

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Diāna ŽALOSTĪBA
Doktora studiju programmas „Enerģētika” doktorante

**AIZSARDZĪBAS UN
PAŠATJAUNOŠANĀS AUTOMĀTIKAS
KOMPLEKSS ENERĢOSISTĒMU
SABRUKUMU NOVĒRŠANAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. ing., emeritētais profesors
J.BARKĀNS

RTU Izdevniecība
Rīga 2010

UDK 621.311+621.316.9](043.2)

Ža 450 a

Žalostība D. Aizsardzības un pašatjaunošanās automātikas
komplekss energosistēmu sabrukumu novēršanai.
Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU, 2010. – 40
lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Promocijas padomes P-05
(Enerģētika un Elektrotehnika) 2010. gada 22.janvāra
Protokolu Nr.2.

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

ISBN 978-9934-10-010-9

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2010. gada 16.aprīlī, 15:30, Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un Elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, aktu zālē.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Vadošais pētnieks, Dr.sc.ing. Kārlis Briņķis
LZA Fizikālās enerģētikas institūts

Docente, Dr.sc.ing. Anna Mutule
RTU EEF Enerģētikas institūts

Ģenerālā direktora vietnieks zinātnes jautājumos
Dr.sc.ing. Dmitrijs Ļubarskis
a/s „Institūts „Ergosetproject” (Krievija)

APSTIPRINĀJUMS

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

Diāna Žalostība(paraksts)
Datums

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 8 nodaļas, secinājumus un rekomendācijas, 1 pielikumu, kā arī literatūras sarakstu. Darba kopējais apjoms ir 172 datorsalikuma lappuses. Darbā iekļautas 14 tabulas un 105 attēli. Literatūras sarakstā iekļauts 121 izmantotās literatūras avots.

SATURS

Saturs	4
Promocijas darba aktualitāte.....	5
Darba mērķis un uzdevumi.....	5
Pētījumu līdzekļi un metodes	6
Zinātniskā novitāte	6
Darba rezultātu praktiskais pielietojums	6
Darba aprobācija.....	7
Publikāciju saraksts	7
Promocijas darba struktūra un apjoms	8
1. Energosistēmu sabrukumu analīze	9
2. Energosistēmu vadīšana un to drošums.....	10
3. Pašreizējo kaskādveida avāriju īpatnības un aizsardzība no tām	14
4. Ģenerējošo avotu siltumtehnikās iekārtas stabilitāte	21
5. Pašatjaunošanās mehānisms	24
6. Energosistēmas preventīvā aizsardzības sistēma.....	28
7. Energosistēmas pēcavārijas automātiskā apvienošānās	30
8. Pašatjaunošanās kā cikliskais process	37
9. Secinājumi un tēmas nākotnes attīstības perspektīvas	38
Literatūra	39

PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE

Neskatoties uz sasniegumiem elektroenerģētikas jomā un energosistēmu nepārtrauktu modernizāciju, pasaulē regulāri notiek sabrukumu avārijas. Parasti tās sākas ar kāda elementa izkrišanu, izraisot elektrotīkla šķēluma pārslodzi, kam seko kaskadveida notikumu birums, kura izplatīšanās ātrums daudzkārt pārsniedz personāla aptveršanas un reaģēšanas spējas. Rezultātā atslēdzas elektrostacijas un energosistēma vai tās būtiskā daļa nodziest.

Elektroapgādes pārtraukšana lielās teritorijās, sevišķi lielās pilsētās, pilnīgi dezorganizē dzīvi. Energosistēmas normālā darba atjaunošana pēc sabrukumiem rada nopietnas problēmas un atkarīgi no elektrostaciju palaišanas īpatnībām var ilgt no dažām stundām līdz vairākām diennaktīm, nesot lielus zaudējumus. Avārijas izmeklēšanai dibina ekspertu komisijas, kas analizē sabrukumu gaitu un atzīmē novēršamus trūkumus. Bet sistēmas avārijas turpinās, liecinot par energosistēmu aizsardzības sistēmas strukturālās pilnveidošanas nepieciešamību.

Kā zināms, energosistēmas vadīšanā tiek izmantotas hierarhiskās struktūras, kas dod augstu drošumu. Tādas struktūras tiek izmantotas gan operatīvajā vadīšanā, gan energosistēmas procesu regulēšanā. Savukārt, avāriju procesu novēršanas aizsardzību var iedalīt sekojoši: zemākā līmenī izmanto energosistēmu elementu aizsardzību no bojājumiem; nakošā – lokālo avāriju (tādu kā stabilitātes zaudēšana, aktīvās jaudas deficīta avārijas, sprieguma lavīnas) likvidācijas sistēmas. Diemžēl tās nevienmēr konstatē sabrukuma epicentru un rezultātā nespēj aktivizēt nepieciešamo iedarbi avārijas lokalizācijai ar sekojošu energosistēmas normālā stāvokļa automātisko atjaunošanu, saglabājot darbā ģenerējošus avotus un izmantojot energosistēmu pašorganizācijas iespējas bez personāla līdzdalības.

Ņemot vērā iepriekšminētos apsvērumus, tika izvēlēts šī promocijas darba pētījumu virziens, piedāvājot jauno aizsardzības un pašatjaunošanās automātikas kompleksa koncepciju energosistēmu sabrukumu novēršanai un normālā režīma atjaunošanai bez personāla līdzdalības. Centralizētās sastāvdaļas iekļaušana šajā kompleksā nodrošinās hierarhisko darbības principu ievērošanu aizsardzības sistēmas augstākā līmenī.

Piedāvātajā koncepcijā tiek izmantota Latvijas speciālistu unikālā pieredze un nozīmīgie ieguldījumi, kas tika iegūti, ilgstoši strādājot energosistēmu pretsabrukumu aizsardzību attīstībā un to ieviešanā ekspluatācijā.

DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Darba mērķis ir pilnveidot pretavārijas kompleksu energosistēmu aizsardzībai no sabrukumiem ģenerējošo avotu masveidīgās atslēgšanās dēļ un avārijas režīma likvidācijai bez personāla līdzdalības. Mērķa sasniegšanai tika izvirzīti un atrisināti sekojošie galvenie uzdevumi:

- izpētīta sabrukumu vēsture energosistēmu attīstības gaitā;
- novērtētas iespējas pretavārijas pasākumu gaitā saglabāt darbā ģenerējošus avotus pie īslaicīgām avārijas režīma parametru novirzēm;
- analizēti energosistēmu sabrukumi pēdējos 50 gados ar nolūku klasificēt avārijas notikumus un konstatēt identiskās pazīmes, ko varētu izmantot pretsabrukumu aizsardzības pilnveidošanai;
- noformulētas pretsabrukuma kompleksa modernizācijas koncepcija un prasības, izvirzot kā primāro uzdevumu pārvades tīkla pārslogotā šķēluma ātrdarbīgo atslogošanu, saglabājot to darbā ar maksimāli iespējamām jaudas plūsmām, īslaicīgi sadalot energosistēmu (īslaicīgā sekcionēšana), ar mērķi nepieļaut bīstamo kaskādveida procesu attīstību, kuru dēļ masveidīgi atslēdzas ģenerējošie avoti;
- apskatīta iespēja izmantot esošās pretavārijas metodes jaunās pretsabrukumu koncepcijas mērķiem;

- analizēti energosistēmās esošie pretavārijas infrastruktūras līdzekļi no to izmantošanas iespējas apskatāmās pretavārijas koncepcijas ietvaros;
- analizēta frekvences avārijas likvidācijas pašatjaunošanās mehānisma integrēšana energosistēmas sabrukumu novēršanas kompleksā kopā ar speciālajiem pasākumiem ģenerējošo avotu saglabāšanai darbā pazeminātās frekvences apstākļos, kā arī kopā ar frekvences normalizācijas līdzekļiem jaudas pāruma novēršanai, kas dotu iespēju dažu desmitu sekunžu laikā pēc sekcionēšanas automātiski atjaunot energosistēmas darbu bez personāla līdzdalības;
- pretavārijas līdzekļi tika apskatīti no to vieglākas ieviešanas viedokļa, pēc iespējas izmantojot esošos risinājumus jaunajiem mērķiem.

PĒTĪJUMU LĪDZEKĻI UN METODEDES

Darbā tika noskaidrota visu tā apjomā iekļautu parādību fizikālā būtība. Noformulētais mērķis tika sasniegts, izmantojot šādas metodes:

- tika izveidoti un izmantoti matemātiskie modeļi, lai pētītu tranzīta sprieguma lavīnu, termiskos un mehāniskos procesus gaisvadu līnijas vados, frekvences atslogošanas automatikas darbību, energosistēmas veseluma pašatjaunošanās pārejas procesu, automatikas un energosistēmas darba režīmus; energosistēmas dalīšanas vietas izvēles optimizācija. Darba uzdevumu risināšanai tika pielietotas sekojošās programmas „Mathcad”, „Matlab”, „Mustang”, „PowerWorld”.

ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

Darba mērķis un uzdevumi nosaka zinātnisko novitāti. Analizējot lielākos sabrukumus, to gaitā tika atklāti posmi, kuros izrādās izteikta notikumu identitāte. Tas deva iespēju pilnveidot sabrukumu novēršanas aizsardzības un pašatjaunošanās automatikas kompleksu, bāzējot to uz personālam pazīstamo iekārtu jaunām izmantošanas metodēm.

Piedāvātajam kompleksam ir hierarhiskā struktūra ar mērķtiecīgi sadalīto vadību un pašorganizāciju zemākos līmeņos. Primārais elements ir centralizētā preventīvā sistēma, kas, saņemot informāciju par bīstamo pārslodzi, nosūta signālu energosistēmas īslaicīgai (uz 1-1.5minūtēm) sadalīšanai pārvades tīkla jaudas saņemšanas pusē (sekcionēšanai), iedarbinot pašatjaunošanās mehānismu. Informācija par pārslodzes līmeni un dalīšanas vietu, tiek pārraidīta, izmantojot ātrdarbīgus sakaru kanālus un pastāvīgi rīcībā esošo informāciju par normālo režīmu. Lokāla jaudas deficīta likvidācijas un energosistēmas režīma normalizācijas funkcijas realizē esošas lokālās sistēmas, izmantojot frekvences avārijas likvidācijas pašatjaunošanās mehānismu, kas ir papildināts ar speciālajiem pasākumiem ģenerējošo avotu saglabāšanai darbā pie frekvences novirzēm, kā arī ar papildu līdzekļiem frekvences normalizācijai veseluma atjaunošanās vajadzībām.

Šāda kompleksa izmantošana palielina energosistēmu drošumu un novērš tādu procesu rašanos, kas var izraisīt kaskādveida avāriju attīstību un energosistēmu sabrukumu.

Darbā tiek izmantoti seši patenti (5 saņemti, 1 pieteikums) energosistēmu pretsabrukumu aizsardzības metodēm.

DARBA REZULTĀTU PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS

Pielietojot piedāvātās vadības metodes un algoritmus, ir iespējama šī kompleksa ieviešana, integrējot tajā esošos pretavārijas līdzekļus jauno mērķu sasniegšanai. Šim nolūkam izmantojot Latvijas energosistēmā 60-tos gados praktiski ieviesto aktīvās jaudas deficīta avāriju novēršanas metodi inversā veidā, tiek nodrošināta normālā režīma pašatjaunošanas funkcija jaunajos apstākļos.

Zinātnisko pamatojumu un piedāvāto algoritmu pareizība apstiprināta analītiski ar

aprēķiniem, kuros izmantoti pētāmo procesu matemātiskie modeļi. Izstrādātās energosistēmas avārijas procesu pētīšanas metodes, var tikt izmantotas situācijas praktiskai analīzei.

Darbā parādīti eksistējošo pretavārijas aizsardzības līdzekļu trūkumi, kurus jāņem vērā, veidojot vai pilnveidojot pretsabrukumu sistēmas.

DARBA APROBĀCIJA

Par darba rezultātiem tika ziņots un tie tika apspriesti 10 starptautiskajās konferencēs:

1. „Principles of Protection against Power System Blackouts”, IEEE International Conference PowerTech, Bukaresta, Rumānija, 28.06.-02.07.2009.
2. „Development of Anti-collapse Complex of Power System”, RTU 49.starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, Latvija, 13-14.10.2008.
3. „Automatics of Blackout Prevention in a Power System”, The 3rd International Conference on Electrical and Control Technologies – ECT2008, Kauņa, Lietuva, 08-09.05.2008.
4. „Short-term Splitting of a Power System with its self-restoration as Blackout Prevention”, IEEE The 8th International Power Engineering Conference – IPEC2007, Singapūra, Singapūra, 03-06.12.2007.
5. „Protection of Generating Units at deviations of parameters by Sectioning a power system as a tool for blackout prevention”, RTU 48.starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, Latvija, 11-13.10.2007.
6. „Automatic Synchronization of a Power System as the Element of Blackout Prevention”, The 4th International Scientific Symposium ‘Elektroenergetika 2007’, Stara Lesna, Slovākija, 19-21.09.2007.
7. „Blackout prevention and power system self-restoration”, IEEE International Conference ‘EUROCON2007’ on “Computer as a tool”, Varšava, Polija, 09.-12.09.2007.
8. „Blackouts Prevention with Automatic Self-restoration”, CIGRE NRCC Regional Meeting on Security and Reliability of Electric Power Systems, Tallina, Igaunija, 18-20.06.2007.
9. „Blackout Prevention and Power System Self-Restoration Using Automatic Synchronization”, The 2nd International Conference on Electrical and Control Technologies – ECT2007, Kauņa, Lietuva, 03-04.05.2007.
10. „Protection against the voltage avalanche as the cause of the power system blackout”, RTU 47.starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, Latvija, 12.-13.10.2006.

PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

Starptautiski referējamos izdevumos 15 publikācijas:

1. J.Barkans, D.Zalostiba. Principles of Protection against Power System Blackouts // IEEE PES Conference Scientific Proceedings, paper # 382, 1-8pp, 2009.
2. J.Barkans, D.Zalostiba. Automatic Synchronization as the Element of a Power System’s Anti-collapse Complex // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, Nr.6, 2008, 3-19p.
3. J.Barkans, D.Zalostiba. Development of Anti-collapse Complex of Power System // RTU Scientific Proceedings, 4th part “Power and Electrical Engineering”, 23th volume, October 2008, 82-91pp.
4. J.Barkans, D.Zalostiba. Automatics of Blackout Prevention in a Power System // Kauno Technologijos Universitetas, May 2008,199-204 pp.
5. J.Barkans, D.Zalostiba. Short-Term Splitting of a Power System with Its Self-Restoration as Blackout Prevention // International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 9, Iss. 2, Article 2, 2008; Available at: <http://www.bepress.com/ijeeps/vol9/iss2/art2>
6. J.Barkans, D.Zalostiba. Blackout Prevention in a Power System by its Short-Term

Sectioning and Subsequent Self-Restoration without Personnel Participation // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, Nr.6, 2007, 12-28p.

7. J.Barkans, D.Zalostiba. Short-term Splitting of a Power System with its self-restoration as Blackout Prevention // IEEE Conference IPEC2007 Proceedings, December 2007, 525-530p.

8. J.Barkans, D.Zalostiba. Protection of Generating Units at deviations of parameters by Sectioning a power system as a tool for blackout prevention // RTU Scientific Proceedings, 4th part "Power and Electrical Engineering", 20th volume, October 2007, 25-35pp.

9. J.Barkans, D.Zalostiba. Automatic Synchronization of a Power System as the Element of Blackout Prevention // EE2007 Proceedings, September 2007, 632-636p.

10. J.Barkans, D.Zalostiba. Blackout prevention and power system self-restoration // IEEE Conference EUROCON2007 Proceedings, September 2007, 1547-1554pp.

11. J.Barkans, D.Zalostiba. Blackouts Prevention with Automatic Self-restoration // CIGRE NRCC Regional Meeting Proceedings, June 2007, 159-166p.

12. J.Barkāns, D.Žalostība, G.Junhāns. Jaudas plūsmu ierobežojumi enerģijas tirgus apstākļos // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2007, Nr.2, 15-24p.

13. J.Barkans, D.Zalostiba. Blackout Prevention and Power System Self-Restoration Using Automatic Synchronization // Kauno Technologijos Universitetas Proceedings, May 2007, 94-98 pp.

14. J.Barkans, D.Zalostiba. Protection against the voltage avalanche as the cause of the power system blackout // RTU Scientific Proceedings, 4th part "Power and Electrical Engineering", 14th volume, October 2006, pp.93-101.

15. J.Barkans, D.Zalostiba. New Principles of Power System Protection against Collapse in the Present Stage of Development // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, Nr.3, 2006, 3-22p.

Vietējos izdevumos 1 publikācija:

16. J.Barkāns, D.Žalostība. Energosistēmu sabrukuma problēmai ir risinājums // Enerģija un pasaule, Nr. 2, 2009, 34-40.lpp.

Saņemti 5 patenti un iesniegts 1 patenta pieteikums:

1. J.Barkāns, D.Žalostība. Patents LV 13994 B „Energosistēmas stabilitātes sabrukumu un ģenerējošo avotu masveida atslēgšanās novēršanas metode”, (20.08.2009. spēkā 20 gadus);

2. J.Barkāns, D.Žalostība. Patents LV 13913 B „Energosistēmas pretavārijas automātiskas darbības metode”, (20.08.2009. spēkā 20 gadus);

3. J.Barkāns, D.Žalostība. Patents LV 13881 B „Energosistēmas pretsabrukuma automātiskas darbības metode”, (20.05.2009 spēkā 20 gadus);

4. J.Barkāns, D.Žalostība. Patents LV 13772 B „Energosistēmas sabrukumu novēršanas metode”, (20.11.2008 spēkā 20 gadus);

5. J.Barkāns, D.Žalostība. Patents LV 13663 B „Energosistēmas pretavārijas automātiskas darbības metode”, (20.04.2008 spēkā 20 gadus).

PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, darbs satur 8 nodaļas, secinājumus un rekomendācijas, kā arī literatūras sarakstu. Darba kopējais apjoms 172 lappuses. Darbā iekļautas 14 tabulas un 105 attēli. Literatūras sarakstā iekļauts 121 izmantotas literatūras avots.

1. ENERGOSISTĒMU SABRUKUMU ANALĪZE

Neskatoties uz relejaizsardzības un pretavārijas līdzekļu nepārtraukto pilnveidošanu, energosistēmu sabrukumi turpinās. Tā kā pretsbrukumu aizsardzības izstrādes pamatā ir notikumu un iekārtu reakcijas īpatnību novērtējums, šajā nodaļā, pamatojoties uz veikto lielāko avāriju analīzi, apkopota sabrukumu vēsture energosistēmu attīstības gaitā, parādot katra posma īpatnības.

1.1. Sabrukumu vēsture energosistēmu attīstības gaitā

Energosistēmas attīstījās kā kompaktie slodzes mezgli, kas tika savienoti ar starpsistēmu tīklu. Sākumā šie mezgli pašbalansējās, to apvienošana deva iespēju kāpināt jaudu, nodrošinot kopējo rezervi. Līdz ar to savstarpēja atkarība pieauga un jaudas līdzsvars kļuva labilāks. No šā laika energosistēmu sabrukumi notika regulāri. Sabrukumu vēsturi energosistēmas attīstības gaitā var iedalīt 6 posmos [1]:

- sprieguma lavīnas ģeneratoru ierosmes regulatoru nepilnvērtību dēļ ⇒ ierosmes regulatoru pilnveidošana;
- frekvences lavīnas energosistēmu vājo un nepietiekoši drošo starpsistēmu saišu dēļ ⇒ ātrdarbīgās frekvences atslogošanas automātikas radīšana;
- frekvences avārijas pašlikvidācijas un pašatajunošanās mehānisma radīšana Latvijas energosistēmā un ieviešana (bij.PSRS);
- stabilitātes zaudēšanas avārijas ⇒ stabilitātes saglabāšanas un asinhronās gaitas pārtraukšanas līdzekļu ieviešana;
- sprieguma lavīnas tīkla pārslozdes dēļ ⇒ reaktīvās jaudas kompensācija un slodzes atslēgšana;
- līniju masveidīgās atslēgšanās gan spriegumu lavīnas, gan palielinātās nokares dēļ.

1.2. Analizējamie sabrukumi

Energosistēmu sabrukumu novēršanas aizsardzības pilnveidošanas iespēju novērtēšanai tika analizēti dati par 30 sabrukumiem kopš pagājušā gadsimta otrās puses, ar mērķi atrast vispārīnājumus, uz ko varētu reaģēt pietiekoši vienkāršs automātisko pretsabrukuma līdzekļu komplekss (1.1.tabula).

1.1.tabula

Analizētās sabrukumu avārijas

Nr.	Datums	Energosistēma
1	09.11.1965	ASV ziemeļaustrumi - Kanāda
2	05.06.1967	ASV (PJM)
3	14.07.1977	ASV Ņujorkas rajons
4	19.12.1978	Francija
5	04.08.1982	Beļģija
6	14.12.1982	Kanāda
7	27.12.1983	Zviedrija
8	12.01.1987	Francija
9	22.08.1987	ASV (Tennessee)
10	21.02.1995	ASV (PECO)
11	26.04.1995	ASV

Nr.	Datums	Energosistēma
12	08.06.1995	Izraēla
13	02.-03.07.1996	ASV rietumi - Kanāda
14	10.08.1996	ASV rietumi - Kanāda
15	20.06.1998	Bangladeša
16	25.06.1998	ASV ziemeļrietumi
17	11.03.1999	Brazīlija
19	06.-07.07.1999	ASV ziemeļaustrumi
18	11.1999.	Japāna
20	21.01.2002.	Brazīlija
21	12.01.2003	Horvātija
22	14.08.2003	ASV-Kanāda
23	23.09.2003	Zviedrija-Dānija
24	28.09.2003	Itālija
25	12.07.2004	Grieķija
26	14.03.2005	Austrālija
27	25.05.2005	Maskava, Krievija
28	04.11.2006	Eiropas enerģosistēma
29	25.06.2008	Baltkrievija
30	10.05.1964	Latvija
	01.09.1965	Latvija
	18.07.1967	Latvija (PA strādāja četras reizes dienā)

1.3. Secinājumi

Analizējot minētos sabrukumus, īpaša uzmanība tika veltīta sekojošiem jautājumiem, kas ir apskatīti turpmākajās nodaļās:

- personāla loma kaskādveida avāriju likvidācijā;
- pasākumi normālos un pirmsavārijas režīmos avāriju attīstības minimizācijai;
- avārijas notikumu klasifikācija un identisko notikumu konstatācija;
- ģenerējošo avotu reakcija uz parametru novirzēm un iespēja tos saglabāt darbā;
- pielietojamās aizsardzības un to izmantošanas iespējas jaunajiem mērķiem.

2. ENERĢOSISTĒMU VADĪŠANA UN TO DROŠUMS

Šīs nodaļas ietvaros, analizējot enerģosistēmas darba režīmus un to vadīšanas pasākumus, tika izdibināti enerģosistēmu sabrukumu rašanās mehānismi un konstatēts kaskādvāriju izraisošais notikums. Rezultātā tika definēta jaunā enerģosistēmas pretsabrukuma kompleksa koncepcija pārslodzes ātrdarbīgai likvidācijai un normālā režīma pašatjaunošanai.

2.1. Enerģosistēmas vadīšana no drošuma viedokļa

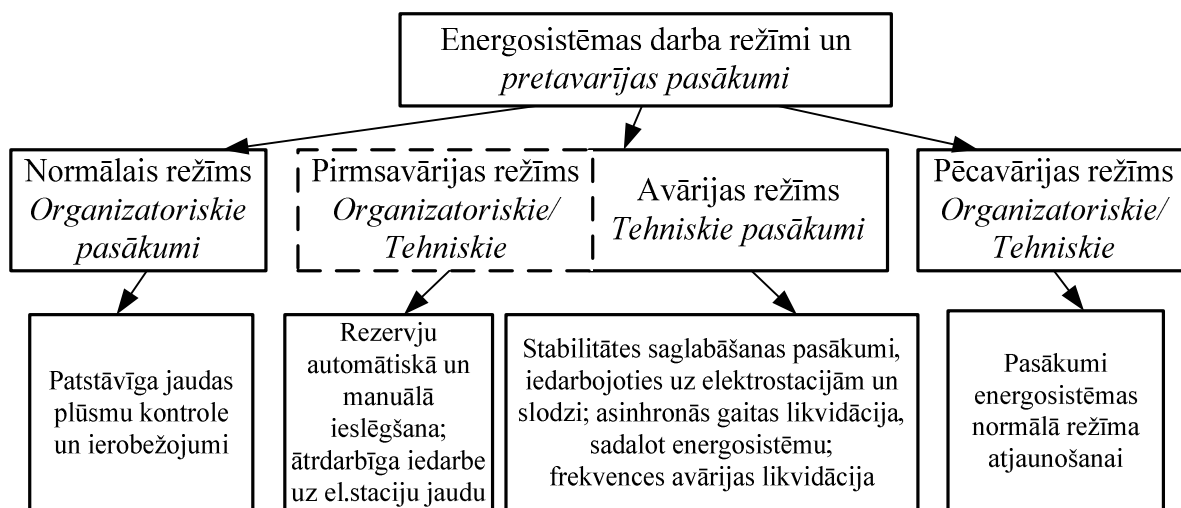
No drošuma viedokļa enerģosistēmas režīmus var klasificēt kā [2]:

- normālo režīmu, kurā paredzēti obligāti drošuma normatīvi un jaudas ierobežojumi sprieguma un frekvences uzturēšanai pieļaujamās robežās; parasti tas saistīts ar $(n-1)$

kritērija ievērošanu;

- pirmsavārijas režīmu, kurš iestājas, atslēdzoties kādam svarīgam elementam; drošuma kritēriji vairs netiek izpildīti un avārijas procesu attīstība var sākties jebkurā mirklī; izmantojot jaudu un rezervju mobilizācijas iespējas, stāvokli vēl var normalizēt;
- avārijas režīmu, kura laikā procesiem parasti ir ātra kaskādveida attīstība; personāls to nav spējīgs kontrolēt un novērst sabrukumu var vienīgi ar ātrdarbīgo pretavārijas automātiku.

Minēto režīmu vadīšanai parasti pielieto 2.1.att. parādītus pasākumus [1].



2.1. att. Pretavārijas pasākumu sadalījums atkarībā no energosistēmas darba režīmiem

Organizatoriskie pasākumi ir saistīti ar personāla darbību, saskaņā ar instrukciju norādījumu izpildi. Tiem jāatbilst cilvēku darbības ātrdarbības un izvēles iespējām. Drošuma paaugstināšanas nolūkos šādu norādījumu izpilde var būt daļēji automatizēta. Normālā režīmā tos izmanto parastā kārtībā, bet pirmsavārijas režīmā ir nepieciešami matemātiskie modeļi un programmas, kas dod norādījumus steidzamai rīcībai izmainījušos apstākļos.

Tehniskie pasākumi ir neizbēgami avārijas režīmos, kad notikumi risinās ar cilvēku darbībai neiespējamu ātrumu un sabrukumu var novērst tikai ar ātrdarbīgiem tehniskajiem līdzekļiem. Personālam šajā gadījumā jāieklaujas procesā tikai pēcavārijas režīmā.

Energosistēmas vadīšanu pašreizējos apstākļos grūti stādīt priekšā bez programmu nodrošinājuma. Šādas programmas ir izstrādātas dažādiem mērķiem un sekmīgi strādā reālās energosistēmās [3]. Kopumā tām jāpilda sekojošie uzdevumi:

1. reālā laikā jāattēlo energosistēmas stāvoklis, novēršot mērīšanas kļūdas;
2. normālos apstākļos, darbojoties automātiskā režīmā, jākonstatē maksimāli pieļaujamās jaudas plūsmas caur pārvades tīkla bīstamajiem šķēlumiem, cikliski apskatot režīmu drošumu, pa vienam atslēdzot energosistēmas svarīgos elementus;
3. realizējot cikliskos elementu atslēgumus uz modeļa, automātiskās pretavārijas sistēmas atmiņā jāfiksē bīstamās situācijas raksturu;
4. kaskādveida notikumu novēršanai pirmsavārijas režīma apstākļos programmai jādemostrē personālam nepieciešamos pasākumus instruktīvo norādījumu.

Kritērija ($n-1$) ievērošana ierobežo pārvades tīkla caurlaides spēju, kas rada zināmas psiholoģiskās grūtības sakarā ar to, ka atsevišķos gadījumos grūti atsacīties no ekonomiskiem ieguvumiem reti notiekošo avāriju varbūtības dēļ [4].

2.1.1. Pretavārijas līdzekļi drošuma noteikumos

Sevišķi bīstami ir tādi bojājumi, kas izraisa papildus viena vai vairāku elementu atslēgšanos, būtiski pasliktinot režīmu [5], [6]. Vairumu no tiem var novērst, ja drošuma

noteikumos paredz sekojošo pretavārijas līdzekļu izmantošanu:

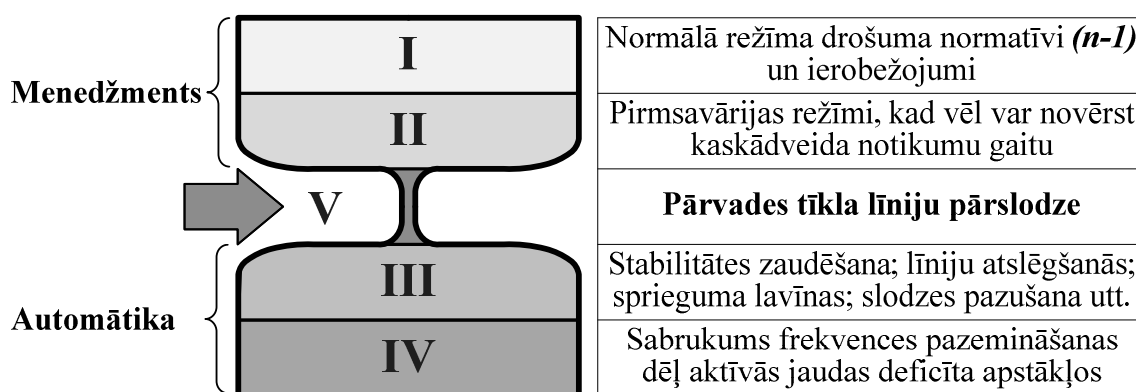
- momentānās darbības aizsardzība pārvades tīkla līnijām īsslēgumu atslēgšanai;
- speciālā slēdžu atslēgšanas rezervēšanas aizsardzība (SBA) slēdžu atteikumu novēršanai;
- aizsardzības dublēšana svarīgos objektos kā līdzeklis pret tās atteikumiem;
- speciālie pasākumi ģenerējošo avotu saglabāšanai darbā avārijas apstākļos (§4);
- AAF automātiskai frekvences atjaunošanai līdz nominālai vērtībai;
- AAF iestatījumiem jābūt nejutīgiem pret sprieguma izmaiņām.

2.2. Sabrukumu attīstības gaita un iemesli

Darbā tika analizēti sekojošie sabrukumu gaitā notiekošie avārijas procesi:

1. elektrostaciju dināmiskās stabilitātes sabrukumi īsslēgumu dēļ;
2. elektrostaciju dināmiskās stabilitātes sabrukumi noslogoto līniju atslēgšanas dēļ;
3. elektrostaciju statiskās stabilitātes sabrukumi sprieguma pazemināšanas apstākļos;
4. asinhronais režīms;
5. sprieguma lavīna slodzes mezglos;
6. pavadošās sprieguma lavīnas jaudas deficīta gadījumos;
7. pārvades tīkla tranzīta sprieguma lavīnas;
8. elektrostaciju atslēgšanās nepietiekamas slodzes dēļ;
9. masveidīgas ģeneratoru atslēgšanas pārslodzes dēļ sprieguma lavīnas apstākļos;
10. masveidīgas līniju atslēgšanās aizsardzības reakciju dēļ uz sprieguma dziļiem pazeminājumu;
11. masveidīgas līniju atslēgšanās pie īsslēgumiem uz zemi vadu nokares palielināšanas dēļ;
12. masveidīgas elektrostaciju atslēgšanās jaudas deficīta avārijās siltumtehnisko iekārtu stabilitātes zaudēšanas apstākļos.

Sakarā ar sabrukuma notikumi daudzveidīgumu var rasties iespaids, ka katrs no tiem ir unikāls. Šāds viedoklis būtiski sarežģī pretsabrukuma aizsardzības radīšanu. Pamatojoties uz veikto sabrukumu analīzi, situāciju ilustrē 2.2.att. [6].



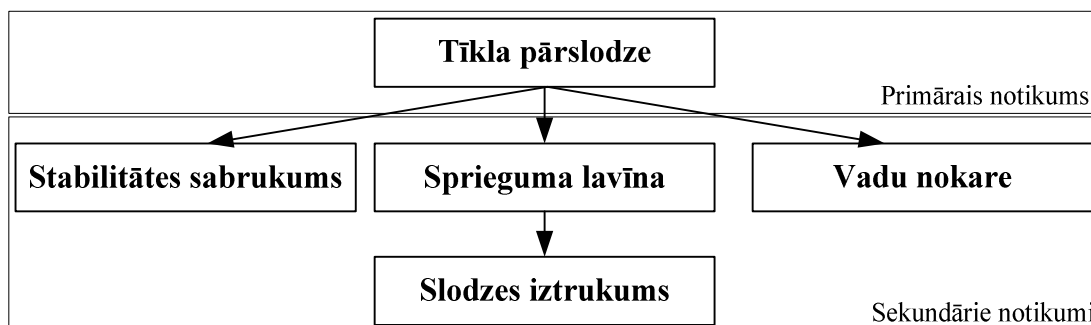
2.2.att. Avārijas notikumu posmi

Analizējot energosistēmas sabrukumus, izrādījās, ka pirmie divi posmi ir saistīti ar pārējiem caur V posmu, kurā process ir vienveidīgs, – **pārvades tīkla bīstamo šķēlumu pārslodze**. Posmos I un II svarīgi organizatoriskie pasākumi (menedžments), toties posmos III un IV, kuros procesi attīstās sekundēs, jāizmanto ātrdarbīgā preventīvā automātika, jo personāls nespēj reaģēt uz notikumu ātrām izmaiņām. Nepieciešamo ātrdarbību nosaka stabilitātes saglabāšanas prasība.

Sabrukumu izraisošos avārijas notikumus var iedalīt (2.3.att.) [5]:

- Primārā (iemesls) – pārvades tīkla šķēlumu bīstamā pārslodze;
- Sekundāros (sekas) – reakcija uz primāro; šie notikumi attīstās kaskadveidīgi un ir

galvenais iemesls elektrostaciju masveida atslēgšanām.



2.3.att. Primārā un sekundārās avārijas

Tātad likvidējot primāro sabrukuma iemeslu, ir iespējams izvairīties no sekundāro avāriju kaskādprocesu attīstības, nepieļaujot elektrostaciju masveida atslēgšanos kā galveno energosistēmas sabrukuma faktoru. Ievērojot to, ka pārvades tīkla līniju pārslodzi parasti rada reģionāls aktīvas jaudas deficīts, bet aktīvās jaudas deficīta likvidācijai energosistēmās paredzētas obligātas aizsardzības sistēmas, kas satur atgriezeniskās saites un režīma pašatjaunošanās elementus; radot šo sistēmu iedarbināšanas iespēju, to var izmantot arī jaunajam mērķim (pārslodzes likvidācijai).

2.3. Pārvades tīkla pārslodzes novēršanas koncepcijas izvēle

Energosistēmu dzīvotspējas nodrošināšanai tika radītas dažādas aizsardzības sistēmas, vissvarīgākajām no kurām piemīt drošumam un vadīšanas precizitātei nepieciešamās negatīvās atgriezeniskās saites. Attīstības gaitā noskaidrojās, ka tās nevar pilnīgi pasargāt energosistēmas no sabrukumiem. Lai panāktu sekmīgu rezultātu, šīs aizsardzības jāpapildina ar ātrdarbīgu virsbūvi, kas nodrošinās sabrukuma epicentra fiksāciju un iedarbinās esošās pretavārijas aizsardzības sistēmas kā hierarhiskas struktūras sastāvdaļas.

Izvēloties energosistēmu aizsardzības koncepciju, priekšroka dota pretsabrukumu kompleksa koncepcijai, kas saistīta ar tiešu iedarbi uz saišu jaudas plūsmām, ko nosaka uz rīcībā esošās iepriekšējā normālā režīma informācijas pamata.

Piedāvājamā koncepcija paredz realizēt īslaicīgu vienkārtēju iedarbi, uz 1-1.5 minūtēm sadalot (**īslacīgi sekcionējot**) pārvades tīklu vietā, caur kuru plūst jauda tuva pārslodzei. Īslaicīgās sekcionēšanas rezultātā pārslodze momentāni tiek novērsta. Attiecīgās līnijas paliek darbā ar maksimāli pieļaujamām jaudas plūsmām, neizraisot sabrukuma briesmas. Aizsardzības darbībai nepieciešamai informācijai jāpienāk no dažādām energosistēmas vietām, kā arī tai jādarbojas vienlaicīgi uz vairākām līnijām, kas nosaka tās centralizēti-reģionālu raksturu. Pēc situācijas stabilizācijas 100 sekunžu laikā energosistēmas veselums un normālais režīms automātiski atjaunojas, izmantojot frekvences avārijas pašlikvidācijas līdzekļus un darbā aprakstītās aizsardzības metodes [7]-[12]. Pašatjaunošanās process notiek patstāvīgi bez turpmākas kontroles vajadzības. Sakarā ar to, ka energosistēmas veselums un normālā režīma atjaunošanās tiek panākta automātiski, pārejas process paliek vairākus patērētāju nepamanīts. Līdz ar to tiek nodrošināta ātrdarbība, vadīšanas precizitāte un augsts drošums. Sīkāk šis process tiek analizēts turpmākās nodaļās.

Ieviešanas atvieglošanai orientējas uz ekspluatācijā pārbaudīto iekārtu izmantošanu jaunajiem mērķiem, līdz ar to novēršot bažas par risinājumu darbaspēju.

2.4. Secinājumi

Avāriju situāciju varbūtības mazināšanai normālos un pirmsavārijas režīmos jāievēro drošuma prasības, īpašu uzmanību pievēršot situācijām, kas var izraisīt papildu atslēgumus,

kuri var kļūt par sabrukumu attīstības iemeslu.

Ņemot vērā to, ka kaskādvārijas ātrās attīstības apstākļos personāls nespēj adekvāti reaģēt, atjaunošanas procesam jānotiek ar automatikas palīdzību bez personāla līdzdalības.

Izmantojot veiktās sabrukumu analīzes rezultātus, tiek piedāvāta jauna pretsabrukuma kompleksa koncepcija, kuras pamatā ir ātrdarbīga optimālā bīstami pārslogotā pārvades tīkla atslogošana, izmantojot energosistēmas īslaicīgo dalīšanu (īslaicīgo sekcionēšanu) ar turpmāko normālā režīma pašatjaunošanos bez personāla līdzdalības.

Aizsardzības kompleksa centralizēti-reģionāls raksturs ļauj nodrošināt pietiekošu ātrdarbību un precizitāti, iesaistot darbā esošos aizsardzības elementus.

Lai atvieglotu kompleksa ieviešanu, nepieciešama avārijas procesu analīze no pretavārijas līdzekļu radīšanas un ieviešanas viedokļa.

3. PAŠREIZĒJO KASKĀDVEIDA AVĀRIJU ĪPATNĪBAS UN AIZSARDZĪBA NO TĀM

Izvēlētās koncepcijas ietvaros, rekomendējot energosistēmām jaunus aizsardzības principus, tiek paredzēts maksimāli izmantot tās mērķiem noderīgus esošos aizsardzības līdzekļus. Šī mērķa sasniegšanai nodaļas ietvaros tiek analizēti kaskādveida avārijas procesi, izstrādāti procesu matemātiskie modeļi un aprēķinu algoritmi, parādītas iespējas izmantot esošo aizsardzību struktūras izvirzītajiem uzdevumiem jauno izmantošanas metožu veidā. Sakarā ar to, ka energosistēmas normālā darba ātrās pašatjaunošanās galvenais priekšnosacījums ir ģenerējošo avotu saglabāšana darbā, īpaša uzmanība tika pievērsta elektrostaciju iekārtu reakcijai uz energosistēmu režīmu parametru izmaiņām, kā arī tehnoloģiskās aizsardzības darbībai avārijas apstākļos. Rezultātā, tika konstatēti aizsardzības līdzekļi un metodes, kas jāintegrē jaunajā pretsabrukumu kompleksā.

3.1. Stabilitātes zaudēšanas avārijas

Stabilitātes zaudēšanas un asinhronā režīma avārijas procesi ir labi izpētīti. Tāpēc darbā tie tiek apskatīti no pielietojamās aizsardzības principu un struktūru izmantošanas viedokļa.

Stabilitātes zaudēšana ir viens no bīstamākajiem avārijas veidiem, kas var radīt energosistēmas sabrukuma priekšnoteikumus. Var izdalīt:

- dināmiskās stabilitātes sabrukumus kā reakciju uz īsslēgumu;
- dināmiskās stabilitātes sabrukumus, kā reakciju uz atslēgušos stipri noslogoto līniju;
- statiskās stabilitātes sabrukumu, sprieguma lavīnas apstākļos § 3.3.

Pirmajā gadījumā sabrukums nenotiek, izmantojot ātrdarbīgas aizsardzības pārvades tīklos, tai skaitā slēdžu un aizsardzību atteikumu gadījumos. Otrajā un trešajā gadījumos stabilitātes zaudēšanu var novērst, likvidējot tīkla pārslodzi.

Parasti stabilitātes saglabāšanai pielieto netiešo iedarbi uz saitēm, mainot mezglu jaudu (lokālās un centralizētās sistēmas). Atslogošanas efektivitāte ir atkarīga no mezglu topoloģijas attiecībā pret pārslogoto šķēlumu. Šī problēma kļūst sevišķi sarežģīta cilpveida tīklos, kur jaudas plūsmu izmaiņas aptver vienlaicīgi 4-6 līnijas un vairākas elektrostacijas. Tad labāk orientēties uz tiešo iedarbi uz jaudas plūsmām.

Šīm nolūkam jaunajā pretsabrukumu sistēmā kā aizsardzības virsbūvi sekcionēšanas iedarbes adreses izvēlei, reaģējošai uz informāciju par pārvades tīkla pārslodzi un nomālā režīma jaudas plūsmu datiem, var izmantot stabilitātes saglabāšanas matricveida aizsardzības struktūru, kuras darbaspēja pārbaudīta ekspluatācijā [2].

3.2. Asinhronais režīms

Kā zināms, asinhronā režīma gaitā, mainoties spriegumam, mazinās tīkla šķēluma caurlaides spēja, izraisot papildu stabilitātes zaudēšanu citās vietās, kas rada energosistēmas

sabrukuma draudus. Asinhrono režīmu pārtrauc, dalot energosistēmu svārstību šķēlumā. Lai izvairītos no smagām komplikācijām, saskaņā ar [13], dalīšanai jānotiek pirms leņķis sasniedz 180°. Analizējot energosistēmu sabrukumus, konstatēts, ka sevišķi asi uz svārstībām reaģē atomelektrostaciju lielu gabarītu turbīnas, kurās tiek izmantots piesātināts tvaiks (1500 apgr/min). Svārstību gaitā šo turbīnu apgriezienu regulatoros pieaug eļļas patēriņš un samazinās spiediens, aizsardzībām reaģējot uz spiediena samazināšanos, tās tiek atslēgtas. Nepieciešamība saglabāt darbā AES sevišķi paaugstina sekcionēšanas ātrdarbības prasību.

Ievērojot drošuma prasības, aizsardzības ātrdarbību un likvidējot tīkla pārslodzi, stabilitātes zaudēšanas briesmas un asinhronais režīms neattīstās, savukārt attiecīgās iekārtas paliek, izpildot rezerves aizsardzību funkcijas.

3.3. Sprieguma lavīna

Sprieguma lavīna ir avārijas režīms, ko raksturo ievērojami samazināts spriegums [14], kas izraisa energosistēmas elementu masveida atslēgšanos. Var izšķirt sekojošus sprieguma pazemināšanas lavīnas veidus:

- slodzes mezgla sprieguma lavīnu;
- pavadošo sprieguma lavīnu;
- pārvades tīkla tranzīta sprieguma lavīnu.

Rodoties reaktīvās jaudas pārsumam, ko nav iespējams patērēt, spriegums paaugstinās, izraisot bīstamu ģeneratoru ierosmes samazināšanos.

3.3.1. Slodzes mezgla sprieguma lavīna

Slodzes mezgla sprieguma lavīna notiek lokālos slodzes mezglos un ir saistīta ar esošo reaktīvās jaudas avotu reakciju uz sprieguma izmaiņu [15]. Pie nepareizās proporcijas starp šāda veida reaktīvās jaudas avotiem slodzes mezglā rodas pozitīvā atgriezeniskā saite pret sprieguma izmaiņu un iespējama slodzes mezgla sprieguma lavīna. Normālais režīms mezglā tiek panākts ar pareizo reaktīvās jaudas avotu reakciju uz sprieguma izmaiņu saskaņā ar:

$$d(Q_g - Q_{st})/dU < 0 \quad (3.1)$$

Kā pretavārijas līdzekli pret slodzes mezgla sprieguma lavīnu pielieto slodzes atslēgšanu pēc sprieguma pazeminājuma pazīmes (AAS). To izmantojot, laika ieturējumu dēļ nevar nodrošināt pietiekošu ātrdarbību, savukārt atsakoties no selektivitātes, sistēma strādās bez atgriezeniskās saites.

3.3.2. Pavadošā sprieguma pazemināšanās lavīna

Pavadošā sprieguma lavīna iestājas vienlaicīgi ar frekvences samazināšanos aktīvās jaudas energosistēmas deficīta daļā [15]. Pavadošās sprieguma pazemināšanas lavīnas laikā īslaicīgi palielinās sinhrono mašīnu ierosme, pateicoties kam, reaktīvās jaudas deficīts samazinās. Ja deficīts ir pārāk liels, spriegums var ievērojami samazināties, ko papildus ietekmē frekvences samazināšanos.

Pavadošās sprieguma lavīnas gadījumā režīmu normālizē frekvences atslogošanas automātika pie noteikuma, ja tās iestatījumus neiespaido sprieguma izmaiņa.

3.3.3. Pārvades tīkla tranzīta sprieguma lavīna

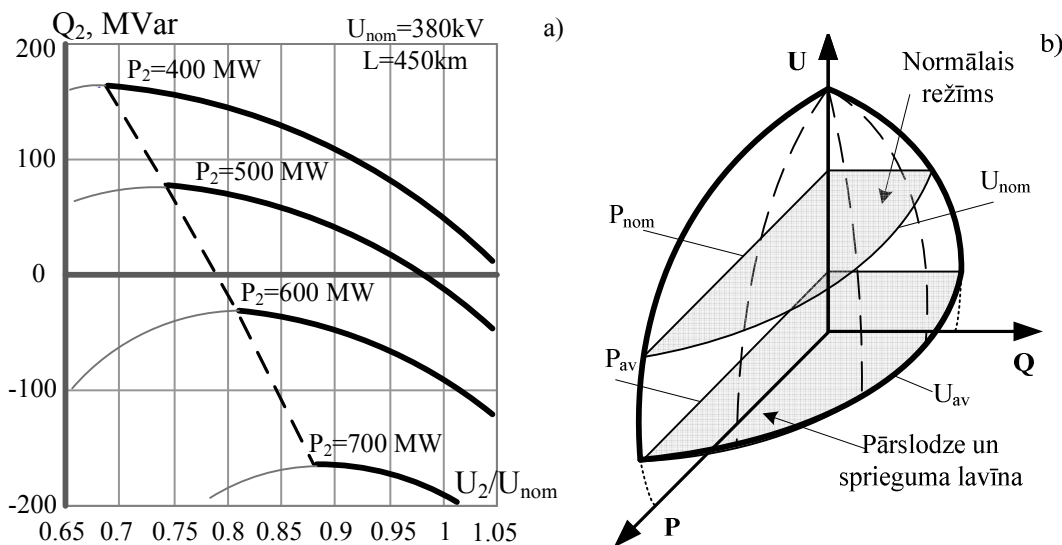
Pārvades tīkla tranzīta sprieguma lavīna ir sevišķi bīstama un notiek rajonā, kas aptver plašu teritoriju, kurā ir liels elektrostaciju skaits un izraisa energosistēmas daļas sabrukumu ģeneratoru un līniju masveidīgās atslēgšanās rezultātā [2], [15].

Šī lavīna rada reaktīvās jaudas deficīta iespaidu, bet patiesībā sākotnēji pārvades tīklā reaktīvās jaudas deficīta nav. Lavīna attīstās, tīklam pārslogoties ar aktīvu jaudu, kā rezultātā pieaug reaktīvās jaudas zudumi. Līdz ar to rodas normālā režīmā neesošās reaktīvās jaudas plūsmas, kas rada sprieguma pazeminājumu.

Vienkāršotu priekšstatu par tranzīta sprieguma lavīnu, līnijām pārslogojoties ar aktīvo jaudu, parāda 3.1.att. a), kas tika konstruēts, izmantojot vienādojumu [15]:

$$Q_2(U_2, P_2) = -U_2^2 \left(\frac{x}{r^2 + x^2} - \frac{b}{2} \right) + \frac{U_1 U_2}{\sqrt{r^2 + x^2}} \sin \left(\arccos \left[\frac{\sqrt{r^2 + x^2}}{U_1 U_2} \left(P_2 + U_2^2 \left(\frac{r}{r^2 + x^2} + \frac{g}{2} \right) \right) \right] \right) \quad (3.2)$$

Reaktīvās jaudas atkarība no sprieguma pie dažādām aktīvajām jaudām parādīta ar tumšām līnijām, savukārt stabilitātes zaudēšanas robežu raksturo funkcijas atvasinājums dQ_2/dU_2 (raustīta līnija) [15]. Pārslodzes rezultātā spriegums jaudas saņemšanas pusē var samazināties par 15-20%. Tīkla dažādus darba režīmus ilustrē 3.1.att. b).



3.1.att. Sprieguma lavīnas shematiskais attēlojums

P_{nom} , U_{nom} jaudas un spriegumi normālā režīmā; P_{av} , U_{av} - avārijas režīmā

Šajā gadījumā sprieguma pazeminājums nav notikumu iemesls, bet tīkla pārslodzes sekas. Slodzes atslēgšana pēc sprieguma pazeminājuma pazīmes šinī gadījumā nedod vēlamo rezultātu. Radikāli problēmu atrisina, ātrdarbīgi likvidējot tīkla pārslodzi.

3.3.4. Sprieguma paaugstināšanās lavīna

Sprieguma paaugstināšanās lavīna var attīstīties kā patstāvīga lavīnas avārija, tā arī kā pavadošā (frekvences lavīnas laikā), pēkšņa ģenerējamās reaktīvās jaudas pārpalikuma dēļ. Tas rada draudus elektriska tīkla izolācijai (īsslēgumi) un var izraisīt patērētāju iekārtu bojājumus, kā arī ģeneratoru izkrišanu no sinhronisma [15], [17].

3.3.5. Ģeneratoru reakcija uz sprieguma izmaiņām

Ģeneratori reaģē uz sprieguma pazeminājumu ar ierosmes paaugstināšanos, pieaugot reaktīvai jaudai [17]. Līdz ar to ierosmes un statora strāva pārsniedz nominālās vērtības un, nostrādājot aizsardzībai no ārējiem bojājumiem, ģeneratori masveidīgi tiek atslēgti, izraisot energosistēmas sabrukumu. Radikāla aizsardzība no šādiem sabrukumiem ir ātrdarbīga tīkla pārslodzes novēršana.

Reaģējot uz sprieguma paaugstinājumu, ģeneratoru ierosme samazinās līdz pat pilnīgai lauka zaudēšanai [17]. Ģeneratori tā rezultātā var izkrist no sinhronisma un tikt atslēgti. Lai no tā izvairītos, jāieslēdz šķērskompensācijas reaktori vai īslaicīgi jāatslēdz kāda augsta sprieguma līnija, ko pēc režīma normalizācijas ieslēdz darbā.

3.4. Masveida slodzes pazušana

Ir zināms, ka elektrostaciju darbam ir nepieciešama noteiktā minimālā enerģētisko katlu slodze $\approx 0.4P_{nom}$. Ja slodze ir mazāka par minimāli nepieciešamo, tehnoloģiskās aizsardzības atslēdz elektrostaciju nepietiekamas slodzes dēļ [15], [17].

Slodze var pazust līniju atslēgšanās rezultātā.

Spriegumam samazinoties līdz $\approx (0.7 \div 0.8)U_{nom}$, magnētiskie palaidēji atslēdzas un attiecīgā slodze zūd. Kā arī slodze samazinās saskaņā ar tās sprieguma statistiskām raksturlīknēm.

Pārvades tīkla pārslodzes novēršana izslēdz sprieguma lavīnas izcelšanās iespēju un līdz ar to arī ģenerējošo avotu atslēgšanās iespēju slodzes pazūšanas dēļ.

3.5. Līniju masveidīgās atslēgšanās avārijas

Līniju masveidīgās atslēgšanās sprieguma lavīnas un līniju vadu nokares palielināšanās dēļ, kas rada energosistēmu sabrukumus, izraisa pārvades tīkla pārslodze.

Spriegumam dziļi pazeminoties, atsevišķi līniju aizsardzības veidi reaģē uz to kā uz bojājumu, atslēdzot pārslogotās līnijas, piemēram, dažu distantaizsardzību 3. un pat 2. zonas [14]. Tā, piemēram, 2003.gada ASV-Kanādas sabrukumā 10 sekunžu laikā distantaizsardzības darbības rezultātā tika atslēgtas 14 līnijas.

Citos gadījumos, līnijām pārslogojoties, pieaug vadu nokare un notiek līniju pārklāšanās uz zemi, kas ir paliekošs bojājums, un automātiskā atpakaļ ieslēgšana (AAI) ir nesekmīga. Paralēli strādājošas līnijas pārņem jaudas uzmetumu, pārslogojas un procesi iegūst kaskādveidīgu attīstību. Līniju pārslodzes gadījumā vadu temperatūra var vairākkārt pārsniegt pieļaujamo, ko papildus iespaido augsta apkārtējas vides temperatūra un saules starojums. Pie noteiktās temperatūras vadu tērauda nesošie elementi atlaižas, zaudējot stiprību. Tādā gadījumā vadi jānomaina.

Vadu nokari nosaka termisko un mehānisko procesu mijiedarbība. Termisko procesu būtību raksturo pārveidotais siltuma bilances vienādojums:

$$f_1(I, t_v) + f_2(\phi) = f_3(t_g, t_v) + f_4(t_g, t_v) \quad (3.3)$$

kur $f_1(I, t_v)$ – džoulu zudumi, W/cm^2 , atkarībā no strāvas lieluma, ievērojot pretestības atkarību no temperatūras; $f_2(\phi)$ – saules starojuma enerģija, ko absorbē vads, ieskaitot atstaroto starojumu no citiem ķermeņiem (galvenokārt, no mākoņiem), W/cm^2 ; $f_3(t_g, t_v)$ – siltuma novadišana ar starošanu pēc Stefana-Bolcmana likuma, W/cm^2 ; $f_4(t_g, t_v)$ – konvekcijas zudumi, W/cm^2 .

Attiecībā pret vada temperatūru t_v , (3.3) ir sarežģīta transcendentā funkcija, kuras atrisināšanai jāizmanto iterācijas metodes.

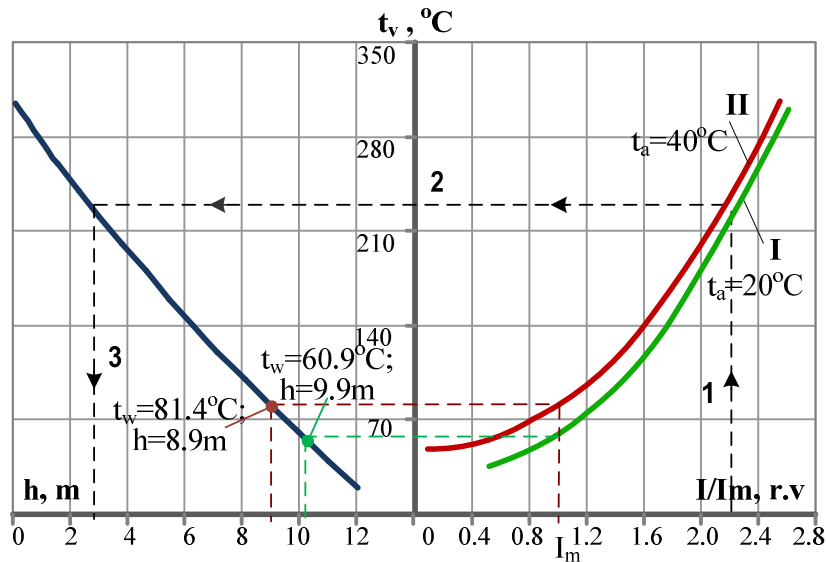
Savukārt, mehāniskos procesus apraksta, pārveidojot vada stāvokļa pamatvienādojumu:

$$\frac{\gamma_1 l^2}{8f_{n,t}} - \frac{8f_{n,t}^2 E}{3l^2} = \sigma_s - \frac{\gamma_s^2 l^2 E}{24\sigma_s^2} - \alpha E(t_1 - t_s) \quad (3.4)$$

kur σ_s, γ_s, t_s – vada sākuma stāvokļa nosacījumi mehāniskam spriegumam, temperatūrai, īpatnējai mehāniskai slodzei, kas ir atkarīgi no kritiska pārlaiduma; σ_1, γ_1 – vada stāvokļa nosacījumi spriegumam un īpatnējai mehāniskajai slodzei, temperatūrai pieaugot līdz t_1 ; $f_{n,t}$ – nokare mainoties temperatūrai, m; l – līnijas pārlaidums, m; α – lineārās izplešanās termiskais koeficients, $1/^\circ C$, E – elastības modulis, daN/mm^2 .

Attiecībā pret nokari f_{nt} , (3.4) ir kubiskais vienādojums, kura atrisināšanai var izmantot Kardano metodi, kā arī iterācijas metodes. Termisko un mehānisko procesu kā funkciju

$t_v = f(I, t_g)$ un $f_{n,t} = f(t_v)$ mijiedarbības izpētei tika radīti divi algoritmi, izmantojot a) iterācijas metodes un b) algebriskās izteiksmes. Aprēķinu rezultāti parādīti 3.2.att. nomogrammā, kur labajā kvadrantā attēloti termiskie procesi (pie dažādām ārējām gaisa temperatūrām), bet kreisajā – mehāniskie. Pārklāšanās uz zemi vai krūmiem notiek pirms vadi sasniedz zemi.



3.2.att. Pārslodzes, vada temperatūras un vadu attāluma līdz zemei nomogramma:

I/I_m – pārslodze pret maksimāli pieļaujamo no termiskā viedokļa (1); $U_{nom} = 750\text{kV}$; $I_m = 860\text{A}$ pie $t_m = 70^\circ$; alumīnija tērauda vadi AC-4x400/93; t_v – vada temperatūra (2); attālums līdz zemei, m (3)

Piedāvātā aprēķina metodika ļauj novērtēt īsslēguma uz zemi rašanās iespējas pārslodzes rezultātā, ievērojot mehānisko un termisko procesu īpatnības. Izmantojot piedāvāto īslaicīgo sekcionēšanu, tīkla pārslodze tiek ātrdarbīgi likvidēta, līdz ar to izslēdzot līniju masveidīgās atslēgšanās sprieguma lavīnas un līniju vadu nokares palielināšanās dēļ.

3.6. Frekvences izmaiņas raksturs jaudas deficīta likvidācijas laikā

Energosistēmas aizsardzība no sabrukumiem var būt sekmīga pie noteikuma, ja avārijas gaitā saglabājas darbā ģenerējošie avoti. Siltumtehnikās iekārtas sastāv no tvaika ģeneratoriem un turbīnām. Pie tvaika ģeneratoriem šajā kopumā pieder: enerģētiskie katli, gāzes turbīnas un atomreaktori.

Normālos režīmos turbīnas strādā fluktuāciju režīmā, reaģējot uz nelielām frekvences svārstībām tvaika ģeneratoru akumulācijas iespēju robežās. Toties jaudas deficīta apstākļos, pazeminoties frekvencei, stāvoklis krasi mainās, jo tvaika ģeneratori un turbīnas reaģē uz frekvences izmaiņu nesaskaņoti [17]. Tas rada siltumtehnikās iekārtas statiskās stabilitātes sabrukumus ar tās atslēgšanos (§4). Tāpēc svarīgi noskaidrot frekvences pazemināšanās raksturu jaudas deficīta avārijas gaitā, darbojoties frekvences atslogošanas automātikai (AAF) pie dažādām enerģosistēmu īpašībām, deficītiem un AAF kārtu iestatījumiem, kā arī gadījumos, ja pazemināta frekvence avārijas gaitā iestrēgst.

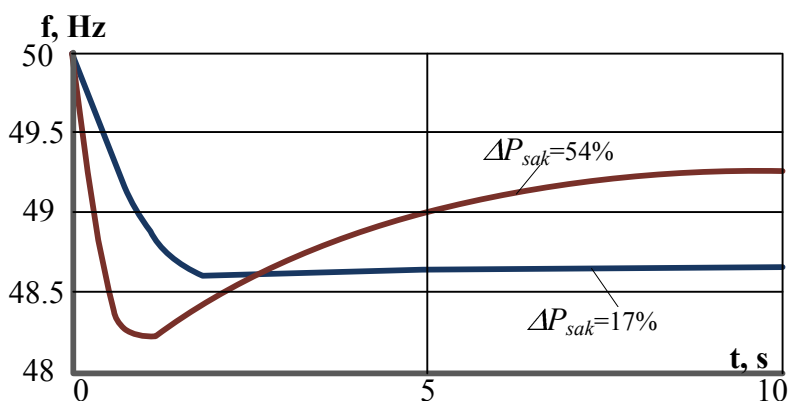
Frekvences izmaiņas rakstura izpētei jaudas deficīta avārijas gaitā tika izstrādāts aprēķina algoritms, kas ievēro frekvences atslogošanas kārtu diskretību un darbības kavējumus, ko nosaka slēdžu atslēgšanas pašlaiks un kārtu darbības kavējumi aizsardzībai no nepareizās darbības traucējumu dēļ.

3.6.1. AAF1 darbs vidējo un lielo deficītu apstākļos

Analīze veikta attiecībā uz parastām energosistēmās izmantojamām iekārtām [14]. Dažādiem automātiem ir dažādas nostrādes frekvences iestatījumi. Tika pieņemts, ka frekvences izmaiņas laika konstante mainās $T_f = 3 \div 5s$; slodzes koeficients $k_f = 1.5 \div 3$; slodze pa kārtām sadalīta vienmērīgi 49.3÷48 Hz diapazonā; katrai kārtai pieslēgta 5.5 % slodze; kārtu nostrādes kavējums $t_{kav} = 0.15 \div 0.3s$; sākotnējais deficīts ΔP_{sak} mainās ar soli 0.1%.

Pie vidējiem deficītiem (20÷40%) frekvences samazināšanās notiek pieļaujamā diapazonā, toties pie lieliem deficītiem (virs 40%) kavējuma iespaidā frekvence īslaicīgi samazinās līdz līmenim, kad tehnoloģiskā aizsardzība momentāni atslēgs agregātu. Situāciju uzlabo, izmantojot speckārtas, reaģējošās uz frekvences ātruma izmaiņu.

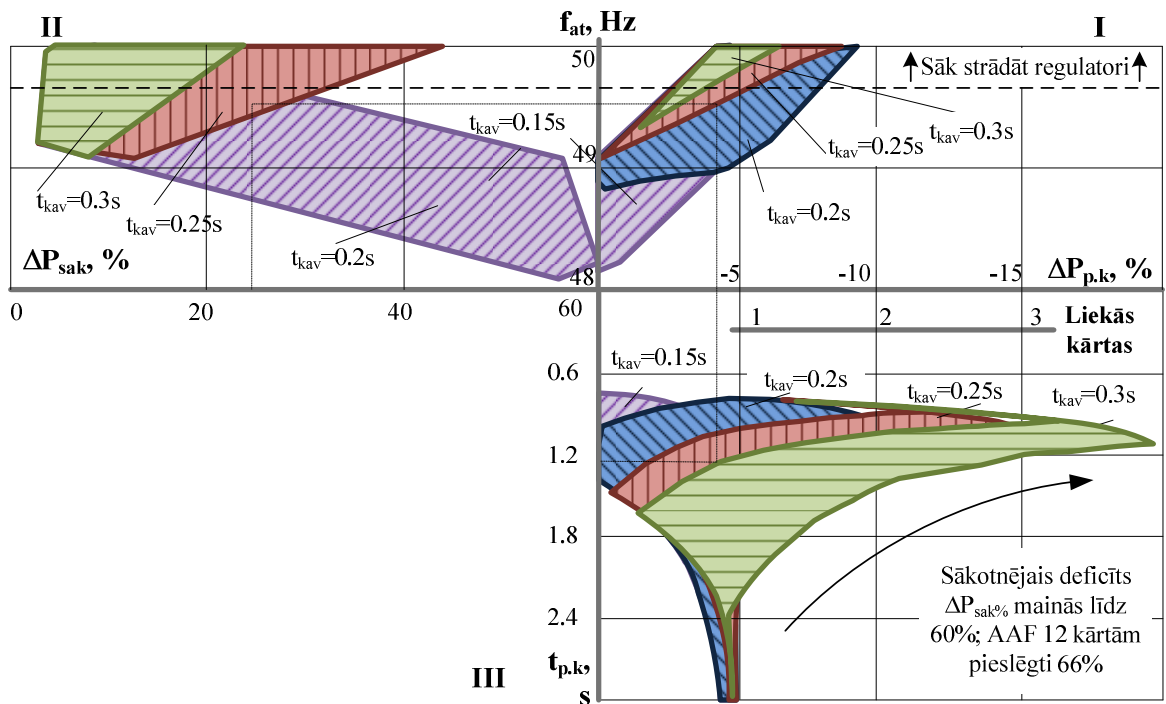
Neskatoties uz to, ka automātika pēc būtības satur atgriezenisko saiti, iedarbināto kārtu skaitam atkarībā no konkrētiem apstākļiem ir zināmā nenoteiktība. Kārtu nostrādes kavējuma dēļ vairākas kārtas var nostrādāt neselektīvi, kā rezultātā tiek atslēgta lielāka slodze nekā bija nepieciešams. Lieki atslēgtas slodzes lielums pēc pēdējas kārtas nostrādes - ΔP_{pk} atkarīgs no frekvences samazināšanās ātruma un sākotnējā deficīta vērtības. Rezultātā pēc AAF1 darbības pie nelieliem sākotnējiem deficītiem frekvence stabilizējas pie mazākām vērtībām (3.3.att.), savukārt pie lielākiem deficītiem lieki atslēgtas slodzes iespaidā frekvencei ir tendence paaugstināties.



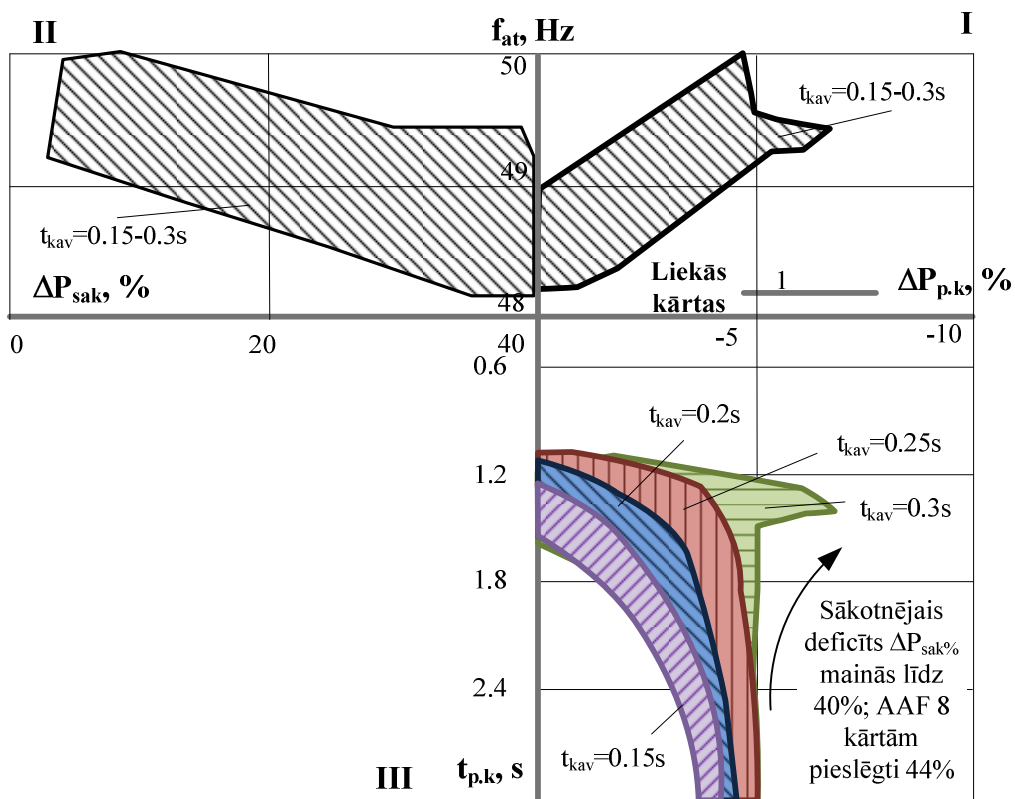
3.3.att. Frekvences izmaiņas raksturs pēc AAF1 nostrādes

Ģenerējošo avotu vadīšanas vajadzībām tika noteiktas frekvences pēc AAF1 nostrādes un frekvenču izmaiņu zonas atkarībā no deficīta apmēra, atslogošanas jaudas un laika kavējumiem (3.4.att., 3.5.att.). Rezultātā katrs attēls (3.4.att., 3.5.att.) sastāv no trīs kvadrantiem. Pirmajā kvadrantā parādītas frekvences atjaunošanās vērtības f_{at} atkarībā no neselektīvi nostrādāto kārtu slodzes lielumiem ΔP_{pk} (un neselektīvi nostrādāto kārtu skaits). Otrajā - frekvences atjaunošanās vērtības f_{at} atkarībā no sākotnējā jaudas deficīta ΔP_{sak} . Trešajā - sakarības starp AAF1 darbības laikiem t_{pk} un ΔP_{pk} , kas veidojas kārtu neselektīvās darbības rezultātā. Kā redzams, attiecībā uz frekvenču līmeņiem situācija ir sliktāka pie maziem deficītiem, toties pie lieliem deficītiem tā ātri atjaunojas vēl pirms lēnās atslogošanas automātikas darbības. Papildu atslogošanas kārtu pēc frekvences izmaiņas ātruma izmantošana ļauj forsēt slodzes atslēgšanu pie lieliem frekvences samazinājumiem un paaugstināt pārejas procesa drošumu. Savukārt kārtas, reaģējošās uz frekvences novirzēm, nodrošina atslodzes precizitāti un selektivitāti.

Ja normālās frekvences un veseluma atjaunošana pēc energosistēmu sadalīšanas ir uzticēta personālam, avārijas likvidācija tiek bremsēta, kas var izraisīt papildu komplikācijas pazeminātās frekvences iestrēgšanas gadījumā. Lai novērstu šādus kavējumus ir aktuāla energosistēmas pāsatjaunošanās mehānisma izmantošana.



3.4.att. Lieki atslēgtā slodze ΔP_{pk} pēc pēdējās kārtas nostrādes, frekvences atjaunošanas vērtības f_{at} un AAF1 darbības laika t_{pk} sakarības pie dažādiem laika kavējumiem t_{kav} , ja sākotnējais deficīts mainās līdz 60 %, bet AAF1 pieslēgti 66 % slodzes



3.5.att. Lieki atslēgtā slodze ΔP_{pk} pēc pēdējās kārtas nostrādes, frekvences atjaunošanas vērtības f_{at} un AAF1 darbības laika t_{pk} sakarības pie dažādiem laika kavējumiem t_{kav} , ja sākotnējais deficīts mainās līdz 40 %, bet AAF1 pieslēgti 44 % slodzes

3.7. Izklidētā ģenerācija energosistēmu sabrukumu avārijās

Pašreizējos apstākļos izklidēta ģenerācijas jauda lielās energosistēmās sasniedz daudzus tūkstošus MW. Ievērojot šo apstākli, to iespaids uz lielo energosistēmu avārijās apstākļos kļūst arvien ievērojamāks [18].

Ievērojot izklidētās ģenerācijas sliktu novērojamību, vienīga iespēja novērst negatīvu iespaidu uz lielo energosistēmu avārijām ir izklidēto ģenerāciju iekārtu obligātie aizsardzības standarti. Šim nolūkam jārada tādas nelielo jaudas iekārtu aizsardzības, kas spētu atšķirt avārijas „savā” tīklā, kad tie būtu jāatslēdz, no avārijām barojošā pārvades tīklā, kad tos atslēgt nevajadzētu.

3.8. Secinājumi

Sabrukuma attīstību pavadošie kaskādprocesu izraisa bīstamās režīma parametru novirzes, kā rezultātā masveidīgi atslēdzas ģenerējošie avoti. Galvenais uzdevums sabrukumu gaitā ir saglabāt ģenerējošos avotus darbā, kas nodrošina normālā režīma ātru atjaunošanos.

Kaskādprocesu attīstība ir sarežģīta un norit ļoti strauji, tādējādi aizsardzībai jābūt ātrdarbīgai un preventīvai, orientējoties uz procesa pilnīgu automatizāciju. Starp esošām aizsardzības sistēmām ir tādas, kuru darbības principus un struktūru ar nelielām izmaiņām var izmantot jauno mērķu sasniegšanai. Tās integrējot jaunajā kompleksā, veidojas racionāla aizsardzības struktūra, kurā situāciju konstatē centralizēta sastāvdaļa, kas rada apstākļus lokālo sistēmu darbam. Līdz ar to notiek balstīšanās uz iegūto ekspluatācijas pieredzi, kas novērš šaubas par aizsardzības darbaspēju un ļauj pārvarēt psiholoģisko barjeru tās ieviešanā.

4. ĢENERĒJOŠO AVOTU SILTUMTEHNISKĀS IEKĀRTAS STABILITĀTE

Energosistēmu drošumu lielā mērā nosaka siltumtehnisko ģenerējošo avotu reakcija uz frekvences novirzēm avārijās apstākļos, kad rodas apstākļi siltumtehniskās iekārtas statistiskās stabilitātes zaudēšanai. Ņemot vērā, ka ģenerējošo avotu saglabāšana darbā ir energosistēmu drošuma un pašatjaunošanās pamats, problēmas izpētei ir liela nozīme. Šīs nodaļas ietvaros tika izpētīta siltumtehnisko iekārtu mijiedarbība un formulētas nepieciešamās vadības metodes, kuras jāpielieto pazeminātās frekvences apstākļos ar nolūku tos saglabāt darbā.

4.1. Ģenerējošā avota pašregulēšanās

Ģenerējošo avotu darbības drošumu nosaka to elementu: enerģētisko katlu, kodolreaktoru, tvaika, gāzes turbīnu un papildiekārtu - īpašības, ko raksturo statisko raksturlīkņu mijiedarbība. No enerģētiskā viedokļa šajā kompleksā katli, gāzes turbīnas un kodolreaktori ir barojošie elementi. Toties tvaika turbīnas – patērējošie. Agregāta spējas, ko nosaka konstruktīvās īpašības un kas sekmē darba režīma līdzsvara atjaunošanos pēc traucējumiem bez ārējās iejaukšanās, sauc par pašregulēšanos, ko nosaka objekta iekšējā atgriezeniskā saite. Neregulējamā objekta stabilitāte saglabājas pie noteikuma [17]:

$$\frac{\partial(G-S)}{\partial\pi} < 0 \quad (4.1)$$

kur $G = f_1(\pi)$ - ģenerācijas raksturlīkne kā funkcija no interesējošā režīma parametra π (spiediens, frekvence vai spriegums); $S = f_2(\pi)$ - noslodzes atkarība no šā parametra.

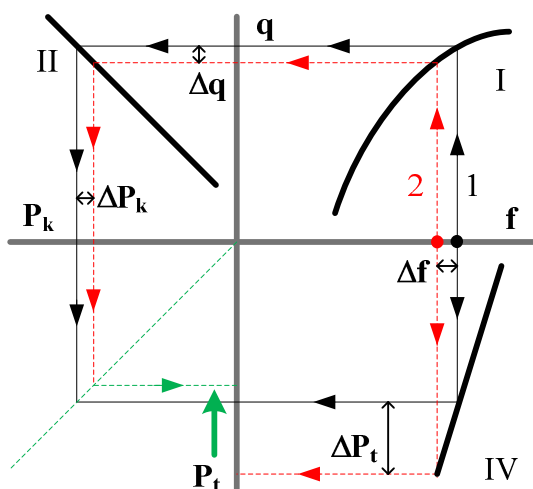
Režīms ir atkarīgs no abu raksturlīkņu īpašību mijiedarbības. Gadījumā, ja mijiedarbības rezultātā izpaužas pozitīvā atgriezeniskā saite, iekārtas darbaspēja tiek nodrošināta tikai pateicoties automātiskai regulēšanai, kas kompensē dabīgās negatīvās atgriezeniskās saites neesamību. Tas prasa paaugstinātu uzmanību un mazina ekspluatācijas

drošumu.

Pazeminoties frekvencei, enerģētiskā agregāta procesiem mainās raksturs, kura izpratne ir svarīga no ģenerējošas iekārtas saglabāšanas un vadīšanas viedokļa avārijas apstākļos.

4.2. Katla-turbīnas ģenerējošā kompleksa režīms, samazinoties frekvencei

Parasti barošanas sūkņu darbināšanai izmanto lieljaudas asinhronos dzinējus, tad sūkņa ražotspēja ir atkarīga no frekvences. Ģenerējošā kompleksa darbību raksturo 4.1.att. parādīta nomogramma. Samazinoties frekvencei par Δf , turbīnas jauda pieaug par ΔP_t (IV kvadrants). Toties, barošanas sūkņa ražīgums atkarībā no frekvences samazinās par Δq (I kvadrants), kas izraisa katla jaudas samazināšanos par ΔP_k (II kvadrants).



4.1.att. Nomogramma katls-tvaika turbīnas kopdarbībai:

I kvadrants - barošanas sūkņa ražīguma raksturlīkne; II – katla ražīguma raksturlīkne; IV- turbīnas apgriezienu regulatora statistiskā raksturlīkne; sākotnējam režīmam atbilst līnija 1 (nepārtrauktā), bet avārijas - 2 (raustīta)

No 4.1.att. seko, ka, samazinoties frekvencei, turbīnas kā tvaika patērētāja un katla kā tvaika ģeneratora jaudas mainās pretējos virzienos un saskaņā ar (4.1), agregāta stabils darbs ir apdraudēts, jo:

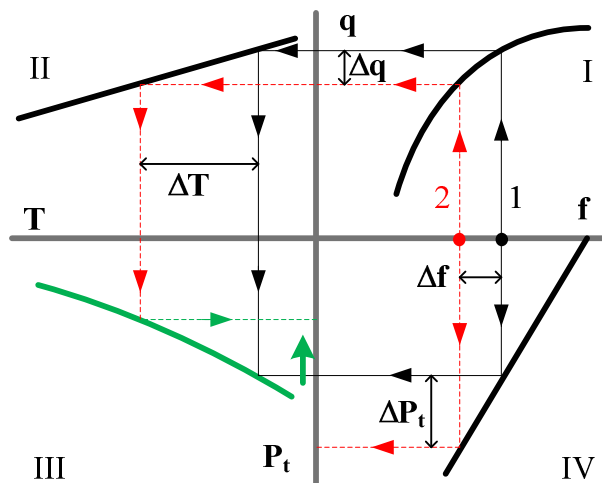
$$\frac{\partial (P_{k(-)} - P_{t(+)})}{\partial f_{(-)}} > 0 \quad (4.2)$$

Šīs izmaiņas rada spiediena samazināšanos, uz ko reaģē tehnoloģiskā aizsardzība, atslēdzot siltumtehnikās iekārtas. Ņemot vērā, ka tvaika iekārtas ir galvenie ģenerējošie avoti un to atslogošana palielina frekvences izmaiņu, dotajā gadījumā paļaujas uz pietiekoši ātru frekvences samazinājuma apturēšanu, strādājot ātrdarbīgai AAF. Pie pazeminātās frekvences iestrēgšanas pēc zemās frekvences pazīmes turbīnas jāpārslēgt uz tvaika spiediena regulēšanu [J.Barkāna un D.Žalostības patentpieteikums, 12]. Īslaicīga atslogošana ir nepieciešama arī tvaika turbīnām, kas strādā kombinētā ciklā, gāzes turbīnu asās reakcijas dēļ uz frekvences pazeminājumu [12].

4.3. Gāzes turbīnas režīms, samazinoties frekvencei

Īpatnējs ir pazeminātās frekvences iespaids uz gāzes turbīnām (4.2.att.). Samazinoties frekvencei, turbīnas jauda palielinās (IV kvadrants), bet kompresora ražīgums samazinās par Δq (I kvadrants). Pasliktinoties dzesēšanai, temperatūra turbīnas lāpstiņu zonā pieaug (II

kvadrants), radot tās bojājuma iespēju.



4.2.att. Nomogramma gāzes turbīnas – kompresora kopdarbībai:

I kvadrants - kompresora ražīguma raksturlīkne; II – lāpstiņu zonas temperatūras izmaiņas raksturlīkne; III – vēlamā jaudas izmaiņa; IV- turbīnas apgriezienu regulatora statiskā raksturlīkne; sākotnējam režīmam atbilst līnija 1 (nepārtrauktā), bet avārijas - 2 (raustīta)

Gāzes turbīnu ražotāji šādos gadījumos paredz iekārtas atslēgšanu, kas jaudas deficīta apstākļos var izraisīt energosistēmas sabrukumu. Lai no tā izvairītos un saglabātu darbā ģenerējošos avotus, pieļaujamās temperatūras uzturēšanai turbīnas jāatslogo pēc frekvences pazemināšanas pazīmes (J.Barkāns, D.Žalostība, patents LV13944 B, [11]). Trešajā kvadrantā paradīta jaudas izmaiņa temperatūras noturēšanai pieļaujamās robežās, neatslēdzot turbīnu.

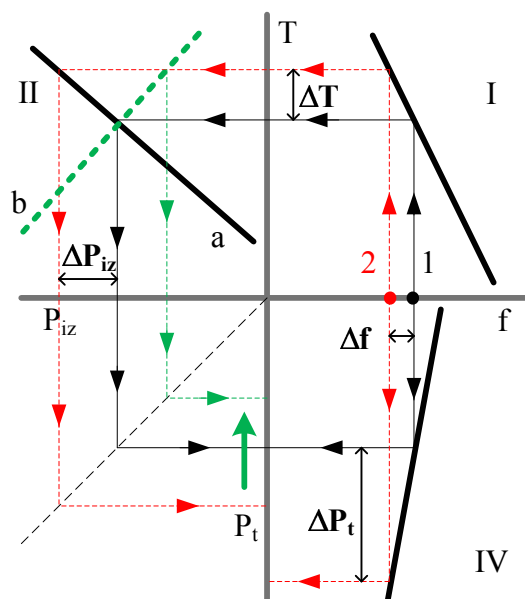
Kombinētā ciklā līdz ar gāzes turbīnām atslēdzas ar tām strādājošās tvaika turbīnas. Tā, piemēram, Itālijas avārijā 2003.gadā frekvences pazeminājuma apstākļos atslēdzās gāzes turbīnas ar summāro jaudu 600 MW, radot energosistēmas sabrukumu. Elektrostacijās ar kombinēto ciklu gāzes turbīna ir tvaika ģenerējošais elements attiecībā pret tvaika turbīnu. Frekvences pazemināšanas apstākļos rodas disproporcija starp tvaika turbīnu un gāzes turbīnu kā tvaika ģenerācijas iekārtu režīmiem. No izgatavotāja viedokļa galvenais – pasargāt iekārtu no bojājumiem, sevišķi nerēķinoties ar to saglabāšanu darbā. Lai avārijas apstākļos saglabātu darbā gāzes turbīnas un līdz ar to arī kombinēta cikla tvaika turbīnas, vadīšana jākoncentrē uz tvaika ģenerējošo iekārtu vadīšanu, pakļaujot tiem tvaika patērējošās turbīnas. Šim nolūkam pēc frekvences pazemināšanas pazīmes tvaika turbīnas jāpārslēdz uz tvaika spiediena regulēšanu, kas enerģētiski cieši savieno iekārtas savā starpā (J.Barkāns, D.Žalostība, patentpieteikums, [12]). Pēc tam, kā minēts augstāk, vadīšanu koncentrē uz gāzes turbīnu. To atslogojot, atbrīvo nepieciešamo gaisa daudzumu lāpstiņu dzesēšanai (J.Barkāns, D.Žalostība, patents LV 13944 B, [11]).

4.4. Kodolreaktoru režīms, samazinoties frekvencei

Kodolreaktoriem atgriezeniskās saites raksturu nosaka vairākas sakarības starp režīma izmaiņu un citiem režīma parametriem: pieprasāmo jaudu, aktīvās zonas temperatūru, un vienkontūra reaktoros tvaika ģenerācijas parametriem. Atkarībā no reaktoru tiem, dažām no šīm sakarībām ir pozitīvās atgriezeniskās saites raksturs, kas izvirza stingrās prasības regulēšanas ātrdarbībai un ekspluatācijai.

Kodolreaktoru režīmu, samazinoties frekvencei, līdzīgi kā iepriekšējos gadījumos, attēlo 4.3.att. nomogramma. Frekvences samazināšanos izraisa cirkulācijas iekārtu ražīguma kritumu, pasliktinot reaktora dzesēšanu, līdz ar ko temperatūra reaktora aktīvajā zonā pieaug

(I kvadrants) un reaktora režīms pārvietojas augstāku temperatūru zonā, kas izraisa izejas jaudas pieaugumu par ΔP_{iz} (II kvadrants, līkne a).



4.3.att. Nomogramma reaktora darbībai:

I kvadrants – cirkulācijas iekārtas atkarība no frekvences; II – reaktora jaudas a) faktiskā un b) vēlama izmaiņas, palielinoties temperatūrai; IV- turbīnas apgriezienu regulatora statistiskā raksturlīkne; sākotnējam režīmam atbilst līnija 1 (nepārtrauktā), bet avārijas - 2 (raustīta)

Ja pirms avārijas reaktors strādāja ar nominālu jaudu, tad avārijas mirklī tas pārslogosies un ņemot vērā, ka temperatūra reaktora ieejā izmainās, uz to, piesardzības dēļ, reaģēs reaktora aizsardzība, atslēdzot to pēc dzesēšanas pasliktināšanās pazīmes (Ninemile atomelektrostacija ASV 2003.g.). Situācijas uzlabošanai, ievērojot nepieciešamību saglabāt reaktorus darbā, pēc frekvences pazemināšanas pazīmes turbīna jāpārslēdz tvaika spiediena regulēšanas režīmā (J.Barkāns, D.Žalostība, patentpieteikums, [12]). Pēc tam vadīšanu var koncentrēt uz reaktoru ar nolūku novērst tā pārslodzi dzesēšanas pasliktināšanās dēļ, nedaudz samazinot jaudu pēc frekvences pazemināšanas pazīmes [11]. Vēlama jaudas izmaiņa parādīta ar līkni (b) nomogrammas otrajā kvadrantā.

4.5. Secinājumi

Frekvences pazeminājums aktīvās jaudas deficīta apstākļos rada situācijas, pie kurām var notikt ģenerējošo avotu siltumtehnikās iekārtas statistiskās stabilitātes zaudēšana ar to masveidīgu atslēgšanos. Sevišķi bīstami tas kļūst pazeminātās frekvences iestrēgšanas gadījumos. Lai novērstu šādas briesmas, pēc frekvences pazemināšanas pazīmes jāpārslēdz turbīnu regulēšanu no frekvences uz tvaika spiediena regulēšanu (regulēšana „pirms sevis”). Šādā gadījumā turbīna tiek cieši saistīta ar tvaika ģenerējošo iekārtu, sekojot to režīma vadīšanai līdz frekvences atjaunošanas brīdim, novēršot ģenerējošo avotu statistiskās stabilitātes sabrukšanu un saglabājot tos darbā. Sevišķi svarīgi to ievērot kombinēto siltumtehniko ciklu iekārtās un atomu elektrostacijās.

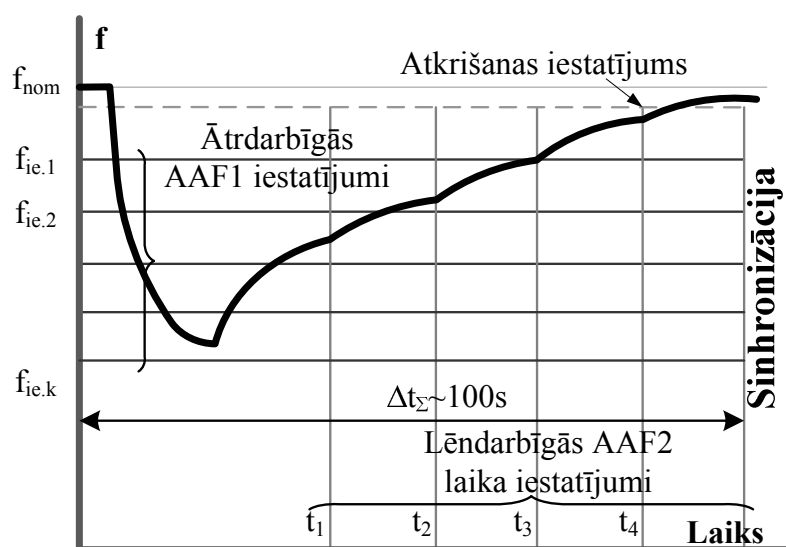
5. PAŠATJAUNOŠANĀS MEHĀNISMS

Šīs nodaļas ietvaros ir apskatīti jautājumi saistīti ar iespēju integrēt jaunajā aizsardzības koncepcijā pašatjaunošanās mehānismu. Īpaša uzmanība tika pievērsta frekvences normalizācijai kā energosistēmas veseluma atjaunošanās priekšnoteikumam.

5.1. Pašatjaunošanās caur frekvences avārijas likvidāciju

Frekvenču avārijas likvidācijas pašatjaunošanās mehānismu izstrādāja 1963.gadā. Latvijas, gan arī citās PSRS energosistēmās, ik gadu notika sabrukumi energosistēmas sadalīšanās rezultātā vāja starpsistēmu tīkla dēļ. Izpētot šādu avāriju notikumus, Latveņergo galvenais dispečers – J.Barkāns noskaidroja, ka avārijas norisei ir identisks raksturs. Rezultātā izveidojās problēmas risinājuma priekšlikums, saskaņā ar kuru esošā ātrdarbīgā frekvences atslogošanas automātika tika papildināta ar trīs sekojošiem elementiem [19]:

- lēno frekvences atslogošanas automātiku, kuras uzdevums ir atjaunot frekvenci līdz normālai vērtībai (5.1.att.);
- automātisko energosistēmu daļu savienošanos pie nelielas energosistēmu daļu frekvenču starpības, izmantojot uz visām līnijām esošus AAI ar sinhronisma kontroles iekārtām;
- patērētāju līniju automātisko atpakaļ ieslēgšanu pēc normālās frekvences pazīmes.



5.1. att. Frekvences izmaiņas, darbojoties pretavārijas automātikai

Ieviešana bija samērā vienkārša, kaut gan tas bija liela mēroga darbs. Lēnai atslogošanai varēja izmantot esošos komplektus ar nelielām izmaiņām, patērētāju atpakaļ ieslēgšanai - standarta risinājumus, pielietojamus uz līnijām. Risinājums tika ieviests 1964.gada beigās. Ja līdz šim energosistēmas darbību atjaunoja vairākās stundās, tad 1965.gada 1.oktobra sabrukums pašlikvidējās automātiski 100 sekunžu laikā.

Publikācija [20] par šo darbu nonāca Enerģētikas ministrijas tehniskajā pārvaldē un risinājuma galvenie elementi tika iekļauti PSRS enerģētikas ministrijas Pretavārijas vadošos norādījumos, kas nodrošināja tā plašu ieviešanu PSRS mērogā. Latvijā no 1965.gada šī sistēma strādāja aptuveni 20 reizes līdz bija uzbūvēts drošs starpsistēmu tīkls.

Pašatjaunošanās mehānisma izmantošanas gaitā noskaidrojas tā divas svarīgas īpašības:

- **Pirmkārt**, sakarā ar avārijas pašlikvidāciju 1 – 1.5 minūtēs, lielākais patērētāju daudzums procesu nemana. Kā rezultāts frekvences avārija pārvērtās īsā nemanāmā pārejas procesā.
- **Otrkārt**, sakarā ar frekvences automātikas pilnveidošanu un papildināšanu ar lēno atslodzi, automātisko sinhronizāciju un patērētāju AAI, frekvences avārija no bīstamās energosistēmu sabrukumu izraisošās avārijas kļuva par energosistēmu normālā režīma pašatjaunojošo līdzekli.

Neskatoties uz to, ka šis pašatjaunošanās mehānisms bija iekļauts vadošajos norādījumos, tā izpēte līdz galam netika veikta. Tāpēc šī darba ietvaros tiek pētīti jautājumi, saistīti ar energosistēmas daļu frekvences normalizāciju, automātisko veseluma un elektroapgādes atjaunošanu.

5.2. Prasības lēnai atslogošanas automātikai

Lēnās atslogošanas kārtām paredz 5-15 sekunžu laika iestatījumus, lai novērstu pārregulēšanu. Lai nodrošinātu frekvences atjaunošanos līdz nominālai vērtībai, lēnai AAF paredz atkrišanās koeficienta pārstāššanu pēc kārtu palaišanas. To realizē ar iedarbību uz frekvences elementa iestatījuma devēju, izmantojot palaišanas signālu (5.1.att.).

Izvēlētajās koncepcijās ietvaros nostrādes iestatījums lēnai atslogošanas automātikai ir pašatjaunošanās mehānisma palaišanas līdzeklis. Nostrādes frekvenci jāizvēlas nedaudz zemāku par nominālo frekvenci, kas netiek sasniegta normālos režīmos.

5.3. Frekvences izmaiņa pie jaudas nometumiem

Pēc enerģosistēmas sadalīšanas jaudas pāruma daļā notiek frekvences paaugstināšanās, kur, atšķirībā no deficītās daļas, darbojas apgriezīgu regulatori. Izskatot procesus vienkāršotā TES shēmā, pārvades funkciju un raksturojošo vienādojumu var pierakstīt sekojoši [18]:

$$\frac{\omega(p)}{\Delta P_{sl}(p)} = \frac{s(T_s p + 1)(T_{rv} p + 1)}{s(T_s p + 1)(T_{rv} p + 1)(T_j p + k_{sl}) + 1}$$

$$T_s T_{rv} T_j p^3 + (T_s T_{rv} k_{sl} + T_{rv} T_j + T_s T_j) p^2 + (k_{sl}(T_s + T_{rv}) + T_j) p + k_{sl} + 1/s = 0 \quad (5.1)$$

kur – T_s , T_{rv} , T_j - servodzinēja, turbīnas tvaika telpas un ģeneratora laika konstantes; p – Laplasa operators; s - statisms; ΔP_{sl} - slodzes izmaiņa.

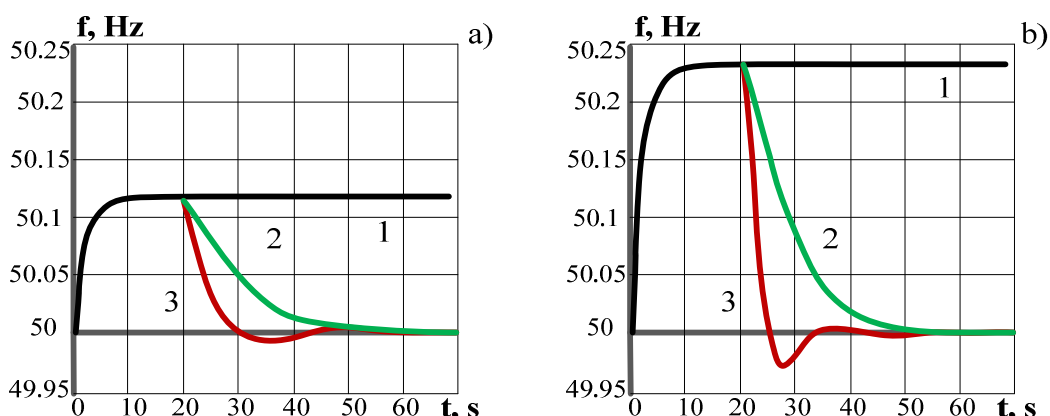
Praktiski šim frekvences izmaiņas procesam ir aperiodisks raksturs. Jaudas nometuma radīta frekvences paaugstināšanās kā svarīgs priekšnoteikums turpmākam veseluma atjaunošanās procesam vienāda ar:

$$\Delta f = \left(\frac{1}{k_f + 1/s} \right) \frac{\Delta P}{P_s} f_{nom} \quad (5.2)$$

kur ΔP - nometamā jauda, MW; P_s - enerģosistēmas jauda, MW; s - statisms, r.v. un k_f - slodzes statistiskais koeficients, 1/%.

5.4. Frekvences līmeņu normalizācija pirms savienošanās

Sinhronizācijas nodrošināšanai jāpanāk pēc iespējas mazāku frekvenču starpību atdalītās enerģosistēmu daļās. Jaudas pāruma dēļ frekvence var izrādīties nedaudz paaugstināta, kas var aizkavēt sinhronizāciju. Tad frekvences normalizācijai var izmantot lokālo frekvences sekundārās regulēšanas forsēšanu ar mērķi paātrināt nominālās frekvences iestāšanos (J.Barkāns, D.Žalostība, patents LV13881 B, [9]). Piemēram 5.2.att..



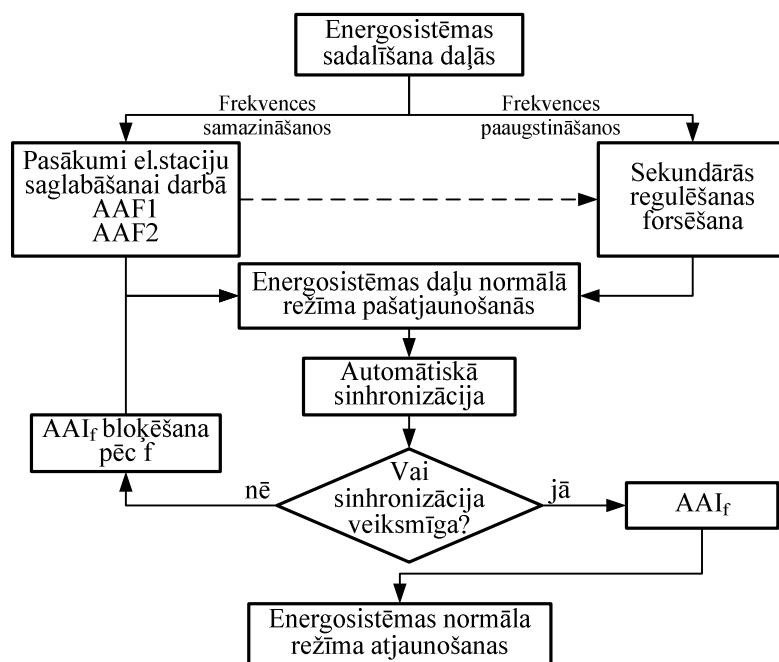
5.2.att. Frekvences izmaiņas raksturs a) pārumš 5%; b) pārumš 10%:

1 – bez forsēšanas; 2 – ar forsēšanu; 3 – pārregulēšana

Regulēšanas forsēšanas modelēšanai tika izmantota Matlab Simulink programma (5.2.att.), kur līkne (1), strādājot regulatoriem pāruma daļā ($T_I=10s$, $k_f=1.5$, $s=5\%$) (a) gadījumā pie jaudas uzmetuma 5% frekvence paceltos līdz 50.12 Hz, savukārt (b) gadījumā, pie 10% līdz 50.23 Hz, kas varētu traucēt ātru automātisko savienošanu. Izmantojot minēto risinājumu ar integrālo posmu pie $T_{2r}=2s$ un $k_{2r}=4-5$, frekvence normalizējas 30-35 s laikā, ko raksturo līkne (2) 5.2.att., (a) variantā frekvences izmaiņas ātrumu sākumposmā 8mHz/s un (b) – 15mHz/s, kas ļauj notikt sinhronizācijai, izmantojot sinhronisma kontroles iekārtas. Stabils process pie šiem koeficientiem saglabājas, ja statisms mainās 5-8% robežās un $T_I=8-10s$, $k_f=1.5-2$. Pārregulēšana pie lielākām attiecībām T_{2r} tiek novērsta apmēram 25 sekundēs, kas parādīts 5.2.att. ar līkni (3), (a) gadījumā $k_{2r}/T_{2r} = 5$ un (b) – $k_{2r}/T_{2r} = 10$.

5.5. Pašatjaunošanās mehānisms pretsabrukuma koncepcijas ietvaros

Apskatīto pašatjaunošanās metodi tīkla pārslodzes novēršanai izmanto inversi. Ja frekvences avārijas gadījumā process vērsts uz daļu automātisko savienošanu pēc notikušās enerģosistēmas sadalīšanas, tad pārslodzes gadījumā tas vērsts uz apzinātu īslaicīgu enerģosistēmas dalīšanu ar turpmāk sekojošu savienošanas procesu; šādā veidā bloķējot sabrukuma „vilņa” izplatīšanos. Avārijas likvidācija un pašatjaunošanās notiek ātri un kontrolējami, tāpēc to var uzskatīt par stabilu pārejas procesu. Situāciju ilustrē 5.3.att..



5.3. Lokālās sistēmas ar atgriezeniskajām saitēm pašatjaunošanās mehānismā

Dalot enerģosistēmu vietā, caur kuru plūst jauda, kā bija minēts, vienā daļā rodas jaudas deficīts un frekvences samazināšanās, bet otrā – pārums un frekvences paaugstināšanās. Īslaicīgi pazeminātās frekvences apstākļos, ja nepieciešams, jāizmanto minētie §4 speciālie pasākumi ģenerējošo avotu saglabāšanai darbā. Paaugstināto frekvenci normalizē, izmantojot sekundārās regulēšanas forsēšanu, radot labvēlīgus nosacījumus automātiskai veseluma atjaunošanai (§7). Atjaunojoties enerģosistēmas veselumam un elektrotīkla caurlaides spējai, pakāpeniski tiek ieslēgti patērētāji. Tādējādi pateicoties lokālajām sistēmām ar atgriezeniskajām saitēm, tiek nodrošināta ātra avārijas pašlikvidācija.

5.6. Secinājumi

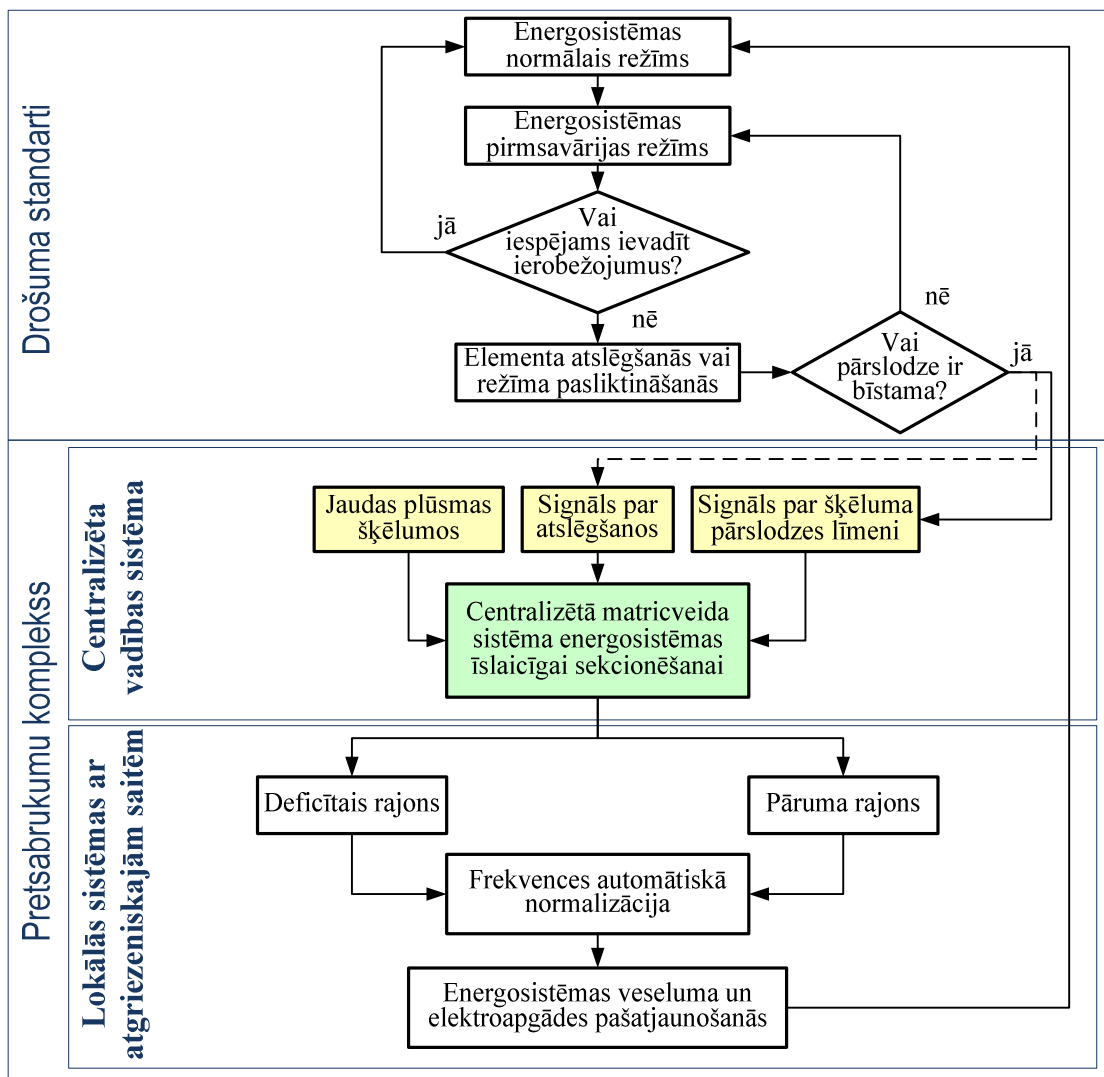
No apskatītā skaidrs, ka frekvenču atjaunošanas un to izlīdzināšana abās daļās rada priekšnoteikumus energosistēmas automātiskai pašatjaunošanās operācijai, kas notiek apmēram 100 sekundēs un paliek nepamanīta no patērētāju vairākuma puses. Šāds režīms var tikt izmantots arī citu avārijas veidu, piemēram, sprieguma lavīnu likvidācijai. Šim nolūkam tās jāpārvērš aktīvās jaudas deficīta režīmā, kas, savukārt, labākā gadījumā nodrošinās pašatjaunošanos, bet sliktākā – novērsīs ģenerējošo avotu un līniju masveidīgas atslēgšanās.

6. ENERGOSISTĒMAS PREVENTĪVĀ AIZSARDZĪBAS SISTĒMA

Šīs nodaļas ietvaros ir definētas prasības aizsardzības un pašatjaunošanas automātikas kompleksam energosistēmu sabrukumu novēršanai; ir parādīta pretsabrukuma kompleksa struktūra un šī kompleksa realizācijas metodes.

6.1. Energosistēmas pretsabrukumu kompleksa struktūra

Piedāvājamā pretsabrukuma kompleksa struktūra parādīta 6.1.att.. Aizsardzībai ir centralizēti-reģionāls raksturs.



6.1. att. Pretsabrukuma kompleksa vienkāršots darbības algoritms

Centralizētās vadības uzdevums – ieslēgt darbā esošās lokālās sistēmas ar tām

piemītošām atgriezeniskajām saitēm, kas garantē augstu drošumu. Lokālo automātikas sistēmu izmantošana attiecas uz abām energosistēmas daļām. Augstāk minētā pilnveidotā pašatjaunošanās mehānisma izmantošana nodrošina pilnīgu vai atsevišķos gadījumos daļēju normālā režīma atjaunošanos. Nepieciešamības gadījumā frekvences normalizācijai tiek izmantota sekundārās regulēšanas forsēšana. Turpmāka procesa gaita ir atkarīga no tīkla caurlaides spējas atjaunošanās līniju atpakaļieslēgšanās rezultātā. Ja līniju darbs atjaunojās, tad apmēram 100 sekundēs sekos energosistēmu daļu savienošanos un atslēgto patērētāju līniju automātiskā atpakaļieslēgšanās. Gadījumā, ja caurlaides spēja nav pilnīgi atjaunojusies, tad, saglabājoties ģenerējošiem avotiem, patērētāju ieslēgšanās process tiek pabeigts līdz situācijas normalizācijai.

Informācijas nodošanu par pārslodzes apmēru un dalījuma vietām realizē ar ātrdarbīgiem sakaru kanāliem loģisko signālu veidā.

Konkrētos gadījumos risinājumus var papildus vienkāršot.

6.2. Pārvades tīkla šķēluma pārslodzes novēršanas metodes

Pārslodzes optimālā novēršana

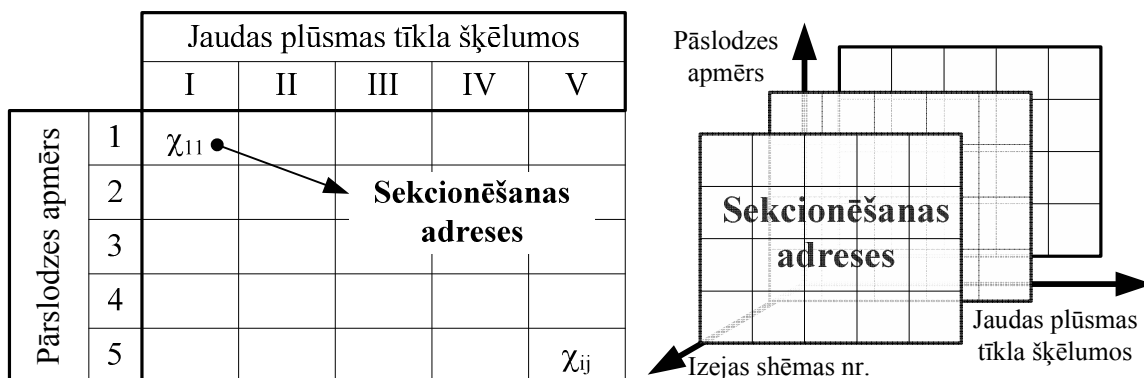
Optimālo īslaicīgo sekcionēšanu realizē, izmantojot centralizēto divparametru matricveida struktūru, sadalot energosistēmu vietā, caur kuru plūst jauda, līdzīga tīkla pārslodzes lielumam (J.Barkāns, D.Žalostība, patents LV 13772 B, [8]). Viens no parametriem ir jaudas plūsma caur bīstamo šķēlumu kā režīma smaguma rādītājs. To nosaka normālā režīmā, izmantojot energosistēmas matemātisko modeli, fiksējot optimālās sekcionēšanas adreses. Otrs - signāls par svarīga elementa atslēgšanos.

Optimālo sekcionēšanu var nodrošināt, kontrolējot normālā režīmā jaudas plūsmas iespējamās sekcionēšanas zonā. Atslēdzoties svarīgam elementam, darbība tiek adresēta uz sekcionēšanas vietu, kuru nosaka, izmantojot energosistēmas matemātiskā modelī virtuālu ģeneratoru jaudas saņemšanas pusē, kura jauda tiek regulēta tā, lai tīkla šķēluma jauda līdzinātos maksimāli pieļaujamai. Sekcionēšanas vieta tādā gadījumā atbilst jaudas sateces punktam (J.Barkāns, D.Žalostība, patents LV 13663 B, [7]).

Optimālā sekcionēšana bez matemātiskā modeļa

Centralizētās sistēmas drošuma palielināšanas nolūkos tās funkcijas pēc iespējas jāsašaurina. Atšķirībā no iepriekš aprakstītās metodes, šinī gadījumā nepieciešams tīkla pārslodzes pakāpi raksturojošs signāls, kas pienāk uz centralizēto aizsardzību (J.Barkāns, D.Žalostība, patents LV 13913 B, [10]).

Uzdevums tiek atrisināts, izmantojot divparametru matricveida struktūru, kurā viens parametrs ir faktiskā tīkla šķēluma pārslodze, ko fiksē šķēluma aizsardzība, un otrs – informācija par jaudas plūsmām aiz pārslogojamās tīkla daļas, ko nosaka izejas režīmā reālā laikā pirms avārijas izcelšanās (6.2.att.).



6.2.att. Sekcionēšanas adrešu matrica

Šo uzdevumu var izpildīt lokālā aizsardzība ar vairāku līmeņu diskrētiem jaudas iestatījumiem, kas nodrošina augstākā iestatījuma nostrādi un tā līmeņa signāla pārraidi [10]. Katram pārslodzes līmenim atbilst tīkla šķēlums, kurā jārealizē sekcionēšana.

Aizsardzības ātrdarbību nosaka signāls par tīkla elementa atslēgšanos. Šā signāla esamība liecina, ka tīkla pārslodze izraisīs dināmiskās stabilitātes zaudēšanu un aizsardzībai jādarbojas momentāni. Toties, ja šā signāla nav, tad gaidāma sprieguma lavīna un aizsardzība lielāka drošuma nolūkos var darboties ar nelielu laika ieturējumu.

Sekcionēšana fiksētās vietās

Lielās energosistēmās atsevišķos gadījumos var pielietot sekcionēšanu fiksētās vietās, līdz ar to atkrīt šīs darbības adresācija ar sazarotā kanāla palīdzību, kas vienkāršo aizsardzības sistēmu (J.Barkāns, D.Žalostība, patents LV 13881 B, [9]). Ievērojot, ka energosistēmas sabrukumi notiek reti un process likvidējas tikpat ātri, kaut gan ar īslaicīgi lielāku patērētāju daudzumu atslēgšanu, šāda avārijas likvidācija jāuzskata par iespējamu, it īpaši lielajās energosistēmās, kur deficīts ir mazs salīdzinot ar energosistēmas jaudu.

6.3. Secinājumi

Saskaņā ar piedāvātajiem principiem un koncepciju var realizēt aizsardzības un pašatjaunošanās automātiskas kompleksu sabrukumu novēršanai. Izmantojot īslaicīgo energosistēmas sekcionēšanu, pārvades tīkla šķēlums tiek ātrdarbīgi atslogots līdz pieļaujamam līmenim. Sekcionēšana rada vienā energosistēmas daļā īslaicīgu slodzes noņemumu, bet otrā – tikpat lielu uzmetumu. Avārija pašlikvidējas apmēram 100 sekundes, izmantojot pilnveidotu pašatjaunošanās mehānismu. Hierarhiskās vadības sistēmas izmantošana garantē augstu drošumu un precizitāti.

Dažādi sekcionēšanās realizācijas varianti un iespēja izmantot ekspluatācijā pārbaudītas medotes nodrošina kompleksa vienkāršu ieviešanu.

7. ENERGO SISTĒMAS PĒCAVĀRIJAS AUTOMĀTISKĀ APVIENOŠANĀS

Energosistēmas veseluma atjaunošana ir svarīgs pašatjaunošanās elements. Personālam izpildot šo uzdevumu, nepieciešami sarežģīti pārslēgumi sinhronizācijas iekārtu izmantošanai, kas nepieļaujami aiztur procesu. Ievērojot to, ka energosistēmas sabrukumi ir samērā retas avārijas un frekvences abās daļās tiek ātri izlīdzinātas, pēcavārijas apvienošanās nolūkam var izmantot uz līnijām esošās AAI sinhronisma kontroles iekārtas. Šajā nodaļā parādīta šīs pieejas pielietošanas iespējas piedāvājamā pretsabrukuma kompleksa ietvaros.

7.1. Apvienošanās procesa trajektorijas

Pārējas procesa vienkāršotai novērtēšanai tiek izmantotas fāžu plaknes trajektorijas (δ ; Δf) koordinātu sistēmā. Šīs trajektorijas nosaka konkrētie sistēmas un ieslēgšanas parametri: turbīnas un ģenerators sinhronie un asinhronie momenti (demferēšanas un ierosmes ietekme), energosistēmu daļu kustības paātrinājumi un ieslēgšanās leņķis [21].

Iespējamo ekvivalentā ģenerators ievilkšanos sinhronismā vienkāršās struktūras sistēmai pirmā tuvinājumā var noteikt, izmantojot ģenerators rotora kustības vienādojumu:

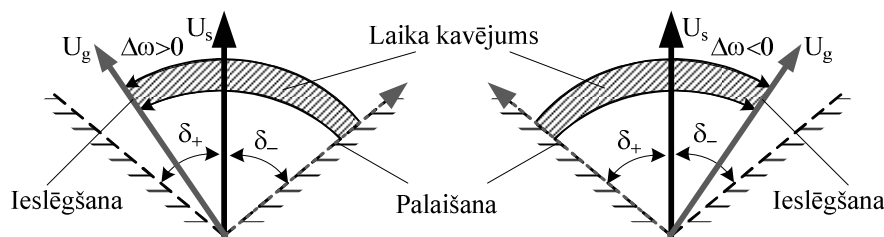
$$\begin{aligned} \frac{T_{j.s}\pi\Delta f^2}{f_0} &= A = \frac{E_*U_*}{x_{\Sigma_*}}(\cos\delta - \cos\delta_{\max}) - \frac{a}{f_0}T_{j.s}(\delta_{\max} - \delta) \\ \Rightarrow \Delta f &= \sqrt{\frac{f_0}{\pi} \frac{E_*U_*}{x_{\Sigma_*}}(\cos\delta - \cos\delta_{\max}) - \frac{a}{\pi}(\delta_{\max} - \delta)} \end{aligned} \quad (7.1)$$

kur A - kinētiskā enerģija; f_0 - nominālā frekvence, Hz; δ_{max} - maksimāli pieļaujamais leņķis pārejas procesā, °; δ - ieslēgšanās leņķis, °; T_{js} – sistēmas mehāniskās inerces laika konstante, s; $P_{m*} = E_*U_* / x_{\Sigma_*}$ - maksimālā jauda, r.v; a – vienmērīgs paātrinājums, Hz·s.

7.2. Pēcavārijas apvienošanās ar sinhronisma kontroles iekārtām

Lai nekavētu normālā režīma pašatjaunošanās pēc frekvences normalizācijas, procesam jānotiek automātiski bez personāla iejaukšanās. Šīm nolūkam piedāvāts izmantot energosistēmās plaši pielietojamās sinhronisma kontroles iekārtas.

Parasti līnijas ieslēdzās vienā galā pēc sprieguma neesamības pazīmes, bet otrā pēc sinhronisma esamības pazīmes ar sinhronisma kontroles iekārtām, kuras tiek palaistas pie leņķu starpības $\pm\delta$, bet nostrādā pēc laika ieturējuma t_d izsmelšanas. Izmantojot šīs iekārtas pēcavārijas apvienošanai, sekcionēšanas rezultātā vienpusīgi atslēgto līniju sinhronisma kontroles iekārtas atrodas gaidīšanas režīmā un veiksmīgai ieslēgšanai ir nepieciešams, lai ieturējuma laikā sprieguma vektors¹ neizietu no pieļaujamo leņķu diapazona (7.1.att.). Ja pirmā līnija ieslēgsies, izmantojot iekārtu sinhronisma uztveršanas režīmā, tad pārējo elektropārvades līniju ieslēgšanās notiks kā parasti pēc sinhronisma esamības pazīmes.



7.1.att. Sinhronisma kontroles iekārtas darbības zona

Paātrinājums izmaina sekmīgās ieslēgšanās diapazonu, tāpēc no sinhronizācijas viedokļa tam jābūt minimālam, lai vektors ieturējuma laikā paliktu iekārtas darbības zonā.

7.3. Ieslēgšanas strāvas ietekme

Energosistēmas daļām savienojoties pie $\pm 40^\circ$ leņķu diapazonā un frekvenču starpības, rodas izlīdzinošā strāva I_{iz} . Aptuveni pieņemot, ka pretestības ir apgriezti proporcionālās jaudām, strāvu attiecība vienāda:

$$\frac{I_{izl}}{I_k} = \frac{0.68}{1+m+n} \quad (7.2)$$

kur n - attiecība starp sinhronizējamo daļu pretestībām; m - šķeluma pretestības attiecība pret pievienojamās daļas pretestību.

Tā, piemēram, ieslēgšanas strāvas attiecība pret īsslēguma strāvu, savienojot dažādu jaudu daļas caur 500kV 400km garu līniju pie 40° leņķa, ir vairākkārt mazāka. Ja apvienojamo energosistēmu daļu jaudas ir vienādas, tad maksimāla ieslēgšanas strāva ir 16% no īsslēguma strāvas. Toties, ja jaudu attiecība ir 1:5, tad tikai 8%. Konkrētos gadījumos parametri var atšķirties no augstāk minētiem visparinājumiem. Tad izlīdzinošas strāvas var sasniegt 30% no īsslēguma strāvas, kas ir ģeneratoru un transformatoru pieļaujamās robežās.

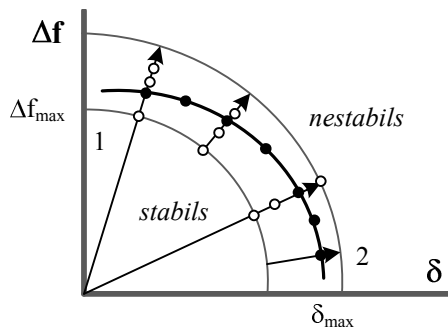
7.4. Sinhronizācijas procesa matemātiskais modelis

Pēcavārijas apvienošanās sinhronizācijas procesa gaitu var pārbaudīt uz matemātiskā modeļa, ko izstrādāja V.Ivanovs programmas "Mustang" [1990-2005 Copyright Vladimir

¹ Pieņemts, ka energosistēmas daļas sprieguma vektors U_s ir nekustīgs, bet atdalītās daļas vektors U_g rotē pret.

Ivanov Group] ietvaros [21], kurā ir paredzēta dināmisko procesu modelēšana, savienojot enerģosistēmas daļas pie noteikta leņķa un frekvenču starpības.

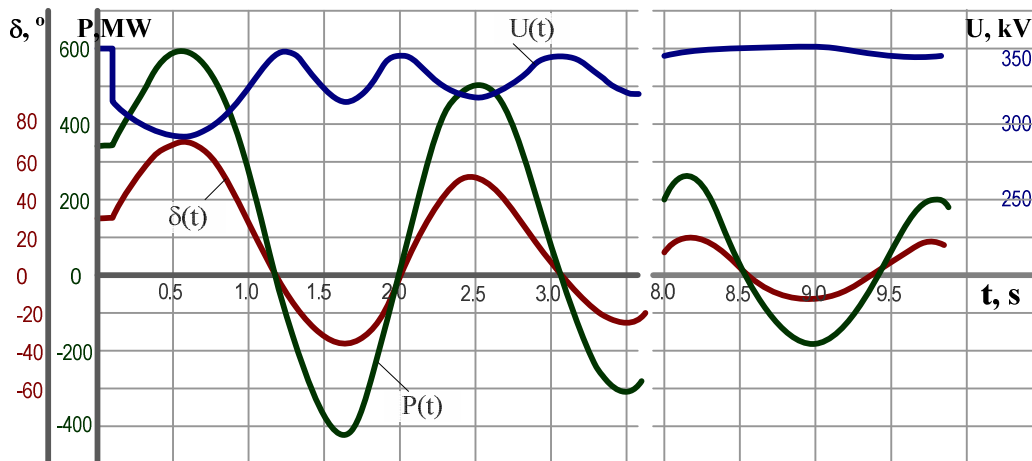
Izstrādātā aprēķinu programma ļauj modelēt enerģosistēmu savienošanās procesu ar vajadzīgu precizitāti (ģeneratoru modeļi, ierosmes sistēmas, regulēšana, slodzes r/l, automātika utt.), kā arī neatkarīgi izvēlēties sākuma frekvences starpības un ieslēgšanās leņķus, tādā veidā iegūstot pilnīgu ainu par dažādu režīma parametru ietekmi uz procesa sekmīgumu. Pārējas procesa trajektoriju aprēķinam izmanto rādiuss vektoru (skat. 7.2.att.).



7.2.att. Trajektorijas apgabala novērtējums

Ar rādiuss vektora palīdzību soli pa solim mainot parametrus un aprēķinot režīmu virzienā no stabila režīma (sekmīgas sinhronizācijas), atrod robežpunktu, kas atdala to no nestabila režīma. Šo procedūru atkārto katram nākamam punktam.

Sekmīgās sinhronizācijas gadījumā pārējas procesa svārstībām ir rimstošs raksturs (7.3.att.), nesekmīgās – augošs.

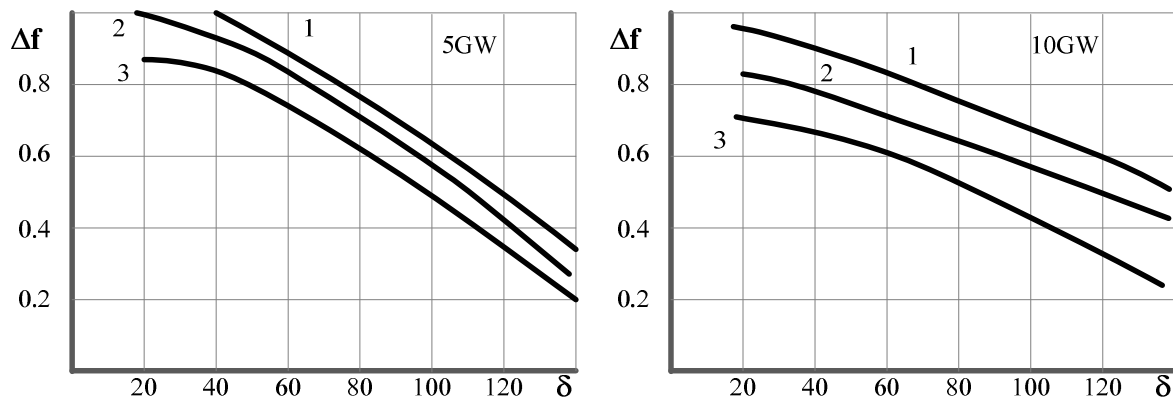


7.3. Veiksmīgās sinhronizācijas pārējas process

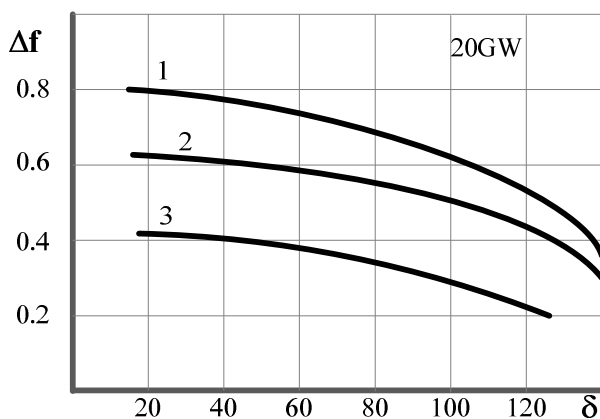
7.5. Robežtrajektorijas dažādiem savienošanās apstākļiem

Analizējot pēcavārijas savienošanās procesu no stabilitātes saglabāšanas viedokļa, tika pieņemts, ka savienošanās vietas tuvumā ir pievienota noslogotā. Enerģosistēmas daļas vienkāršoti apzīmēsim: ES1 – jaudas nodošanas daļa, ES2 – jaudas saņemšanas daļa un ES3 – pievienojamā daļa. Pieņemsim, ka enerģosistēmas daļu jaudas vienādas, tās savieno 500kV 400 km garas līnijas; ģeneratoriem ir stiprās darbības ierosmes regulatori. Pēcavārijas savienošanās notiek, ieslēdzot līniju starp ES2 un ES3. Pie tam ES3 frekvence ir zemāka nekā ES1 un ES2. Izmantojot minēto programmu, tika aprēķinātas robežtrajektorijas, pieņemot, ka: 1 – AAF2 darbības rezultātā pievienojamai daļai ir -0.3Hz·s paātrinājums; 2 – savienošanās notiek bez paātrinājuma; 3 – slodzes uzmešanas rezultātā pievienojamai daļai ir 0.3Hz·s

paātrinājums. Trajektorijas 5 GW un 10GW daļu savienošanai parādītas 7.4.att., savukārt 7.5.att. - 20GW; kā redzams, AAF2 darbība (līnijas 1) sekmē ievilkšanos sinhronismā, savukārt pretēji vērsts paātrinājums (līnijas 3), sašaurina veiksmīgās savienošanās apgabalu.



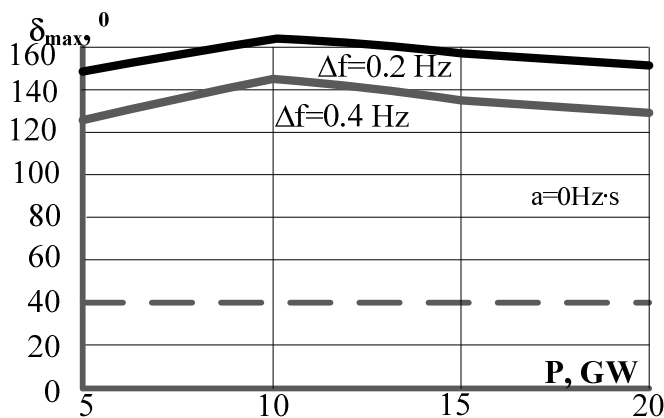
7.4.att. a) Robežtrajektorijas savienojoties 5GW sistēmām; b) tas pats 10GW



7.5.att. Robežtrajektorijas savienojoties 20GW sistēmām:

1, 2 un 3 – pievienojamās daļas paātrinājums, attiecīgi -0.3, 0 un 0.3 Hz·s

Palielinoties pievienojamo energosistēmu jaudām un paātrinājumam, pieļaujamo leņķu diapazons sašaurinās. Redzamās 7.6.att. līknes raksturo maksimāli pieļauamos ieslēgšanās leņķus, pie kuriem notiek sinhronisma atjaunošanās atkarībā no pievienojamo daļu jaudas un frekvenču starpības.



7.6.att. Maksimāli pieļaujamā leņķa atkarība no sinhronizējamās daļas jaudas

Ieslēgšanās leņķa vērtības ierobežo sinhronisma kontroles iekārtas iestatījums, kas praksē pieņemts $\pm 40^\circ$. Analizējot iegūtos rezultātus, var secināt, ka pēcavārijas gadījumos sinhronisma kontroles iekārtas var sekmīgi, ar lielu rezervi izmantot energosistēmu daļu veseluma atjaunošanai.

7.6. Pārējas procesa maksimālais leņķis un sprieguma samazinājums

Pārējas procesa maksimālais leņķis δ_{\max} ir atkarīgs no ieslēgšanās leņķa δ , frekvenču starpības Δf un paātrinājuma a , kuru jāierobežo. Maksimālā leņķa vērtību δ_{\max} tuvināti var noteikt izmantojot vienādojumu (7.1), pieņemot, ka paātrinājuma nav:

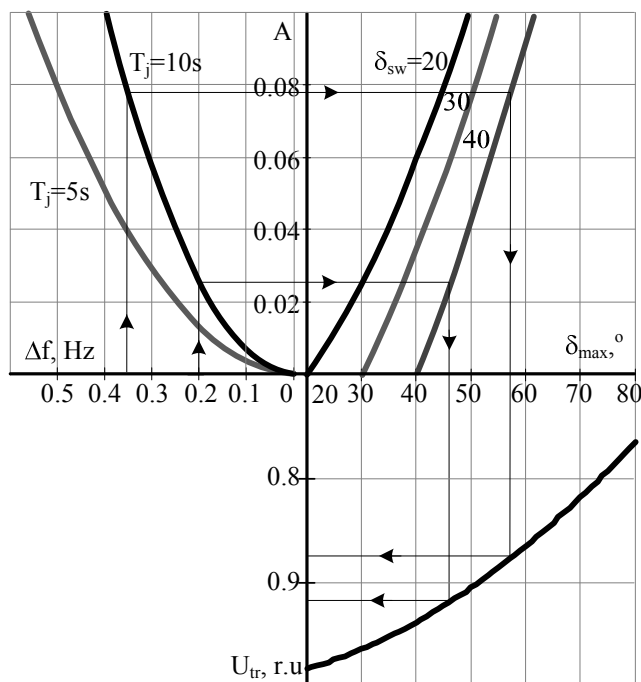
$$\delta_{\max} = \arccos \left(\cos \delta - \frac{T_j \pi \Delta f^2}{f_0 P_m} \right) \quad (7.3)$$

Izvēloties sinhronizācijas apstākļus, jāņem vērā, ka spriegums ap svārstību centru samazinās, ko vienkāršoti var aprēķināt kā:

$$|U_{tr}| = \sqrt{\left(\frac{U_g x_1}{x_1 + x_2} \cos(\delta) + \frac{U_s x_2}{x_1 + x_2} \right)^2 + \left(\frac{U_g x_1}{x_1 + x_2} \sin(\delta) \right)^2} \quad (7.4)$$

kur U_s un U_g - ģenerējošo avotu spriegumi; tiek pieņemts, ka U_g sprieguma vektors rotē attiecībā pret nekustīgo vektoru U_s ; x_1 un x_2 - pretestības no tranzīta punkta līdz ģenerējošiem avotiem; x - summārā pretestība, $x = x_1 + x_2$; δ - leņķis starp sprieguma vektoriem.

Izmantojot vienādojumus (7.1), (7.4), (7.3), var konstruēt nomogrammu pie zināmiem T_j un P_m lielumiem, kas ļauj novērtēt maksimālo leņķi un spriegumu izmaiņas atkarībā no ieslēgšanās leņķa un frekvenču starpībām (7.7.att.).



7.7.att. Sinhronizācijas parametru aprēķina nomogramma

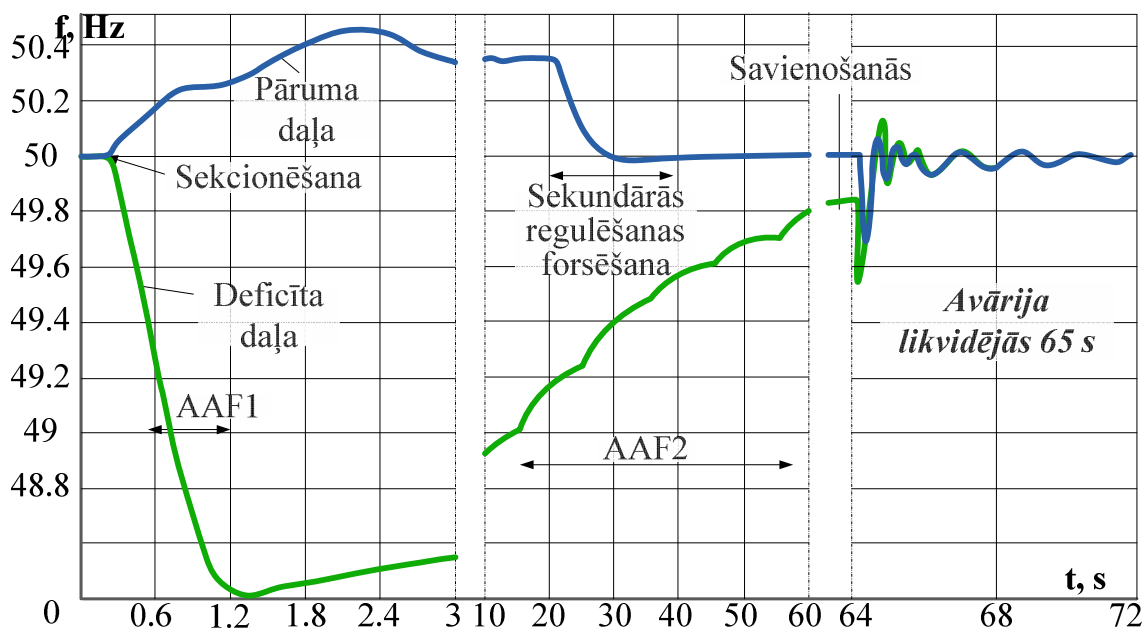
Kā redzams 7.7.att., spriegums samazinās pieļaujamās robežās, ja energosistēmu daļu savienošana izmanto sinhronisma kontroles iekārtas, kas pieļauj sinhronizāciju nelielā frekvenču starpību diapazonā pie minimāliem paātrinājumiem un ieslēgšanās leņķiem.

7.7. Piedāvātā aizsardzības kompleksa darbības modelēšana

Pārējas procesu analīzei tika izmantota 'Mustang' programma, nomodelējot energosistēmu, kas sastāv no 50 mezgliem (t.sk. 25 ģenerējošie avoti). Papildus tam, izejas režīma pētīšanai tika izmantota 'PowerWorld' programma. Modeļa pamatā ir Baltijas, daļa no Baltkrievijas un Krievijas apvienotās energosistēmas (330kV tīkls). Energosistēmas izejas režīms vienkāršoti parādīts 7.9.att.; modelī pieņemts, ka visiem ģeneratoriem ir automātiskie ierosmes regulatori; turbīnām - ātruma regulatori; deficīta rajona staciju rezerves izsmeltas.

Izmantojot programmas iespējas tika nomodelēta automātika, ar kuras palīdzību: izejas režīmā konstatējot 'kontrolējamā tīkla šķēluma' bīstamo pārslodzi (647MW), energosistēma tika sadalīta pa 'sekcionējamo tīkla šķēlumu' divās daļās. Pretējā gadījumā 'kontrolējamā šķēluma' jebkuras līnijas atslēgšanās izraisītu citu līniju nepieļaujamu pārslodzi un energosistēmas sabrukumu.

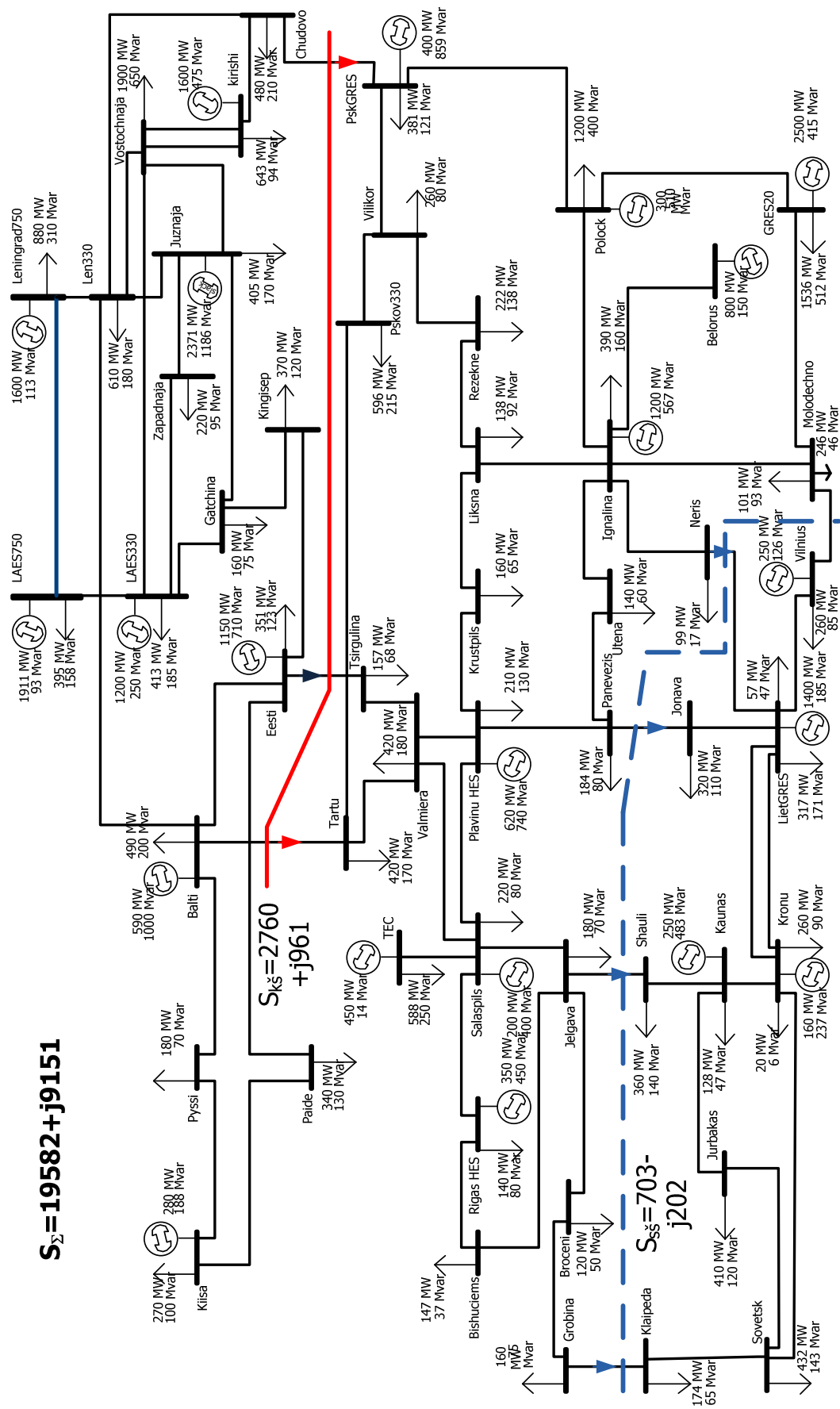
Sekcionēšanas rezultātā vienā daļā izveidojas 26 % jaudas deficīts, bet otrā – 4.5 % pārumš. Pārumsa daļā, strādājot primārai regulēšanai, frekvence nostabilizējas 50.347 Hz līmenī, frekvences normalizācijai automātiskās pēcavārijas savienošanās vajadzībām 4 elektrostacijās tiek paredzēta sekundārās regulēšanas forsēšana. Tās darbības rezultātā turbīnu jauda tiek izmaiņīta par 934 MW, savukārt ģenerācija samazinās līdz 16586 MW. Līdz savienošanās brīdim frekvence nostabilizējas 50.01 Hz līmenī. Frekvences izmaiņa pārējas procesa laikā parādīta 7.8.att..



7.8.att. Frekvences izmaiņas raksturs

Deficītajā daļā frekvences pazeminājumu likvidē speckārta, kas reaģē uz frekvences atvasināto, un AAF1 (frekvences iestatījumi 49.1 - 48.4 Hz diapazonā; laika kavējums 0.2 s), kas reaģē uz frekvences novirzi. Nostrādājot atslēgšanas automātikai, tiek atslēgta slodze ar kopējo jaudu 640 MW un frekvences kritums tiek apturēts (48.44 Hz). Savukārt, AAF2 darbības rezultātā papildus atslēdzot 40 MW slodzi (intervāls starp kārtām 10s), pirms savienošanās frekvence atjaunojas līdz 49.82 Hz (7.8.att.).

Frekvenču normalizācija norit nepilnu 60 sekunžu laikā. Energosistēmas veseluma atjaunošana notiek automātiski, tik līdz līnijas kontrolējamie parametri atbilst sinhronisma kontroles iekārtas iestatījumiem (ieslēgšanas leņķu diapazons $\pm 40^\circ$, 1s). Pārējas šķēluma līnijas ieslēdzas sekundes dažu simtdaļu laikā. Pārējas procesam ir rimstošs raksturs un parametri nepārsniedz pieļaujamās vērtības.



7.9.att. Izejas režīma dati

7.8. Patērētāju pieslēgšana

Atjaunojoties energosistēmas veselumam, patērētāju līnijas tiks ieslēgtas, izmantojot automātisko atpakaļieslēgšanu pēc normālās frekvences pazīmes [6].

Ņemot vērā, ka apvienošana dažādu apstākļu dēļ var nenotikt, elektroapgādes atjaunošanai jānotiek pakāpeniski ar frekvences kontroli. Ja frekvence pazeminās zem iestatījuma, patērētāju pieslēgšana tiek apturēta vai pāriet gaidīšanas režīmā.

Pateicoties frekvences kontrolei, atkārtotā frekvences avārijas vai sprieguma pazemināšanas lavīnas draudi atdalītājā rajonā ir izslēgti.

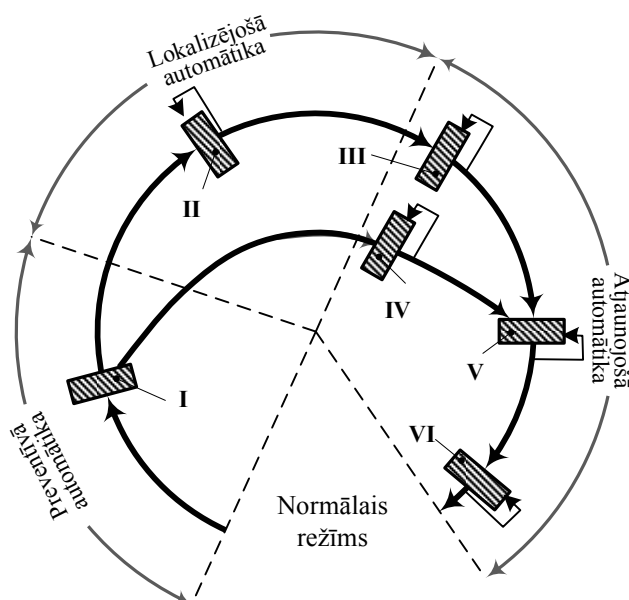
7.9. Secinājumi

Ņemot vērā, ka savienošanai jānotiek nenoteiktā vietā, retos avārijas gadījumos šim nolūkam var izmantot uz līnijām esošās sinhronisma kontroles iekārtas. Izmantojot to kā sinhronisma uztveršanas iekārtu, apvienošanās process notiek tikko energosistēmu daļu frekvences ir izlīdzinājušās (tas notiek aptuveni 20 sekundēs). Pirmā līnija nodrošina energosistēmas daļu apvienošanu ar rimstošo pārejas procesu. Pārejas līnijas tiek ieslēgtas darbā parastajā sinhronisma kontroles režīmā. Tas nodrošina pašatjaunošanas procesa norisi 100 sekunžu laikā, ko vairums patērētāju neievēro.

Maksimālais leņķis pārejas procesa gaitā nepārsniedz lielumu, pie kura notiek nevēlams sprieguma samazinājums tīklā, jo savienošanās notiek pie nelielām frekvenču starpībām, ko nodrošina lēndarbīga AAF, un reāliem sinhronisma kontroles iekārtas leņķu iestatījumiem.

8. PAŠATJAUNOŠANĀS KĀ CIKLISKAIS PROCESS

No augstāk apskatītā skaidrs, ka pretsabrukuma aizsardzība veido kompleksu, kas sastāv no iekārtām, kas novērš energosistēmas sabrukuma sākšanos un atjauno tās normālo darbu bez personāla līdzdalības. Rezultātā šis process notiek cikliskā procesa veidā, kas attēlots 8.1.att. [14], [19].



8.1.att. Sabrukumu aizsardzības kopdarbība

I – tīkla šķēluma pārslodzes likvidācija ar īslaicīgu energosistēmas sekcionēšanas palīdzību bez atgriezeniskās saites; II – ātrās AAF darbība; III – lēnās AAF darbība; IV – frekvences normalizācija, izmantojot sekundārās regulēšanas forsēšanu; V – energosistēmas apvienošanās ar sinhronizācijas palīdzību; VI – patērētāju līniju automātiskā atpakaļ ieslēgšana

Aizsardzības elementus var attiecīgi sagrupēt:

- preventīvā (brīdinošā) – aizsardzība no pārvades tīkla līniju pārslodzes;
- lokalizējošā – ātrdarbīgā frekvences atslogošanas automātika;
- atjaunojošā – lēndarbīgā frekvences atslogošanas automātika, sekundārās regulēšanas forsēšana, sinhronizācija un patērētāju līniju automātiskā atpakaļieslēgšana.

Galvenais aizsardzības elements ir pārvades tīkla šķēlumu ātrdarbīga pārslodzes likvidācijas aizsardzība **I** ar energosistēmas īslaicīgu sekcionešanu vietās, kas momentāni novērš pārslodzi. Energosistēmas vienā daļā rodas jaudas deficīts ar frekvences pazemināšanos, bet otrā – jaudas noietums ar frekvences paaugstināšanos turbīnu apgriezīgu regulatoru darbības robežās. Deficītajā daļā darbosies ātrdarbīgā frekvences atslogošanas automātika **II** un frekvence zināmu laiku paliks uz elektrostacijām pieļaujamā pazeminātā līmeņa. Pēc tam sāks darboties lēnā frekvences atslogošanas automātika **III**, kas to atjaunos līdz nominālai vērtībai. Paaugstinātās frekvences normalizācijai ir paredzēta turbīnu sekundārās regulēšanas forsēšanas automātika **IV**.

Pie vienādām frekvencēm uz līnijām esošās sinhronisma kontroles iekārtas **V** izpildīs sinhronizācijas funkciju un energosistēmas veselums atjaunosies. Tālāk pēc normālās frekvences pazīmes pakāpeniski notiks patērētāju līniju automātiskā ieslēgšanās **VI** (pēc normālās frekvences eksistēšanas pazīmes apmēram 20 s laikā). Līdz ar to avārija tiek likvidēta. Kopumā šī sistēma izpilda energosistēmas pašatjaunošanās mehānisma funkciju.

Lai panāktu pretsabrukumu automātikas darbību, tā ir jāuztur darbības gatavībā. Šim nolūkam energosistēmu apvienībā ir nepieciešams analītisks centrs ar noteiktām pilnvarām, kas nosaka aizsardzības iekārtu izvietojumu, to apjomu un iestatījumus.

9. SECINĀJUMI UN TĒMAS NĀKOTNES ATTĪSTĪBAS PERSPEKTĪVAS

Energosistēmu sabrukumi notiek visā pasaulē. Sabrukumi parasti sākās noteiktās vietās, ko var uzskatīt par to epicentriem. Aizsardzībai jābūt spējīgai tos fiksēt, apturot avārijas procesu attīstību. Smagas sistēmas avārijas liecina par to, ka problēma pagaidām vēl nav pilnīgi atrisināta.

Darbā tika izpētīti 30 sabrukumu avārijas. Tika konstatēti un analizēti sabrukumu gaitā notiekošie 12 avārijas procesi no aizsardzības līdzekļu radīšanas viedokļa. Rezultātā, ņemot vērā pielietojamo aizsardzību struktūru izmantošanas iespējas un pašu procesu īpatnības jaunajos apstākļos, tika izstrādāta energosistēmu pretsabrukumu aizsardzības koncepcija.

Ievērojot to, ka energosistēmu sabrukumu primārais iemesls ir pārvades tīkla pārslodze, kas izraisa kaskādveida procesu attīstību, darbā tiek piedāvāts pretsabrukumu aizsardzības komplekss, kas momentāni likvidē pārslodzi un automātiski atjauno normālo režīmu.

Aizsardzības struktūras noslēdzošo līmeni veido centralizēta matricveida sistēma, kas fiksē pārslodzes vietu un tās apmēru. Kā palaides elements tiek izmantots signāls par pārslodzi, kas pienāk ar ātrdarbīgā loģiskā kanāla palīdzību. Vienlaicīgi aizsardzībā ir informācija par normālo režīmu. Pārslodzes likvidācijai tiek noteikts tīkla šķēlums, caur kuru plūst jauda, tuva pārslodzes līmenim. Šajā vietā notiek energosistēmas īslaicīga sekcionešana, vienpusīgi atslēdzot līniju slēdžus sinhronisma kontroles iekārtu uzstādīšanas pusē. Pateicoties tam, tiek likvidēta pārslodze, saglabājot darbā līnijas ar maksimāli pieļaujamām jaudas plūsmām un novēršot sekundāro avāriju attīstību ar ģenerējošo avotu masveidīgo atslēgšanos, kvalitatīvi paaugstinot energosistēmas darbības drošumu.

Secionešanas rezultātā deficītajā daļā pazeminās frekvence, uz ko reaģē lokālā frekvences atslogošanas automātika, iedarbinot pašatjaunošanās sistēmu, kuras pamatā ir Latvijas energosistēmā izstrādāts un daudzgadīgi izmantots frekvences avārijas pašlikvidēšanās un pašatjaunošanās mehānisms.

Nepieciešamības gadījumā paaugstinātās frekvences normalizācijai izmanto piedāvāto lokālo sekundārās regulēšanas forsēšanu, kam seko automātiskā energosistēmu daļu savienošanās un patērētāju līniju atpakaļ ieslēgšanās.

Pie praktiski vienādām frekvencēm pārvades tīkla sekcionētā šķēlumā notiek energosistēmu savienošanas operācija, izmantojot uz līnijām esošās sinhronisma kontroles iekārtas pie ierobežotiem leņķiem starp sprieguma vektoriem. Saskaņā ar veiktajiem pētījumiem pārējas procesam praktiski vienmēr ir rimstošs raksturs ar energosistēmas veseluma atjaunošanos apmērām 100 sekunžu laikā, kas vairākumam patērētāju paliek nepamanīts.

Līdz ar to, energosistēmas sabrukums transformējas īslaicīgā pārējas procesā.

Īpašos gadījumos pazeminātās frekvences apstākļos jāizmanto piedāvātās siltumtehniko iekārtu vadīšanas metodes, lai novērstu to atslēgšanos siltumtehnikās statistiskās stabilitātes zaudēšanas dēļ.

Kā darba nākotnes attīstības perspektīvu var minēt bezvadu kanālu izmantošanas iespējas izpēti kompleksa vajadzībām; sistēmas integrēšanu dažāda sprieguma tīklos; sistēmas pilnveidošanu, izskatot smagākas komplikācijas energosistēmas avārijas attīstībā.

LITERATŪRA

1. J.Barkans, D.Zalostība. Blackout Prevention in a Power System by its Short-Term Sectioning and Subsequent Self-Restoration without Personnel Participation // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, Nr.6, 2007,12-29p.
2. J.Barkans, D.Zalostība. Blackout prevention and power system self-restoration // IEEE Conference EUROCON2007 Proceedings, Sep. 2007, 1547-1554pp.
3. J.Barkans, D.Zalostība. Short-term Splitting of a Power System with its self-restoration as Blackout Prevention // IEEE Conference IPEC2007 Proceedings, December 2007, 525-530p.
4. J.Barkāns, D.Žalostība, G.Junhāns. Jaudas plūsmu ierobežojumi enerģijas tirgus apstākļos// Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2007, Nr.2, 15-24p.
5. J.Barkans, D.Zalostība. Development of Anti-collapse Complex of Power System // RTU Scientific Proceedings, 4th part "Power and Electrical Engineering", 23th vol., Oct. 2008, 82-91pp.
6. J.Barkans, D.Zalostība. Principles of Protection against Power System Blackouts// IEEE PES Conference Scientific Proceedings, 2009, paper # 382, 1-8pp.
7. J.Barkāns, D.Žalostība, patents LV 13663 B Energosistēmas pretavārijas automātikas darbības metode, 20.04.2008.
8. J.Barkāns, D.Žalostība, patents LV 13772 B Energosistēmas sabrukumu novēršanas metode, 20.11.2008.
9. J.Barkāns, D.Žalostība, patents LV 13881 B Energosistēmas pretsabrukuma darbības metode, 20.05.2009.
10. J.Barkāns, D.Žalostība, patents LV 13913 B Energosistēmas pretavārijas automātikas darbības metode, 20.08.2009.
11. J.Barkāns, D.Žalostība, patents LV 13944 B Energosistēmas stabilitātes sabrukuma un ģenerējošo avotu masveida atslēgšanās novēršanas metode, 20.08.2009.
12. J.Barkāns, D.Žalostība, patenta pieteikums P-09- , (Energosistēmas stabilitātes sabrukumu un ģenerējošo avotu masveida atslēgšanās novēršanas metode)
13. Бринкис К., Беляков Ю. Авторское свидетельство SU1026232, 30.06.1983., Устройство для предотвращения асинхронного хода в энергосистеме
14. J.Barkans, D.Zalostība. New Principles of Power System Protection against Collapse in

the Present Stage of Development // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, Nr.3, 2006, 3-22p.

15. J.Barkans, D.Zalostiba. Protection against the voltage avalanche as the cause of the power system blackout // RTU Scientific Proceedings, 4th part "Power and Electrical Engineering", 14th volume, Oct. 2006, pp.93-101.

16. J.Barkans, D.Zalostiba. Blackout Prevention and Power System Self-Restoration Using Automatic Synchronization // Kauno Technologijos Universitetas Proceedings, May 2007, 94-98 pp.

17. J.Barkans, D.Zalostiba. Protection of Generating Units at deviations of parameters by Sectioning a power system as a tool for blackout prevention // RTU Scientific Proceedings, 4th part "Power and Electrical Engineering", 20th vol., Oct. 2007, 25-35pp.

18. J.Barkans, D.Zalostiba. Automatics of Blackout Prevention in a Power System // Kauno Technologijos Universitetas, May 2008,199-204 pp.

19. J.Barkans, D.Zalostiba. Blackouts Prevention with Automatic Self-restoration // CIGRE NRCC Regional Meeting Proceedings, Jun. 2007, 159-166p.

20. Баркан. Я., Маркушевич Н.С. Рудзитис Р.Р. и др. Частотная разгрузка как средство автоматической ликвидации аварий // Электрические станции. – 1966. - №5. - с.74-78

21. J.Barkans, D.Zalostiba. Automatic Synchronization as the Element of a Power System's Anti-collapse Complex // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, Nr.6, 2008, 3-19p.