

5 PINGE STABIILSUS

5.1 Pinge stabiilsuse mõiste

Seni vaatlesime stabiilsust kui elektrisüsteemi võimet jätkata sünkroonset tööd peale talitluse suuremaid või väiksemaid häiringuid. Elektrisüsteemi normaalne töö võib aga osutuda võimatuks ka pinge järsu languse (kollapsi) korral. Sellist nähtust (õigemini selle puudumist) nimetatakse **pinge stabiilsuseks**. Kui on vaja eristada neid kahte stabiilsuse liiki, nimetatakse esimest ka **nurga-** ehk **sünkroonseks stabiilsuseks**.

Pinge elektrisüsteemis on tihedalt seotud reaktiivvõimsusega. Kasutame punktis 2.4 tuletatud seoseid ja saame lihtsaima elektrisüsteemi tingimustes (s.o $z_{11} = z_{12} = z_{22} = x$ ja $\alpha_{11} = \alpha_{12} = \alpha_{22} = 0$), et

$$Q_G = \frac{E^2 - EU \cos \delta}{x}, \quad Q_S = \frac{EU \cos \delta - U^2}{x}$$

kus Q_G on genereeritav ja Q_S süsteemi suubuv võimsus ning δ generaatori elektromotoorjõu E ja süsteemi pinge U vaheline nurk. Kui võrrelda reaktiivvõimsust lihtsaimas süsteemis ülekantava aktiivvõimsusega, mille kohta punktis 1.1 saadi seos

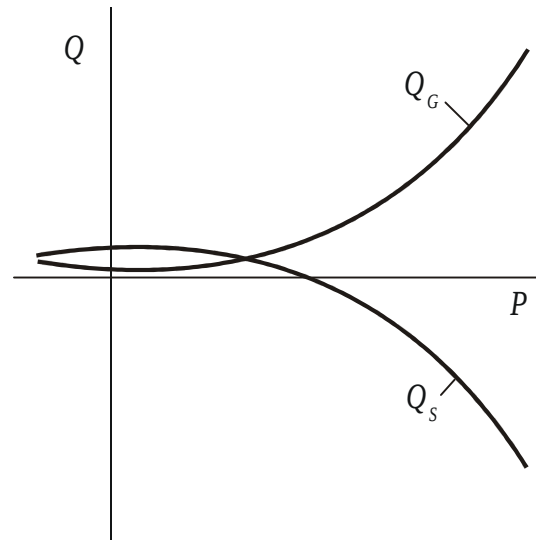
$$P = \frac{EU}{x} \sin \delta$$

näeb, et nurga δ piiratud väärtustel ($\delta < 30^\circ$), kus $\sin \delta \approx \delta$ ja $\cos \delta \approx 1$, on aktiivvõimsus praktiliselt võrdeline nurgaga, reaktiivvõimsused seevastu sõltuvad pinge tasemest. Nurga, ühtlasi ka ülekantava aktiivvõimsuse suurenemisel olukord muutub. Kuna $\cos \delta$ väheneb, siis genereeritav reaktiivvõimsus Q_G suureneb ja süsteemi suubuv reaktiivvõimsus Q_S väheneb, muutudes peagi negatiivseks. Olukorda iseloomustavad hästi kõverad $Q_G = Q_G(P)$ ja $Q_S = Q_S(P)$ (joonis 5.1), mis arvestavad ka elektriliini mahtuvuslikku juhtivust. On näha, et suurematel aktiivvõimsuse väärtustel ei õnnestu reaktiivvõimsust generaatorist (elektrijaamast) süsteemi üle kanda, kuna see kulub kõik ülekandes suurenenuks reaktiivvõimsuskadude kompenseerimiseks.

Elektrivõrgu pinge võimalike muutuste hindamisel on heaks lähtekohaks *lühisvõimsus*, mis on kolmefaasilise lühisvoolu ja nimipinge korrutis. Suhtelistes ühikutes on lühisvõimsus pöördvõrdeline lühise takistusega. On

ilmne, et mida suurem on lühisvõimsus, seda vähem mõjutavad võrgupinget kommutatsioonid, järsud koormusmuutused jms, seda *jäigem* on elektrisüsteem. Kasutatakse ka mõistet *lühisesuhe*, mis on lühisvõimsuse ning mingi seadme võimsuse suhe. Mida suurem on lühisesuhe, seda vähem antud seadme seisund mõjutab elektrivõrgu talitlust.

Elektrisüsteemi pinge stabiilsusega on seotud terve kompleks nähtusi, mis erinevad nii füüsikaliste põhjuste kui kulgemiskiiruse poolest: näiteks punktides 2.7 ja 3.8 vaadeldud asünkroonkoormuse staatiline ja dünaamiline stabiilsus ja ka operatiivpersonali (väär)tegevuse tagajärjed. Pinge stabiilsust mõjutavaid nähtusi on joonisel 5.2.



Joonis 5.1 Kõverad $Q_G = Q_G(P)$ ja $Q_S = Q_S(P)$

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

Joonis 5.2 Pinge stabiilsusega seotud nähtusi

Nii nagu sünkroonse stabiilsuse korral võib pinge stabiilsust vaadelda eraldi ka talitluse väikeste ja suurte häiringute suhtes, millest tulenevad järgmised definit-sioonid:

- elektrisüsteemi *pinge on stabiilne väikeste häiringute suhtes*, kui häiringu möödumisel taastub süsteemi esialgne seisund;
- elektrisüsteemi *pinge on stabiilne antud häiringu suhtes*, kui häiringu möödumisel taastub süsteemi esialgne või sellele lähedane (lubatud) seisund. Pinge mittestabiilsust nimetatakse ka *pinge kollapsiks*. Kui kord juba langenud pinget õnnestub kiiresti taastada (näiteks koormuste väljalülitamise teel), siis räägitakse **pinge resulteeruvast stabiilsusest**. Vaadeldakse ka **pingekindlust**, mis tähendab pinge stabiilsuse säilimist elektrisüsteemi oleku muutuste (näiteks koormuse juurdekasvu) korral.

Mitte kõik pinge lubamatute kõrvalekalletega seotud nähtused ei kuulu pinge stabiilsuse valdkonda. Siia ei kuulu näiteks liigpingete teke elektriliinidel ega ka üksikute seadmete põhjustatud pinge alanemised, mis ei laiene elektrivõrgu muudele tarbijatele.

Vaatleme pinge stabiilsusega seotud ilminguid.

- *Pinge dünaamiline stabiilsus*. Kui võrgupinge mingil põhjusel langeb (näiteks pikaajalisel lühisel), siis asünkroonmootorid pidurdavad ja nende reaktiivvõimsus tõuseb. Tagajärjeks on pinge edasine langus ja teiste asünkroonmootorite pidurdumine, mis võib lõppeda kõikide asünkroonmootorite seiskumise ja pinge kollapsiga. Negatiivselt mõjuvad siin ka reaktiivvõimsust kompenseerivad kondensaatorid, mille võimsus muutub proportsionaalselt pinge ruuduga. Seega väheneb pinge langemisel järsult nende võimsus. Avarii vältimiseks varustatakse asünkroonmootorid alapingekaitsega, mis osa mootoreid pinge tunduval langemisel välja lülitab, võimaldades võrgupinget taastada. Pinge langus vähendab ka võimsust, mida elektrisüsteemi allsüsteemide vahel üle kantakse. Võimsusdefitsiidis allsüsteemis põhjustab see sageduse langust. Kui sagedusautomaadid osa koormusest välja ei lülita (näiteks ei reageeri madala pinge tõttu), kaob sünkroonne stabiilsus. Olukorda raskendab sageduse vähenemisest tingitud elektriijaama katelde toitepumpade ja sellest tingituna ka turbiinide võimsuse langemine. Kirjeldatud protsessi kestus on umbes 10 sekundit.
- *Pinge häiringujärgne (keskajaline) stabiilsus*. Eespool kirjeldatud siirdeprotsess võib kulgeda edukalt (ei põhjusta mittestabiilsust), kuid oht pole veel möödas. Kui genereeritav reaktiivvõimsus on häiringu tagajärjel oluliselt langenud (elektriijaama või ülekandeliini väljalülitamise tõttu), on ka koormuse pingetase madal ja trafode astmelülitid püüavad seda taastada. Kuna pingetaseme tõus on võimalik üksnes reaktiivvõimsuse kasvu arvel, on tulemuseks generaatorite ülekoormumine nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsuse osas (pinge tõusmisel kasvab ka koormuse aktiivvõimsus). Mõne aja pärast rakenduvad ülekoormuskaitse (sh ergutussüsteemi ülekoormuskaitse), genereeritav reaktiivvõimsus väheneb ning tulemuseks on pinge kollaps, mis releekaitse ja muu automaatika toime tõttu võib haarata vaid osa elektrisüsteemist. Kogu protsess kestab mõni minut.

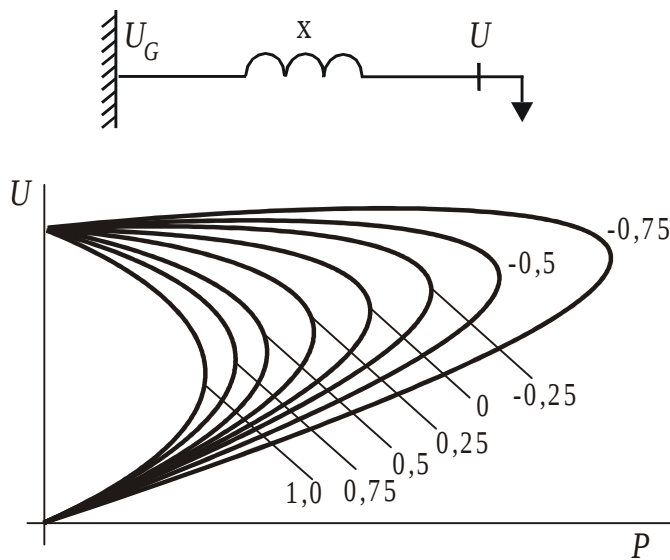
- *Pinge pikaajaline stabiilsus.* Kui elektrisüsteemi koormuse või ülekantava võimsuse juurdekasv on kiire näiteks hommikuse või õhtuse tippkoormuse ajal, põhjustab see reaktiivvõimsuse defitsiiti, mis nõuab süsteemi dispetšeri sekkumist (täiendavate reaktiivvõimsuse allikate sisselülitamine, koormuse osaline väljalülitamine). Mõne aja möödudes (kümnekond minutid) lülituvad ülekoormatud liinid ja trafod välja ning tulemuseks on süsteemi avarii. Negatiivselt mõjuvad siin ka seadmed, mis püüavad säilitada energiat (näiteks termostaatilised seadmed).
- *Koormuse dünaamika.* Elektrivõrgu pinge taastumine häiringu möödumisel sõltub suurel määral koormuse dünaamikast. Nii muutub asünkroonmootorite kiirus teatava inertsiga punktis 3.8 toodud diferentsiaalvõrrandi kohaselt. Kui häiringu kestel mootorite libistus tõuseb niivõrd, et elektriline võimsus muutub väiksemaks mehaanilisest võimsusest, siis mootorid seiskuvad. Analoogiline, s.o esimese astme diferentsiaalvõrrand kehtib ka konstantse energiaga koormuste ja trafode astmelülitite kohta (muutujaks koormuse juhtivus ja trafoastme number), ainult ajakonstandid on siin suuremad – ulatuvad mõne minutini. Seega on sarnane ka nende seadmete mõju pinge stabiilsusele.

Pinge dünaamiline stabiilsus on tihedalt seotud nurga- ehk sünkroonse stabiilsusega. Mõlemad protsessid toimuvad 10 sekundi jooksul ja sageli on võimatu osutada, kas generaatorite sünkronismist väljalangemist põhjustab pinge mittestabiilsus või vastupidi. Olukord on selge ainult lihtsaima elektrisüsteemi korral (p 1.1), kus tegemist on puhta sünkroonse stabiilsusega, ja konstantse pingega lattidelt toidet saava koormuse juhtumil (p 2.7), kus on esindatud puhas pinge stabiilsus. Sellega seoses võib sünkroonset stabiilsust nimetada ka **generaatori stabiilsuseks** ja pinge stabiilsust **koormuse stabiilsuseks**.

5.2 Pinge stabiilsuse lihtsustatud käsitlemine

Pinge stabiilsus määratakse üldjuhul süsteemi talitlust kirjeldavate diferentsiaalvõrranditega. Lihtsustatult võib pinge staatilist stabiilsust vaadelda karakteristikute $U = U(P)$ ja $Q = Q(U)$ põhjal. Lisaks lihtsusele on siin eeliseks nähtuse arusaadav sisu. Need karakteristikuid võib leida tavalise püsitalitluse arvutusprogrammide abil.

Punktis 2.7 tuletati asünkroonmootori karakteristik aseskeemi alusel. Samalaadne aseskeem ja seosed kehtivad ka juhtumil, kui tegemist on konstantse takistusega aktiivkoormusega. Oluline on tähele panna, et koormustakistuse väärtusel $r = x$, kus x on ülekande takistus, saavutatakse aktiivvõimsuse suurim väärtus. Vaatleme siinkohal veidi üldisemat juhtumit, kus tegemist on nii aktiiv-

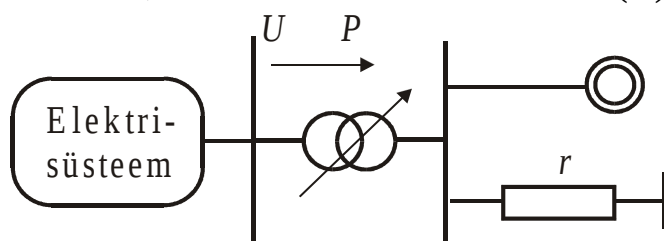


(pingest sõltumatu) reaktiivvõimsusega. Konstantse takistusega reaktiivvõimsuse allika (kondensaatori) korral oleks olukord teine.

Joonis 5.3 Koormuse $U = U(P)$ karakteristikud erinevatel $\tan \varphi$ väärtustel

$Q = Q(U)$ parvena, täiendava muutujana aktiivvõimsus P . Sageli iseloomustavad karakteristikud $Q = Q(U)$ olukorda paremini, kuna pinge sõltub põhiliselt reaktiivvõimsusest. Näide seda tüüpi karakteristikute kasutamise kohta on punktis 2.7.

Vaatleme, kuidas karakteristikute $U = U(P)$ abil selgitada pinge häiringujärget



Joonis 5.4 Elektrisüsteemi põhimõtteskeem

kui reaktiivkoormusega. Joonisel 5.3 on aseskeem ja karakteristikud $U = U(P)$, mis vastavad reaktiiv- ja aktiivvõimsuse suhte $\tan \varphi$ erinevatele väärtustele. Näeme, et ülekantava võimsuse maksimum sõltub oluliselt reaktiivvõimsuse tarbimisest/genereerimisest.

Oluline on siinjuures tähele panna, et tegemist on etteantud

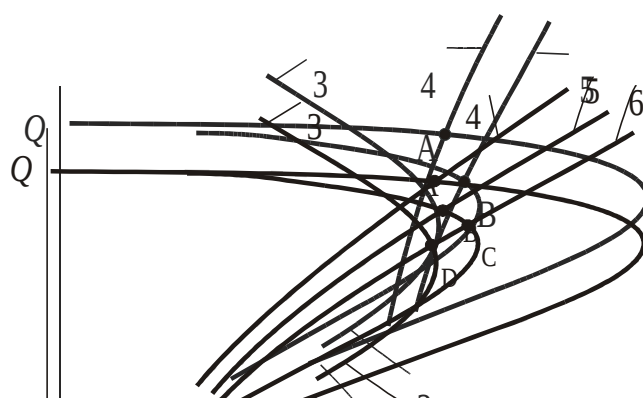
Kõverate $U = U(P)$ parve, kus täiendavaks muutujaks on $\tan \varphi$, võib esitada ka kõverate

stabiilsust. Joonisel 5.4 on elektrisüsteemi põhimõtteskeem, kus tegemist on asünkroon- ja konstantse aktiivtakistusega koormusega. Arvestatakse ka võimalikku konstantse energiaga koormust, trafode reguleerimist ja generaatorite voolu piiramist.

Joonisel 5.5 on kolm süsteemi karakteristikut ning koormuse karakteristikud, mis vastavad olukorrale, kus asünkroonkoormus on 75% kogukoormusest (vastab tööstuskoormusele). Karakteristikud on järgmised:

- 1) süsteemi karakteristik enne häiringut,
- 2) süsteemi karakteristik peale häiringut (osa seadmeid välja lülitatud),
- 3) süsteemi karakteristik peale (ergutus)voolu piiramist,
- 4) koormuse karakteristik normaalolukorras,
- 5) koormuse karakteristik peale trafoastmete ümberlülitamist (+10%).

Trafoastmete ümberlülitamine toimub vahepealse pinge languse ajal. Kui trafoastmete



Joonis 5.5 Karakteristikud $U = U(P)$, kui

ümberlülitamine puudub, võib koormus kasvada konstantse energiaga tarbijate tõttu. Joonisel tähistab A esialgset tööpunkti ja B tööpunkti peale häiringut. Kuna peale voolu piiramist tööpunkt puudub, siis tähendab see, et tegemist on pinge kollapsiga. Olukorra täpsem analüüs diferentsiaalvõrrandite alusel näitab, et veel enne staatilise stabiilsuse kadumist, millele eeltoodud arutelu vastab, kaotab stabiilsuse asünkroonkoormus. Igal juhul ei ole antud olukorras peale häiringut, mis otseselt mittestabiilsust ei põhjusta, süsteemi normaalne talitus võimalik.

Joonisel 5.6 on sama olukorda kujutatud juhul, kui konstantse takistusega koormus on 75%

Joonis 5.6 Karakteristikud $U = U(P)$, kui konstantse takistusega koormus on 75%

(vastab koormusele elekterkütte korral). Siin on kuuendana esitatud karakteristik, mis arvestab nii trafo pingeastmete muutust kui konstantse energiaga tarbijaid. Jooniselt näeme, et tööpunktid on olemas kõikides võimalikes situatsioonides, kaasa arvatud juhtumil, kus generaatori voolu piiratakse (tööpunkt D).

5.3 Keeruka süsteemi pinge stabiilsus

Pinge stabiilsuse määramine üldjuhul, s.o keerukas elektrisüsteemis, toimub põhimõtteliselt niisamuti, sageli ka samal ajal kui sünkroonse stabiilsuse hindamine – süsteemi talitlust kirjeldavate diferentsiaalvõrrandite alusel. Kui eesmärgiks on määrata staatiline stabiilsus, siis diferentsiaalvõrrandid lineariseeritakse ning stabiilsust hinnatakse sellekohaste kriteeriumide järgi. Dünaamilise stabiilsuse hinnang saadakse (mittelineaarsete) diferentsiaalvõrrandite numbrilise lahendamise teel. Diferentsiaalvõrrandid koostatakse uuritava nähtuse alusel, pidades silmas tulemuste vajalikku täpsust. Selleks tutvutakse esmalt süsteemi elementide staatiliste ja dünaamiliste omadustega.

5.3.1 Ülekandesüsteemi reaktiivvõimsuse kompenseerimine ja reguleerimine on enamasti efektiivne tee nii aktiivvõimsuse suurima väärtuse tõstmiseks kui ka pinge stabiilsuse tagamiseks. Reaktiivvõimsuse kompenseerimine võib toimuda nii piki- kui põiklülitusena ning olla aktiivne või passiivne. Aktiivne kompenseerimine tähendab reaktiivvõimsuse reguleerimist pinge või mõne muu suuruse järgi. Tavalised kompenseerimisseadmed on pikilülituses kondensaatorid ning põiklülituses kondensaatorid, reaktorid ja staatilised reaktiivvõimsuse allikad.

Elektriliinide põhilised parameetrid on induktiivtakistus x ja mahtuvuslik juhtivus b . Nende parameetrite väärtus sõltub liinide konstruktsioonist, mis on määratud nimipingega, ja muidugi liini pikkusest. Mahtuvusliku juhtivuse tõttu

genereerib liin reaktiivvõimsust $Q_G = U^2 b$. Induktiivtakistus põhjustab aga reaktiivvõimsuse kadu $Q_K = I^2 x$. Näeme, et liin genereerib suhteliselt konstantset võimsust. Seevastu kaovõimsus sõltub voolust ja ka ülekantavast võimsusest. Liini poolt genereeritav ja tarbitav reaktiivvõimsus on võrdsed, kui kantakse üle *naturaalvõimsus* P_0 , mis on leitav liini *lainetakistuse* z_0 kaudu

$$z_0 = \sqrt{\frac{x}{b}}, \quad P_0 = \frac{U^2}{z_0}$$

Kui edastatav võimsus on suurem või väiksem võrreldes naturaalvõimsusega, siis liin kas tarbib või genereerib reaktiivvõimsust. Probleeme tekib pikkade liinide (üle 300 km) korral, kus alakoormatud liini pinget liigse tõusu vältimiseks tuleb rakendada šunteerivaid reaktoreid.

Pika liini suur induktiivtakistus piirab edastatavat võimsust. Ülekande induktiivtakistuse vähendamiseks kasutatakse pikilülituses kondensaatoreid. Need genereerivad reaktiivvõimsust $I^2 x_C$, mis sõltub voolu ruudust ja on seega isereguleeruv, mitte nagu põiklülituses kondensaatorite või reaktorite võimsus. Kondensaatorid paigutatakse piki liini ühte või mitmesse lülituspunkti. Kondensaatoritele lisaks kuulub komplekti kaitse- ja reguleerimisseadmeid.

Pikikompenseerimise üks probleem on võimalik pinget tõus kondensaatoril. Kui kahe paralleelliini korral üks liin välja lülitub, kahekordistub teise liini vool ja ka genereeritav võimsus ja pinget. Lühikest aega (mõni minut) lubatakse kondensaatoritele pinget kuni 150% nimipingest. Selle aja jooksul peab süsteemi dispetšer võimsusvood elektrivõrgus ümber jaotama. Ohtlikuks võib kujuneda ka liigpinge, mis tekib kondensaatoril, kui koormatud liin välja lülitatakse.

Pikilülituses kondensaator ja liini induktiivsus moodustavad jadaresonantsahela, mille sagedus on umbes 1 Hz. Sellise sagedusega voolud võivad tekitada generaatorite ja turbiinivõllide mehaanilise võnkumise – **subsünkroonse resonantsi**, mille tulemusel kaob süsteemi stabiilsus. Avarii vältimiseks tuleb rakendada võnkumist summutavaid ja kaitseseadmeid.

Põiklülituses kondensaatorite ja reaktorite eesmärk on reguleerida ja stabiliseerida pinget. Kondensaatorite reguleerimine (ümberlülitamine) toimub mehaaniliselt või elektroonselt kondensaatorpatarei türistorreguleerimisega või staatiliste reaktiivvõimsuse allikate (koosneb kondensaatorpatareist ja eel-magneetimisega reaktorist) abil. Mehaanilise lülitamise eelis on seadmete lihtsus, puudus – lülituse astmelisus, mittepiisav lülituskiirus ja lülitamisel tekkivad siirdeprotsessid.

Võib tõdeda, et reaktiivvõimsuse piki- ja põikkompenseerimine tõstavad nii elektrisüsteemi sünkroonset stabiilsust kui pinget stabiilsust. Kondensaatorite pikilülituse eeliseks on reaktiivvõimsuse isereguleerimine. Ka saab nende

ümberlülitamistega juhtida elektrivõrgu aktiiv- ja reaktiivvõimsusvooge. Põiklülituses kondensaatorid staatiliste reaktiivvõimsuse allikate koosseisus võimaldavad lisaks stabiilsuse tõstmisele reguleerida pinget ja likvideerida liigpingeid.

Efektiivsed pinge reguleerimise ja süsteemi stabiilsuse tõstmise vahendid on ka sünkroonkompensaatorid tänu ergutuse kiiretoimelisele reguleerimisele. Sünkroonkompensaatorite maksumus ja käidukulud on aga tunduvalt suuremad kui staatilistel seadmetel, mistõttu püütakse nende ülesseadmist tänapäeval vältida.

5.3.2 Koormuse staatilised ja dünaamilised omadused mõjutavad oluliselt pinge stabiilsust. Arvestada tuleb ka jaotusvõrgu omadusi. Tõsi, suurtarbijad ühendatakse otse ülekandevõrku, kuid see ei muuda kuigi palju olukorda.

Jaotusvõrgu osadest on kõige olulisemad trafod, kuna nende takistus on suhteliselt suur. Astmelülititega trafod toidavad toiteliine (fiidreid), millega võib olla ühendatud suur hulk tarbijaid. Vajaduse korral reguleeritakse kaugemate tarbijate pinget täiendavalt ümberlülitatavate kondensaatorite abil. Pinge reguleerimise ja stabiilsuse seisukohalt ongi suurema tähtsusega suhteliselt pikad liinid, mis on iseloomulikud maavõrkudele.

Kuigi koormus sõltub ka sagedusest, on pinge stabiilsuse seisukohalt oluline (reaktiiv)koormuse ja pinge vaheline seos. Kiirete siirdeprotsesside korral saavad otsustavaks koormuse dünaamilised omadused. Aeglastes protsessides (mõni minut) võib lähtuda koormuse staatilistest karakteristikutest (p 2.6). Lisaks sellele tuleb aeglastes protsessides võtta arvesse pinge reguleerimise mõju. Kui talitluse muutused ei välju reguleerimispiirkonnast, tähendab see, et koormuse pinge ja seega ka koormus on konstantsed. Täpsemal käsitlemisel arvestatakse koormuse ja regulaatorite (näiteks trafode astmelülitid) karakteristikuid eraldi.

Koormuse dünaamilised omadused määravad ennekõike ära asünkroonmootorid. Pinge langemisel asünkroonmootorite libistus ja ka tarbitav reaktiivvõimsus suurenevad, mis omakorda kiirendab pinge alanemist. Kui pinge langeb alla 0,7–0,9 nimipingest, võivad asünkroonmootorid seiskuda. Vahetult peale pinge järsku langust ei muutu rootori inertsitõttu mootori libistus ja seega on ka mootori takistus mõne sekundikümnendiku jooksul konstantne. Selline “impedantsilöök” põhjustab pinge järsu languse. Üldjuhul võib asünkroonkoormuse talitlust määrata diferentsiaalvõrrandi alusel (p 3.8).

Lisaks asünkroonmootorite omadustele mõjutavad koormuse dünaamikat

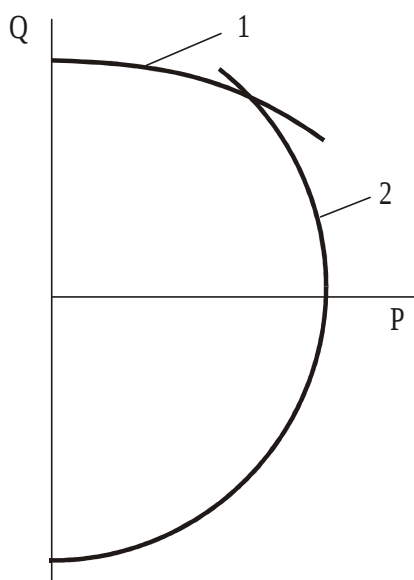
- kaitseseadmed, muuhulgas alapingekaitse, mis lülitab pinge liigsel langemisel osa mootoritest välja
- mootorite elektroonsed kiirusregulaatorid
- elektronseadmete reguleeritud (stabiliseeritud) toide

- konstantse energiaga tarbijad (kütteseadmed, konditsionaatorid jm)
- ergutuse automaatse reguleerimisega sünkroonmootorid ja kohaliku tähtsusega sünkroongeneraatorid
- kohalik reaktiivvõimsuse kompenseerimine ja pinge reguleerimine
- liini pingekao kompenseerimine
- järjestikku asetsevate astmelülititega trafod

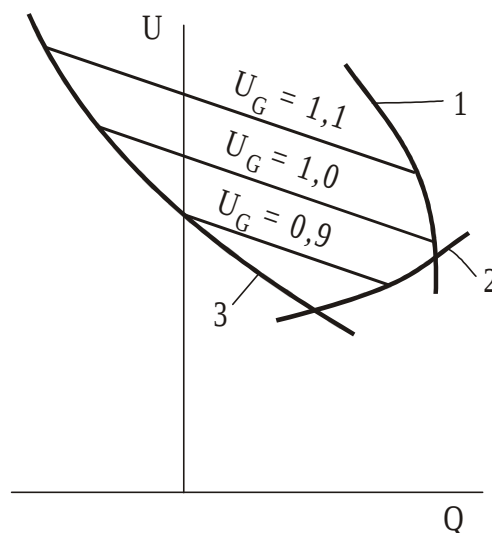
5.3.3 Generaatorite karakteristikud on sageli määratud ergutuse regulaatoritega. Regulaatorite toimet kiiretes siirdeprotsessides vaadeldi neljandas peatükis. Peatugem siinkohal aeglastel protsessidel kestusega mõni minut, kus määravaks on generaatori staatori ja rootori ülekoormus ning sageduse automaatne reguleerimine.

Generaatori võime väljastada või tarbida reaktiivvõimsust on piiratud staatori- ja rootorimähise kuumenemisega ning sõltub genereeritavast aktiivvõimsusest. Olukorda iseloomustavad joonisel 5.7 esitatud kõverad $Q = Q(P)$. Siin vastab esimene karakteristik rootori-, teine staatorivoolu piirväärtusele. Karakteristikute lõikepunkt näitab generaatori võimsusteguri nimiväärtust.

Pinge stabiilsuse seisukohalt on veelgi olulisem teada võrgupinge sõltuvust generaatori reaktiivvõimsusest $U = U(Q)$ ja sellega seonduvaid piirväärtusi. Joonisel 5.8 osutab esimene piirkõver rootori-, teine staatorivoolule ning kolmas kõver generaatori sünkroonse stabiilsuse piirile. Esitatud karakteristikud vastavad aktiivvõimsusele $P = 0,8$ (suhtelistes ühikutes). Neid võib esitada ka kolmemõõtmelise PQU-karakteristikuna (joonis 5.9).



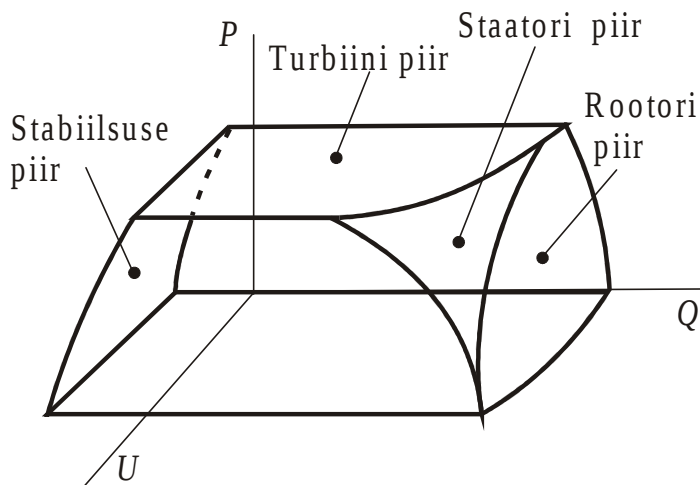
Joonis 5.7 Generaatori $Q = Q(P)$ karakteristikud



Joonis 5.8 Generaatori $U = U(Q)$ karakteristikud

Generaatorite käit on soovitatav planeerida nii, et reaktiivvõimsus oleks vähim (võimsustegur suurim). 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. Elektrivõrgu pinge tuleb hoida võimalikult kõrge. Staatilise stabiilsuse (nii sünkroonse kui pinge stabiilsuse) säilitamiseks peavad pingeregulaatorid olema kiiretoimelised.



Joonis 5.9 Generaatori PQU-karakteristik

Pinge dünaamilise stabiilsuse määravad protsessid, mis järgnevad koormustõukele. Lisaks koormuse sisselülitamisele põhjustab koormustõuke generaatorite ja ülekandeliinide väljalülitamine, sest muudes liinides tõuseb vool ja suurenevad süsteemis summaarsed kaod, kuna need on proportsionaalsed voolu ruuduga. Koormus jaguneb vahetult peale koormustõuget süsteemis ümber. Seadmetes salvestunud elektromagnetilise energia muutuste tõttu tekib siirdeprotsess, mis kestab sekundi murdosa. Järgneb generaatorite nurkade üldjuhul võnkuv muutumine, mis kestab mõne sekundi. Protsessi mõjutab generaatorite mehaaniline inerts. Nurkade muutusega kaasneb keskmise pöörlemiskiiruse (sageduse) langus. Sellele reageerivad turbiinide kiirusregulaatorid, mis peatavad 3–5 sekundi jooksul sageduse languse ja tõstavad 10–20 sekundi pärast sageduse nimisageduse lähedale. Protsessi kiirendab pinge ja sageduse langusest tingitud vähenev koormus. Kuna turbiinide kiirusregulaatorid toimivad astaatiliselt (vältimaks reguleerimise mittestabiilsust), ei tõuse sagedus esialgsele tasemele. Sageduse taastamine, mis võib kesta kuni 15 minutit, on selleks ette nähtud elektrijaamade ülesanne. Ühendatud energiasüsteemis peaks koormustõukest tingitud genereeriva võimsuse kasvu katma sama allsüsteemi elektrijaamad. Kui allsüsteemi reservist ei piisa, antakse osa võimsust juurde süsteemiliinide kaudu.

Seega on elektrisüsteemi stabiilsuse säilitamiseks koormustõuke korral vajalik mõne minuti jooksul tõsta elektrijaamade võimsust. Kõige efektiivsemad on hüdrojaamad, mille võimsust saab tõsta 10–20% minutis. Soojusjaamade võimsuse tõstmise kiirus sõltub katlaseadmete ehitusest. Orienteeriv kiirus on 2–3% minutis. Mainitud kiirused kehtivad pöörleva reservi kohta. Gaasiturbiin- jaamad, mis on harilikult külmas reservis, käivitamine nõuab 5–20 minutit.

Stabiliseerimisprotsessile töötavad vastu eespool vaadeldud generaatori voolupiirangud ning trafode astmelülite taastatud pinge, mis tõstab koormust.

Ülekoormatud võivad saada ka elektriliinid ja trafod, kus lisaks ülekuumemisele suurenevad kaod (proportsionaalselt voolu ruuduga). Seetõttu tuleb vahetult peale koormustõuget korraldada süsteemi talitus ümber nii, et ülekoormused kaoksid ja seadmed oleksid võimalikult ühtlaselt koormatud.

5.3.4 Alalisvooluülekanne võib olla kujundatud nii pika liinina kui ka vahelüli kujul, mis seob kahte mittesünkroonselt töötavat elektrisüsteemi. Pikas merealuses kaabelliinis rakendatakse tavaliselt alalisvooluülekanne, kuna pikk vahelduvvoolukaabelliin ei ole suure mahtuvusliku juhtivuse tõttu võimalik. Alalisvooluülekanne aitab tagada ka ühendelektorisüsteemi stabiilsust.

Elektrisüsteemile on alalisvooluülekanne ebasoodne "koormus", kuna muundurid (alaldid ja invertorid) tarbivad reaktiivvõimsust 50–60% edastatavast aktiivvõimsusest. Reaktiivvõimsust kompenseerivad reguleeritavad põiklülituses kondensaatorid. Alalispinget ja -voolu reguleeritakse türistoride süütenurga ja astmelülitiga trafo abil. Kuna süütenurka saab kiiresti (1–10 ms jooksul) muuta, siis toimub juhtimine algul selle abil. Seejärel püütakse trafo astmelülitiga (kiirus 5–6 sek astme kohta) esialgset süütenurka taastada. Püsitalitluses reguleerib alaldi tavaliselt voolu (võimsust) ja invertor pinget. Reguleerimise eesmärk on säilitada ennekõike konstantne võimsus või vool. Juhtimisseadmed on veel ülekande käivitamiseks, peatamiseks ja reversiks ning avariide vältimiseks (elektrisüsteemi võnkumiste summutamine, sageduse reguleerimine jm).

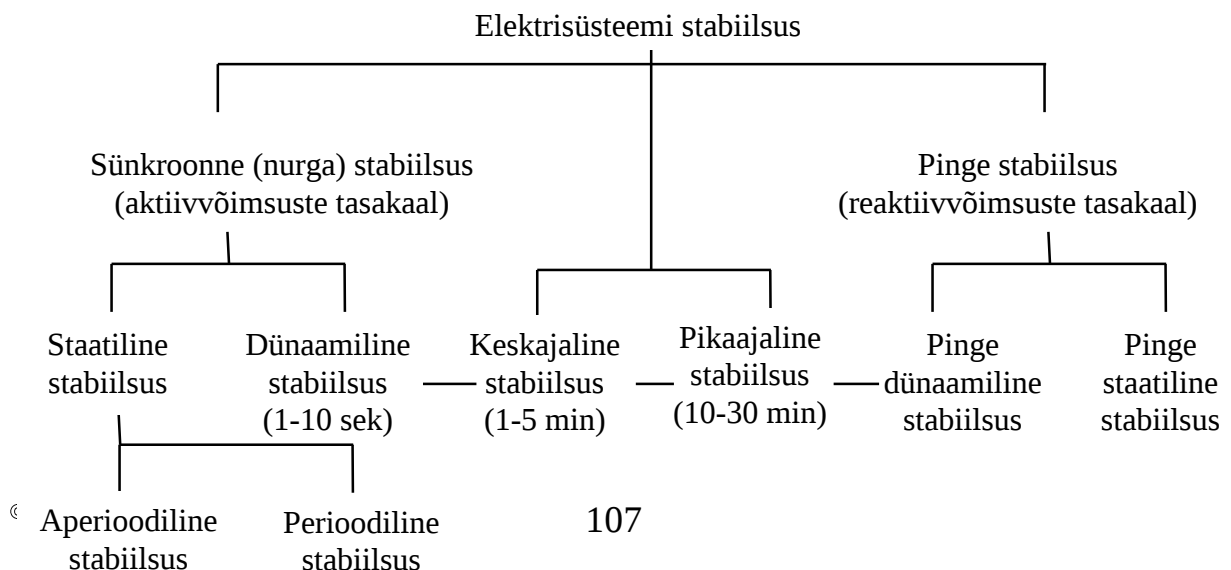
Alalisvooluülekande juhtimisega on probleeme nii püsitalitluses kui siirdeprotsesside ajal. Püsitalitluses on ülesandeks seadmete ülekoormuste vältimine vahelduvvooluvõrgu pinge muutumisel. Alalisvooluülekandele kõige ohtlikum talitluse häiring on invertoripoolses võrgus pinge langemine, mida tingib genereeritava reaktiivvõimsuse (sünkroonkompensaatorite või staatiliste reaktiivvõimsuse allikate) nappus või lühis. Sel juhul võib esineda ventiilide kommutatsioonivigu, mille tagajärjel tekib lühis alalisvooluseadmetes. Kui alaldipoolse vahelduvvooluvõrgu pinge langeb, siis väheneb pinge ka alalisvooluliinil. Kuna reguleerimissüsteem püüab pinget (süütenurga muutmise teel) taastada, võib tekkida ülekoormus. Kaitseks on muuhulgas ülekande ümberlülitamine konstantsele voolule. Kuigi ülekantav võimsus sel juhul väheneb, on see siiski parem kui seadme väljalülitamine. Perspektiivsed on alalisvooluseadmete juhtimisseadmed, mis lülitavad voolu suure sagedusega (kHz) sisse ja välja. Sel juhul on võimalik vältida enamikku mainitud raskustest, muuhulgas reguleerida aktiiv- ja reaktiivvõimsust teineteisest sõltumatult.

5.3.5 Keeruka süsteemi stabiilsus nõuab erilist tähelepanu, kui tegemist on nõrkade sidemete, pikkade liinide ja ülekoormatud seadmetega. Ülekoormus võib johtuda näiteks koormuse kasvust erakordselt külmal talvel. Mõni iseloomulik pinge mittestabiilsuse juhtum maailmas [2].

- *Rootsi, 27 detsember 1983.* Lahklüliti rike põhjustab kahe 400 kV liini väljalülitamise. Umbes 8 sekundit hiljem lülitub ülekoormuse tõttu välja üks

220 kV liin. Astmelülititega trafod püüavad tarbijate pinget tõsta. Tulemuseks on koormuse kasv ja 50 sekundi pärast lülitub veel üks 400 kV liin välja. Süsteem jaguneb allsüsteemideks, mida koormuse sagedusjärgne väljalülitamine ei suuda vältida. Kokku jäävad elektrita tarbijad umbes 11 400 MW ulatuses.

- *Tokio, 23 juuli 1987.* Ilm oli kuum ja koormus seetõttu erandlikult kõrge. Peale keskpäeva tõusis koormus 400 MW/min. Vaatamata kõikide olemasolevate põikkondensaatorite sisselülitamisele langes 500 kV süsteemi pinge esialgu 460 kV-ni ja umbes 4 minuti pärast 370 kV-ni, mis viis pinge kollapsini. Tarbijad kaotasid toite 8168 MW ulatuses. Koormuse kiire tõusu kõrval aitasid kollapsi tekkele kaasa õhukonditsionaatorid.
- *Prantsusmaa, 19 detsember 1987.* Kell 7.00 kuni 8.00 tõusis koormus 4600 MW. Eelmisel päeval samal ajal oli tõus olnud ainult 3000 MW. Kuna puuduv võimsus tuli katta impordi arvel, siis pinge ülekandeseadmetes langes, mis vähendas Prantsusmaa soojusjaamadest edastatavat võimsust. Kell 8.26 lülitus välja esimene ülekoormatud 400 kV liin, kuigi süsteemi dispetšer oli saanud hoiatuse juba 20 minutit varem. Järgnes kaskaadne protsess, mille tulemusena süsteem lagunes. Süsteemi taastamise käigus toimus veel teinegi pinge kollaps, nii et elektrisüsteemi normaalne talitus õnnestus taastada alles kell 12.30. Tarbijad jäid toiteta 100 GW ulatuses, kahju hinnati 200–300 miljonile dollarile.
- *USA Florida, 1982.* Toimus neli sarnast avariid, mis algasid võimsa generaatori avariilisest väljalülitumisest. Järgnes pinge langus, pikkade liinide ülekoormus ja väljalülitumine 1–3 minuti jooksul. Sageduse languse tõttu lülitasid automaadid välja umbes 2000 MW koormust.
- *Belgia, 4. august 1982.* Testimise ajal lülitus välja 700 MW agregaat. 45 sekundi pärast vähendas ergutusahelate kaitse süsteemis genereeritavat reaktiivvõimsust. Pinge langes ja 4 minuti pärast lülitus ülekoormuse tõttu välja kolm generaatorit ning 4,5 minuti pärast veel kaks. Järgnes pinge kollaps.



Ülaloodud näidetes oli tegemist suhteliselt aeglase protsessidega. Kiiremates protsessides, mis võtavad 1–10 sekundit, mängib olulist osa generaatorite rootorite võnkumine. Selle tõttu ei õnnestu sünkroonset stabiilsust ja pinge stabiilsust enamasti eraldada, vaid olukorda tuleb käsitleda kui energiasüsteemi ühtset dünaamilist protsessi. Joonisel 5.10 on elektrisüsteemi stabiilsuse klassifikatsioon, mis seda ühtsust rõhutab.

Joonis 5.10 Elektrisüsteemi stabiilsuse klassifikatsioon