

1 Elektrisüsteem

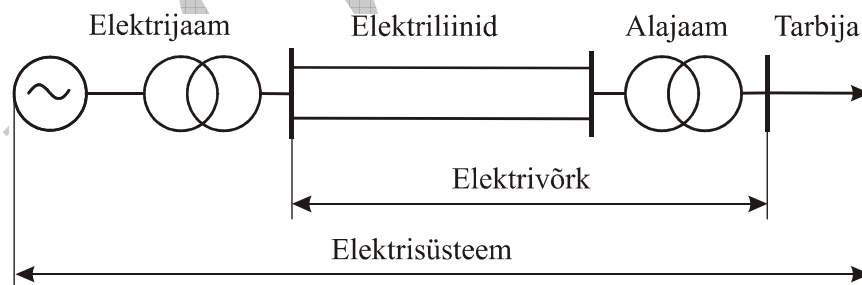
Elektrienergiat toodetakse, edastatakse ja tarbitakse tänapäeval suurtes ühend-
elektrisüsteemides, mis toimivad ühtse tervikuna. Süsteemi üksikute osade ja
elementide vahel on tihe side. Sellest arusaamiseks piisab, kui tähele panna, et
turbogeneraatorid Eestis ja siit ligi 5000 km kaugusel asuvas Irkutskis peavad
pöörlema kooskõlastatult. Võimalik on rootorite nurga mõningane erinevus,
kuid pöörlemiskiirus peab olema täpselt sama. Vastasel juhul lakkaks süsteemi
normaalne toimimine ja tarbijate varustamine elektriga. Ka jaotusvõrkude töö
jälgimisel ja juhtimisel tuleb arvesse võtta kogu elektrisüsteemi funktsioneerimise
põhimõtted ja tingimused.

1.1 Põhimõisted

Elektrisüsteemi tööpõhimõtete selgitamisel on esmalt vaja meelde tuletada kõiki
põhilisi elektri tootmist, ülekannet ja jaotamist puudutavaid mõisteid ja seisukohti.
Unustada ei saa elektri tarbimist – elektrisüsteemi koormust, mille
katmine on elektrisüsteemi toimimise ainuke eesmärk.

1.1.1 Energiasüsteem

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).



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.** Kui mõni energiasüsteemi põhielement (katel, turbiin, generaator, transformaator, liin) langeb rivist välja ja süsteemis tekib võimsuse defitsiit, siis saavad tarbijad toite mõnest teisest süsteemist.

- *Vajaliku reservi vähenemine.* Süsteemis peab olema reserv vähemalt suurima agregaadivõimsuse ulatuses. Süsteemide ühendamisel vajaliku reservi suhteline määr väheneb, mis võimaldab taas vähendada tootmiskulusid.
- *Agregaatide nimivõimsuse suurenemine.* Suures süsteemis on majanduslikult otstarbekas kasutada suure nimivõimsusega agregaatide, mille kasutegur on suurem ja tootmiskulud toodetava energiaühiku kohta väiksemad.
- *Elektrituru toimimine.* Vaba elektriturg võimaldab tarbijatel hankida elektrienergiat sealt, kus see hetkel on soodsam. Mida suurem on elektrisüsteem, seda tõhusamalt turg toimib.

Energiasüsteemide ühendamisest saadav majanduslik tulu ületab tavaliselt selleks vajalike liinide ja alajaamade rajamise kulud. Ent energiasüsteemide ühendamine toob kaasa ka probleeme. Nendest olulisim on, kuidas säilitada süsteemi stabiilsus (generaatorite sünkroonne töö ja vajalik pingeniivoo). 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
- avariijärgseteks.

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 talitlusse satub energiasüsteem peale avarii likvideerimist (nt peale lühistunud elektriliini väljalülitamist). Avariijärgne talitus on enamasti ka raskendatud talitus,

mistõttu avarii kordumise vältimiseks tuleb kiiresti taastada normaalalitus.

Elektrisüsteemi töö põhilised iseärasused tulenevad asjaolust, et energia akumuleerimisvõimaluste puudumise tõttu peab toodetav ja tarbitav võimsus igal hetkel olema tasakaalus. Sellepärast ei saa agregaatide tootlikkust enamasti maksimaalselt kasutada. Ka peab süsteemis alati olema genereeriva võimsuse **reserv** avarii või tarbimise ettenägematu kasvu puhuks. Muidugi tuleb arvestada remontide ja muude asjaoludega, mis piiravad agregaatide kasutamist. Kasutusel on järgmised mõisted:

- **ülesseatud (installeeritud) võimsus** – elektrijaamades 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 elektrijaamade omatarvet, kadusid elektrivõrkudes ning elektrienergia ekspordi ja impordi vahet. Põhimõisted on järgmised:

- **elektrienergia brutotoodang** – elektrijaamade generaatoritest väljastatud energia
- **elektrijaama omatarve** – osa brutotoodangust, mida elektrijaam kasutab tootmistsüklis oma vajadusteks
- **elektrienergia netotoodang** – energia, mida elektrijaam 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 elektrijaamadest riigi elektritarbimise katmiseks (netotoodangu ja netoeksporti vahe)
- **kasulik tarbimine** – energia, mida kasutab tarbija (leitakse tarbijate arvestinäitude summeerimise teel)
- **kaod** – kogutarbimise ja kasuliku tarbimise vahe.

Eesti energiasüsteem on 330 kV liinide kaudu ühendatud Läti ja Venemaa energiasüsteemidega, moodustades koos Leedu ja SRÜ riikidega ühendenergiasüsteemi. Euroopas on veel kolm ühendenergiasüsteemi. Euroopa mandriosa riikide ning Türgi ja Maroko elektrisüsteemid moodustavad ühendsüsteemi UCTE. Skandinaavia maad Soome, Rootsi ja Norra kuuluvad

ühendsüsteemi NORDEL. Organisatsiooniliselt kuulub sinna ka Islandi energiasüsteem. Omavahel on ühendatud veel Suurbritannia ja Iirimaa.

1.1.2 Elektrienergia tootmine

Elektrienergia tootmisele on maailmas viimastel aastakümnetel pööratud suurt tähelepanu. Üldise huvi taustaks on mure fossiilkütuste ammendumisest, keskkonna saastumisest ning inimese võimalik mõju kliimamuutustele. Ka on kütusevarud jaotunud maailma riikide vahel ebaühtlaselt, mistõttu riigid või riikide rühmad võivad oma huvides dikteerida kütuste hindu ja esitada poliitilisi nõudmisi. Olukord teravnes aastal 1973, kui Naftat Eksportivate Riikide Organisatsioon OPEC, kuhu kuulub 13 riiki, tõstis nafta hinna neljakordseks ja teatas naftatoodangu vähendamisest. Tekkis olukord, mis kestab seniajani ja mida nimetatakse ülemaailmseks kütusekriisiks. Kriisi teeb teravaks asjaolu, et maailma naftavarude ammendumist võib prognoosida juba enne 21. sajandi lõppu. Veidi kauem saab maailmas toota maagaasi, veel kauem aga kivisütt. Fossiilkütustest kasutatakse veel pruunsütt, 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. Samas tuleb aga koos hüdroelektrijaamaga rajada paisjärv, mis ujutab üle põllumajandusmaid, metsi, asulaid ja kultuurimälestisi. Seetõttu püütakse hüdroelektrijaamu ehitada väheasustatud piirkondadesse ja jõgedele, mille särg on kitsas ning sügav, langus aga suur. Sellised jõed on maailmas peaaegu kõik kasutusel. Märgatavaid hüdroressursse leidub veel vaid Hiinas, Aafrikas ja Venemaal. Hüdroelektrijaamade talitlemine on eriti efektiivne energiasüsteemi tippkoormuse katmisel. Tõsi, see tähendab jaama ebaühtlast koormamist, mis toob kaasa veetaseme muutusi hüdrorajatise ülemises ja alumises veehoidlas. Sellised muutused võivad olla ebasoovitavad nii majanduslikust (laevatatavus, kalandus) kui looduslikust (lindude ja loomade elupaigad) seisukohast.

Ka tuumaelektrijaamades toodetakse elektrienergiat ilma süsinikdioksiidi ja muude keskkonnakahjulike ainete emissioonita. Tuumakütuse vedu ei kujuta väikeste koguste tõttu probleeme. Tõsi, uraanil põhineva tuumakütuse varud võivad lähema sajandi jooksul ammenduda nii nagu fossiilsed kütused. Suuremaks probleemiks peetakse nüüdisajal keskkonna radioaktiivse saastamise ohtu tuumareaktorite rikke korral, radioaktiivsete jäätmete lõppladude eba-piisavat töökindlust ning suuri kulutusi lõplikult seisma pandud tuumareaktorite lammutamisel. Mitmekülgsete ohutusmeetmete rakendamine muudab tuumaelektrijaamad siiski piisavalt ohutuks, kuid ühtlasi ka kalliks ning suurendab nende rajamiseks kuluvat aega. Viimastel aastatel on vahepeal soikunud tuumaelektrijaamade ehitamine elavnenud. Uute tuumareaktorite püstitamist on alustatud USAs, Hiinas, Venemaal ja mujal. Vahepeal on edasi arenenud ka

tuumareaktorite tehnoloogia. Soomes algas 2006. aastal ülitöökindla kolmanda (täpsemalt kolm pluss) põlvkonna surveveereaktori paigaldamine. See reaktor elektrilise võimsusega 1600 MW tagab varasematega võrreldes toodetava elektrienergia madalama omahinna ja tuumakütuse parema ärakasutamise. Sama tüüpi reaktoreid kavatakse kasutada ka teistes uutes tuumajaamades.

Tuumaenergeetikute 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. Peale selle peab vesiniku tihedus olema reaktsiooni tekkimiseks piisavalt suur ja reageeriv aine koos püsima nõnda kaua, et see jõuaks reaktsioonis osaleda. Tuumasünteesil põhineva reaktori põhieelised on tuumareaktsioonis osaleva aine äärmiselt väike kogus ja radioaktiivsete jäätmete puudumine. Langeb ära ka selline tuumalõhestumisel põhinevatele reaktoritele iseloomulik ohufaktor nagu aktiivsooni ülessulamise võimalus. Tuumareaktsiooni tekitamiseks on vajalik raske vesinik (deuteerium), mida võib eraldada mereveest, ning liitium, mille varud on samuti piisavad. Kavas on ehitada termotuumareaktori katseline prototüüp *ITER (international thermonuclear experimental reactor)* Prantsusmaale mitme maailma riigi osavõtul. Reaktori, mis peaks valmima 2011. aastal, elektriliseks võimsuseks kujuneb 500 MW tuumareaktsiooni kestusega kuni 500 s. Pärast seda tuleb kõne alla tööstuslike reaktorite projekteerimine võimsusega 1...10 GW tuumareaktsiooni kestusega kuni 90 min.

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 biomassi ja hüdroenergiat. Geotermaal- ja päikeseenergiat elektri tootmiseks ei ole meil kasutada võimalik.

Tuuleenergeetika on viimasel aastakümnel arenenud tunduvalt kiiremini kui muud energeetikaharud ennekõike 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 kaasa arvatud nende ootamatut väljalülitumist tormi või tuulevaikuse järsul tekkel. Seetõttu on tuuleelektrijaamade lubataval võimsusel energiasüsteemis piir, mis praegu arvatakse olevat enamalt 20%.

Vesinikuenergeetika all mõeldakse energia salvestamist ja edastamist vesiniku kujul. Lähtutakse vesiniku kõrgeast kütteväärtusest ja sellest johtuvalt väikestest edastamiskuludest energiaühiku kohta. Vesinikku toodetakse praegu peaaesjalikult teistest kütustest, maagaasist, naftast ja söest. Vesiniku hind on suhteliselt kallis. Et vesinikku saaks energeetikas laiemalt rakendada, tuleb leida selle tõhusamaid tootmisviise. Kõne alla tuleb vesiniku tootmine vee elektrolüüsi teel tarbimiskeskustest kaugel paiknevates hüdro- ja päikeseelektrijaamades, tuuleelektrijaamades energia ühe salvestamisviisina ning eriehitusega tuumareaktorites, mis päeval toodavad elektrienergiat, öösi aga vesinikku. Vee elektrolüüsi kasutegur on ligikaudu 70%. Kui elektrit genereeriva kütuseelemendi kasuteguriks on 60%, kujuneb elektrienergia akumulereerimise kasuteguriks umbes 40%.

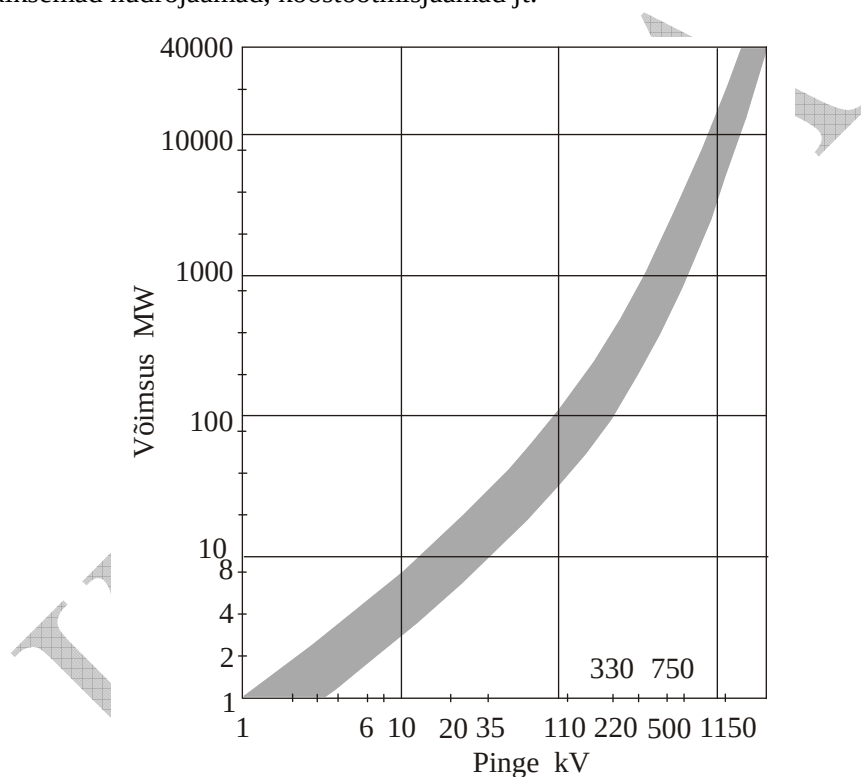
Elektrijaamaliikide osatähtsus on riigiti erinev. Näiteks annavad Norras üle 99% elektrienergiast hüdroelektrijaamad. Araabia maades saadakse kogu elektrienergia vedelkütusega või maagaasiga kõetavatest elektrijaamadest. Prantsusmaal on arenenud tuumaenergeetika, mis annab 78% kogu elektrienergiast. 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 osatähtsus 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 suurimaks hüdrojaamaks on Italpu Brasiilias võimsusega $19 \times 700 = 13\,300$ MW, tuumaelektrijaamaks Kashiwasaki-Kariwa $5 \times 1100 + 2 \times 1356 = 8212$ MW Jaapanis ja soojusjaamaks Surgut $2 \times 6 \times 800 = 4800$ MW Venemaal. Meil on suurimaks elektrijaamaks Eesti Elektrijaam võimsusega 1615 MW. Maailma võimsamaks elektrijaamaks on kujunemas Sanxia hüdroelektrijaam Jangtse jõel Hiinas, mille ehitamine algas 1994. 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.

1.1.3 Elektri ülekanne ja jaotamine

Energiasüsteemi elektrijaamad 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 madalpingel. Jaotusvõrguga võivad olla ühendatud ka kohalikud elektrijaamad, näiteks väiksemad hüdrojaamad, koostootmisjaamad jt.



Joonis 1.2 Kolmefaasilise elektriliini kaudu edastatava võimsuse sõltuvus nimipingest

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 1.2.

Esimene 110 kV liin rajati aastal 1906 USAs 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 kondensaatorpatareidest ja reaktoritest. Sellised kompenseerimisseadmed toimivad nii püsi- kui siirde- talitluses, kindlustades elektrisüsteemi stabiilsuse. Põiklülituses kompenseerimisseade stabiliseerib pinget, pikilülituses kompenseerib (kuni 50%) aga liini reaktiivtakistust. Mõlemal juhul tõuseb liini läbilaskevõime ja suureneb ülekande kaugus.

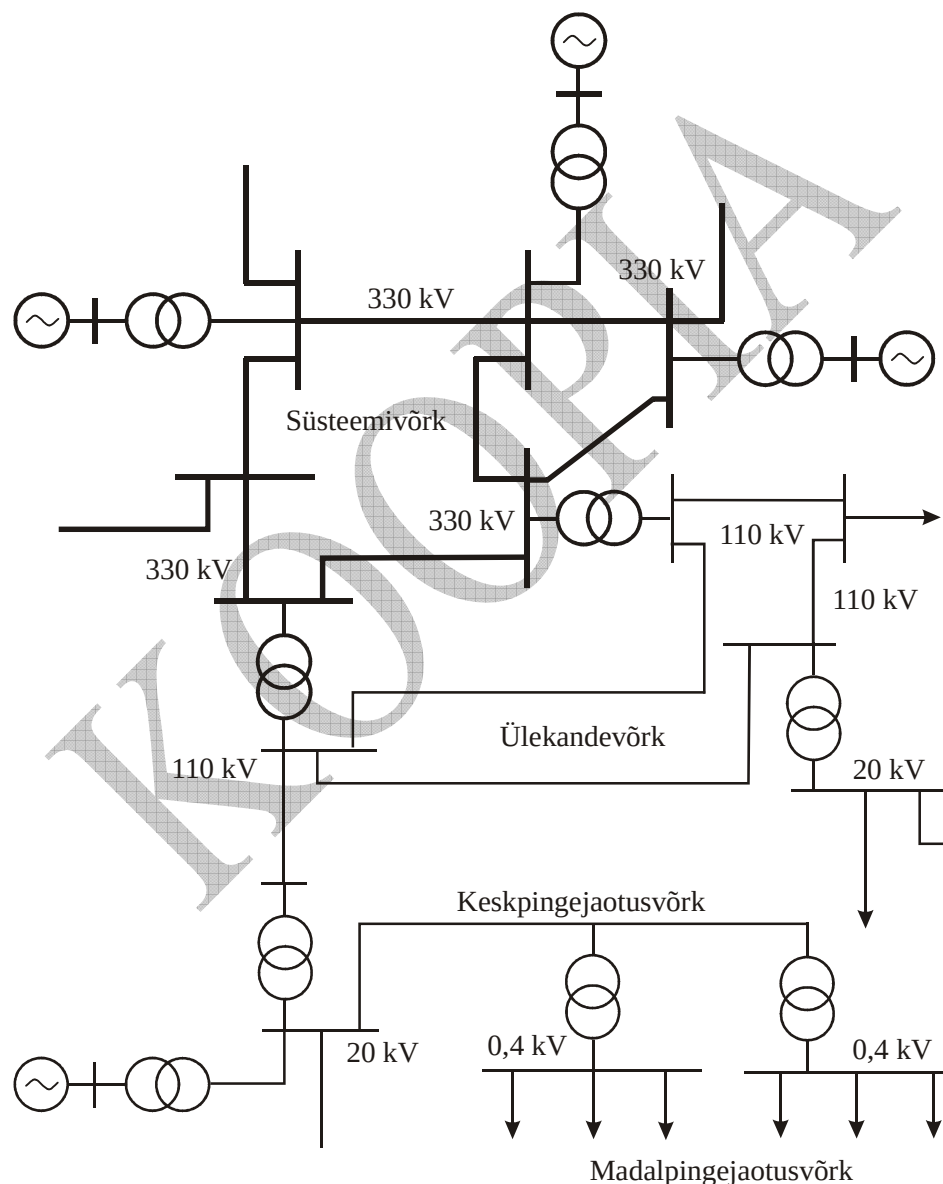
Kui on vaja edastada suuri võimsusi (mõni GW) suurele kaugusele (1000 km ja enam), võidakse kasutada alalisvooluliine. Alalisvoolu korral on nii õhu- kui kaabelliinid lihtsamad ja odavamad kui vahelduvvooluliinid, kuid nad nõuavad mõlemas otsas kalleid muunduralajaamu. Alalisvooluliinid või vahelülid (nt Viiburis Venemaa ja Soome vahel) on vajalikud ühendamaks mittesünkroonselt talitlevaid elektrisüsteeme. 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. Lühemate alalisvooluliinide rajamisel peetakse silmas ka türistorseadmete häid võimalusi reaktiivvõimsuse ja pinge reguleerimiseks ning elektrisüsteemi stabiilsuse kindlustamiseks.

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	–
Keskipingevõrgud	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

Elektrivõrke liigitatakse ennekoike nimipinge alusel. **Elektrivõrgu nimipinge** on pinge, millele võrk on ette nähtud ja millele viidates iseloomustatakse teatud

talitluskarakteristikuid. Kõige üldisemalt võib elektrivõrke jaotada madal- ja kõrgepingevõrkudeks vastavalt nimipingega $U_n \leq 1000 \text{ V}$ või üle selle. Viimaseid jaotatakse omakorda keskpingevõrkudeks $1 < U_n \leq 35 \text{ kV}$, 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).



Joonis 1.3 Elektrisüsteemi skeem

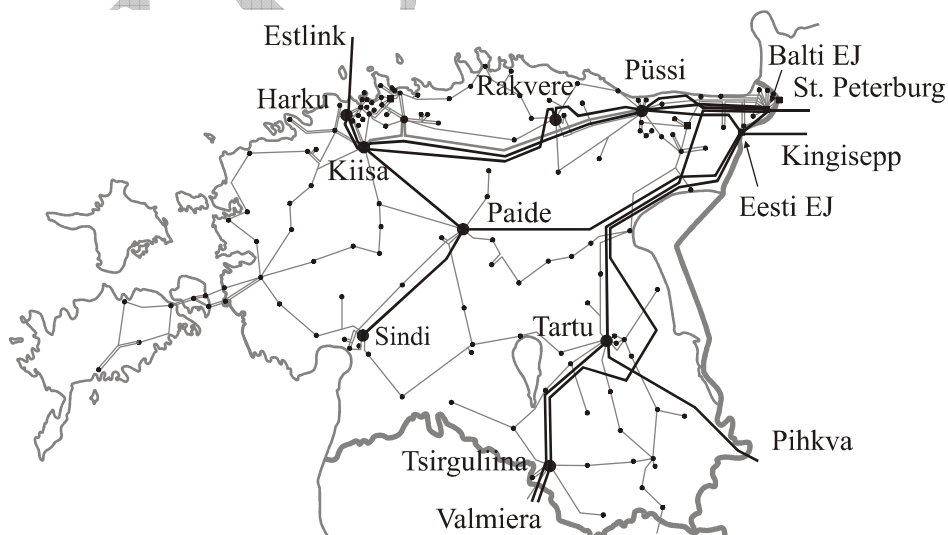
Maailmas kasutatakse keskpingejaotusvõrkudes mitmesuguseid nimipingeid. Standardi IEC 60038 kohased keskpinge võrgu nimipinged on tabelis 1.2. Jada 1 pingeid kasutatakse maades, kus sagedus on 50 Hz, jada 2 pingeid aga sagedusel 60 Hz. Jada 1 nimipinged on kahes loendis. Eestis on kasutusel esimese jada 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

Rõhutagem, et nimipingega määratletakse või iseloomustatakse teatud elektrivõrku. Võimaliku pingevahemiku määravad kindlaks võrgus lubatav suurim ja vähim talitluspinge (tööpinge). Talitluspinget võidakse vaadelda võrgu mis tahes punktis ja mis tahes hetkel võrgu normaalse talitluse ajal. 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 1.3). Väiksemad elektrijaamad, nagu koostootmisjaamad, väikesed hüdrojaamad, elektrituulikud jm, võidakse ühendada jaotusvõrguga ka otse. Selliste jaamade olemasolu avaldab olulist mõju jaotusvõrgu ehitusele ja käidule.



Joonis 1.4 Eesti elektrivõrgu kaart

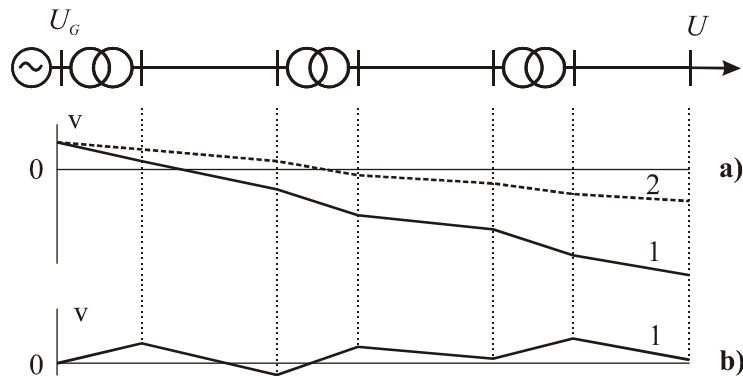
Eesti elektrisüsteemi 110 ja 330 kV võrgu kaart on joonisel 1.4. Eesti elektrisüsteem on kolme 330 kV liiniga (kaks liini Narvast St. Peterburgi ja Kingiseppa ning üks Tartust Pihkvasse) ühendatud Venemaa elektrisüsteemiga ja kahe Valmierasse viiva 330 kV liiniga Läti elektrisüsteemiga. Soomega on Eesti elektrisüsteem ühendatud Harku – Espoo ± 150 kV alalisvooluliini kaudu. Elektrienergiat kannab Eestis üle monopoolne ettevõtte OÜ Põhivõrk. Elektrienergia jaotamisega tegeleb OÜ Jaotusvõrgu kõrval veel muidki ettevõtteid (Fortum, Narva Elektrivõrgud jt).

Kuna 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 asünkroonmootorid, muundurid, induktsioonahjud jm. Reaktiivvõimsuse kogutarbimisest moodustavad elektritarvitite kõrval olulise osa reaktiivvõimsuskadod, 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 ($E > U$). Generaatori reaktiivvõimsust piiravad nii staatori- kui rootorivoolu (ergutusvoolu) lubatud väärtused, aga ka elektrisüsteemi stabiilsuse tingimused. 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 põikreaktorid. Sünkroonkompensaatori eeliseks on nii reaktiivvõimsuse kui pinge sujuv reguleerimine. Kahjuks on sünkroonkompensaatorite hankimine ja käit kulukas, mistõttu tänapäeval leiavad järjest enam kasutamist jõuelektroonikamuunduritega juhitavad staatilised kompenseerimisseadmed. Mehaaniliselt lülitatavad kondensaatorpatareid on küll suhteliselt odavad ja töökindlad, aga kuna nende poolt genereeritav reaktiivvõimsus on võrdeline pinge ruuduga, siis ei soodusta need pinge säilimist, sest pinge langemisel väheneb järsult kondensaatorpatareid võime reaktiivvõimsust kompenseerida. Ainuke võimalus kondensaatorpatareid reguleerida seisneb rööptalitluses kondensaatorite sisse- või väljalülitamises. Põikreaktoreid kasutatakse ülikõrgepingeõhuliinides genereeritud liigse reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks.

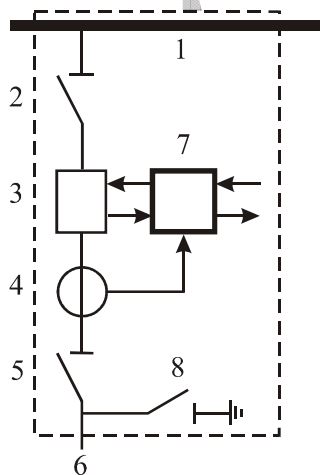
Pinge taseme põhivõrgus määrab reaktiivvõimsuste tasakaal. Pinget reguleeritakse ka trafode ülekandesuhete muutmise teel. Pinget tarbija juures määravad ka pingekaod võrguelementides. Joonisel 1.5a on suurimale 1 ja vähimale 2 koormusele vastavad suhteliste pingehälvete $v = (U - U_N)/U_N$ diagrammid juhul, kui trafode ülekandesuhted on võrdsed võrkude nimipingete suhetega. Kuna elektrivõrgu summaarsed pingekaod suurimal koormusel võivad ületada

50% nimipingest, läheb vaja pingelisa, mis saadakse trafode ülekandesuhete muutmise teel (joonis 1.5b).



Joonis 1.5 Suhtelised pingehälbed elektrisüsteemis suurimal (1) ja vähimal (2) koormusel

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 jõutrafod, 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) sektsioonideks. Sektsioonid jagunevad omakorda lahtriteks, kuhu on koondatud sektsiooniga ühendatud liini või trafo lülitus- ja kaitseaparaadid. Kõrgepingelahter (joonis 1.6) ühendab kogumislaidet 1 liini või trafoga 6. Lahtri koosseisu kuuluvate 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



Joonis 1.6 Kõrgepingejaotla lahtri skeem

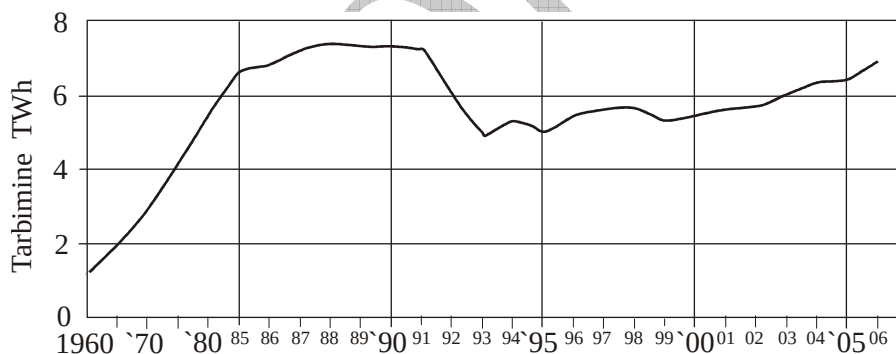
maanduslülitid 8. Lahtrisse kuulub ka juhtimis-, kaitse- ja mõõtesüsteem 7, millega on ühendatud voolutrafo 4. Keskingel võib võimsuslülitid paikneda ka

väljatõmmataval vankril. Sel juhul asendavad lahtlüliteid kõrgepingepistik-ühendused. Lihtsamates paigaldistes kasutatakse lühisvoolude katkestamiseks võimsuslüliti asemel kõrgepingesulavkaitsmeid. Sel juhul toimuvad lülitused koormuslülitite abil.

Võimsuslüliti juhitakse nüüdisajal mikroprotsessorsüsteemiga, mis edastab releekaitse ja muu automaatika korraldusi ning tahtlikke käsklusi. Ühtlasi annab see juhtimiskeskusele infot lüliti seisundi ning sooritatud lülitustoimingute kohta koos vajalike mõõteandmetega. Madalpingejaotlate lahtrites nähakse lühisvoolude katkestamiseks ette kaitselüliteid või sulavkaitsmeid.

1.1.4 Elektri tarbimine

Elektrienergiat tarbiti maailmas 2003. aastal keskmiselt 2,6 MWh inimese kohta. Eriti kõrge oli see näitaja arenenud maades, kus odavat näiteks hüdrojaamadest saadavat elektrienergiat saab kasutada elektrimahukas tootmises ja ka hoonete kütteks. Nii oli tarbimine inimese kohta aastal 2003 Islandil 29,4 MWh, Norras 25,3, Kataris 19,4, Kanadas 18,3. Eestis, kus see näitaja oli 6,1, on suhteliselt kõrge elektrienergia tarbimine tingitud majanduse ja olme hästi arenenud elektrifitseerimise tasemest.



Joonis 1.7 Elektrienergia tarbimine Eestis

Eesti elektroenergeetika nagu kogu rahvamajandus arenes jõudsalt 1930ndail aastail. Aastal 1940 areng seiskus. Kiire elektrienergia tarbimise kasvu aeg oli aastatel 1960...1980 (joonis 1.7). Pärast taasiseseisvumist oli elektrienergia tarbimise tase 10 aasta jooksul peaaegu stabiilne, aastal 2006 algas tõus. Kuni Eesti taasiseseisvumiseni mõjutas elektri tarbimist ka elektrienergia andmine Venemaa loodeossa, mis suurendas elektri tarbimise hulka kuuluvat elektri-jaamade omatarvet.

Elektrit tarbivad ennekõike elektrimootorid või täpsemalt elektriajamid, kui silmas pidada ka juhtimis- ja reguleerimisseadmeid. Üldse tarbivad elektriajamid 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, kus ilmastikuolud nõuavad intensiivset kütet ning kütteõli transport on pika vahemaa tõttu kallis, on elekterkütte valdavas ülekaalus, moodustades külmade ilmade korral elektrivõrgu koormusest 50% ja enam. Elekterkütet saab realiseerida nii otse- kui salvestusküttena. Salvestuskütte eeliseks on, et küttekehad lülitatakse sisse öösiti elektrienergia soodustariifide kehtimise ajal. Tööstuslikud elektrotehnoloogiaseadmed tarbivad ligikaudu 25% kogu tööstuses kasutatavast elektrienergiast. Võimsaimad neist on metallisulatusahjud, mis elektrotermiliste protsesside järgi jagunevad kaar-, induktsioon-, takistus- ja kiirgusahjudeks. Elektrit kasutatakse ka metallide ja muude materjalide kuumutamiseks, keevitamiseks, galvaaniliste pinnakatete saamiseks ja muudel tehnoloogilistel eesmärkidel. Valgustuseks kulub maailmas ligikaudu 10% elektrienergiast. Valgusallikateks on hõõglambid, lahenduslambid ja valgusdioodid.

Elektrisüsteemi talitluse plaanisel ja juhtimisel lähtutakse elektrivõrgu koormusest, mõistes selle all elektritarvitite summaarset aktiiv- ja reaktiivvõimsust, millele lisanduvad kaod kohalikus elektrivõrgus. Koormusi vaadeldakse nii elektrisüsteemi kohta summaarselt kui ka võrgu üksikute sõlmede ja elektritarbijate kaupa. 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). Esineb ka koormuse otsest juhtimist näiteks elekterkütte lühiajalise väljalülitamisena jaotusvõrgu dispetšjuhtimise toimetel. 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. Lühiajalisse prognoosi kuulub enamasti koormuse temperatuurisõltuvus. Pikaajalise prognoosi ja koormuse analüüsi korral võib temperatuurisõltuvust imiteerida. Koormuse juhuslikkust kirjeldavad ruuthälve ja jaotusseadus. Koormuse lühiajalisel prognoosimisel ennetusajaga mõni tund kuni üks nädal on kasutusel formaalsed koormuse prognoosimudelid. Täpsemaid ja mitmekülgsemaid tulemusi annab koormuse matemaatiline mudel, mis kirjeldab koormuse muutumise seaduspärasusi sisulisel, füüsilisel tasemel.

Elektrisüsteemi talitlust vaadeldakse ka pikemas (nt aastases) perspektiivis. Vaja on plaanida kütuseressursse ning sõlmida elektri ostu-müügilepinguid. Aluseks on koormuse väärtused mitmesugustes ilmastikuoludes ning koormuse kasvu (trendi) variandid. Koormuse pikaajalise prognoosi korral võivad asja-

tundjad arvesse võtta ka regiooni majandusliku arengu perspektiive ja oodatavaid tehnilisi muutusi elektrivõrgus.

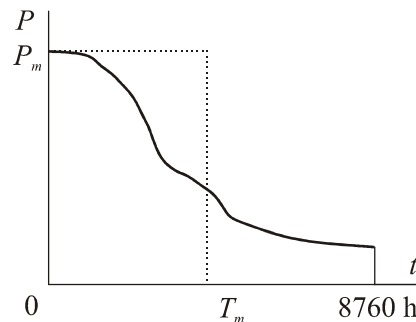
Elektrivõrgu projekteerimisel lähtutakse koormuse maksimaalväärtustest, mida rajatavad elektriliinid ja alajaamade seadmed peavad taluma. Kasutusel on mitmesugused meetodid, mis võimaldavad maksimaalkoormusi hinnata tarbijatüüpide (nt tööstus-, põllumajandus-, kommunaaltarbijad jm) kaupa. Üheks lähtekohaks on aasta koormuskestusgraafik, mis näitab antud väärtusega võrdse või seda ületava koormuse kestust mingi ajavahemiku (aasta) jooksul (joonis 1.8). Ligikaudselt võib maksimaalkoormust P_m hinnata tippkoormuse kasutusaja T_m ja aastaenergia W järgi, arvestades, et

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

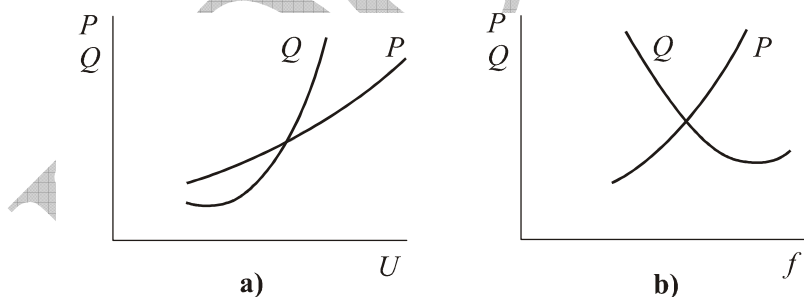
Veidi täpsema tulemuse annab Velanderi valem

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

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



Joonis 1.8 Aasta koormuskestusgraafik



Joonis 1.9 Koormuse staatilised karakteristikud pinge (a) ja sageduse (b) järgi

Talitluse reguleerimis- ja stabiilsusülesannete lahendamisel on vaja teada koormuse **staatilisi karakteristikuid** – sõltuvust sagedusest ja pingest (joonis 1.9). Fikseeritud olukorras iseloomustab pinge ja sageduse mõju aktiiv- ja reaktiivkoormuse **pinge-** ja **sagedustundlikkus**.

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

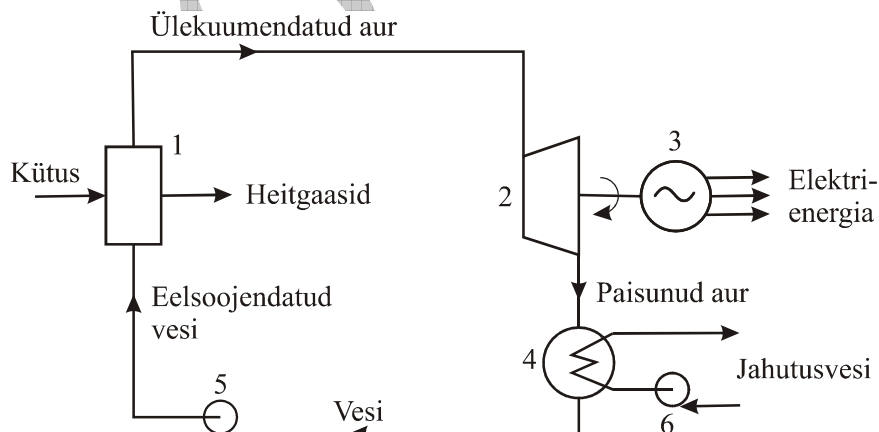
Elektri tarbimisega liitub **elektri kvaliteedi** nõue. Elektritarnitid on projek-teeritud nii, et nende töö on optimaalne talitluse nimiparameetrite (pinge, sagedus) korral. Seejuures eeldatakse, et pinge on siinuseline ja kolmefaasilises süsteemis sümmeetriline. Elektriyaamast väljastatud elektrienergia kvaliteeti rikuvad pingekaod elektrivõrgus, ühefaasilised ning mittelineaarseid elemente sisaldavad tarnitid jm. Elektri kvaliteedi all mõeldakse üldjuhul elektritarbijate elektrivarustuskindlust ja talitusparameetrite vastavust nimisuurustele. Kvali-teedinõuded 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.

1.2 Elektriyaamad

Elektriyaamu liigitatakse tavaliselt energiaressursi alusel soojuselektriyaamadeks (süsi, gaas, nafta, põlevkivi, turvas), tuumaelektriyaamadeks (uraan) ja hüdro-elektriyaamadeks (vesi). Peale selle on veel gaasiturbiinjaamad, diiseljaamad, elektrituulikud jm.

1.2.1 Soojuselektriyaamad

Soojuselektriyaamad jagunevad **kondensatsioonjaamadeks** ning **koostootmis-jaamadeks**. Esimesed toodavad ainult elektrienergiat. Neis kondenseeritakse turbiinist väljuv aur taas veeks ja suunatakse tagasi katlasse. Koostootmis-jaamades suunatakse turbiinidest väljuv aur ja sellega soojendatud vesi soojus-tarbijatele. Soojuselektriyaamade hulka võib arvata ka gaasiturbiin- ja diisel-elektriyaamad.



Joonis 1.10 Kondensatsioonielektriyaama skeem

Joonisel 1.10 on kondensatsioonjaama skeem. Aurukatlas (aurugeneraatoris) 1 toodetakse kütuse – kivisöe, põlevkivi, maagaasi, masuut vms põletamise teel ülekuumendatud auru, mille rõhk ulatub 35 MPa-ni ja temperatuur 650 °C

(tavaliselt 13...24 MPa ja 540...560 °C). Aur suunatakse auruturbiini 2, kus auru sisalduv soojusenergia muutub kineetiliseks energiaks – turbiini pöörlemiseks. Turbiin paneb pöörlema generaatori 3, mis toodab elektrienergiat. Turbiinis paisunud aur rõhuga 3...5 kPa veeldatakse kondensaatoris 4, jahutades seda temperatuurini 20...25 °C. Oluline on auru jahutada võimalikult madala temperatuurini, kuna soojuselektrijaama kasutegur on teatavasti võrdeline temperatuuride vahel auruturbiini sisenemisel ja väljumisel. Kondensaatorist pumbatakse külm vesi toiteveepumpade 5 abil tagasi katlasse. Kasuteguri tõstmiseks soojendatakse toitevett enne katlasse jõudmist turbiinist võetud kuuma vaheltvõtuauru abil (joonisel pole eelsoojendeid näidatud). Kondensaatori jahutamiseks kasutatakse järve-, jõe- või merevett, mida pumpab jahutusveepump 6.

Aurukatel moodustab keeruka agregaadi, kuhu koldele ja selles aurutorudest moodustatud küttepindadele lisaks kuuluvad toitevee ja õhu eelsoojendid, filtersüsteem põlemisgaasidest keskkonnakahjulike ainete (lendtuhk, vääveldioksiid ja lämmastikoksiidid) eraldamiseks, tuha ja räbu ärastamisseadmed, õhu- ja tõmbeventilaator, kütuse ettevalmistusseadmed (nt tahke kütuse veskid), küttepindade puhastusseadmed ning mitmesugused kaitse-, reguleerimis- mõõte- ja signalisatsiooniseadmed. Katelde aurutootlikkus ulatub 4000 t/h, mis vastab soojuslikule väljundvõimsusele 3500 MW. Probleemiks on keskkonda saastava lendtuha ja vääveldioksiidi eraldamine. Kasutusel on erinevatel põhimõtetel toimivad filtrid. Aastal 2004 valmisid Eesti ja Balti elektrijaamas kummaski kaks tsirkuleeriva keevkihiga katelt, kus kumbki katlapaar toidab 215 MW auruturbiini. Keeskihis ühineb kütuses sisalduv väävel põlevkivis sisalduva kaltsiumiga, mistõttu vääveldioksiidi ei teki.

Auruturbiinis suunatakse ülekuumendatud aur juhtlabade abil turbiini võllil paiknevatele töölabadele. Töölabadele toimiv jõud võib olla määratud aurujoa otsese rõhuga (aktiivturbiin) või labadelt pörkuva joa reaktiivtoimega (reaktiivturbiin). Nii juht- kui töölabasid on labaderingi ümbermõõdul mõnikümme, järjestikuseid labaringe (astmeid) kuni paarkümme. Kuna aur energiat ära andes paisub, on turbiini kere (silinder) laieneva koonuse kujuline. Võimsad auruturbiinid võivad koosneda mitmest omavahel ühendatud osaturbiinist. Auruturbiinide pöörlemiskiirus on enamasti 3000 1/min, mis vastab ühe poolusepaariga turbogeneraatori pöörlemiskiirusele 50 Hz sageduse korral. Tuumaelektrijaamades, kus auru parameetrid on madalamad, kasutatakse ka väiksemat pöörlemiskiirust 1500 1/min ja vastavalt kahe poolusepaariga generaatoreid. Auruturbiinide võimsus võib ulatuda kuni 1500 MW ja enamgi (Prantsusmaal Civaux tuumaelektrijaama turbiini võimsus on 1561 MW).

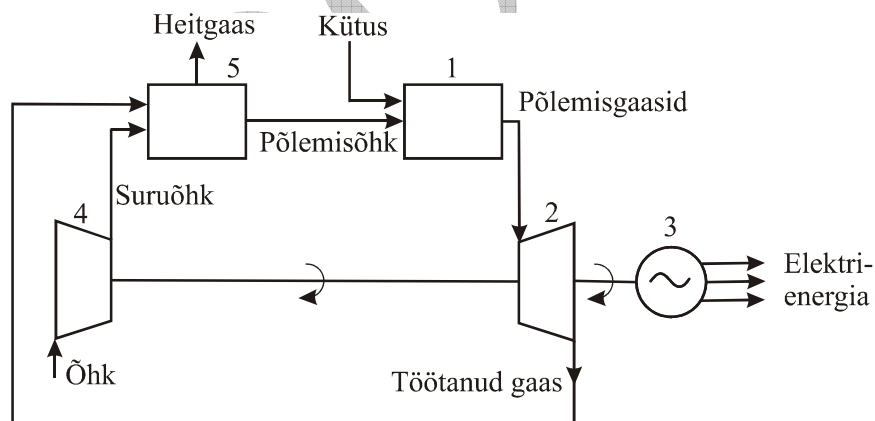
Auruturbiinist väljuv aur kondenseeritakse (veeldatakse) veega või harvemini õhuga jahutatavas kondensaatoris (**jahutustornis** ehk **gradiiris**). Jahutusveega viiakse ära soojus, mis vabaneb auru kondenseerumisel. Vabanev soojushulk sõltub sisend- ja väljundtemperatuuride vahest. Ideaalne (termodünaamiline)

kasutegur on

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

kus temperatuur on väljendatud absoluutses skaalas (Kelvini kraadides). Nüüdisaegsete kondensatsioonijaamade kasutegur on kuni 45%, enamasti 35...45%. Auru madalamate parameetrite korral (nt tuumaelektrijaamades) võib turbiini kasutegur olla veelgi madalam. Kasutegurit saab mõnevõrra tõsta auru ühe- või mitmekordse vaheülekuumendamisega. Kogu soojuselektrijaama kasuteguri hindamisel tuleb lisaks arvestada, et 7...10% toodetud elektrienergiast kulub jaama omatarbeks. Vajalik jahutusvee kogus on suur – 50...100 kg ühe kilogrammi auru kohta ehk 0,10...0,15 m³ saadava elektrienergia iga kilovatt-tunni kohta.

Aurus sisalduvat energiat saab täielikumalt kasutada sel teel, et turbiini madalrõhuosast võetakse osa auru muude aurutarvitite (nt kaugkütte või tehnoloogiliste protsesside) toiteks. Sellised turbiinid, mida nimetatakse **vaheltvõtuturbiinideks**, annavad nii mehaanilist energiat kui ka soojust. Energia muundamise kasutegur on neis jaamades ligikaudu 60%. Veelgi kõrgema kasuteguri (kuni 85%) võimaldavad saavutada **vasturõhuturbiinid**, milles kogu väljuv aur, enamasti rõhul 0,2...0,5 MPa, suunatakse kaugkütteks või tööstuslikele aurutarbijatele. Elektrijaamu, mis elektri kõrval väljastavad ka soojust, nimetatakse soojus- ja elektrijaamadeks ehk **koostootmisjaamadeks**.



Joonis 1.11 Gaasiturbiinjaama põhimõtteskeem

Elektrienergia tootmiseks võib kasutada ka gaasiturbiine, kus auru asemel paneb turbiini rootori pöörlema kütuse põlemisel tekkiv kõrge rõhuga gaas. Joonisel 1.11 on gaasiturbiinsükli põhimõtteskeem. Turbiini 2 paneb pöörlema gaas, mis tekib põlemiskambris 1. Kasuteguri tõstmiseks suunatakse töötanud gaas soojusvahetisse 5, kus ta soojendab kompressorist 4 tulnud põlemisõhku. Gaasi algrõhk on tavaliselt 0,6...1,2 MPa ja algtemperatuur kuni 900 °C

(jahutatavate labade korral kuni 1600 °C). Turbiinist väljuva gaasi temperatuur on ligikaudu 500 °C. Turbiinist ja kompressorist koosneva agregadi kasutegur on 25...40%. Kasuteguri tõstmiseks kasutatakse kütuse mitmejärgulist põletamist ja õhu mitmeastmelist komprimeerimist. Gaasiturbiini võimsus ulatub kuni 400 MW. Kütusena kasutatakse gaasiturbiinides enamasti maagaasi või ka vedelkütust.

Gaasiturbiinjaamade eeliseks on väikesed mõõtmed. Aurukatlast ja auruturbiinist koosneva energiaallikaga võrreldes on gaasiturbiinjaama jaoks vajalik ruumala ligikaudu 200 korda väiksem. Gaasiturbiini kiire käivitamise võimalus (mõni minut) teeb selle sobivaks tipuenergia tootmiseks ning kasutamiseks reservtoiteallikana. Näiteks kuulub Soome põhivõrgu Fingrid käsutusse rida 20...100 MW gaasiturbiinjaamu koguvõimsusega ligi 1 GW. Neid jaamu kasutatakse avariilukordades reservina. Gaasiturbiini puuduseks on kallite kuumuskindlate eriteraste ja -sulamite vajadus, labade ning muude aktiivosade kiire kulumine ja väike eluiga, tavaliselt mitte üle mõnekümne tuhande tunni. See teeb gaasiturbiinjaamades toodetud elektrienergia tunduvalt kallimaks auruturbiinidel põhinevate elektrijaamadega võrreldes. Gaasiturbiinjaamade efektiivsuse tõstmiseks võib heitsoojust kasutada soojuse tootmiseks. Koostootmisjaamade kasutegur võib ulatuda 60%. Rakendatakse ka liittsüklit, mis ühendab joonistel 1.10 ja 1.11 näidatud auru- ja gaasitsüklid. Sellistes **kombijaamades** kasutatakse gaasiturbiinist väljunud kuumade gaaside soojust auru tootmiseks. Aur suunatakse kondensatsiooni- või vasturõhuturbiini. Kombijaamade kasutegur võib ulatuda 62%.

Väikestes elektrijaamades kasutatakse ka gaasi- või diiselmootorit ja generaatorist koosnevaid agregate võimsusega mõnekümnest kilovatist mõnekümne megavatini niihästi pidevalitluses kui tippkoormusel, aga ka reservtoiteallikana. Levinud on automaatselt mõne sekundi või mõne minuti jooksul käivituvad diiselereservtoiteallikad vastutusrikaste elektritarbijate (haiglad, raadio- ja televisioonijaamad, juhtimiskeskused jms) elektrivarustussüsteemides.

Eesti suuremad elektrijaamad on tabelis 1.3. Tegemist on kondensatsioonijaamadega, vähemal määral ka koostootmisega. Tabelis näidatud aasta osutab jaama valmimisele või renoveerimisele.

Tabel 1.3 Eesti suured elektrijaamad 2007. aasta alguses

Nimi või asukoht	Agregaatide arv ja võimsus MW	Aasta
Eesti Elektri jaam	$7 \times 200 + 215 = 1615$	2004
Balti Elektri jaam	$2 \times 180 + 190 + 215 = 765$	2005
Iru Elektri jaam	$100 + 90 = 190$	1982
Kohtla-Järve Elektri jaam	$4 \times 12 = 48$	1978

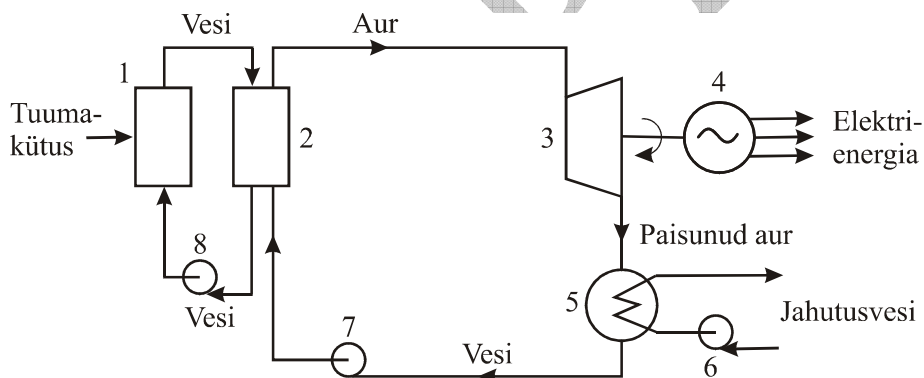
1.2.2 Tuumaelektrijaamad

Tuumaelektrijaama põhiliseks erinevuseks soojusjaamast on see, et aurugeneraatorina kasutatakse neis tuumareaktoreid, kus tuumakütuse lõhustumise energia muudetakse auru soojusenergiaks. Lisanduvad rajatised kiirgusohutuse tagamiseks.

Tuumaelektrijaamade liigituse aluseks on

- energiakandekontuuride arv (ühe-, kahe- ja kolmekontuurilised)
- reaktorite tüüp (aeglasel või kiirel neutronil)
- soojuskandja (vesi, gaas, vedelmetall)
- reaktori konstruktsioon (keevvee- või rõhkveereaktorid jm)
- aeglusti (grafiit, vesi, raske vesi).

Kahekontuurilise tuumajaama tehnoloogiline skeem on joonisel 1.12. Reaktoris 1 kuumutatud vesi suunatakse aurugeneraatorisse 2. Nende kahe kontuuri isoleeritus tagab selle, et aur ei ole praktiliselt radioaktiivne. Muus osas on skeem nagu kondensatsioonijaamagi korral. Erinevused on vaid auru parameetrites. Auru temperatuur ja rõhk on tuumajaama puhul madalamad.



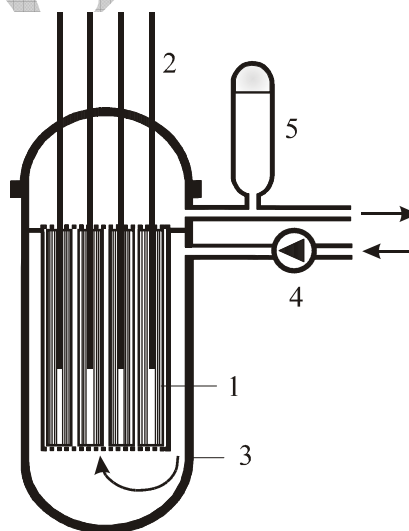
Joonis 1.12 Kahekontuurilise tuumajaama tehnoloogiline skeem

Tänapäeva elektrijaamades kasutatavad tuumareaktorid põhinevad enamasti uraani isotoobi ^{235}U lõhestumise ahelreaktsiooni tulemusel tekkival soojusel. Ahelreaktsioonis põrkub aeglustatud ligikaudu 2 km/s liikuv neutron uraani aatomi tuumaga, aatom lõheneb kaheks kergemaks aatomiks, ning vabaneb keskmiselt 2,5 uut kiiret ligikaudu 2×10^4 km/s liikuvat neutronit. Osa kiiretest neutronitest aeglustatakse sobiva kiiruseni aeglusti ehk moderaatori (nt vee, raske vee või grafiidi) abil, misjärel üks nendest lõhestab uue uraani tuuma. Ülejäänud neutronid neelduvad kütusevarrastes, aeglustis ja reaktori muudes osades, andes neile ära oma energia, mis muundub soojuseks. Aeglustumine põhineb neutroni mitmekordsel põrkumisel aeglusti aatomituumadega ja on vajalik selleks, et suurendada neutroni ja uraaniaatomi tuuma põrkumise

tõenäosust. Et ahelreaktsioon oleks stabiilne, peab uraani ^{235}U kogus tuumakütuses olema 2...5% ja protsessi peab saama neutroneid neelavate ainetega (nt booriga, kaadmiumiga või hafniumiga) reguleerida. Tuumaprotsesside tulemusel muundub mingi osa uraanist plutooniumiks ^{239}Pu , mida saab kasutada tuumakütusena muud tüüpi tuumareaktorites, aga ka tuumarelvade valmistamiseks. 1 g uraani ahelreaktsioonil saadav energia on 839 GJ ehk 23 MWh. Võrdluseks võib mainida, et 1 g tingkütuse põletamisel saadakse 8,14 Wh soojust.

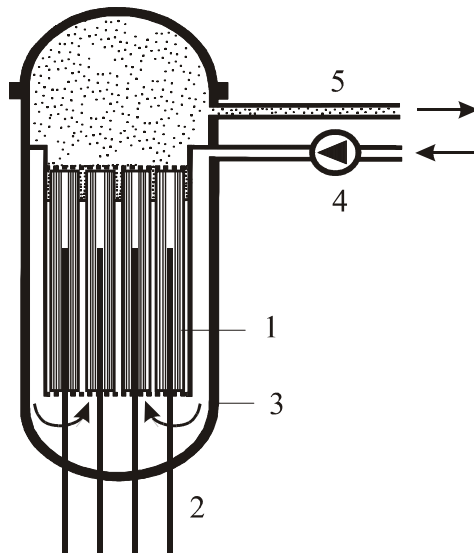
Tuumakütus (rikastatud uraan) viiakse tuumareaktoris enamasti uraanoksiidina UO_2 . Selle aine pulbrist paagutatakse keraamilised tabletid läbimõelduga 1 cm ja kõrgusega 2...3 cm, mis lukitakse tsirkooniumisulamist valmistatud torudesse pikkusega 3,5...4,5 m. Sel viisil saadud kütusevardad ühendatakse 70...300 kaupa ruudukujulise ristlõikega kimpudeks, mis paigutatakse reaktoris püstiasendis. Kütusevarraste ja vardakimpude vahele jääb aeglusti, milleks enamasti on vesi. Reaktori seda osa, milles paiknevad kütusevardad ja milles toimub ahelreaktsioon, nimetatakse aktiivtsooniks. Vesi on siin ühtlasi soojuskandja, mille abil edastatakse soojus aurugeneraatorisse. Peale kütusevarraste paiknevad aktiivtsoonis boori (ka kaadmiumi või hafniumi) sisaldavad pidurdus- ehk juhtvardad, mis neelavad neutroneid ja võimaldavad aktiivtsooni viimise või sellest eemaldamise teel reaktori võimsust muuta.

Kahekontuuriliste tuumajaamade **surveveereaktori** (*pressurized water reactor, PWR*) ehituspõhimõte on joonisel 1.13, kus on näidatud kütusevardad 1, juhtvardad 2, reaktori kest 3, toitepump 4 ja rõhuregulaator 5. Surveveereaktorites võib vee rõhk olla 16 MPa ja reaktorist väljuva vee temperatuur 315 °C. Aurugeneraatoris võimaldab see saavutada auru rõhuga 6 MPa ja temperatuuriga 275 °C. Reaktori kütusevardad sisaldavad kokku 80...110 t tuumakütust. Reaktori soojuslik väljundvõimsus on 4...6 GW, mis võimaldab arendada elektrilist võimsust 900...1600 MW (kasutegur 25...30%). Surveveereaktorid on levinud tuumareaktorite liik. Maailma tuumaelektrijaamades on neid praegu umbes 300.



Joonis 1.13 Surveveereaktori ehituspõhimõte

Kasutusel on ka **keevveereaktorid** (*boiling water reactor, BWR*) (joonis 1.14), kus vesi reaktoris aurustub ja juhitakse pärast niiskuse eraldamist otse



Joonis 1.14 Keevveereaktori ehituspõhimõte

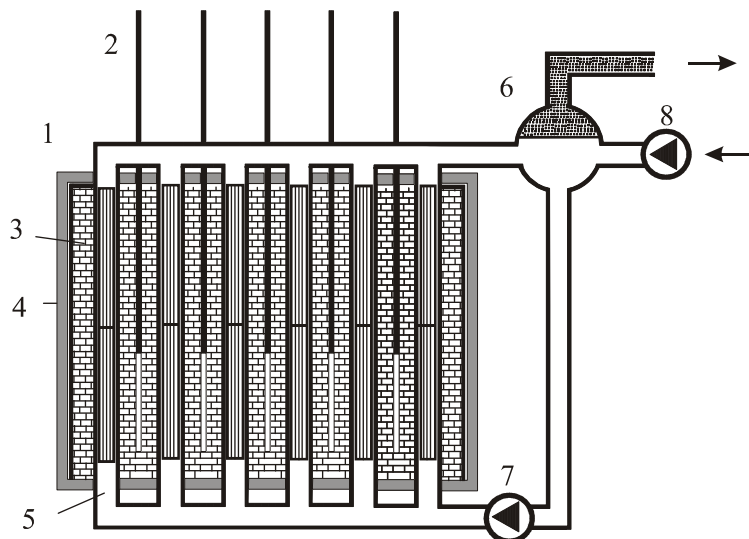
reactor, PHWR), mis on välja töötatud Kanadas ja seetõttu ka CANDU-reaktoriteks nimetatakse, võimaldavad raske vee D_2O paremate aeglustusomaduste tõttu kasutada tuumakütusena looduslikku (rikastamata) uraani. Soojuskandja väljub reaktorist temperatuuriga 280...290 °C ja suunatakse nagu teistegi surveveereaktorite puhul aurugeneraatorisse. Reaktorit iseloomustab kõrge töökindlus, odavam tuumakütus ja loodusliku uraani mitu korda parem väärtustamine.

Grafiitaeglustiga kanaltüüpi keevveereaktor (reaktor bolshoy moshnosti kanalniy, RBMK) (joonis 1.15) kujutab endast silindrikujulist teraskestaga ümbritsetud grafiitplokkide kogumit 3 kõrgusega 7 m ja läbimõõduga 11,8 m. Grafiidi üldmass on 1850 t. Läbi grafiidi kulgeb 1693 kütusekanalit 5. Kanaleid läbib soojuskandja (vesi) rõhu all 6,5 MPa, mis reaktoris aurustub. Väljuva auru temperatuur on 280 °C. Joonisel 1.15 on veel kütusevardad 1, juhtvardad 2, reaktori kest 4, aurutrummel 6 ning ringlus- ja toitepump 7 ja 8. RBMK-tüüpi reaktor töötati välja NSV Liidus ja on üles seatud näiteks Sosnovõi Bori ja Ignalina tuumajaamades. Reaktori omapäraks on võimalus ebastabiilsuse tekkeks. 1986. aastal toimuski seda tüüpi reaktoriga katastroof Tšernobõli tuumaelektrijaamas.

Paljundusreaktorid ehk briiderid (liquid metal fast breeder reactor, LMFB) põhinevad kiiretel neutronitel ja neis tekib plutooniumi näol uut tuumakütust enam, kui seda reaktoris kulutatakse. Tekkivast tuumakütusest ja kasutatud tuumakütusest saadava energia suhet nimetatakse paljundusteguriks. Selle väärtus on 1,2...1,4. Plutooniumit tekib ka eespool vaadeldud reaktorites. Vesiaeglustiga reaktorites on paljundustegur 0,4...0,5 ja grafiitaeglustitega

auruturbiini. Joonisel on näidatud kütusevardad 1, juhtvardad 2, reaktori kest 3, toitepump 4 ja auruväljund 5. Keevveereaktorite korral jääb ära aurugeneraator, mis lihtsustab energiaploki ehitust. Keevveereaktoreid oli 2007. aasta alguses maailma tuumaelektrijaamades kokku 73. Sellise ühekontuurilise tuumaelektrijaama korral on aga turbiini minev aur mingil määral radioaktiivne, mis nõuab turbiini ümbritsemist kiirguskaitsevarjega. Nii surve- kui keevveereaktorite korral on võimalik ehitada eriti kõrge töökindlusega ohutuid elektrijaamu.

Raskeveeaeglustiga surveveereaktorid (pressurized heavy water

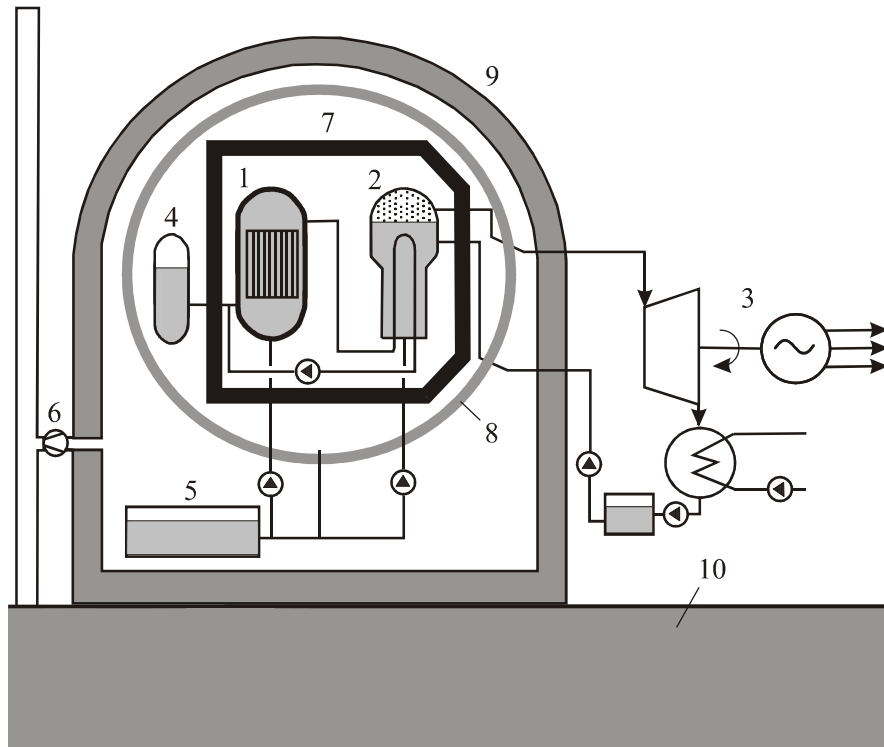


Joonis 1.15 Reaktori RBMK ehituspõhimõte

reaktorites kuni 0,8. Briiderites on soojuskandjaks vedel naatrium, mille temperatuur reaktorist väljumisel on 500...600 °C. Kuna soojuskandja on siin tugevasti radioaktiivne, suunatakse soojus teise kontuuri naatriumsoojuskandjasse ja alles sealt aurugeneraatorisse. Kiiretel neutronitel põhinevate paljundusreaktorite korral on kõrget töökindlust saavutada tunduvalt raskem kui tavapärase veereaktorite korral. Pealegi on neist saadav plutoonium kallim kui rikastatud uraan. Seetõttu on maailma avalikes tuumaelektrijaamades talitluses vaid mõni selline reaktor.

Tuumaelektrijaamade ehitamisel pööratakse erilist tähelepanu ohutusele. Joonisel 1.16 kujutatud surveveereaktoriga energiaplokis on tehnoloogiliste seadmete nagu reaktor 1, aurugeneraator 2, turbiingeneraatoragregaat 3, vee paisupaak 4 kaitseks järgmised barjäärid: eribetonist kiirguskaitseümbris 7, rõhukindel terasümbris 8, betoonkuppel 9 ja betoonvundamendiplaat 10. Joonisel on näidatud veel hädajahutuse veevaru 5 ja ventilatsioon 6. Betoonkuppel peab muuhulgas vastu pidama raketirünnakule ning välistama radioaktiivsete ainete väljapääsu reaktori purunemisel. Vundamendiplaat paksusega ligikaudu 10 m peab kinni pidama reaktori aktiivtsooni täielikul sulamisel tekkiva metallikoguse.

Tänapäeval kasutatakse tuumaelektrijaamades peamiselt teise ja kolmanda põlvkonna tuumareaktoreid. Turule on tulnud esimesed kolmanda põlvkonna reaktorite edasiarendused – põlvkond kolm pluss. Soomes ehitatav viies tuumareaktor kuulub just sellesse põlvkonda. Tulevikus tahetakse suurendada tuumaenergia konkurentsivõimelisust ja ohutust, vähendada jäätmeid ning suurendada tuumaenergia osakaalu. Kavandatavad neljanda põlvkonna reaktorid



Joonis 1.16 Surveveereaktoriga energiabloki ehituspõhimõte

peaksid kulutama vähe tuumakütust ning suutma suurema osa oma jäätmeist ise kahjutuks teha. Reaktorites kasutatakse jahutuseks heeliumi ning neis peaks olema suletud kütuseringlus¹. Toorainena kasutatakse ainult looduslikku uraani. Uraan ja rasked isotoobid, nagu plutoonium ja ameriitsium, kasutatakse reaktori töötssükli käigus lõplikult ära. Praegustes reaktoreis nii ei ole, sestap jäävadki rasked isotoobid tuumajäätmeis aastasadeks keskkonda ohustama. Praegusel ajal tegeletakse uurimistööga ning tulemusteni loodetakse jõuda aastaks 2030. Arendustöös on põhitähelepanu pööratud kuuetele tehnoloogiale:

- eriti kõrgtemperatuuriline reaktor (*very-high-temperature reactor, VHTR*)
- ülekritiline vesijahutusega reaktor (*supercritical-water-cooled reactor, SCWR*)
- sulasoolareaktor (*molten salt reactor, MSR*)
- gaasjahutusega kiire reaktor (*gas-cooled fast reactor, GFR*)
- naatriumjahutusega kiire reaktor (*sodium-cooled fast reactor, SFR*)
- pliijahutusega kiire reaktor (*lead-cooled fast reactor, LFR*).

¹ Suletud kütuseringlus toimub kiirete neutronitega reaktoris, kus tekib uut tuumakütust rohkem, kui kulub. Seetõttu pole sellisesse reaktoris vaja kütust lisada.

Kolme esimest reaktorit nimetatakse terministeks reaktoriteks² ja ülejäänud kolme kiireteks reaktoriteks³. Kiired reaktorid võimaldavad rakendada raskeid isotoope, selleks et veelgi enam vähendada tuumajäätmeid ning samas toota enam kütust, kui nad ise tarbivad, kuuludes seega paljundusreaktorite ehk briiderite hulka. Need süsteemid tagavad jätkusuutlikkuse, tõstavad ohutust ja töökindlust ning on kasulikud ka majanduslikus mõttes.

Eriti kõrgtemperatuuriline reaktor *VHTR* on grafiitaeglustiga heeliumjahutusega reaktor, millel on ühekordne kütuseringlus. Reaktori väljundtemperatuuriks on 1000 °C, mille tõttu saab seda kasutada vesiniku tootmisel ja naftakeemiatööstuses. Elektrienergia tootmise kõrval võimaldab reaktor varustada tööstusliku auruga kõrge temperatuuriga energiamahukaid mitteelektrilisi protsesse. Selline koostootmine tõstab oluliselt reaktori kasutegurit.

Ülekriitiline vesijahutusega reaktor *SCWR* töötab kõrgemal vee kriitilisest termodünaamilisest punktist (374 °C, 22.1 MPa). Tegemist on vesijahutusega reaktoritega *LWR*, mis töötavad kõrgemal rõhul ja temperatuuril kui tavalised *PWR*- ja *BWR*-tüüpi reaktorid. Reaktorid on ühekontuurilised ning neid kasutatakse elektrienergia tootmiseks. Reaktori kasutegur ulatub 45% ja enam.

Sulasoolareaktoris *MSR* kasutatakse jahutina sulasoola. Arendamisel on erinevaid tüüpe ning ehitatud on prototüüpe. Sulasoolas salvestatud soojus kantakse läbi vahesoojusvaheti teise soojusvahetisse ning sealt edasi läbi kolmanda soojusvaheti auruturbiini. Reaktori suletud kütuseringlust on võimalik seadistada nii, et plutoonium ja teised rasked isotoobid kasutatakse efektiivselt ära. Reaktoritel on hea neutronite bilanss, mis annab võimaluse aktiniidide (siin tuumareaktsiooni jäägid) põletamiseks või muundamiseks. Kõrgete temperatuuride tõttu on reaktorit võimalik kasutada termokeemiliselt vesiniku tootmiseks. Kütust lisada ja eemaldada on võimalik reaktorit seiskamata.

Gaasjahutusega kiirel reaktoril *GFR* on kiirete neutronite spekter ja suletud kütuseringlus, mille eesmärgiks on uraani efektiivsem muundamine ning raskete isotoopide juhtimine. Reaktor on heeliumjahutusega, heeliumi väljundtemperatuur on 850 °C. Kõrgema termilise kasuteguri saamiseks kasutatakse Braytoni termodünaamilise tsükliga gaasiturbiine, mida käitab reaktorist väljuv gaas, heelium. Nii nagu termilise spektriga heeliumjahutusega reaktoritel võimaldab kõrge väljundtemperatuur suurendada kasutegurit nii elektri, vesiniku kui ka tööstusliku auru tootmiseks.

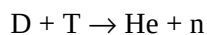
² Terministest reaktorites (termilise spektri korral) aeglustuvad neutronid soojusliku kiiruseni ja liiguvad difusiooni teel, kuni nad aeglustis või konstruktsioonides neelatakse või kutsuvad esile tuumareaktsiooni.

³ Kiiretes reaktorites (kiirete neutronite spektri korral) pole aeglustit. Neutronite liikumiskiirus on suur.

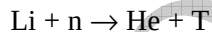
Naatriumjahutusega kiiret reaktorit *SFR* jahutatakse vedela naatriumiga ning kütusena kasutatakse uraani ja plutooniumi sulamit. Tal on kiirete neutronite spekter, naatriumjahutusega reaktor ja suletud kütuseringlus. Naatriumi temperatuur on 530...550 °C. Seda tüüpi reaktor on ette nähtud käitlemaks jäätmeid ning eriti plutooniumi ja teisi raskeid isotoope.

Pliijahutusega kiire reaktor *LFR* on kiiretel neutronitel põhinev seatina või seatina-vismuteutektikumi jahutusega reaktor. Reaktoril on suletud kütuseringlus, mis muundab tõhusalt uraani ja käitleb aktiniide. Seda tüüpi reaktoritel võivad olla erinevad võimsused ja mõõtmed. Näiteks *battery*-tüüpi reaktori võimsus on 50...150 MW, moodulsüsteemi korral 300...400 MW ning püsipaigaldusena elektri jaamas kuni 1200 MW. Reaktoril on pikk kütuse lisamise intervall – 15...20 aastat.

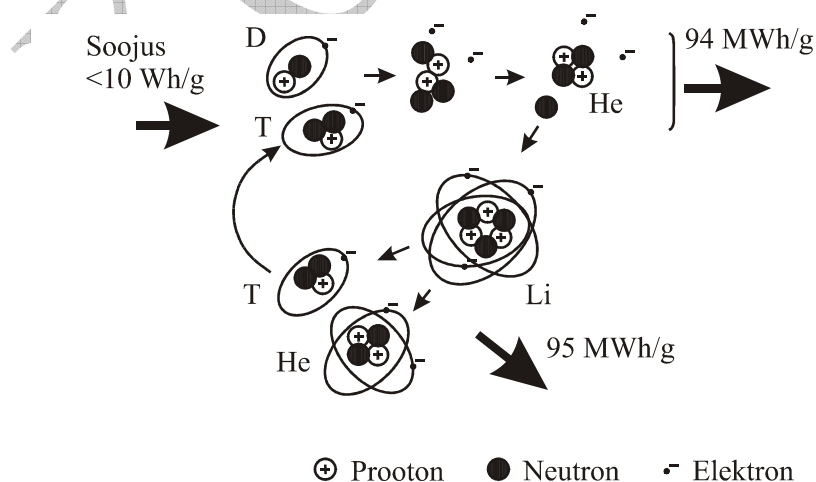
Tuumaenergeetika kaugemaks perspektiiviks on **termotuumareaktor**, mis põhineb vesinikuaatomite ühinemisel (fusioonil) heeliumiaatomiks, kusjuures eraldub energia. Võimalikest reaktsioonivariantidest peetakse kõige realiseerimiskõlblikumaks raske ja üli raske vesiniku (deuteeriumi ja triitiumi) muundamist heeliumiks reaktsioonil



milles vabaneb energia 94 MWh/g. Deuteeriumi eraldamine näiteks mereveest ei paku raskusi. Triitium on aga vesiniku radioaktiivne isotoop, mille poolestusaeg on 12 aastat. Looduses triitiumi seetõttu ei ole ja termotuumareaktoris saadakse see tekkiva neutroni reageerimisel liitiumiaatomiga



millega juures eraldub energiat 95 MWh/g. Kaevandamiseks sobivat liitiumimaaki arvatakse olevat piisavas koguses. Liitiumisoolasid sisaldab ka ookeanivesi, millest liitiumisoolade eraldamine ei tekita probleeme. Reaktsioonid on piltlikult joonisel 1.17.



Joonis 1.17 Termotuumaprotsessi põhimõte

Et kirjeldatud ühinemisprotsess toimuda saaks on vaja kõrget temperatuuri (umbes 10^8 K), ionide piisavat tihedust ja plasma piisavat kooshoidekestust. Senistel katseseadmetel seda saavutada ei ole õnnestunud. Kõige lähemale on jõutud ringkanaliga (tokamak-tüüpi) katseseadmeil. Tingimused peaks esmakordselt täitma rahvusvaheline katsereaktor *ITER*, mis valmib aastal 2011.

1.2.3 Hüdrolektrijaamad

Hüdrolektrijaamades käitavad generaatoreid hüdroturbiinid, mis muundavad vee langemise energia pöörlemise energiaks. Hüdroturbiinid jaotatakse reaktiiv- ja aktiivturbiinideks. Reaktiivturbiini tööratas pöörleb vees, talle kandub üle vee potentsiaalne ja kineetiline energia. Aktiivturbiini tööratas pöörleb õhus veejooa kineetilise energia varal.

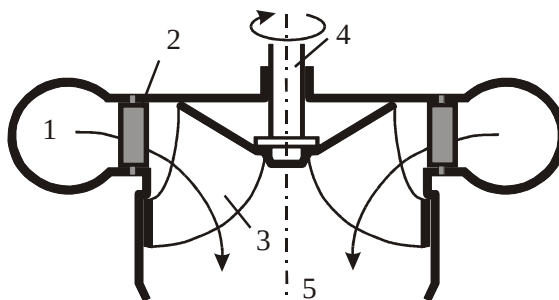
Turbiinide põhitüübid.

- *Francise ehk radiaalaksiaalturbiin* on reaktiivturbiin. See on maailmas enim levinud turbiinitüüp. Kasutatakse muuhulgas suurtel rõhkudel (kuni 700 m) ja võimsustel (kuni 1000 MW). Pöörlemiskiirus 80...500 1/min.
- *Kaplani ehk pöördlabaturbiin* on reaktiivturbiin. Kasutatakse väikestel rõhkudel (kuni 50 m) ja võimsustel (kuni 150 MW). Pöörlemiskiirus 70...250 1/min.
- *Propellerturbiin* on Kaplani turbiin, mille töölabad ei ole pööratavad. Kasutatakse lihtsa konstruktsiooni ja madala hinna tõttu väikestel võimsustel.
- *Pelton- ehk koppturbiin* on aktiivturbiin. Kasutatakse eriti suure veerõhu ja väikese veehulga korral. Pöörlemiskiirus 1000...3000 1/min.

Hüdrolektrijaamu liigitatakse veel veehoidla, paisu jm ehituslike iseärasuste järgi. Elektrisüsteemi talitluse juhtimise seisukohalt on soodus veehoidla suhteliselt suur maht. Elektrienergia akumulatsiooniks kasutatakse pump-hüdrolektrijaamu, mille agregaadid (enamasti Francise turbiinid) töötavad nii pumbana kui turbiinina. Pump-hüdrolektrijaama kasutegur on 75% ringis.

Radiaalaksiaalturbiin

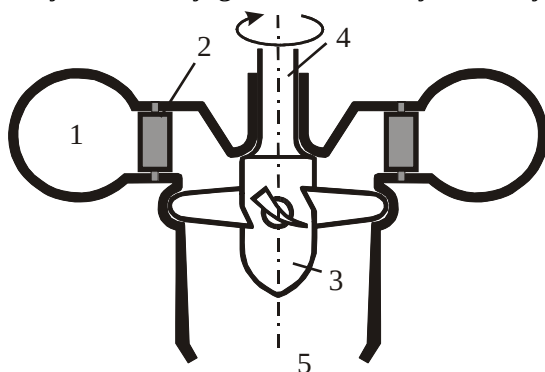
ehk **Francise turbiin** (joonis 1.18) on püstise võlliga, mille tööratas labad on võlliga jäigalt ühendatud. Vesi siseneb turbiini hüdrolektrijaama paisjärvest spiraalkanali 1 kaudu, mis tagab vee ühtlase sissevoolu tööratas kogu ümbermõõdul,



Joonis 1.18 Francise turbiini ehituspõhimõte

läbides 16...32 labast koosneva juhtaparaadi 2. Viimane reguleerib vee vooluhulka ja suunab selle tööratte labadele 3, mille arv on 9...19. Tööratas paneb pöörlema võlli 4. Vesi väljub turbiini telje suunas imitorusse 5. Turbiin sobib kasutamiseks vee rõhukõrgusel 30...700 m. Turbiini võimsus ulatub 1000 MW ja seda rakendatakse kiire langusega jõgedel, millele saab ehitada kõrgeid paisusid. Turbiini pöörlemiskiirus on 80...500 1/min.

Pöördlabaline ehk **Kaplani turbiin** (joonis 1.19) on konstrueeritud laevakruvi eeskujul lausmaajõgede hüdroelektrijaamade jaoks. Turbiini telg on püstine,

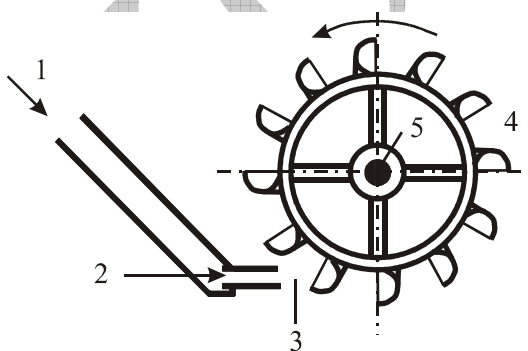


Joonis 1.19 Kaplani turbiini ehituspõhimõte

töölabsid 4...6, tööratte 3 läbimõõt võib ulatuda kuni 10 m. Muud turbiini osad on samad kui Francise turbiinil. Turbiini kasutatakse vee rõhukõrgusel 2...50 m. Võimsus võib ulatuda kuni 150 MW. Turbiini pöörlemiskiirus jääb tavaliselt alla 100 1/min. Kaplani turbiiniga on sarnane propellerturbiin. Erinevus seisneb selles, et

propellerturbiini labad on jäigalt ühendatud tööratte võlliga, mis teeb selle ehituse lihtsamaks. Eesti pisihüdroelektrijaamades on peaaegu eranditult kasutusel Kaplani turbiinid.

Kopp- ehk **Peltoni turbiin** (joonis 1.20) on vesiratta edasiarendus, kus tööratte 4 lamedad labad on asendatud kaheosaliste koppadega. Kopale suunatud



Joonis 1.20 Peltoni turbiini ehituspõhimõte

veejuga 3, mis tuleb juurdeviigutorust 1 läbi vooluhulga reguleerimisseadise 2, jaguneb kaheks (kopa mõlemale poole) ja paneb tööratte pöörlema. Turbiin on enamasti rõhtsa võlliga 5. Koppiturbiin sobib rõhukõrgustel 100...1800 m ja selle nimivõimsus võib ulatuda kuni 450 MW. Turbiini pöörlemiskiirus on 1000...3000 1/min. Peltoni turbiine kasutatakse eeskätt

mägijõgedel, kus hüdroelektrijaama veehoidla saab paikneda palju kõrgemal kui turbiinihoone.

Hüdroturbiine iseloomustab kõrge kasutegur 90...96%. Võimsus turbiini võllil avaldub valemiga

$$P = \eta \rho g H Q$$

kus P – võimsus turbiini võllil W

η – turbiini kasutegur

ρ – vee tihedus kg/m³

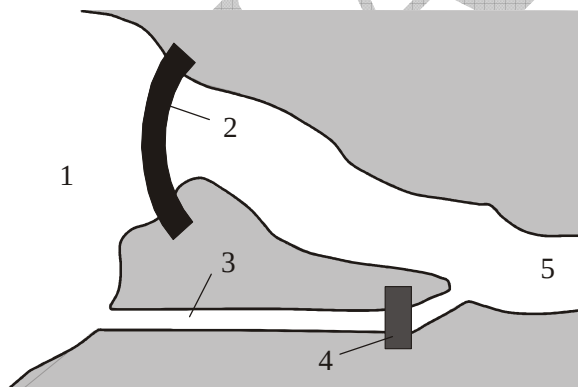
g – raskuskiirendus m/s²

H – rõhukõrgus m

Q – vee vooluhulk m³/s.

Hüdroelektrijaama ehitamisel tõkestatakse jõgi paisuga, mille kõrgus oleneb jõesängi geoloogilisest struktuurist. Kaljuste kallastega kitsaste jõgede korral võib paisu kõrgus ulatuda 300 meetrini, lauskmaaajõgedel on see tavaliselt mõni kuni mõnikümmend

meetrit. Kõrgete paisude puhul paikneb jaama masinasaal tammi järel, madalate korral on aga paisu osa. Lauskmaaajõgedel võib jõe suure languse korral osutada otstarbekaks paigutada jõujaamahoone paisust eemale ja juhtida vesi selle juurde derivatsioonikanali abil (joonis 1.21). Joonisel 1 – paisjärv (ülemine bjeff), 2 – betoonpais, 3 – derivatsioonikanal,



Joonis 1.21 Derivatsioonihüdroelektrijaama ehituspõhimõte

4 – masinasaal ja 5 – vee äravool (alumine bjeff). Seda põhimõtet kasutatakse ka Narva hüdrojaama puhul. Mägijõgede hüdroelektrijaamades juhitakse vesi jaamahoonesse maapealsete või maasiseste torude kaudu.

Hüdroelektrijaama kasutegur on vähemalt 90%. Elektrienergia kulu omatarbeks ei ületa 0,5%. Jaama eluiga on 50...100 aastat ja hoolduskulud madalad, mistõttu hüdrojaamade elektrienergia on kuni 10 korda odavam kui soojus-elektrijaamadest saadav. Suurim probleem hüdrojaamade rajamisel on enamasti paisjärve alla jäävad suured maa-alad.

Ühel ja samal jõel võib olla palju hüdrojaamu, mis endastmõistetavalt peavad kasutama vett omavahel kooskõlastatult. Selliseid komplekse nimetatakse **hüdrojaamakaskaadiks**. Maailma võimsam kaskaad, mis koosneb 13 elektrijaamast koguvõimsusega 25,15 GW, paikneb 2250 km pikkusel Columbia jõel, mis algab Kanadas ja kulgeb läbi USA Washingtoni osariigi. See jõgi sobib hüdroenergeetiliselt hästi, kuna voolab kaljuses mäestikus väheasutatud aladel.

Jõe langus on suur (883 m) ja paisjärvede pindala suhteliselt väike. Balti riikide suurim kolmest hüdrojaamast koosnev kaskaad koguvõimsusega 1534 MW on Daugava jõel Lätis.

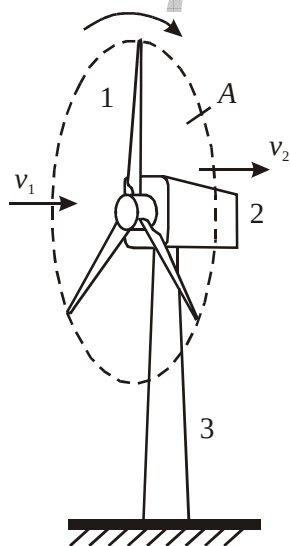
Hüdroenergia salvestamist võimaldavad **pumpelektrijaamad**, mida nimetatakse ka hüdroakumulatsioonijaamadeks. Jaama juurde kuulub kaks veehoidlat (ülemine ja alumine), mille veetasemete vahe on 50...500 m. Jaama agregaadid võivad töötada nii mootorpumbana kui ka turbiingeneraatorina. Suurtel rõhku-del võidakse kasutada ka eraldi pump- ja turbiinagregate. Energiasüsteemi miinimumkoormuse ajal pumpavad need vett alumisest veehoidlast ülemisse, tippkoormuse ajal aga toodavad elektrienergiat. Pumpelektrijaama kasutegur on 70...85%. Eriti sobivad pumpelektrijaamad koostööks tuumaelektrijaamadega, et need saaksid talitleda võimalikult ühtlase koormusega. Maailmas on praegu üle 300 pumpelektrijaama. Suurim 2700 MW võimsusega jaam on Jaapanis.

1.2.4 Alternatiivsed elektrienergia allikad

Alternatiivseteks nimetatakse selles raamatus elektrienergia allikaid, mis pole traditsioonilised soojus-, tuuma- ja hüdroelektrijaamad. Mõnikord nimetatakse alternatiivseteks taastuvaid energiaallikaid, kuhu kuuluvad ka hüdroelektrijaamad.

1.2.4.1 Tuuleelektrijaamad

Tuuleturbiin muundab tuule kineetilise energia mehaaniliseks pöörlemis-energiaks. Tuuleelektrijaamades kasutatakse rõhtsa võlliga propellerturbiine



Joonis 1.22 Tuuleturbiini ehituspõhimõte

võimsusega 0,1...6 MW. Tuuleturbiini (joonis 1.22) põhiosaks on tiivik 1, mis koosneb tiibadest, nabast, võllist ja tiibade pöörlemismehhanismist. Tiiviku võlli laagerdus asub gondlis 2, kuhu kuuluvad veel gondli pöörlemismehhanism, reduktor (kui see olemas on) ja elektrigeneraator koos abiseadmetega. Gondel toetub torutaolisele mastile 3, mis valmistatakse terasest või terasbetoonist. Tiivikul on tavaliselt 3 tiiba. Tiiva tipu liikumiskiirus on 6...8 korda suurem tuule kiirusest. Turbiini nimi-pöörlemiskiirus on vahemikus 20...40 1/min.

Kui tuule kiirus on tiiviku ees v_1 , on tuule võimsus tiiviku pöörlemispindalal enne tiivikut

$$P_1 = \frac{1}{2} m v_1^2 / t = \frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

kus P_1 – õhuvoolu võimsus W

$m = \gamma A v_1 t$ – pöörlemispindalale suunduva õhu mass kg

γ – õhu tihedus ($1,2 \text{ kg/m}^3$)

A – tiiviku pöörlemispindala m^2

v_1 – tuule kiirus m/s

t – aeg s.

Tuule võimsus tiiviku pöörlemispindalal on võrdeline tuule kiiruse kuubiga. Enamik tuuleturbiine nähakse ette tuule kiirusele $12 \dots 16 \text{ m/s}$, kusjuures turbiin käivitub tuule kiirusel $2 \dots 4 \text{ m/s}$ ja lülitub välja, kui tuule kiirus tõuseb üle $25 \dots 35 \text{ m/s}$.

Kui tiiviku järel on tuule kiirus v_2 , avaldub tiiviku pöörlemisvõimsus valemiga

$$P_2 = \frac{1}{2} \gamma (v_1^2 - v_2^2) \times \frac{1}{2} (v_1 + v_2) A$$

Kui tähistada $x = v_2/v_1$, saab turbiini teoreetilise võimsussuhte kujul

$$c_{\text{teor}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{2} (1 + x)(1 - x^2)$$

Tegemist ei ole kasuteguriga, sest osa õhuvoolust läheb turbiini tiivikust paratamatult mööda ega saa muunduda tiiviku pöörlemisvõimsuseks. Võimsussuhte maksimum $c_{\text{teor}} = 0,59$ ehk 59% saavutatakse, kui $x = 1/3$. Tegelik võimsussuhe on $40 \dots 50\%$.

Et tiivik pöörleks püsiva kiirusega, tuleb tiibadele toimivat jõudu olenevalt tuule kiirusest reguleerida. Väikestel turbiinidel võivad tiiviku tiivad olla nabaga järgalt ühendatud, kusjuures tiibade ristlõige on sellise kujuga, et tuule kiiruse suurenemisel üle teatava väärtuse tekib aerodünaamiline väärtusnähtus ja tiibadele mõjuv jõud väheneb. Selline isetoimiv reguleering võib tekitada elektrigeneraatori võimsuse ja pinge lubamatult suuri kõikumisi. Enamasti kasutatakse reguleerimiseks aktiivset väärtusmeetodit, pöörates tiibu teatava nurga võrra päri- või vastutuult. Tiibade pööratav mehhanism asub tiiviku nabas. Gondlit ja tiivikut pöörab vastavalt tuule suunale servoajam.

Kuna tuuleturbiini tiivik pöörleb suhteliselt aeglaselt (mõnest pöördest mõnekümne pöördeni minutis), nähakse turbiini ja generaatori vahele ette reduktor. Võidakse kasutada ka mitmepooluselisi väikese kiirusega generaatoreid. Kuna turbiini optimaalne pöörlemiskiirus on olenevalt tuule tugevusest, ei saa tuuleelektrijaamades kasutada otse elektrivõrku ühendatud sünkroongeneraatoreid. Kasutusel on lühis- ja faasirootoriga asünkroongeneraatorid või sagedusmuunduri kaudu võrku ühendatavad sünkroongeneraatorid.

Tuuleturbiini võimsus on võrdeline tiiviku pöörlemispindalaga. Seetõttu on võimsate tuuleturbiinide mõõtmed suhteliselt suured (tabel 1.4). Et turbiini tiivad oleksid mehaaniliselt piisavalt tugevad, kasutatakse nende materjalina enamasti klaas- või süsinikkiududega armeeritud valuvaiku.

Tabel 1.4 Tuuleturbiinide mõõtmed

Turbiini nimivõimsus MW	Tiiviku läbimõõt m	Tiiviku naba kõrgus m
0,5...0,6	40	40...65
1,5...2	70	65...115
4,5...6	112...126	120...130

Tuulikute arv tuuleelektrijaamas (tuulepargis) võib ulatuda mitmesajani. Tuuleelektrijaamade koguvõimsus 2006. aasta lõpul ulatus 74 gigavatini. Eesti esimene energiat elektrivõrku andev tuuleelektrijaam võimsusega 150 kW seati üles 1997 Tahkuna poolsaarel Hiiumaal. 2006. aasta lõpus oli Eestis 5 tuuleelektrijaama koguvõimsusega 31 MW. Neist suurim võimsusega 18,4 MW asub Pakri poolsaarel.

1.2.4.2 Kütuseelemendid

Kütuseelemendiks nimetatakse galvaanielementi, mis muundab omavahel reageerivate ainete keemilise energia elektrienergiaks. Primaargalvaanielementist erineb kütuseelement selle poolest, et reagente lisatakse sellesse pidevalt juurde. Lihtsaim kütuseelement põhineb vesiniku ja hapniku elektroolüütilisel ühinemisel pärast nende ioniseerimist sobivast materjalist elektroodidel. Sellist reaktsiooni võib pidada elektroolüüsi pöördnähtuseks. Erinevus on selles, et vee elektroolüüs toimub mis tahes materjalist elektroodide korral, kütuseelement vajab aga katalüsaatori omadustega elektroode. Kütuseelemendi klemmipinge on enamasti 0,8...1 V, mistõttu jadamisi ühendatakse kuni mõnisada elementi. Vedela elektroolüüdi asemel kasutatakse kütuseelementides tahkeid ioonvahetusmembraane, mis lasevad läbi kas vesiniku- või hapnikuioone. Nii membraan kui elektroodid on õhukesed kokku mõni kümnendik millimeetrit, mistõttu elemendi ehitus on leheataoline. Polümeermembraaniga kütuseelemendid talitlevad temperatuuril 70...90 °C. Nende kasutegur on 60% piires ja tööiga kuni 5000 tundi. Kõrgtemperatuurilised oksiidmembraaniga kütuseelemendid talitlevad temperatuuril 800...1000 °C kütuseks vesinik või maagaas. Nende tööiga võib ulatuda 20 000 tunnini ja enamgi. Valmistatakse ka kütuseelemente, mis talitlevad metanoolil. Selliste kütuseelementide kasutegur on väiksem (20...30%) ja hind kõrgem. Seni on kütuseelemendid võimsusühiku kohta 2...3 korda kallimad kui traditsioonilised elektrienergiaallikad ning ruumi vajavad nad rohkem kui näiteks diiselektrijaamad.

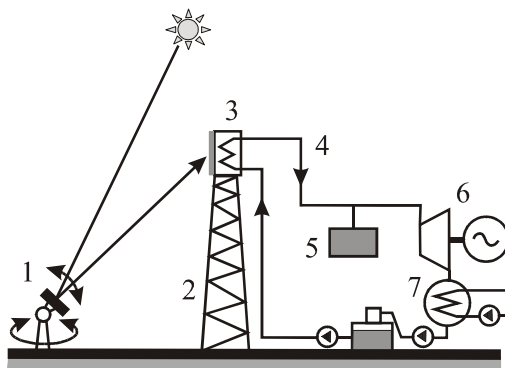
1.2.4.3 Päikeseelektrijaamad

Päikesekiirgust saab suhteliselt lihtsalt muundada nii soojuseks kui ka elektrienergiaks. Päikese kiirgustihedus maapinnal koosneb otsesest ja hajutatud

kiirgusest. Enamik päikesejaamu kasutab üksnes otsest päikesekiirgust ja annab energiat ainult päikesepaistelisel ajal.

Päikesejaamad võib jagada kahte rühma selle järgi, kas kiirgust kontsentreeritakse peegel- või läätssüsteemide abil või mitte. Esimesse rühma kuuluvad torn- ja rennpeegelpäikeseelektrijaamad, teise päikesetiik, tõusval õhuvoolul põhinev elektrijaam, ning enamasti ka fotoelementelektrijaamad.

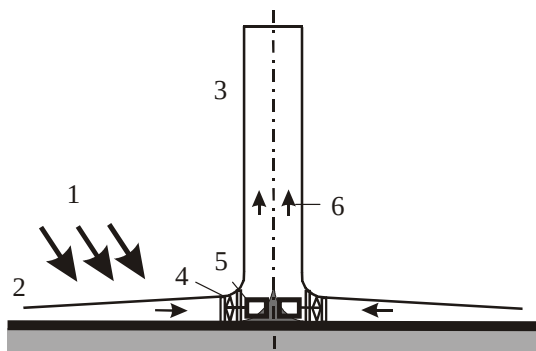
Tornpäikeseelektrijaamades (joonis 1.23) kontsentreeritakse päikesekiirgus automaatjuhtimisega elektrijami abil pööratavate tasapeeglite, heliostaatide 1 abil, mis suunavad kiirguse tornil 2 paiknevale suure neeldumisteguriga vastuvõtuseadisele 3. Ühe heliostaadi pindala võib ulatuda 100 m^2 ja heliostaatide arv kuni 2500. Kiirgusvastuvõtja kuumutab auru 4 temperatuurini $500 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$. Seejärel suunatakse aur turbiini 6. Joonisel on näidatud veel aurusalvesti 5 ning kondensaator 7. Tornpäikesejaamade võimsus ulatub 10 MW. Nende maksumus on umbes 3 korda suurem kui sama võimsusega soojuselektrijaamadel. Mõnevõrra lihtsama ehitusega on paraboolsilindripinnal põhinevate rennpeeglitega päikeseelektrijaamad. Siin kulgeb kõrge keemistäpiga vedel soojuskandja mustapinnalistes terastorudes, mis on paigutatud rennpeeglite fookusesse, ja kuumeneb temperatuurini $300 \dots 400 \text{ }^\circ\text{C}$. Erinevalt heliostaadist saab paraboloidrennidel muuta päikese jälgimiseks üksnes kalde-, mitte aga rõhst suunanurka. Seda tüüpi jaamade maksimaalvõimsuseks on saavutatud 150 MW. Kogu maailmas oli päikesekiirguse kontsentreerimisel põhinevaid elektrijaamu 2005. aasta lõpus koguvõimsusega 400 MW.



Joonis 1.23 Tornpäikesejaama ehituspõhimõte

Päikesekiiri mittekontsentreerivatest elektrijaamadest kujutab päikesetiik madalat kuni 3 m sügavust veega täidetud basseini, mille põhjakihi vee tihedus on mingi soola lahustamise teel muudetud suuremaks kui ülemiste kihtide oma. Päikesekiirgus neeldub vee põhjakihis, mistõttu selle temperatuur tõuseb $90 \text{ }^\circ\text{C}$, pinnakiht jääb aga tasemele $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Kuumenenud soola lahust saab kasutada madala keemistäpiga soojuskandja aurustamiseks. Aur suunatakse sellekohase ehitusega auruturbiini. Sellise ehitusega elektrijaamade võimsus tiigi pindalaga 7000 m^2 on kuni 150 kW.

Tõusval õhuvoolul põhinev elektrijaam (joonis 1.24) koosneb maapinna lähedal paiknevast lamedast, läbipaistva kattega õhukollektorist 2, milles õhk päikesekiirguse 1 toimel kuumeneb, ja kollektori keskel paiknevast korstnast 3, mis



Joonis 1.24 Õhuvoolu-päikesesejaama ehituspõhimõte

tekitab tugeva loomuliku tõmbe 6. Korstna jalamil paiknevad rõhtsa teljega õhuturbiinid 4, mis käitavad elektrigeneraatorid 5. Niisuguse ehitusega elektrijaamu maailmas praegu pole. Küll aga kavatakse Austraalias rajada tõusval õhuvoolul põhinev elektrijaam võimsusega 200 MW, mille kollektori läbimõõt oleks 6 km, korstna läbimõõt 130 m ja kõrgus 1000 m.

Fotoelement- ehk fotoelektrilistes elektrijaamades muundatakse päikesekiirgus otse alalisvooluks ventiilfotoelementide abil. Fotoelementidest moodustatakse lamedad mõne ruutmeetri suurused paneelid (moodulid), mis ühendatakse sobiva pinge saamiseks jadamisi. Moodulijadadest moodustatakse rööpühenduse teel sektsioonid, mis omakorda ühendatakse vastavalt soovitavale võimsusele rööbiti. Sektsioonid või nende rühmad varustatakse vahenditega, mis lülitatakse toidetavasse elektrivõrku. Ühe fotoelektrilise mooduli pinge on 0,5 V, võimsus 50...1000 W. Moodulite arv võib suurtes päikeseelektrijaamades olla mõnisada tuhat. Moodulid võivad olla paigaldatud mingis kindlas asendis, kuid võivad olla ka automaatselt päike poole kallutatavad. Maailma suurim seda tüüpi 10 MW päikeseelektrijaam on ehitatud Saksamaal. Üle kogu maailma on ehitatud palju väikese võimsusega (10...1000 kW) päikeseelektrijaamu üksikhoonete soojus- ja elektrivarustuseks. Üldse oli maailmas 2005. aasta lõpus fotoelektrilisi päikesejaamu koguvõimsusega 5,4 GW, millest elektrivõrku oli lülitatud 3,1 GW.

1.3 Juhitavad ülekanDESüsteemid

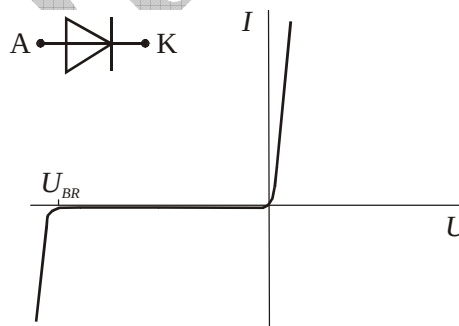
Elektrienergia ülekandmisel ja reguleerimisel rakendatakse tavapäraste tehniliste lahenduste kõrval jõuelektronikal põhinevaid seadmeid. Kuigi selliseid seadmeid tuntakse juba aastakümneid, on nende kasutamine viimasel ajal hinna alanemise ja uute tehnoloogiliste lahenduste tõttu järsult kasvanud. Jõuelektronikal põhinevaid seadmeid kasutab nii põhi- kui jaotusvõrk. Elektrisüsteemides on 1954. aastast tuntud alalisvooluülekanded, lühend *HVDC* (*high voltage direct current systems*). Järjest rohkem rakendatakse jõuelektronikapõhiseid seadmeid aga vahelduvvooluülekannete kompenseerimiseks ja reguleerimiseks, üldnimetus *FACTS* (*flexible alternating current transmission systems*). Jaotusvõrkudes rakendatakse *FACTS*-seadmeid pinge ja reaktiivvõimsuse reguleerimise kõrval ka elektri kvaliteedi tõstmiseks. Laialt juhitakse jõuelektronikaseadmetega elektriajameid.

1.3.1 Jõuelektroonikamuundurid

Jõuelektroonika tegeleb elektri parameetrite muundamise ja juhtimisega elektroniliste vahendite abil. Nõrkvooluelektroonikaga võrreldes on jõumuundurid võimsamad. Nende võimsusi mõõdetakse kilovattides ja megavattides. Oluline on, et jõumuunduritele hädavajalik kõrge kasutegur saavutatakse sel teel, et jõupooljuhid töötavad lülititena, mitte aga lineaarses režiimis nagu nõrkvooluvõimendites.

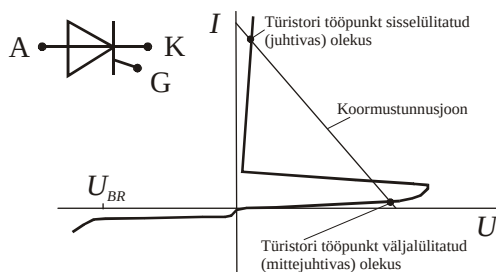
Muundurite tähtsamad komponendid on **jõupooljuhid** – jõudiodid, -türistorid ja -transistorid. Jõupooljuhte lülitatakse vaheldumisi sisse ja välja, **kommuteeritakse**, juhtides voolu kord ühte, kord teise muunduri harusse. Muundurid sisaldavad jõupooljuhtide kõrval hulgaliselt teisi seadmeid – toitetrafosid, reaktoreid (siludrosseleid), kondensaatoreid, elektromagnetiliste häirete filtreid, voolu- ja pingetrafosid jne. Muunduri talitluse tagab **juhtsüsteem**. Juhtsüsteem peab lisaks vajaliku talitluse kujundamisele mõõtma muunduri sisend- ja väljundsuurusi, tagama liigpinge- ja liigkoormuskaitse, sünkroniseerimise toitevõrguga, sideme juhtarvutiga jm. Keerukamate muundurite juhtseadmed põhinevad mikroprotsessoritel.

Diood on pooljuhtelement, mis on ette nähtud voolu juhtimiseks vaid ühes suunas. Dioodi tingmärk ja volt-ampere-karakteristik on joonisel 1.25. Kui diod on päripingestatud, s.t anoodil on katoodi suhtes positiivne pinge, siis juhib diod voolu ja tema pingelang on väike. Vastupingestuse korral läbib diodi ainult väike vastuvool. Kui vastupinge on suurem kui diodi läbilöögipinge U_{BR} , siis kasvab vastuvool järsult. Tavaliselt on diodi tööpinge 60...70% läbilöögipingest. Toodetakse mitut liiki jõudioode, mis erinevad ennekoike voolu ja vastupinge väärtuste poolest kuni kiloamprieni ja kilovoltideni välja. Oluline näitaja on taastumisaeg, mis määrab, millise sageduse juures võib diodi kasutada.



Joonis 1.25 Dioodi volt-ampere-karakteristik ja tingmärk

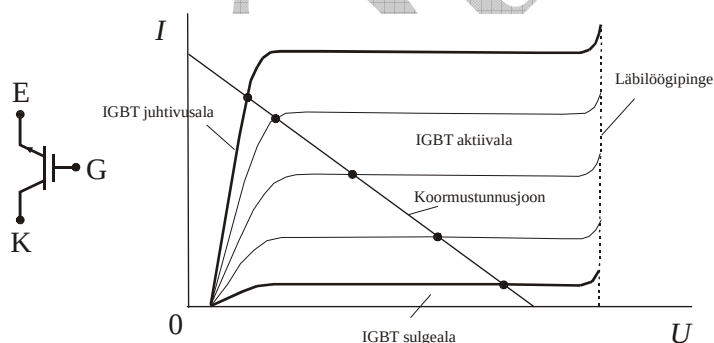
Türistor (*silicon controlled rectifier, SCR*) on kolme elektroodiga jõupooljuhtseadis, millel anoodile ja katoodile lisaks on veel juhtimist võimaldav tüürelektrood (joonis 1.26). Tüürvoolu puudumisel on türistor suletud olekus, s.t ei juhi voolu kummaski suunas. Lühike tüürvooluimpulss avab türistori. Pärast seda jääb türistor juhtivasse olekusse, kuni teda läbib nullilähedane vool. Pinge, mille juures türistor sisse lülitub, sõltub tüürvooluimpulsi hetkest. Harilik SCR-tüüpi türistor, mida nimetatakse ka üheoperatsiooniliseks ehk alaldüstüristoriks, ei



Joonis 1.26 Türistori volt-ampere-karakteristik ja tingmärk

võimalda voolu suvalisel hetkel katkestada. Välja on töötatud aga *GTO*-tüüpi (*gate turn off*) kaheoperatsiooniline türistor, mis lülitub samuti sisse positiivse tüürvooluimpulsi mõjul, kuid selle sulgeb negatiivse pingega võimas tüürvooluimpulss. Türistore valmistatakse kõigist pooljuhtlülituselementidest suurimale voolule ja suurimale lubatavale vastupingele.

Transistoridel on kolm viiku: kollektor, emitter ja pais (baas). Jõuseadmetesse sobivad väikeste juhtivus- ja kommutatsioonikadudega isoleeritud paisuga bipolaarsed transistorid *IGBT* (*insulated gate bipolar transistor*). *IGBT*-transistori tingmärk ja volt-ampere-karakteristikud on joonisel 1.27. Transistori kollektorivool on võrdeline baasvooluga. Jõuahelates on transistor kas täielikult sisse või välja lülitatud. Vahepealne olek tähendaks suuri kadusid, mis jõuahelates pole mõeldavad. Oluline on, et transistor võimaldab mis tahes hetkel nii sisse- kui väljalülitamist.



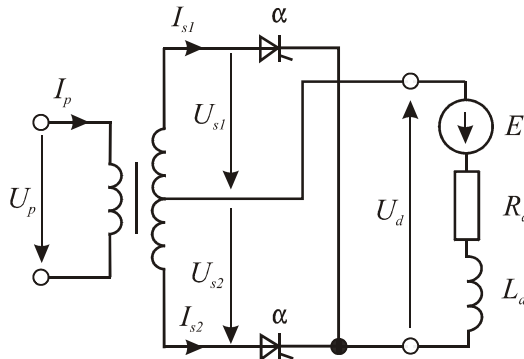
Joonis 1.27 IGBT-transistori volt-ampere-karakteristikud ja tingmärk

Kõik pooljuhtjõuseadised töötavad niisiis lülititena, võimaldades juhtida kas ainult sisselülitamist (*SCR*-türistor) või nii sisse- kui väljalülitamist (*GTO*-türistor ja transistor). Edaspidises tekstis peetakse silmas, et transistoride asemel võib kasutada ka *GTO*-türistore, türistoride all aga mõeldakse vaid *SCR*-türistore.

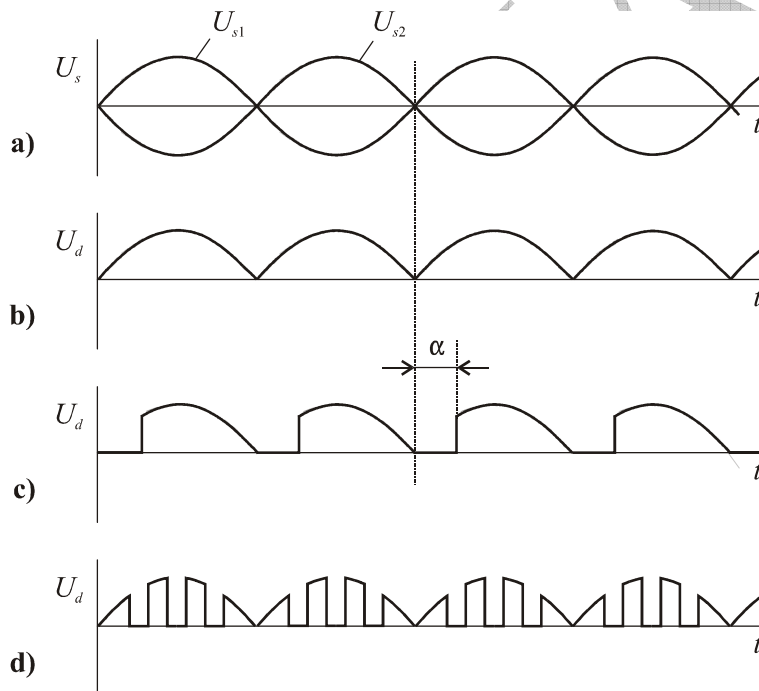
Tuntuim jõuelektroonikal põhinev seade on **alaldi**. Diodidest koosnev alaldi on mittetüüritav, selle väljundpinget saab muuta vaid sisendpinge reguleerimise teel. Joonisel 1.28 on ühefaasilise täisperioodalaldi skeem ning joonistel 1.29a ja 1.29b on alaldi õlgade pinged ja väljundpinge. Nägu näha, on väljundpinge pulseeriv, s.t sisaldab harmoonikuid. Kui see alalisvoolutarbijale ei sobi, tuleb

väljundpoolele lisada reaktoritest ja kondensaatoritest koosnev filter. Kolmefaasilise alaldi korral on väljundpinge ühtlasem.

Kui diodide asemel rakendada türistore, saab nende sisselülitumisenurka sisendpinge suhtes muuta, tüürida. Tulemuseks on joonisel 1.29c kujutatud väljundpinge, mille keskvärtus sõltub tüüri-nurgast α ja on seega reguleeritav. Väljundpinge ebahühtlus



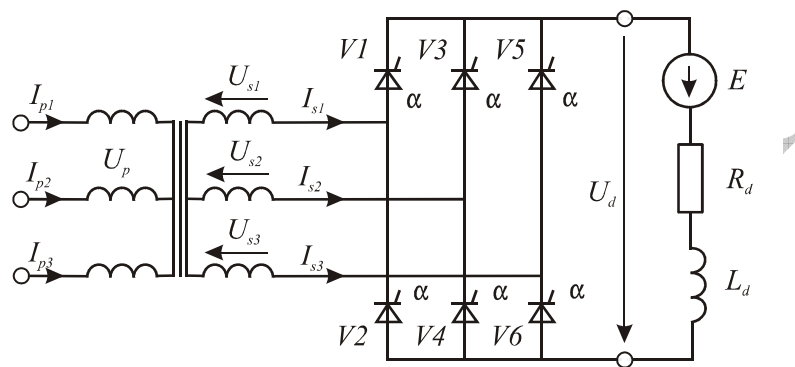
Joonis 1.28 Ühefaasiline täisperioodalaldi



Joonis 1.29 Täisperioodalaldi sisend- ja väljundpingete diagrammid

(harmoonikute sisaldus) on dioodalalditega võrreldes suurem. Omapäraks on see, et ka sisendvool ei ole siinuseline ning selle põhikomponent on pinge suhtes nihutatud (jääb maha), mis toitevõrgu seisukohalt tähendab, et tüüritavad alaldid on harmoonikute allikaks ja et need tarvivad reaktiivvõimsust. Seda on eriti oluline tähele panna elektrisüsteemis, kus kasutatakse türistoridel põhinevaid alalisvooluülekandeid.

Täielikult tüüritavaid pooljuhtelementide, nagu *GTO*-türistor ja jõutransistor, võib igal hetkel sisse ja välja lülitada ka toitepingega võrreldes tunduvalt suurema sagedusega. Kasutusel ongi **pulsilaiusmodulatsioon** (*pulse width modulation, PWM*), kus pooljuhti lülitatakse ümber kümneid kordi vahelduvvoolu ühe poolperioodi jooksul. Tulemuseks on pulseeriv väljundpinge (joonis 1.29d), mille keskväärus sõltub pooljuhi sisselülituse suhtelisest kestusest – pulsi laiusest. Väljundvool vajab ka siin silumist. Sisendvool ei ole samuti päris siinuseline, kuid ei ole pinge suhtes nihutatud. Selline alaldi ei tarbi niisiis reaktiivvõimsust.

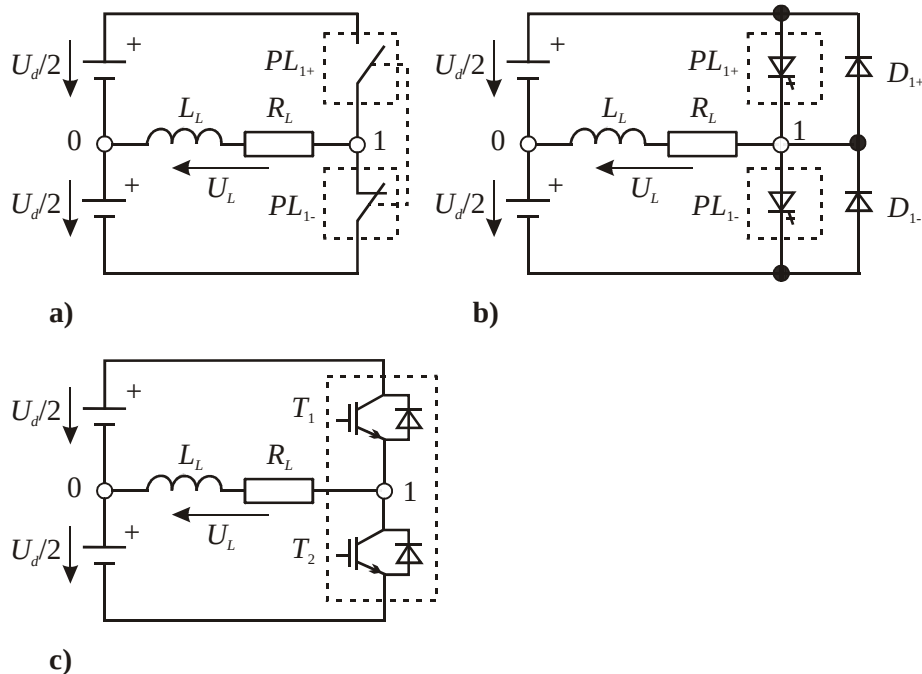


Joonis 1.30 Kolmefaasiline sildaladi

Levinud on kolmefaasiline sildaladi (joonis 1.30). Väljundpinge pulsatsioon on sellel väiksem, sest vahelduvvoolu ühe perioodi kohta on 6 pulssi täisperiood – alaldi 2 pulsi asemel. Ventiilide tööjärjekord on V1–V6–V3–V2–V5–V4. Korraga on avatud vähemalt kaks ventiili. Koormusahela suure induktiivsuse korral jätkub ventiili päri vool ka negatiivse anoodpinge puhul ning ventiili sulgemine viibib. Seetõttu on võimalik, et korraga on alaldis avatud kolm või isegi neli ventiili.

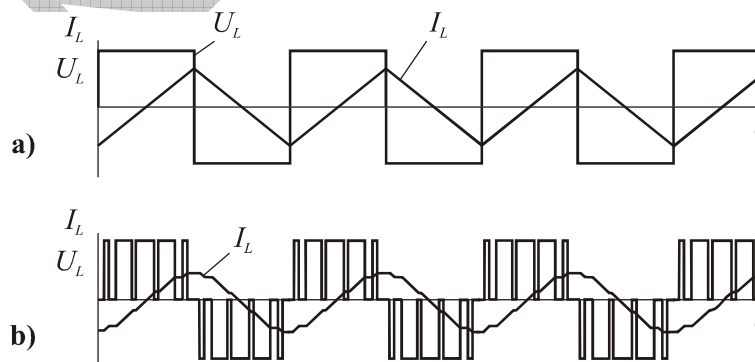
Alalisvooluülekande väljundpoolel, aga ka puhvertoiteallika korral, tuleb alalisvool muuta vahelduvvooluks. Ühefaasiline **vaheldi (inverter)** saadakse kahe lülitiga skeemi abil (joonis 1.31). Lülitid on vaheldis muidugi türistoridel või transistoridel põhinevad pooljuhtlülitid, mida vahelduvalt ümber lülitatakse (kommuteeritakse). Ümber lülitamise juures tuleb arvestada, et induktiivse iseloomuga koormuse korral jätkub vool pärast kommuteerimist samas suunas, kuni indutseeritud pinge muutub väiksemaks toitepingest. Et koormusvool saaks peale türistori või transistori jätkuda, ühendatakse pooljuhiga rööbiti vastulülituses diodid.

Vaadeldud plokkihtimisega vaheldite väljundpinge on põhimõtteliselt nelinurkne (joonis 1.32a, kuigi sildlülituse korral võib saavutada ka siinusele lähemat kuju). Tunduvalt parema väljundpinge võib saada pulssjuhtimise abil, kus pooljuhte kommuteeritakse korduvalt ühe põhiharmoonilise perioodi



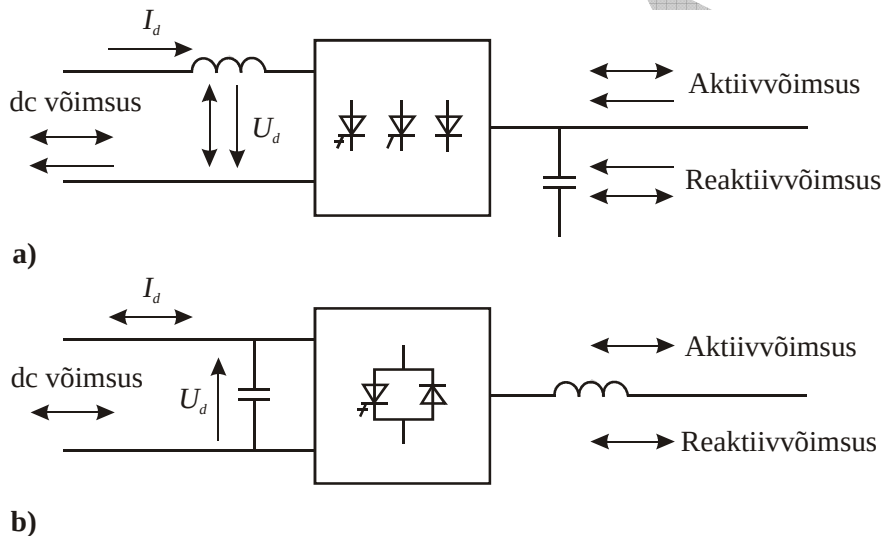
Joonis 1.31 Vaheldi kommutaatorid: lülititega (a), türistoridega (b), transistoridega (c)

jooksul (joonis 1.32b). Kolmefaasiline vaheldi koosneb kolmest lülitite komplektist, mida juhitakse nii, et faaside pinged oleksid 120° võrra nihutatud. Seda põhimõtet nimetatakse vektorjuhtimiseks (vektormodulatsiooniks). Kuna SCR-türistor lülitub välja vaid nullise voolu juures, tuleb selle saavutamiseks lisada spetsiaalne sulgeahel, kuhu kuuluva kondensaatori vool suunatakse türistori voolule vastu, mille tulemusena see kahaneb nullini. Kolmefaasiline sildlülitus on kasutusel ka vaheldi põhilülitusena, kusjuures kommutatsioonielementideks sobivad nii türistorid kui transistorid.

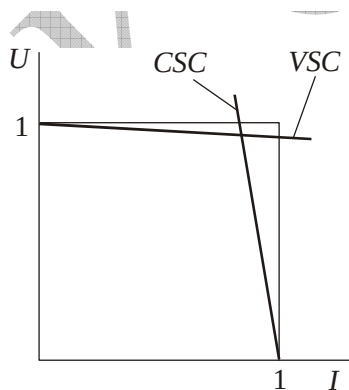


Joonis 1.32 Vaheldi pinged ja vool plokki- (a) ja pulssjuhtimisel (b)

Alaldeid ja vaheldeid võib kokkuvõtlikult nimetada **muunduriteks**. Diodidel põhinevad muundurid töötavad vaid alalditena (AC-DC-muunduritena). Türistoridel ja transistoridel põhinev muundur võib töötada mõlemas suunas nii AC-DC- kui DC-AC-muundurina. Türistoridel võib teatavasti juhtida avanemise momenti, tema sulgemine sõltub aga voolu nulli minekust, seega võrgu talitlusest. Öeldakse, et türistoridel (muidugi ka diodidel) põhinev muundur on võrguga sünkroniseeritud ning peab seetõttu olema alati ühendatud vahelduvvooluvõrku. Seevastu transistorid on täielikult juhitavad ning vastav muundur autonoomselt kommuteeritav. Selliseid muundureid võib rakendada näiteks puhvertoiteallikana. Eriti oluline energiasüsteemi seisukohalt on, et taolisel alalisvooluülekanal on võrgupingest sõltumatu pimekäivitusvõime.



Joonis 1.33 Voolu- (a) ja pingemuundur (b)



Joonis 1.34 Voolumuunduri (CSC) ja pingemuunduri (VSC) karakteristikud

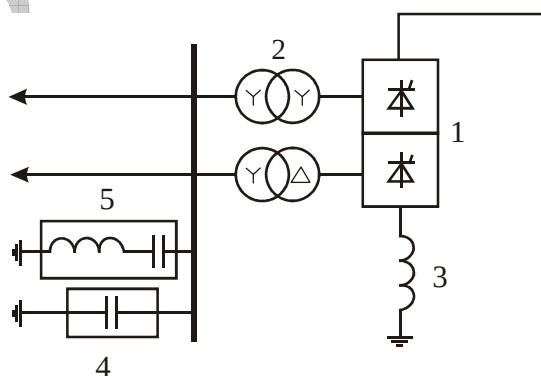
Kasutusel on kahte tüüpi muundureid. **Voolumuundur** (joonis 1.33a), milles alalisvoolu polaarsus on alati sama ning võimuse suuna muutmine toimub alalispinge polaarsuse muutmise teel (*current-source converter, CSC*). **Pingemuundur** (joonis 1.33b), mille alalispinge polaarsus ei muutu ning võimuse suuna muutmine toimub alalisvoolu polaarsuse muutmise teel (*voltage-source converter, VSC*). Muundurite selline jagunemine tuleneb pinget ja voolu silumiseks mõeldud reaktorite ja kondensaatorite paigutusest, millest sõltuvalt moodustuvad voolu ja

pinge karakteristikud (joonis 1.34). Voolumuunduri alalisvoolu poolele kuulub reaktor, mille ülesandeks on pulseeriva voolu silumine ja mis soodustab voolu väärtuse säilimist. Vahelduvvoolu poolel on taas kondensaatorpatareid, mis silub järskudest voolumuutustest tingitud pingeid ja kindlustab vajaliku reaktiivvõimsuse genereerimise. Voolumuunduri pooljuhtlüliteid läbib ainult ühesuunaline vool, mistõttu vastupingedioode pole tarvis. Pingemuunduri korral on alalisvoolu poolel taas kondensaator ja vahelduvvoolu poolel reaktor. Kondensaatori ülesanne on alalisvoolu silumise kõrval säilitada pinge väärtus. Reaktor vahelduvvoolu poolel on muuhulgas vajalik lühisvoolude piiramiseks. Tavapärastel türistoridel põhinev muundur võib olla ainult CSC-tüüpi.

1.3.2 Alalisvooluülekanded

Traditsioonilised alalisvooluülekanded põhinevad CSC-tüüpi muunduritel, mis kasutavad tavatüristore. Selline muundur tarbib vahelduvvooluvõrgust märgatavalt reaktiivvõimsust. Nii on 1000 MW ülekandmiseks vaja reaktiivvõimsust 500 MVar. Aktiivvõimsuse suurust ja suunda võimaldab aga CSC-muundur muuta piisavalt kiiresti ja suures ulatuses tagamaks elektrisüsteemi stabiilsust avariolukordades. CSC-muunduri lühisvool on suhteliselt väike, sest lühisvoolu tõusu kiirus on piiratud reaktoritega alalisvooluahelas. Sildlülituses 6-pulsiline muundur ei genereeri kolmandaid harmoonikuid. AC-kondensaatorid põhjustavad pingeharmoonikuid ning tulenevalt sellest on võimalikud ka resonantsnähtused. Harmoonikud ning DC-reaktor võivad põhjustada ventiilide ja trafode liigpingeid.

Traditsioonilise muundusalajaama (joonis 1.35) põhiplokiks on trafost 2 ja türistorventiilidest 1 koosnev kolmefaasiline sildmuundur, mis alalditalitluses muundab kolmefaasilise vahelduvpinge 6-pulsiliseks alalispingeks. Alaldit saab reguleerida türistoride sisse-lülitushetke (tüürnurga) muutmise-ga. Tüürnurga suurendamisel väheneb alaldatud pinge keskvärtus U_d maksimumist nullini. Tüürnurga edasisel suurendamisel muutub alalispinge negatiivseks. Sellega muutub alalispinge polaarsus ja võimsuse suund. Muundur läheb üle vaheldi-ehk invertertalitlusse. Põhimõtteliselt on alalisvooluülekanded kasutatavad elektrienergia edastamiseks mõlemas suunas. Muunduri vajaliku piirvõimsuse



Joonis 1.35 Traditsioonilise muundusalajaama skeem

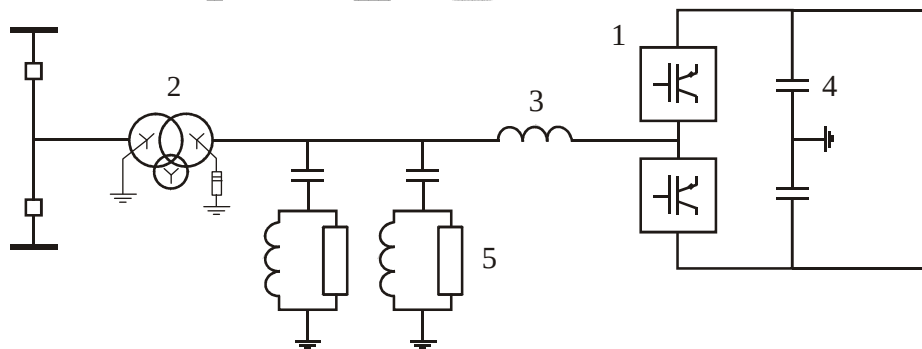
(pinge ja voolu) saavutamiseks lülitatakse türistore jadamisi ja rööbiti. Muunduri juurde kuuluvad veel reaktor 3, kondensaatorpatarei 4 ning filtrid 5.

Alalisvooluliinis määrab voolu liini alguse ja lõpu pingete vahe ning liini aktiivtakistus

$$I_d = \frac{U_{d1} - U_{d2}}{r}$$

Alalispinged on aga muundusalajaamades põhimõtteliselt ülikiiresti reguleeritavad. Seda on ka vool ja edastatav võimsus. Enamasti küll hoitakse etteantud pinget vaheldusalajaamas ning reguleeritakse voolu pinge muutmise alaldusalajaamas. Reguleerimise kiiretoimelisuse tõttu pole karta lühisvoolu läbi alalisvooluühenduse.

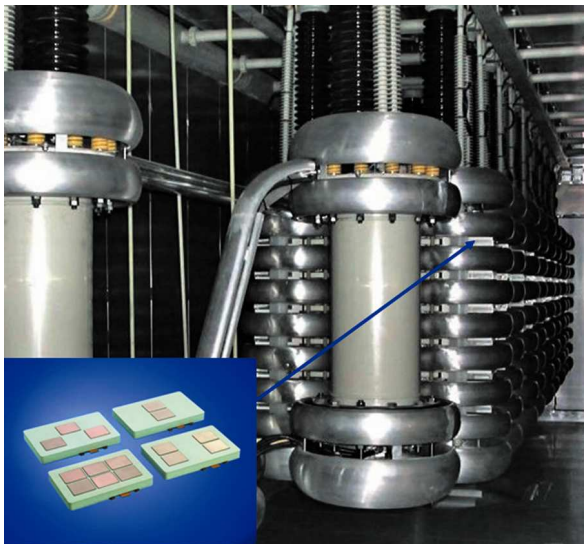
Kuigi majanduslikult on traditsioonilised alalisvooluülekanded eelistatavamad ja nende energiakaod väiksemad, on viimasel aastakümnel hakatud enam kasutama tehniliselt täiuslikumaid VSC-muunduritel põhinevaid alalisvooluülekandeid (joonis 1.36). Skeemi muud elemendid on sama otstarbega kui eespool vaadeldud muunduril. VSC-muundur võimaldab aktiivvõimsust juhtida mõlemas suunas. Aktiivvõimsusest sõltumatult saab juhtida reaktiivvõimsuse tarbimist või genereerimist. Muidugi juhitakse aktiivvõimsust vaid ülekande ühest otsast. Reaktiivvõimsuste juhtimine on aga kummaski otsas sõltumatu. Sellised võimalused on vajalikud elektrisüsteemi normaaltalitluse juhtimiseks, eriti aga avariitalitluses süsteemi stabiilsuse säilitamiseks. Ka võimaldavad kaheperioodilised elemendid pulsilausmodulatsiooni, mis tagab madalama harmoonikute taseme nii alalisvoolu kui vahelduvvoolu poolel.



Joonis 1.36 Nüüdisaegse muundusalajaama skeem

Joonisel 1.36 esitatud skeemiga VSC-tüüpi *HVDC Light*® (*HVDC Light* on firma ABB tootenimetus) muundusalajaamad on kasutusel ka Eesti ja Soome vahelise alalisvooluülekande Estlink puhul. Ülekanne, mille nimivõimsus on 350 MW, tugineb kahele alalisvoolukaablile pingega ± 150 kV, millele vastav pinge vahelduvvoolu poolel on 195 kV. Kuuepulsiline sildmuundur põhineb

IGBT-transistoridel, mille nimivool on 40 A ja nimipinge 2500 V. Transistore kommuteeritakse pulsilaiusmodulatsiooni käigus sagedusega 2000 Hz. Muundur on paigutatud kuude konteinerisse, igaühes üks muunduri ventiil (joonis 1.37). Ventiil koosneb 17 rippuvast tornist, igaühes jadamisi 18 IGBT-transistoride plaati (joonis 1.37 all vasakul), milles 24 transistori ja 12 diodi paralleellülituses. Ühe transistoriplaadi nimivooluks on seega $40 \times 24 \approx 1000$ A. Transistoriplaatide vahel on lülitusmoodulid (transistor lülitub sisse, kui paisu pinge on +15 V ja sulgub pingel -5 V) ja vesijahutus-radiaatorid.



Joonis 1.37 Jõupooljuhtmuunduri ventiil

Alalisvoolu ülekandesüsteem on ühe- või kahepooluseline. Ühepooluselise ehk unipolaarse ülekande (joonis 1.35) puhul on voolu tagasiteeks meri või maa. Seda skeemi saab täiendada teise samasuguse ja ühise maandatud keskpunktiga skeemiga, mis moodustab alalisvooluülekande teise pooluse. Nii saadakse bipolaarne alalisvooluülekande (joonis 1.36). Bipolaarse ühenduse ühe pooluse avarii olukorras jääb teine poolus tööle unipolaarse ülekandena.

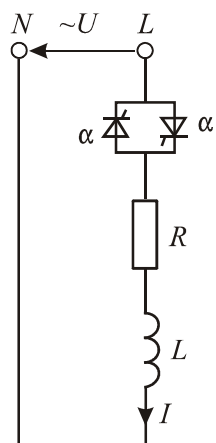
1.3.3 Juhitavad kompenseerimisseadmed

Vahelduvvooluvõrgus toimivad jõuelektroonikamuundurid regulaatoritena ja lülititena. Joonisel 1.38 on kodumasinates kasutatava pingeregulaatori skeem. Selleks et juhtida vahelduvvoolu, kasutatakse vastuparalleelselt ühendatud pooljuhtventiile, türistore või transistore. Pinge väärtust koormusel muudetakse türistoride avamishetke reguleerimisega. Transistoride puhul saab kasutada ka pulsilaiusmodulatsiooni põhimõtet.

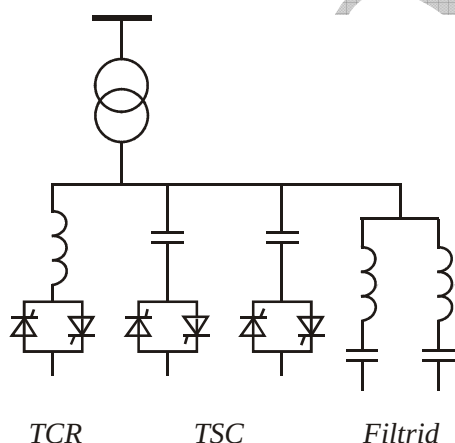
Elektrivõrkudes kasutatakse jõuelektroonikamuundureid kompenseerimisseadmete juhtimiseks. Türistorjuhitavate⁴ ehk staatiliste kompenseerimisseadmete üldnimetuseks on kujunenud *FACTS* (*flexible alternating current transmission systems*). Siia kuuluvad nii põiklülituses SVC- (*static var compensator*) kui

⁴ Mõistet "türistorjuhitav kompenseerimisseade" kasutatakse mõnikord nii tavatüristoridel kui ka suletavatel pooljuhtventiilidel, sealhulgas transistoridel põhinevate seadmete puhul.

pikilülituses TCSC- (*thyristor-controlled series compensator*) kompenseerimis-seadmetele, lisaks veel seadmed UPFC (*unified power flow controller*), mis võimaldavad nii piki- kui põikkompenseerimist.



Joonis 1.38 Pinge-regulaatori skeem



Joonis 1.39 Reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadme SVC skeem

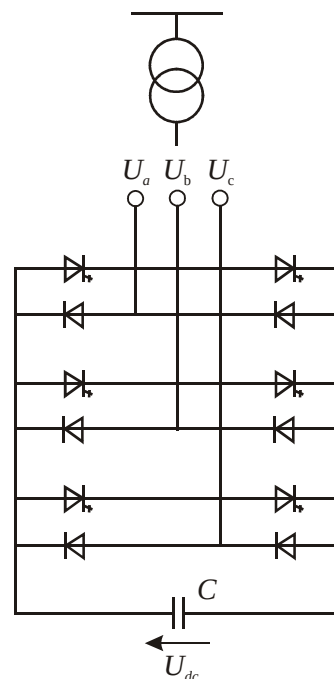
Enam levinud FACTS-seadmeks on SVC, mis võeti kasutusele 1970. aastatel, ning selle edasiarendus STATCOM. Need põiklülituses seadmed toimivad püsitalitluses reaktiivvõimsuse kompensaatoritena. Suure reguleerimiskiiruse tõttu rakendatakse neid ka elektrisüsteemi staatilise ja dünaamilise stabiilsuse tõstmiseks ning jaotusvõrkudes elektri kvaliteedi parandamiseks. Tüüpiliselt koosneb SVC türistoridega lülitatavast kondensaatorist (*thyristor-switched capacitors, TSC*) ja türistoridega juhitavast reaktorist (*thyristor-controlled reactor, TCR*) või ka mittejuhitavast kondensaator-patareist (*fixed capacitor, FC*) ja juhitavast reaktorist. Lülitusse kuuluvad veel harmoonikute filtrid ja trafo (joonis 1.39). Põhiliselt on probleemiks 5. ja 7. järku harmoonikud. SVC volt-amper-karakteristik on joonisel 1.41a. On näha, et SVC on võimeline reguleerima pinget, lähtudes mahtuvusliku ja induktiivse voolu maksimaalsetest piiridest. Kuna mahtuvusliku voolu maksimum väheneb koos võrgu pinge vähenemisega, siis alaneb samavõrd ka SVC pingetoetuse võime.

SVC edasiarenduseks on kompenseerimisseade STATCOM (*static synchronous compensator*), mis omadustelt on võrreldav traditsioonilise sünkroonkompensaatoriga. Kuna tegemist on elektroonse seadmega, siis on sellel paremad dünaamilised omadused (puudub inerts) ning investeerimis-, käidu-

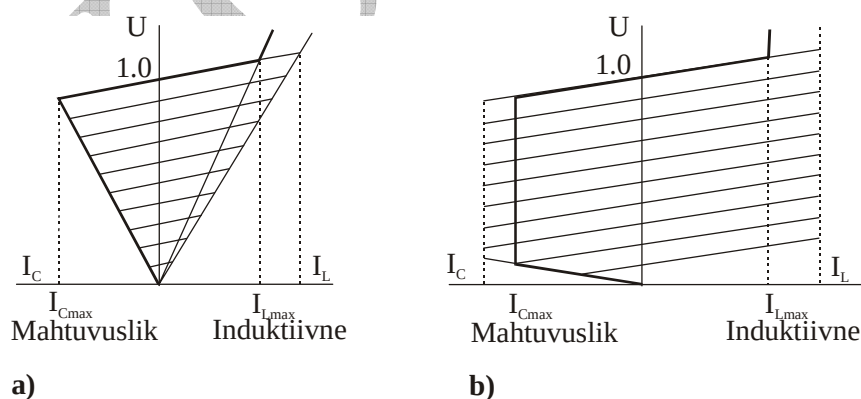
ja hooldekulud on madalamad. STATCOM põhineb pingemuunduril VSC (joonis 1.40). STATCOMi tööpõhimõte on lihtne – kui muunduri väljundpinge on suurem võrgupingest, siis seade genereerib reaktiivvõimsust, vastasel juhul aga tarbib seda. Tulemuseks on, et reaktiivvõimsuse juhtimine ei sõltu võrgupingest, kompensaator on võimeline andma mahtuvuslikku väljundvoolu ka madala võrgupinge puhul (joonis 1.41b). Esimene staatiline sünkroonkompensaator võeti maailmas kasutusele 1999. aastal. Tänapäeval kasutatakse

STATCOMi järjest enam nii jaotusvõrkudes pinge kvaliteedi parandamiseks kui põhi-võrkudes süsteemi talitluse reguleerimiseks ja stabiilsuse tõstmiseks.

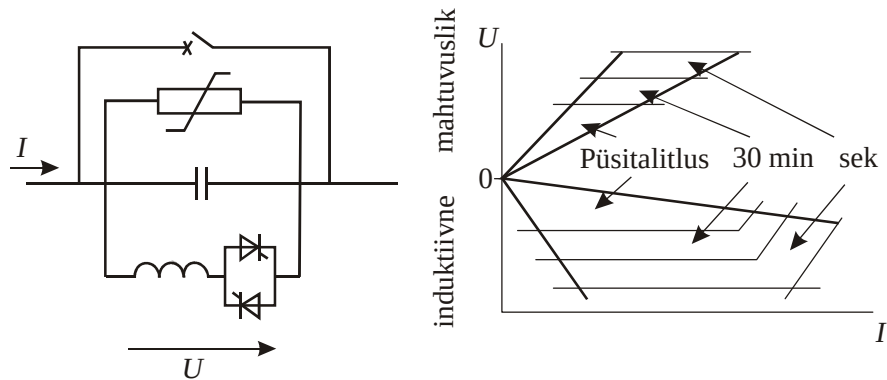
Türistorjuhitava pikikompensaatori TCSC ülesanne on ülekande reaktiivtakistuse kompenseerimise kõrval võimalike võnkumiste summutamine, sealhulgas subsünkroonse resonantsi summutamine, lühisvoolude piiramine ja võimsusvoogude reguleerimine. Kuna pinge pikikondensaatoril on võrdeline liini vooluga, tuleb rakendada meetmeid kondensaatorpatarei kaitsmiseks. Liigpingekaitse koosneb metalloksiidtüüpi mitte-lineaarsetest varistoridest, sädevahemikust ja kiirest möödaviiklülitist. Seade võimaldab nii mahtvuslikku kui ka induktiivset kompenseerimist, mille tõttu on tavapärase pikikompensaatoriga võrreldes võimalik juhtida võrgu parameetreid tunduvalt suuremas vahemikus. TCSC põhimõtteskeem ja talitluskarakteristik on joonisel 1.42. Talitluskarakteristiku piirid on määratud türistoride sisselülitusnurgaga ja tema termiliste omadustega. Esimene TCSC seati üles 1996. aastal.



Joonis 1.40 Staatilise sünkroonkompensaatori STATCOM skeem



Joonis 1.41 SVC (a) ja STATCOMi (b) volt-amper-karakteristikud



Joonis 1.42 TCSC skeem ja talitluskarakteristik

Tabel 1.5 Jõuelektronikapõhised reguleerimisseadmed

Seadmed	Türistormuundur	Pingemuundur VSC
Põikseadmed	Staatiline reaktiivvõimsuse kompensator SVC	Staatiline sünkroonkompensator STATCOM
Pikiseadmed	Türistorjuhitav pikikompensator TCSC	Staatiline sünkroonne pikikompensator SSSC
Põik- ja piki-seadmed	Dünaamiline võimsusvoogude kontrollid DFC	Ühitatud võimsusvoogude kontrollid UPFC

Ülevaade elektrivõrgu parameetrite kompenseerimiseks mõeldud FACTS-seadmetest on tabelis 1.5. Eristatakse türistoridel ja transistoridel põhinevaid muundureid. Viimaseid vaadeldakse enamasti kui pingemuundureid VSC. Nii nagu mehaaniliselt lülitatavad reaktorid ja kondensaatoridki on põiklülituses seadmed põhiliselt mõeldud reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks ja seega ka pinge reguleerimiseks, ning pikilülituses seadmed ülekannete reaktiivtakistuse vähendamiseks ja võimsusvoogude suunamiseks. Pikikompenseerimine on elektrivõrkudes levinud pikkade ülekandeliinide korral. Sujuva ning inertsivaba reguleerimisvõimaluste tõttu tõstavad FACTS-seadmed elektrisüsteemi stabiilsust ning kompenseerivad jaotusvõrkudes pingelohke, flikkerit ning muid elektri kvaliteedi häiringuid.

Tabelis 1.5 on SVC-, STATCOM- ja TCSC- seadmetele lisaks toodud pingemuunduril põhinev staatiline sünkroonpikikompensator SSSC (*static synchronous series compensator*), mis oma kõrgema hinna tõttu TCSC-seadmega võrreldes pole põhivõrgus kasutamist leidnud. Küll aga on pingemuunduril põhinevad pikikompensatorid dünaamilise pingetaastaja DVR



Joonis 1.43 Firma Nokia Capacitors SVC-kompenseerimisseade

(*dynamic voltage restorer*) nime all kasutusel jaotusvõrkudes elektri kvaliteedi parandamiseks. Tänapäeval tegeletakse FACTS-seadmete arendamisega, millel on nii piki- kui põikikonfiguratsioon. Neid seadmeid, mille vasteks on traditsioonilised trafodel põhinevad faasinihutid, kasutatakse võimsusvoogude juhtimiseks. FACTS-lahenduseks on ühitatud võimsusvoogude kontrolleri *UPFC* (*unified power flow controller*). Seade koosneb kahest vahetrafost ja pingemuundurist ning ühest ühisest kondensaatorpatareist, mida kasutatakse nii piki- kui põiklülituses. Kõrge hinna tõttu *UPFC*-d eriti ei kasutata, kuid sellest on tuletatavad rida lihtsamaid ja odavamaid seadmeid. Vastavat türistoridel põhinevat seadet nimetatakse dünaamiliseks võimsusvoogude kontrolleriiks (*dynamic flow controller, DFC*). Joonisel 1.43 on firma Nokia Capacitors SVC-tüüpi kompenseerimisseade.

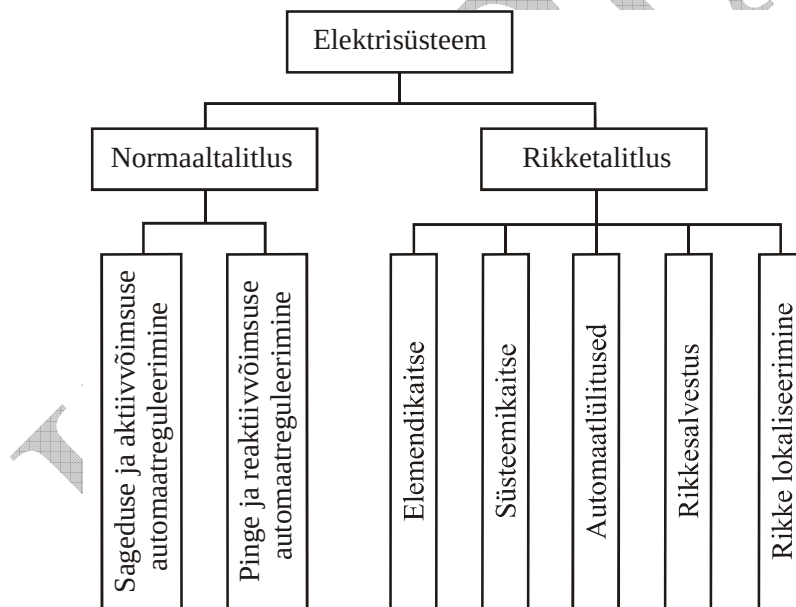
1.4 Elektrisüsteemi talitus

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. Püsitalitlusse 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.

1.4.1 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 (joonis 1.44). Enam kasutatavate automaatide hulka kuuluvad releekaitseadmed, reservilülitusautomaadid, taaslülitusautomaadid ja koormusvähendusautomaadid. Elektrienergia kvaliteedi tagavad sageduse ja pinge automaatregulaatorid.

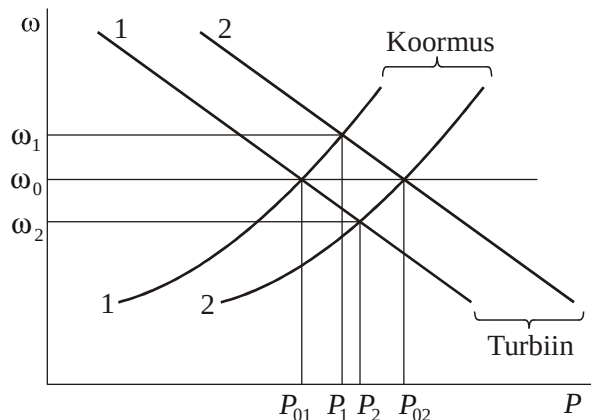


Joonis 1.44 Elektrisüsteemi automaatjuhtimine

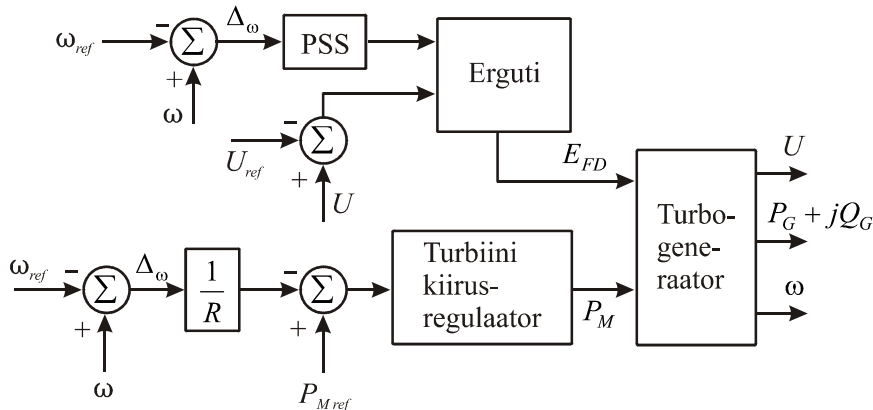
Releekaitse peab vähendama kahjusid avarii kiire likvideerimise ja selle laiene-
mise vältimise teel. Releekaitse ei hoia avariid ära. Ta avastab elektriseadmete
rikked, enamasti isolatsioonirikked, nendest põhjustatud suure lühisvoolu või
küllaltki väikese maaühendusvoolu järgi ja lülitab vigastatud elektriseadmed
kiiresti ning selektiivselt välja. Kiired ülikõrgepingeliini kaitseseadmed raken-
duvad 5 ms jooksul. Kui releekaitse avastab talitlushäiringu (nt ülekoormuse),
mis on mõne aja jooksul lubatav, antakse ainult sellekohane signaal. Relee-

kaitseseadmed moodustavad energiasüsteemi automaatikaseadmetest umbes 80%. Mikroprotsessorite laia leviku tõttu võetakse järjest rohkem kasutusele kohtterminale, mis täidavad releekaitse ülesannete kõrval ka automaatjuhtimise ning andmehõive ja -edastuse funktsioone.

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 (kald-karakteristiku järgi). Oma roll on ka koormuse sõltuvusel sagedusest. Kokku võttes kujuneb sagedus süsteemis joonisel 1.45 toodud karakteristikute lõikepunkti järgi (ω tähistab nurksagedust ja P võimsust).



Joonis 1.45 Turbiini ja koormuse sageduskarakteristikud



Joonis 1.46 Turbiini ja generaatori reguleerimise plokkskeem

Joonisel 1.46 on turbiini ja generaatori reguleerimise plokkskeem. Siin annab tegeliku nurksageduse ω ja selle sätevväärtuse ω_{ref} vahe $\Delta\omega$ korrutatuna teguriga $1/R$ (statismi pöördväärtus) suuruse, mida võrreldakse etteantud võimsusega $P_{M ref}$. Tulemuseks on turbiini võimsus P_M . Niisamuti on generaatori pinge ja selle sätevväärtuse vahe $\Delta U = U - U_{ref}$ sisendväärtuseks generaatori ergutule. Teiseks sisendiks on sageduse kõrvalekalle $\Delta\omega$, mida kasutatakse ära generaatori stabiliseerimiseks (*power system stabilizer, PSS*). Püsisalatluses, kus $\omega = \omega_{ref}$ on ka $U = U_{ref}$ ja $P_M = P_G = P_{M ref}$. Siirdetalitluses sumbuvad nende suuruste kõrvalekalded toimeaja jooksul, mis ergutuse regulaatoritele on 10...50 ms ja turbiini kiirusregulaatoritele 5...10 s. Kirjeldatud **sageduse primaarreguleerimine**, milles osalevad süsteemi kõik turboagregaadid, ei kindlusta sageduse püsivat väärtust. Lisaks on vajalik **sageduse sekundaarreguleerimine**, mida teevad selleks ette nähtud elektrijaamad sagedusregulaatorite abil.

Sageduse reguleerimine on tihedalt seotud vahetusvõimsuste reguleerimisega ühendsüsteemis. Mitmel põhjusel (liinide läbilaskevõime, riikidevahelised kokkulepped jm) on alamsüsteemidevaheline vahetusvõimsus ette määratud. Kui sageduse reguleerimine põhjustab plaanitud vahetusvõimsuste hälbeid, tuleb vahetusvõimsusi korrigeerida genereeritava võimsuse ümberjaotamisega nii, et sagedus ei muutuks. Näiteks kui ühes alamsüsteemis genereeritav võimsus avariiliselt väheneb, tekib seal võimsuse defitsiit, mille naabersüsteemid automaatselt korvavad. Selle alamsüsteemi ülesandeks on tõsta enda genereeritav võimsus endisele tasemele. Veelgi enam, mingi ajavahemiku vältel peab genereeritav võimsus selles alamsüsteemis olema isegi kõrgem, korvamaks vahepeal saadud lisaenergiat. Seega peab vahetusvõimsuse reguleerimisel olema nii proportsionaalne kui integraalne toime. Sageduse sekundaarreguleerimise ja vahetusvõimsuse reguleerimise automaate käsitletakse kui ühtset **genereeriva võimsuse automaatjuhtimise** (*automatic generation control, AGC*) kompleksi. Selle kompleksi ülesanne on minimeerida (nullida) **piirkondlik reguleerimisviga** (*area control error, ACE*)

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

kus β – sagedustegur

Δf – sageduse hälve

ΔP_T – vahetusvõimsuste summaarne hälve.

Elektrisüsteemi sihipärase töö kindlustab operatiivjuhtimine. Operatiivjuhtimise tuum on dispetšisüsteem (*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, mis võimaldavad kiiresti saada infot rikke lokaliseerimiseks ja teha vajalikud ümberlülitused tarbijate toite taastamiseks.

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.

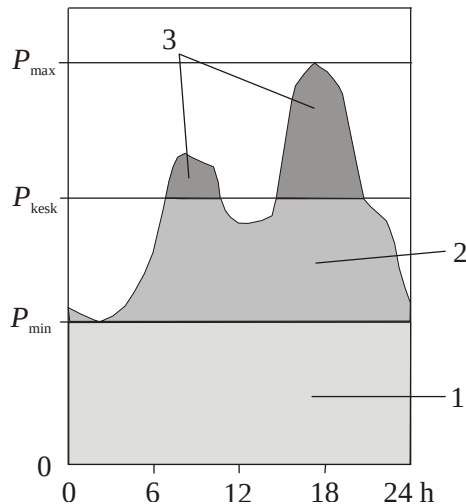
Elektrivõrku juhitakse juhtimiskeskustest (dispetšikeskustest), kus paiknev riist- ja tarkvara võimaldab elektrivõrgu juhtimiseks vajalikke andmeid säilitada ja töödelda ning operatiivpersonalile sobivas vormis edastada. Oluline on jooksvate andmete esitamine graafiliselt skeemide ja diagrammide näol. 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. Operatiivjuhtimise tarkvara toetub reaalajatööks sobivale operatsioonisüsteemile. Andmehõive ja kasutajaliidesega seotud tarkvara ning lülitite ja muude seadmete kaugjuhtimise vahendid kuuluvad dispetšisüsteemi. Elektrivõrgu talitluse analüüsimiseks ning selle talitluskindluse, ökonoomsuse ja elektrienergia kvaliteedi tagamiseks vajalikud keerukad programmid moodustavad talitluse tugisüsteeme. Arvutusteks vajalikud jooksvad (dünaamilised) andmed hangib dispetšisüsteem. Staatilisi andmeid saab infosüsteemidest. Ennekoike on vajalikud võrguinfosüsteem, geoinfosüsteem ja kliendiinfosüsteem.

1.4.2 Elektrisüsteemi normaaltalitus

Põhilise aja töötab elektrisüsteem häiringukindlas normaaltalitluses, kusjuures täidetud on ka talitluse ökonoomsuse, elektrienergia kvaliteedi ja keskkonnakaitse nõuded. Normaaltalitus on elektrisüsteemi normaalskeemile ja käidueeskirjadele 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.



Joonis 1.47 Energiasüsteemi ööpäevane koormusgraafik

Energiasüsteemi talitluse töökindlust ja majanduslikkust mõjutab elektrilise koormuse ööpäevane, nädalane ja aastane muutumine. Joonisel 1.47 on energiasüsteemi tüüpiline ööpäevane koormusgraafik. Seda iseloomustavad minimaalvõimsus $P_{\min}$, mis langeb enamasti ööle, hommikune või õhtune maksimaalvõimsus $P_{\max}$ ning keskmine võimsus P_{kesk} . Koormust, mis ulatub nullist kuni minimaalkoormuseni ja mis on järelikult kogu ööpäeva jooksul konstantne, nimetatakse baas- ehk põhikoormuseks 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 kehtvalt 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 tipptarbimise eest. Tariifid olmetarbijatele on tavaliselt kuni kaks korda kõrgemad kui tööstustarbijatele, sest need tarbivad elektrit suurel määral koormuse tipu aegadel.

Püsiseisundite määramisel antakse peale võrgu parameetrite ja sõlmede aktiiv- ja reaktiivkoormuste ette ka juhivad parameetrid (elektrijaamade aktiivvõimsused ning pinged generaatorsõlmedes ja tugisõlmes, samuti trafode ülekandesuhted). Ette ei anta neid aga meelevaldselt. Esmaseks tingimuseks on seisundi lubatavuse kindlustamine (kõigi kitsenduste täitmine). Kuid parameetrite lubatud piirkonnas jääb nende väärtuste valikuks küllalt lai diapason. Seetõttu tuleks valik teha kriteeriumite järgi, mis kajastavad tootmiskulusid, töökindlust

ja arvestavad keskkonnakaitsega. Oluline koht on elektrivõrgu pingeniivo reguleerimisel, mis on seotud reaktiivvõimsuste genereerimisega ja bilansi kindlustamisega. Kuna võimsuskadude põhiosa, koormuskaod, on pöördvõrdelised pinge ruuduga, tuleb võimsuskadude minimeerimiseks kasutada võimalikult kõrget lubatavat pingeniivood. Märkimisväärse reaktiivvõimsusvooga võrgust toiteallikate suunas kaasnevad täiendavad võimsuskaod ja võrgu pingeniivo liigne tõus eriti väikeste koormuste ajal. Sellistel juhtudel tuleb kasutada reaktoreid, mis suurendavad reaktiivvõimsuse tarbimist ülekandevõrgus.

Elektrisüsteemi talitlust mõjutab oluliselt **elektriturg**. Suurt mõju põhivõrgu talitlusele avaldab hulgimüügiturg. Jaotusvõrgu tasandil toimiv jaemüügiturg 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.

Elektriturg toimib esmapilgul samal viisil kui muude kaupade (nafta, gaas, metallid jm) turg. Tootja ja tarbija vaheline kaubavahetus (antud juhul elektrienergia vahetus) toimub arvukate vahendajate kaudu, kes tegutsevad hulgi- ja jaemüügiturul. Ostu-müügilepped võivad olla kahepoolsed (bilateraalsed) või sõlmitakse reaajas spotturul kõigile turuosalistele võrdsetel alustel. Bilateraalsed lepped sõlmitakse mõni päev kuni mõni aasta ette, spotturul vaid päev või ka mõni tund ette. Näiteks 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 mahu 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. Põhimõtteliselt peaksid nii põhi- kui jaotusvõrgud toimima neutraalselt, kindlustades samadel tingimustel elektrienergia ülekandmise kõigile turuosalistele. Probleemiks on siin elektrivõrgu, eriti süsteemidevaheliste ühenduste ülekandevõime. Ülekande piirangute tõttu jaguneb ühtne elektriturg piirkondadeks, kusjuures genereeriva võimsuse ülejäägiga piirkondades on elektri hind keskmisega võrreldes madalam, puudujäägiga piirkondades aga kõrgem.

Salvestusvõimaluste puudumise tõttu peab igal hetkel elektri tootmine ja tarbimine olema tasakaalus. Elektrienergia bilansi tagamine on iga turuosalise kohustus, s.t iga tootja või tarbija poolt võrku antud või võrgust hangitud energia kogus peab igal tunnil võrduma turul müüdud või ostetud energia kogusega. Kuna tavalised elektri tarbijad ja tootjad pole sellise kohustuse täitmiseks ilmselt võimelised, tulevad mängu veel kaks turuosalist – avatud

tarnija ja bilansihaldur. Avatud tarnija varustab tarbijaid elektrienergiaga avatud elektrivarustuslepingu alusel, suurendades või vähendades elektri tootmist jooksvalt. Bilansihaldur, kelleks võib olla ka avatud tarnija, organiseerib elektrienergia bilansi tasakaalustamist temaga lepingu sõlminud turuosaliste osas. Kuna ka bilansihaldurid ei suuda süsteemis täielikku tasakaalu saavutada, tuginevad nad elektrisüsteemi bilansihaldurile ehk süsteemihaldurile. Ühend-süsteemis on bilansihalduriks süsteemioperaator (*transmission system operator, TSO*), mis võib toimida nii tsentraalselt kui hajutatult (ühendsüsteemis võib olla mitu süsteemioperaatorit). Süsteemioperaator hangib tasakaalustamiseks vajaliku energia (nii positiivse kui negatiivse) bilansiturult, mille osalisteks on süsteemioperaatoriga lepingu teinud elektritootjad.

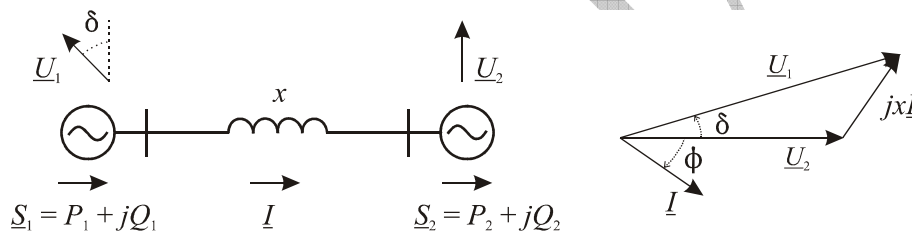
Kasutustunni möödudes algab bilansiselgitus, kus tehakse kindlaks kes, kui palju ja kellele peab bilansi tagamise eest maksma. On arusaadav, et varakult (nt päev ette) avatud elektritarnijalt hangitud energia on odavam, kui kasutustunni sees bilansiturult saadu. Veel tuleb tähele panna, et lühikese ennetusaja korral on peaaegu ükskõik, kumma märgiga lisaenergia oli, kas tegemist oli elektri tootmise jooksva suurendamisega või vähendamisega.

Euroopa Liit on eesmärgiks seadnud luua Euroopas ühtse hinnaga elektriturg. Esimeseks etapiks on Põhja- ja Kesk-Euroopa elektribörside toimimisviiside ühtlustamine ja kooskõlastamine eeskujuna NordPool ning rahvuslike börside muutmine rahvusvahelisteks. Tulemuseks on 2008. aasta lõpuks elektriturg, kuhu Põhjamaade kõrval kuuluvad veel Saksamaa, Prantsusmaa, Belgia ja Holland. Turu üheks aluseks kujuneb Norra ja Hollandi vahele rajatav NordNet-alalisvoolukaabelliin, mis peaks valmima 2007. aasta lõpuks. Kaabelliini pikkus on 580 km ja võimsus 600 MW. Hetkel toimib Euroopas 15 elektribörsi. Nende osatähtsus kogu vastava ala elektriturust on alla 10%. NordPooli osakaal on seevastu 63%. Eesti avab 35% oma elektriturust 2008. aasta lõpuks. Kõigile elektritarbijatele, välja arvatud kodutarbijad, avatakse Eestis turg aastal 2012.

Nii vaba elektrituru toimimiseks kui elektrivarustuse tagamiseks üldse on vajalik piisava ülekandevõimega põhivõrk. Tänapäevase 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 elektriturgude avanemisega ei ole põhimõtteliselt oluline, kus elektrienergiat toodetakse, määravaks saab elektrienergia ülekande füüsiline võimalikkus. Koormuse pideva kasvu tõttu on võrguettevõtetal vaja investeerida võrgu ülekandevõime suurendamisse. Uute liinide ehitamisel kerkivad esile majanduslikud kriteeriumid ning probleemid maaga. Sageli on otstarbekam investeerida olemasolevatesse liinidesse, tõstes nende ülekandevõimet täiendavate kompenseerimiseseadmete paigaldamisega.

Reaktiivvõimsuse sobiva reguleerimisega saab edastatava võimsuse piiri tõsta ning samas juhtida ka võrgu pinget. Juba aastakümneid on elektrivõrkudes kasutusel olnud elektriliiniga põikühenduses olevad mehaaniliselt lülitatavad või statsionaarsed reaktorid ja kondensaatorid, mille ülesanne on tagada vajalik pingetase kas siis elektriliini madala või suure koormuse korral. Pikas ülekande-liinis kasutatakse pikiühendatud mahtuvuslikku kompenseerimist, et vähendada liini reaktiivtakistust (liini elektrilist pikkust). Elektrivõrgu teatud konfiguratsioonide korral võib tekkida olukord, kus liini loomulik võimsusvoog ei sobi sellele liinile kavandatud ülekande mahuga. Olukorda võib parandada faasinurga regulaatoriga (faasinihutiga), mis muudab liini pingevektori nurka.

Elektrienergia ülekanne elektriliinis põhineb füüsikaseadustel, mis ei luba konkreetse ülekande kaudu edastada rohkem elektrienergiat, kui liini parameetrid (pinge ja reaktiivtakistus) võimaldavad. Arvestada tuleb ka termiliste piirangutega ning kogu süsteemi stabiilsuse tingimustega.



Joonis 1.48 Lihtsa elektrisüsteemi skeem ja vektordiagramm

Vaatleme joonisel 1.48 kujutatud lihtsat elektrisüsteemi, mis tugineb ühele elektriliinile. Süsteemi vektordiagrammist tulenevad liini kaudu edastatava aktiiv- ja reaktiivvõimsuse avaldised

$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 U_2}{x} \sin \delta$$

$$Q_1 = \frac{U_1^2 - U_1 U_2 \cos \delta}{x}$$

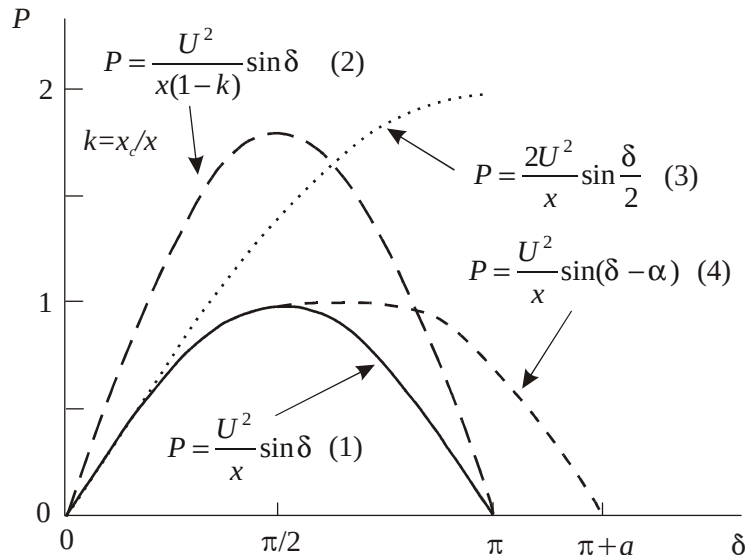
$$Q_2 = \frac{U_1 U_2 \cos \delta - U_2^2}{x}$$

Ligikaudu, kui $U_1 = U_2$, siis avaldised lihtsustuvad

$$P_1 = P_2 = \frac{U^2}{x} \sin \delta$$

$$Q_1 = -Q_2 \approx \frac{U^2}{x} (1 - \cos \delta) = \frac{1}{2} x I^2$$

Elektriülekande nurkkarakteristikud on joonisel 1.49. Kõver 1 vastab kompenseerimata ülekandele, kui



Joonis 1.49 Elektriülekanne nurkkarakteristikud

$$P = \frac{U^2}{x} \sin \delta, \quad Q = \frac{U^2}{x} (1 - \cos \delta)$$

Pikikompenseerimise korral ülekanne arvutuslik takistus väheneb ja maksimaalvõimsus vastavalt kasvab (kõver 2)

$$P = \frac{U^2}{x(1-k)} \sin \delta, \quad Q_C = I^2 x_C = \frac{2U^2}{X} \frac{k}{(1-k)^2} (1 - \cos \delta)$$

kus $k = x_C/x$, $0 \leq k < 1$ on kompenseerimistegur. Q_C on siin reaktiivvõimsus, mida genereerib kondensaatorpatari ja mis sõltub voolust – pikikompenseerimine on isereguleeruv. Kui liini keskele on paigutatud konstantne pingesallikas reaktiivvõimsuse kompensaatori näol, võib ette kujutada kahte järjestikust ülekannet poolitatud takistusega (kõver 3), mistõttu

$$P = \frac{2U^2}{x} \sin \frac{\delta}{2}, \quad Q = \frac{2U^2}{x} \left(1 - \cos \frac{\delta}{2} \right)$$

On näha, et põikikompenseerimisega on ülekantavat võimsust võimalik märgatavalt tõsta, kuid samas suureneb vajadus reaktiivvõimsuse järele. Faasinihuti korral muutub pingvektoritevaheline nurk, maksimaalvõimsus jääb aga samaks (kõver 4)

$$P = \frac{U^2}{x} \sin(\delta - \alpha), \quad Q = \frac{U^2}{x} (1 - \cos(\delta - \alpha))$$

Kokku võttes on ülekantavat aktiivvõimsust võimalik reguleerida reaktiivtakistuse, pingete ja nurga muutmise teel. Mehaaniliselt ümberlülitatavad kompenseerimiseadmed pakuvad majanduslikult otstarbekamaid lahendusi, kuid

toimivad vaid püsitalitluse korral. Süsteemi dünaamilises talitluses pole neil seadmel vajalikku töökiirustust. Jõuelektroonikal 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.

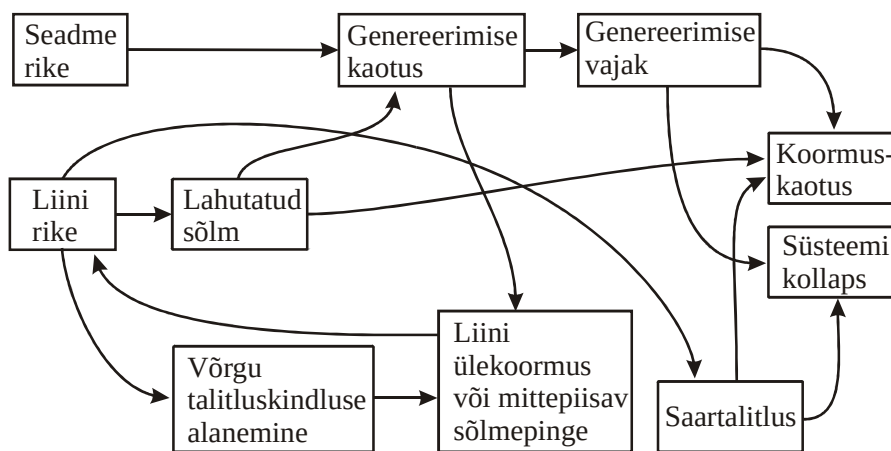
1.4.3 Elektrisüsteemi töökindlus

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 alam-süsteemi.
- 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.

Joonisel 1.50 on illustreeritud elektrisüsteemi elementide rikete tagajärgi. Veendumaks, et elektrisüsteemi talitus ei ole häiringute tagajärjel hädaohus, tuleb uurida süsteemi seisundeid generaatorite, kompensatorite, liinide ja teiste põhielementide väljalangemise korral. Uurimust nimetatakse **püsitalitluse häiringuanalüüsiks** (*contingency analysis*). Selle eesmärgiks on ennustada püsiseisund, mis kujuneb välja peale rikkeid ja väljalülitumisi, mis võivad olla kavatsuslikud, tahtlikud lülitamised (remondi otstarbel, võimsuste jagunemise või pingeolukorra parandamiseks vms) ja sundlülitumised (ülekoormuse korral, et vältida elemendi vigastusi, või automaatselt rikete puhul).



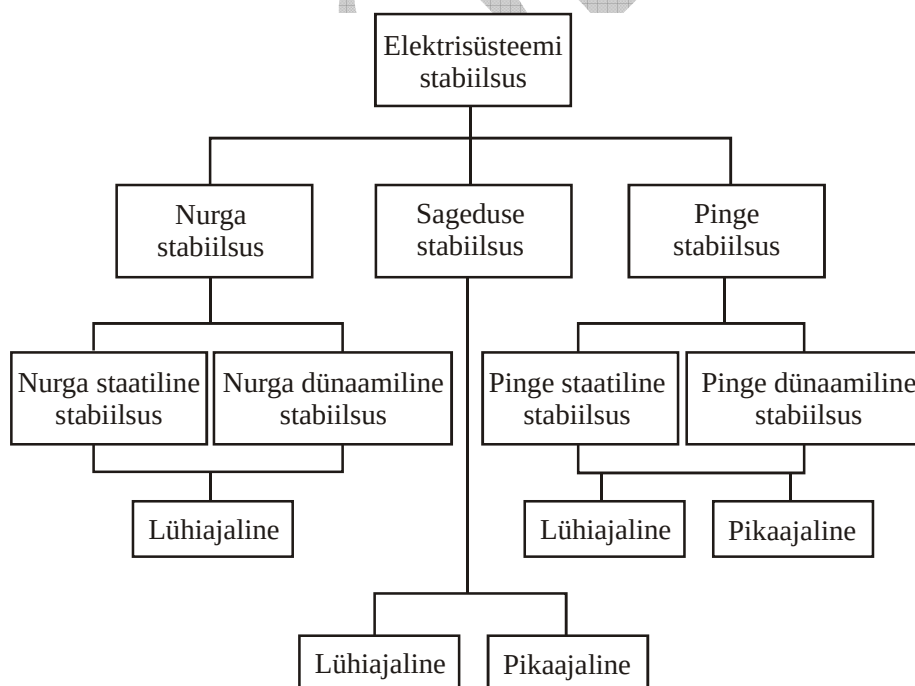
Joonis 1.50 Rikete tagajärgi

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. Sundväljalülitamiste tõenäosused on väikesed ja sõltuvad ilmastikust. Kuna suurema tõenäosusega toimuvad ühekordsed väljalülitumised, siis üldjuhul piirduaksegi nende analüüsiga. Siiski on rasketes ilmastikuoludes võimalik ka mitme elemendi üheaegne väljalülitumine eriti kaheaheelaliste liinide puhul.

Võimalik süsteemiavarii, 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. Aeg-ajalt esineb tõsisemaid häiringuid, nagu lühised või suurte generaatorite väljalülitumine, mis võivad muuta süsteemi struktuuri. Süsteemi stabiilsus sõltub nii lähtetalitlusest kui häiringu iseloomust.

Süsteemi reageering häiringule võib haarata hulga seadmeid. Näiteks 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. Kui süsteemi stabiilsus säilib, tähendab see, et enamik generaatoritest jätkab tööd ja tarbijad saavad elektrit. Mõni generaator ja väike osa koormusest, mis oli vahetult seotud rikkis elemendiga, võib siiski olla välja lülitatud. Koormuse võivad välja lülitada ka sagedusautomaadid. Selleks et vältida süsteemiavariid võib süsteemikaitse suure häiringu korral lahutada ühendsüsteemi reaks saartalitluses töötavaks alamsüsteemiks. Mõne aja möödudes taastavad ühendsüsteemi normaaltöö kas automaadid või teeb seda operatiivpersonal. Kui süsteem on mittestabiilne, tähendab see progresseeruvat protsessi, kus näiteks generaatorite rootorite nurgad kasvavad või sõlme pinged alanevad. Mittestabiilsuse tagajärjeks on süsteemi suure osa seiskumine

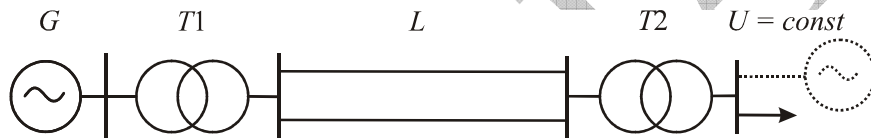
Süsteemi lähteolukorrast ja häiringu iseloomust sõltuvalt võivad vastumõjud põhjustada erinevaid mittestabiilsuse vorme. Kuigi süsteemi siirdeprotsess ja võimalik mittestabiilsus on kompleksne nähtus, on seda asjast paremaks arusaamiseks ja analüüsimiseks otstarbekas liigitada. Eristatakse **nurga-** ehk



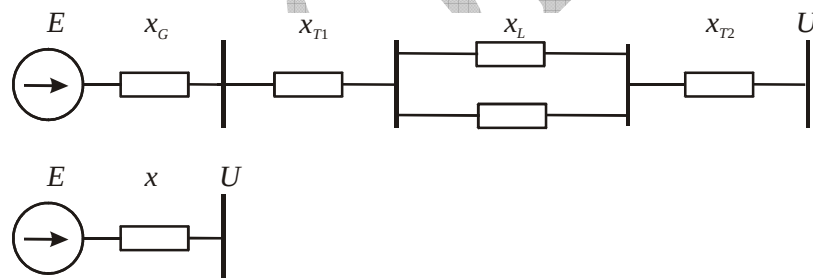
Joonis 1.51 Elektrisüsteemi stabiilsuse klassifikatsioon

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 aperioidiline või perioodiline. Võimsuse suure ebalansi tagajärjeks on süsteemi **sageduse mittestabiilsus**. Elektrisüsteemi stabiilsuse klassifikatsioon on joonisel 1.51.

Protsessid, mis võivad viia süsteemi stabiilsus kaotuseni on erineva kestusega. Generaatorite sünkronismist väljalangemine toimub mõne sekundi jooksul. Võimalik sageduse mittestabiilsus võtab enamasti aega kümneid sekundeid kuigi saartalitluse korral võib toimuda ka kiiremini. Pinge stabiilsus hõlmab erinevaid protsesse, mis võivad kulgeda mõne sekundi jooksul, või võtta aega mõnikümne minutit.



Joonis 1.52 Lihtsaima elektrisüsteemi põhimõtteskeem



Joonis 1.53 Lihtsaima elektrisüsteemi aseskeem

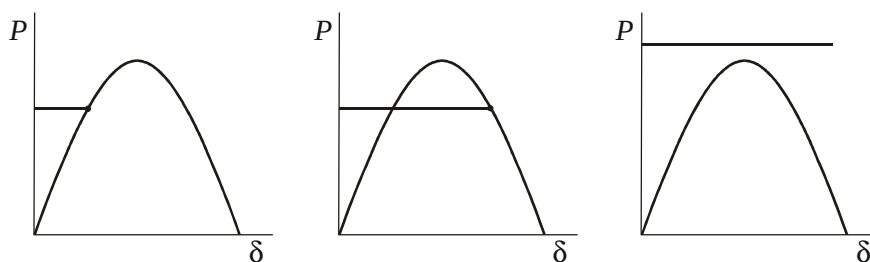
Nurgastabiilsuse olemust on otstarbekas selgitada lihtsaima elektrisüsteemi näitel (joonised 1.52 ja 1.53). Konstantse pingega latid iseloomustavad piisavalt suurt alamsüsteemi, mille seisund ei sõltu oluliselt vaadeldava ekvivalentse generaatori (elektrijaama) talitlusest. Kehtib punktis 1.4.2 vaadeldud lihtsa elektrisüsteemi vektordiagramm ja sellest tulenev seos

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

Kui elektromotoorjõud lugeda konstantseks (ergutuse automaatne reguleerimine puudub), annab esitatud seos süsteemi nurkkarakteristiku $P = f(\delta)$ sinusoidina. Kui samas teljestikus vaadelda ka generaatori karakteristikut, mis ei sõltu nurgast, saadakse kaks tasakaalu- ehk tööpunkti. Kolmandaks võimaluseks on

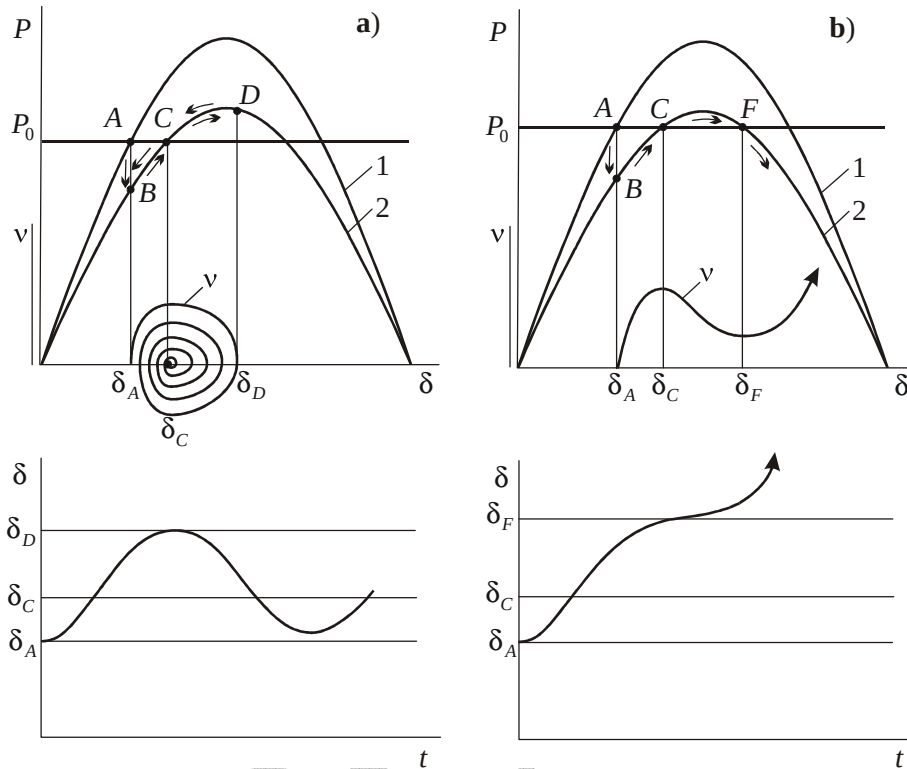
tööpunkti puudumine (joonis 1.54). On lihtne näidata, et stabiilne on vaid vasakpoolne tööpunkt, kus $\delta < 90^\circ$. Tulemusi saab üldistada ka keerukamale elektrisüsteemile, kus nagu lihtsaimaski süsteemis võib esineda kolm olukorda:

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



Joonis 1.54 Võimalikud tulemused lihtsaima elektrisüsteemi seisundi määramisel

Häiringu korral süsteemi karakteristik muutub. Näiteks ühe elektriliini ahela väljalülitumisel vaadeldavas lihtsaimas süsteemis, asendub lähtekarakteristik 1 aseskeemi takistuse suurenemise tõttu madalama karakteristikuga 2 (joonis 1.55a). Kui tasakaaluolukorras lähteseisund vastas tööpunktile A, siis uueks tööpunktiks vahetult peale lülitust saab B, sest rootori mehaaniline inerts ei lase nurgal δ muutuda hetkeliselt. Siin on generaatori elektriline võimsus väiksem kui mehaaniline võimsus P_0 (turbiini võimsus jääb muutumatuks), jääkvõimsus (mehaanilise ja elektrilise võimsuse vahe) on positiivne, mille tõttu generaatori rootor kiireneb ja nurk δ hakkab kasvama. Vastavalt nihkub ka tööpunkt punktist B punkti C poole. Punktis C on elektriline ja mehaaniline võimsus taas tasakaalus, kuid rootori täiendava kineetilise energia tõttu nurga suurenemine jätkub. Nüüd saab elektriline võimsus omakorda suuremaks mehaanilisest ja rootori suhteline kiirus v hakkab vähenema. Mõnda aega on see kiirus veel positiivne (rootor pöörleb kiiremini kui staatori magnetväli) ja nurk suureneb edasi. Punktis D muutub rootori liikumise suhteline kiirus nulliks. Kuna kiirendus on endiselt negatiivne, sest elektriline võimsus ületab mehaanilise, siis muutub kiirus negatiivseks, nurk δ hakkab vähenema ja tööpunkt nihkub tagasi punkti C. Kuna punktis C ei saa tööpunkt taas rootori inerts tõttu peatuda, jätkub liikumine lähtepunkti B suunas. Liikumine peatub sedapuhku punktis B (või veidi enne) ja kogu protsess kordub. Tekib perioodiline protsess, milles mehaaniliselt võngub generaatori rootor ja muutuvad elektrilised parameetrid (võimsus, vool, generaatori pinge jm). Elektrilised ja mehaanilised vastumõjud summutavad selle protsessi aga teatud aja (mõni sekund) möödudes ning saabub püsiseisund, mis vastab tööpunktile C. Seega on tegemist stabiilse siirdeprotsessiga. Vaatleme nüüd olukorda, kus turbiini võimsus P_0 on mõnevõrra suurem (joonis 1.55b). Esialgu kulgeb siirdeprotsess analoogiliselt vaadelduga –



Joonis 1.55 Elektrisüsteemi stabiilne (a) ja mittestabiilne (b) siirdeprotsess

positiivne jääkvõimsus kiirendab rootorit, tööpunkt liigub punktist B punkti C ja sealt rootori kineetilise energia tõttu edasi. Kuna rootori kiirenemine on nüüd suurema jääkvõimsuse tõttu intensiivsem, pidurdumine aga nõrgem, siis võib juhtuda, et liikumine jätkub punktini F ja edasi. Punktis F muutub jääkvõimsuse ja seega ka rootori kiirenduse märk taas positiivseks ning nurga δ kasv jätkub pidurdamatult. Seega võib tõdeda, et antud tingimustes on siirdeprotsess mittestabiilne (generaator langeb sünkronismist välja).

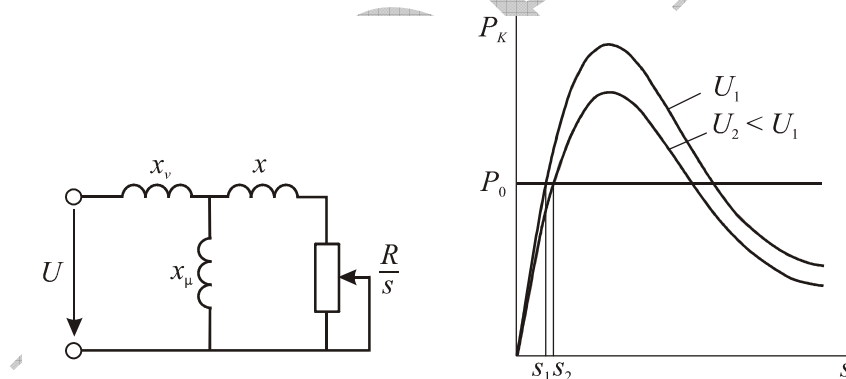
Kokku võttes mõjuvad generaatori rootori liikumisele nii jääkvõimsusele vastav sünkroniseeriv moment kui rootori suhtelisest liikumiskiirusest tingitud summutusmoment. Vaadeldud suure talitlushäiringu korral oli küsimus süsteemi dünaamilises stabiilsuses. Rootori nurga piiramatul kasv võib saada alguse ka kui tahes väikesest häiringust. Sel juhul on tegemist süsteemi staatilise stabiilsuse kadumisega. Nurga kasv võib esineda aperioidilisel või perioodilisel kujul. Nurga aperioidiline eksponentsiaalne kasv on seletatav sünkroniseeriva momendi tasakaalustamatusega. Liiga väike summutusmoment on põhjuseks rootori nurga võnkumisele eksponentsiaalselt kasvava amplituudiga. Selline perioodiline mittestabiilsus võib esineda lokaalselt, haarates ühte elektrijaama või vaid väikest osa elektrisüsteemist, või esineda

ühendsüsteemis alamsüsteemide omavahelise madalsagedusliku (0,2...3 Hz) võnkumisena.

Pinge stabiilsuse üheks alaliigiks on asünkroonkoormuse stabiilsus. Asünkroonmootori karakteristiku võib esitada võimsuse P ja libistuse s funktsioonina (joonis 1.56). Samas teljestikus saab näidata ka töömasina karakteristikut P_0 . Nagu lihtsaima elektrisüsteemi puhul tekib ka siin kaks tööpunkti, millest vaid vasakpoolne on stabiilne. Karakteristiku maksimum avaldub seosega

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

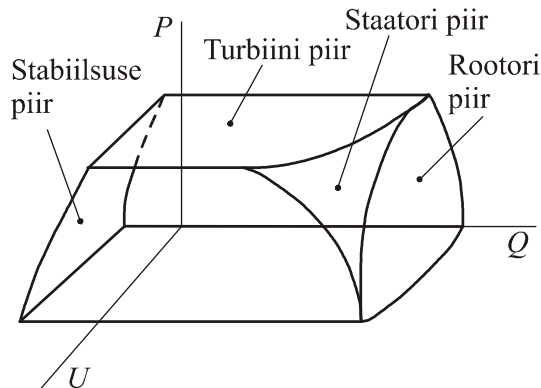
kus x on mootori ja x_v mootori ja konstantse pingega lattide vaheline välis-takistus. Kuna tegemist on ruutsõltuvusega, põhjustab toitepinge U mõningane vähenemine maksimaalvõimsuse tunduva langemise. Võib tekkida olukord, kus uus tööpunkt hoopiski puudub ja mootor seiskub. Toitepinge järsul langemisel asünkroonmootorid pidurduvad ja nende reaktiivvõimsus suureneb, mis põhjustab pingelangu edasist kasvu. Pinge taastumisel võivad mootorid taas saavutada töökiiruse või madala kiiruse ja märgatava välis-takistuse korral seiskuda, mis tähendab pinge dünaamilist mittestabiilsust.



Joonis 1.56 Asünkroonmootori karakteristikud

Kirjeldatud asünkroonkoormuse näites eeldatakse, et pinge koormust toitva alajaama lattidel on konstantne. Nii süsteemi pingetase kui elektrivõrgu üksikute sõlmede pinge sõltub reaktiivvõimsuse tasakaalust. Tasakaalu rikkumist põhjustab ennekõike koormus. Lisaks juba vaadeldud asünkroonkoormuse reaktiivvõimsuse kasvule toitepinge langemisel suurendavad reaktiivvõimsuse tarvet ka asünkroonmootorite kiirusregulaatorid, jaotusvõrgu trafode astmelülid, muud pingeregulaatorid, termostaatilised seadmed jt. Kuna need seadmed püüavad elektritarbijate talitlust säilitada, suureneb pinge langemisel jaotusvõrgus vool ja tarbitav reaktiivvõimsus. Olukorda halvendab veelgi reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks ülesseatud kondensaatorpatareide poolt toodetava reaktiivvõimsuse järsk langus (võrdeliselt pinge ruuduga).

Tasakaalustamiseks vajaliku reaktiivvõimsuse juurdevool sõltub põhivõrgu läbilaskevõimest ning reaktiivvõimsuse allikate, sealhulgas generaatorite ergutusahelate koormatusest. Generaatori võime väljastada või tarbida



Joonis 1.57 Generaatori PQU-karakteristik

reaktiivvõimsust on piiratud staatori- ja rootorimähise kuumenemisega ning sõltub genereeritavast aktiivvõimsusest. Olukorda iseloomustab seos $Q = Q(P)$. Pinge stabiilsuse seisukohalt on veelgi olulisem teada võrgupinge sõltuvust generaatori reaktiivvõimsusest $U = U(Q)$ ja sellega seonduvaid piirväärtusi. Nimetatud seoseid võib esitada kolmemõõtmelise PQU-karakteristikuna (joonis 1.57). Generaatorite käitu on

soovitav plaanida nii, et reaktiivvõimsus oleks võimalikult väike (võimsustegur võimalikult suur). Siis on häiringu korral võimalik reaktiivvõimsust tõsta ning sellega stabiilsust parandada. Lühikest aega võib nii rootori- kui staatorimähist ka üle koormata. Ülekoormamise kestus oleneb generaatori jahutussüsteemist. Orienteerivalt on 100%-line ülekoormus lubatud 10 sekundi, 10–15%-line ülekoormus kahe minuti jooksul.

Kui reaktiivvõimsuse tasakaalu taastada ei õnnestu, järgnebki süsteemi pinge mittestabiilsus ehk **kollaps**. Nurga ja pinge mittestabiilsus on enamasti üksteisega seotud. Nii tõstab nurkade suurenemine voolu väärtust, mis omakorda põhjustab pingelange. Pinge alanemine aga vähendab ülekantavat aktiivvõimsust, põhjustades rootorite kiirenemist ja nurkade edasist suurenemist.

Protsess, mis võib viia pinge mittestabiilsuseni, kestab mõnest sekundist kuni mõnekümne minutini. Kiirelt kulgeb protsess asünkroonmootorites, nende elektronkontrollerites ja alalisvoolumuundurites. Seevastu trafode astmelülidid, termostaatiliselt juhitud koormus ning generaatorite ülekoormus toimivad mõne minuti jooksul. Ka võib häiringujärgne talitus osutuda staatiliselt mittestabiilseks. 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.

Võib esineda ka kiireid protsesse, eriti kui ühendsüsteem on jaotatud saarteks ja mõnes alamsüsteemis tekib terav võimsuste ebabalanss. Sellisel juhul võivad kaitseseadmed välja lülitada generaatoreid, liine ja koormust juba mõne sekundi jooksul. Olukorda raskendab sageduse vähenemisest tingitud elektrijaamade katelde toitepumpade ja sellest põhjustatud turbiinide võimsuse langus. Protsessi kestus on umbes 10 sekundit. Üldiselt on sageduse mittestabiilsus seotud regulaatorite ja kaitseseadmete halva koordineerimisega ja mitteküllaldase võimsuse reserviga. Olukorda raskendab sageduse kiire muutusega kaasnev pinge tõus või langus. Pinge ülemäärane tõus võib põhjustada näiteks generaatorite väljalülitamist, pinge langus – impedantsreleede väärtoimingut.

Elektrisüsteemi stabiilsuse tagamine algab süsteemi projekteerimise ning talitluse pika- ja lühiajalise plaanimise 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. Kuna dünaamilise nurgastabiilsuse kaotust põhjustab enamasti generaatori ülemäärane kineetiline energia, mille rootor saab häiringu ajal, siis on peamiseks vahendiks siin releekaitse kiiretoimelisus. Staatilise stabiilsuse tagab generaatorite ergutuse asjakohane reguleerimine. Kohalike võnkumiste summutamiseks on ette nähtud ergutuse täiendav reguleerimine elektrisüsteemi stabilisaatori (*power system stabilizer, PSS*) abil. Piiratud aktiiv- ja reaktiivvõimsuse reguleerimisvõimaluste tõttu ei ole PSS võimeline summutama võnkumisi ühendsüsteemis.

Alalisvooluülekanne, eriti alalisvoolu vahelüli, võimaldab ülekantavat aktiivvõimsust vajaliku sagedusega ja võimsusdiapasooniga moduleerida. Taoline toime on nii traditsioonilistel türistorjuhitavatel kui uuematel, pingemuunduritel VSC põhinevatel, alalisvooluülekannetel. VSC HVDC võimaldab lisaks muuta suurtes piirides reaktiivvõimsust, mille abil võib samuti võnkumisi summutada. Eriti tõhus on VSC HVDC pinge stabiilsuse tõstmisel reaktiivvõimsuse tasakaalu rikkumise korral. Sellal kui traditsiooniline alalisvooluülekanne tarbib reaktiivvõimsust, võimaldab uus tehnoloogia seda nii tarbida kui genereerida aktiivvõimsuse ülekannet mõjutamata.

Järjest enam kasutatakse elektrisüsteemi stabiilsuse kindlustamiseks *FACTS*-seadmeid, mis põhinevad samal tehnoloogial kui alalisvooluülekandedki. Võrgu ülekandevõime suurendamine pikilülituses TCSC-kompensaatoritega tähendab samavõrd süsteemi staatilise (aperioodilise) stabiilsuse tõstmist ja mõjub soodsalt ka muudele stabiilsuse liikidele. Elektrivõrgu parameetrite kompenseerimise kõrval on TCSC-seadmed edukalt kasutatavad nii nurga kui ka pinge stabiilsusele tõstmise vahendina. Eriti efektiivne on selline kompensaator alamsüsteemidevaheliste võnkumiste summutamiseks, aga ka subsünkroonse resonantsi vältimiseks. Põiklülituses SVC-seadmed, mis reguleerivad reaktiivvõimsust ja pinget, on olulised pinge stabiilsuse kindlustamisel.

Kompenseerimiseadmete kasutamisel tuleb tähelepanu pöörata nende talitluspiiridele ning hulgale süsteemis. Süsteemi liigse sõltuvuse korral kompenseerimiseadmetest võib tekkida olukord, kus süsteem ei ole enam võimeline talitlema ettenähtud moel ning tulemuseks võib olla selle kustumine. Näiteks SVC korral võib tekkida probleeme, kui seade talitleb oma mahtuvusliku võimsuse piiril. Sel juhul on sisuliselt tegemist statsionaarse kondensaatorpatareiga, millega reguleerida ei ole võimalik. Arvestada tuleb ka olukorraga ühendsüsteemis. Siin peavad seadmete koordineeritud juhtimise ning tehnilisi ja majanduslikke eesmärke aktsepteerima kõik ühendsüsteemi osapooled.

Stabiilsuse probleeme lisab elektri hajustootmine, mille allikateks on väikesed jaotusvõrku ühendatud elektrijaamad. Sünkroonselt töötavad elektrigeneraatorid – gaasiturbiinjaamad, diiselaagregaadid, kohalikud hüdrojaamad jm võivad kaotada nurgastabiilsuse tunduvalt kergemini kui suurte elektrijaamade generaatorid. Elektroonsete inverterite kaudu elektrivõrguga ühenduses olevad elektriallikad, nagu tuuleturbiinid, väikesed hüdrojaamad, päikeseelektrijaamad jm, võivad põhjustada jaotusvõrgu pinget mittestabiilsust. Väikeste elektrienergia allikate mittestabiilsuse ilmingud tähendavad häiringuid põhivõrgu talitlusele ja võivad ohustata kogu elektrisüsteemi stabiilsust.

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. Mingi generaatori, elektriliini, trafo või kogumislattide rikkest või ülekoormusest põhjustatud väljalülitamise tagajärjel jaotuvad võimsusvood süsteemis ümber nii, et üle võib koormuda mõni teine element, mille releekaitse samuti välja lülitab. Olukord süsteemis halveneb veelgi, järgnevad uued väljalülitused ja mittestabiilsus, mille tõttu jääb toiteta suur hulk tarbijaid. Elektrisüsteemis püütakse järgida häiringukindluse $n-1$ kriteerium, mis nõuab, et n elemendist koosnevas süsteemis oleks tagatud normaaltalitus ka pärast ühe mis tahes elemendi väljalülitumist. $n-2$ või kõrgemaid kriteeriume tavaliselt ei vaadelda, sest nende täitmine nõuaks ülemäära suuri kulutusi. Kuigi kahe või enama süsteemi töö seisukohalt olulise häiringu üheaegne teke on äärmiselt ebatõenäoline, selliseid olukordi siiski esineb.

Talitlushäiringutele reageerivad esmalt releekaitse ja muud automaadid, mis püüavad avariiolukorra 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. Õhuliinidel võib teatud aja jooksul kuumenemise tõttu suureneda ripe niivõrd, et toimub ülelööki liini trassil kasvavasse võsasse. Tulemuseks on liini väljalülitamise kõrval talitlushäiring, mis võib põhjustada nurgastabiilsuse

kaotuse. Sarnaseid erinevate nähtuste koosinemisi täheldatakse süsteemiavariide korral hulgaliselt. 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) avariiolukorras võib vältida pinge kollapsi.
- Pinge ja reaktiivvõimsuse reguleerimine. Ka reaktiivvõimsusele nähakse ette reservallikad, mis võetakse kasutusele avariiolukorras, või lülitatakse välja, kui tegemist on näiteks reaktoritega. Reaktiivvõimsuse reserv on oluline pinge stabiilsuse tõstmise vahend. Kasutada võib nii mehaaniliselt kui elektroonselt juhitavaid kondensaatorpatareisid ning staatilisi reaktiivvõimsuse allikaid. Oluline on hoida reaktiivvõimsuse reservi generaatoritel, kus see on tõhusalt reguleeritav. Probleemiks on, kuidas vältida staatori ja rootori ülekoormuskaitse soovimatut (stabiilsuse seisukohalt enneaegset) tegevust.
- Trafode astmelülitite mõju sõltub trafo positsioonist. Põhivõrgu trafode astmelülitid püüavad säilitada kõrget pingeniivood ja ka pinge stabiilsust. Jaotusvõrgu trafode astmelülitid püüavad häiringu tõttu langenud koormusepoolset pinget aga tõsta, suurendades põhivõrgus ülekantavat aktiiv- ja reaktiivvõimsust, mis omakorda kiirendab pinge alanemist. Selle tõttu on jaotusvõrgu trafode astmelülitid soovitatav põhivõrgu pinge languse ajaks blokeerida.
- Elektrivõrgu skeemi muutmine. Ökonoomsuse või muudel kaalutlustel ei pruugi võrgu talitlusskeem olla maksimaalselt töökindel või on kujunenud selliseks häiringu tagajärjel.
- Koormuse vähendamine. Automaatne koormusvähenduskaitse toimib süsteemi sageduse langemisel. Avarii laienemise ärahoidmiseks võib osutuda vältimatuks koormuse mingi osa väljalülitamine ka normaalse sageduse korral. Koormuse juhtimine, mis seisneb tarbijate osalises väljalülitamises alapingekaitse või operatiivpersonali poolt, on nii tehniliselt kui majanduslikult efektiivne. Kuigi see põhjustab toite katkestusi, võib väljalülitatavad tarbijad valida nii, et kahju oleks minimaalne. Näiteks elekterkütte, kliimaseadmete jms 5...10 minutiks väljalülitamine ei too kaasa negatiivseid tagajärgi. Teisalt on selline aeg piisav, et teha vajalikke ümberkorraldusi süsteemi talitluses.

Meetmed süsteemiavariide 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.

SCADA kaudu saadakse olukorrast vajalik teave ja realiseeritakse enamik juhtkorraldustest. Probleem on aga selles, et info süsteemi toimimisest saabub juhtimiskeskusesse teadete näol, mida üksikud infoallikad genereerivad omaette. Selliseid allikaid on süsteemis palju ja kõikvõimalike teadete arv suur. 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. Häda on selles, et tõsisema häiringu korral osutuvad paljud teated alarmideks ja dispetšeril on füüsiliselt võimatu neid lühikese aja jooksul käsitleda. Tulemuseks on, et häiringu põhjus jääb arusaamatuks ja avarii vältimise meetmed rakendamata. Puhhtehniliste 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 süsteemiavariid. 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 releekaitse toimel. Põhjusena 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 tõi esile nendevahelise koostöö puudulikkuse. Puudusi täheldati ka operatiivjuhtimissüsteemides (alarmide käsitlemine) ja elektriliinide hooldetöodes (liinide all kasvavad puud). Süsteemioperaatori, mille juhtimispiirkonnas 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 elektrijaama (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 süsteemiavarii 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 resünkroniseerida 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. Kuna elektrituulikud ja koostootmisjaamad on lülitatud jaotusvõrku, puudub elektrisüsteemi dispetšeritel nende üle kontroll.

Energiasüsteemi taastamine peale süsteemiavariid, eriti aga peale avariiseiskumist on keeruline ja aeganõudev. Esmalt tuleb käivitada seiskunud elektrijaamad. Suhteliselt lihtne on käivitada hüdro- ja gaasiturbiinjaamu, millel on pimekäivitamisvõime. 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. Auruturbiinide kiirusregulaatorid on väiksema inertsiga, mis tagab sageduse täpsema säilimise. Tuumaagregaadid tuleb süsteemi avariiseiskumisel täielikult välja lülitada, mistõttu nende taaskäivitamine 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. Vastasel juhul laieneb süsteemiavarii taas. Unustada ei saa ka releekaitse ja muu automaatika ning infosüsteemide (eriti SCADA) taastamist. Lõpuks, kui tarbijatele on toide kindlustatud, taastatakse süsteemi avariieelne normaalne talitus (lülitatakse välja vahepeal käivitatud gaasiturbiinjaamad jms).

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 normaaltalitus teatud häiringute korral. Matemaatiliselt võttes tähendab talitluskindlus süsteemi toimimise tõenäosust, elektrivarustuskindlus aga normaalse töö jätkumise tinglikku tõenäosust vaadeldava talitlushäiringu suhtes. 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. Võib siiski ette tulla ka muid süsteemi töö katkestusi, põhjustatuna näiteks elektrivõrgu mastide massilisest purunemisest jäite tõttu või sabotaažist, mis stabiilsusega ei seonu. 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, avarii ulatusest ja iseloomust ning muudest asjaoludest.