

6 STABIILSUSE TAGAMISE PROBLEEMID

6.1 Stabiilsuse tõstmise vahendid ja moodused

Elektrisüsteemi stabiilsuse tõstmise vahendeid ja moodused on kokkuvõtlikult esitatud tabelis 6.1.

Tabel 6.1

Stabiilsuse tõstmise vahendid ja moodused

Vahend, moodus	Staat stab		Dün stab	
	Aper	Per	Sünkr	Res
GENERAATORID				
Reaktiivtakistuse vähendamine	++	+	+	+
Inertsikonstandi suurendamine	--	--	++	-
Summutusmähiste olemasolu	--	+	-	+
Automaatne ergutusregulaator	++	++	-	-
Automaatne kiirusregulaator	--	--	++	++
Elektriline pidurdamine	--	--	++	+
ELEKTRIVÕRK				
Nimipinge tõstmine	++	+	+	+
Takistuse vähendamine	++	+	+	+
Trafode neutraalide maandamine	--	--	+	--
AUTOMAATIKA				
Releekaitse kiiretoimelisus	--	--	++	+
Automaatne taaslülitus	--	--	+	+
Koormuste sagedusjärgne väljalülitamine	--	--	--	++
Süsteemi jagamine allsüsteemideks	--	--	+	--
Avariitõrjeautomaatika	++	++	++	++
MUUD				
Kõrge pingeniivo	++	+	+	+
Suur genereeriva võimsuse reserv	++	++	++	++

Tabelis on kasutatud järgmisi tähiseid:

- ++ – mõjub otsustavalt
- + – mõjub positiivselt
- – mõjub vähe või kaudselt
- – ei mõju

Generaatorite reaktiivtakistuse vähendamine suurendab maksimaalset võimsust ja mõjutab seega otseselt aperioodilise stabiilsuse piiri. Ülejäänud stabiilsuse

liikidele avaldab reaktiivtakistuse vähendamine samuti positiivset mõju, kuigi vähemal määral. Generaatorite reaktiivtakistust vähendatakse õhupilu suurendamisega. Selleks et säilitada magnetvoogu staatoris, tuleb ühtlasi tõsta ergutussüsteemi (rootori) võimsust, mille tõttu kasvavad generaatori mõõtmed ja maksumus.

Generaatori inertsikonstandi toimest dünaamilisele stabiilsusele oli juttu punktis 3.3.1. Inertsikonstandi väärtus on proportsionaalne rootori läbimõõdu ruuduga. Seega suurendab inertsikonstandi tõstmine jälle generaatori mõõtmeid ja maksumust. Olgu märgitud, et eriti väike inertsikonstant (2–3 korda väiksem) on kapselgeneraatoritel. Nende generaatorite dünaamilise stabiilsuse tagamine on selle tõttu tõsine probleem.

Summutusmähised paigaldatakse hüdrogeneraatorite rootoritele kõrgemate harmoonikute ja resonantsliigpingete vähendamiseks ning rootori võnkumiste summutamiseks. Turbogeneraatoril annavad sama efekti protsessid rootori kehas. Summutusmähised mõjuvad positiivselt perioodilisele stabiilsusele ning soodustavad eri sagedusega allsüsteemide tõmbumist sünkronismi. Summutusmähiste suhteliselt suure takistuse tõttu on nende mõju siiski väike.

Generaatori ergutuse automaatse reguleerimise soodsat toimet staatilisele stabiilsusele kirjeldati punktides 2.3 ja 4.6. AER-i mõju dünaamilisele stabiilsusele on väike, sest järsul seisundi muutumisel säilib mõnda aega rootori aheldusvoog ja ühtlasi ka elektromotoorjõud E'_q sõltumata ergutusregulaatori toimest.

Süsteemi resünkroniseerimise põhiline vahend on turbiini automaatne kiirusregulaator (p 3.9). Sünkroonsele dünaamilisele stabiilsusele avaldab AKR mõju siis, kui auruturbiinid on erikonstruktsiooniga (p 3.3.5).

Generaatorite elektriline pidurdamine on ette nähtud sünkroonse dünaamilise stabiilsuse tõstmiseks. Resulteeruvalle stabiilsusele mõjub elektriline pidurdamine kaudselt, luues soodsad algtingimused (väikese sageduse erinevuse allsüsteemide vahel).

Elektrivõrgu nimipinge tõstmine mõjub nagu takistuse vähendamine, sest suhteline takistus väheneb võrdeliselt nimipinge ruuduga. Otsesteks takistuse vähendamise võteteks on lisaks juhtmete lõhestamisele ja pikikompenseerimisele ennekõike parallelelementide (trafod, liinid) ülesseadmine ja nende konstruktsiooni muutmine. Need võtted on nagu nimipinge tõstminegi aga eriti kulukad.

Trafode neutraalide maandamine vähendab skeemi nulljärgnevustakistust ja ühes sellega ebasümmeetrilise lühise ajal ülekantavat võimsust (p 2.5.1). Praktiliselt võib neutraalide maandamist varieerida pingetel 35 kV ja vähem, mis süsteemi stabiilsuse seisukohalt ei oma erilist tähtsust.

Elektrisüsteemide automaatikast tuleb lisaks juba generaatorite ja turbiinidega seoses vaadeldud seadmetele ennekõike mainida releekaitset, mis otseselt mõjutab sünkroonset dünaamilist stabiilsust. Automaatne taaslülitamine mõjub dünaamilisele stabiilsusele soodsalt vaid siis, kui taaslülitamine on edukas (p 3.3.4). Resulteeruvale stabiilsusele mõjuvad mainitud seadmed positiivselt soodsamate algtingimuste loomise tõttu. Vajadus koormuse automaatseks sagedusjärgseks väljalülitamiseks (ASV) tekib genereeriva võimsuse defitsiidi korral. ASV on oluline vahend süsteemi resünkroniseerimisel ja elektrisüsteemi töökindluse tagamisel.

Elektrisüsteemi jagamist üksteisest sõltumatuteks allsüsteemideks rakendatakse, et vältida avarii laienemist. Selle abinõu puudus on võimsusdefitsiidi tekkimise võimalus mõnes allsüsteemis.

Siin mõeldakse avariitõrjeautomaatika all seadmeid, mis on otseselt ette nähtud süsteemi stabiilsuse tõstmiseks, ennekõike türistorjuhtimisega piki- ja põiklülituses kondensaatoreid ja reaktorite regulaatoreid. Põiklülituses staatiline reaktiivvõimsuse allikas tagab püsitalitluses lülituspunktis konstantse pinget. Seetõttu väheneb ülekande arvutuslik takistus ja tõuseb staatilise stabiilsuse piir. Pikilülituses kondensaator vähendab otseselt ülekande takistust ja on staatilise stabiilsuse seisukohalt eriti soodne. Kui kondensaatoritega ühendada paralleelselt (türistor)juhitav reaktor, on tulemuseks staatilise reaktiivvõimsuse allikaga analoogiline seade. Kummagi seadme regulaatorid võib sätestada nii, et need summutaksid nii aktiivvõimsuse aeglast kui kiireid võnkumisi (võldiksid subsünkroonset resonantsi ja perioodilist mittestabiilsust).

Kõrge pingeniivoo mõjub analoogiliselt takistuse vähendamisega positiivselt ennekõike aperiodilisele stabiilsusele. Tuletagem meelde, et pingeniivood elektrisüsteemis saab tõsta vaid reaktiivvõimsuse täiendava genereerimise teel. Trafode ülekandetegurite muutmine jaotab vaid pinget lokaalselt ümber. Seega on pingeniivoo tõstmise eelduseks reaktiivvõimsuse reserv.

Suur genereeriva võimsuse (ka reaktiivvõimsuse) reserv mõjub positiivselt kõikidele stabiilsuse liikidele. See on aga kõige kulukam stabiilsuse tõstmise moodus.

Mainitud abinõud on mõeldud ennekõike sünkroonse stabiilsuse tõstmiseks. Samad vahendid mõjuvad soodsalt ka pinget stabiilsusele, seda enam, et neid stabiilsuse liike on tasakaaluseisundi ja kiirete protsesside korral raske üksteisest eraldada. Pinget stabiilsusega seotud aeglase protsesside juhtimiseks (muuhulgas operatiivpersonalilt) on järgmised vahendid.

- Mobiilne aktiivvõimsuse reserv kujutab endast hüdro- ja gaasiturbiine, mis normaaltalitluses on välja lülitatud. Nende kiire käivitamine (mõne minuti jooksul) avariolukorras väldib pinget kollapsi.
- Reaktiivvõimsuse reserv on üks olulisem pinget stabiilsuse tõstmise vahend. Kasutada võib nii mehaaniliselt kui elektroonselt juhitavaid kondensaatorpatareisid ning staatilisi reaktiivvõimsuse allikaid. Oluline on hoida

reaktiivvõimsuse reservi generaatoritel, kus see on efektiivselt reguleeritav. Siin on probleemiks, kuidas vältida staatori ja rootori ülekoormuskaitse mittesoovitavat (stabiilsuse seisukohalt enneaegset) tegevust.

- Trafode astmelülitite mõju sõltub sellest, kuhu need kuuluvad. Kõrgepinge-trafode astmelülitid säilitavad kõrget pingeniivood ja ka pinge stabiilsust. Jaotusvõrgu trafode astmelülitid püüavad häiringu tõttu langenud koormuse pinget aga tõsta, suurendades põhivõrgus ülekantavat aktiiv- ja reaktiivvõimsust, mis omakorda kiirendab pinge alanemist. Selle tõttu on jaotusvõrgu trafode astmelülitid soovitat põhivõrgu pinge languse ajaks blokeerida.
- Alalisvooluülekanne, kuigi see tekitab stabiilsuseprobleeme, võib teisalt olla stabiilsuse tagamise vahend. Kui allsüsteemis on näiteks aktiivvõimsuse defitsiit, võib aktiivvõimsust alalisvooluülekanne kaudu kiiresti lisada. Reaktiivvõimsuse defitsiidi korral saab aga ülekantavat võimsust vähendada, mis vabastab alalisvooluülekanne seotud reaktiivvõimsuse allikad. Alalisvooluülekandel võivad olla regulaatorid, mis püüavad summutada võnkumisi ja pingemuutusi vahelduvvooluvõrgus. Igal juhul ei edasta alalisvooluülekanne teises süsteemis esinevaid talitluse häiringuid.
- Koormuse juhtimine, mis seisneb tarbijate osalises väljalülitamises alapingekaitse või operatiivpersonali poolt, on nii tehniliselt kui majanduslikult efektiivne. Kuigi see põhjustab toitekatkestusi, 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.

6.2 Nõuded stabiilsusele

Elektrisüsteemi mittestabiilsus toob endaga kaasa katkestusi tarbijate elektrivarustuses, põhjustades majanduslikku kahju. Teisalt nõuab stabiilsuse tagamine abinõude rakendamist, mis on samuti seotud kulutustega. Küsimus on seega majanduslikult optimaalse lahenduse leidmises, mis teatavasti saavutatakse arvutuslike kulude minimeerimise teel. Arvutuslike kulude hulka loetakse ka võimalikust mittestabiilsusest tingitud kahju, õigemini selle matemaatilist ootust, sest kahju ise on oluliselt juhuslik suurus. Arvutuslikud kulud avalduvad kujul

$$A = K + E + E[Y] \quad (6.1)$$

kus K – kapitalikulud,

E – käidu- ja hooldekulud,

$E[Y]$ – kahju matemaatiline ootus.

Mittestabiilsusest tingitud majanduslikku kahju hinnata on võrdlemisi raske. Kahju sõltub oluliselt avarii iseloomust. Kui tegemist on vähetähtsa elektriijaama sünkronismist väljalangemise või allsüsteemidevahelise nõrga sideme katkemisega, siis on tagajärjeks vaid energiasüsteemi ökonoomsuse langus lühikese ajavahemiku (vähem kui 1 tund) vältel, mis tekitab suhteliselt vähe kahju. Teine äärmus on elektrisüsteemi täielik kustumine, mil on katastroofilised tagajärjed. Sel juhul katkeb tarbijate toide suurel territooriumil pikaks ajaks (mitu tundi). Kannatada saavad kõik (ka tähtsad) tarbijad, sest tavalised töökindluse tõstmise võtted (kahepoolne toide jm) ei toimi.

Toitekatkestusest põhjustatud kahju sõltub tarbija omapärast. Mõnel tarbijal jääb toitekatkestuse tõttu vaid tootmine seisma. Kahju on sel juhul võrreldav andmata jäänud elektrienergia maksumusega. Enamasti on aga kahju toitekatkestuse ootamatuse tõttu tunduvalt, vähemalt suurusjärgu võrra suurem. Kahju on veelgi suurem, kui katkestus kahjustab tehnoloogilist protsessi (tekitab palju praaki) või, mis veelgi hullem, rikub seadmeid ja seab ohtu inimestele.

Võimalikust mittestabiilsusest põhjustatud kahju praktiline hindamine on võrdlemisi küsitav. Seetõttu ei saa konkreetseid stabiilsuse tõstmise ülesandeid valemi (6.1) alusel lahendada. Praktikas rakendatakse selle asemel mitmesuguseid *normatiive*. Need koostatakse samuti arvutuslike kulude hindamise alusel. Ka tuleb valemit (6.1) silmas pidada normatiivide rakendamisel.

Staatiline stabiilsus on alati vajalik, sest talitus peab olema realiseeritav. Küsimus on *varuteguri* väärtuses. Selle arvutamine on problemaatiline. Otseselt, s.t suurima võimsuse P_m ja vaadeldava võimsuse P võrdlemise teel, võib varuteguri määrata vaid lihtsaimale süsteemile (üksikule elektrijaamale) valemiga.

$$k_P = \frac{P_m - P}{P} 100\%$$

Tavaliselt nõutakse, et selliselt arvutatud varuteguri väärtus peab olema vähemalt 20% normaalses ja 8% avariijärgses talitluses.

Keerukas süsteemis ei ole suurimat võimsust arvutada võimalik. Siin leitakse varutegur minimaalse kriitilise sõlmepinge U_{kr} alusel

$$k_U = \frac{U_N - U_{kr}}{U_N}$$

Süsteemidevahelise nõrga sideme stabiilsust hinnatakse samuti suurima ja vaadeldava võimsuse alusel, lisades viimasele vahetusvõimsuse võimaliku hälbe ΔP

$$k_P = \frac{P_m - P - \Delta P}{P} 100\%$$

Erinevalt staatilisest stabiilsusest ei ole sünkroonse dünaamilise stabiilsuse tagamine vältimatu, sest suured häiringud (lühised) esinevad harva. Normatiivides osutatakse, et kontrollitav seisund peab olema raske, kuid mitte erandlik. Häiringuna vaadeldakse tavaliselt lühiseid. Nõutakse näiteks, et olenevalt lühise kohast peab stabiilsus olema tagatud järgmiselt:

- 35 kV võrk – kolmefaasilisel lühisel
- 110–330 kV võrk – kahefaasilisel lühisel maaga
- 500 kV võrk – kahefaasilisel lühisel maaga või ühefaasilisel lühisel

Teisisõnu, mis tahes jaotusvõrgu (35 kV) lühis ei tohi põhjustada süsteemi mittestabiilsust. Nõuded stabiilsusele lühise korral süsteemivõrgus (330 kV ja enam) sõltuvad aga olukorrast. Kui stabiilsuse säilitamine kahefaasilisel lühisel maaga nõuab liiga suuri kulutusi ja on võimalik vältida avarii laienemist, siis piisab stabiilsuse säilitamisest vaid ühefaasilise lühise korral.

Resulteruva stabiilsuse vajalikkuse hindamine taandub asünkroontalitluse lubatavuse kontrollile. Kui asünkroontalitus on lubatud, siis tuleb luua tingimused süsteemi automaatseks resünkroniseerimiseks.

Ka pinge (koormuse) staatilise stabiilsuse varutegurit hinnatakse kriitilise pinge järgi. Nõutakse, et varu, mida hinnatakse nii aktiiv- kui reaktiivvõimsuse järgi, peab olema vähemalt 10%. Seejuures tuleb erilist tähelepanu pöörata reaktiivvõimsuse kompenseerimisele staatiliste kondensaatoritega, sest need mõjuvad koormuse stabiilsusele negatiivselt. Kontrollida tuleb ka pinge dünaamilist stabiilsust, kusjuures häiringuna vaadeldakse muuhulgas reaktiivvõimsuse allikate avariilist väljalülitumist.

6.3 Stabiilsuse arvutamise tingimused

Elektrisüsteemi stabiilsust määratakse mitmesugustel eesmärkidel ja tingimustel. Sagedamad arvutuste liigid on järgmised.

- *Orienteerivad arvutused*, mis tehakse eelprojekteerimisel ja perspektiivsete talitluste arvutamisel. Siin määratakse süsteemi staatiline ja dünaamiline stabiilsus lihtsustatult (skeemilihtsustused, mööduva elektromotoorjõu konstantsus jm).
- *Täpsustatud arvutused* tehakse detailprojekteerimisel, kus muuhulgas valitakse stabiilsuse tõstmise vahendid. Arvutatakse staatilist ja dünaamilist stabiilsust võimalikult täpsete meetoditega. Hinnatakse ka resulteruvat stabiilsust ja koormuse stabiilsust. Vajaliku täpsuse saavutamiseks

kasutatakse põhjalikke võrrandeid ning arvestatakse koormuse staatilisi ja dünaamilisi karakteristikuid.

- *Seadistusarvutuste* eesmärk on valida releekaitse ja automaatikaseadmete sätted. Nõutakse suurt täpsust, kuid ainult vastava seadme ja stabiilsuse liigi suhtes.
- *Käiduarvutused* tehakse eesmärgiga valida talitluse kontrolli ja automaatikaseadmete sätted. Siia kuulub ka avariide analüüsimine. Tulemuste õigsus on kindlustatud sellega, et algandmed on teada maksimaalse täpsusega.
- *Uurimuslikud arvutused* selgitavad mingi uue nähtuse olemust. Püritakse suurimale täpsusele selle nähtuse suhtes.

Arvutustes lähtutakse enamasti normaaltalitlusest maksimaalkoormuse korral. Staatilist stabiilsust (ka koormusele) kontrollitakse ka avariijärgses talitluses. Vaadeldakse veel võimalikke remonditalitlusi ja lühiajalisi eriti raskeid talitlusi.

6.4 Stabiilsuse arvutamise vahendid

Elektrisüsteemi stabiilsuse arvutused on mahukad. Juba elektrisüsteemide moodustamise algusaastatest (30. aastad) alates on nende arvutamiseks kasutatud arvutusvahendeid.

Enne numbriliste arvutite ilmumist olid stabiilsuse arvutamisel põhilisteks abivahenditeks füüsikalised arvutusmodelid ehk *arvutuslauad*, mis elektrisüsteemi püsiseisundeid modelleerisid analoogia põhjal. Kuna stabiilsuse määramisel on oluline koht elektromotoorjõu ja pinge vahelisel nurgal δ , siis võis kasutada vaid vahelduvvoolu arvutuslaudu.

Põhimõtteliselt sobivad stabiilsuse määramiseks kõige enam *analoogarvutid*, mis modelleerivad siirdeprotsesse. Analooaarvutite praktilist rakendamist takistab lahendatava ülesande väike võimalik maht, mis on tingitud operatsioonivõimendite arvu piiratusest. Ka on ülesannet analooaarvutile ette valmistada tülikas.

Tänapäeval tehakse stabiilsuse arvutusi *numbriliste arvutitega*. Nende põhiline eelis on ülesande sisestamise ja väljastamise (infotöötuse) mugavus, puuduseks aga asjaolu, et diferentsiaalvõrrandite numbriline lahendamine nõuab keerukate elektrisüsteemide korral palju arvutustööd. Stabiilsuse arvutamiseks ettenähtud programmpakettidesse kuuluvad järgmised moodulid:

- püsiseisundi arvutamine
- null- ja vastujärgnevustakistuste arvutamine
- oma- ja vastastikuste takistuste arvutamine
- aperiodilise stabiilsuse piiride määramine
- perioodilise stabiilsuse piiride määramine

- sünkroonse dünaamilise stabiilsuse arvutamine
- asünkroonse talitluse ja resünkroniseerimise arvutamine
- pinge staatilise stabiilsuse arvutamine
- pinge dünaamilise stabiilsuse arvutamine

Põhimõtteliselt sobiks siirdeprotsesside ja stabiilsuse arvutamiseks kõige enam *hübriidarvuti*, mis ühendab numbrilise ja analoogarvuti. Sellise komplekti numbrilises arvutis toimuks andmete ettevalmistamine ja lahendataks algebralisi võrrandeid. Arvuti analoogosa lahendaks diferentsiaalvõrrandeid. Kahjuks ei ole hübriidarvutid seni seeriatootmises, mis teeb nad kättesaadamatuks.

Kõik mainitud vahendid eeldavad protsesside matemaatilist modelleerimist ja vastavat teooriat. Kui teooria puudub või teooriat on vaja kontrollida, tuleb kasutada füüsilist modelleerimist. Seade, mida nimetatakse *elektro-dünaamiliseks mudeliks*, kujutab endast vähendatud mastaabis elektrisüsteemi. Pöörlevad masinad (sünkroongeneraatorid ja asünkroonmasinad) on selles erikonstruktsiooniga, mis võimaldab muuta nende parameetreid (takistust, inertsikonstanti). Masinate võimsus on enamasti 10 kW piires. Samal viisil modelleeritakse ka trafosid. Elektriline modelleeritakse T- või Π -kujulisele aseskeemile vastavate (südamikuta) induktiivtakistuste ja kondensaatoritega. Turbiine ja töomasinaid asendavad alalisvoolumootorid ja -generaatorid, sest nende talitlust on lihtne reguleerida. Releekaitse ja automaatika võib dünaamilises mudelis olla naturaalne.

KIRJANDUS

1. Kundur, P. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994.
2. Taylor, C. W. *Power System Voltage Stability*. McGraw-Hill, 1994.
3. Machowski, J., Bialek, J. W., Bumby, J. R. *Power System Dynamics and Stability*. John Wiley & Sons, 1998.
4. Левинштейн М. Л., Щербачев О. В. *Статическая устойчивость электрических систем*. Санкт Петербургский Государственный Технический Университет, 1994.
5. Веников В. А. *Переходные электромеханические процессы в электрических системах*. Высшая Школа, 1985.
6. Жданов П. С. *Вопросы устойчивости электрических систем*. Энергия, 1979.