

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Santa ĶIENE
Enerģētikas doktora programmas doktorante

**ELEKTROENERĢĒTISKO SISTĒMU DINAMISKO
PROCESU STABILIZĀCIJAS PROBLĒMAS UN
RISINĀJUMI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. ing., profesors
V. ČUVIČINS

Konsultants
Dr. sc. ing.
N. GUROVS

RTU Izdevniecība
Rīga 2010

UDK 621.311(043.2)
 Ѐi 080 e

Ѐiene S. Elektroenerģētisko sistēmu dinamisko
procesu stabilizācijas problēmas un risinājumi.
Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2010.-
33 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Enerģētikas institūta
2010.gada 19.jūnija lēmumu, protokols Nr.1

ISBN

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ
INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2010.gada 26.novembrī Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, 36.aud.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Valdes priekšsēdētājs, Dr.sc.ing. Vilnis Krēsliņš
Latvijas Elektroenerģētiķu un Energobūvnieku Asociācija

Vadošā pētniece, Dr.sc.ing. Anna Mutule
Latvijas Zinātņu akadēmija, Fizikālās enerģētikas institūts

Izpētes inženiere, Dr.sc.ing. Viktorija Neimane
Wattenfall R&D, Zviedrija

APSTIPRINĀJUMS

Es apstiprinu, ka esmu izstrādājusi doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Santa Ķiene(paraksts)

Datums

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tas satur ievadu, 7 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu un 2 pielikumus. Darba kopējais apjoms ir 163 datorsalikuma lappuses, kurās ietverti 74 attēli un 8 tabulas. Literatūras sarakstā norādīti 105 izmantotās literatūras avoti.

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā Fonda atbalstu Nacionālās programmas „Atbalsts doktorantūras programmu īstenošanai un pēc-doktorantūras pētījumiem” projekta „Atbalsts RTU doktorantūras attīstībai” ietvaros.

SATURS

PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE.....	5
PROMOCIJAS DARBA MĒRĶI UN UZDEVUMI.....	5
PĒTĪJUMA METODES	5
PROMOCIJAS DARBA ZINĀTNISKĀ NOZĪME	6
PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME	6
PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA	6
PUBLIKĀCIJAS	7
PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS	7
1. LIELU ENERĢĒTISKO APVIENĪBU DINAMISKIE PROCESI UN STABILITĀTE	7
2. APVIENOTO ENERGOSISTĒMU VADĪBA	9
3. ADAPTĪVĀS VADĪBAS IEDARBES NOTEIKŠANAS ALGORITMS 15	
4. DINAMISKO PROCESU ANALĪZEI NEPIECIEŠAMO MATEMĀTISKO MODEĻU IZVEIDE	22
5. ADAPTĪVĀS VADĪBAS IEDARBES PIELIETOŠANA FREKVENCES UN JAUDAS REGULĒŠANĀ	23
6. ADAPTĪVĀS VADĪBAS IEDARBES PIELIETOŠANA AVĀRIJAS REŽĪMU VADĪBĀ	25
7. ADAPTĪVĀS VADĪBAS IEDARBES PIELIETOŠANAS METODES PĀRBAUDE BALTIJAS APVIENOTĀS ENERGOSISTĒMAS MODELĪ	29
8. SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS TURPMĀKAM DARBAM ..31	
LITERATŪRA	33

PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE

Problēmas aktualitāte ir elektroapgādes drošuma un elektroenerģijas kvalitātes paaugstināšana ar energosistēmu normālu režīmu un pretavāriju vadības jaunu metožu palīdzību.

Lielu apvienotu energosistēmu veidošanās ir pasaules globalizācijas procesa neatņemama sastāvdaļa. Enerģētisku sistēmu apvienošana saistīta ar ievērojamām tehniskām un ekonomiskām priekšrocībām. Taču, energosistēmu apvienošanas rezultātā parādās arī vairākas būtiskas problēmas, kā, piemēram, nelokāls energosistēmu reakcijas raksturs uz režīma iedarbēm, energosistēmas kļūst komplicētākas, parādās liela energosistēmu darba režīmu nosacījumu un avārijas iedarbju daudzveidība, kas nosaka milzīgu skaitu avārijas situācijas u.c.

Energosistēmām attīstoties un kļūstot sarežģītākām īpašu aktualitāti iegūst drošuma, kā arī savstarpēji savienotu energosistēmu vadības kvalitātes problēma. Mūsdienās jaunu elektrostaciju un elektropārvades līniju būvniecība vides un citu ierobežojumu dēļ ir apgrūtināta, taču energouzņēmumi saskaras ar nepārtrauktu elektroenerģijas patēriņa pieaugumu un tirgus liberalizāciju, tāpēc energosistēmas tiek darbinātas tuvu stabilitātes robežām. Elektropārvades saites līniju noslogojums tad sasniedz maksimāli pieļaujamo caurlaides spējas robežu, līdz ar to energosistēmas ir daudz jutīgākas uz dažādiem elektrotīkla darba režīma traucējumiem. Noslogotā energosistēmā ir liels kaskādes avāriju iespējamības risks. Viena notikuma sekas ar kaskādes efektu var izplatīties uz plašiem energosistēmu rajoniem, izraisot ievērojamus tautsaimniecības zaudējumus, kā to parāda lielās sistēmu avārijas ASV, Kanādā un Eiropā.

Visi iepriekšminētie faktori paaugstina pareizas energosistēmu vadības organizācijas nozīmi. Šīs problēmas efektīvu risināšanu ierobežo nepietiekama energosistēmu vadāmība, galvenokārt, avārijas režīmos, kas ir saistīta ar pretavāriju vadības iekārtu ierobežotām principiālām iespējām. Tāpēc ir nepieciešama vadības sistēmu attīstīšana izveidojot jaunus, daudz pilnīgākus vadības principus un jaunus vadības līdzekļus.

PROMOCIJAS DARBA MĒRĶI UN UZDEVUMI

Promocijas darba mērķis ir energosistēmas dinamisko procesu stabilitātes paaugstināšana. Nostādītā mērķa sasniegšanai ir risināti sekojoši uzdevumi:

1. Ģenerators rotora kustības bilances veida un aprēķinātā aktīvās jaudas deficīta (pārums) veida dinamikas vienādojuma analīze.
2. Energosistēmas matemātisko modeļu izstrāde skaitlisku rezultātu iegūšanai energosistēmas funkcionēšanai laikā.
3. Vadības iedarbju pielietošanas algoritma izstrāde energosistēmas normālu režīmu optimālas vadības nodrošināšanai.
4. Vadības iedarbju pielietošanas algoritma izstrāde energosistēmas avārijas režīmu optimālas vadības nodrošināšanai.

PĒTĪJUMA METODES

1. Promocijas darba uzdevumu risināšanai galvenokārt tika izmantota datorprogramma MATLAB® un tās vizuālās modelēšanas pielikums SIMULINK®. Atsevišķos gadījumos izmantota arī datorprogramma PSCAD®.

2. Pētījumiem tika izveidoti un izmantoti dažādi matemātiskie modeļi – tradicionālajiem ģenerācijas avotiem, elektropārvades līnijām u.c., kā arī jauna darbības principa automātikas ierīcēm.

PROMOCIJAS DARBA ZINĀTNISKĀ NOZĪME

1. Izstrādāta pētījumu metodoloģija un matemātiskie modeļi, ar kuru palīdzību var veikt dažādus energosistēmas dinamisko procesu aprēķinus.
2. Dota dinamikas vienādojuma analīze, pēc kuras tiek noteikts energosistēmas reālais aktīvās jaudas deficīts (pārums).
3. Izstrādāts algoritms automātikas vadības iedarbju dozu noteikšanai normālu režīmu vadībai, kā arī pretavāriju vadībai pēc lielām avārijas iedarbēm, abos gadījumos nodrošinot augstu vadības precizitāti.
4. Izstrādāts energosistēmas avārijas režīmu optimālas vadības algoritms, kas paaugstina stabilitātes traucējumu novēršanas automātikas darbības efektivitāti.

PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

1. Piedāvātā jaunā metodika izmantojama ātrākai un precīzākai regulējošo iedarbju noteikšanai salīdzinājumā ar esošajiem paņēmieniem. Tāpat tā labāk piemērojas avārijas norises gaitai.
2. Izveidotā pētījumu metodoloģija un matemātiskie modeļi var tikt izmantoti dažādiem praktiskiem mērķiem, piemēram, energosistēmā notiekošo avārijas situāciju analīzei.
3. Izveidotie matemātiskie modeļi ir universāli – tos var izmantot dažādās energosistēmu darba režīmu aprēķinu programmās.

PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

1. „Energosistēmas Stabilitātes Uzturēšanas Problēmas Frekvences Regulēšanas Laikā,” RTU 47. Starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, Latvija, 2006. gada 12. – 14. oktobris.
2. „Stability Problems of Power System Control During Emergency, Caused by the Active Power Deficiency,” ECT 2007, 2nd International Conference on Electrical and Control Technologies, Kaunas, Lithuania, May 3 – 4, 2007.
3. „Frequency Control and Determination of Controlling Actions to Enhance Stability of Power System,” 4th Scientific Symposium „Elektroenergetika-2007”, Stara Lesna, Slovakia, September 19 – 21, 2007.
4. „Vadības Iedarbju Noteikšanas Metode Energosistēmas Stabilitātes Paaugstināšanai,” RTU 49. Starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, Latvija, 2008. gada 13. – 15. oktobris.
5. „Application of Actual Power Deficiency Value on Load Shedding,” ECT 2009, 4th International Conference on Electrical and Control Technologies, Kaunas, Lithuania, May 7 – 8, 2009.
6. „Application of New Emergency Control Principle in Power Systems,” 2009 IEEE Bucharest PowerTech Conference, Bucharest, Romania, 29 June – 2 July, 2009.

PUBLIKĀCIJAS

Starptautiski referējamos izdevumos:

1. Chuvychin, V., Gurov, N., Kiene, S. Power System Stability Maintenance Problems during Frequency Control. Scientific proceedings of Riga Technical University, Power and Electrical Engineering, 4th series. Riga: RTU, 2006, Vol.17, pp.52-58.
2. Chuvychin, V., Gurov, N., Kiene, S. Stability Problems of Power System Control During Emergency, Caused by the Active Power Deficiency. Scientific proceedings of the 2nd International Conference on Electrical and Control Technologies of Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania, May 3 – 4, 2007, pp.98-101.
3. Chuvychin, V., Gurov, N., Kiene, S. Frequency Control and Determination of Controlling Actions to Enhance Stability of Power System. Proceedings of 4th Scientific Symposium „Elektroenergetika-2007”, Stara Lesna, Slovakia, September 19 – 21, 2007, pp.709-712.
4. Chuvychin, V., Gurov, N., Kiene, S. Method for the Determination of Controlling Actions to Enhance Power System Stability. Scientific proceedings of Riga Technical University, Power and Electrical Engineering, 4th series. Riga: RTU, 2008, Vol.23, pp.31-36.
5. Chuvychin, V., Gurov, N., Kiene, S. Application of Actual Power Deficiency Value on Load Shedding. Scientific proceedings of the 4th International Conference on Electrical and Control Technologies of Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania, May 7 – 8, 2009, pp.298- 301.
6. Chuvychin, V., Gurov, N., Kiene, S. Application of New Emergency Control Principle in Power Systems. Proceedings CD of the IEEE Bucharest PowerTech Conference, Bucharest, Romania, 29 June – 2 July, 2009, 6 p.

PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, tas satur ievadu, 7 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu un 2 pielikumus. Darba kopējais apjoms ir 163 datorsalikuma lappuses, kurās ietverti 74 attēli un 8 tabulas. Literatūras sarakstā norādīti 105 izmantotās literatūras avoti.

1. LIELU ENERĢĒTISKO APVIENĪBU DINAMISKIE PROCESI UN STABILITĀTE

Šī nodaļa ir veltīta vispārējam lielu pasaules enerģētisko sistēmu apvienību, to apvienošanas priekšrocību un problēmu apskatam. Sniegts priekšstats par energosistēmas dinamisko procesu fizikālo būtību un stabilitātes novērtēšanas kritērijiem.

Energosistēmas drošs darbs ir lielā mērā atkarīgs no tās stabilitātes, kas ir saistīta ar visu sistēmā esošo ģeneratoru spēju rotēt sinhroni neatkarīgi no dažādiem sistēmas traucējumiem. Sakarā ar pieaugošo elektroenerģijas patēriņu un elektroapgādes drošuma nozīmi industrijai un sabiedrībai kopumā energosistēmas tiek paplašinātas, apvienojot vairāku valstu energosistēmas sinhronam darbam caur elektropārvades līnijām. Tādejādi, energoapvienību stabilitātes nodrošināšana iegūst arvien lielāku nozīmi [1].

Vēsturiski ir izveidojušās tādas lielas energosistēmu apvienības kā UCTE, NORDEL, IPS/UPS, Ziemeļamerikas savienojumi, kas apvieno vienas vai vairāku valstu pārvades

sistēmas operatorus (PSO) kopīgai sadarbībai ar mērķi koordinēt energosistēmu paralēlā darba režīmus, uzturēt energosistēmu stabilitāti un nodrošināt elektroenerģijas tirgus iespējas.

Pēc iespējas lielāku energoapvienību izveidošanas tendence parādās gandrīz visās valstīs, jo enerģētisku sistēmu apvienošana saistīta ar ievērojamām tehniskām un ekonomiskām priekšrocībām, salīdzinot ar atsevišķām elektrostacijām, kas caur savu elektrotīklu apgādā ar elektroenerģiju patērētājus [1]. Galvenās energosistēmu apvienošanas priekšrocības ir:

- atsevišķo agregātu uzstādītās jaudas palielināšana, uzlabojot to tehniskos raksturlielumus un samazinot elektroenerģijas izstrādes īpatnējās izmaksas, kā arī samazinot turbīnu īpatnējo metālietilpību un īpatnējo kurināmā patēriņu;
- apvienojamo energosistēmu summārā slodzes maksimuma samazināšana, un sekojoši to summārās uzstādītās jaudas samazināšana.
- summārās rezerves jaudas samazināšana.
- dažāda tipa elektrostaciju darba režīmu ekonomiskuma paaugstināšana, nodrošinot kurināmā ekonomiju un sekojoši samazinot elektroenerģijas pašizmaksu;
- elektroenerģijas tirgus iespējas;
- energosistēmu darba atvieglošana remontu un avāriju laikā.

Taču, neskatoties uz ievērojamām energoapvienību priekšrocībām, energosistēmu apvienošanas rezultātā parādās arī vairākas būtiskas problēmas [1]. Energoapvienību galvenās problēmas, kas rada grūtības energosistēmu stabilitātes uzturēšanai ir sekojošas:

- energosistēmas apvieno elektroenerģijas patērētājus lielā teritorijā, kas kopā ar augstu elektroenerģijas izstrādes koncentrācijas pakāpi izraisa nepieciešamību jaudas pārvadei no diezgan attālinātiem avotiem līdz patērētājiem. Tāpat rodas nelokāls energosistēmas reakcijas raksturs uz režīma iedarbēm.
- energosistēmas kļūst komplicētākas, parādās liela energosistēmas darba režīmu nosacījumu un avārijas iedarbju daudzveidība, kas nosaka milzīgu skaitu avārijas situācijas, t.i., sākuma nosacījumus avārijas procesiem, kurus jāidentificē un kuriem nepieciešams atrast pēc iespējas minimālas vadības iedarbes, kas nodrošinātu stabilitāti.
- energosistēmas tiek piesātinātas ar vadības, automātikas un regulēšanas sistēmām, un, uzliekot tām arvien atbildīgākus uzdevumus, paaugstinās šo sistēmu atteikumu cena, kā arī to pareizas organizācijas nozīme.

Lielākās avārijas energosistēmu apvienībās uzskatāmi atspoguļo to vadības problēmas. Tā, piemēram, 2003.gads raksturīgs ar piecām totālām avārijām energosistēmās – Ziemeļamerikā (14.augustā), Londonā (28.augustā), Skandināvijā (23.septembrī), Itālijā (28.septembrī) un Čīlē (7.novembrī), kurās liels skaits elektroenerģijas patērētāju lielos reģionos uz vairākām stundām palika bez elektroapgādes. Tāpat arī virkne citu energosistēmas avāriju ar ievērojamām negatīvām sekām ir notikušas pasaulē – 2003.gadā Atēnās, 2005. gadā Maskavā u.c. Pēdējā lielā avārija Eiropā notika 2006.gada 4.novembrī, kad pēc daudzu 380 kV un 220 kV elektropārvades līniju kaskādveidīgas atslēgšanas UCTE sistēma sadalījās trijās izolētās salās – Rietumu, Ziemeļaustrumu un Dienvidaustrumu. Bez elektroenerģijas palika vairāk nekā 15 miljoni patērētāju.

Elektroenerģētiskās sistēmās iekļauti tūkstoši ģeneratoru, transformatoru, simti tūkstoši kilometru elektropārvades līniju un miljoni patērētāju. Visi energosistēmas elementi funkcionē kā vienota sistēma. Energosistēmas pamatfunkcija ir droša patērētāju apgāde ar nepārtrauktu, noteiktas kvalitātes elektroenerģiju. Pamatfunkcijas izpildes kvalitāti raksturo

termins energosistēmas drošums, kas nosaka, ka energosistēmai jāatrodas normālā līdzsvara stāvoklī ar nemainīgiem, normatīvos noteiktas kvalitātes darba režīma parametriem (elektriskā jauda, spriegums, strāva, mašīnu elektrodzinējspēka EDS vektoru nobīdes leņķis, frekvence u.c.). Taču energosistēmu darba režīmi tiek pakļauti liелam skaitam traucējumu, no kuriem daži var parādīties nepārtraukti, piemēram, patērētāju skaita izmaiņas, daži retāk, taču ar potenciāli lielu bīstamību – ieslēdzot un atslēdzot ģeneratorus, elektropārvades līnijas, transformatorus, jaudīgas apakšstacijas (sloдzes mezglus), kā arī īsslēgumi, iekārtu bojājumi, izolācijas pārkļāšanās un caursīte, dažādu iekārtu un aparātūras nepareiza nostrāde, personāla kļūdaina darbība u.c. Jebkuri energosistēmas traucējumi izraisa dinamiskos procesus energosistēmā, kas nosaka energosistēmas režīma pāreju no kāda sākotnējā tās darba režīma uz citu. Sistēmas uzvedība šajā laikā tiek saukta par sistēmas dinamiku. Kā jebkurai dinamiskai sistēmai energosistēmas galvenais droša darba nosacījums ir tās stabilitāte. Stabilitāte tiek definēta kā energosistēmas spēja atjaunot darba režīma līdzsvarotu stāvokli pēc notikuša režīma traucējuma, saglabājot vairākumu režīma parametru pieļaujamās robežās tā, ka kopumā sistēma paliek netraucēta.

Līdz ar jaunu energosistēmu starpsavienojumu, tehnoloģiju un kontrolierīču attīstību, kā arī smagāku energosistēmu darba režīmu plānošanu ir radušās dažādas sistēmas stabilitātes formas – rotora leņķa stabilitāte, frekvences stabilitāte un sprieguma stabilitāte. Turklāt, rotora leņķa un sprieguma stabilitāti atkarībā no traucējuma lieluma var iedalīt statistiskajā (mazi traucējumi) un dinamiskajā (lieli traucējumi).

Apvienotajās energosistēmās galvenais stabilitātes nodrošināšanas uzdevums ir sinhrono mašīnu sinhronisma uzturēšana jeb rotora leņķa stabilitāte, kas saistās ar relatīvā leņķa starp sinhrono mašīnu EDS vektoriem uzturēšanu pieļaujamās robežās visā avārijas procesa laikā līdz jauna stacionārā režīma nostabilizēšanai un ko teorētiski var novērtēt ar noteiktiem statistiskās un dinamiskās stabilitātes kritērijiem [2].

Pēdējā laikā notikušās smagās sistēmas avārijas parāda, ka potenciālo energosistēmas darba drošuma un stabilitātes paaugstināšanas iespēju realizācijai īpaša uzmanība ir jāvērs uz efektīvas režīmu vadības sistēmas izveidošanu, pretavāriju vadības līdzekļu attīstību.

2. APVIENOTO ENERGO SISTĒMU VADĪBA

Šī nodaļa ir veltīta apvienoto energosistēmu galveno vadības uzdevumu apskatam, atsevišķi izdalot normālo režīmu vadību un avārijas režīmu vadību. Vispārīgi ir aplūkoti energosistēmās pielietotie avārijas režīmu vadības līdzekļi un to darbības principi.

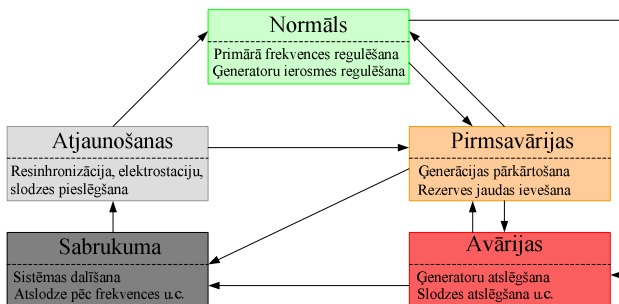
Liелas energoapvienības vadības organizācija ir sarežģīta zinātniski tehniska problēma. Energosistēmas galvenais uzdevums ir patērētāju droša, ekonomiska un kvalitatīva apgāde ar elektroenerģiju, kā realizēšana nav iespējama bez vadības automatizācijas līdzekļu un sistēmu pielietošanas. Energosistēmas darba drošumam ir nepieciešama nepārtraukta automātiska energosistēmu darba režīmu kontrole un vadība ar mērķi novērst energosistēmas stabilitātes traucējumus [3].

Energosistēmu vadības mērķi:

- nepārtraukta ģenerētās un patērētās jaudu bilances uzturēšana. Elektrisko enerģiju nevar uzkrāt pietiekamā daudzumā, tāpēc ir nepieciešama ātri pieejama un vadāma ģenerācijas rezerve;
- noteikta elektroapgādes drošuma un kvalitātes līmeņa nodrošināšana (sprieguma un frekvences vērtībām jābūt šaurās, stingri noteiktās robežās);
- minimālu izmaksu un minimālas ietekmes uz vidi nodrošināšana.

Energosistēmas vadības uzdevumi ir atkarīgi no noteikta energosistēmas stāvokļa, ko savukārt, nosaka energosistēmas darba režīma un pārejas procesa raksturs. Energosistēmā

var izdalīt piecus stāvokļus, kā parādīts 2.1. att. Atbilstoši katram energosistēmas stāvoklim ir izstrādāti un pielietoti vadības uzdevumi, lai nodrošinātu efektīvu rīcību katrā stāvoklī.



2.1. att. Energosistēmas stāvokļu klasifikācija

Energosistēmas drošuma priekšnoteikums ir normāls darba stāvoklis. Jebkurš cits stāvoklis pazemina drošumu un ir uzskatāms par nelabvēlīgu, tādejādi, energosistēmas stabilitātes nodrošināšanai ir nepieciešama efektīva darba režīmu vadība normālos un avārijas apstākļos, kam arī ir veltīts dotais promocijas darbs.

Energosistēmas frekvences un jaudas regulēšana

Viens no svarīgākajiem energosistēmas kvalitātes rādītājiem ir frekvence, un galvenais normālu režīmu vadības uzdevums ir frekvences regulēšana.

Sistēmas frekvencei jābūt uzturētai stingri noteiktās robežās [4]. Dažādās pasaules energosistēmās ir atšķirīgas frekvences regulēšanas teorētiskās nostādnes. To reglamentē katras valsts ģeogrāfiskās, tehniskās un ekonomiskās īpatnības. Tipiska UCTE frekvences regulēšanas struktūra izpilda trīs regulēšanas pakāpes, kas tiek sauktas par primāro, sekundāro un terciāro regulēšanu. Apvienotajās energosistēmās tiek pielietotas visas trīs regulēšanas formas. Mazākās izolētās energosistēmās sekundārā regulēšana var neeksistēt kā tāda. Dažādu frekvences regulēšanas pakāpju realizācija var būt dažāda atkarībā no ģenerācijas avotu tipiem, apvienības izmēriem, ekonomiskiem apsvērumiem un konkrētās apvienības tradīcijas.

Dotajā promocijas darbā detalizēti ir apskatīta tikai primārā frekvences regulēšana, kuras mērķis ir atjaunot bilanci starp ģenerēto un patērēto jaudu pie noteikta frekvences līmeņa pēc dažādiem bilances līdzsvara traucējumiem.

Ģeneratoru rotācijas frekvence un jauda vispārīgā gadījumā ir atkarīga no turbīnā laika momentā ievadītā enerģijas nesēja daudzuma, tādejādi, frekvence tiek regulēta ar ģeneratoru rotoru apgriezienu ātruma regulatoriem [4].

Primārā frekvences regulēšana ir proporcionāla tipa ātrdarbīgā regulēšana, kuras darbības laiks sastāda 0-30 s pēc ģenerācijas un slodzes jaudu bilances traucējuma, un to izpilda saskaņā ar ģeneratoru rotoru apgriezienu ātruma regulatoriem uzdotu statisko raksturlīkni, kas parādīta 2.2. att. (a).

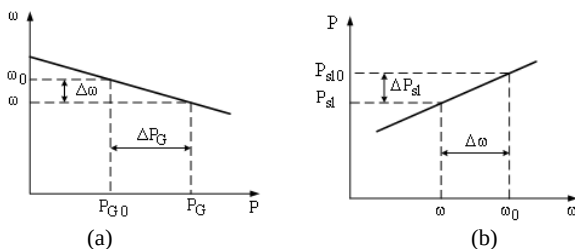
IPS/UPS sistēmā primāro regulēšanu praktiski neizmanto, jo sistēmas frekvenci nosaka apvienība, kurā frekvences regulēšanu veic īpaši izdalītas elektrostacijas. Tāda tipa regulēšanu sauc par astatisko, kad sistēmas frekvence teorētiski paliek nemainīga pie jebkurām slodzes izmaiņām. Šajā gadījumā agregātu jaudai jābūt 8-10% no sistēmas jaudas.

Tomēr, pasaules prakse pierāda, ka frekvences regulēšanā jāpiedalās katrai apvienības sistēmai.

Tāpēc, lai sadalītu slodzi starp paralēli strādājošiem agregātiem, primārajai regulēšanai nozīmēto ģeneratoru apgriezīenu ātruma regulatoriem tiek uzdotas statistiskās raksturlīknes, kuru slīpumu raksturo statisma koeficients k_{stat} . Statisma koeficients nosaka pakāpi, par cik izmainīsies turbīnas jauda un sekojoši arī jauda ģeneratora izejā ΔP_G izmainoties sistēmas frekvencei par lielumu Δf :

$$k_{\text{stat}} = \frac{\Delta f}{f_0} \cdot \frac{P_{G0}}{\Delta P_G}, \quad (2.1)$$

kur ΔP_G - ģenerētās jaudas izmaiņa [MW], P_{G0} - ģeneratoru nominālā jauda [MW], f_0 - nominālā sistēmas frekvence [Hz], $\Delta f = f - f_0$ - frekvences izmaiņa [Hz], f - faktiskā sistēmas frekvence [Hz].



2.2. att. Statiskās raksturlīknes: (a) agregāta; (b) slodzes

Hidroelektrostacijās statisma koeficientu parasti var mainīt aptuveni 0-10% robežās. Savukārt siltumelektrostacijās (sevišķi lielas jaudas) statisma koeficients ir neregulējums (aptuveni 4-6%).

Frekvences novirze sistēmā izraisīs ne tikai ģeneratoru jaudas, bet arī slodzes jaudas izmaiņu, tā kā enerģosistēmā ir virkne patērētāju, kuru jauda ir atkarīga no frekvences pirmajā, otrajā un pat trešajā pakāpē. Slodzes jaudas atkarību no frekvences izmaiņām enerģosistēmā sauc par slodzes regulējošo efektu, un to raksturo slodzes statistiskā raksturlīkne, kas parādīta 2.2. att. (b). Slodzes statistiskās raksturlīknes slīpumu nosaka slodzes regulējošā efekta koeficients k_{reg} , un tas raksturo dažāda sastāva patērētāju slodzes aktīvās jaudas izmaiņu ΔP_{sl} mainoties frekvencei enerģosistēmā par lielumu Δf :

$$k_{\text{reg}} = \frac{\Delta P_{sl}}{P_{sl0}} \cdot \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (2.2)$$

kur ΔP_{sl} – slodzes jaudas izmaiņa [MW], P_{sl0} – slodzes nominālā jauda [MW].

Slodzes regulējošā efekta koeficienta vērtība var samērā būtiski mainīties diennakts laikā, gan patērētāju satura slodzē, gan arī sprieguma atkarības no frekvences maiņas dēļ.

Raksturīgākā slodzes regulējošā efekta koeficienta vērtība dažādām slodzēm un energosistēmām ir aptuveni 2. Kopumā šī vērtība svārstās salīdzinoši nelielās robežās.

Tādējādi, primārās regulēšanas gadījumā ar statisko raksturlielni aktīvās jaudas bilance tiek atjaunota pie frekvences, kas atšķiras no nominālās. Frekvences līmeni pēc jaudu bilances traucējuma nosaka frekvences primārajā regulēšanā iesaistīto ģeneratoru devums, kas ir atkarīgs no rotora apgriezienu ātruma regulatora statisma koeficienta un primārās regulēšanas jaudas rezerves, kā arī slodzes regulējošā efekta koeficients.

Lai atjaunotu frekvenci līdz nominālam līmenim, kā arī atjaunotu primārās frekvences rezultātā izmainītās starsistēmu pārplūdes jaudas līdz to plānotajām vērtībām tiek pielietota sekundārā frekvences regulēšana, kas ir lēndarbīga proporcionāli-integrālā tipa regulēšana, ko izpilda ar centrālo regulatoru.

Šāda pakāpju veida frekvences un aktīvās jaudas regulēšanas metode var aizņemt vairākus desmitus minūtes, kas negatīvi atsaucas uz energosistēmas darba režīmu pārejas procesus kvalitāti. Ir nepieciešama uzlabota frekvences regulēšanas sistēma pārejas procesa kvalitātes paaugstināšanai.

Avārijas režīmu vadība

Lielāki energosistēmas darba režīma traucējumi izraisa straujākus režīma parametru pārejas procesus, kas, savukārt, var izraisīt energosistēmas avārijas. Avārijas, kas notiek pārvades sistēmā ar plašiem elektroenerģijas patērētāju atslēgumiem, ir diezgan retas, taču tās rada lielu negatīvu ietekmi uz daudzām sabiedrības aktivitātēm. Tāpēc īpaša nozīme ir energosistēmās pielietotajai avārijas režīmu vadībai.

Avārijas režīmu vadībai atbilstoši uzskaitītajiem energosistēmas stabilitātes veidiem ir jānodrošina sekojoši uzdevumi:

- energosistēmu paralēla darba stabilitātes traucējumu novēršana, t.i., relatīvā lēnķa starp sinhrono mašīnu EDS vektoriem uzturēšana pieļaujamās robežās;
- asinhronās gaitas pārtraukšana, ja stabilitātes traucējumu novēršana nav izdevusies;
- frekvences, sprieguma un strāvas pieļaujamo robežu pārsniegšanas novēršana.

Apvienotajās energosistēmās automātiskā pretavāriju vadība galvenokārt vērsta uz pirmā uzdevuma izpildīšanu, tā kā asinhronā gaita, nepieļaujamās frekvences, sprieguma un strāvas novirzes vairākumā gadījumos parādās vai nu pēc energosistēmas stabilitātes traucējuma, vai arī pēcavārijas apstākļos, kas tuvi stabilitātes robežai. Tādēļ stabilitātes saglabāšana vairākumā gadījumos nodrošina arī pārējo uzdevumu izpildi.

Pretavāriju vadības realizāciju nodrošina pretavāriju automātikas (PA) iekārtas. Lielajās Ziemeļamerikas un Rietumeiropas valstu energosistēmās pretavāriju automātika tiek definēta kā speciālās aizsardzības shēmas (*Special Protection Schemes*) vai korektīvas iedarbes shēmas (*Remedial Action Schemes*).

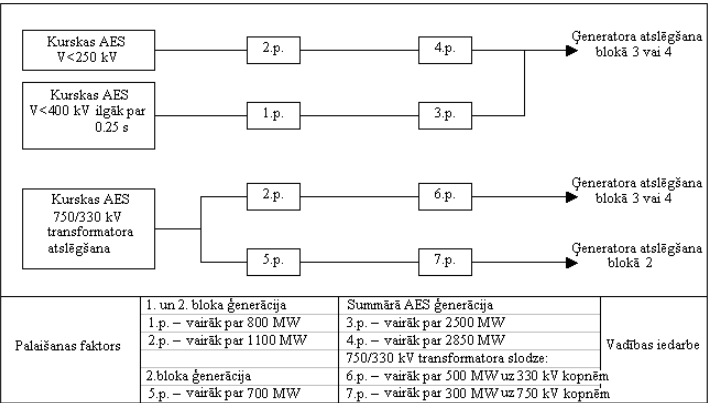
Pretavāriju automātikas iekārtas ir paredzētas, lai noteiktu energosistēmas straujas parametru novirzes no pieļaujamiem līmeņiem, kas var izraisīt smagas energosistēmas avārijas, un nodrošinātu noteikta veida dozētu vadības iedarbi, lai novērstu fiksētās parametru novirzes [2], [3], [5].

Šobrīd pasaulē tiek pielietota dažādu veidu pretavārijas automātika. PA atbilstoši to veicamajam uzdevumam var būt ģeneratoru atslēgšana, slodzes atslēgšana, atslodze pēc frekvences, sistēmas sadalīšana, turbīnas vārstu regulēšana, asinhronās gaitas novēršana, ģeneratoru elektriskā bremzēšana u.c. Viens PA veids var izpildīt vairākas darbības funkcijas atkarībā no situācijas energosistēmā, kā, piemēram, IPS/UPS sistēmā pielietotā Stabilitātes traucējumu novēršanas automātika (STNA), kuras mērķis ir jaudas bilances

atjaunošana pēc avārijas iedarbēm, pazeminot ģenerējamo jaudu enerģosistēmas daļā ar jaudas pārpalikumu un atslēdzot slodzi enerģosistēmas daļā ar jaudas deficītu.

Avārijas režīmu vadību var klasificēt divās kategorijās: iepriekš noteikta un reālā laika avārijas režīmu vadība. Šobrīd pasaulē pamatā ir tikai iepriekš noteiktā avārijas režīmu vadība, kas darbojas saskaņā ar iepriekš aprēķinātām avārijas situācijām enerģosistēmās. Par aprēķina pamatu tiek pieņemtas vissmagākās avārijas situācijas, pie kurām nepieciešamas maksimālās vadības iedarbes. Aprēķinu veikšanas vispārpieņemtie līdzekļi ir mainstrāvas elektrotīkla statistiskie modeļi, fiziskie modeļi, analogās un ciparu skaitļošanas iekārtas.

Pēc avārijas režīma fiksācijas esošo PA var iedalīt divās grupās: PA ar avārijas režīmu fiksāciju pēc elementu stāvokļa un PA ar avārijas režīmu fiksāciju pēc kontrolējamo parametru izmaiņas. Pirmajā gadījumā PA ir projektēta, lai reaģētu uz kādu noteiktu notikumu kombināciju, kā, piemēram, 2.3. att. parādītā Krievijas enerģosistēmas Kurskas AES atslēgšanas automātikas loģiskā iekārta. Savukārt, otra veida PA balstās uz elektrisko parametru mērījumiem un darbojas pie noteiktiem robežkritērijiem, kā, piemēram, automātiskā atslodze pēc frekvences.



2.3. att. Kurskas AES atslēgšanas automātikas loģiskās iekārtas piemērs

Viens no PA svarīgākajiem darbības kritērijiem ir precizitātes prasība jeb pareizas vadības iedarbes apjoma izvēle. Esošo pretavāriju automātiku nostrādes iestatījumi, kā arī vadības iedarbes apjoma noteikšana balstās uz iepriekš veiktiem aprēķiniem dažādiem enerģosistēmu darba režīmiem un avārijas situācijām [2],[3],[5],[6].

Loģisko shēmu izmantošanas gadījumā katra vadības līdzekļa maksimālais apjoms tiek noteikts kā vislielākais pēc visām aprēķinu avārijas situācijām. Piemēram, ģeneratoru atslēgšanas apjoms, kas jāparedz enerģosistēmas k-tajā mezglā, tiek noteikts sekojoši:

$$P_{GA,k} = \max\{P_{GA,kj}\}, \quad (2.3)$$

kur $P_{GA,kj}$ - nepieciešamais ģeneratoru atslēgšanas apjoms k-tajā mezglā pie j-tās aprēķinu avārijas situācijas.

Maksimālais atslodzes apjoms $\Delta P_{\text{atsl}}^{\text{max}}$, kas jānodrošina PA pēc noteiktas elektropārvades līnijas atslēgšanas kādā elektriskajā šķērsgrīzumā, tiek noteikts kā starpība starp maksimāli pieļaujamo caurlaides spēju sākotnējā shēmā un caurlaides spēju ievērojot normatīvo statiskās stabilitātes rezervi (8%) pēcavārijas shēmā:

$$\Delta P_{\text{atsl}}^{\text{max}} = k_{\text{U}\uparrow} \cdot (P_{\text{pirms/a.m.p}} - P_{\text{pēc/a.8\%}}), \quad (2.4)$$

kur indeksi „pirms/a.m.p” un „pēc/a.8%” norāda uz attiecīgi maksimāli pieļaujamo pirmsavārijas režīmu un ar 8% rezervi pieļaujamo pēcavārijas režīmu; $k_{\text{U}\uparrow}$ - koeficients, kas ievēro caurlaides spējas vērtību palielināšanas iespēju dažādās režīmu variācijās, $k_{\text{U}\uparrow} = 1 \pm 1.5$. Līdzīgā veidā tiek noteikts arī maksimālais atslodzes apjoms, kas jānodrošina PA pēc kāda jaudīga ģeneratora vai energobloka atslēgšanas.

Precīzākas avārijas vadības realizēšanai nepieciešamā aktīvās jaudas apjoma noteikšanai praksē un publikācijās lielākoties tiek izmantota frekvences izmaiņas ātruma pazīme, ko pamatā pielieto tikai automātiskās atslodzes pēc frekvences (AAF) automātikā. Piemēram, nepieciešamās avārijas iedarbes apjoms ierosinošās iedarbes sākuma momentā, ko izmanto AAF:

$$\left. \frac{df}{dt} \right|_{t=0} = - \frac{\Delta P_G \cdot f_0}{P_{\text{sl0}} \cdot [\tau_{\text{TG}} \cdot (P_{\text{sl0}} - \Delta P_G) + \tau_{\text{sl}}]}, \quad (2.5)$$

kur mīnusa zīme vienādojumā norāda uz frekvences pazemināšanos; ΔP_G - ģenerējošās jaudas deficīts [r.v.]; P_{sl0} - slodzes jauda stacionārā režīmā pirms ierosinošās iedarbes [r.v.]; f_0 - frekvences vērtība stacionārā režīmā pirms ierosinošās iedarbes [Hz]; τ_{TG} - turbīnas un ģeneratora mehāniskās inerces laika konstante [s]; τ_{sl} - slodzes (dzinēju un mehānismu) mehāniskās inerces laika konstante [s].

Kaut kādā mērā ir iespējams prognozēt visas iespējamās avārijas situācijas, kuru pamatā ir bojāta elementa atslēgšana no elektriskā tīkla: pārvades elektrolīnijas, kopņu, transformatoru, ģeneratoru u.c., taču praktiski neiespējami ir prognozēt avārijas, kas saistītas ar iekārtu vai aparātūras atteici, kas noved pie kaskādveidīgas iekārtu atslēgšanas ar laika ieturējumu vai kļūdainu neparedzētas iekārtas atvienošanu no elektriskā tīkla.

Energosistēmām kļūstot komplicētākām palielinās to režīmu un avārijas situāciju daudzveidība, ko nevar pilnībā ievērot pretavāriju automātikas iestatījumu un vadības iedarbju izvēles aprēķinos.

Nepietiekams nepieciešamais pretavāriju automātikas vadības iedarbes apjoms, kā arī tā pārsniegšana var izraisīt avārijas attīstību. Pie tam, avārijas iedarbe, kas radusies vienā energosistēmas vietā, īsā laika intervālā izplatās uz citām energosistēmas vietām, tādējādi nepieciešamais vadības iedarbes apjoms izmainās, kas netiek ievērots esošajā pretavāriju automātikā [2], [3], [5].

Līdz ar to, avārijas režīmu vadība ar iepriekš noteiktu avārijas situāciju metodi var izrādīties neefektīva, tāpēc pasaulē tiek veiktas izpētes jaunu avārijas režīmu metožu izstrādē, kas balstītos uz reālā laika avārijas režīmu vadību.

Avārijas vadība reālā laikā balstās uz energosistēmas režīma parametru mērījumiem reālā laikā, fiksējot sistēmas stabilitātes traucējumus un realizējot atbilstošas vadības

iedarbes, sekojot sistēmas uzvedībai un veicot attiecīgas korekcijas, ja nepieciešams. Avārijas vadība reālā laikā ir vēlams papildinājums iepriekš noteiktai režīmu vadībai. Publikācijās piedāvātie reālās avārijas režīmu vadības algoritmi balstās uz jaunāko tehnoloģiju, tādu kā teritoriālās uzraudzības sistēmas (WAMS), izmantošanu, kuru pielietošana pagaidām ir izpētes un eksperimentālā līmenī un plašāka ieviešana prasa ievērojamas investīcijas.

3. ADAPTĪVAS VADĪBAS IEDARBES NOTEIKŠANAS ALGORITMS

Šajā nodaļā ir aprakstīts piedāvātais algoritms automātikas vadības iedarbes noteikšanai, kas ir faktiskais energosistēmā avārijas laikā radies aktīvās jaudas deficīts vai pārumš, kā arī ir izstrādāti principi šīs vadības iedarbes dozēšanai un pielietošanai frekvences regulēšanas un pretavāriju vadības automātikā.

Apsverot iepriekšējās nodaļās aprakstītos energosistēmu režīmu vadības trūkumus, rodas nepieciešamība pēc adaptīvas automātikas izveides, kas noteiktu vadības iedarbi visā pārejas procesa laikā, pielāgojoties avārijas norises gaitai un attiecīgi koriģējot automātikas iedarbes apjomu.

Aktīvās jaudas deficīta (pārums) noteikšanas algoritms

Aktīvās jaudas deficīta (pārums) vērtības noteikšana balstās uz labi zināmā dinamikas vienādojuma izmantošanu, kas uzrakstīts viena ģeneratora ekvivalentai energosistēmai ar koncentrētu elektrisko slodzi uz tās kopnēm sekojošā veidā [4], [6]:

$$\frac{T_J}{\omega_0} \cdot \frac{d\omega}{dt} = P_G - P_{sl}, \quad (3.1)$$

kur T_J - rotora mehāniskās inerces laika konstante [s]; ω_0 - nominālā leņķiskā rotora griešanās frekvence [rad]; ω - faktiskā rotora leņķiskā griešanās frekvence [rad]; P_G , P_{sl} - attiecīgi turbīnas attīstītā jauda uz ģeneratora kopnēm un slodzes elektriskā jauda uz ģeneratora kopnēm [r.v.].

Vienādtība $d\omega/dt = 0$ ir pietiekams nosacījums stacionāram režīmam, kas raksturojas ar ģenerētās un patērētās jaudu līdzsvaru $P_G = P_{sl}$. Lielumu $d\omega/dt$ var izmantot straujas frekvences samazināšanās novēršanai, atslēdzot slodzi līdz brīdim, kad $d\omega/dt$ kļūst vienāds ar nulli. Taču, vienādtība $P_G = P_{sl}$ var iestāties pie jebkuras leņķiskās frekvences vērtības, kas nav vienāda ar nominālo. Tāpēc svarīgs uzdevums energosistēmas režīmu vadībā ir frekvences atjaunošana līdz nominālai vērtībai. Šī uzdevuma atrisināšanai izteiksmes (3.1) elementi ir izvērsti ietverot to frekvences atkarīgās funkcijas [1]-[6].

Promocijas darbā ir dots izvērsts dinamikas vienādojuma apraksts ietverot turbīnas pašregulēšanās efektu, slodzes frekvences atkarīgo daļu koeficientus, kā arī atsevišķi ģeneratora un slodzes mehāniskās inerces laika konstantes. Taču praktiski ir izmantota vienkāršota metodika aktīvās jaudas deficīta (pārums) noteikšanai, kā aprakstīts zemāk.

Kā tika noskaidrots 2. nodaļā, saskaņā ar agregāta statisko raksturlīkni, izmainoties frekvencei, jauda ģeneratora izejā izmainīsies par lielumu ΔP_G . Rezultātā, ģenerētās jaudas

faktisko vērtību no (3.1) var izteikt kā tās vērtību pie nominālās frekvences P_{G0} un apgriezienu regulatora izmainītās jaudas ΔP_G summu:

$$P_G = P_{G0} + \Delta P_G, \quad (3.2)$$

kur vērtība ΔP_G no izteiksmes (2.1) izteikta relatīvajās vienībās:

$$\Delta P_{G*} = -\frac{\Delta f_*}{k_{stat}}, \quad (3.3)$$

un $\Delta f_* = (f - f_0)/f_0$.

Ar izteiksmi (3.3) apgriezienu ātruma regulatoru darbība ir aprakstīta vienkāršoti, neietverot regulatora sastāvdaļu darbības aprakstošos diferenciālvienādojumus.

Slodzes jaudas faktisko vērtību var izteikt kā tās vērtības pie nominālās frekvences P_{sl0} un slodzes pašregulēšanās efekta rezultātā izmainītās jaudas ΔP_{sl} summu:

$$P_{sl} = P_{sl0} + \Delta P_{sl}, \quad (3.4)$$

kur vērtība ΔP_{sl} no izteiksmes (2.2) izteikta relatīvajās vienībās:

$$\Delta P_{sl*} = \Delta f_* \cdot k_{reg}. \quad (3.5)$$

Turpmāk matemātiskajā aprakstā relatīvo vienību apzīmējums „*” nav izmantots.

Mehāniskās inerces laika konstante T_J ir skaitliski vienāda ar laiku, kāds nepieciešams, lai agregāts iegrieztos no miera stāvokļa līdz nominālai rotācijas frekvencei nominālā griezes momenta iedarbē. Tā sastāv no ģeneratora un slodzes mehāniskās inerces laika konstantēm T_{Jsl} un T_{JG} . Konstanti T_{Jsl} nosaka dzinēju un piedzenamo mehānismu slodze, kas var mainīties diennakts laikā, tāpēc slodzes ietekmes uz kopējo energosistēmas mehāniskās inerces konstanti noteikšana ir daudz sarežģītāka nekā ģeneratoriem, kuru mehāniskās inerces laika konstantes T_{JG} var viegli noteikt no to pases datiem. Vienkāršojumu rezultātā energosistēmā notiekošo procesu analīzei nav ņemta vērā slodzes mehāniskās inerces laika konstante ($T_{Jsl} = 0$), tā kā tā ir vidēji par kārtu mazāka nekā ģeneratoru mehāniskās inerces laika konstante ($T_J = T_{JG}$).

Ietverot sākotnējo no frekvences neatkarīgo ierosinošo iedarbi ΔP , var uzrakstīt rotora kustības vienādojumu relatīvajās vienībās, kurā tiek ievērota aktīvās jaudas izmaiņa slodzes pašregulēšanās efekta iespaidā, kā arī aktīvās jaudas izmaiņa turbīnas apgriezienu regulatoru darbības dēļ:

$$T_J \cdot \frac{df}{dt} = \left(-\frac{\Delta f}{k_{stat}} \right) - (\Delta f \cdot k_{reg}) + \Delta P. \quad (3.6)$$

Sekojoši, energosistēmā avārijas laikā radusies aktīvās jaudas disbalances vērtība ir nosakāma no izteiksmes:

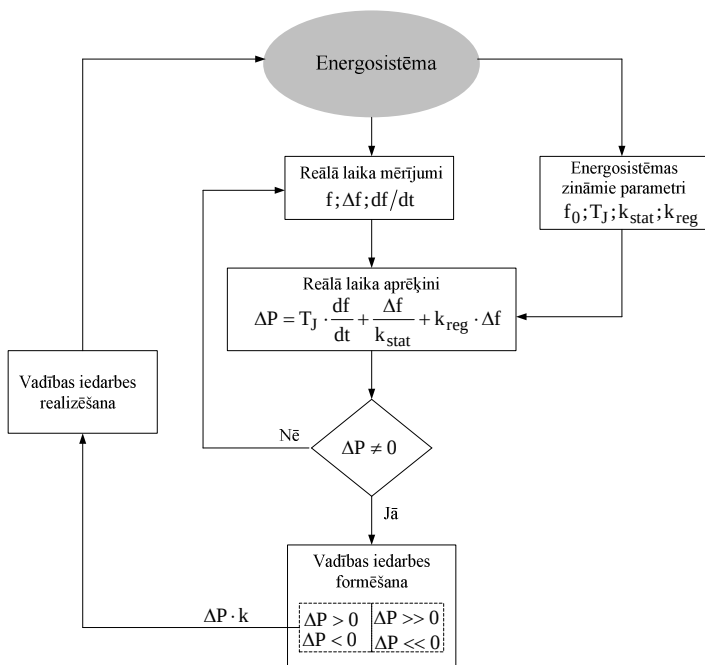
$$\Delta P = T_J \cdot \frac{df}{dt} + \frac{\Delta f}{k_{stat}} + \Delta f \cdot k_{reg} \quad (3.7)$$

Kā redzams no izteiksmes (3.7), ja energosistēmā rodas aktīvās jaudas deficīts, tad lielums ΔP ir negatīvs, un ja energosistēmā rodas aktīvās jaudas pārpalikums, tad – pozitīvs. Aktīvās jaudas disbalances lielums ΔP būs vienāds ar nulli tikai pie nominālās frekvences ($\Delta f = 0$).

Izteiksme (3.7) ir pamata vienādojums aktīvās jaudas deficīta (pāruma) noteikšanai attiecinātās vienībās viena ģeneratora energosistēmā. Jaudas vērtības iegūšanai nosauktajās vienībās aprēķinātā deficīta (pāruma) vērtība jāpareizina ar izvēlēto bāzes jaudu – ģeneratora nominālo jaudu vai energosistēmas ģenerēto jaudu.

Analoģiskus dinamikas vienādojumus un aktīvās jaudas deficīta (pāruma) noteikšanas algoritmus var uzrakstīt visas apvienotās energosistēmas elektrostacijām, ņemot vērā katras elektrostacijas (ģeneratora) parametrus, un noteikt deficītu (pārumu) visai energosistēmai kopumā.

Apkopojot visu iepriekšminēto, ir izveidots vienkāršots aktīvās jaudas deficīta (pāruma) noteikšanas algoritms viena ģeneratora energosistēmai ar koncentrētu elektrisko slodzi. Jaudas deficīta (pāruma) noteikšanas algoritms ir parādīts 3.1. att.



3.1. att. Aktīvās jaudas deficīta (pāruma) noteikšanas algoritms

Visi 3.1. att. dotajā algoritmā izmantotie parametri var būt noteikti: f_0 - vispārzināms elektroenerģijas kvalitātes rādītājs; T_j - no iekārtu tehniskajām pasēm; k_{stat} - no automātikas ierīču iestatījumiem; k_{reg} - no eksperimentāliem datiem vai orientējošiem pieņēmumiem.

3.1. att. redzamajā vadības iedarbes formēšanas blokā tiek noteikta nepieciešamā vadības iedarbe uz energosistēmu atkarībā no jaudas disbalances lieluma un zīmes. Tā var būt ģenerācijas palielināšana ($\Delta P < 0$), ģenerācijas samazināšana ($\Delta P > 0$), kā arī ģenerācijas atslēgšana ($\Delta P \gg 0$) vai slodzes atslēgšana ($\Delta P \ll 0$). Jebkurā gadījumā 3.1. att. parādītā vadības iedarbe ir attēlota kā aprēķinātās aktīvās jaudas deficīta vai pāruma vērtības reizinājums ar kādu noteiktu koeficientu k .

Izstrādātais princips atspoguļo vairākus būtiskus faktorus:

- energosistēmas avārijas režīmu analīzei ir pielietota jauna pieeja energosistēmas dinamikas vienādojuma aprakstam, kas pēc procesa dinamikas ļauj noteikt, vai energosistēma ir ar aktīvās jaudas deficītu, ar pārpalikumu vai atrodas brīvā virzībā uz nominālo frekvenci;
- iedarbe uz energosistēmu ar aprēķināto aktīvās jaudas deficīta (pāruma) vērtību ļauj atjaunot frekvenci līdz nominālai vērtībai;
- apskatītais vadības princips ļauj avārijas laikā atjaunot frekvenci ne tikai līdz nominālai vērtībai, bet arī līdz jebkurai citai uzdotai vērtībai. Tas ir aktuāli gadījumos, kad ir nepieciešama energosistēmas atdalīto daļu resinhronizācija;
- ar piedāvāto vadības metodi var izstrādāt pretavāriju automātiku, kas avārijas laikā nosaka precīzu vadības iedarbes lielumu uz energosistēmu un pielāgojas avārijas norises gaitai, attiecīgi koriģējot vadības iedarbes apjomu.

Vadības iedarbes dozēšanas metode

Neprecīzo parametru iespaida samazināšanai un automātiskās režīmu vadības precizitātes paaugstināšanai vadības iedarbī nepieciešams sadalīt vairākās daļās – pēc pirmās iedarbes frekvence tuvosies savai nominālai vērtībai, un aprēķinu kļūda pakāpeniski samazināsies, līdz ar to, katra nākošā iedarbe būs aizvien precīzāka.

Piedāvātās vadības iedarbju sadalīšanas jeb dozēšanas metodes būtība ir tajā, ka ar iepriekš aprakstīto algoritmu noteiktais energosistēmas jaudas deficīts (pārums) tiek novērsts iedarbojoties uz energosistēmas ģenerācijas palielināšanu/samazināšanu vai slodzes atslēgšanu ar impulsiem, kuru skaitliskais lielums tiek aprēķināts pēc ģeometriskās samazināšanās progresijas likuma ar progresijas saucēju mazāku par vieninieku. Laika intervāls starp impulsu nostrādi var būt pieņemts robežās no 0.2 s līdz 0.5 s, ievērojot visu iekārtu darbības kopējo laiku.

Vadības iedarbe uz energosistēmu tiek realizēta pēc sekojoša algoritma:

1. Tiek noteikts pirmās vadības iedarbes apjoms kā sākotnējās aprēķinātā deficīta (pāruma) vērtības ΔP reizinājums ar proporcionalitātes koeficientu k , kas nosaka kādu deficīta (pāruma) daļu kompensēt ar pirmo vadības impulsu:

$$P_{vad1} = \Delta P \cdot k = \Delta P \cdot (1 - k)^0 \cdot k. \quad (3.8)$$

Lielums k ir konstants visu vadības iedarbju aprēķināšanas laiku un regulēšanas precizitātes paaugstināšanai (kļūdaina aprēķinātā aktīvās jaudas deficīta (pāruma) ietekmes samazināšanai) to pieņem mazāku par vienu: $k \approx 0.7 \div 0.9$.

2. Katra nākamā vadības impulsa iedarbes lielums tiek aprēķināts kā atlikušā deficīta (pārums) vērtība pareizināta ar koeficientu k:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{vad2} = \Delta P \cdot (1-k)^1 \cdot k, \\ P_{vad3} = \Delta P \cdot (1-k)^2 \cdot k, \\ \\ P_{vadm} = \Delta P \cdot (1-k)^{n-1} \cdot k. \end{array} \right. \quad (3.9)$$

Vadības iedarbe uz energosistēmu ar pirmo vadības impulsu, kas sastāda lielāko iedarbes apjomu, palēnina pārejas procesu. Tas, savukārt, ļauj nostrādāt nākamajiem impulsiem pirms energosistēmas stabilitātes traucējuma iestāšanās un samazināt vadības kļūdu. Vadības kļūda (koeficienta izvēle $k < 1$) ļauj novērst frekvences pārregulēšanas iespēju [3].

Piedāvātās aktīvās jaudas deficīta (pāruma) noteikšanas metodes ievērojama priekšrocība ir iespējamās aprēķinu kļūdas pakāpeniska samazināšanās līdz ar frekvences tuvošanos nominālai vērtībai.

Aktīvās jaudas deficīta vērtības pielietošana automātiskajā atslodzē

Tā kā promocijas darbā piedāvātās metodes pamatā ir diezgan precīza aktīvās jaudas deficīta aprēķināšana reālā laikā, kas nosaka nepieciešamo atslēdzamās slodzes apjomu, tad šo informāciju var pielietot automatiskajā atslodzes sistēmā. Tāpēc tika izstrādāts princips aprēķinātās aktīvās jaudas deficīta vērtības pielietošanai automatiskās atslodzes pēc frekvences sistēmā.

Aktīvās jaudas deficīta vērtībai sasniedzot kādu noteiktu atslodzes automātikas nostrādes lielumu P_{no} ($\Delta P \geq P_{no}$), uz atslodzi ir jāpadod skaitlis n , kas atbilst vienlaicīgi atslēdzamo kārtu skaitam un tiek noteikts kā aprēķinātās aktīvās jaudas deficīta vērtības dalījums ar vienai automātikas kārtai pieslēgto slodzes apjomu:

$$n = \frac{\Delta P}{\Delta P_{AAFi}}. \quad (3.10)$$

Automātikas nostrādes vērtību P_{no} ir jāizvēlas vienādu ar vienai atslodzes automātikas kārtai pieslēgto slodzes apjomu ΔP_{AAFi} ($P_{no} = \Delta P_{AAFi}$).

Ar automātikas kārtu vienlaicīgu atslēgšanu tiek panākta atslodzes ātrdarbība. Daļījuma atlikums sastāda neatslēgtās slodzes apjomu pēc automātikas nostrādes, ko var nosaukt arī par automātikas nostrādes kļūdu. Automātikas nostrādes kļūdas lielums ir atkarīgs no uzdotajiem parametriem, bet jebkurā gadījumā tā nepārsniedz automātikas vienai kārtai pieslēgtās slodzes apjomu ΔP_{AAFi} .

Minētā automātikas nostrādes vērtība P_{no} , pie kuras automātikai jāzūst atslodze, katrai energosistēmai vai aplūkojamam energorajonam būtu jānosaka atsevišķi atkarībā no to lieluma, specifiskācijas un pieejamo regulēšanas rezervju apjoma. Avārijas vadības procesa efektivitātes paaugstināšanai atslodzes automātikas nostrādes vērtību būtu jāpieņem tā, lai atslodzes automātika sāktu darbību aktīvās jaudas deficītam pārsniedzot pieejamo primāro regulēšanas rezervju apjomu. Šāda izvēle ir pamatojama gan ar atslodzes

ātrdarbības, gan ar frekvences kvalitātes paaugstināšanu, kā arī pieejamo primāro regulēšanas rezervju izmantošanu, neizraisot lieku patērētāju atslēgšanu.

Atslodzes automātikas kārtu nostrādes laiks un solis starp kārtām ir atkarīgs no aktīvās jaudas deficīta iekārtas darbības laika, kā arī no frekvences mērīšanas ierīces, releju precizitātes un ātrdarbības.

Galvenās priekšrocības piedāvātās atslodzes automātikas darbības principam salīdzinājumā ar tradicionālo AAF ir:

- diezgan precīza informācija par atslēdzamo slodzes apjomu uzdotā frekvences līmeņa atjaunošanai;
- lielākās deficīta daļas likvidēšana ar pirmo iedarbi, kas palēnina pārejas procesu;
- izvairīšanās no liekas patērētāju atslēgšanas un sekojošas frekvences pārregulēšanas;
- lokāla darbība neizmantojot sakaru kanālus un informāciju no elektriski attālinātām vietām, līdz ar to arī spēja darboties pēc energosistēmu sadalīšanās.

Līdz ar iepriekšminēto, izveidotais princips aktīvās jaudas deficīta vērtības pielietošanai automātiskajā atslodzē paaugstina atslodzes darbības efektivitāti [4].

Aktīvās jaudas deficīta (pārums) vērtības pielietošana energosistēmu paralēla darba stabilitātes traucējumu novēršanas automātikā

Iepriekšējās apakšnodalās tika piedāvāta automātika, kas novērš aktīvās jaudas deficītu vai pārumsu, taču bieži vien energosistēmā var notikt avārijas, kas rada tikai īslaicīgu aktīvās jaudas disbalanci, kas tiek kompensēta ar jaudas plūsmu izmaiņām elektropārvades līnijās. Lai novērstu iespējamo elektropārvades līnijas maksimālās caurlaides spējas $P_{\max}$ pārsniegšanu pēc kādas avārijas iedarbes, energosistēmā ar pretavāriju automātiku ir nepieciešams realizēt slodzes/generācijas atslēgšanu, taču automātikas darbības efektivitātes nodrošināšanai būtiski ir zināt iedarbes apjomu. Šim nolūkam ir izstrādāts speciāls princips aktīvās jaudas deficīta (pārums) pielietošanai STNA sistēmā, kur papildus aktīvās jaudas disbalances ΔP aprēķinam tiek kontrolēta arī elektropārvades līnijas jauda P_L . Princips, kas izstrādāts vienkāršākajai shēmai „ģenerators – elektropārvades līnija – bezgalīgas jaudas kopnes”, ir sekojošs:

1. Apskatāmajā elektrostacijā tiek nepārtraukti noteikta aktīvās jaudas disbalance ΔP , kur negatīva vērtība nosaka deficītu ($-\Delta P$), pozitīva – pārumsu ($+\Delta P$), saskaņā ar piedāvāto algoritmu.
2. Nepārtraukti tiek mērīta elektropārvades līnijas jauda P_L , aprēķiniem pieņemot par pozitīvu no mezgla aizplūstošo jaudu ($+P_L$) un negatīvu – mezglā ieplūstošo jaudu ($-P_L$).
3. STNA iekārtā tiek uzdota pieļaujamā kontrolējamās elektropārvades līnijas caurlaides spēja $P_{\max}$.
4. STNA iekārtā tiek kontrolēta sekojošu nosacījumu izpilde:
a) ja $\Delta P + P_L \geq P_{\max}$, tad STNA aprēķinātā iedarbe:

$$\Delta P_{STNA} = \Delta P + P_L - P_{\max} \cdot \sin \delta_{av}, \quad (3.11)$$

kur δ_{av} - pēcavārijas režīmā vēlamais jaudas leņķis, kas jāuzdod STNA iekārtā. Leņķa izvēli var veikt pamatojoties uz apskatāmās energosistēmas drošuma kritērijiem.

b) ja $\Delta P + P_L \leq (-P_{\max})$, tad STNA aprēķinātā iedarbe:

$$\Delta P_{STNA} = \Delta P + P_L + P_{\max} \cdot \sin \delta_{av} . \quad (3.12)$$

No iepriekšminētā izriet, ka pozitīvas STNA iedarbes gadījumā ir jāpadod komanda uz ģenerācijas samazināšanu (ģeneratoru atslēgšanu vai elektrisko bremzēšanu, turbīnu impulsu atslogošanu), savukārt negatīvas STNA iedarbes gadījumā – uz slodzes atslēgšanu. Abos gadījumos realizējamā iedarbe ΔP_{STNA} nodrošina elektropārvades līnijas atslodzi līdz pēcavārijas režīmā vēlamajam jaudas leņķim δ_{av} .

Izvēloties par automātikas nostrādes parametru aktīvās jaudas deficītu (pārums) tiek ņemts vērā būtisks aspekts – aktīvās jaudas deficīts (pārums) var mainīties lēcienveidīgi, tādā veidā var paredzēt iespējamo jaudas uzmetumu uz elektropārvades līniju pēc konkrētās avārijas iedarbes.

Metode var būt izvēsta arī divu samērojamas jaudas energosistēmu paralēlam darbam, ievērojot STNA darbību abos enerģorajonos. Šajā gadījumā pēc avārijas STNA noteiks vienāda apjoma pretavāriju iedarbes tikai ar pretējām zīmēm. Vairāku energosistēmu apvienībā ir jāievēro aktīvās jaudas plūsma visās enerģorajonus savienošās elektropārvades līnijās, tāpēc tika uzrakstīta vispārīga izteiksme, kas apraksta STNA vadības iedarbi k-tajam enerģorajonam energosistēmā ar n enerģorajoniem:

$$\begin{cases} \Delta P_k + P_{Lk-i} \geq P_{\max k-i}, \Delta P_{STNAk} = \Delta P_k + P_{Lk-i} - P_{\max k-i} \cdot \sin \delta_{av}; \\ \Delta P_k + P_{Lk-i} \leq (-P_{\max k-i}), \Delta P_{STNAk} = \Delta P_k + P_{Lk-i} + P_{\max k-i} \cdot \sin \delta_{av}, \end{cases} \quad (3.13)$$

kur $i = 1...n$.

Vairāku enerģorajonu apvienībā STNA iedarbes aprēķinu ietekmēs aktīvās jaudas deficīta (pārums) izplatīšanās raksturs uz citiem enerģorajoniem un jaudas izmaiņas to savienojosajās elektropārvades līnijās. Līdz ar to STNA aprēķinātās iedarbes uz slodzes atslēgšanu un vienlaicīgu ģenerācijas samazināšanu var atšķirties pēc apjoma, izraisot jaudas disbalanci energosistēmā. Tāpēc vienlaicīgi ar STNA iedarbes noteikšanu vienā enerģorajonā ir jāparedz automātiska tāda paša apjoma pretējas zīmes pretavāriju iedarbes padošana uz enerģorajonu, kas atrodas atslogojamās elektropārvades līnijas pretējā pusē.

Izveidotais princips aktīvās jaudas deficīta (pārums) vērtības pielietošanai stabilitātes traucējumu novēršanas automātikā paaugstina tās darbības efektivitāti, nosakot nepieciešamo vadības iedarbes veidu un apjomu bīstamās elektropārvades līnijas atslogošanai līdz noteiktam lielumam un saglabājot relatīvo leņķi starp divām energosistēmām pieļaujamās robežās pie nominālās frekvences energosistēmā.

4. DINAMISKO PROCESU ANALĪZEI NEPIECIEŠAMO MATEMĀTISKO MODEĻU IZVEIDE

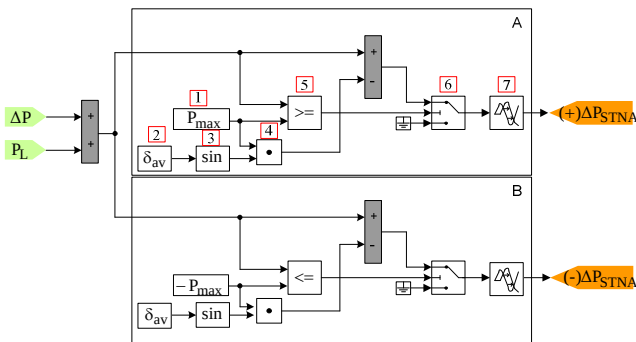
Šajā nodaļā ir apskatīti promocijas darbā izmantotie energosistēmu modelēšanas pamatprincipi un matemātisko modeļu apraksti energosistēmas dinamisko procesu analīzei. Pēc 3. nodaļā aprakstītajiem teorētiskajiem principiem ir izstrādāti jauni matemātiski modeļi praktiskai adaptīvas vadības iedarbes noteikšanai un pielietošanai energosistēmu režīmu vadībā.

Vadības sistēmu pētīšana balstās uz reālās sistēmas elementu aizvietošanu ar tipveida matemātiskajiem posmiem, kuru izejas lielums atkarībā no ieejas lieluma izmaiņas laikā mainās saskaņā ar elementa parametru un pašreizējā laika noteiktu likumsakarību, t.i., elementu diferenciālvienādojumiem.

Šajā darbā dinamisko procesu pētīšana ir veikta ar visbiežāk pielieto katra elementa raksturošanu ar pārvades funkciju atbilstoši šī elementa aprakstošajam diferenciālvienādojumam operatoru formā, diferenciālvienādojuma aizstāšanai ar operatora p vidē funkcionējošu algebrisku vienādojumu ieviešot Laplasa operatoru $p = d/dt$.

Izpētei ir pielietoti lielu energoapvienību modelēšanas pamatprincipi [1].

Promocijas darbā izpētes procesam pamatā ir izmantoti energosistēmā notiekošo dinamisko procesu raksturojoši matemātiskie modeļi, realizējot tos ar datorprogrammas MATLAB palīdzību. Ar tipveida posmu palīdzību ir izveidoti vienkāršots termoelektrostacijas modelis un elektropārvades līnijas modelis, kas pamatā tika pielietoti dažādas struktūras energosistēmu izveidē, kā arī Baltijas energosistēmā pielietotās AAF modelis. Tāpat ar tipveida posmiem tika izstrādāta virkne jaunu matemātisko modeļu piedāvātā principa analīzei – aktīvās jaudas deficīta (pāruma) aprēķina iekārtas modelis, vadības iedarbes dozēšanas iekārtas modelis, modelis automātiskās atslodzes realizēšanai, kā arī STNA modelis, kas parādīts 4.1. att.



4.1. att. Piedāvātās STNA modelis

Izveidotie modeļi nodrošina to praktiskas pielietošanas iespējas arī citās energosistēmu modelēšanas datorprogrammās (PSCAD, PSSTME, EUROSTAG u.c.).

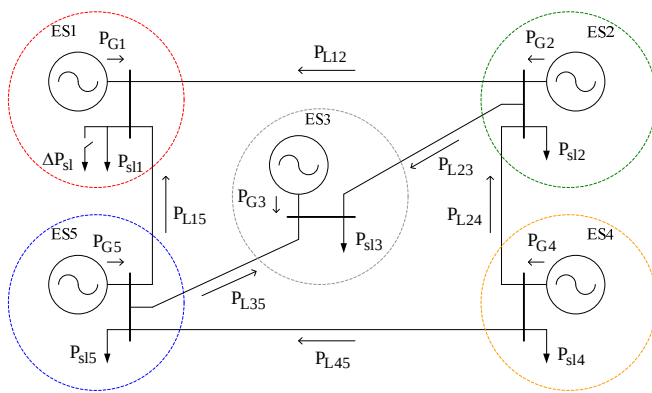
Atsevišķi gadījumi energosistēmas vadības uzdevumu realizēšanai, piemēram, Baltijas apvienotajā energosistēmā, ir apskatīti uz PSCAD programmā izveidotiem matemātiskiem modeļiem, ievērojot arī ierosmes regulatoru darbību.

5. ADAPTĪVĀS VADĪBAS IEDARBS PIELIETOŠANA FREKVENCES UN JAUDAS REGULĒŠANĀ

Šajā nodaļā ir aplūkota automatiskā režīmu vadība normālos darba režīmos veicot frekvences un jaudas regulēšanu.

Regulēšanas procesi ir apskatīti tradicionālās enerģosistēmās pielietotās primārās frekvences regulēšanas apakšsistēmas gadījumā, kā arī pielietojot piedāvāto aktīvās jaudas deficīta (pārums) aprēķināšanas un adaptīvās vadības iedarbes dozēšanas metodi ar mērķi paaugstināt regulēšanas kvalitāti un enerģosistēmas stabilitāti. Kā piemēri ir apskatīti gan koncentrēta enerģosistēma [1], [2], gan divu samērojamas jaudas enerģosistēmu paralēls darbs [3], gan arī sarežģītas struktūras enerģoapvienība.

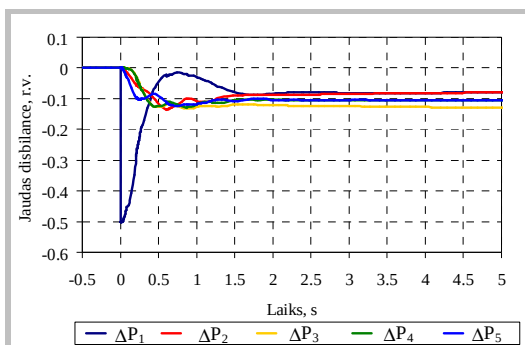
Darbā analizētais sarežģītas struktūras enerģoapvienības modelis, kas sastāv no piecām ekvivalentām termoelektrostacijām (ES1 – ES5) ar katrai stacijai pievienotu elektrisko slodzi ir parādīts 5.1. att.



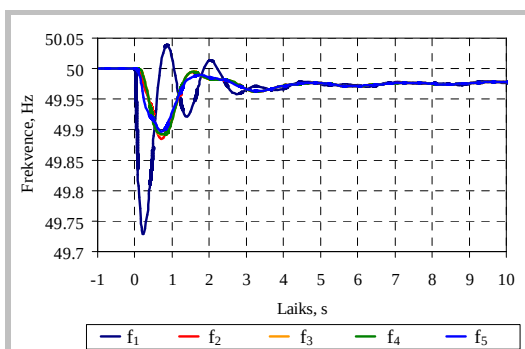
5.1. att. Sarežģītas struktūras enerģosistēmas shēma

Sarežģītā enerģosistēmas shēmā, kas sastāv no liela skaita elektrostaciju savienotu savā starpā ar elektropārvades līnijām, pie slodzes jaudas palielinājuma uz viena vai vairāku ģeneratoru kopnēm frekvences novirzes dinamika katram ģeneratoram būs atšķirīga, ko nosaka daudzi faktori.

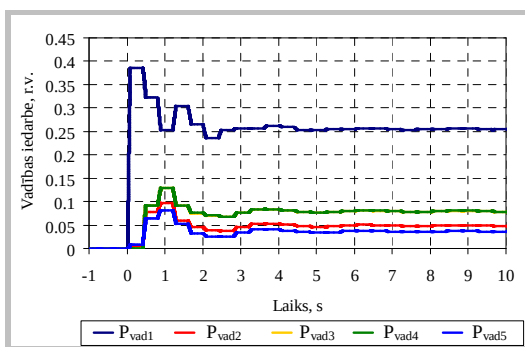
Aktīvās jaudas deficīta izplatīšanās raksturs visos enerģorajonos pēc 0.5 relatīvo vienību liela slodzes jaudas lēcienveidīga palielinājuma uz ES1 primārās regulēšanas gadījumā ar visiem regulatoriem uzdotu statisma koeficientu $k_{\text{stat}} = 10\%$ ir parādīts 5.2. att. Frekvences izmaiņas raksturs veicot adaptīvās vadības iedarbi visās enerģosistēmas elektrostacijās ir parādīts 5.3. att. Regulēšanas laikā aprēķinātās vadības iedarbes izmaiņas raksturs ir parādīts 5.4. att.



5.2. att. Aktīvās jaudas deficīta izmaiņas procesi režīma vadībai ar primāro regulēšanu visos enerģorajonos



5.3. att. Frekvences izmaiņas raksturs režīma vadībai ar adaptīvo vadības iedarbi visās elektrostacijās



5.4. att. Adaptīvās vadības iedarbes izmaiņas raksturs veicot iedarbi visās elektrostacijās

Aprēķini frekvences regulēšanai dažādos energosistēmu piemēros parādīja, ka:

- frekvence pēc primāro regulatoru darbības neatjaunojas līdz nominālai vērtībai, un aktīvās jaudas bilance iestājas pie pazeminātas frekvences. Ir nepieciešama sekundārā frekvences regulēšana, kas paildina regulēšanas procesa laiku, pasliktinot kvalitāti;
- frekvences regulēšana ar adaptīvās vadības iedarbes pielietošanu var pildīt vienlaicīgi primārās un sekundārās regulēšanas funkcijas atjaunojot gan aktīvās jaudas bilanci, gan nominālo frekvenci. Pie tam, ir augstāka frekvences regulēšanas precizitāte, ievērojami mazāks frekvences atjaunošanas laiks;
- starpība starp dažādiem frekvences regulēšanas veidiem energosistēmā nosaka dažādu procesa dinamiku. Frekvences regulēšanas sistēma ar adaptīvās vadības iedarbes dozēšanas metodi ir stabilāka, frekvences regulēšana – kvalitatīvāka;
- aktīvās jaudas deficīta izplatīšanās raksturs parāda avārijas rašanās vietu un nepieciešamo vadības iedarbes apjomu katrā elektrostacijā, tā norādot nepieciešamās regulēšanas principu – veikt vadības iedarbi momentāni, tā novēršot visu radušos deficītu (pārumu) avārijas iedarbes tuvumā un neiesaistot regulēšanas procesā pārējās energosistēmas elektrostacijas, vai arī regulēšanu veikt pēc kāda laika visās elektrostacijās, vienlaicīgi novēršot katrā elektrostacijā izplatījušās deficīta (pāruma) daļu;
- visizdevīgāk adaptīvās vadības iedarbi ir veikt visās elektrostacijās. Sevišķi būtiski tas ir neliela skaita elektrostaciju gadījumā, jo tad katras stacijas ietekme ir procentuāli nozīmīgāka, kā arī izpildās lielo energoapvienību nosacījums par katras atsevišķas energosistēmas nepieciešamo rezerves jaudu samazinājumu;
- ar dažādu vadības iedarbes dozēšanas intensitāti iegūst dažādu regulēšanas procesa raksturu;
- piedāvātā frekvences regulēšanas metode efektīvi darbojas normālos energosistēmas darba režīmos.

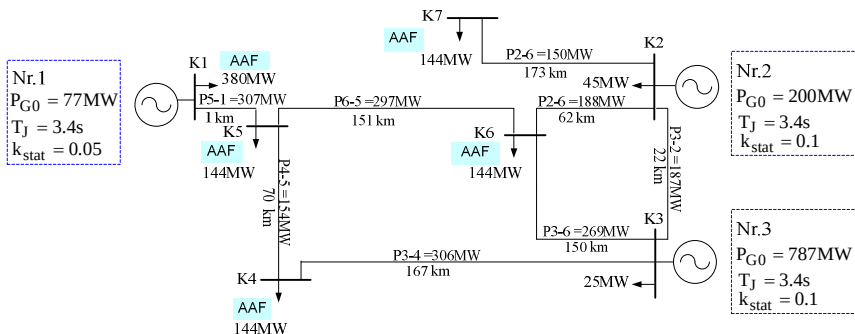
6. ADAPTĪVĀS VADĪBAS IEDARBES PIELIETOŠANA AVĀRIJAS REŽĪMU VADĪBĀ

Nodaļas mērķis ir pārbaudīt stabilitātes paaugstināšanas iespēju avārijas situācijās ar piedāvāto aktīvās jaudas deficīta (pāruma) pielietošanu energosistēmu pretavāriju automātikā. Ir analizēta avārijas režīmu vadība, veicot divus stabilitātes nodrošināšanas uzdevumus – energosistēmas frekvences un paralēlā darba stabilitātes saglabāšanu.

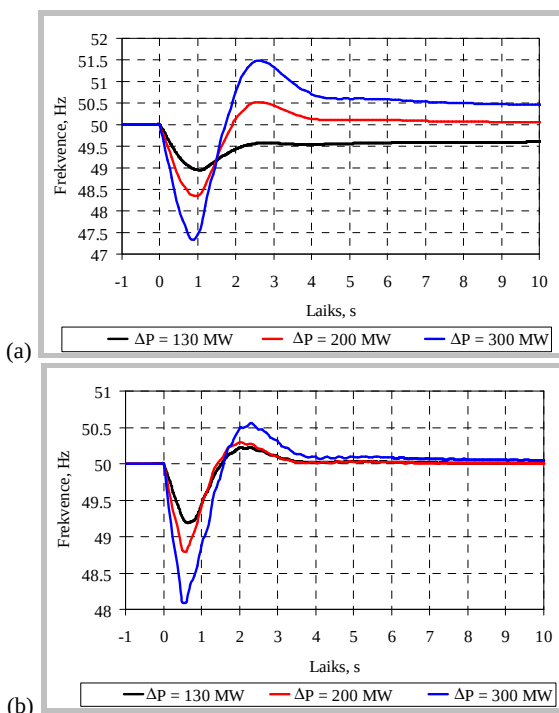
Frekvences stabilitātes saglabāšana

Adaptīvās vadības iedarbes pielietošana frekvences stabilitātes saglabāšanā ir apskatīta koncentrētas viena ģeneratora energosistēmas shēmā, kā arī vairākmašīnu koncentrētā energosistēmas shēmā, ievērojot arī sprieguma un reaktīvās jaudas izmaiņu ietekmi uz pārejas procesiem. PSCAD programmā izveidotās vairākmašīnu energosistēmas principiālā elektriskā shēma ar attiecīgajiem režīma parametriem nosauktajās vienībās un elektrolīniju garumiem ir parādīta 6.1. att. [4].

Frekvences izmaiņas procesi trīs avārijas situācijām ar dažādiem aktīvās jaudas deficīta apjomiem, ievērojot AAF automātikas darbību pēc esošā principa ir parādīti 6.2. att. (a). Frekvences izmaiņas procesi avārijas situācijām, ievērojot atslodzes automātikas darbību pēc jaunā principa ir parādīts 6.2. att. (b).



6.1. att. Energosistēmas modelis automātiskās atslodzes darbības analīzei



6.2. att. Frekvences izmaiņas procesi: (a) ievērojot AAF darbību pēc esošā principa; (b) ievērojot piedāvātās automātiskās atslodzes darbību

Veiktie aprēķini ļauj secināt, ka:

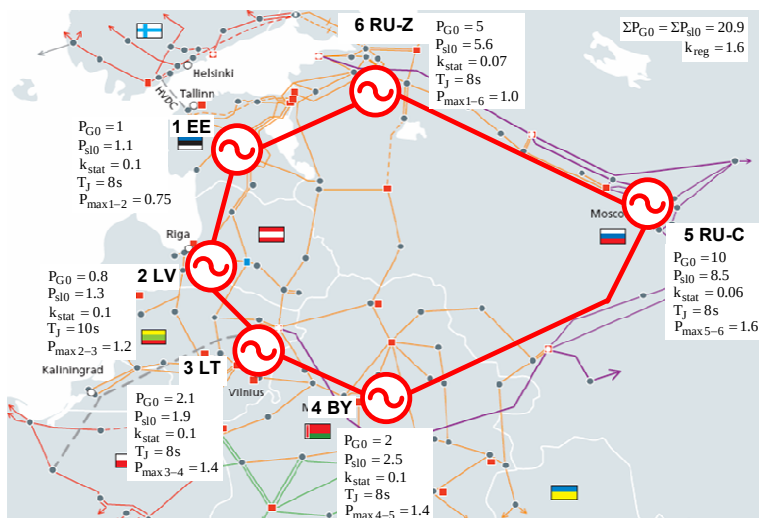
- apskatītā automātiskās atslodzes darbība nodrošina frekvences stabilitātes saglabāšanas uzdevumu gan koncentrētā viena ģenerators enerģosistēmā, gan vairākmašīnu enerģosistēmā ar izkliedētu slodzi;

- jaunās automātiskās atslodzes darbība efektīvāk novērš frekvences samazināšanos, ātrāk un precīzāk atjauno frekvenci pieļaujamās robežās, kā arī novērš frekvences pārregulēšanu pēcavārijas režīmā;
- apskatītajā vairākmašīnu energosistēmas piemērā ir modelēta centralizēta tipa atslodzes automātikas darbība, summējot visās elektrostacijās aprēķinātos aktīvās jaudas deficītus un noteikto vadības iedarbi padodot vienlaicīgi uz visām atslodzes realizēšanai paredzētajām apakšstacijām. Ir lietderīgi apskatīt arī decentralizēta tipa atslodzes automātikas darbību, nozīmējot atsevišķus katrai elektrostacijai atbilstoša aktīvās jaudas deficīta atslodzes darbības apgabalus.

Energosistēmu paralēla darba saglabāšana

Energosistēmu paralēla darba saglabāšanas uzdevuma nodrošināšanai paredzētās stabilitātes traucējumu novēršanas automātikas (STNA), kuras darbības principa teorētiskais izklāsts ir piedāvāts 3. nodaļā, darbības analīze avārijas procesu laikā ir apskatīta divu samērojamas jaudas energosistēmu shēmā, trīs mašīnu energosistēmas shēmā [5], kā arī vairākmašīnu gredzenveida energosistēmas shēmā [6]. Kā avārijas iedarbe visos piemēros ir apskatīta viena no raksturīgākajām – elektropārvades līnijas atslēgšana.

Darbā analizētās vairāku apvienotu enerģorajonu energosistēmas principiālā shēma, kas attēlo vienkāršotu ekvivalentu Baltijas energosistēmas shēmu, kas darbojas paralēli ar Krievijas un Baltkrievijas energosistēmām veidojot tā saukto elektrisko gredzenu, ir parādīta 6.3. att. [6].

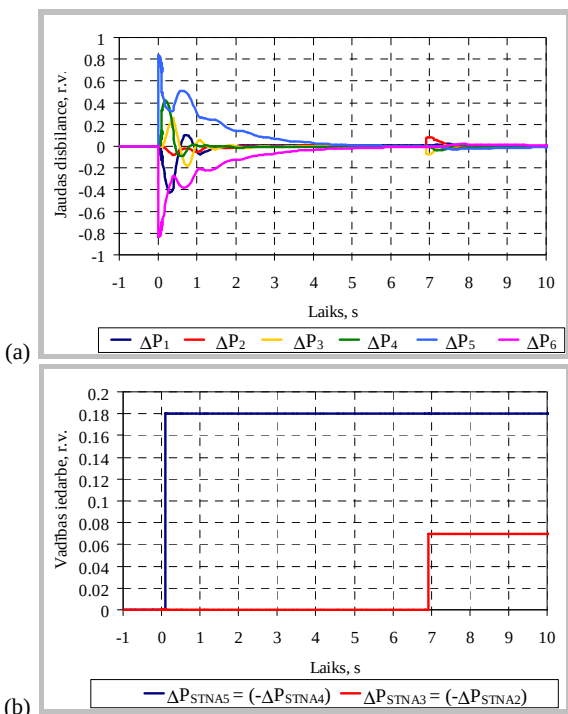


6.3. att. Baltijas, Krievijas un Baltkrievijas apvienotās energosistēmas ekvivalents modelis

Atslēdzot noslogotu elektrisko šķērssgriezumu starp Krievijas Centra un Ziemeļu energosistēmām (6.3. att.) ir acīmredzams, ka asinhronā gaita iestāsies elektriskajā šķērssgriezumā starp Krievijas Centra un Baltkrievijas energosistēmām, tā kā minētais šķērssgriezums ir stipri noslogots jau normālā energosistēmas darba režīmā. Esošajā situācijā reaģēs Baltijas energosistēmas un Krievijas un Baltkrievijas pretavāriju kompleksi.

Neveiksmīgas asinhronās gaitas novēršanas rezultātā energosistēma tiks sadalīta atslēdzot bīstamā šķēsgriezuma saites. Taču, tā kā dotā promocijas darba galvenais uzdevums ir saglabāt energosistēmu paralēlu darbu, tad šajā piemērā ir veikta STNA iedarbes pielietošanas metodes analīze paralēla darba saglabāšanai elektriskajā gredzenā.

Pielietojot STNA vadības iedarbes katrā energosistēmā pēc apskatītās avārijas iedarbes, tiek saglabāta energoapvienības paralēla darba stabilitāte, ko ilustrē 6.4. att. (a) redzamais jaudas disbalances izplatīšanās raksturs energoapvienībā. STNA aprēķinātās un pielietotās adaptīvās vadības iedarbes vērtības katrā energosistēmā ir parādītas 6.4. att. (b).



6.4. att. Aktīvās jaudas disbalances lieluma izplatīšanās raksturs ievērojot STNA darbību (a) un aprēķinātās STNA vadības iedarbes ģenerācijas/slodzes atslēgšanai (b)

No veiktajiem aprēķiniem var secināt, ka:

- aktīvās jaudas bilances traucējums pēc avārijas iedarbes izplatās pa visu energoapvienību pēc noteikta likuma. Aktīvās jaudas deficīta (pāruma) noteikšanas ierīču pielietošana katrā energosistēmā ļauj noteikt jaudas disbalances lielumu jebkurā laika momentā, tādējādi sniedzot informāciju par avārijas norises gaitu un nepieciešamo vadības iedarbi;
- katras elektrostacijas vai energorajona apgādāšana ar STNA, kas reālā laikā veic aktīvās jaudas disbalances un elektrolīnijas jaudas mērījumus, ļauj noteikt minimālo

nepieciešamo vadības iedarbes apjomu un veidu energosistēmas paralēlā darba saglabāšanai;

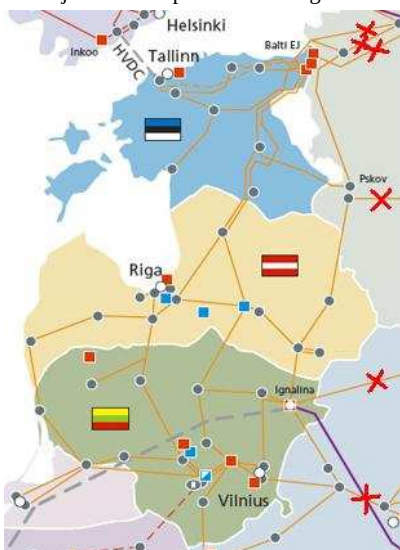
- piedāvātās adaptīvās vadības iedarbes noteikšanas metodes pielietošana ievērojami uzlabo energosistēmas stabilitāti un pielāgo pretavāriju automātikas darbību arī kaskādes veida avārijas situācijām, kā arī ļauj izvairīties no nevēlamas patērētāju atslēgšanas un asinhronās gaitas pārtraukšanas automātikas darbības;
- STNA aprēķini tiek veikti reālā laikā, un STNA izveide neprasa informāciju par energosistēmas topoloģiju, sākotnējiem darba režīmiem, elementu stāvokli un iepriekš aprēķinātiem dinamiskās stabilitātes apgabaliem;
- vienlaicīga un vienāda apjoma STNA realizētā vadības iedarbe uz energosistēmām elektrolīnijas pretējās pusēs nodrošina ātru dinamiskā procesa stabilizēšanu, novērš frekvences novirzes pēcavārijas režīmā. Tā ir efektīvs līdzeklis dinamisko procesu stabilizācijai un energosistēmas paralēla darba stabilitātes saglabāšanai.

7. ADAPTĪVĀS VADĪBAS IEDARBES PIELIETOŠANAS METODES PĀRBAUDE BALTIJAS APVIENOTĀS ENERGOŠISTĒMAS MODELĪ

Šajā nodaļā ir analizēta promocijas darbā piedāvātās metodes adaptīvās vadības iedarbes noteikšanai pielietošana avārijas režīmu vadībā Baltijas valstu apvienotās energosistēmas modelī.

Jāatzīmē, ka galvenais šīs nodaļas mērķis ir nevis nomodelēt precīzu atdalīto Baltijas energosistēmu darbību, bet gan pārbaudīt piedāvātā principa spēju darboties komplicētās, reālas energosistēmas piemērā.

Baltijas valstu apvienotās energosistēmas matemātiskais modelis dinamisko procesu



7.1. att. Baltijas valstu 330 kV elektropārvades tīkla izdalītā shēma

izpētei ir izveidots PSCAD programmas vidē pamatojoties uz 2003. gadā veiktā reģiona atdalīšanās eksperimenta datiem. Baltijas 330 kV elektropārvades tīklu shēma 2003. gada reģiona atdalīšanās eksperimenta laikā ir parādīta 7.1. att.

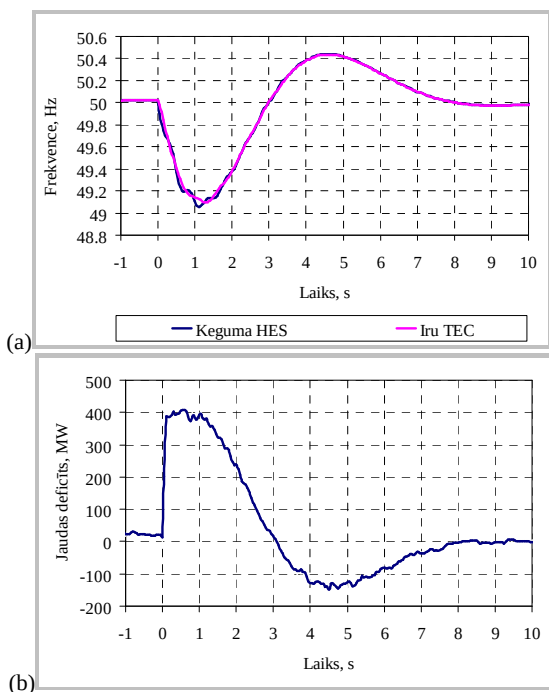
Energoapvienības modeļa vienkāršošanas nolūkiem, katra elektrostacija ir modelēta kā viens ekvivalents ģenerators, kura nominālā jauda atbilst summārai elektrostacijas ģenerētai jaudai 2003. gada atdalīšanās eksperimenta laikā.

Visās elektrostacijās ir modelēti primārie ģeneratoru rotoru apgriezienu ātruma regulatori. Katra elektrostacija ir apgādāta ar piedāvāto aktīvās jaudas deficīta (pārums) noteikšanas bloku. Kā avārijas režīms ir modelēts Pļaviņu HES ģenerētās jaudas atslēgšanas gadījums.

Ja uz katras elektrostacijas jaudas regulatoriem iedarbotos ar vērtību, kas atbilst šīs elektrostacijas reālajā laikā

aprēķinātajam aktīvās jaudas deficītam, tad, ņemot vērā rotējošo jaudu rezerves pieejamību, sistēmā automātiski tiktu atjaunota nominālā frekvences vērtība. Šajā darbā ir pieņemts, ka rezerves jaudas apjoms ir pietiekams.

Frekvences izmaiņas raksturs šādas regulēšanas gadījumā ir parādīts 7.2. att. (a). Atbilstošais aktīvās jaudas deficīta izmaiņas raksturs, veicot iedarbi uz jaudas regulatoriem ar aprēķināto deficīta vērtību, ir parādīts 7.2. att. (b). Deficīta novēršana ar jauno deficīta aprēķina regulatoru novērš dziļu frekvences kritumu – frekvences minimālā vērtība nepārsniedz 49 Hz, kā arī aptuveni 8 sekunžu laikā frekvence tiek atjaunota līdz nominālai vērtībai. Jāatzīmē, ka tikai primārās frekvences regulēšanas gadījumā frekvences minimālā vērtība sasniedz 48.9 Hz un novirze saglabājas aptuveni 49.4 Hz līmenī.



7.2. att. Frekvences izmaiņa pēc Pļaviņu HES atslēgšanas uz Ķeguma HES un Iru TEC kopnēm (a) un energosistēmas summārā aktīvās jaudas deficīta izmaiņa (b) pēc Pļaviņu HES atslēgšanas, ievērojot jaudas deficīta regulatoru darbību

Frekvences pārregulēšanas vērtību var samazināt optimizējot aktīvās jaudas deficīta regulatora laika konstantes – signāla aprēķināšanas perioda, impulsa iedarbības laiku.

Līdzīgi aprēķini ir veikti, ievērojot jaunā principa jaudas deficīta regulatoru kopā ar centralizētās atslodzes automātikas darbību, kā arī jaunā principa jaudas deficīta regulatoru kopā ar decentralizētās atslodzes automātikas darbību.

Iegūtie rezultāti parādīja, ka:

- elektrostaciju ģenerētās jaudas regulēšana ar piedāvāto aktīvās jaudas deficīta (pāruma) noteikšanas algoritmu darbojas arī komplicētā enerģosistēmā ar dažādiem elektrostaciju tipiem un parametriem;
- piedāvāto aktīvās jaudas regulatoru darbība ļauj izmantot dažu elektrostaciju aktīvās jaudas rezerves samazinot atslēgto patērētāju skaitu;
- piedāvātā centralizētā tipa atslodzes automātika veiksmīgi novērš enerģosistēmā radušos aktīvās jaudas deficītu, tā ir ātrdarbīga un efektīva;
- piedāvātā decentralizētā tipa atslodzes automātika veiksmīgi darbojas atsevišķos enerģosistēmas rajonos, novēršot aktīvās jaudas deficītu tikai tā rašanās rajonā un tam tuvākajos;
- decentralizētā tipa atslodzes automātika ir veiksmīgs risinājums frekvences pieļaujamā līmeņa uzturēšanai pēc enerģosistēmas avārijas sadalīšanas atsevišķos enerģorajonos;
- gan centralizētā, gan decentralizētā tipa atslodzes automātika ne tikai novērš strauju frekvences pazemināšanos, bet arī atjauno to līdz nominālai vērtībai (vai tuvu tai);
- avārijas režīmu vadības sistēma ar aktīvās jaudas deficīta (pāruma) pielietošanu ir adaptīva, kas ļauj vienlaicīgi darboties dažādiem automātikas veidiem ar dažādiem iedarbes veidiem (ģeneratoru atslēgšana, slodzes atslēgšana, rotoru apgriezīnu ātruma regulēšana u.c.);
- optimāla pretavāriju automātikas darbība ar aktīvās jaudas deficīta (pāruma) pielietošanu ievērojami paaugstinātu enerģosistēmu avārijas režīmu vadības efektivitāti Baltijas enerģosistēmu apvienībā arī to izolētā darba režīmā;
- ģeneratoru ierosmes regulatoru darbība katrā elektrostacijā neietekmē aktīvās jaudas deficīta (pāruma) noteikšanas un novēršanas procesu, kā arī avārijas režīmu vadības laikā ar aktīvās jaudas deficīta (pāruma) vērtības pielietošanu spriegums uz elektrostaciju un apakšstaciju kopnēm saglabājas pieļaujamā līmenī.

8. SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS TĪRPMĀKAM DARBAM

1. Enerģosistēmām apvienojoties parādās liela to darba režīmu nosacījumu un avārijas situāciju daudzveidība, līdz ar to kļūst sarežģītāka darba režīmu vadība. Savukārt, pareizas vadības un organizācijas uzdevumi kļūst arvien atbildīgāki, līdz ar elektroapgādes drošuma nozīmes paaugstināšanos.
2. Lielākās notikušās avārijas apvienotajās enerģosistēmās pamatā bija saistītas ar aktīvās ģenerētās un patērētās jaudu bilances traucējumiem, kas izraisīja nepieļaujamās frekvences novirzes, kas, savukārt, ir viens no galvenajiem elektroapgādes kvalitātes rādītājiem enerģosistēmā. Tādējādi, ir nepieciešams zināt precīzu bilances traucējuma lielumu jeb radušos aktīvās jaudas deficītu vai pārumu reālā laikā.
3. Esošā normālo režīmu vadība, kas paredz frekvences un jaudas regulēšanu enerģosistēmās, reaģē uz jaudas bilances traucējumu netieši, ir lēndarbīga un nav pilnībā automatizēta.
4. Esošā pretavāriju automātika, kas iedarbojas uz ģenerācijas vai slodzes izmaiņu enerģosistēmā, pamatā darbojas pēc iepriekš noteikta algoritma, tā nespēj pielāgoties visām iespējamām avārijas situācijām un nav adaptīva konkrētas avārijas situācijas norises gaitai. Ir nepieciešama efektīva režīmu automātiskā vadības sistēma, adaptīvas pretavāriju automātikas izveide.

5. Darbā ir piedāvāta adaptīvas vadības iedarbes noteikšanas metode, kas pamatojas uz reālā laikā noteiktas aktīvās jaudas deficīta vai pāruma vērtības izmantošanu normālo un avārijas režīmu vadības automātikā. Ir izveidota dozēšanas metodika aprēķinātā aktīvās jaudas deficīta (pāruma) vērtības pielietošanai frekvences un jaudas regulēšanas automātikā, avārijas atslodzes automātikā un stabilitātes traucējumu novēršanas automātikā. Iespējama piedāvātā algoritma praktiska realizācija uz mikroprocesoru elementu bāzes.
6. Darbā izstrādāta pētījumu metodoloģija un matemātiskie modeļi dažādiem energosistēmas darba režīmu aprēķiniem un piedāvātās metodes analīzei.
7. Darbā doti vienkāršoti matemātisko modeļu piemēri dažādas struktūras energosistēmām, galvenokārt, ar dominējošām termoelektrostacijām. Ir nepieciešams pilnveidot modeļus ar precīzākiem matemātiskajiem aprakstiem, ar dažāda tipa elektrostacijām un regulatoriem, ievērojot arī dažādu esošo automātikas un releju aizsardzības ierīču darbību.
8. Piedāvātā metode ir aprobēta izmantojot praktiska pielietojuma piemērus, analizējot atsevišķu koncentrētu elektrostaciju, vienkāršas struktūras energosistēmu apvienību, sarežģītākas struktūras vairāku mašīnu apvienotu energosistēmu, kā arī detalizētas Baltijas energosistēmas darbību. Promocijas darba izstrādē iegūtie rezultāti parādīja piedāvātās metodes pielietošanas efektivitāti un priekšrocības.
9. Galvenie piedāvātās metodes darbības principi energosistēmu piemēros ir analizēti pie nemainīga vai stabili uzturēta sprieguma (Baltijas energosistēmas piemēra gadījumā). Papildus būtu nepieciešams analizēt sprieguma un reaktīvās jaudas izmaiņu iespējamo ietekmi uz piedāvāto vadības principu.
10. Iespējams izvērst piedāvāto metodi, ievērojot adaptīvās vadības iedarbes noteikšanas algoritmā arī energosistēmas elementu sprieguma atkarīgās funkcijas.
11. Iespējams uzlabot piedāvāto aktīvās jaudas deficīta (pāruma) dozēšanas metodi, papildus pielietojot kādas optimizācijas procedūras efektīvākai iedarbju impulsu intensitātes noteikšanai, regulēšanas iespējamās kļūdas samazināšanai, kā arī ievērojot slēdžu un iekārtu darbības laiku.
12. Darbā ir piedāvāts avārijas atslodzes automātikas decentralizētas darbības princips, nosakot un realizējot vadības iedarbes tikai avārijas rašanās rajonā. Būtu nepieciešams padziļināt izpēti piedāvātajam principam, optimizējot atslodzes automātikas darbības organizāciju un nepieciešamo parametru izvēli katra rajona robežās.
13. Darbā ir analizētas, galvenokārt, vienkāršas iedarbes, kas saistītas ar kāda energosistēmas elementa avārijas atslēgšanu, taču būtu nepieciešams izvērtēt piedāvātās metodes darbību arī elektrostacijai tuvu īsslēgumu gadījumā, kā arī paplašināt izpēti kaskādes avāriju situācijām.
14. Avārijas režīmu vadība ar piedāvāto metodi ir izvērtēta pie noteiktiem pieņēmumiem un vienkāršojumiem. Turpmākai metodes attīstīšanai ir nepieciešama padziļināta izpēte tās organizēšanai un pielietošanai konkrētu pretavārijas līdzekļu izmantošanā, piemēram, algoritmu izstrādāšana atslēdzamo ģeneratoru un slodzes izvēlei, ģeneratoru elektriskās bremzēšanas, turbīnas impulsu atslogošanas un jaudas ierobežošanas parametru izvēlei.
15. Lai gan aktīvās jaudas deficīta (pāruma) noteikšanas metodes būtiska priekšrocība ir neprecīzi izvēlētu parametru radīto kļūdu pakāpeniska samazināšanās, tomēr būtu jāizvērtē aprēķinu iekārtas iespējamās atteices ietekme uz energosistēmas darba režīmu vadību un nepieciešamā vadības rezervēšanas organizācija, kā arī koordinācija ar cita veida automātikas darbību energosistēmā.

LITERATŪRA

- [1] Chuvychin, V., Gurov, N., Kiene, S. Power System Stability Maintenance Problems during Frequency Control. Scientific proceedings of Riga Technical University, Power and Electrical Engineering, 4th series. Riga: RTU, 2006, Vol.17, pp.52-58.
- [2] Chuvychin, V., Gurov, N., Kiene, S. Stability Problems of Power System Control During Emergency, Caused by the Active Power Deficiency. Scientific proceedings of the 2nd International Conference on Electrical and Control Technologies of Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania, May 3 – 4, 2007, pp.98-101.
- [3] Chuvychin, V., Gurov, N., Kiene, S. Frequency Control and Determination of Controlling Actions to Enhance Stability of Power System. Proceedings of 4th Scientific Symposium „Elektroenergetika-2007”, Stara Lesna, Slovakia, September 19 – 21, 2007, pp.709-712.
- [4] Chuvychin, V., Gurov, N., Kiene, S. Application of Actual Power Deficiency Value on Load Shedding. Scientific proceedings of the 4th International Conference on Electrical and Control Technologies of Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania, May 7 – 8, 2009, pp.298- 301.
- [5] Chuvychin, V., Gurov, N., Kiene, S. Method for the Determination of Controlling Actions to Enhance Power System Stability. Scientific proceedings of Riga Technical University, Power and Electrical Engineering, 4th series. Riga: RTU, 2008, Vol.23, pp.31-36.
- [6] Chuvychin, V., Gurov, N., Kiene, S. Application of New Emergency Control Principle in Power Systems. Proceedings CD of the IEEE Bucharest PowerTech Conference, Bucharest, Romania, 29 June – 2 July, 2009, 6 p.