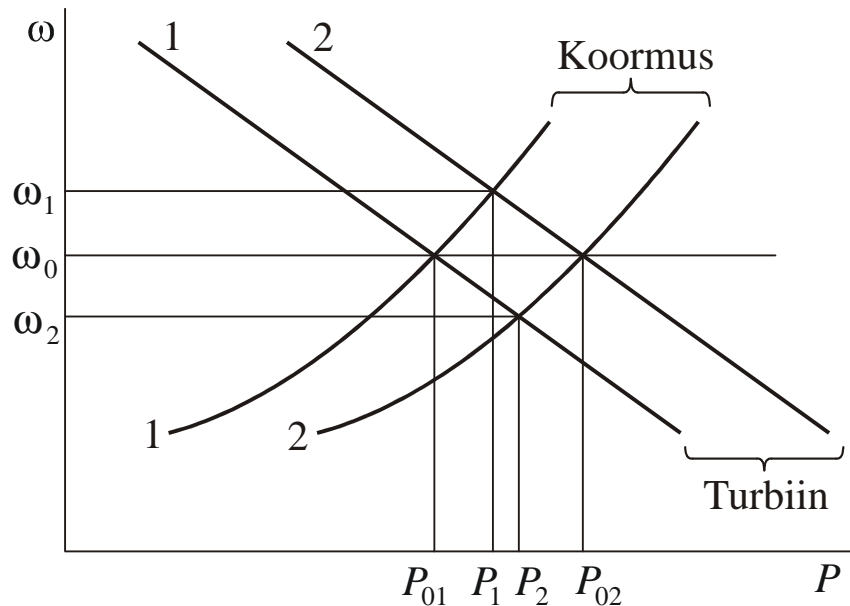
Releekaitseadmed moodustavad energiasüsteemi automaatikaseadmetest umbes **80%**.

Elektrienergia tootmine ja tarbimine peavad igal ajahetkel olema **tasakaalus**. Tasakaalu rikkumine avaldub elektrisüsteemi sageduse kõrvalekaldena. Kui koormus süsteemis tõuseb, siis põhjustab genereeritava ja tarbitava võimsuse vahe kineetilise energia vähenemist ja generaatorite pöörlemiskiiruse ja sellega võrdeliselt ka sageduse langust.

Sageduse ja seega ka pöörlemiskiiruse muutumisele reageerivad turbiinide **kiirusregulaatorid**, mis suurendavad auru või vee juurdevoolu ning ühtlasi ka turbiini ja generaatori võimsust. Kuna süsteemis töötab korraga suur hulk turbiine, siis vältimaks nende kooskõlastamata reguleerimist, seadistatakse

kiirusregulaatorid tööle **statismiga** R (kaldkarakteristiku järgi). Oma roll on ka koormuse sõltuvusel sagedusest.

Kokkuvõttes kujuneb sagedus süsteemis joonisel toodud karakteristikute lõikepunkti järgi (ω tähistab nurksagedust ja P võimsust).



Joonis 1.13 Turbiini ja koormuse sageduskarakteristikud

Siirdetalitluses sumbuvad nende suuruste kõrvalekalded toimeaja jooksul, mis ergutuse regulaatoritele on 10...50 ms ja turbiini kiirusregulaatoritele 5...10 s.

Kirjeldataud **sageduse primaarreguleerimine**, milles osalevad süsteemi kõik turboagregaadid, ei kindlusta sageduse püsivat väärtust.

Lisaks on vajalik **sageduse sekundaarreguleerimine**, mida teevad selleks ette nähtud elektrijaamad sagedusregulaatorite abil.

Sageduse reguleerimine on tihedalt seotud vahetusvõimsuste reguleerimisega ühendsüsteemis.

Sageduse sekundaarreguleerimise ja vahetusvõimsuse reguleerimise automaate käsitletakse kui ühtset **genereeriva võimsuse automaatjuhtimise** (*automatic generation control, AGC*) kompleksi. Selle kompleksi ülesanne on minimeerida (nullida) **piirkondlik reguleerimisviga** (*area control error, ACE*)

Elektrisüsteemi sihipärase töö kindlustab **operatiivjuhtimine**. Operatiivjuhtimise tuum on dispetsisüsteem

(*supervisory control and data acquisition, SCADA*), mis võimaldab jälgida võrgu talitlust, koguda mõõteandmeid ja signaale, pidada arvet sündmuste ja alarmide kohta ning juhtida lüliteid, trafoastmeid ning muuta releekaitse sätteid.

Operatiivjuhtimiseks vajalik **info lähtub** ennekõike *alajaamadest* ja *lülituspunktidest*, kus toimub andmehõive, täidetakse kaugjuhtimiskorraldusi, toimib releekaitse ja automaatika. Jaotusvõrgu juhtimiseks on efektiivsed kaugjuhitavad lülituspunktid.

Andmeedastuseks on vaja **sidesüsteemi**. Kuna elektrivõrgud paiknevad laial territooriumil ja edastatavad andmehulgad võivad graafiliselt esitatud andmete korral olla suured, on probleemiks sideliinide **läbilaskevõime**. Kuigi kiudoptilised kaablid tagavad nii vajaliku läbilaskevõime kui ka suure häirekindluse, ei ole need veel piisavalt levinud.

Teine probleem on, kuidas eri aegadel ja erinevates ettevõtetes toodetud sideaparatuuri **kokku sobitada**. Alles viimasel ajal on hakatud andmevahetust korraldavaid sideprotokolle standardiseerima.

Elektrivõrku juhitakse juhtimiskeskustest (dispetšikeskustest), kus paiknev riist- ja tarkvara võimaldab elektrivõrgu juhtimiseks vajalikke andmeid säilitada ja töödelda ning operatiivpersonalile sobivas vormis edastada.

Oluline on jooksvate andmete esitamine graafiliselt skeemide ja diagrammide näol. Tähtis on sündmuste, eriti alarmide **haldamine**.

Juhtimiskeskustest lähtuvad ka korraldused lülititele ning releekaitse- ja automaatikaseadmetele.

Dispetšerid suhtlevad operatiivjuhtimissüsteemiga arvutite sisend-väljundseadmete abil. Traditsiooniliselt kasutusel olnud juhtkilp on viimasel ajal taandumas suuremõõtmelise **projektsiooniekraani** ees.

Elektrivõrgu operatiivjuhtimine tugineb **nüüdisaegsele arvutus- ja sidetehnikale**. Kasutusel on nii üldlevinud personaalarvutid kui suuremate võimalustega tööjaamad ja serverid.

Arvutusteks vajalikud **jooksvad** (dünaamilised) andmed **hangib** dispetšisüsteem. Staatilisi andmeid saab infosüsteemidest. Ennekõike on vajalikud võrguinfosüsteem, geoinfosüsteem ja kliendiinfosüsteem.

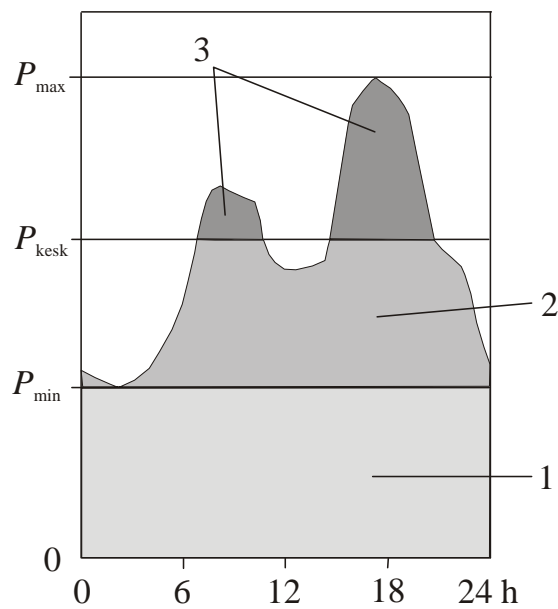
1.5.2 Elektrisüsteemi normaaltalitus

Normaaltalitus on elektrisüsteemi normaalskeemile ja käidueskirjadele vastav staatiliselt ja dünaamiliselt **stabiilne talitus**.

Normaaltalitluses võib esineda ka tehnoloogilisi piiranguid ja energia kvaliteedinõudeid rahuldavaid või mitterahuldavaid seisundeid. Tavaliselt määrab normaaltalitluse operatiivkäidu plaanimisteenistus mingi ajavahemiku jaoks ja dispetšerile antakse juhendid selle hoidmiseks.

Esmaseks nõudeks talitlusele on tagada **süsteemi töökindlus**. Järgneb **ökonoomsuse nõue**, mis põhivõrgus tähendab ennekõike elektrituru toimimiseks vajalikku läbilaskevõimet. Tähelepanu pööratakse ka võrgukadude vähendamisele.

Energiasüsteemi talitluse töökindlust ja majanduslikkust mõjutab elektrilise koormuse **ööpäevane, nädalane ja aastane** muutumine. Joonisel on energiasüsteemi tüüpiline **ööpäevane** koormusgraafik.



Joonis 1.14. Energiasüsteemi ööpäevane koormusgraafik

Seda iseloomustavad **minimaalvõimsus** P_{\min} , mis langeb enamasti ööle, hommikune või õhtune **maksimaalvõimsus** P_{\max} ning **keskmine võimsus** P_{med} .

Koormus, mis ulatub nullist kuni minimaalkoormuseni ja mis on järelkult kogu ööpäeva jooksul konstantne, on **baas- ehk põhikoormus** 1. Seda koormust katavad jaamad, mille elektrilise võimsuse muutmine on raske või ebasoovitav (nt tuumaelektrijaamad ja koostootmisjaamad).

Koormust, mis ulatub minimaalsest ööpäeva keskmiseni ja mis muutub suhteliselt suurtes piirides, nimetatakse **pooltippkoormuseks** 2 ja seda katavad enamasti kondensatsioonielektrijaamad ja hüdroelektrijaamad.

Koormus, mis ulatub ööpäeva keskmisest maksimaalkoormuseni 3, kestab tavaliselt mõni tund kaks korda ööpäevas. Sellist tippkoormust katavad kiiresti käivituvad ning kergesti reguleeritavad elektrijaamad nagu hüdro- ja gaasiturbiinjaamad, nende puudumisel ka kondensatsioonijaamad.

Kui koormus on ebaühtlane, ei saa elektrijaamad talitleda kestvalt oma nimi- ehk paigaldatud võimsusega.

Koormusgraafikute ühtlustamiseks kehtestatakse **kahe- või mitmeastmelisi elektritariife**, mis stimuleerib tarbijaid oma ööpäevast või nädalast tarbimisgraafikut ühtlustama.

Tööstusettevõtteid maksustatakse nii **tarbitava energia kui ka ööpäeva tipparbimise eest**. Tariifid olmetarbijatele on tavaliselt kuni kaks korda kõrgemad kui tööstustarbijatele, sest need tarbivad elektrit suurel määral koormuse tipu aegadel.

Elektrisüsteemi talitlust mõjutab oluliselt **elektriturg**. Suurt mõju põhivõrgu talitlusele avaldab hulgimüügitur. Jaotusvõrgu tasandil toimiv jaemüügitur seevastu võrgu talitlust otseselt ei mõjuta.

Hulgimüügiturg jaguneb põhimõtteliselt füüsiliseks ja finantsturuks. Talitluse seisukohalt pakub huvi vaid füüsiline turg. Finantsturul opereeritakse rahaga nii elektri tootjate kui tarbijate riskide vähendamiseks turuhinna liiga madala või kõrge taseme korral.

Põhjamaade elektripuulis NordPool, mis tegeleb Norra, Rootsi, Soome, Taani ja Saksamaa elektrivarustusega, töötab elektribörs, mille spotturule Elspot esitatakse pakkumised nii elektri müügi kui tarbimise kohta ning kujundatakse hinnad järgmise ööpäeva igaks tunniks eelmisel päeval kell 12. Seega on ennetusaeg 12...36 tundi. Täiendavalt (piiratud mahus ja enamasti kõrgema hinnaga) võib tehinguid teha veel spotturul Elbas, kuni üks tund enne kasutustundi.

Elektrituru omapäraks on elektrivõrkude **monopoolne asend ning elektrienergia salvestusvõimaluste puudumine**. Ülekande piirangute tõttu jaguneb ühtne elektriturg piirkondadeks, kusjuures genereeriva võimsuse ülejäägiga piirkondades on elektri hind keskmisega võrreldes madalam, puudujäägiga piirkondades aga kõrgem.

Nii vaba elektrituru toimimiseks kui elektrivarustuse tagamiseks üldse on vajalik **piisava ülekandevõimega** põhivõrk. Tänapäevased elektrienergia ülekandevõrgud on peamiselt ehitatud aastakümneid tagasi.

Mitmel pool Euroopas ja mujal maailmas talitlevad olemasolevad ühendused oma maksimaalse **ülekandevõime piiride lähedal**, mistõttu häiringute korral võrgus võivad tekkida probleemid süsteemi stabiilsusega. Suurenenud on riikidevaheliste ühenduste kasutamine.

Seoses elektriturude avanemisega **ei ole põhimõtteliselt oluline**, kus elektrienergiat toodetakse, määravaks saab elektrienergia ülekande füüsiline võimalikkus. Koormuse pideva kasvu tõttu on võrguettevõtetel vaja investeerida võrgu ülekandevõime suurendamisse. Sageli on otstarbekam investeerida olemasolevatesse liinidesse, tõstes nende ülekandevõimet täiendavate kompenseerimisseadmete paigaldamisega.

Kokkuvõttes on ülekantavat aktiivvõimsust võimalik reguleerida *reaktiivtakistuse, pingete ja nurga muutmise teel*. Mehaaniliselt ümberlülitatavad kompenseerimisseadmed pakuvad majanduslikult otstarbekamaid lahendusi, kuid toimivad vaid püsitalitluse korral. Süsteemi dünaamilises talitluses pole neil seadmeil vajalikku töökiirust. Jõuelektronikal põhinevad **FACTS-seadmed** reguleerivad võrgu parameetreid tunduvalt kiiremini ning täpsemalt.

FACTS-seadmed võimaldavad suurendada ülekandevõimet (sageli 50% ja enam), kompenseerida reaktiivvõimsust ja reguleerida pinget ning tõsta süsteemi stabiilsust.

Jaotusvõrgus parandavad **FACTS-seadmed** elektri kvaliteeti ning loovad eeldused elektri hajustootmiseseadmete ja elektrienergia salvestite ühendamiseks võrguga.

FACTS-seadmetega juhitakse ühte või mitut ülekandevõrgu parameetrit, suurendades selle juhitavust ja ülekandevõimet. Sellega väheneb vajadus ehitada uusi ülekandeliine ja kasutatakse otstarbekamalt ära olemasolevat võrku.

1.5.3 Elektrisüsteemi töökindlus

Elektrisüsteem peab olema töökindel, säilitama sünkroonse töö ka mitmesuguste talitlushäiringute olukorras.

Elektrisüsteemi struktuur ja käit **peavad tagama**, et ka kõige ebasoodsamate talitlushäiringute tagajärjel **ei tekiks** süsteemis juhitamatut, kaskaadselt laienevat elektrikatkestust.

Enamasti nõutakse, et **elektrisüsteemi töö säiliks** vähemalt siis, kui lülitub välja üks oluline genereeriv või ülekandeelement. Seda nõuet nimetatakse **n-1 kriteeriumiks**.

Elektrisüsteemi häiringu- ja töökindluse tagamine algab talitluse hoolika plaanimisega, kus nähakse ette abinõud, mis minimeerivad häiringute mõju talitlusele. Erilist tähelepanu pööratakse energiasüsteemi **kustumise (blackout)** ärahoidmisele.

Põhilised meetmed selleks on järgmised:

- Kehtestatakse põhivõrgu **käidutingimused**, mida peavad järgima kõik põhivõrgu kliendid. Käidutingimusi väljendab võrgukoodeks (*grid code*), dokument, mis sisaldab elektrivõrguga ühendamise, töökindluse ja stabiilsuse minimaalsed tehnilised nõuded, ning muud eeskirjad.
- Kehtestatakse **nõuded elektrigeneraatoritele**, kus nähakse ette aktiiv- ja reaktiivvõimsuse piirid, tingimused elemendi- ja süsteemikaitsele ning regulaatoritele (pingeregulaator, elektrisüsteemi stabilisaator, sagedusregulaator jm).
- Nähakse ette elektrisüsteemidevaheliste ülekandeliinide **sünkronismikaitse**, mis jaotab ühendsüsteemi saartalitluses töötavateks alamsüsteemideks, selleks et vältida süsteemiavariid või vähemalt eristada see ühte alamsüsteemi.
- Nähakse ette võimalikud **saartalitlused** oluliste tuuma- ja hüdrojaamade töö jätkamiseks.
- Täiustatakse elektrivõrgu **releekaitset**.

Nähakse ette **toimingud** kriitiliste elektrijaamade ning kogu süsteemi talitluse taastamiseks peale süsteemiavariid.

Veendumaks, et elektrisüsteemi talitus ei ole häiringute tagajärjel hädaohus, tuleb **uurida süsteemi seisundeid** generaatorite, kompensaatorite, liinide ja teiste põhielementide väljalangemise korral. Uurimust nimetatakse **püsitalitluse häiringuanalüüsiks** (*contingency analysis*).

Sõltumata väljalülitumise iseloomust ja põhjusest on dispetšeril vaja teada selle mõju talitlusele.

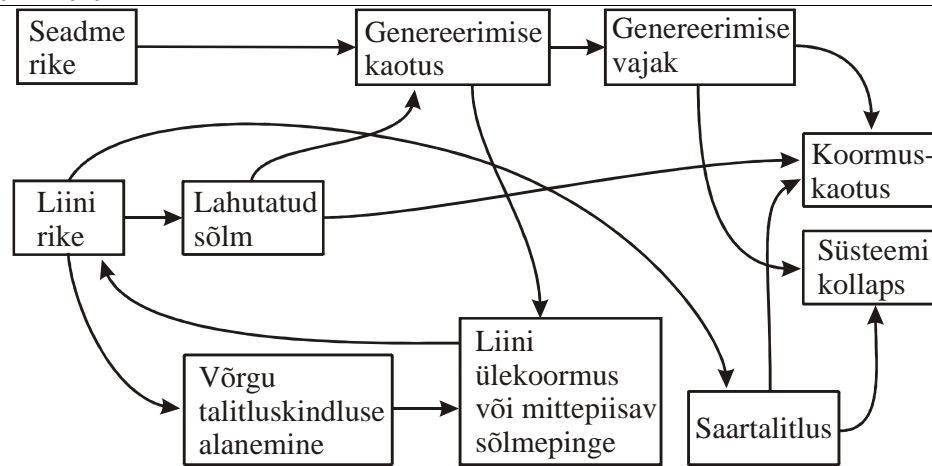
Kergem on olukord **ettekavatsetud väljalülitamiste** puhul, siis on väljalülitatav element teada ning piisab ainult selle väljalülitamise mõju analüüsist. **Sundväljalülitumised** toimuvad ootamatult ning seetõttu tuleb häiringukindluse analüüsil vaadelda kõikvõimalike väljalülitamiste tagajärgi.

Võimalik süsteemiavariid, kus toite kaotab suur osa elektritarbijatest, on peaaegu alati seotud **süsteemi stabiilsuse** kaotusega. Stabiilsuse all mõistetakse elektrisüsteemi võimet jätkata normaalset tööd peale talituse häiringuid.

Elektrisüsteemis leiavad aset nii *suured kui väikesed talitlushäiringud*. **Väikesed häiringud**, mis on tingitud näiteks koormuse muutusest, toimuvad pidevalt. **Suured häiringud** esinevad stsenaariumitena.

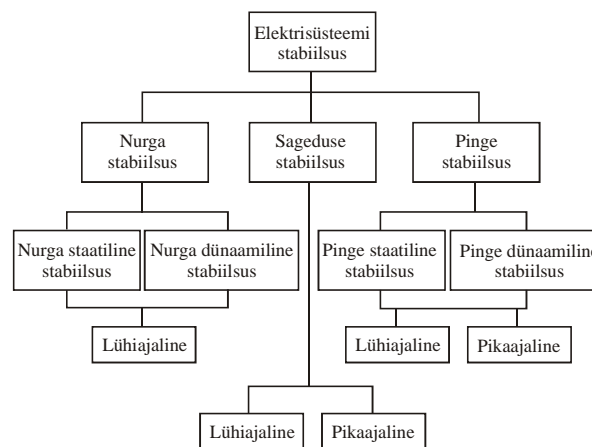
Süsteemi reageering häiringule **võib haarata hulga seadmeid**. Kui releekaitse lülitab välja rikkis elemendi, siis muutuvad võimsusvood, sõlme pinged ja elektrimasinate pöörlemiskiirus ning süsteemi sagedus. Pinge- muutustele reageerivad ergutus- ja pingeregulaatorid, sagedusmuutusele turbiinide kiirusregulaatorid. Väljalülituste tõttu süsteem nõrgeneb, mis halvimal juhul viib talitluse mittestabiilsuseni. Mittestabiilsuse tagajärjeks on süsteemi suure osa **seiskumine**.

Kuigi süsteemi siirdeprotsess ja võimalik mittestabiilsus on kompleksne nähtus, on seda asjast paremaks arusaamiseks ja analüüsimiseks otstarbekas **liigitada**.



Joonis 1.15 Rikete tagajärgi

Eristatakse **nurga-** ehk **sünkroonset stabiilsust** ja **pingestabiilsust**. Süsteemi võimet jätkata tööd peale väikesi häiringuid nimetatakse **staatiliseks stabiilsuseks**, peale suuri häiringuid (lühised, põhielementide kommutatsioon jm) **dünaamiliseks stabiilsuseks**. Siirdeprotsess, mida on põhjustanud väikesed häiringud, võib olla kas *aperioodiline* või *perioodiline*.



Joonis 1.16 Elektrisüsteemi stabiilsuse klassifikatsioon

Võimsuse suure ebabalansi tagajärjeks on süsteemi **sageduse mittestabiilsus**.

Süsteemis võib esineda **kolm olukorda**:

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

Protsess, mis võib viia **pinge mittestabiilsuseni**, kestab mõnest sekundist kuni mõnekümne minutini.

Kiirelt kulgeb protsess asünkroonmootorites, nende elektronkontrollerites ja alalisvoolumuundurites.

Seevastu trafode astmelülitid, termostaatselt juhitud koormus ning generaatorite ülekoormus toimivad **mõne minuti jooksul**.

Veelgi kauem võib aega võtta talitluse kujunemine näiteks koormuse hommikuse kiire tõusu ajal, mis lõpeb mittestabiilsusega, kui pinge tõstmiseks mõeldud vahendid toimivad liiga aeglaselt.

Sageduse stabiilsus on elektrisüsteemi võime säilitada süsteemi sagedus suurte häiringute korral, kus tekib genereeritava ja tarbitava võimsuse oluline ebabalanss.

Mittestabiilsus esineb sageduse võnkumise näol, mis põhjustab nii generaatorite kui koormuse väljalülitamisi.

Protsess on **tavaliselt aeglane** tingituna sagedust reguleeriva süsteemi inertsist ja protsessidest aurukateldes.

Üldiselt on sageduse mittestabiilsus seotud regulaatorite ja kaitseseadmete **halva koordineerimisega ja mitteküllaldase võimsuse reserviga**. Olukorda raskendab sageduse kiire muutusega kaasnev pingetõus või langus. Pingetõus ülemäärane võib põhjustada näiteks generaatorite väljalülitamist, pingelangus – impedantsreleede väärtõimingut.

Elektrisüsteemi stabiilsuse tagamine algab süsteemi projekteerimise ning talitluse pika- ja lühiajalise plaanamise käigus. Nii mõjub suur genereeriva võimsuse (ka reaktiivvõimsuse) reserv häiringujärgses olukorras positiivselt kõikidele stabiilsuse liikidele. See on ka kõige kulukam stabiilsuse tagamise moodus. Efektivsemad vahendid stabiilsuse tagamiseks on automaadid.

Alalisvooluülekanne, eriti alalisvoolu vahelüli, võimaldab ülekantavat aktiivvõimsust vajaliku sagedusega ja võimsusdiapasooniga moduleerida. Taoline toime on nii traditsioonilistel türistorjuhitavatel kui uuematel, pingemuunduritel VSC põhinevatel, alalisvooluülekannetel.

Kompenseerimisseadmete kasutamisel tuleb tähelepanu pöörata nende **talitluspiiridele** ning **hulgale** süsteemis. Süsteemi liigse sõltuvuse korral kompenseerimisseadmetest võib tekkida olukord, kus süsteem ei ole enam võimeline talitlema ettenähtud moel ning tulemuseks võib olla selle kustumine.

Stabiilsuse probleeme lisab elektri **hajustootmine**, mille allikateks on väikesed jaotusvõrku ühendatud elektrijaamad.

Sünkroonselt töötavad elektrigeneraatorid – gaasiturbiinjaamad, diiselagregaadid, kohalikud hüdrojaamad jm võivad kaotada nurgastabiilsuse **tunduvalt kergemini** kui suurte elektrijaamade generaatorid.

Süsteemiavariidid saavad enamasti alguse **lokaalsetest talitlushäiringutest**, mis ühendsüsteemi mastaabis pole iseenesest kuigi märkimisväärsed.

Probleemiks on aga häiringu võimalik kaskaadne **laienemine süsteemiavariiks** kuni kogu süsteemi või selle osa mittestabiilsuseni ja avariiseiskumiseni välja.

Talitlushäiringutele reageerivad esmalt **releekaitse** ja muud **automaadid**, mis püüavad avariilukorra tekkimist süsteemis vältida või vähemalt selle ulatust piirata.

Automaatide toime lõpeb mõnekümne sekundi jooksul. Mitte alati ei toimu väljalülitamine ülekoormuse tõttu koheselt. Nii trafosid kui generaatori staatori- ja ergutusmähiseid on lubatud ülekoormata teatud aja jooksul (10...30 min), pidades silmas, et nende temperatuur ei tõuseks üle lubatud piiri.

Kui ohtlik olukord süsteemis säilib, **peavad vahele segama** süsteemi **dispetšerid**.

Dispetšerite käsutuses on selleks mitmed vahendid.

- **Operatiivreservi käikulaskmine.** Mobiilseks aktiivvõimsuse reserviks on hüdro- ja gaasiturbiinid, mis normaaltalitluses on välja lülitatud. Nende kiire käivitamine (mõne minuti jooksul) avariolukorras võib vältida pinge kollapsi.
- **Pinge ja reaktiivvõimsuse reguleerimine.** Ka reaktiivvõimsusele nähakse ette reservallikad, mis võetakse kasutusele avariolukorras, või lülitatakse välja, kui tegemist on näiteks reaktoritega. Reaktiivvõimsuse reserv on oluline pinge stabiilsuse tõstmise vahend.
- **Trafode astmelülite mõju sõltub trafo positsioonist.** Põhivõrgu trafode astmelülid püüavad säilitada kõrget pingeniivood ja ka pinge stabiilsust. Jaotusvõrgu trafode astmelülid püüavad häiringu tõttu langenud koormusepoolset pinget aga tõsta, suurendades põhivõrgus ülekantavat aktiiv- ja reaktiivvõimsust, mis omakorda kiirendab pinge alanemist. Selle tõttu on jaotusvõrgu trafode astmelülid soovitatav põhivõrgu pinge languse ajaks blokeerida.
- **Elektrivõrgu skeemi muutmine.** Ökonoomsuse või muudel kaalutlustel ei pruugi võrgu talitluskeem olla maksimaalselt töökindel või on kujunenud selliseks häiringu tagajärjel.
- **Koormuse vähendamine.** Automaatne koormusvähenduskaits toimib süsteemi sageduse langemisel. Avarii laienemise ärahoidmiseks võib osutada vältimatuks koormuse mingi osa väljalülitamine ka normaalse sageduse korral.

Meetmed süsteemivariide ärahoidmiseks ja nende laienemise vältimiseks **kavandatakse hoolikalt ette** ja personali **treenitakse** muuhulgas dispetšivalmendit rakendades. Reaalses olukorras võib siiski ette tulla raskusi. Võib esineda ettenägematuid olukordi, kuid suurem probleem on olukorra õige hindamine. Teatavasti toimub juhtimine dispetšisüsteemi **SCADA** vahendusel. Selleks et dispetšerid suudaksid olukorda jälgida, jaotatakse teated automaatselt nende tähtsuse järgi **sündmusteks** ja **alarmideks**. Dispetšer peab reageerima vaid alarmidele, muud teated arhiveeritakse võimaliku hilisema analüüsi tarvis. Tõsisema häiringu korral osutuvad paljud teated alarmideks ja dispetšeril on füüsiliselt võimatu neid lühikese aja jooksul käsitleda. Puhtehniliste vahenditega sellist olukorda vältida ei saa. On välja pakutud **tehisintellektile** põhinevaid algoritme, mida nimetatakse **intellektseks alarmiks** või avarii põhjuse analüüsiks, kuid laiemat levikut pole need seni leidnud.

Vaatleme lähemalt **kolme viimastel aastatel aset leidnud süsteemivariid**.

Ulatuslik avarii toimus **14. augustil 2003** USA idarannikul ja Kanadas. Avarii haaras Suurt Järvistut, Ontariot ja New Yorki. Toiteta jäi **24** tunniks **61 800 MW** ulatuses elektritarbijaid. Avarii puudutas umbes **50 miljonit inimest**. Süsteemi kustumisele eelnes rida väljalülitusi. Umbes 2 tundi enne avariid lülitati remondiks välja üks 345 kV liin. Järgnesid teiste 345 kV liinide väljalülitused Suure Järvistu piirkonnas releekaitsel. Põhjuseks ülekoormus ja süsteemi võnkumine. Vähemalt ühel korral tekkis lühis, kui liinijuhtmed puudutasid puude latvu. Tulemuseks oli avarii kaskaadne laienemine. Avariiala haaras mitut alamsüsteemi, mida juhtis neli süsteemioperaatorit (juhtimiskeskust). Avarii analüüs tõigi esile nendevahelise koostöö puudulikkuse. Puudusi täheldati ka operatiivjuhtimissüsteemides (alarmide käsitlemine) ja elektriliinide hooldetöodes (liinide all kasvavad puud). Süsteemioperaatori, mille juhtimiskiirkonnas avarii alguse sai, operatiivjuhtimissüsteem oli osaliselt välja lülitatud, mistõttu dispetšer ei saanud liinide kaskaadset väljalülitumist jälgida. Avarii kaskaadse laienemise esimene, aeglane etapp kestis vähemalt ühe tunni. Selle aja jooksul oleksid dispetšerid võinud võtta tarvitusele abinõud avarii laienemise vältimiseks, kui nad oleksid olnud olukorrast teadlikud.

23. septembril 2003 toimus avarii ühendsüsteemi Nordel lõunaosas, mis haaras Lõuna-Rootsit ja osa Taanit. **7** tunniks jäi toiteta ligi **5000 MW** ulatuses tarbijaid. Katkestus puudutas umbes **3,5 miljonit inimest**. Avarii sai alguse kahest mehaanilisest rikkest. Esmalt riknes ühe turbiini klapp Oskarshamni tuumajaamas hetkel, kui turbiini võimsus oli 1200 MW. Viis minutit hiljem purunes lahklüliti Horredi alajaamas Edela-Rootsis, mis tekitas lühise. Tulemuseks oli kogu alajaama ja sellega ühendatud elektriijaama (1800 MW) väljalülitumine. Tekkinud võnkumiste ja ülekoormuse tulemusena lülitus välja võimsuslüliti, mille kaudu Lõuna-Rootsi oli ühendatud ülejäänud süsteemiga. Avarii areng kuni pinge kollapsini kestis umbes 100 sekundit. Kuigi see aeg oli ilmselt liiga lühike süsteemivariid vältimiseks, on tähelepanuväärne, et operatiivpersonal sai Oskarshamni jaamas toimunud intsidendi põhjustatud infotulva tõttu teada veast Horredi alajaamas alles viie tunni möödumisel.

4. novembril 2006 kell 21.39 lülitati firma E.ON Netz elektrivõrgus Saksamaal välja kaks 380 kV elektriliini selleks, et lasta Emsi jõel olev laev ohutult Balti merre. Lülitus põhjustas kell 22.05 ühe töösoleva 380 kV liini ülekoormuse, mille kohta võrgu juhtimiskeskusesse tuli SCADA-signaal. Ülekoormuse kõrvaldamiseks otsustas dispetšer ühendada kaks seni lahus töötanud latisektsiooni ülekoormatud liiniga seotud alajaamas. Tulemus oli kahjuks soovitud vastupidine. Järgnes ülekoormuste ja väljalülituste kaskaad üle UCTE lõuna- ja idaosa 22.10:13...22.10:32, mille tulemusena ühendsüsteem jagunes kolmeks alamsüsteemiks. UCTE idaosa haaravas alamsüsteemis tekkis suur võimsuse defitsiit, mis tingis umbes **15** miljoni tarbija väljalülitamise. Järgnevad katsed süsteemi resinkroniseerida ebaõnnestusid sageduste suure erinevuse tõttu. Esimene õnnestunud lülitus toimus alles kell 22.47 ja ühendsüsteemi normaalne töö taastati kell 23.57. Vaadeldaval juhtumil arenes häiring liiga kiiresti (umbes 20 s) selleks, et dispetšerid oleksid võinud sekkuda. Küll aga polnud operatiivpersonalil olukorrast selget pilti nii enne häiringu kaskaadset laienemist kui pärast avariid. Olukorra tegid halvemaks elektrituulikud ja koostootmisjaamad, mis sageduse langedes välja lülitusid (kokku 16 GW ulatuses) ja hiljem automaatselt tagastusid, suurendades alamsüsteemide sageduse erinevust.

Energiasüsteemi taastamine peale süsteemiavariid, eriti aga peale avariiseiskumist on keeruline ja aeganõudev.

Suhteliselt lihtne on käivitada hüdro- ja gaasiturbiinjaamu, millel on pimekäivitusvõime. Neid võib sünkroniseerida juba 1...2 minuti pärast. Samavõrd võtab aega nende koormamine.

Hüdrojaamade puuduseks on kiirusregulaatorite **suur inerts**, mis ei võimalda täpselt säilitada sagedust koormuse muutumisel. Soojusjaamad vajavad käivitamiseks elektrienergiat väljastpoolt. Ka toimub nende koormamine aeglaselt, otsevoolukateldega jaamades võtab see mitu tundi.

Tuumaagregaadid tuleb süsteemi avariiseiskumisel **täielikult välja lülitada**, mistõttu nende taaskäivitus võtab 1...2 ööpäeva. Muidugi vajavad ka tuumajaamad käivitamiseks energiat väljastpoolt.

Koos jaamade käivitamisega toimub järk-järgult ülekandeseadmete (liinid, trafod) **sisselülitamine** ja tarbijate toite **taastamine**. Tähele tuleb panna aktiiv- ja reaktiivvõimsuste **balansi** ning süsteemi **stabiilsuse** säilimist. Unustada ei saa ka relekaitse ja muu automaatika ning infosüsteemide (eriti SCADA) taastamist.

Vaatleme lõpuks mõisteid *töökindlus* ja *häiringukindlus* ning nende seost süsteemi stabiilsuse mõistega.

Töökindlus, ka **talitluskindlus** või **elektrivarustuskindlus** (*reliability*) on elektrisüsteemi võime täita elektrivarustuse ülesandeid pika aja vältel võimalikult väheste katkestustega.

Elektrivarustuse häiringukindlus (*security of supply*) seondub **häiringukindlusega** (*security*) ning on elektrisüsteemi võime säilitada normaalalitus teatud häiringute korral.

Süsteemi talitluskindel töö tähendab, et enamik aega on ta häiringukindel – suuremad ja vähemad talitlushäiringud ei põhjusta suuri elektrikatkestusi (avariisid). Enamasti tähendab häiringukindlus süsteemi stabiilsuse säilimist.

Häiringukindlus ja stabiilsus on ajas *muutuvad atribuudid*, sõltudes süsteemi talitlusest ja muudest tingimustest. **Töökindlus** seevastu on keskmistatud näitaja, mida saab hinnata vaid *pikema ajavahemiku kohta*.

Elektrisüsteemi töö- ja häiringukindlust väljendatakse mitmesuguste erinevate näitajaga sõltuvalt praktilisest eesmärgist, avariid ulatusest ja iseloomust ning muudest asjaoludest.