

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte

Enerģētikas institūts

Ivars Zālītis

Doktora studiju programmas “Enerģētika” doktorants

**MODEĻA PARAMETRU IDENTIFIKĀCIJAS
METODES PIELIETOŠANA
ELEKTROPĀRVADES LĪNIJU PRETAVĀRIJU
AUTOMĀTIKĀ**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
asociētais profesors *Dr. sc. ing.*
ALEKSANDRS DOLGICERS

RTU Izdevniecība
Rīga 2020

Zālītis, I. Modeļa parametru identifikācijas metodes pielietošana elektropārvades līniju pretavāriju automātikā. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2020. 54 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-05” 2020. gada 16. jūlija lēmumu, protokols Nr. 75/20.

Darbs izstrādāts ar Latvijas Zinātnes padomes pētījumu programmas I-POWER (Nr. lzp-2018/1-0066) un valsts pētījumu programmas *INGRIDO* (2018–2021) atbalstu.

Šo pētījumu finansē Latvijas Republikas Ekonomikas ministrija, projekts “Latvijas gāzes infrastruktūras attīstības tendences, izaicinājumi un risinājumi (LAGAS)”, projekts Nr. VPP-EM-INFRA-2018/1-0003.



ISBN 978-9934-22-493-5 (print)

ISBN 978-9934-22-494-2 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai publiski aizstāvēts 2020. gada 12. novembrī plkst. 10 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1, 306. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Vadošais pētnieks *Dr. sc. ing.* Romāns Petričenko,
Rīgas Tehniskā universitāte, Enerģētikas institūts, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* Saulius Gudzius,
Kauņas Tehnoloģiju universitāte, Lietuva

Galvenais inženieris *Dr. sc. ing.* Andrejs Svalovs,
Kompānija “*General Electric*”, Šveice

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Ivars Zālītis (paraksts)

Datums:.....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, astoņas nodaļas, secinājumi un informācijas avotu saraksts, 85 attēli, 25 tabulas, trīs pielikumi, kopā 179 lappuses. Informācijas avotu sarakstā ir 163 nosaukumi.

SATURS

IEVADS.....	6
1. BOJĀJUMA VIETAS NOTEIKŠANA, DISTANTAIZSARDZĪBA UN ADAPTĪVĀ AUTOMĀTISKĀ ATKALIESLĒGŠANA KĀ ENERGOSISTĒMAS VADĪBAS SISTĒMAS DAĻAS.....	11
1.1. Pretavāriju automātikas uzdevuma matemātiskais formulējums.....	11
1.2. Bojājuma vietas noteikšanas, distantaizsardzības un automātiskās atkalieslēgšanas funkcijas	12
1.3. Piedāvātās metodes pamatideja.....	12
1.4. Secinājumi	13
2. ESOŠĀS BOJĀJUMA VIETAS NOTEIKŠANAS, DISTANTAIZSARDZĪBAS UN ADAPTĪVĀS AUTOMĀTISKĀS ATKALIESLĒGŠANAS METODES.....	14
2.1. Esošās bojājuma vietas noteikšanas metodes.....	14
2.2. Esošās distantaizsardzības metodes.....	15
2.3. Esošās adaptīvās vienfāzes automātiskās atkalieslēgšanas metodes.....	17
2.4. Secinājumi	17
3. ELEKTRISKO SISTĒMU NESIMETRISKO REŽĪMU MODELĒŠANA.....	19
3.1. Režīmi ar vienu šķērsnesimetriju.....	19
3.2. Režīmi ar vienu garensimetriju.....	19
3.3. Režīmi ar vairākām nesimetrijām vienlaikus.....	20
3.4. Secinājumi	21
4. TOPOLOĢISKĀ ELEKTRISKO SISTĒMU REŽĪMU MODELĒŠANAS METODE	22
4.1. Mezglu potenciālu metode matricu formā.....	22
4.2. Stacionāru bojājuma režīmu modelēšana	22
4.3. Stacionāro pirmsavārijas režīmu modelēšana	23
4.4. Pārejas procesu aprēķini, izmantojot skaitlisku inverso Laplasa transformāciju.....	23
4.5. Mūsdienu distantaizsardzības termināla testēšana	24
4.6. Secinājumi	25
5. MODEĻA PARAMETRU IDENTIFIKĀCIJAS METODES LIETOŠANA BOJĀJUMA VIETAS NOTEIKŠANAI UN DISTANTAIZSARDZĪBAI.....	26
5.1. Piedāvātās parametru identifikācijas metodes pamatstruktūra	26
5.2. Modificētās nejaušās meklēšanas izmantošana modeļa parametru identifikācijai.....	26
5.3. Modificētā ģenētiskā algoritma izmantošana modeļa parametru identifikācijai.....	28
5.4. Secinājumi	29
6. MODEĻA PARAMETRU IDENTIFIKĀCIJAI IZMANTOTĀS MĒRĶA FUNKCIJAS OPTIMĀLĀS VERSIJAS SINTĒZE	30
6.1. Izmantoto avārijas režīma parametru atlases stratēģijas.....	30
6.2. Mērķa funkcijas analīzes izmantošana potenciālas parametru atlases stratēģijas izvirzīšanai	31
6.3. Secinājumi	33

7. PIEDĀVĀTĀS METODES UN PARAMETRU ATLASĒS STRATĒGIJU	
TESTĒŠANA	34
7.1. Testēšanai izmantotā energosistēma	34
7.2. Parametru atlasē rezultāti	34
7.3. Piedāvātās metodes testēšanas rezultāti	35
7.4. Secinājumi	38
8. MODEĻA PARAMETRU IDENTIFIKĀCIJAS UN TOPOĻOGISKĀS	
MODELĒŠANAS METODES LIETOŠANA ADAPTĪVĀS VIENFĀZES	
AUTOMĀTISKĀS ATKALIESLĒGŠANAS FUNKCIJAS IZSTRĀDEI	39
8.1. Augstsprieguma pārvades līnijas modelēšana fāžu koordinātēs	39
8.2. Adaptīvās vienfāzes automātiskās atkalieslēgšanas izstrādē izmantotais dinamiskais elektriskā loka modelis	39
8.3. Piedāvātā adaptīvā vienfāzes automātiskās atkalieslēgšanas metode	40
8.4. Piedāvātās adaptīvās vienfāzes automātiskās atkalieslēgšanas metodes testēšana	41
8.5. Secinājumi	42
SECINĀJUMI.....	43
KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI.....	44

IEVADS

Promocijas darba aktualitāte

Pārvades līnijas ir pakļautas daudziem dabīga un antropogēna rakstura bojājumu riskiem. Augstsprieguma (turpmāk tekstā AS) tīklu statistika parāda, ka Baltijas valstīs 60–70 % bojājumu notiek pārvades līnijās un ka 100–150 kV un 220–330 kV līnijām vidēji 60,2 % un 67,6 % bojājumu ir fāze-zeme (turpmāk tekstā F-Z) īsslēgumi [1]. Zināms, ka vairāki esošie distantaizsardzības (turpmāk tekstā DA) un vienusējīgi bojājuma vietas noteikšanas (turpmāk tekstā BVN) algoritmi šādu īsslēgumu gadījumos mēdz darboties kļūdaini. Kļūdu cēloņi ietver īsslēguma pārejas pretestības ietekmi, nekontrolēto īsslēguma strāvu no līnijas otra gala, izmantotos modelēšanas vienkāršojumus u. c. Viens no risinājumiem ir sakaru tīklu izmantošana datu apmaiņai starp apakšstacijām, kas ļauj realizēt ātrus un precīzus divpusējos BVN algoritmus, bet pastāv sakaru vai mērījumu sinhronizācijas zaudēšanas risks līnijas bojājuma vai citu iemeslu dēļ. Balstoties uz iepriekšminēto, būtu lietderīgi izstrādāt metodi, kas spētu precīzi noteikt bojājuma attālumu, izmantojot vienusējus mērījumus, un varētu kalpot vismaz kā rezerves risinājums divpusējām BVN metodēm.

Iepriekš minētā statistika parāda arī to, ka 100–150 kV un 220–330 kV līnijām vidēji 19,8 % un 29,5 % īsslēgumu ir stabils raksturs [1]. Attiecīgi vairumā gadījumu līniju iespējams atjaunot darbā pēc elektriskā loka dejonizācijas, izmantojot automātiskās atkalieslēgšanas iekārtas (turpmāk tekstā AAI). Ņemot vērā, ka lielākā daļa līniju bojājumu ir F-Z īsslēgumi, iespējams realizēt vienfāzes AAI (turpmāk tekstā VAAI). Šāds risinājums ir izdevīgs, jo jaudu plūsmas nebojātajās fāzēs saglabājas, kas samazina AAI ietekmi uz sistēmas dinamisko stabilitāti, it īpaši AS tīklos. AAI visbiežāk lieto konstantu nostrādes laika iestatījumu, kas balstīts uz maksimālo sagaidāmo loka dejonizācijas laiku. Straujas loka izdzišanas gadījumā tas var radīt ilgāku nevēlamu nullsecības (turpmāk tekstā NS) strāvu plūšanu transformatoru neitrālēs un sistēmas atrašanos samazināta drošuma stāvoklī. Tādēļ būtu vēlams izstrādāt adaptīvu VAAI (turpmāk tekstā AVAAI).

Promocijas darba hipotēze

Vienusējās BVN un DA metodes darbojas neprecīzi, ja īsslēgumam ir liela pārejas pretestība un tīkla struktūra ir sarežģītāka, un minētās metodes var aizstāt ar modeļa parametru identifikācijas paņēmieni, kas risina šos uzdevumus kā optimizācijas uzdevumus, vienlaikus panākot neatkarību no tālsakaru tīkliem. Ir izdevīgi sadalīt šo uzdevumu nelineārajā pirmsavārijas un lineārajā avārijas režīma modeļa parametru identifikācijas posmos, jo tas samazina nezināmo skaitu katrā posmā. Izstrādāto modeļa parametru identifikācijas metodi var veiksmīgi lietot arī citu automātikas un relejaizsardzības funkciju, piemēram, AVAAI, izveidē.

Promocijas darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt divu posmu modeļa parametru identifikācijas metodi, uz tās pamata izveidot BVN, DA, AVAAI un līdzīgu automātikas funkciju risinājumus, kas palīdz samazināt avārijas likvidācijas laiku, samazina neselektīvi atslēgto klientu skaitu un paaugstina energosistēmas stabilitāti kopumā, palielinot energosistēmas drošumu.

Promocijas darba uzdevumi

Lai sasniegtu promocijas darba mērķi, izvirzīti šādi uzdevumi:

- 1) izpētīt esošās BVN, DA un AVAAI ierīces un metodes;
- 2) aprakstīt un pilnveidot piedāvātās metodes realizācijai nepieciešamos elektrisko sistēmu pirmsavārijas un avārijas režīmu modelēšanas paņēmienus;
- 3) definēt divu posmu modeļa parametru identifikācijas metodes pamatstruktūru;
- 4) implementēt pamatstruktūru ar optimizāciju BVN un DA algoritmos;
- 5) sintezēt optimālo optimizācijā izmantotās mērķa funkcijas versiju;
- 6) izveidoto BVN un DA algoritmu testēšana un salīdzināšana ar esošām metodēm;
- 7) izstrādāt AVAAI algoritmu, pielietojot darbā dotos modelēšanas paņēmienus un piedāvāto parametru identifikācijas metodi.

Izmantotās pētniecības metodes un rīki

Promocijas darba rezultāti iegūti, izmantojot šādas pētniecības metodes un rīkus:

- 1) elektrisko sistēmu topoloģiskās modelēšanas metodes;
- 2) mezglu potenciālu un Gausa–Zeideļa metode;
- 3) simetrisko sastāvdaļu metode;
- 4) modeļa parametru identifikācijas metode;
- 5) ģenētiskais algoritms;
- 6) skaitlisko aprēķinu, simulāciju un datu apstrādes vide *MATLAB*®, *MATLAB SimPowerSystems*®;
- 7) *ISA DRTS 64* signālu ģenerators ar *COMTRADE* oscilogrammu atskaņošanu programmā *ISA TDMS 7.0.4*®;
- 8) augstsprieguma 110–220 kV elektropārvades līniju aizsardzība *REDI*;
- 9) bojājumu oscilogrammu nolasīšanas programma *Smoky*.

Promocijas darba zinātniskā novitāte

1. Elektrisko sistēmu režīmu ar vairākām vienlaicīgām nesimetrijām aprēķinu metode.
2. Elektropārvades līniju hibrīdā modelēšanas metode simetrisko sastāvdaļu un fāžu koordinātēs.
3. Divu posmu modeļa parametru identifikācijas metode ar optimizācijas implementāciju BVN, DA un AVAAI algoritmos.

4. Optimālas mērķa funkcijas versijas sintēzei izmantojamās parametru atlases stratēģijas.
5. Skaitliskās inversās Laplasa transformācijas lietojums ar topoloģisko tīkla modelēšanas metodi.
6. Analogais/digitālais DA testēšanas paņēmiens īsslēgumiem ar nestacionāru pārejas pretestību, kas ietver kritušu koku radītos īsslēgumus.

Promocijas darba praktiskā nozīme

1. Aprakstītās un pilnveidotās modelēšanas metodes iespējams izmantot tālākiem relejaizsardzības un automātikas pētījumiem.
2. Piedāvāto metodi iespējams lietot, veidojot robustas BVN un DA ierīces, kuru darbība neprasa tālsakaru tīklus.
3. Izstrādāto AVAAI algoritmu var realizēt atbilstošā ierīce, kas dotu ievērojamu sistēmas stabilitātes uzlabojumu.

Autora personiskais ieguldījums veiktajos pētījumos

Elektrisko sistēmu stacionāro un pārejas režīmu modelēšanas metodes un modeļa parametru identifikācijas metodes pamatstruktūra izstrādāta sadarbībā ar asociēto profesoru Aleksandru Dolgiceru. Literatūras analīze, modelēšanas paņēmieni implementācijas programmu tekstos, piedāvātās modeļa parametru identifikācijas metodes lietojumi BVN, DA un AVAAI algoritmos, simulāciju un testēšanas rezultāti un secinājumi pieder personiski promocijas darba autoram.

Promocijas darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, astoņas nodaļas ar 34 apakšnodaļām, secinājumi, pielikumi un informācijas avotu saraksts ar 163 informācijas avotiem. Promocijas darbā ir 75 vienādojumi, 25 tabulas, 85 attēli un trīs pielikumi, tā kopējais apjoms ir 179 lappuse.

Pirmajā nodaļā aprakstīta ārējo faktoru un vadības sistēmas iedarbība uz energosistēmu kā vadāmo objektu, kā arī norādīta modelēšanas un optimizācijas loma energosistēmu vadībā. Turpinājumā minēti galvenie vadības sistēmām un piedāvātajai metodei izmantotie vienkāršojumi un aprakstītas darbā analizētās vadības sistēmas apakšfunkcijas: BVN, DA un VAAI. Nodaļas nobeigumā dots vispārīgs piedāvātās metodes apraksts. Otrajā nodaļā veikta plaša esošo BVN, DA metožu un ierīču, kā arī esošo AVAAI metožu analīze. Trešajā nodaļā dotas elektrisko sistēmu nesimetrisko režīmu aprēķinu metodes vienas nesimetrijas gadījumā un divi skaitlisko režīmu aprēķinu paņēmieni vairāku vienlaicīgu nesimetriju gadījumos. Ceturtā nodaļa ietver matemātisko aprakstu stacionāro avārijas un pirmsavārijas režīmu aprēķiniem, izmantojot topoloģiskās modelēšanas metodi, mezglu potenciālu metodi (turpmāk tekstā MPM) matricu formā un Gausa–Zeideļa metodi skaitlisko aprēķinu realizācijai. Šajā nodaļā parādīta arī skaitliska inversā Laplasa transformācija, ko iespējams apvienot ar

topoloģiskās modelēšanas metodi un izmantot maiņstrāvas ķēžu pārejas procesu brīvo komponentu noteikšanai. Ceturtās nodaļas noslēgumā doti esoša digitāla līnijas automātikas un relejaizsardzības termināla DA testēšanas rezultāti, kas iegūti, izmantojot analogo/digitālo DA testēšanas paņēmieni īsslēgumiem ar nestacionāru pārejas pretestību. Piektajā nodaļā aprakstīta piedāvātās modeļa parametru identifikācijas metodes pamatstruktūra. Turpinājumā dotas šīs metodes implementācijas BVN un DA algoritmos ar dažādiem optimizācijas paņēmieniem. Doti arī testēšanas rezultāti piedāvātās metodes BVN un DA algoritmiem, kas izmantoja optimizācijai sākotnēji lietoto modificēto nejaušo meklēšanu. Sestā nodaļa veltīta optimālas mērķa funkcijas versijas sintēzei, piedāvājot divas parametru atlases stratēģijas un veicot mērķa funkcijas virsmu veidošanās analīzi, lai attīstītu potenciālu parametru atlases stratēģiju, kas spētu samazināt viltus minimumu klātbūtni mērķa funkcijā. Septītajā nodaļā veikta piedāvātās metodes un ģenētiskā algoritma (turpmāk tekstā ĢA) realizācijas BVN testēšana. Testēšanai izveidotā tīkla modeļa aprakstam seko optimizācijā izmantoto parametru atlases rezultāti gan piesardzīgajai, gan oportunistiskajai stratēģijai. Turpinājumā aplūkotas mērķa funkciju virsmas, kas iegūtas abām parametru atlases stratēģijām. Nodaļas beigu daļā doti iepriekšminētie piedāvātās metodes BVN algoritma testēšanas rezultāti un to analīze scenārijiem ar dažādām parametru atlases stratēģijām un pieejamo parametru skaitu. Astotā nodaļa sākas ar detalizētu pārvades līnijas modeļa VAAI darbības laikā aprakstu un ar minēto modeli iegūtā bojātās fāzes līnijas puses sprieguma grafiku analīzi. Nodaļas turpinājumā aprakstīts simulācijās izmantotais dinamiskais primārā un sekundārā loka modelis, kas ietver loka izstiepšanos un izdzišanu. Balstoties uz VAAI stacionāro un pārejas režīmu simulāciju rezultātiem, izveidots AVAAI algoritms, kas testēts gan stabila īsslēguma, gan dažādu pārejošu īsslēgumu scenārijos. Promocijas darba nobeigumā apkopoti darbā gūtie secinājumi.

Promocijas darba aprobācija

Promocijas darba rezultāti prezentēti starptautiskās konferencēs Latvijā un ārzemēs.

1. The 4th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE'2016), Vilnius, Lithuania, 10–12 November 2016.
2. 2017 17th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power System Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Milan, Italy, 6–9 June 2017.
3. 12th IEEE PES Powertech Conference Towards and Beyond Sustainable Energy Systems, Manchester, United Kingdom, 18–22 June 2017.
4. 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2017), Riga, Latvia, 12–13 October 2017.
5. The 5th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE'2017), Riga, Latvia, 24–25 November 2017.
6. The 6th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE'2018), Vilnius, Lithuania, 8–10 November 2018.

Promocijas darba rezultāti ir publicēti pilna teksta zinātnisko konferenču materiālos un zinātniskajos žurnālos.

1. A. Dolgicers, **I. Zālītis**, and J. Kozadaļevs. The Modified Seidel Method as a Tool for the Evaluation of the Stability of a Power System. In: *2016 IEEE 4th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE'2016)*, Vilnius, Lithuania, 10–12 November 2016. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 27–33, ISBN: 978-1-5090-4474-0. Available from: DOI: 10.1109/AIEEE.2016.7821806.
2. **I. Zālītis**, A. Dolgicers, and J. Kozadaļevs. A power transmission line fault locator based on the estimation of system model parameters. In: *Proceedings 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Milan, Italy, 6–9 June 2017. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 1–6, ISBN: 978-1-5386-3918-4. Available from: DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977459.
3. **I. Zālītis**, A. Dolgicers, and J. Kozadaļevs. A distance protection based on the estimation of system model parameters. In: *Proceedings 2017 IEEE Manchester PowerTech*, Manchester, UK, 18–22 June 2017. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 1–6, ISBN: 978-1-5090-4238-8. Available from: DOI: 10.1109/PTC.2017.7981277.
4. A. Dolgicers and **I. Zālītis**. Numerical calculation method for symmetrical component analysis of multiple simultaneous asymmetrical faults. In: *Proceedings 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*, Riga, Latvia, 12–13 October 2017. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 1–7, ISBN: 978-1-5386-3847-7. Available from: DOI: 10.1109/RTUCON.2017.8124748.
5. **I. Zālītis**, A. Dolgicers, and J. Kozadaļevs. Experimental testing of distance protection performance in transient fault path resistance environment. In: *Proceedings 2017 5th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering*, Riga, Latvia, 24–25 November 2017. Piscataway: IEEE, 2018, pp. 1–6, ISBN: 978-1-5386-4138-5. Available from: DOI: 10.1109/AIEEE.2017.8270526.
6. **I. Zālītis**, A. Dolgicers, and J. Kozadaļevs. Influence Analysis of Mutual Coupling Effects between a High-Voltage Transmission Line and a Fiber-optic Cable with a Conductive Support Element. In: *2018 IEEE 6th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE'2018)*, Vilnius, Lithuania, 8–10 November 2018. Piscataway: IEEE, 2018, pp. 1–7, ISBN: 978-1-7281-2000-3. Available from: DOI: 10.1109/AIEEE.2018.8592447.
7. **I. Zālītis**, A. Dolgicers, and J. Kozadaļevs. An adaptive single-pole automatic reclosing method for uncompensated high-voltage transmission lines. *Electric Power Systems Research*, vol. 166, Jan. 2019, pp. 210–222. ISSN: 0378-7796. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.10.012>.

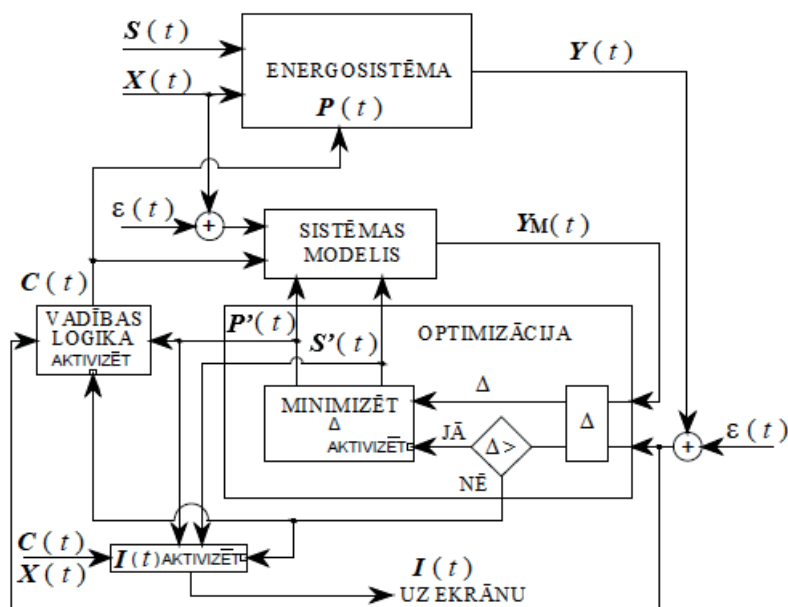
Pētījumu rezultātā iegūts viens patents.

1. Riga Technical university. *Transmission line single phase-to-ground fault locator method*. A. Dolgicers, **I. Zālītis** and J. Kozadaļevs (inventors). Int. Cl.: H02H7/26. LV Patent 15207, issued May 20, 2017. 20 p. Available from: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?FT=D&date=20170520&DB=&locale=en_EP&CC=LV&NR=15207B&KC=B&ND=4#.

1. BOJĀJUMA VIETAS NOTEIKŠANA, DISTANTAIZSARDZĪBA UN ADAPTĪVĀ AUTOMĀTISKĀ ATKALIESLĒGŠANA KĀ ENERGO SISTĒMAS VADĪBAS SISTĒMAS DAĻAS

1.1. Pretavāriju automātikas uzdevuma matemātiskais formulējums

Energosistēmas darbību ietekmē sistēmas elementu parametri $P(t)$ (pretestības, vadītspējas u. c.), ārēji zināmie faktori $X(t)$ (konkrētā brīža elektrības cena, gaisa temperatūra u. c.), ārēji daļēji prognozējami stohastiski faktori $S(t)$ (bojājumi, slodžu jaudas u. c.) un vadības iedarbes $C(t)$ (transformatoru, ģeneratoru sprieguma regulēšana u. c.). Šie parametri un faktori nosaka sistēmas stāvokļa parametrus $Y(t)$ (mezglu spriegumus, zaru strāvas u. c.), kas līdzīgi $X(t)$ noteikti ar kādām kļūdām $\varepsilon(t)$. Balstoties uz pieejamo informāciju, vadības sistēmai jānodrošina energosistēmas optimāla darbība un $Y(t)$ atbilstību normām, veicot nepieciešamās vadības iedarbes, kā arī jāsniedz personālam informācija $I(t)$ par sistēmas stāvokli [2]–[6]. Mērījumu trūkuma vai ārējās iedarbības rezultātā vadības sistēmai var nākties noteikt patiesās $P(t)$ un/vai $S(t)$, vai pat nezināmās $Y(t)$ vērtības. Šādu uzdevumu iespējams atrisināt, izmantojot optimizāciju, kas minimizē starpību starp $Y(t)$ mērījumiem un atbilstošām sistēmas modeļa izejas vērtībām $Y_M(t)$ (1.1. att.). Alternatīvi iespējams noteikt daļu parametru, bet pārējos aizstāt ar to vērtību varbūtības sadalījumiem [7], [8].



1.1. att. Vadības sistēma ar nezināmo sistēmas parametru $P(t)$ un stohastisko ārējo faktoru $S(t)$ identifikāciju pielietojot optimizāciju.

Energosistēmas vadības uzdevums ir nelineārs, stohastisks, daudzkriteriāls, un tas ietver daudz stāvokļa parametru, kā arī optimizācijas nezināmos. Attiecīgi šo uzdevumu nav iespējams atrisināt bez vienkāršojumiem. Promocijas darbā aplūkota daļa no energosistēmu vadības – pretavāriju automātika, konkrētāk pievēršoties BVN, DA un AAI, kas realizētas, izmantojot parametru identifikāciju. Šajā promocijas darbā parametru identifikācijai

izmantotie modeļi satur koncentrētus, lineārus elementus, un no mērījumu signāliem izdalīta vienīgi pamatharmonikas sastāvdaļa. Darbā veiktā esošo metožu un piedāvātās metodes testēšana neņem vērā mērījumu kļūdas, līdz ar to visas parādītās kļūdas un nepilnības rodas vienīgi metožu trūkumu dēļ.

1.2. Bojājuma vietas noteikšanas, distantaizsardzības un automātiskās atkalieslēgšanas funkcijas

Ņemot vērā, ka darbā konkrētāk aplūkotas BVN, DA un AAI metodes gaisvadu elektropārvades līnijām (turpmāk tekstā GVEPL), būtu lietderīgi dot īsus šo funkciju aprakstus.

BVN galvenais uzdevums ir noteikt bojājuma attālumu α no BVN ierīces uzstādīšanas vietas līdz bojājuma vietai [9], [10]. Galvenā prasība BVN ir precizitāte, jo tā nosaka bojājuma atrašanās un remonta laiku, kurā sistēmas drošums ir pazemināts.

DA ir līdzīga BVN, jo arī tā nosaka bojājuma attālumu, bet izsaka to kā DA releja šķietamo pilno pretestību $Z_{rel} = f(\alpha)$, ko parasti aprēķina no vienas apakšstacijas bojāto fāžu kopņu spriegumu un līnijas strāvu mērījumiem. Primārais DA uzdevums ir fiksēt īsslēgumus tās aizsargātajā līnijā, balstoties uz iegūto Z_{rel} , un novērst tos atslēdzot DA kontrolēto jaudas slēdzi. Galvenās DA izvirzītās prasības ir ātrdarbība, jutība (spēja fiksēt īsslēgumus vissliktākajos nostrādes nosacījumos) un selektivitāte (spēja nostrādāt paredzētajos bojājumu scenārijos, prioritāri atslēdzot jaudas slēdžus, kas ir vistuvāk īsslēgumam) [5], [11]–[14].

AAI pamatzdevums ir atjaunot līniju darbā pēc aizsardzības nostrādes, noteiktu laiku ieturot bezsprieguma pauzi, ja īsslēgumam bijis pārejošs raksturs. Galvenā AAI izvirzītā prasība ir minimizēt bezsprieguma pauzes laiku, jo tajā energosistēma atrodas pazemināta drošuma stāvoklī, vienlaikus nodrošinot pietiekami daudz laika elektriskā loka dejonizācijai un izolācijas izturības atjaunošanai. F-Z īsslēgumu gadījumos iespējams lietot AAI paveidu, kas iedarbojas uz vienu fāzi – VAAI. Promocijas darbā aplūkots VAAI variants, kas spējīgs pielāgot bezsprieguma pauzes laiku – AVAAI [3], [4], [6], [14].

1.3. Piedāvātās metodes pamatideja

Piedāvātā modeļa parametru identifikācija realizēta kā optimizācijas uzdevums, kas papildināts ar pirmsavārijas režīma modeļa parametru identifikāciju, lai samazinātu avārijas režīma parametru identifikācijas posma nezināmo skaitu un ņemtu vērā ģeneratoru regulatorus. Atšķirībā no divpusējām BVN metodēm piedāvātā metode paplašina pieejamo mērījumu kopu BVN ierīces apakšstacijā nevis no otra līnijas gala. Saprotais, ka šāda risinājuma realizācijai nepieciešams sistēmas modelis, kas ir sarežģītāks par tipiski izmantoto vienusējī barotas līnijas vai divu sistēmu shēmu [15], [16].

1.4. Secinājumi

1. BVN, DA un AAI ir energosistēmas vadības, kas paredzēta sistēmas darbības uzturēšanai un optimizācijai, apakšuzdevumi.
2. Mērījumu datu trūkuma vai ārēju ietekmju dēļ automātikas un aizsardzības funkcijām var nākties paplašināt pieejamās informācijas kopu, identificējot nezināmos energosistēmas elementu parametrus.
3. BVN galvenais uzdevums ir noteikt attālumu no apakšstacijas līdz bojājuma vietai, un galvenā BVN izvirzītā prasība ir precizitāte.
4. DA pamatuzdevums ir novērst bojājumus tās aizsardzības zonā, atslēdzot DA kontrolēto jaudas slēdzi, un galvenās DA izvirzītās prasības ir ātrdarbība, jutība un selektivitāte.
5. AAI paredzēta līnijas atjaunošanai darbā pēc īsslēguma atslēgšanas, ja tam bijis pārejošs raksturs.
6. Galvenā AAI izvirzītā prasība ir minimizēt tās darbības laiku, vienlaikus nodrošinot pietiekamu bezstrāvas pauzes laiku pilnīgai elektriskā loka dejonizācijai.

2. ESOŠĀS BOJĀJUMA VIETAS NOTEIKŠANAS, DISTANTAIZSARDZĪBAS UN ADAPTĪVĀS AUTOMĀTISKĀS ATKALIESLĒGŠANAS METODES

2.1. Esošās bojājuma vietas noteikšanas metodes

Vienas no pirmajām BVN metodēm bija topogrāfiskās un inspekciju metodes, sākot ar GVEPL sekcionalizēšanu, izmantojot atdalītājus [17]. No 1949. gada izmantoti arī uz līniju balstiem izvietoti bojājumu indikatori (turpmāk tekstā BI), kas sākotnēji atbrīvoja mehānisku indikatoru pēc šaujampulvera patronas sadegšanas [18], [19], bet vēlāk inženieri izveidoja arī elektromagnētiskus BI ar automātisku atiestatīšanu [20]. 1989. gadā piedāvāts izmantot sakaru tīklus ar BI, lai noteiktu bojāto līnijas posmu [21]. Mūsdienās BI izmanto pamatā sadales tīklos, un pētījumos vairāk aplūko BI optimālā izvietojuma uzdevumu [22], [23]. Pastāv arī inspekcijas metode, kur bojājuma vietu nosaka ar signālu ģeneratoru un pārnēsājamu piektās harmonikas sensoru [18], [19]. Kabeļu līnijām līdzīgu paņēmieni izmanto vēl mūsdienās [24]. Šīs metodes ir laiktietilpīgas un prasa papildu ieguldījumus aprīkojumā.

Viļņu metodes, kas balstītas uz strāvas vai sprieguma viļņu procesiem līnijā, publikācijās minētas vismaz no 1931. gada [25], un sākotnēji izmantoja osciloskopu ierakstus [26]–[28]. Īsā laika posmā tika radītas vairākas jaunas viļņu BVN metodes: A tipa BVN, kas nosaka bojājuma attālumu pēc laika, kurā sprieguma krituma vilnis atgriežas pēc atstarošanās no bojājuma vietas; B tipa BVN, kas nosaka bojājuma attālumu no starpības starp laikiem, kuros vilnis ierodas abos līnijas galos; C un F tipa BVN, kas principā ir pulsu radara metodes, kas izmantoja līdzstrāvas vai augstfrekvences pulsus; D tipa BVN, kas ir līdzīgs B tipa BVN, bet mērījumus veic ar sinhronizētiem taimeriem [18], [19], [27], [28]. Kopš 1985. gada viļņu metodes lieto arī AS līdzstrāvas GVEPL, nosakot bojājuma attālumu no laika starpības starp secīgu identiskas polaritātes viļņu fiksēšanas [29], [30]. Vēlāk piedāvāts risinājums, kas apvieno viļņu metodi ar globālās pozicionēšanas sistēmu (turpmāk tekstā GPS) [31]. 1998. un 1999. gadā viļņu metodes lietotas kopā ar mākslīgajiem neironu tīkliem (turpmāk tekstā MNT) un viļņu transformāciju signālu apstrādei [32], [33]. Pēdējā laikā šo BVN metožu pētījumi saistīti ar lietojumiem konkrētu līniju un bojājumu veidiem [34], [35]. Viļņu metodēm raksturīga augsta precizitāte (kļūdas nepārsniedz 1 % vai vienu līnijas laidumu), taču šīs metodes prasa augstu mērījumu frekvenci, kas var padarīt nepieciešamo aprīkojumu dārgu, tām nepieciešami labi noskaņoti korelācijas bloki, lai izvairītos no kļūdām, ko radītu papildu viļņu frontes un viļņu norimšana.

Nākamā BVN metožu grupa izmanto elektriskos (visbiežāk avārijas režīma signālu uzspiestās sastāvdaļas) mērījumus apakšstacijā un līnijas modeli, lai noteiktu bojājuma attālumu. Sākotnēji mērījumus veica, atslēgtai līnijai pieslēdzot ārēju līdzstrāvas avotu vai maiņstrāvas avotu ar spriegumu paaugstinošu transformatoru [17]. Vēlāk BVN izmantoja bojājuma laikā uzņemtos mērījumus un iepriekš sagatavotas bojātās un/vai veselās paralēlās līnijas strāvu līknes [18], [19], [36], [37]. Pagājušā gadsimta 80. gados izveidoja digitālās BVN ierīces, kas pievienoja Tevenena ekvivalentus vienā vai abos līnijas modeļa galos. Tās izveida nelineāru vienādojumu sistēmu ar Kirhofa likumu palīdzību [38] vai noteica bojājuma

attālumu no DA šķietamās reaktīvās pretestības [15], vai arī izmantoja mērījumu signālu avārijas komponentes (avārijas un pirmsavārijas mērījumu punktu starpības) [16], [39]. Vēlāk izstrādāja divpusējās BVN metodes, kurām sākotnēji mērījumu datu apmaiņa bija manuāla [40], bet laika gaitā divpusējās BVN metodes izmantoja gan GPS, gan *PMU* (angļu val. *Phasor Measurement Unit*) mēraparātus kopā ar diskrēto Furjē transformāciju signālu apstrādei [41]–[43]. No 1996. gada BVN lieto arī MNT, kuriem padod momentānā sprieguma un strāvas signālu dažādas frekvenču sastāvdaļas [44]. Vēlāk MNT izmantoja bojājuma veida atpazīšanai, kā arī optimālās BVN metodes izvēlei [45], [46]. Zināmi arī BVN risinājumi, kas izmanto optimizāciju, piemēram, minimizējot atšķirību starp īsslēguma vietas sprieguma vērtībām, kas aprēķinātas no divpusējiem mērījumiem [47]. Iespējams arī risinājums, kurā līnijas otra gala ekvivalento pretestību aizstāj ar tās vērtību varbūtību sadalījumu un veic Montekarlo simulācijas, saglabājot vienīgi tos risinājumus, kam īsslēguma vietā pilnai jaudai ir aktīvs raksturs [7], [8]. Rakstā [47] minēto paņēmieni vēlāk modificēja un realizēja, izmantojot ĢA un vaļu uzvedībā balstītu optimizācijas metodi [48]–[50]. Sākotnēji šīs BVN metožu grupas kļūdas varēja sasniegt 20 % mērierīču vai izmantoto līkņu neprecizitātes dēļ. Digitālie vienkāršie BVN risinājumi ar Tevenena ekvivalentiem bieži nespēja kompensēt mērījumu nepietiekamību izmantoto modeļa vienkāršojumu un citu pieņēmumu dēļ. MNT ir perspektīvs atpazīšanas rīks, bet to realizācijai var būt nepieciešama jauna apmācības datubāze katram relejam vai apakšstacijai. Divpusējās BVN metodes parasti darbojas ātri un precīzi, bet to darbību var izjaukt sakaru vai mērījumu datu sinhronizācijas zaudēšana avārijas fizisko seku u. c. iemeslu dēļ. Optimizācijas risinājumi bieži prasa lielāku skaitļošanas apjomu, bet BVN šis trūkums ir mazāk izšķirošs, jo ātrdarbība ir sekundāra precizitātei.

Nemot vērā sakaru vai mērījumu sinhronizācijas zaudēšanas risku un citus iepriekš minētos BVN metožu trūkumus, var secināt, ka būtu lietderīgi izstrādāt BVN, kas spēj precīzi noteikt bojājuma attālumu pat nepilnīgas informācijas apstākļos.

2.2. Esošās distantaizsardzības metodes

DA attīstība sākās pagājušā gadsimta 20. gados ar bilances (sviras) tipa DA releju, pirmie praksē izmantotie C-Z tipa releji bija bilances un indukcijas diska maksimālstrāvas releja apvienojums [51]–[56]. Līdz 1930. gadam bija izstrādāts DA pakāpienveida saskaņošanas paņēmieni, parādījās pirmie apraksti par pārejas pretestības ietekmi uz DA darbību un sākās pētījumi par elektronikas izmantošanu DA relejos [57]. Šajā laikā ieviesa arī bojātās un veselās paralēlās līnijas NS strāvu radīto sprieguma kritumu kompensāciju gan C-Z, gan reaktances tipa DA relejiem [58], [59].

Pagājušā gadsimta 40. gados publicēja pētījumus par selektorreleju lietojumiem, kas samazināja kopējās DA releju komplekta izmaksas [60]. Minētajā laika posmā attīstījās arī DA risinājumi trīs zaru GVEPL [61]. 1944. gadā aprakstīts pirmais DA relejs ar iespēju ne tikai izmainīt nostrādes zonas izmēru, bet arī pārbīdīt to kompleksajā pretestību plaknē [62], kas ievērojami atviegloja DA saskaņošanu. Šajā desmitgadē attīstījās arī sinhrono svārstību un asinhronās gaitas ietekmes uz DA darbību analīzes metodes [63], [64].

50. un 60. gados pētnieki radīja pirmos darbspējīgos elektroniskos un vēlāk tranzistoru DA relejus, kuru pamatā bija fāzes sakritības vai citas signālu fāzes salīdzināšanas shēmas [65], [66]. Savukārt elektromehānisko releju pilnveides rezultātā pētnieki radīja kombinēto DA releju fāze-fāze (turpmāk tekstā F-F), fāze-fāze-zeme (turpmāk tekstā F-F-Z) īsslēgumu novēršanai [67], [68]. Ap 1966. gadu izveidots pirmais DA relejs ar četrstūra formas nostrādes zonu [69].

70. gados aprakstīti vairāki četrstūra formas nostrādes zonu implementējoši DA releji [70], [71]. Kopš 1971. gada publicēti raksti, kuros piedāvāti uz mikroprocesoru bāzes veidoti DA releji ar pakāpenisku loģikas un signālu apstrādes paņēmieni attīstību [72]–[76]. Šajā desmitgadē parādījās arī vairāki kombinētie DA releji visu asimetrisko īsslēgumu novēršanai, kas balstījās uz kompensēto F-Z spriegumu vektoru secību [77], [78]. 1977. gadā aprakstīts iespējams pirmais DA relejs ar adaptīvu nostrādes zonu, kas ir atkarīga no pirmsavārijas režīma jaudas plūsmas [79]. Šis ir viens no retajiem paņēmieniem ar DA integrētu pirmsavārijas režīma ievērošanu, bet zonas adaptācijas palielina selektivitātes zaudēšanas risku sazarotos tīklos.

Viens no 80. un 90. gados piedāvātajiem risinājumiem apvienoja DA ar viļņu BVN metodi [80]. Aprakstīta arī DA modifikācija, kas izmanto vienīgi pretsecības (turpmāk tekstā PS) un NS strāvas un spriegumus [81]. Minētajā laika posmā piedāvāti arī vairāki jauni DA risinājumi ar adaptīvu nostrādes zonu, piemēram: pievienojot reaktances iestatījuma korekciju frekvences nobīdes gadījumā [82]; realizējot pilnīgas adaptīvās nostrādes zonas (ietver visas iespējamās Z_{rel} vērtības pie dota pirmsavārijas režīma) aproksimāciju [83]. Izveidoti arī vairāki mērījumu avārijas komponentes izmantojoši virziena releji lietojumam kopā ar DA [84], [85]. 1996. gadā aprakstīts iespējams pirmais MNT lietojums DA, kurā tas izpilda signālu brīvās komponentes un Furjē filtru funkcijas [86]. Šajā laikā parādās arī publikācijas, kurās aplūkotas DA saskaņošanas stratēģijas, lietojot praksē izmantotos koordinācijas norādījumus [87] vai varbūtiskos paņēmienus, balstoties uz statistikas datiem un simulāciju rezultātiem [88]. 1999. gadā aprakstīts viens no pirmajiem DA risinājumiem, kurā izmantota optimizācija, kas minimizē atšķirību starp izmērīto bojātās fāzes sprieguma signālu un signālu, kas iegūts no momentānās strāvas mērījumiem un līnijas diferenciālvienādojumiem [89].

Aplūkojot kopš 2000. gada publicētos rakstus, iespējams atrast adaptīvās nostrādes zonas paņēmiena implementāciju ar MNT [90], kā arī tā modifikāciju, kas sadala nostrādes zonu fiksētajā daļā un adaptīvajā daļā, ko nosaka, izmantojot SCADA (angļu val. *Supervisory Control and Data Acquisition*) sistēmu [91]. Citi raksti ietver padziļinātu analīzi par mērījumu kļūdu un signālu kropļojumu ietekmi uz DA darbību [92], [93]. Zināms arī Montekarlo metodes lietojums DA, kas ir līdzīgs BVN metožu analīzē minētajam [94]. 2011. gadā publicētā rakstā parādīts paņēmieni optimālu DA iestatījumu noteikšanai, minimizējot selektivitātes un jutības zaudēšanas varbūtību summu [95]. Kopš 2015. gada pastāv arī DA paralēlām līnijām, kas spēj darboties pie īsslēgumiem starp līnijām [96], [97]. Pēdējā laikā aktuāla pētniecības tēma ir DA bloķēšana un darbība sinhrono svārstību vai asinhronās gaitas laikā [98]–[100].

Esošo DA risinājumu analīze parāda, ka sākotnējās DA pētniecības mērķis bija lētāku un praktiskāku DA komplektu izstrāde, ievērojot īsslēguma pārejas pretestības un pirmsavārijas

režīma jaudu plūsmas (reaktances efekta [11]) ietekmi vienīgi ar fiksēto iestatījumu palielināšanu. Mikroprocesoru izmantošana DA deva iespējas lietot labākus signālu apstrādes paņēmienus, taču tikai 1977. gadā pētnieki izstrādāja DA, kurā bija integrēta spēja pielāgoties pirmsavārijas režīmam. Citi risinājumi, kas mēģināja ievērot pirmsavārijas režīma ietekmi, lietoja strāvas sadalījuma koeficientus ar pieņēmumiem, izvairījās no mērījumu tiešsecības (turpmāk tekstā TS) sastāvdaļu izmantošanas vai realizēja DA ar optimizācijas palīdzību.

2.3. Esošās adaptīvās vienfāzes automātiskās atkalieslēgšanas metodes

Izteikta AVAAI attīstība novērojama kopš pagājušā gadsimta 90. gadiem, un viens no piedāvātajiem risinājumiem nostrādes momentu nosaka pēc bojātās fāzes sprieguma moduļa, kura vērtība atjaunojas 0,5–1,0 r. v. apmērā pēc loka dejonizācijas, ja GVEPL TS kapacitātes kompensācijas koeficients pārsniedz 0,7 r. v. [101]. Attiecīgi, nekompensētām vai daļēji kompensētām līnijām, nepieciešams cits risinājums, piemēram, balstoties uz leņķa starp bojātās fāzes spriegumu un NS strāvu izmaiņām. Trešā metode, kas lietojama daļēji kompensētām līnijām, kontrolē bojātās fāzes sprieguma periodu [101], taču šīs metodes darbību var ietekmēt citas frekvences svārstības. Zināms arī risinājums, kas nomērīto sprieguma signālu salīdzina ar simulētu sinusoidālu spriegumu, kam pieskaitīta rimstoša brīvā komponente [102], bet šim risinājumam nepieciešama augsta mērījumu frekvence. Pastāv arī MNT implementācija AVAAI, kas izmanto mērījumu brīvo komponenti un pirmās četras harmoniskās sastāvdaļas MNT apmācībai [103]. Savukārt cita AVAAI metode fiksē loka nodzišanas brīdi, notiekot straujai bojātās fāzes sprieguma efektīvās vērtības (turpmāk tekstā *RMS*, angļu val. *Root Mean Square*) izmaiņai [104]. Zināms arī par AVAAI metodi, kas nostrādā pēc diviem sprieguma kritumiem (īsslēgums un tā atslēgšana) un sekojoša sprieguma pieauguma, taču šāda metode var nenostādīt tuvu īsslēguma gadījumā [105]. Pastāv arī risinājums, kur loka nodzišanu fiksē pēc brīvās komponentes parādīšanās bojātās fāzes spriegumā [106], tomēr sprieguma brīvā komponente parādās arī pēc jaudas slēdžu atslēgšanas. Vairākas metodes izveidotas, balstoties uz strāvu spektrālā sastāva izmaiņām reaktīvās jaudas kompensācijas šunta reaktorus [107], [108].

2.4. Secinājumi

1. Abpusējās BVN metodes ir ātras un precīzas, taču to darbību var negatīvi ietekmēt sakaru vai mērījumu datu sinhronizācijas zaudēšana.
2. Esošās vienpusējās BVN metodes atrodas informācijas nepietiekamības apstākļos, kas bieži rada kļūdas, un tādēļ tiek lietotas metodes, kas spēj darboties, neskatoties uz strāvas pieplūdi no līnijas otra gala, piemēram, viļņu metodes un MNT, vai arī ņem vērā līnijas otrā gala sistēmu tuvināti, piemēram, lietojot Montekarlo metodi un varbūtiskus sadalījumus.
3. Vairums pētījumu par DA pievēršas tās implementācijai dažādās elektromehāniskās, elektroniskās un vēlāk digitālās ierīcēs.

4. DA jutības zaudēšanu reaktances efekta dēļ iespējams novērst ar adaptīvās nostrādes zonas lietošanu, taču tas palielina risku zaudēt selektivitāti.
5. Daļa no AVAAI metodēm fiksē izmaiņas bojātās fāzes sprieguma modulī vai vadās pēc sprieguma brīvās komponentes parādīšanās, citas metodes izstrādātas GVEPL darbībai ar reaktīvās jaudas kompensācijas reaktoriem, izmantojot to strāvas spektrālā sastāva izmaiņas.
6. Bieži AVAAI metodes neņem vērā veselo fāžu jaudas plūsmas vai tās prasa augstu mērījumu frekvenci augstāko harmoniku un citu sprieguma signāla kropļojumu fiksēšanai, kas sadārdzina šādu metožu implementāciju VAAI ierīcēs.

3. ELEKTRISKO SISTĒMU NESIMETRISKO REŽĪMU MODEĻĒŠANA

3.1. Režīmi ar vienu šķērsnesimetriju

Vienas šķērsnesimetrijas atainošanai var izmantot atbilstošas šuntējošās fāžu pārejas pretestības un kopēju neitrāles pārejas pretestību uz zemi, ko iespējams izmantot kopā ar simetrisko sastāvdaļu metodes pagrieziena operatoru $\dot{a} = e^{i120^\circ}$, lai izvestu vienādojumu sistēmu, kas sasaista nesimetrijas vietas aprēķina fāzes sprieguma simetriskās sastāvdaļas ar aprēķina fāzes strāvas simetriskajām sastāvdaļām:

$$\begin{cases} \dot{U}_{KA}^1 = \frac{1}{3} [\dot{I}_{KA}^1 (\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC}) + \dot{I}_{KA}^2 (\dot{Z}_{KA} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{KB} + \dot{a} \dot{Z}_{KC}) \\ \dot{U}_{KA}^2 = \frac{1}{3} [\dot{I}_{KA}^1 (\dot{Z}_{KA} + \dot{a} \dot{Z}_{KB} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{KC}) + \dot{I}_{KA}^2 (\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC}) \\ \dot{U}_{KA}^0 = \frac{1}{3} [\dot{I}_{KA}^1 (\dot{Z}_{KA} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{KB} + \dot{a} \dot{Z}_{KC}) + \dot{I}_{KA}^2 (\dot{Z}_{KA} + \dot{a} \dot{Z}_{KB} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{KC}) \\ \quad + \dot{I}_{KA}^0 (\dot{Z}_{KA} + \dot{a} \dot{Z}_{KB} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{KC})], \\ \quad + \dot{I}_{KA}^0 (\dot{Z}_{KA} + \dot{a}^2 \dot{Z}_{KB} + \dot{a} \dot{Z}_{KC})], \\ \quad + \dot{I}_{KA}^0 (\dot{Z}_{KA} + \dot{Z}_{KB} + \dot{Z}_{KC} + 9\dot{Z}_{KN})], \end{cases} \quad (3.1.)$$

kur $\dot{U}_{KA}^1, \dot{U}_{KA}^2, \dot{U}_{KA}^0$ – A fāzes sprieguma bojājuma vietā TS, PS un NS sastāvdaļu vektori, V;

$\dot{I}_{KA}^1, \dot{I}_{KA}^2, \dot{I}_{KA}^0$ – A fāzes strāvas bojājuma vietā TS, PS un NS sastāvdaļu vektori, A;

$\dot{Z}_{KA}, \dot{Z}_{KB}, \dot{Z}_{KC}$ – A, B un C fāzes šuntējošā pārejas pretestība bojājuma vietā, Ω ;

$\dot{Z}_{KN}$ – neitrāles pārejas pretestība uz zemi bojājuma vietā, Ω .

3.1. vienādojumu sistēmu iespējams lietot ar atsevišķām secību shēmām, realizējot [109] līdzīgu skaitliskā aprēķina algoritmu, kur nesimetrijas vietas aprēķina fāzes sprieguma simetriskās sastāvdaļas $\dot{U}_{KA}^1, \dot{U}_{KA}^2, \dot{U}_{KA}^0$ ataino ar elektrodzinējspēku (turpmāk tekstā EDS) avotiem. Minēto paņēmieni iespējams izmantot pat vispārīgas šķērsnesimetrijas ($0 \leq \dot{Z}_{KA} \neq \dot{Z}_{KB} \neq \dot{Z}_{KC} < \infty \Omega$) gadījumā, bet, ja vismaz divas no fāžu pretestībām ir vienādas, iespējams lietot kompleksās aizvietošanas shēmas ar elektriskajiem savienojumiem starp secību shēmām [110]. To aprēķini ir skaitliski stabilāki, salīdzinot ar atsevišķām secību shēmām, un, lietojot topoloģisko modelēšanas metodi, iespējams uzreiz iegūt simetriskās sastāvdaļas visām zaru strāvām un mezglu spriegumiem.

3.2. Režīmi ar vienu garensimetriju

Vienas garensimetrijas atainošanai var izmantot atbilstošas fāžu virknes pretestības, ko var izmantot, lai izvestu vienādojumu sistēmu, kas sasaista nesimetrijas vietas aprēķina fāzes sprieguma krituma simetriskās sastāvdaļas ar aprēķina fāzes strāvas simetriskajām sastāvdaļām:

$$\begin{cases} \Delta\dot{U}_{LA}^1 = \frac{1}{3}[i_{LA}^1(\dot{Z}_{LA} + \dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC}) + i_{LA}^2(\dot{Z}_{LA} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LB} + \dot{a}\dot{Z}_{LC}) \\ \Delta\dot{U}_{LA}^2 = \frac{1}{3}[i_{LA}^1(\dot{Z}_{LA} + \dot{a}\dot{Z}_{LB} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LC}) + i_{LA}^2(\dot{Z}_{LA} + \dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC}) \\ \Delta\dot{U}_{LA}^0 = \frac{1}{3}[i_{LA}^1(\dot{Z}_{LA} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LB} + \dot{a}\dot{Z}_{LC}) + i_{LA}^2(\dot{Z}_{LA} + \dot{a}\dot{Z}_{LB} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LC}) \\ \quad + i_{LA}^0(\dot{Z}_{LA} + \dot{a}\dot{Z}_{LB} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LC})], \\ \quad + i_{LA}^0(\dot{Z}_{LA} + \dot{a}^2\dot{Z}_{LB} + \dot{a}\dot{Z}_{LC})], \\ \quad + i_{LA}^0(\dot{Z}_{LA} + \dot{Z}_{LB} + \dot{Z}_{LC})], \end{cases} \quad (3.2.)$$

kur $\Delta\dot{U}_{LA}^1, \Delta\dot{U}_{LA}^2, \Delta\dot{U}_{LA}^0$ – A fāzes sprieguma krituma bojājuma vietā TS, PS un NS sastāvdaļu vektori, V;

$i_{LA}^1, i_{LA}^2, i_{LA}^0$ – A fāzes strāvas bojājuma vietā TS, PS un NS sastāvdaļu vektori, A;

$\dot{Z}_{LA}, \dot{Z}_{LB}, \dot{Z}_{LC}$ – A, B un C fāzes virknes pārejas pretestība bojājuma vietā, Ω .

3.2. vienādojumu sistēmu iespējams lietot ar atsevišķām secību shēmām, līdzīgi kā aprakstīts 3.1. apakšnodaļā. Tāds paņēmieni ļauj aprēķināt arī režīmu vispārīgas garensimetrijas ($0 \leq \dot{Z}_{LA} \neq \dot{Z}_{LB} \neq \dot{Z}_{LC} < \infty \Omega$) gadījumā, bet, ja vismaz divas fāžu pretestības ir vienādas, iespējams [110] un rekomendējams izmantot kompleksās aizvietošanas shēmas ar elektriskajiem savienojumiem 3.1. apakšnodaļā minēto iemeslu dēļ.

3.3. Režīmi ar vairākām nesimetrijām vienlaikus

Režīmi ar vairākām nesimetrijām visbiežāk rodas, kad īsslēgumu radīti pārspriegumi izsauc citu īsslēgumu rašanos, vienlaikus esot īsslēgumam un vienfāzes pārrāvumam VAAI darbības laikā u. tml. Promocijas darbā šādu režīmu aprēķini nepieciešami, lai noteiktu veselo fāžu režīmu AVAAI darbības laikā, kura parametrus izmanto detalizētajā līnijas modelī. Teorētiski lielākajai daļai no šiem režīmiem pieļaujams lietot kompleksās aizvietošanas shēmas vienīgi tad, ja gandrīz visu nesimetriju ievērošanai izmantoti ideāli transformatori, kurus ir sarežģīti precīzi ņemt vērā [110], [111], [112]. Vienā darbā minēta iespēja aizstāt ideālos transformatorus ar EDS avotiem, kas nodrošina robežnosacījumu izpildi [111], taču tajā neparādās šīs idejas praktiskā realizācija. Šajā darbā izstrādātas divas atšķirīgas minētā paņēmiena skaitlisko aprēķinu adaptācijas.

Pirmajai metodei izmanto vienu komplekso aizvietošanas shēmu vai atsevišķas secību shēmas. Gadījumā, ja kaut viena no nesimetrijām nav vispārīga, vienu no tām iespējams ievērot ar elektriskajiem savienojumiem, savukārt pārējās ņem vērā, ieviešot papildu EDS avotus, kuru vērtības atjauno starp aprēķina soļiem no 3.1. un/vai 3.2. vienādojumu sistēmas. Savukārt, ja visas nesimetrijas ir vispārīgas, lieto atsevišķas secību shēmas un visas nesimetrijas ievēro, ieviešot papildu EDS avotus, taču šis risinājums ir skaitliski nestabilāks lielām pretestībām nesimetriju vietās.

Otrajam risinājumam nepieciešams katrai nesimetrijai izveidot komplekso aizvietošanas shēmu, kur tā ievērota ar elektriskajiem savienojumiem, savukārt pārējās nesimetrijas – ar EDS avotiem. Minētā prasība izriet no tā, ka ieviesto EDS avotu vērtības nosaka kā sprieguma kritumus kompleksajās aizvietošanas shēmās, kur šī nesimetrija ievērota ar

elektriskajiem savienojumiem [109]. Šāds risinājums prasa vairāk sagatavošanās darbu, taču tas ir skaitliski stabils pat pie ievērojamām fāžu pretestībām.

Nemot vērā piedāvātajā metodē paredzēto mērījumu kopas paplašināšanas veidu, topoloģiskās modelēšanas metodes lietošana kopā ar kompleksajām aizvietošanas shēmām, lai ar vienu režīma risinājumu iegūtu visas nepieciešamo zaru strāvu un mezglu spriegumu simetriskās sastāvdaļas, šķiet izdevīga. Minētā risinājuma realizācijai nepieciešams arī režīma matemātiskais apraksts un izrietošo vienādojumu risināšanas veids, kas ir parādīts 4. nodaļā.

3.4. Secinājumi

1. Elektrisko sistēmu asimetriskos režīmus, kas ietver visbiežāk novērojamās bojājumus, iespējams modelēt ar simetrisko sastāvdaļu metodes palīdzību.
2. Režīmu vienas asimetrijas gadījumā iespējams noteikt, iteratīvi pārrēķinot atsevišķās secību shēmās ieslēgto EDS avotu vērtības atbilstoši nesimetrijas robežnosacījumiem vai izmantojot komplekso aizvietošanas shēmu, ja asimetrijas vietā vismaz divās fāzēs ir vienādas pretestības.
3. Režīmus ar vairākām nesimetrijām iespējams modelēt ar vienas kompleksās aizvietošanas shēmas palīdzību, kurā viena asimetrija ievērota ar elektriskajiem savienojumiem, pārējās – ar papildu EDS avotiem, vai pārmaiņus veicot režīma aprēķina soļus vairākām šāda veida kompleksajām aizvietošanas shēmām, kurās atšķirīgas nesimetrijas ievērotas ar elektriskajiem savienojumiem.

4. TOPOLOĢISKĀ ELEKTRISKO SISTĒMU REŽĪMU MODELĒŠANAS METODE

4.1. Mezglu potenciālu metode matriču formā

Elektriskās sistēmas zaru strāvas un mezglu spriegumus iespējams noteikt, manuāli sastādot uz Kirhofa un Oma likumiem balstītus vienādojumus sistēmas aizvietošanas shēmai un atrisinot šos vienādojumus [113], [114], bet, ņemot vērā, ka režīma aprēķinu nepieciešams integrēt optimizācijā, nolemts izmantot datorrealizācijai pateicīgo MPM matriču formā [115]:

$$YU = I - MZ^{-1}E + Y_B U_B, \quad (4.1.)$$

kur Y – mezglu vadītspēju matrica ($Y = MZ^{-1}M^T$), s;

U – mezglu spriegumu vektors (relatīvi bāzes mezglam), V;

I – strāvas avotu vektors, A;

M – tīkla topoloģijas grafa pirmās incidences matrica;

Z – tīkla pretestību matrica, Ω ;

E – zaru EDS avotu vektors, V;

Y_B – bāzes mezglā vadītspēju vektors, s;

U_B – bāzes mezglā spriegums, V.

Mezglu spriegumu noteikšanai jāatrisina lineārā MPM 4.1. vienādojumu sistēma, ko iespējams izdarīt ar dažādām metodēm: Krāmera formulas, faktorizācija u. c. Šajā promocijas darbā izmantota Gausa–Zeideļa metode vai simulāciju vidē iebūvēta Gausa metode.

4.2. Stacionāru bojājuma režīmu modelēšana

Modelējot stacionāros bojājuma režīmus, pieņemts, ka bāzes mezglis ir zemēts ($U_B = 0$ V). 4.1. vienādojumu sistēmas modifikācijas skaitliskais risinājums, lietojot Gausa–Zeideļa metodi, ir šāds [115]:

$$U_i^{k+1} = \sum_{j=1}^{i-1} C_{ij} U_j^{k+1} + \sum_{m=i+1}^n C_{im} U_m^k + D_i, \quad (4.2.)$$

kur n – aizvietošanas shēmas mezglu skaits, izņemot bāzes mezglu;

k – Gausa–Zeideļa metodes tuvinājuma soļa numurs;

C – no mezglu vadītspēju matricas iegūta koeficientu matrica ($C_{ij} = -Y_{ij}/Y_{ii}$, $C_{ii} = 0$);

D – vektors, ko nosaka no mezglu vadītspēju matricas un MPM vienādojumu sistēmas brīvajiem locekļiem ($D = I - MZ^{-1}E$, $D_i = -B_i/Y_{ii}$).

4.2. vienādojumu atkārtoti izmanto visiem mezglēm $i = 1, \dots, n$, līdz lielākā starpība starp dotā $k + 1$ un iepriekšējā tuvinājuma soļa k mezglu spriegumiem ir zemāka par noteiktu precizitātes iestatījumu: $\varepsilon > \max_i (|U_i^{k+1} - U_i^k|)$. Zinot mezglu spriegumus, var aprēķināt zaru strāvas, izmantojot Oma likumu matriču formā [115]:

$$I_Z = Z^{-1}[E + M^T(U - U_B)], \quad (4.3.)$$

kur EDS un spriegumiem izmantotas F-Z vērtības.

Viegli pamanīt, ka stacionāro bojājumu režīmu topoloģiskās modelēšanas risinājums ar MPM un kompleksajām aizvietošanas shēmām ir pateicīgs datorrealizācijai.

4.3. Stacionāro pirmsavārijas režīmu modelēšana

Pirmsavārijas režīmu pamatā nosaka ģeneratoru un slodžu jaudas, ko ar mezglu spriegumiem saista nelineāras funkcijas, kas rada nepieciešamību nelineāras vienādojumu sistēmas risināšanai. Tā vietā iespējams izmantot modificētu iteratīvo risinājumu. Minētais risinājums aizstāj tīkla avotus un slodzes ar strāvas avotiem, kuru vērtības nosaka to mezglu pilnā jauda un F-F spriegums:

$$J = I = \hat{S}/(\sqrt{3}\hat{U}), \quad (4.4.)$$

kur $\hat{S}$ – kompleksi saistītā trīsfāžu pilnā jauda, VA;

$\hat{U}$ – kompleksi saistītais F-F spriegums, V.

Parādīto aizvietošanu var pamatot ar pārvades tīklos lietoto sprieguma regulēšanu un tipiski izmantotajiem ģeneratoru regulēšanas principiem ($P_G, Q_G = \text{const}$ vai $P_G, |U| = \text{const}$). Šim risinājumam EDS avotu vektors $E = 0$ V un MPM vienādojumu sistēma pierakstāma formā:

$$YU = I + Y_B U_B = \hat{D}_S \hat{U}^{-1} + Y_B U_B, \quad (4.5.)$$

kur $\hat{U}^{-1}$ – kompleksi saistīto F-F spriegumu apgriezto vērtību vektors, V^{-1} ;

$\hat{D}_S$ – diagonāla kompleksi saistīto mezglu pilno jaudu matrica ($\hat{D}_{Sij} = \hat{S}_i/\sqrt{3}$, ja $i = j$, un $\hat{D}_{Sij} = 0$, ja $i \neq j$).

Iegūtās vienādojumu sistēmas skaitliskajam risinājumam var izmantot šādu formulu:

$$U_i^{k+1} = \sum_{j=1}^{i-1} C_{ij} U_j^{k+1} + \sum_{m=i+1}^n C_{im} U_m^k + \frac{1}{Y_{ii}} (\hat{D}_{Sii} \hat{U}_i^{-1k} + Y_{Bi} U_B). \quad (4.6.)$$

Gadījumā, ja, realizējot 4.6. formulu, rodas konverģences problēmas, iespējams iegūt 4.5. risinājumu ar inversās matricas reizinājumu $U = Y^{-1} \hat{D}_S \hat{U}^{-1} + U_B$ vai tā skaitlisko implementāciju:

$$U_i^{k+1} = \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij}^{-1} \hat{D}_{Sjj} \hat{U}_j^{-1k+1} + \sum_{m=i+1}^n Y_{im}^{-1} \hat{D}_{Smm} \hat{U}_m^{-1k} + U_B. \quad (4.7.)$$

Zinot mezglu F-F spriegumus, iespējams noteikt fāžu strāvas ar Oma likumu (4.3. vienādojums), pirms tam pārejot pie F-Z spriegumu vērtībām, un noteikt ģeneratoru pirmsavārijas EDS, pieskaitot to kopņu spriegumiem sprieguma kritumus statora tinumos.

4.4. Pārejas procesu aprēķini, izmantojot skaitlisku inverso Laplasa transformāciju

Pārejas procesu risināšanu visbiežāk sāk ar diferenciālvienādojumu sistēmas sastādīšanu, ko iegūst, izmantojot Kirhofa likumus lineārām ķēdēm, tā var ietvert arī mehānisko procesu vienādojumus. Iegūto vienādojumu sistēmu pamatā risina ar dažādām skaitliskajām metodēm,

piemēram, trapeču, Eilera un Runge–Kutas metodi [116], [117]. Šajā promocijas darbā izpētīta uz Furjē dekompozīcijas bāzes izstrādāta tuvināta inversā Laplasa transformācija, kas iegūst parametru laika funkcijas $f(t)$ no to attēlu Laplasa telpā $F(s)$ ($s = c + i\omega$, $i = \sqrt{-1}$) vērtībām, kuras vienmērīgi sadalītas pa reālo asi $\text{Re}(s) = c$ [118], [119]. Sinusoīdu rindas koeficientu noteikšanai izvesta šāda formula:

$$\sum_{i=0}^m \left(\binom{2m}{i} - \binom{2m}{i-1} \right) S_{m-i} = \frac{4^{m+1}}{\pi} \sigma F((2m+1)\sigma). \quad (4.8.)$$

kur S_{m-i} – sinusoīdu rindas koeficienti;

σ – brīvi izvēlēts pozitīvs reāls skaitlis;

$$\binom{2m}{i} = \frac{(2m)!}{i!(2m-i)!} - \text{kombinācijas no } i \text{ pa } 2m; m = 1, 2, \dots, \infty; i = 0, 1, 2, \dots, m.$$

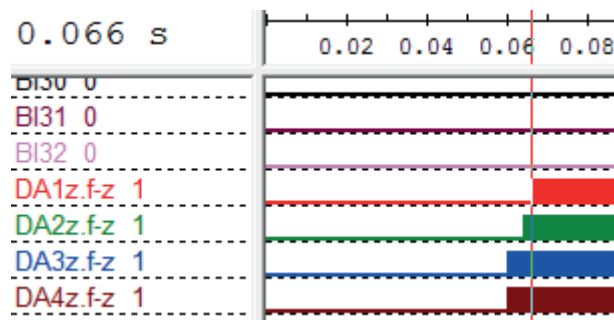
Aprēķinātos sinusoīdu rindas koeficientus iespējams izmantot laika funkcijas iegūšanai:

$$f(t) = \sum_{i=0}^m \{S_i \sin[(2i+1) \arccos(e^{-\sigma t})]\}. \quad (4.9.)$$

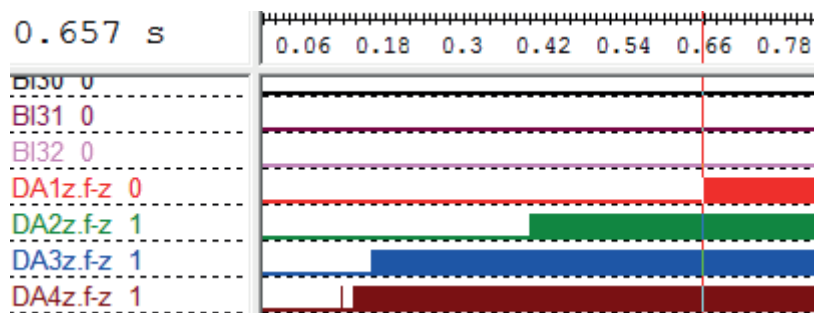
Aprakstītās metodes testēšana parādīja, ka tajā izmantotā $F(s)$ aizvietošana ar $F(s+a)$ bieži izsauca kļūdas laika funkcijas vērtībās, ja sistēmā bija maiņstrāvas avoti. Attiecīgi, šī metode izmantojama līdzstrāvas ķēžu pārejas procesu vai maiņstrāvas ķēžu signālu brīvo komponentu aprēķiniem, taču jāatzīmē, ka to iespējams kombinēt ar topoloģisko MPM, lietojot analogisku vienādojumu sistēmu Laplasa telpā.

4.5. Mūsdienu distantaizsardzības termināla testēšana

Baltijas valstīs salīdzinoši bieži novērojami F-Z īsslēgumi, kas radušies kritušu koku rezultātā [1], [120] un izceļas ar izteikto ietekmi uz vienpusējām BVN un DA metodēm. Minētā parādība skaidrojama ar papildu pārejas pretestības komponenti, kas pastāv koka izdegšanas un caursišanas laikā. Bojājumu oscilogrammu analīze parādīja, ka izdegšanas process mēdz būt arī salīdzinoši lēns [121]. Aprakstīto bojājumu ietekmes uz DA darbību analīzei veikta digitāla GVEPL aizsardzības un automātikas termināla [122] testēšana, lietojot analogo/digitālo testēšanas paņēmieni (simulācijas *MATLAB SimPowerSystems* vidē, rezultātu pārnese ar *COMTRADE* dokumentu formātu un pievade terminālim ar signālu ģeneratoru *ISA DRTS 64*). Iegūtie rezultāti parādīja, ka pat stacionārā pārejas pretestības komponente var izjaukt atpakaļ virzīto rezerves zonu nostrādi F-F-Z un F-Z īsslēgumiem un pārejas pretestības papildu komponente pie F-Z īsslēgumiem virzienā “uz priekšu” spēj izsaukt izteiktus DA nostrādes kavējumus, kamēr DA šķietamā pretestība sasniedz savu stacionāro vērtību (4.1 un 4.2 att.).



4.1. att. DA zonu palaišanas laiki metāliska F-Z īsslēguma gadījumā [123].



4.2. att. DA zonu palaišanas laiki F-Z īsslēgumam ar papildu pārejas pretestību [123].

Piedāvāto metodi neskar parādītā papildu pārejas pretestības negatīvā ietekme F-Z īsslēgumu gadījumos, jo gan pirmsavārijas režīma parametri, gan īsslēguma pārejas pretestība ir ietverta identificējamo parametru lokā un pamatharmonikas ieguvei izmantotā signālu apstrāde arī samazina papildu pārejas pretestības nestacionārā rakstura ietekmi.

4.6. Secinājumi

1. Elektrisko sistēmu topoloģiskā modelēšana, lietojot aizvietošanas shēmas un MPM matricu formā, dod iespēju iegūt datorrealizācijai pateicīgus, viegli pielāgojamus bojājumu un pirmsavārijas režīmu aprēķinu algoritmus.
2. Īsslēguma pārejas pretestība negatīvi ietekmē esošā digitālā DA termināla darbību gan pie F-Z, gan starpfāžu īsslēgumiem, no kuriem īpaši izteiktus laika kavējumus var radīt kritušo koku izsaukti F-Z īsslēgumi.

5. MODEĻA PARAMETRU IDENTIFIKĀCIJAS METODES LIETOŠANA BOJĀJUMA VIETAS NOTEIKŠANAI UN DISTANTAIZSARDZĪBAI

5.1. Piedāvātās parametru identifikācijas metodes pamatstruktūra

Piedāvātā modeļa parametru identifikācijas metode veidota kā optimizācija, kas minimizē starpību starp kontrolētajā apakšstacijā pieejamajiem mērījumiem un tiem atbilstošām matemātiskā modeļa izejas vērtībām. Metode iedalīta divos posmos, vispirms veicot pirmsavārijas un tad avārijas režīma modeļa parametru identifikāciju, kas samazina otrajā posmā identificējamo lielumu skaitu. Pirmo identifikācijas posmu būtu jāatkārto regulāri ar noteiktu laika intervālu vai fiksējot izmaiņas izmantotajos pirmsavārijas režīma mērījumos: kontrolētās apakšstacijas kopņu spriegumos, zaru strāvās vai jaudu plūsmās. Pirmajā posmā identificē aktīvās un reaktīvās slodžu un avotu mezglu jaudas un, ja lietoti aizvietošanas shēmas vienkāršojumi, arī TS aktīvo, reaktīvo pretestību, kas savieno kontrolētos zarus ar pārējo sistēmu. Pirmajā posmā identificētos parametrus izmanto, galvenokārt nosakot avotu ekvivalentos EDS. Otrā posma darbība sākas pēc bojājuma brīdi un veidu fiksējošas loģikas komandas. Šajā posmā lieto mērījumus no tiem pašiem elementiem, bet identifikācija nosaka īsslēguma attālumu α , pārejas pretestību R_F un nepieciešamības gadījumā PS un NS ekvivalento pretestību starp kontrolētajiem zariem un pārējo sistēmu. Abiem parametru identifikācijas posmiem lieto vienu optimizācijas metodi un mērķa funkciju (starpība starp mērījumiem un modeļa izeju):

$$f_{OBJ} = \sum_{i=1}^{N_{MEA}} K_{Wi} \left(\frac{y_i - y_{mi}}{y_i} \right)^2, \quad (5.1.)$$

kur K_{Wi} – i -tā parametra svara koeficients;

N_{MEA} – optimizācijā izmantoto mērījumu skaits;

y_i and y_{mi} – i -tā parametra mērījuma vērtība un tai atbilstošā modeļa izejas vērtība.

Optimizācija iteratīvi maina identificējamo parametru vērtības, līdz izpildīti tās konverģences nosacījumi, kas nodrošina mērķa funkcijas vērtību tuvu globālajam minimumam.

5.2. Modificētās nejaušās meklēšanas izmantošana modeļa parametru identifikācijai

Ņemot vērā, ka mērķa funkcijā izmantoti vairāki parametri, kurus ar identificējamajiem parametriem saista nelineāras funkcijas (6.1 att.), var paredzēt, ka mērķa funkcijā iespējama lokālo minimumu klātbūtne. Atbilstoši, pirmā izmēģinātā optimizācijas metode bija nejaušā meklēšana ar meklēšanas apgabala samazināšanu, kura sākumā ar gadījuma skaitļu ģeneratoru ieguva potenciālo nezināmo (identificējamo) lielumu vektoru X uzdotajās meklēšanas apgabala robežās X_{min} , X_{max} . Ģenerētās modeļa parametru vērtības ievada modelī, kura izeju ar atbilstošiem mērījumiem izmanto mērķa funkcijas vērtības noteikšanai atbilstoši

5.1. vienādojumam. Šādu procesu atkārto, kamēr nav sasniegts noteikts mērķa funkcijas uzlabojumu (samazinājumu) skaits N_{IMPR} , kam seko meklēšanas apgabala samazināšana:

$$X_{\max, \min} = X_B \pm X_N(K\%/(200s)), \quad (5.2.)$$

kur $X_{\min}$ and $X_{\max}$ – vektori ar nezināmo lielumu vektora X minimālajām un maksimālajām iespējamajām vērtībām;

X_B – vektors X ar dotajā brīdī vismazāko mērķa funkcijas vērtību;

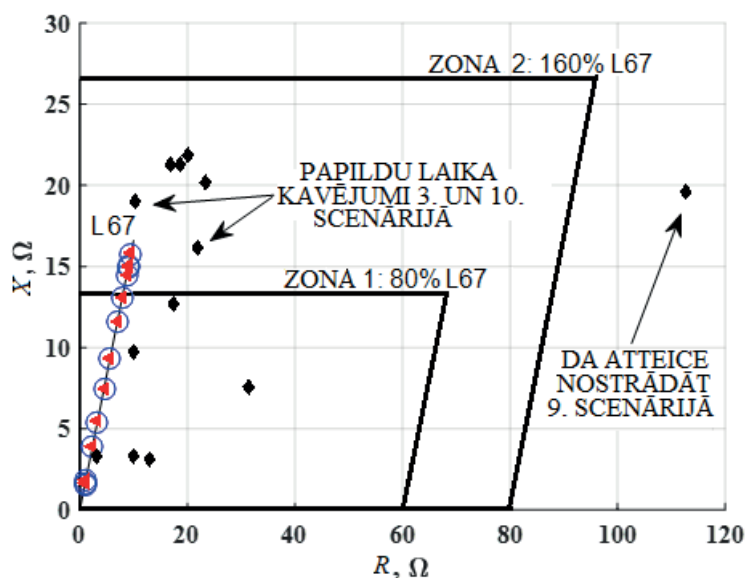
$K\%$ – vektors ar maksimālajām X elementu nobīdēm no to vidējām vai nominālām vērtībām, %;

X_N – vektors ar X nominālajām vai vidējām vērtībām;

s – parametru identifikācijas algoritma soļa numurs.

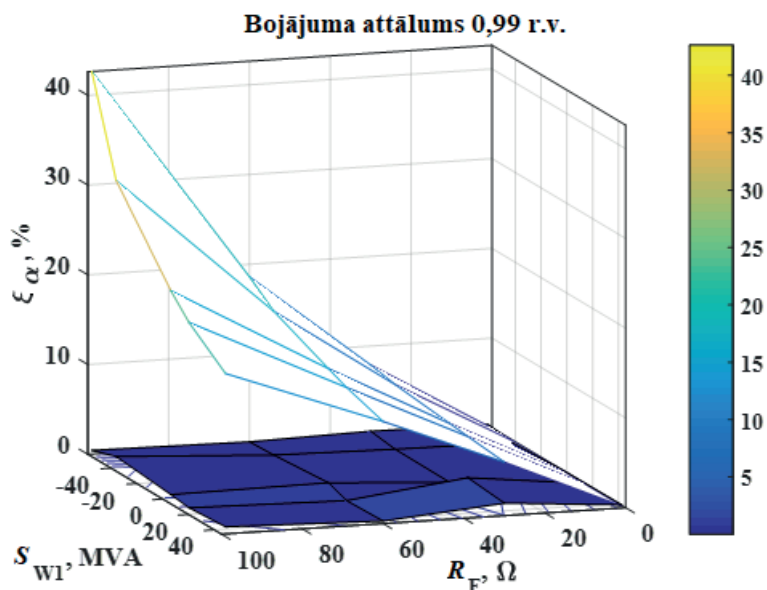
Iepriekš aprakstītās darbības turpina, līdz mērķa funkcijas izmaiņas ātrums samazinās līdz noteiktam limitam (šajā darbā $df_{OBJ} \leq 0,001$).

Piedāvātās metodes lietojumu DA ar šo optimizācijas paņēmieni vispirms testēja un salīdzināja ar klasisko DA algoritmu [11], [124]. Testēšanas rezultāti parādīja, ka testēšanā izmantotā tīkla divu ģeneratoru un divu slodžu identificēto jaudu vērtību kļūda nepārsniedza 2 % un piedāvātās metodes precīzi identificētais bojājuma attālums un no tā aprēķinātā Z_{rel} nodrošināja pareizu DA darbību. Savukārt klasiskā DA algoritma iegūtās šķietamās pretestības (5.1 att. atainotas ar melniem četrstūriem) kļūdu dēļ rastos papildu laika kavējumi [125].



5.1. att. Piedāvātās metodes un klasiskā DA algoritma iegūtās šķietamās pretestības kompleksajā pretestību plaknē [125].

Piedāvātās metodes ar identisku optimizācijas paņēmieni implementācijas BVN testēšana parādīja ne tikai šīs metodes precizitāti, bet, atšķirībā no esošas vienpusējās BVN metodes, arī tās neatkarību no pirmsavārijas režīma (5.2 att., kur baltā virsma ar krāsainām robežām atbilst esošajai vienpusējai BVN metodei, krāsainā virsma – piedāvātajai metodei) [126].



5.2. att. Bojājuma attāluma noteikšanas kļūdas ε_α atkarībā no pirmsavārijas jaudu plūsmas S_{W1} un īsslēguma pārejas pretestības R_F fiksēta īsslēguma attāluma gadījumā [126].

Neskatoties uz precīzo BVN un pareizo DA darbību, modificētās nejaušās meklēšanas metodes darbība aizņēma daudz laika, kas pamudināja izmēģināt citu optimizācijas paņēmieni.

5.3. Modificētā ģenētiskā algoritma izmantošana modeļa parametru identifikācijai

ĢA ir universāla optimizācijas metode, kas tiek veiksmīgi izmantota līdzīgos tehniskos uzdevumos [50], [127], [128], relatīvi viegli realizējama un ar papildu drošības mehānismiem ir spējīga izvairīties no mērķa funkcijas lokāliem minimumiem [129], [130]. Šī metode nosaka labāko risinājumu dabiskās atlases ceļā atbilstoši risinājuma pielāgošanās spējai (mērķa funkcijas vērtībai). ĢA tipiski ietver šādus soļus: “vecāku” pāru izveide, reprodukcija, “bērnu” mutācijas, pielāgošanās spējas noteikšana un atlase, kas izveido nākamo paaudzi no vecākiem un bērniem [23], [128]–[130]. Šī optimizācijas metode katru risinājumu reprezentē ar hromosomu, kas ir nezināmo vērtību virkne izteikta binārajā sistēmā.

Šajā promocijas darbā ĢA modifikācijas sākumā ar gadījuma skaitļu ģeneratoru iegūst 3000 lielu grupu ar risinājuma variantiem, lai samazinātu pirmās paaudzes vidējās pielāgošanās spējas ietekmi uz parametru identifikācijas precizitāti. Turpinājumā nosaka šo variantu pielāgošanās spēju atbilstoši 5.1. vienādojumam un izpilda pirmās paaudzes atlasī (ĢA iekšējā ciklā lietotajai atlasei identiskā veidā). Pirms ĢA iekšējā cikla sākšanas paaudžu skaitītājam N_{GEN} piešķir vērtību 1, stagnējošo paaudžu skaitītājam $N_{STAG} = 0$. Iekšējais ĢA cikls sākas ar vecāku pāru izveidi, lietojot “*autbreeding*” paņēmieni, un vecāku pāru bērnu hromosomu mutāciju varbūtības P_{MUT} noteikšanu ar “*incest*” paņēmieni. Nākamais solis ir reprodukcija, kuras laikā no katra vecāku pāra iegūst divus bērnus atbilstoši “triādes krustošanai” līdzīgam paņēmienam, radot vēl vienu risinājuma variantu grupu ar $POPsize$ (šajā darbā 20) indivīdiem. Trešais solis ir bērnu mutācijas ar “blīvuma mutācijas”

paņēmienu, kas izmanto P_{MUT} un atsevišķa gēna mutācijas varbūtību $P_{GENEMUT}$. Mutācijām sekojošo nākamās paaudzes atlasī realizē ar “elitāro atlasī” 10 % no nākamās paaudzes locekļiem, bet pārējos locekļus nosaka atbilstoši “ruletes riteņa” paņēmienam [129], [130]. Tad nosaka starpību starp iegūtās paaudzes pielāgošanās spējas maksimālo un minimālo vērtību Δf_{OBJ} , maksimālo Heminga attālumu $\max d_{HAMM}$ un starpības starp iegūtās un iepriekšējās paaudzes maksimālajām un minimālajām pielāgošanās spējām ($\Delta_{\max} f_{OBJ}$ un $\Delta_{\min} f_{OBJ}$). Nākamais solis ietver ĢA stagnēšanas pārbaudi, ko fiksē, ja $\Delta_{\max} f_{OBJ}$ un $\Delta_{\min} f_{OBJ}$ ir mazākas par iestatījumu (šajā darbā 0,1 %), N_{STAG} palielināšanu par 1, izpildoties minētajam nosacījumam, vai atiestatīšanu uz nulli pretējā gadījumā. N_{STAG} pārsniedzot noteiktu pieļaujamo stagnāciju skaitu (šajā darbā 20), ar gadījuma skaitļu ģeneratoru, kam ir samazināts meklēšanas apgabals, iegūst 1000 jaunus risinājuma variantus un veic vēl vienu atlasī. Iekšējā cikla beigās notiek konverģences kritēriju pārbaude, kas izpildās, ja N_{GEN} pārsniedz $\min N_{GEN} = 50$, Δf_{OBJ} ir mazāka par $\min \Delta f_{OBJ} = 0,05$ r. v. un $\max d_{HAMM}$ ir mazāks par $\min d_{HAMM} = 0,05$ r. v. Darbā piedāvātās metodes implementācijas ar ĢA testēšana atsevišķi parādītas septītajā nodaļā.

5.4. Secinājumi

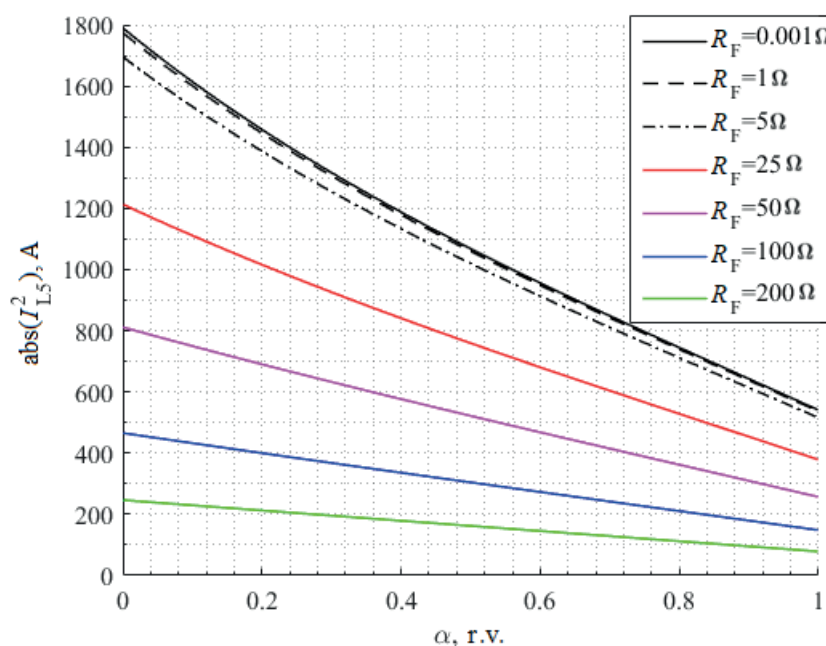
1. Modeļa parametru identifikācijas iedalīšana divos posmos samazina nezināmo parametru skaitu, kas jānosaka pēc bojājuma rašanās un padara otro identifikācijas posmu iespējamāku.
2. Ņemot vērā potenciālo lokālo minimumu klātbūtni mērķa funkcijā, parametru identifikācijai nepieciešams izmantot optimizācijas metodi, kas šādos apstākļos spēj atrast globālo minimumu.
3. Atšķirībā no piedāvātās metodes esošās vienaspusējās BVN metodes precizitāte ir stipri atkarīga no jaudas plūsmas pirmsavārijas režīmā.
4. Salīdzinot ar testēto esošo DA un vienaspusējo BVN metodi, piedāvātās metodes realizācija ar modificēto nejaušo meklēšanu dod precīzākus rezultātus.
5. Neskatoties uz modificētās nejaušās meklēšanas precizitāti, tās darbība prasa salīdzinoši daudz laika, kas pamudināja meklēt veikspējas uzlabošanas ceļus, optimizējot mērķa funkciju un meklējot efektīvāku optimizācijas metodi.

6. MODEĻA PARAMETRU IDENTIFIKĀCIJAI IZMANTOTĀS MĒRĶA FUNKCIJAS OPTIMĀLĀS VERSIJAS SINTĒZE

Piektajā nodaļā dotajai piedāvātās metodes pamatstruktūrai ir universāls raksturs, bet saglabājas nepieciešamība iegūt 5.1. mērķa funkcijas optimālo versiju. Mērķa funkciju nosaka tajā izmantoto mērījumu un no tiem atvasināto parametru grupa Y un/vai šiem parametriem lietotie svāra koeficienti K_{wi} . Pirmsavārijas režīma parametru identifikācijas posmam iespējamais parametru grupas izmērs ir ierobežots, jo šim režīmam pārvades tīklos jābūt praktiski simetriskam [131], [132]. Savukārt avārijas režīmi visbiežāk rodas nesimetrisku bojājumu dēļ [54], [133], [134], un parametru grupa var Y ietvert apakšstacijas kopņu spriegumu, zaru strāvu un jaudu un/vai to simetrisko sastāvdaļu reālās, imaginārās daļas un modulūsus, leņķus u. c. parametrus, kas var radīt pārmērīgi lielu Y grupu. Attiecīgi, šajā darbā pastiprināta uzmanība pievērsta tieši otrā posma mērķa funkcijas optimālās versijas sintēzei. Sākotnējais sintēzes mēģinājums ar ātrēju ĢA ciklu, kas izvēlējās svāra koeficientus K_{wi} , darbojas lēni un dod neviennozīmīgus rezultātus. Šī iemesla dēļ turpinājumā analizē aplūkota parametru grupas atlases stratēģijas un izmantoto parametru skaita ietekme uz mērķa funkciju un K_{wi} pieņemti vienādi ar 100 visiem izmantotajiem parametriem.

6.1. Izmantoto avārijas režīma parametru atlases stratēģijas

Ņemot vērā, ka mērķa funkciju nosaka starpība starp mērījumiem un modelēšanas rezultātiem, iespējams prognozēt, ka vitāli svarīga ir izmantoto parametru jutība izmaiņām bojājuma attālumā α , jo pretējā gadījumā optimizācija var brīvi izvēlēties jebkuru α vērtību. Aplūkojot pieejamo parametru grafikus, iespējams novērot, ka pat parametri ar augstu jutību α izmaiņām vienlaikus ir ļoti atkarīgi no īsslēguma pārejas pretestības R_F (6.1 att.).



6.1. att. Bojātās līnijas PS strāvas moduļa grafiki.

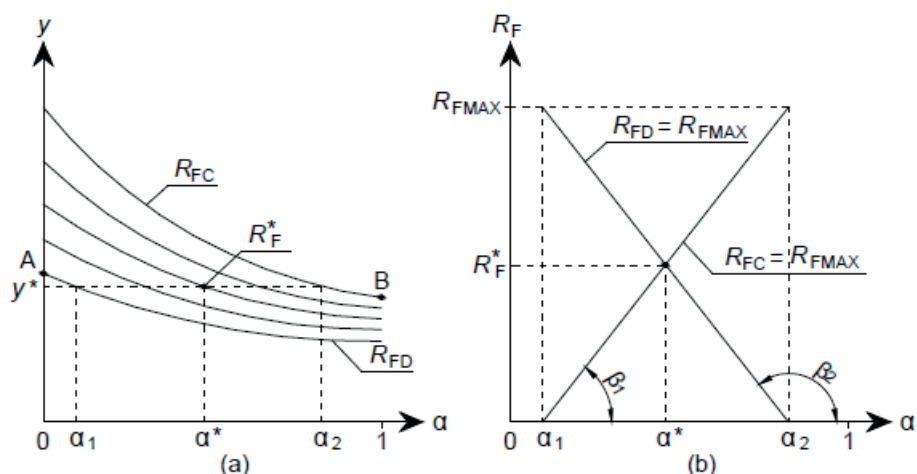
Balstoties uz iepriekšminētajiem apsvērumiem, šajā darbā piedāvātas divas parametru atlasē stratēģijas: piesardzīgā un oportūnistiskā. Atbilstoši oportūnistiskajai stratēģijai parametru atlasē nosaka vienīgi to maksimālā jutība izmaiņām α vērtībās $\max \Delta y_i$, atbilstoši piesardzīgajai atlasē stratēģijai pirms parametru ranžēšanas identiskā stilā notiek pārbaude, vai parametra minimālā jutība α izmaiņām $\min \Delta y_i$ sasniedz noteiktu limitu (šajā darbā 0,01 %) un vai tā izmaiņas raksturs ir monotons, lai padarītu mērķa funkcijas globālo minimumu viennozīmīgāku.

Pieejamo parametru salīdzināšanai veikti režīma aprēķini dažādām α , R_F vērtībām un noteiktas šo parametru skaitliskās izmaiņas $\Delta y_i / \Delta \alpha \approx dy_i / d\alpha$ ar nemainīgu α vērtību soli, kas ļauj vairāk uzmanības pievērst parametra izmaiņai Δy_i . Adekvātai dažādo parametru salīdzināšanai izvēlēti adaptīvi bāzes lielumi: bojātās fāzes strāvu, jaudu un to simetriskajām sastāvdaļām izmantota konkrētā zara bojātās fāzes strāvas, pilnās jaudas moduļu maksimālās vērtības, kas iegūtas, simulējot īsslēgumus ar dažādām α un R_F vērtībām. Sprieguma parametriem iespējams analogiski noteikt maksimālo bojātās fāzes sprieguma moduli vai izmantot nominālo spriegumu, esošā BVN algoritma aprēķinātajam bojājuma attālumam izmantots GVEPL garums. Parametru analīzei veiktas simulācijas ar α soli 5 % apmērā no GVEPL garuma un īsslēguma pārejas pretestībām 0,001 Ω , 1 Ω , 5 Ω , 25 Ω , 50 Ω , 100 Ω , 200 Ω . Parametru atlasē izvērtēti šādi parametri:

- bojātās fāzes kopņu sprieguma un tā simetrisko sastāvdaļu moduli, reālās un imaginārās daļas;
- visu apakšstacijai pieslēgto tīkla zaru bojātās fāzes strāvu, pilno jaudu un to simetrisko sastāvdaļu moduli, reālās un imaginārās daļas;
- ar esošu vienpusējo BVN algoritmu [122] noteiktais bojājuma attālums.

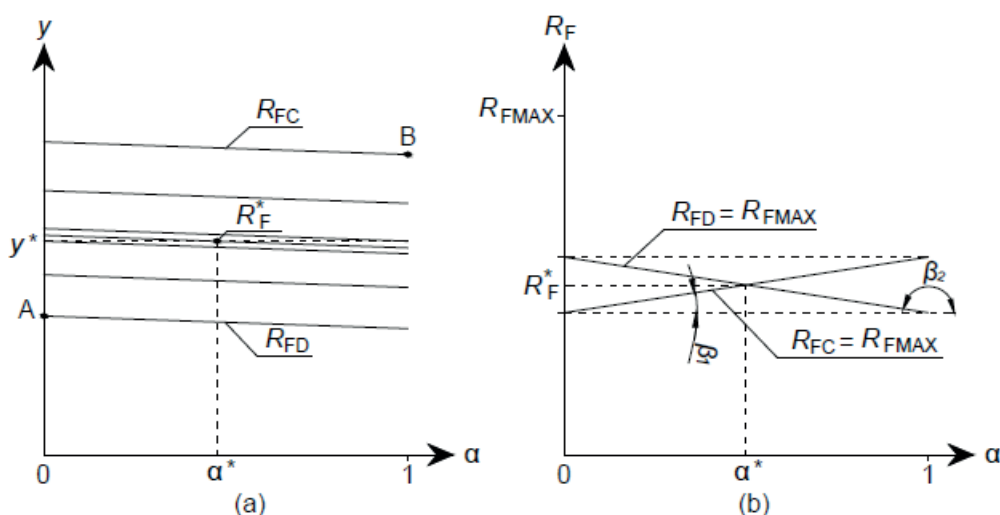
6.2. Mērķa funkcijas analīzes izmantošana potenciālas parametru atlasē stratēģijas izvirzīšanai

Promocijas darba 7.2. apakšnodaļā aprakstītā mērķa funkcijas virsmu analīze parāda, ka mērķa funkcijai iespējami lokālie minimumi, kas atrodas patiesā bojājuma attāluma α^* vai patiesās īsslēguma pārejas pretestības R_F^* apkaimē, vai ir citādi izvietoti (α , R_F) plaknē. Pēdējo divu lokālo minimumu izvietojumu gadījumā iespējamās ievērojamas BVN kļūdas, ja optimizācija nerasniedz globālo minimumu, kas pamudināja sīkāk izpētīt izmantoto parametru ietekmi uz mērķa funkciju. No 5.1. vienādojuma izriet, ka, izmantojot vienu parametru y , jebkuram punktam meklēšanas apgabalā ar vērtību $y = y^* = y(\alpha^*, R_F^*)$ mērķa funkcija $f_{OBJ} = 0$. Attiecīgi, izmantojot vienu parametru, optimizācija garantēti atradīs α^* vienīgi, ja $y \neq f(R_F)$ un funkcijai $y(\alpha)$ ir vienmērīgs raksturs. Pretējā gadījumā $f_{OBJ} = 0$ visos punktos, kuros horizontāla plakne $y(\alpha^*, R_F^*)$ šķēļ parametra vērtību virsmu $y = y(\alpha, R_F)$. Šo punktu veidoto līniju (minimumu “gravu”) orientāciju (α , R_F) plaknē var daļēji novērtēt, izmantojot grafikus, kas ir līdzīgi 6.1. attēlā redzamajiem grafikiem. Daudziem aplūkotajiem parametriem funkcijas $y(\alpha)$ raksturs ir vienmērīgs, un to līkņu secība dažādu R_F vērtību gadījumos arī ir vienmērīga, taču pat šādu parametru minimumu gravu orientācija ievērojami atšķiras. Daļai parametru tās atrodas ierobežotā α vērtību intervālā (6.2. att.).



6.2. att. Vienmērīgi mainīgs parametra y vērtību grafiks (a) un tam atbilstošā minimumu gravas orientācija ar ierobežotu bojājuma attāluma vērtību intervālu (b).

Šāds ierobežojums pastāv visiem punktiem (α, R_F) , ja līknes ar mazākajām y moduļu vērtībām maksimums $y(A)$ pārsniedz līknes ar lielākajām moduļu vērtībām minimuma punktu $y(B)$ (6.2. att.). Savukārt, ja $y(A) < y(B)$, visiem punktiem (α, R_F) ar parametra vērtībām $y(A) < y < y(B)$ minimuma grava atradīsies ierobežotā R_F vērtību intervālā (6.3. att.).



6.3. att. Vienmērīgi mainīgs parametra y vērtību grafiks (a) un tam atbilstošā minimumu gravas orientācija ar ierobežotu īsslēguma pārejas pretestības vērtību intervālu (b).

Pastāv arī parametri, kas ir nevienmērīgi atkarīgi no R_F un kuriem vienlaikus ir vairākas minimumu gravas (funkcijai $y(\alpha)$ ir nevienmērīgs raksturs). Tālākas minimumu gravu un to mijiedarbību analīzes rezultātā definēts parametru grupēšanas paņēmieni potenciālai atlases stratēģijai. Vienu grupu veido parametri ar izteikti šauru vai platu leņķi β (jutība izmaiņām R_F), otru veidotu parametri ar leņķi β maksimālu tuvu 90° (jutība izmaiņām α). Parametru ranžēšanu grupu ietvaros veiktu atbilstoši leņķa β vērtībai, kas ir vistuvāk grupu definējošajiem robežleņķiem. Savukārt galējo parametru grupu Y sastādītu pakāpeniski no šīm apakšgrupām atbilstoši to parametru rangam šajās apakšgrupās.

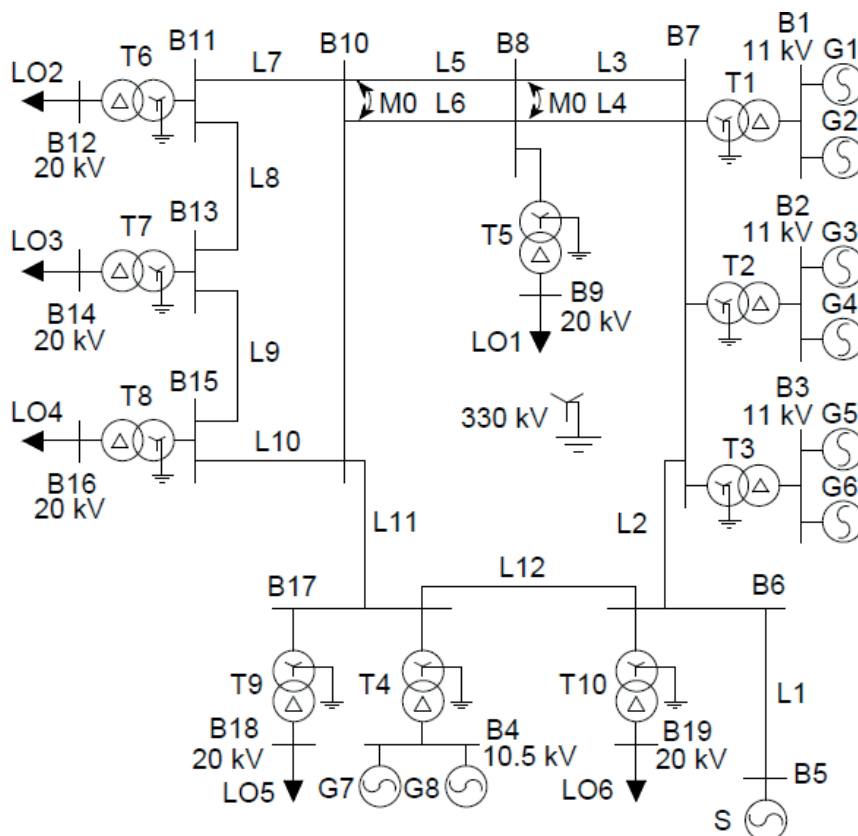
6.3. Secinājumi

1. Viens no iespējamajiem mērķa funkcijai izmantoto parametru atlasēs paņēmieniem ir ranžēšana pēc to jutības izmaiņām bojājuma attālumā, taču tas bieži rada lokālos minimumus mērķa funkcijā, kas palielina bojājuma attāluma aprēķina kļūdu risku.
2. Nomērāmo vai no tiem atvasināto parametru vērtību dažādu bojājuma attālumu un īsslēguma pārejas pretestību gadījumos linearizēto analīzes modeļi var izmantot parametru atlasēs stratēģiju formēšanai, kas dotu iespēju samazināt lokālo minimumu klātbūtni mērķa funkcijā.

7. PIEDĀVĀTĀS METODES UN PARAMETRU ATLASĒS STRATĒGIJU TESTĒŠANA

7.1. Testēšanai izmantotā energosistēma

Parametru analīzei un piedāvātās metodes implementācijas BVN ar ĢA testēšanai izmantotā energosistēma parādīta 7.1. attēlā.



7.1. att. Testēšanai izmantotā energosistēma.

Testēšanai slodžu aktīvo, reaktīvo un ģeneratoru aktīvo jaudu iespējamajām vērtībām pirmsavārijas režīmā noteikts limits 0–120 % no to nominālām vērtībām, ģeneratoru reaktīvās jaudas robežas pieņemtas –120–120 % apmērā no to nominālām vērtībām. Tālāk tekstā aprakstītie testēšanas rezultāti atbilst apakšstacijai, kas parādīta ar kopni B10 (apzīmēta tekstā kā RELEJS1) ar atbilstošiem līniju L5, L6 un L11 F-Z īsslēgumu scenārijiem (apzīmēti tekstā kā ISSL1, ISSL2 un ISSL6). Plašāka informācija par testēšanas energosistēmas elementiem un rezultātiem atrodami promocijas darba pilna teksta versijā.

7.2. Parametru atlasē rezultāti

Balstoties uz pieejamo parametru analīzes rezultātiem, atbilstoši 6.1. apakšnodaļas metodikai atlasītas parametru grupas Y, nepārsniedzot 20 elementus un ranžējot tos grupu ietvaros. RELEJS1 bojājumu scenārijiem iegūtās parametru grupas parādītas 7.1. tabulā (REDI tabulā apzīmē esošā vienpusējā BVN algoritma [122] noteikto bojājuma attālumu).

Izmantoto parametru grupas atbilstoši darbā izvirzītajām parametru atlases stratēģijām

Nr. p. k.	ISSL1		ISSL2		ISSL6	
	Piesardzīgā	Oportūnistiskā	Piesardzīgā	Oportūnistiskā	Piesardzīgā	Oportūnistiskā
1.	$\text{Re}(I_{L6})$	$REDI$	$\text{Re}(I_{L5})$	$REDI$	$ I_{L7}^0 $	$REDI$
2.	$\text{Im}(S_{L6}^1)$	$\text{Im}(I_{L6})$	$\text{Im}(S_{L5}^1)$	$ I_{L5} $	$ I_{L10}^0 $	$ I_{L10} $
3.	$ I_{L7}^0 $	$ I_{L6} $	$ I_{L7}^0 $	$\text{Im}(I_{L5})$	$ I_{L5} $	$ I_{L7} $
4.	$ I_{L10}^0 $	$\text{Re}(I_{L6})$	$ I_{L10}^0 $	$\text{Re}(I_{L5})$	$ I_{L6} $	$\text{Im}(I_{L7})$
5.	$\text{Im}(S_{L6}^2)$	$ I_{L5} $	$\text{Im}(S_{L5}^2)$	$ I_{L6} $	$\text{Re}(I_{L11})$	$ I_{L7}^0 $
6.	$\text{Re}(S_{L6}^1)$	$\text{Im}(I_{L5})$	$\text{Re}(S_{L5}^1)$	$\text{Im}(I_{L6})$	$ I_{L11}^0 $	$ I_{L10}^0 $
7.	$\text{Re}(I_{L5})$	$ I_{L6}^1 $	$\text{Re}(I_{L6})$	$ I_{L5}^1 $	$\text{Re}(I_{L5})$	$\text{Im}(I_{L10})$
8.	$ I_{L11} $	$ I_{L6}^2 $	$ I_{L11} $	$\text{Im}(S_{L5}^1)$	$\text{Re}(I_{L6})$	$\text{Im}(I_{L7}^0)$
9.	$\text{Re}(I_{L6}^1)$	$ I_{L10} $	$\text{Re}(I_{L5}^1)$	$ I_{L5}^2 $	$ I_{L5}^2 $	$\text{Im}(I_{L10}^0)$
10.	$\text{Re}(I_{L6}^2)$	$\text{Im}(I_{L6}^1)$	$\text{Re}(I_{L5}^2)$	$\text{Im}(I_{L5}^1)$	$ I_{L6}^2 $	$ I_{L11} $
11.	$ I_{L5}^0 $	$\text{Im}(I_{L6}^2)$	$ I_{L6}^0 $	$ I_{L7} $	$ I_{L5}^1 $	$\text{Im}(I_{L11})$
12.	$\text{Re}(I_{L10}^0)$	$\text{Im}(S_{L6}^1)$	$\text{Im}(S_{L6}^2)$	$\text{Im}(I_{L5}^2)$	$ I_{L6}^1 $	$ I_{L5} $
13.	$\text{Im}(S_{L5}^2)$	$ I_{L7} $	$\text{Re}(I_{L7}^0)$	$ I_{L10} $	$ I_{L11}^2 $	$ I_{L6} $
14.	$\text{Re}(I_{L6}^0)$	$\text{Im}(I_{L10})$	$ I_{L6}^2 $	$\text{Im}(I_{L7})$	$ I_{L5}^0 $	$\text{Im}(I_{L5})$
15.	$ I_{L5}^2 $	$ I_{L7}^0 $	$\text{Re}(I_{L5}^0)$	$ I_{L7}^0 $	$ I_{L6}^0 $	$\text{Im}(I_{L6})$
16.	$\text{Re}(S_{L5}^1)$	$ I_{L10}^0 $	$\text{Re}(S_{L6}^1)$	$ I_{L10}^0 $	$ U_{B10}^2 $	$\text{Re}(I_{L7})$
17.	$\text{Re}(I_{L11})$	$\text{Im}(I_{L7}^0)$	$\text{Re}(I_{L11})$	$\text{Im}(I_{L10})$	$ U_{B10}^0 $	$\text{Re}(U_{B10})$
18.	$\text{Re}(I_{L5}^0)$	$\text{Im}(I_{L7})$	$\text{Re}(I_{L6}^0)$	$\text{Im}(I_{L7}^0)$	$\text{Re}(I_{L5}^1)$	$ U_{B10} $
19.	$\text{Re}(I_{L5}^2)$	$\text{Im}(I_{L10}^0)$	$\text{Re}(I_{L6}^2)$	$\text{Im}(I_{L10}^0)$	$\text{Re}(I_{L6}^1)$	$\text{Re}(I_{L10})$
20.	$\text{Re}(I_{L5}^1)$	$\text{Im}(S_{L6}^2)$	$\text{Re}(I_{L6}^1)$	$\text{Im}(S_{L5}^2)$	$\text{Re}(I_{L5}^2)$	$\text{Re}(I_{L10}^0)$

7.1. tabulā redzami saraksti parāda arī atlasīto parametru grupu daļējo pārklāšanos starp abām atlases stratēģijām, kas skaidrojams ar to, ka parametru ranžēšanu abām stratēģijām veic atbilstoši šo parametru maksimālajai jutībai uz izmaiņām bojājuma attālumā, savukārt piesardzīgā stratēģija pirms tam pārbauda papildu nosacījumus. Pirms piedāvātās metodes testēšanas rezultātu analīzes jāpiemin, ka darbā veikta arī mērķa funkcijas virsmu analīze, kas abām atlases stratēģijām dažos scenārijos uzrādīja lokālo minimumu klātbūtni mērķa funkcijā. Šis novērojums apliecina nepieciešamību pēc optimizācijas, kas spējīga izvairīties no lokālajiem minimumiem. Minētā analīze parāda arī mērķa funkcijas virsmu kropļojumu pieaugumu, samazinot izmantoto parametru skaitu, kas norāda uz parametru spēju izlīdzināt virsmu kropļojumus, ko radījusi citu parametru iekļaušana izmantoto parametru grupā.

7.3. Piedāvātās metodes testēšanas rezultāti

Piedāvātā metode ar ĢA optimizācijas realizācijai un iepriekš aprakstītajām parametru atlases stratēģijām testēta ar plašu scenāriju kopu, kurā katram līnijas bojājuma scenārijam abām stratēģijām aplūkoti apakšscenāriji ar mērķa funkcijai pieejamo parametru skaita samazināšanos (20, 15, 10 un 5 parametri). Katrs no šiem apakšscenārijiem ietver 1000 testus ar nejauši izvēlētiem pirmsavārijas režīma jaudām un bojājuma attāluma, īsslēguma pārejas pretestības vērtībām. Ņemot vērā, ka iepriekš darbā papildu uzmanība pievērsta avārijas režīma parametru atlasei, arī testēšanā pieņemts, ka pirmsavārijas režīms jau ir zināms vai

precīzi identificēts. Maksimālās, vidējās α un R_F noteikšanas kļūdas ϵ , vidējais konverģencei nepieciešamo paaudžu skaits N_{GEN} un α noteikšanas kļūdu 95 % gadījumu augšējās robežas $\epsilon_{\alpha B}$ vērtības parādītas 7.2. tabulā.

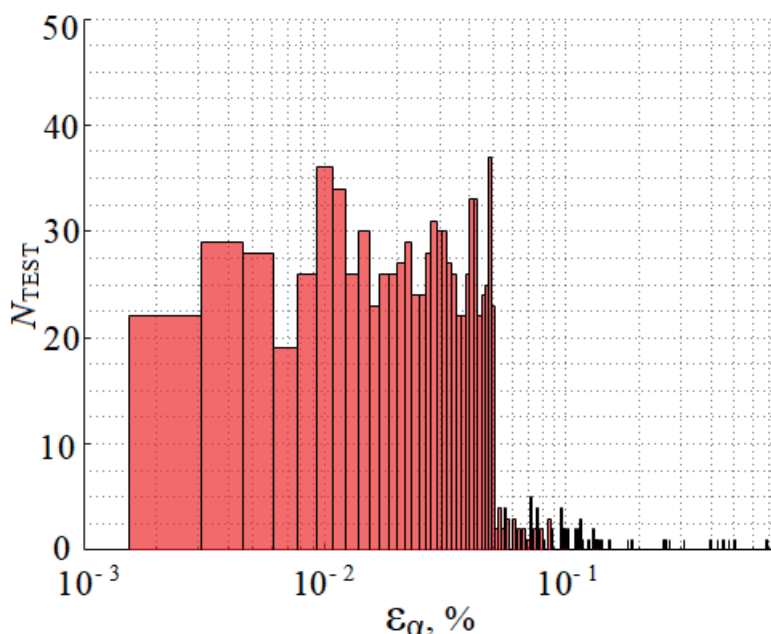
7.2. tabula

Piedāvātās metodes testēšanas rezultāti RELEJS1 scenārijiem

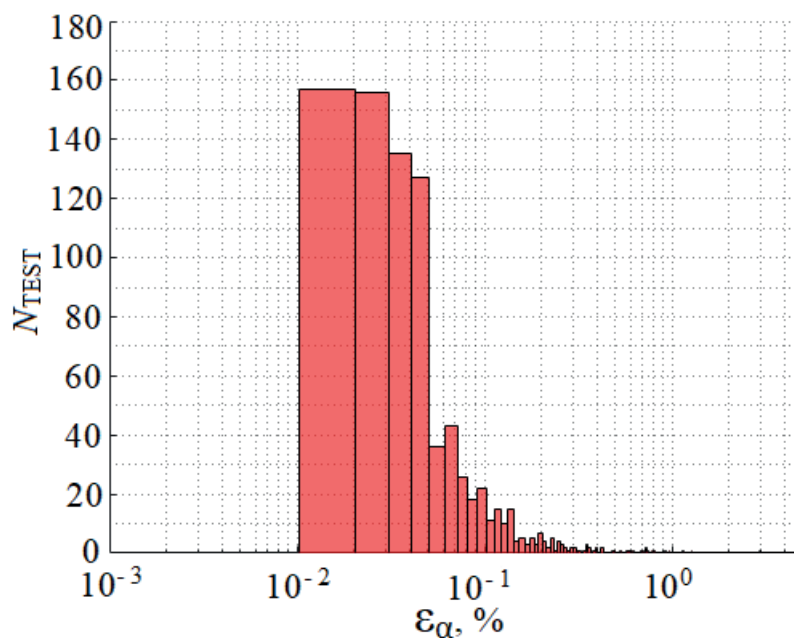
	STRATĒGIJA	N_{PAR}	$\max \epsilon_{\alpha}$, %	vid ϵ_{α} , %	$\epsilon_{\alpha B}$, %	$\max \epsilon_{RF}$, %	vid ϵ_{RF} , %	vid N_{GEN}
ISSL1	Oportūnistiskā	20	0,787	0,037	0,093	1,722	0,041	1125,9
		15	1,457	0,039	0,102	1,540	0,038	1183,1
		10	0,303	0,035	0,094	2,184	0,044	1252,9
		5	0,768	0,035	0,079	2,168	0,064	1285,5
	Piesardzīgā	20	0,881	0,036	0,084	4,024	0,058	930,4
		15	1,031	0,034	0,091	40,901	0,133	1280,2
		10	0,772	0,039	0,114	4,888	0,097	989,8
		5	0,848	0,041	0,130	25,885	0,142	1098
ISSL2	Oportūnistiskā	20	1,719	0,036	0,086	1,133	0,032	1161,1
		15	1,735	0,038	0,090	4,290	0,041	1072,9
		10	0,849	0,036	0,096	1,349	0,042	1013,5
		5	2,029	0,036	0,090	1,758	0,067	974,5
	Piesardzīgā	20	0,893	0,033	0,078	49,60	0,149	1078,3
		15	2,220	0,039	0,092	46,178	0,133	1049,6
		10	3,379	0,043	0,101	6,518	0,093	1222,3
		5	1,371	0,041	0,100	33,293	0,129	1446,2
ISSL6	Oportūnistiskā	20	2,685	0,085	0,363	0,455	0,030	2764,7
		15	3,641	0,075	0,231	0,764	0,028	2114,1
		10	3,595	0,078	0,262	1,218	0,035	3011,8
		5	5,118	0,076	0,235	1,372	0,049	2863,1
	Piesardzīgā	20	2,613	0,082	0,309	0,721	0,031	2838,7
		15	3,135	0,094	0,329	0,909	0,035	2436,1
		10	4,024	0,123	0,447	1,204	0,045	4382,9
		5	6,134	0,120	0,424	1,517	0,044	4934,2

7.2. tabulā redzamo un pārējo testēšanas scenāriju rezultātu analīze parāda, ka noteikto α vērtību kļūdas bija augstākas īsslēgumiem vienķēdes līnijās nekā divķēžu līnijās (7.2. un 7.3. att.), kā arī īsslēgumiem ģeneratoru virzienā, salīdzinot ar īsslēgumiem slodžu virzienā. Līdzīgs rezultāts iegūstams, salīdzinot N_{GEN} , savukārt R_F vērtību noteikšanas precizitāti šīs atšķirības neietekmēja. Vienķēdes līniju īsslēgumu gadījumā oportūnistiskās stratēģijas α vērtību noteikšanas precizitāte bija augstāka, divķēžu līniju īsslēgumu gadījumos piesardzīgās metodes precizitāte bija vienlīdz augsta vai augstāka. R_F vērtību noteikšanas precizitāte bija augstāka oportūnistiskajai stratēģijai, nepieciešamo paaudžu skaits abām stratēģijām vairākumā gadījumu bija līdzīgs. ISSL6 scenāriji bija īpaši sarežģīti piedāvātajai metodei, kuros α noteikšanas kļūda atsevišķos testos pārsniedza 5 %, šis rezultāts galvenokārt parādīja, ka minimālais izmantoto parametru skaits piedāvātajai metodei ir starp 5 un 10. Augšējā robeža 95 % no kļūdu vērtībām parādīja, ka ĢA implementācijai vairākumā no vienķēžu

līniju īsslēgumiem tā nepārsniegs 0,45 %, divķēžu līnijām – 0,12 %. Salīdzinājumam: implementācijai ar modificēto nejaušās meklēšanas paņēmieni lielākā daļa α noteikšanas kļūdu bija robežās 0,1–1,5 %. Identiskā stilā testēts arī esošs vienkusējais BVN algoritms un divpusējais BVN algoritms, kas izmanto PS spriegumus un strāvas [122]. Testēšanas rezultāti apkopoti 7.3. tabulā.



7.2. att. Bojājuma attāluma noteikšanas kļūdu moduļu histogramma ISSL1 scenārijam, izmantojot oportūnistisko stratēģiju ar pieciem parametriem.



7.3. att. Bojājuma attāluma noteikšanas kļūdu moduļu histogramma ISSL6 scenārijam, izmantojot oportūnistisko stratēģiju ar pieciem parametriem.

Esošo bojājuma vietas noteikšanas algoritmu testēšanas rezultāti

	Īsslēgums	max ε_a , %	vid ε_a , %	ε_{aB} , %
Vienpusējs bojājuma vietas noteikšanas algoritms	ISSL1	169,977	16,679	59,939
	ISSL2	157,670	17,754	63,871
	ISSL6	939,143	47,575	208,96
Divpusējs bojājuma vietas noteikšanas algoritms	ISSL1	0,216	0,105	0,198
	ISSL2	0,214	0,107	0,199
	ISSL6	0,219	0,107	0,200

Salīdzinājums starp 7.2., 7.3. tabulās un darba pilnajā versijā dotajiem piedāvātās metodes un esošo BVN algoritmu testēšanas rezultātiem parāda, ka vienpusējā BVN algoritma maksimālās kļūdas vērtība mēdza pietuvināties piedāvātās metodes rezultātam pāris scenārijos, citādi tā bija neprecīzāka. Esošais divpusējais BVN algoritms strādā precīzāk, ja salīdzina maksimālās kļūdu vērtības. Salīdzinot kļūdu vidējās vērtības un to robežu 95 % gadījumu, piedāvātā metode bija precīzāka īsslēgumiem divķēžu līnijās. Tas nozīmē, ka, izskatot lielu skaitu scenāriju, piedāvātā metode bieži iegūs lielāku koncentrāciju ar ļoti precīziem rezultātiem.

7.4. Secinājumi

1. Atjauninātā parametru identifikācijas metode ar ĢA optimizācijas realizēšanai deva precīzākus rezultātus nekā esošais vienpusējais BVN algoritms.
2. Minētās piedāvātās metodes versijas rezultātu maksimālā kļūda bija augstāka nekā esošam divpusējam BVN algoritmam, kas izmanto PS vērtības, bet, salīdzinot vidējās kļūdu vērtības un augšējo robežu 95 % kļūdu vērtībām, var redzēt, ka piedāvātā metode bieži pārspēj esošo divpusējo BVN algoritmu.

8. MODEĻA PARAMETRU IDENTIFIKĀCIJAS UN TOPOĻOGISKĀS MODELĒŠANAS METODES LIETOŠANA ADAPTĪVĀS VIENFĀZES AUTOMĀTISKĀS ATKALIESLĒGŠANAS FUNKCIJAS IZSTRĀDEI

Piedāvātās metodes lietojums AVAAI izmanto topoloģisko modelēšanas metodi gan simetrisko sastāvdaļu koordinātās, nosakot GVEPL veselo fāžu režīmu bezstrāvas pauzes laikā, gan fizisko fāžu koordinātās, lai detalizētāk modelētu veselo fāžu un atslēgtās bojātās fāzes mijiedarbību. Darbā sniegtās BVN implementācijas noteikto bojājuma attālumu izmanto detalizētajā GVEPL modelī, nosakot adaptīvo AVAAI iestatījumu.

8.1. Augstsprieguma pārvades līnijas modelēšana fāžu koordinātēs

Iespējamo AVAAI nostrādes kritēriju izvēlei darbā izstrādāts detalizēts GVEPL stacionārā bezstrāvas pauzes režīma modelis fāžu koordinātēs, kas ietver fāzes vada pretestību Z_w , zibensaizsardzības troses vada pretestību Z_{GW} , visas starpfāžu un fāze-trose mijindukcijas Z_{MAB} , Z_{MBC} , Z_{MCA} , Z_{MAGW} , Z_{MBGW} , Z_{MCGW} , starpfāžu un F-Z kapacitātes C_{AB} , C_{BC} , C_{CA} , C_{AG} , C_{BG} , C_{CG} un fāze-trose kapacitātes C_{AGW} , C_{BGW} , C_{CGW} . Šis modelis un minēto parametru aprēķins parādīts darba pilnajā tekstā [135]–[137]. Modeļa abos galos pieslēgti EDS, kas noteikti kā F-Z spriegumi no visa tīkla divu vienlaicīgu vienfāzes pārrāvumu režīma aprēķina atbilstoši 3.3 apakšnodaļas metodikai.

8.2. Adaptīvās vienfāzes automātiskās atkalieslēgšanas izstrādē izmantotais dinamiskais elektriskā loka modelis

Bezstrāvas pauzes laikā izmantotais sekundārā loka modelis realizēts ar linearizētu posmu loka voltampēru ciklogrammu (loka īpatnējā sprieguma atkarība no tā strāvas) un laikā mainīgu loka atkalaizdedzes spriegumu [135]:

$$U_{re} = (5 + 50T_e)(t - T_e)h(t - T_e), \quad (8.1.)$$

kur U_{re} – sekundārā loka atkalaizdedzes spriegums, kV/cm;

T_e – laiks no sekundārā loka sākuma līdz kārtējai tā izdzišanai, s;

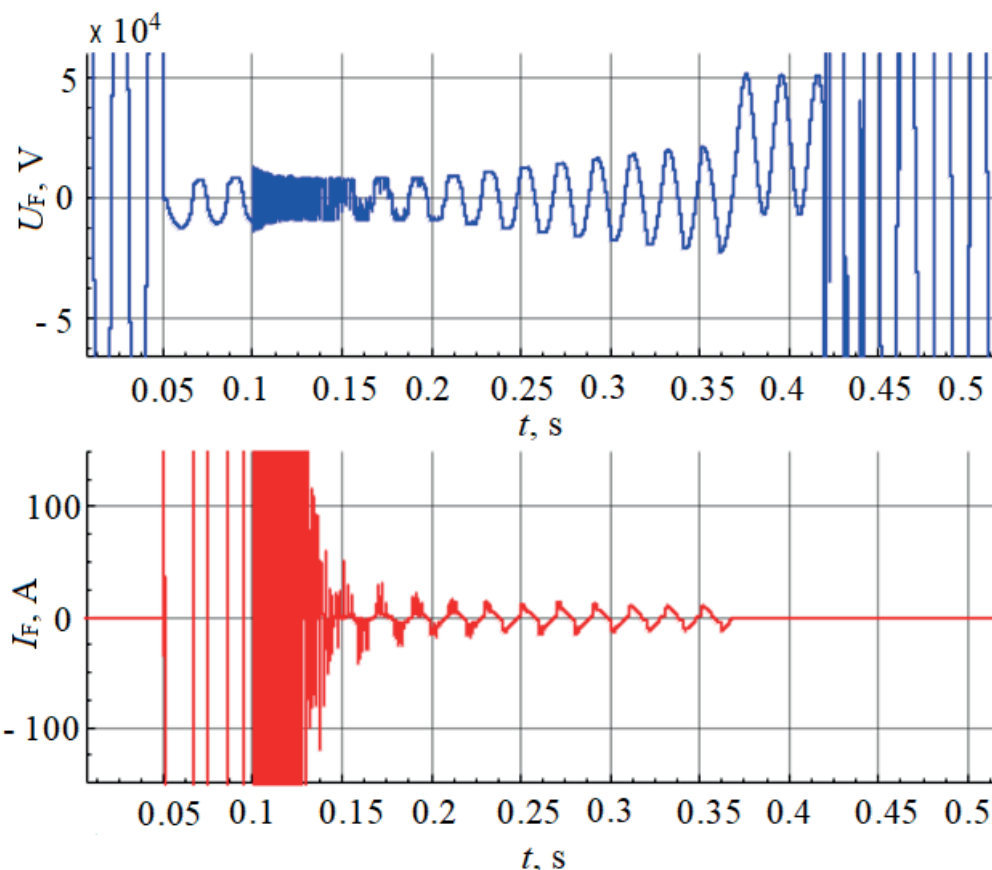
t – laiks kopš simulācijas sākuma, s;

$h(t - T_e)$ – soļa funkcija ar laika kavējumu ($0, t < T_e$; $1, t > T_e$).

Viens no galvenajiem sekundārā loka izdzišanas iemesliem ir tā izstiepšanās, kas šajā promocijas darbā pieņemta vienmērīga [138]. Izmantotais sākotnējā loka garumus ir par 10 % lielāks nekā fāzes izolatora garums.

Īsslēguma laikā esošais primārais loks modelēts līdzīgi sekundārajam, loka garums pieņemts nemainīgs, loka izdzišanu neizskata un izmantota cita linearizētu posmu loka voltampēru ciklogramma [139]. Abi loka modeļi izveidoti *MATLAB SimPowerSystems* simulāciju vidē un iekļauti shēmā, kurā divu sistēmu S1 un S2 Tevenena ekvivalentus savieno divi līniju II-veida aizvietošanas shēmu bloki (līnijas posmi pirms un pēc īsslēguma). Loka

atkalaizdedze priekšlaicīgas AAI komandas gadījumā ievērota, pārslēdzoties no sekundārā loka bloka atpakaļ uz primāro. Loka momentānā sprieguma un strāvas vērtību grafiki veiksmīgas VAAI laikā redzami 8.1. attēlā (primārais loks redzams 50–100 ms, sekundārais loks – 100 ms pēc simulācijas sākuma).



8.1. att. Elektriskā loka spriegums un strāva īsslēguma vietā veiksmīgas VAAI laikā [135].

Grafikos novērojami gan sagaidāmie augstāko harmoniku kropļojumi, gan sprieguma brīvās komponentes parādīšanās pēc loka izdzišanas aptuveni 0,369 s pēc simulācijas sākuma.

8.3. Piedāvātā adaptīvā vienfāzes automātiskās atkalieslēgšanas metode

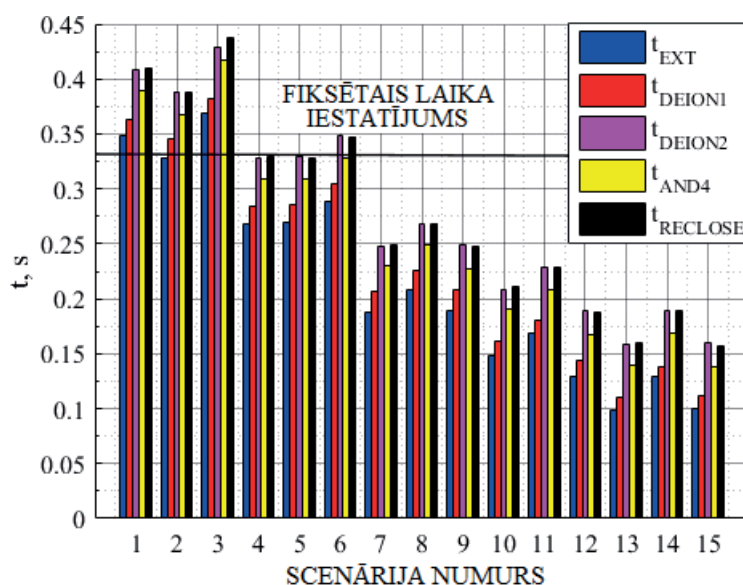
Stacionāro un pārejas režīmu simulāciju rezultātā iegūtā bojātās fāzes līnijas puses sprieguma U_F , tā reālās, imaginārās daļas un šo parametru skaitlisko izmaiņu analīze deva iespēju definēt šādus AVAAI palaišanas nosacījumus: U_F reālās daļas modulis pārsniedz iestatījumu $|\text{Re}(U_F)| \geq S_{\text{Re}2}$, U_F reālās un imaginārās daļas skaitlisko izmaiņu moduļi ir mazāki par iestatījumiem $|\Delta \text{Re}(U_F)/\Delta t| \leq S_{\text{Re}}$, $|\Delta \text{Im}(U_F)/\Delta t| \leq S_{\text{Im}}$ un U_F modulis ir mazāks par iestatījumu $|U_F| \leq S_{\text{ABS}}$. Šie nosacījumi papildināti ar starta signālu, kas liecina par jaudas slēdžu atslēgšanos, un papildu laika aiztures bloku. Tas vispirms prasa 5–10 ms ilgu minēto nosacījumu nepārtrauktu izpildi, lai minimizētu risku nostrādāt īslaicīgas loka izdzišanas gadījumā, un tad ietur 20 ms laika kavējumu, pirms dot VAAI nostrādes komandu, kas nepieciešams pilnīgai izolācijas izturības atjaunošanai pēc loka izdzišanas fiksēšanas. Noteiktais bojājuma attālums un divu vienlaicīgu fāzes pārrāvumu režīma aprēķinu rezultātus

izmanto kā detalizētā līnijas modeļa ieejas datus, šo modeli izmanto iestatījumu S_{ABS} , S_{Re2} noteikšanai (S_{Re} , S_{Im} izvēlās virs pirmsavārijas režīma mērījumu trokšņu līmeņa).

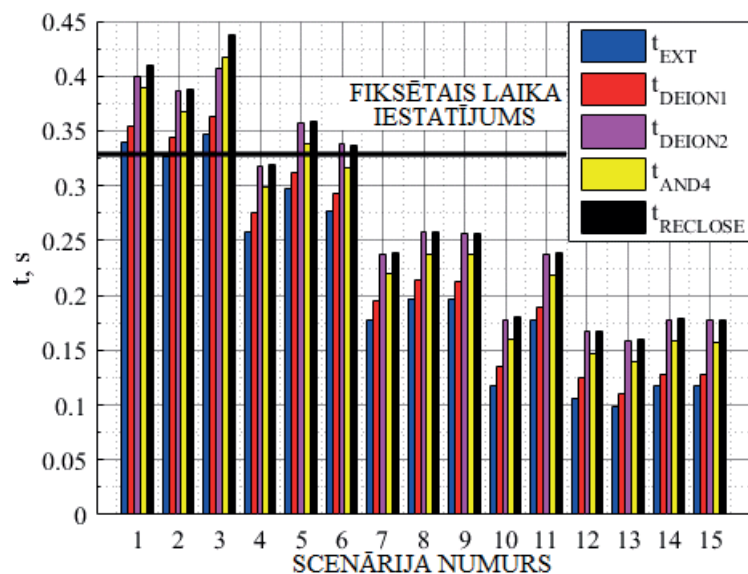
8.4. Piedāvātās adaptīvās vienfāzes automātiskās atkalieslēgšanas metodes testēšana

Piedāvātās AVAAI metodes testēšanai izmantots 330 kV GVEPL modelis, kas savieno divas 330 kV sistēmas S1 and S2 ar īsslēguma jaudām 2 GVA un 1 GVA apmērā ar X/R attiecībām 8 un 6. Vispirms piedāvātās metodes darbība testēta dažādos scenārijos ar pārejoša rakstura īsslēgumiem. Scenārijiem atbilstošie faktiskie loka izdzišanas laiki t_{EXT} , pilnas loka kanāla dejonizācijas laiki atbilstoši 8.1. vienādojumam – t_{DEION1} –, statistiski nepieciešamie pilnas dejonizācijas laiki – t_{DEION2} –, laiki līdz loģikas bloka AND4 nostrādei ar 5 ms laika aizturi (AVAAI nostrāde garantēta pēc 20 ms) – t_{AND4} – un piedāvātās metodes VAAI nostrādes laiki – $t_{RECLOSE}$ – gan pozitīvai, gan negatīvai jaudu plūsmai veselajās fāzēs redzami 8.2. un 8.3. attēlā (parādītie laiki uzņemti no sekundārā loka sākuma). Grafikos redzamais fiksētais nostrādes laika iestatījums noteikts, izmantojot [140] dotu empīrisku dejonizācijas laika formulu.

Testēšanas rezultāti parādīja, ka loka izstiepšanās procesa aizkavēšanās gadījumā fiksētais VAAI iestatījums var būt nepietiekams, taču praksē šo starpību nosegtu papildu laika kavējumi pirms patiesās slēdžu ieslēgšanas. Savukārt straujas loka izstiepšanās gadījumos sagaidāma ievērojama starpība starp nostrādes un pilnas dejonizācijas laiku, kas nav novērojams piedāvātajai AVAAI metodei. Vienlaikus testēšanas rezultāti parāda, ka piedāvātās metodes nostrādes laiks pārsniedz gan teorētiski, gan statistiski nepieciešamo pilnas dejonizācijas laiku (t_{DEION1} , t_{DEION2}). Veikti arī testi stabila rakstura īsslēgumu gadījumos ar salīdzinoši augstu pārejas pretestību (5 kΩ), kuros piedāvātā metode bloķēja VAAI nostrādi.



8.2. att. Piedāvātās AVAAI testēšanas rezultāti pozitīvas jaudu plūsmas gadījumā [135].



8.3. att. Piedāvātās AVAAI testēšanas rezultāti negatīvas jaudu plūsmas gadījumā [135].

8.5. Secinājumi

1. Piedāvāto parametru identifikācijas metodi iespējams lietot dažādu energosistēmas automātikas funkciju radīšanai.
2. Piedāvātais AVAAI algoritms veiksmīgi izmanto ar topoloģisko metodi noteiktā detalizētā trīsfažu līnijas modeļa stacionārā režīma parametrus, lai aprēķinātu adaptīvos iestatījumus, un darbā piedāvātās BVN metodes abu posmu rezultātus kā detalizētā modeļa ieejas datus.
3. Dinamiskā primārā un sekundārā loka modeļu lietošana deva iespēju pārliecināties, ka pieļaujams izmantot bojātās fāzes līnijas puses spriegumu, tā reālo un imagināro daļu un šo abu daļu skaitliskās izmaiņas loka izdzišanas fiksēšanai.
4. Piedāvātā AVAAI algoritma testēšana parādīja tā adaptīvo darbību pārejošu īsslēgumu scenārijos un darbības bloķēšanu stabilu īsslēgumu gadījumos.

SECINĀJUMI

1. Promocijas darba hipotēze ir apstiprinājusies: viensusējas BVN un DA metodes darbojas neprecīzi, ja īsslēgumam ir liela pārejas pretestība, un šīs metodes var aizstāt ar modeļa parametru identifikācijas paņēmienu, kas risina definētos uzdevumus kā optimizācijas uzdevumus, vienlaikus panākot neatkarību no tālsakaru tīkliem.
2. Abpusējas BVN metodes ir ātras un precīzas, taču to darbību var izjaukt sakaru vai mērījumu datu sinhronizācijas zaudēšana.
3. Vairums pētījumu par DA pievēršas tās implementācijai dažādās elektromehāniskās, elektroniskās un vēlāk digitālās ierīcēs.
4. Režīmus ar vairākām nesimetrijām iespējams modelēt ar vienas kompleksās aizvietošanas shēmas palīdzību, kurā viena asimetrija ievērota ar elektriskajiem savienojumiem, pārējās – ar papildu EDS avotiem, vai pārmaiņus veicot režīma aprēķina soļus vairākām šāda veida kompleksajā aizvietošanas shēmām, kur atšķirīgas nesimetrijas ievērotas ar elektriskajiem savienojumiem.
5. Īsslēguma pārejas pretestība negatīvi ietekmē esošā digitālā DA termināla darbību gan pie F-Z, gan starpfāžu īsslēgumiem, no kuriem īpaši izteiktus laika kavējumus var radīt kritušo koku radīti F-Z īsslēgumi.
6. Modeļa parametru identifikācijas iedalīšana divos posmos samazina nezināmo parametru skaitu, kas jānosaka pēc bojājuma rašanās un padara otro identifikācijas posmu iespējamāku.
7. Atšķirībā no piedāvātās metodes esošās viensusējas BVN metodes precizitāte ir stipri atkarīga no jaudas plūsmas pirmsavārijas režīmā.
8. Salīdzinot ar testēto esošo DA un viensusējo BVN metodi, piedāvātās metodes realizācija ar modificēto nejaušo meklēšanu deva precīzākus rezultātus, taču tās darbība prasīja salīdzinoši daudz laika, kas pamudināja meklēt veiktspējas uzlabošanas ceļus, optimizējot mērķa funkciju un meklējot efektīvāku optimizācijas metodi.
9. Viens no iespējamajiem mērķa funkcijai izmantoto parametru atlases un paņēmieniem ir ranžēšana pēc to jutības izmaiņām bojājuma attālumā, taču tas bieži rada lokālos minimumus mērķa funkcijā, kas palielina bojājuma attāluma aprēķina kļūdu risku.
10. Atjauninātā parametru identifikācijas metode ar ĢA optimizācijas realizēšanai dod precīzākus rezultātus nekā esošais viensusējais BVN algoritms.
11. Piedāvātās metodes versijas rezultātu maksimālā kļūda bija augstāka nekā esošam divpusējam BVN algoritmam, kas izmanto PS vērtības, taču, salīdzinot vidējās kļūdu vērtības un augšējo robežu 95 % kļūdu vērtībām, var redzēt, ka piedāvātā metode bieži pārspēj esošo divpusējo BVN algoritmu.
12. Piedāvāto parametru identifikācijas metodi iespējams izmantot dažādu energosistēmas automātikas funkciju radīšanai.
13. Piedāvātā AVAAI algoritma testēšana parādīja tā adaptīvo darbību pārejošu īsslēgumu scenārijos un darbības bloķēšanu stabili īsslēgumu gadījumos.

KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

1. A. Bratlov, I. Puusaar, M. Piironen, R. Stefansson, A. Maklakovs, V. Tarvydas and others (2019, Feb. 6). *ENTSOE Nordic and Baltic grid disturbance statistics 2017*. ENTSO-E Regional group Nordic. Available from: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/hvac_2017_final_kotisivuille.pdf [Wieved: 6.09.2019 11:30].
2. V. Čuvičins un J. Priedīte. *Vadības sistēmas enerģētikā*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2004, 229 lpp. ISBN:9984-32-441-9.
3. Я. Д. Баркан и Л. А. Орехов. *Автоматизация энергосистем: Учебное пособие для студентов вузов*. Москва: Высшая школа, 1981, 271 с.
4. А. Б. Барзам. *Систмная автоматика*. 4-е изд. Москва: Энергоатомиздат, 1989, 446 с. ISBN: 5-283-01024-4.
5. А. М. Федосеев и М. А. Федосеев. *Релейная защита электроэнергетических систем*. 2-е изд. Москва: Энергоатомиздат, 1992, 528 с. ISBN: 5-283-01171-2.
6. Н. И. Овчаренко. *Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем: Учебник для вузов*. Москва: Издательство НЦ ЭНАС, 2000, 504 с. ISBN: 5-93196-020-1.
7. M. Bockarjova, A. Sauhats, and G. Andersson. Statistical algorithms for fault location on power transmission lines. In: *Proceedings 2005 IEEE Russia Power Tech conference*, St. Petersburg, Russia, 27–30 June 2005. Piscataway: IEEE, 2008, pp. 1–7, ISBN: 978-5-93208-034-4. Available from: DOI: 10.1109/PTC.2005.4524558.
8. M. Bockarjova, A. Dolgicers, and A. Sauhats. Enhancing fault location performance on power transmission lines. In: *Proceedings 2007 IEEE Lausanne Power Tech conference*, Lausanne, Switzerland, 1–5 July 2007. Piscataway: IEEE, 2008, pp. 1123–1128, ISBN: 978-1-4244-2189-3. Available from: DOI: 10.1109/PCT.2007.4538473.
9. A. Sauhats, A. Joņins un M. Bočkarjova. *Augstsprieguma līniju bojājuma vietas noteikšanas algoritmu sintēze*. Rīga: RTU EEF Enerģētikas institūts, 85 lpp. Pieejams: https://www.rtu.lv/writable/public_files/RTU_001.pdf.
10. J. Izykowski. *Fault location on power transmission lines*. Wroclaw: Printing House of Wroclaw University of Technology, 2008, p. 221. ISBN: 978-83-7493-430-5.
11. В. Л. Фабрикант. *Дистанционная защита*. Москва: Высшая школа, 1978, 215 с.
12. Э. М. Шнеерсон. *Цифровая релейная защита*. Москва: Энергоатомиздат, 2007, 549 с. ISBN: 978-5-283-03256-6.
13. G. Ziegler. *Numerical Distance Protection Principles and Applications*. 4th ed., Erlagen: Publicis, 2011, p.419. ISBN: 978-3-89578-381-4.
14. М. А. Беркович, В. А. Гладышев и В. А. Семенов. *Автоматика энергосистем*. Москва: Энергоатомиздат, 1991, 240 с. ISBN: 5-283-01004-X.
15. M. T. Sant and Y. G. Paithankar. Online digital fault locator for overhead transmission line. *Proceedings of the institution of Electrical Engineers*, vol. 126, No. 11, Nov. 1979, pp. 1181–1185. ISSN: 0020-3270. Available from: DOI: 10.1049/piee.1979.0201.
16. T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow, and T. Matsushima. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, No. 8, Aug. 1982, pp. 2892–2898. ISSN: 0018-9510. Available from: DOI: 10.1109/TPAS.1982.317615.

17. L. C. Nicholson. Location of broken insulators and other transmission line troubles. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XXVI, No. 2, Jun. 1907, pp. 1319–1329. ISSN: 0096-3860. Available from: DOI: 10.1109/T-AIEE.1907.4764857.
18. AIEE Committee Report. Bibliography and summary of fault location methods. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. Part III: Power Apparatus and Systems, vol. 74, No. 3, Jan. 1955, pp. 1423–1428. ISSN: 0097-2460. Available from: DOI: 10.1109/AIEEPAS.1955.4499247.
19. T. W. Stringfield, D. J. Marihart, and R. F. Stevens. Fault location methods for Overhead lines. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. Part III: Power Apparatus and Systems, vol. 76, No. 4, Apr. 1957, pp. 518–529. ISSN: 0097-2460. Available from: DOI: 10.1109/AIEEPAS.1957.4499601.
20. F. J. Muench and G. A. Wright. Fault indicators: Types, strengths & applications. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, No. 12, Dec. 1984, pp. 3688–3693. ISSN: 0018-9510. Available from: DOI: 10.1109/TPAS.1984.318422.
21. K. Urasawa, K. Kanemaru, S. Toyota, and K. Sugiyama. New fault location system for power transmission lines using composite fiber-optic overhead ground wire (OPGW). *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, No. 4, Oct. 1989, pp. 2005–2011. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/61.35624.
22. S. Jamali, A. Bahmanyar, and H. Borhani-Bahabadi. A fast and accurate fault location method for distribution networks with DG using genetic algorithms. In: *Proceedings 2015 Smart Grid Conference*, Teheran, Iran, 22–23 December 2015. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 110–114, ISBN: 978-1-5090-0370-9. Available from: DOI: 10.1109/SGC.2015.7857419.
23. H. O. Cruz and F. B. Leão. Optimal placement of fault indicators using adaptive genetic algorithm. In: *Proceedings 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Chicago, USA, 16–20 July 2017. Piscataway: IEEE, 2018, pp. 1–5, ISBN: 978-1-5386-2213-1. Available from: DOI: 10.1109/PESGM.2017.8273897.
24. Megger. *Fault finding solutions*, version MEG-231/mil/3m/11.2003, p. 44. Available from: http://www.unitronics-electric.com/pdf/articulos/FaultFindingBook_AG_en_V03.pdf [viewed 10.07.2019].
25. P. F. Gale, P. A. Crossley, X. Bingyin, G. Yaozhong, B. J. Cory, and J. R. G. Barker. Fault location based on travelling waves. In: *Proceedings 1993 Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*, York, UK, 30 March to 2 April 1993. Piscataway: IEEE, 2002, pp. 54–59, ISBN: 0-85296-559-1.
26. F. F. Roberts. New methods for locating cable faults, particularly on high-frequency cables. *Journal of the Institution of Electrical Engineers- Part III: Radio and Communication Engineering*, vol. 93, No. 26, Nov. 1946, pp. 385–404. Available from: DOI: 10.1049/ji-3-2.1946.0067.
27. R. F. Stevens and T. W. Stringfield. Line-fault locator using fault-generated surges. *Electrical Engineering*, vol. 67, No. 11, Nov. 1948, pp. 1060–1060. ISSN: 0095-9197. Available from: DOI: 10.1109/EE.1948.6444437.
28. R. F. Stevens and T. W. Stringfield. A transmission line fault locator using fault-generated surges. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 67, No. 2, Jan. 1948, pp. 1168–1179. ISSN: 0096-3860. Available from: DOI: 10.1109/T-AIEE.1948.5059797.

29. M. Ando, E. O. Schweitzer, and R. A. Baker. Development and field-data evaluation of single-end fault locator for two-terminal HVDC transmission lines-Part 1: Data collection system and field data. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, No. 12, Dec. 1985, pp. 3524–3530. ISSN: 0018-9510. Available from: DOI: 10.1109/TPAS.1985.318905.
30. M. Ando, E. O. Schweitzer, and R. A. Baker. Development and field-data evaluation of single-end fault locator for two-terminal HVDC transmission lines-Part 2: algorithm and evaluation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, No. 12, Dec. 1985, pp. 3531–3537. ISSN: 0018-9510. Available from: DOI: 10.1109/TPAS.1985.318906.
31. H. Lee and A. M. Mousa. GPS travelling wave fault locator systems: investigation into the anomalous measurements related to the lightning strikes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, No. 3, Jul. 1996, pp. 1214–1223. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/61.517474.
32. M. M. Tawfik and M. M. Morcos. A fault locator for transmission lines based on Prony method. In: *Proceedings of 1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Edmonton, Canada, 18 July – 22 July, 1999. Piscataway: IEEE, 2002, pp. 943–947, ISBN: 0-7803-5569-5. Available from: 10.1109/PESS.1999.787443.
33. Q. Jian, C. Xiangxun, and Z. Jianchao. Travelling wave fault location of transmission line using wavelet transform. In *Proceedings of POWERCON 98. 1998 International Conference on Power System Technology*, Beijing, China, 18–21 August 1998. Piscataway: IEEE, 2002, pp. 533–537, ISBN: 0-7803-4754-4. Available from: DOI: 10.1109/ICPST.1998.729021.
34. O. Altay, E. Gursay, A. Font, and O. Kalenderli. Travelling wave fault location on hybrid power lines. In: *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Chengdu, China, 19–22 September 2016. Piscataway: IEEE, 2016, pp. 1–4, ISBN: 978-1-5090-0497-3. Available from: DOI: 10.1109/ICHVE.2016.7800719.
35. A. M. Abeid, H. A. Abd el-Ghany, A. M. Azmy. An advanced travelling-wave fault-location algorithm for simultaneous faults. In: *Proceedings of 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference*, Cairo, Egypt, 19–21 December 2017. Piscataway: IEEE, 2018, pp. 747–752, ISBN: 978-1-5386-0991-0. Available from: DOI: 10.1109/MEPCON.2017.8301265.
36. H. P. Dupuis and W. E. Jacobs. Fault location and relay performance analysis by automatic oscillographs. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 65, No. 7, Jul. 1946, pp. 442–446. ISSN: 0096-3860. Available from: DOI: 10.1109/T-AIEE.1946.5059367.
37. A. C. Lee, Ground-fault-location indicator. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 76, No. 3, Apr. 1957, pp. 1370–1372. ISSN: 0097-2460. Available from: DOI: 10.1109/AIEEPAS.1957.4499796.
38. S. E. Westlin and J. A. Bubenko. An accurate method for fault location on electric power transmission lines. *IFAC Proceedings Volumes*, Melbourne, Australia, 21–25 February 1977, vol. 10, No. 1, Feb. 1977, pp. 262–266. Available from: DOI: 10.1016/S1474-6670(17)67067-8.
39. L. Eriksson, M. M. Saha, and G. D. Rockefeller. An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, No. 2, Feb. 1985, pp. 424–436. ISSN: 0018-9510. Available from: DOI: 10.1109/TPAS.1985.319058.
40. A. T. Johns, S. Jamali, and S. M. Haden. New accurate transmission line fault location equipment. In: *Proceedings of 1989 Fourth International Conference on Developments in Power Protection*, Edinburgh, UK, 11–13 April 1989. Piscataway: IEEE, 2002, pp. 1–5.

41. J. A. Jiang, Y. H. Lin, C. W. Liu, J. Z. Yang, and T. M. Too. An adaptive fault locator system for transmission lines. In: *Proceedings of 1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Edmonton, Canada, 18–22 July 1999. Piscataway: IEEE, 2002, pp. 930–936, ISBN: 0-7803-5569-5. Available from: DOI: 10.1109/PSS.1999.787441.
42. J. A. Jiang, J. Z. Yang, Y. H. Lin, C. W. Liu, and J. C. Ma. An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. I. Theory and Algorithms, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, No. 2, Apr. 2000, pp. 486–493. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/61.852973.
43. J. A. Jiang, Y. H. Lin, J. Z. Yang, T. M. Too, and C. W. Liu. An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. II. PMU implementation and performance evaluation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, No. 4, Oct. 2000, pp. 1136–1146. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/61.891494.
44. M. Joorabian. Artificial neural network based fault locator for EHV transmission system. In: *Proceedings of 2000 10th Mediterranean Electrotechnical Conference*, Lemesos, Cyprus, 29–31 May 2000. Piscataway: IEEE, 2002, pp. 1003–1006, ISBN: 0-7803-6290-X. Available from: DOI: 10.1109/MELCON.2000.879703.
45. M. Kezunovic and M. Knezev. Selection of optimal fault location algorithm. In: *Proceedings 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, Pittsburg, USA, 20–24 July 2008. Piscataway: IEEE, 2008, pp. 1–5, ISBN: 978-1-4244-1905-0. Available from: DOI: 10.1109/PES.2008.4596775.
46. A. S. Altaie and J. Asumandu. Fault location using a new control technique, multiple classifier, and artificial neural network. In: *Proceedings 2017 IEEE Texas Power and Energy conference*, College Station, USA, 9–10 February 2017. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 1–6, ISBN: 978-1-5090-6618-6. Available from: DOI: 10.1109/TPEC.2017.7868267.
47. C. E. M. Pereira and L. C. Zanetta. Optimization algorithm for fault location in transmission lines considering current transformer saturation. *IEEE Transactions Power Delivery*, vol. 20, No. 2, Apr. 2005, pp. 603–608. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/TPWRD.2004.838521.
48. Z. Jian, Z. HongJun, and Q. JiangFeng. A two-terminal fault location algorithm using asynchronous sampling based on genetic algorithm. In: *Proceedings 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, Beijing, China, 16–20 October 2011. Piscataway: IEEE, 2012, vol. 2, pp. 1513–1516, ISBN: 978-1-4244-9622-8. Available from: DOI: 10.1109/APAP.2011.6180605.
49. M. G. Davoudi, J. Sadeh, and K. Kamyab. Time domain fault location on transmission lines using genetic algorithm. In: *Proceedings 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Venice, Italy, 18–25 May 2012. Piscataway: IEEE, 2012, pp. 1087–1092, ISBN: 978-1-4577-1830-4. Available from: DOI: 10.1109/EEEIC.2012.6221542.
50. A. S. Ahmed, M. A. Attia, N. M. Hamed, and A. Y. Abdelaziz. Comparison between genetic algorithm and whale optimization algorithm in fault location estimation in power systems. In: *Proceedings 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference*, Cairo, Egypt, 19–21 December 2017. Piscataway: IEEE, 2018, pp. 631–637, ISBN: 978-1-5386-0991-0. Available from: DOI: 10.1109/MEPCON.2017.8301247.
51. А. М. Федосеев. *Релейная защита электрических систем*. Москва: Государственное энергетическое издательство, 1952, 480 с.
52. W. A. Elmore. *Protective relaying theory and applications*. 2nd edition, New York: Marcel Dekker, 2003, p. 432. ISBN: 978-0824709723.

53. L. Hewitson, M. Brown, R. Balakrishnan. *Practical Power System Protection*. Oxford: Newnes, 2004, p. 288. ISBN: 0 7506 6397 9.
54. J. L. Blackburn and J. T. Domin. *Protective Relaying*. 3rd edition, New York: CRC Press, 2006, p. 664. ISBN: 978-1-57444-716-3.
55. L. N. Crichton. The distance relay for automatically sectionalizing electrical net works. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XLII, pp. 527–537, Jan. 1923. ISSN: 0096-3860. Available from: DOI: 10.1109/T-AIEE.1923.5060893.
56. H. A. McLaughlin and E. O. Erickson. The impedance relay developments and application. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 47, No.3, Jul. 1928, pp. 776–782. ISSN: 0096-3860. Available from: DOI: 10.1109/T-AIEE.1928.5055053.
57. L. N. Crichton. High-speed protective relays. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 49, No. 4, Oct. 1930, pp. 1232–1239. ISSN: 0096-3860. Available from: DOI: 10.1109/T-AIEE.1930.5055649.
58. W. A. Lewis and L. S. Tippet. Fundamental basis for distance relaying. *Electrical Engineering*, vol. 50, No. 6, Jun. 1931, pp. 420–422. ISSN: 0095-9197. Available from: DOI: 10.1109/EE.1931.6430279.
59. S. L. Goldsborough and R. M. Smith. A new distance ground relay. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 55, No. 6, Jun. 1936, pp. 697–703. ISSN: 0096-3860. Available from: DOI: 10.1109/T-AIEE.1936.5057333.
60. L. J. Audlin and A. R. Van C. Warrington. Distance relay protection for subtransmission line made economical. *Electrical Engineering*, vol. 62, No. 9, Sept. 1943, pp. 574–578. ISSN: 0095-9197. Available from: DOI: 10.1109/EE.1943.6435918.
61. M. A. Bostwick and E. L. Harder. Relay protection of tapped transmission lines. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 62, No. 10, Oct. 1943, pp. 645–650. ISSN: 0096-3860. Available from: DOI: 10.1109/T-AIEE.1943.5058619.
62. S. L. Goldsborough. A distance relay with adjustable phase-angle discrimination. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 63, No. 11, Nov. 1944, pp. 835–838. ISSN: 0096-3860. Available from: DOI: 10.1109/T-AIEE.1944.5058808.
63. E. Clarke. Impedances seen by relays during power swings with and without faults. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 64, No. 6, Jun. 1945, pp. 372–384. ISSN: 0096-3860. Available from: DOI: 10.1109/T-AIEE.1945.5059154.
64. A. R. Van C. Warrington. Graphical method for estimating the performance of distance relays during faults and power swings. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 68, No. 1, Jul. 1949, pp. 608–621. ISSN: 0096-3860. Available from: DOI: 10.1109/T-AIEE.1949.5059984.
65. F. R. Bergseth. An electronic distance relay using a phase-discrimination principle. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 73, No. 2, Jan. 1954, pp. 1276–1279. ISSN: 0097-2460. Available from: DOI: 10.1109/AIEEPAS.1954.4498958.
66. C. Adamson and L. M. Wedepohl. Power system protection, with particular reference to the application on junction transistors to distance relays. *Proceedings of the IEE – Part A: Power Engineering*, vol. 103, No. 10, Aug. 1956, pp. 379–388. ISSN: 0369-8882. Available from: DOI: 10.1049/pi-a.1956.0106.
67. W. K. Sonnemann and H. W. Lensner. Compensator distance relaying 1. General principles of Operation. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 77, No. 3, Apr. 1958, pp. 372–382. ISSN: 0097-2460. Available from: DOI: 10.1109/AIEEPAS.1958.4499939.

68. W. E. Rich and H. J. Calhoun. Compensator distance relaying 2. Design and performance. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 77, No. 3, Apr. 1958, pp. 383–387. ISSN: 0097-2460. Available from: DOI: 10.1109/AIEEPAS.1958.4499940.
69. K. Parthasarathy. Three-system and single-system static distance relays. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 113, No. 4, Apr. 1966, pp. 641–651. ISSN: 0020-3270. Available from: DOI: 10.1049/piee.1966.0104.
70. N. M. Anil Kumar. New approach to distance relays with quadrilateral polar characteristic for e.h.v.-line protection. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 117, No. 10, Oct. 1970, pp. 1986–1992. ISSN: 0020-3270. Available from: DOI: 10.1049/piee.1970.0350.
71. V. T. Ingole, M. T. Sant, and Y. G. Paithankar. New technique for quadrilateral distance relay. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 121, No. 6, Jun. 1974, pp. 464–466. ISSN: 0020-3270. Available from: DOI: 10.1049/piee.1974.0112.
72. B. J. Mann and I. F. Morrison. Digital calculation of impedance for transmission line protection. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-90, No. 1, Jan. 1971, pp. 270–279. ISSN: 0018-9510. Available from: DOI: 10.1109/TPAS.1971.292966.
73. G. B. Gilcrest, G. D. Rockefeller, and E. A. Udren. High-speed distance relaying using a digital computer I – System description. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-91, No. 3, May 1972, pp. 1235–1243. ISSN: 0018-9510. Available from: DOI: 10.1109/TPAS.1972.293482.
74. G. D. Rockefeller and E. A. Udren. High-speed distance relaying using a digital computer II – Test results. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-91, No. 3, May 1972, pp. 1244–1258. ISSN: 0018-9510. Available from: DOI: 10.1109/TPAS.1972.293483.
75. P. G. McLaren and M. A. Redfern. Fourier-series techniques applied to distance protection. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 122, No. 11, Nov. 1975, pp. 1301–1305. ISSN: 0020-3270. Available from: DOI: 10.1049/piee.1975.0316.
76. A. G. Phadke, T. Hlibka, M. Ibrahim, and M. G. Adamiak. A microcomputer based symmetrical component distance relay. In: *IEEE Conference Proceedings Power Industry Computer Applications Conference*, Cleveland, USA, 15–19 May, 1979. Piscataway: IEEE, 2002, pp. 47–55. Available from: DOI: 10.1109/PICA.1979.720045.
77. S. P. Patra, S. K. Basu, and S. Choudhuri. Analysis of phase-sequence detector for polyphase distance relay. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 119, No. 10, Oct. 1972, pp. 1503–1504. ISSN: 0020-3270. Available from: DOI: 10.1049/piee.1972.0297.
78. U. S. Hazra, S. K. Basu, and S. Chowdhuri. Polyphase distance relay by 6-input phase-sequence detector. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 123, No. 10, Oct. 1976, pp. 1017–1020. ISSN: 0020-3270. Available from: DOI: 10.1049/piee.1976.0226.
79. A. T. Johns and A. A. El-Alaily. New distance protective relay with improved coverage for high-resistance earth faults. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 124, No. 4, Apr. 1977, pp. 349–355. ISSN: 0020-3270. DOI: 10.1049/piee.1977.0064.
80. P. A. Crossley and P. G. McLaren. Distance protection based on travelling waves. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, No. 9, Sept. 1983, pp. 2971–2983. ISSN: 0018-9510. Available from: DOI: 10.1109/TPAS.1983.318102.
81. Y. Ohura, T. Matsuda, M. Suzuki, F. Andow, Y. Kurosawa, and A. Takeuchi. A digital distance relay using negative sequence current. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, No. 1, Jan. 1990, pp. 79–84. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/61.107259.

82. Z. Zhizhe and C. Deshu. An adaptive approach in digital distance protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, No. 1, Jan. 1991, pp. 135–142. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/61.103732.
83. Y. Q. Xia, K. K. Li, and A. K. David. Adaptive relay setting for stand-alone digital protection, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, No. 1, Jan. 1994, pp. 480–491. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/61.277720.
84. P. G. McLaren, G. W. Swift, Z. Zhang, E. Dirks, R. P. Jayasinghe, and I. Fernando. A new positive sequence directional element for numerical distance relays. In: *Proceedings IEEE WESCANEX 95. Communications, Power and Computing conference*, Winnipeg, Canada, 15–16 May 1995. Piscataway: IEEE, 2002, pp. 334–339, ISBN: 0-7803-2725-X. Available from: DOI: 10.1109/WESCAN.1995.494051.
85. A. Apostolov. Implementation of a transient energy method for directional detection in numerical distance relays. In: *Proceedings 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference*, New Orleans, USA, 11–16 April 1999. Piscataway: IEEE, 2002, pp. 382–387, ISBN: 0-7803-5515-6. Available from: DOI: 10.1109/TDC.1999.755382.
86. S. H. Kang, K. H. Kim, K. R. Cho, and J. K. Park. High speed offset free distance relaying algorithm using multilayer feedforward neural networks. In: *Proceedings of International Conference on Intelligent System Application to Power Systems*, Orlando, USA, 28 January to 2 February 1996. Piscataway: IEEE, 2002, pp. 210–214, ISBN: 0-7803-3115-X. Available from: DOI: 10.1109/ISAP.1996.501070.
87. S. J. Lee and C. C. Liu. Intelligent approach to coordination identification in distance relaying. In: *Proceedings of International Conference on Intelligent System Application to Power Systems*, Orlando, USA, 28 January to 2 February 1996. Piscataway: IEEE, 2002, pp. 62–67, ISBN: 0-7803-3115-X. Available from: DOI: 10.1109/ISAP.1996.501045.
88. J. P. de Sa, J. Afonso, and R. Rodrigues. A Probabilistic approach to setting distance relays in transmission networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, No. 2, Apr. 1997, pp. 681–686. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/61.584342.
89. A. S. AlFuhaid and M. A. El-Sayed. A recursive least-squares digital distance relaying algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, No. 4, Oct. 1999, pp. 1257–1262. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/61.796215.
90. K. K. Li, L. L. Lai, and A. K. David. Stand alone intelligent digital distance relay. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, No. 1, Feb. 2000, pp. 137–142. ISSN: 0885-8950. Available from: DOI: 10.1109/59.852112.
91. S. Jamali. A fast adaptive digital distance protection. In: *Proceedings 2001 Seventh International Conference on Developments in Power System Protection (IEE)*, Amsterdam, Netherlands, 9–12 April 2001. Piscataway: IEEE, 2002, pp. 149–152, ISBN: 0-85296-732-2. Available from: DOI: 10.1049/cp:20010122.
92. T. Segui, P. Bertrand, M. Guillot, P. Hanchin, and P. Bastard. Fundamental basis for distance relaying with parametrical estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, No. 2, Apr. 2000, pp. 659–664. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/61.853001.
93. C. S. Chen, C. W. Liu, and J. A. Jiang. Application of combined adaptive Fourier filtering technique and fault detector to fast distance protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, No. 2, Apr. 2006, pp. 619–626. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/TPWRD.2005.858808.

94. M. Bockarjova, A. Sauhats, and G. Andersson. Statistical algorithm for power transmission lines distance protection. In: *Proceedings 2006 Probabilistic Methods Applied to Power Systems conference*, Stockholm, Sweden, 11–15 June 2006. Piscataway: IEEE, 2007, pp. 1–7, ISBN: 978-91-7178-585-5. Available from: DOI: 10.1109/PMAPS.2006.360210.
95. E. Sorrentino and V. De Andrade. Optimal-probabilistic method to compute the reach settings of distance relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, No. 3, Jul. 2011, pp. 1522–1529. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2091724.
96. K. Jia, T. Bi, W. Li, and Q. Yang. Ground fault distance protection for paralleled transmission lines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, No. 6, Nov.–Dec. 2015, pp. 5228–5236. ISSN: 0093-9994. Available from: DOI: 10.1109/TIA.2015.2416243.
97. W. Chen, Z. Hao, J. Guan, Y. Dang, D. Du, and X. Wang. Research on the distance protection performance for untransposed parallel transmission lines based on six-phase parameter information. In: *Proceedings 2016 IEEE 16th International Conference on Environmental and Electrical Engineering*, Florence, Italy, 7–10 June 2016. Piscataway: IEEE, 2016, pp. 1–6, ISBN: 978-1-5090-2321-9. Available from: DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555406.
98. C. Lozaro, J. P. Marquez, G. Marchesan, and G. C. Junior. Waveform asymmetry of instantaneous current signal based symmetrical fault detection during power swing. *Electric Power Systems Research*, vol. 155, Feb. 2018, pp. 340–349. ISSN: 0378-7796. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.11.005>.
99. S. M. Hashemi and M. S. Pasand. Distance protection during asymmetrical power swings: Challenges and solutions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, No. 6, Dec. 2018, pp. 2736–2745. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2816304.
100. S. Biswas and P. K. Nayak. An unblocking assistance to distance relays protecting TCSC compensated transmission lines during power swing. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 29, No. 8, Apr. 2019, pp. 1–21. ISSN: 2050-7038. Available from: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12034>.
101. Н. Н. Беляков, К. П. Кадомская, М. Л. Левинштейн и др. *Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений*. Москва: Энергоатомиздат, 1991, 256 с. ISBN: 5-283-01184-4.
102. M. Djuric, Z. Radojevic, and K. Zoric. Determination of the arc extinction time on power lines using voltage signals. *ETEP*, vol. 12, No. 6, Nov./Dec. 2002, pp. 415–418. ISSN: 2050-7038. Available from: <https://doi.org/10.1002/etep.4450120605>.
103. D. S. Fitton, R. W. Dunn, R. K. Aggarwal, A. T. Johns, and A. Bennett. Design and implementation of an adaptive single pole autoreclosure technique for transmission lines using artificial neural networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, No. 2, Apr. 1996, pp. 748–756. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/61.489331.
104. S. P. Ahn, C. H. Kim, R. K. Aggarwal, and A. T. Johns. An alternative approach to adaptive single pole auto-reclosing in high voltage transmission systems based on variable dead time control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, No. 4, Oct. 2001, pp. 676–686. ISSN: 0885-8977. Available from: DOI: 10.1109/61.956756.
105. P. Upadhyay, L. Heistrene, and S. Chandrasekaran. Design and implementation of adaptive autoreclosure for EHV transmission line. In: *Proceedings 2016 International Conference on Microelectronics, Computing and Communications (MircoCom)*, Durgapur, India, 23–25 January 2016. Piscataway: IEEE, 2016, pp. 1–6, ISBN: 978-1-4673-6622-9. Available from: DOI: 10.1109/MicroCom.2016.7522588.

106. B. Mahamedi. An adaptive single-pole auto-reclosing function. In: *Proceedings 2012 06th Power Systems Protection & Control Conference (PSPC06)*, Teheran, Iran, 3 January 2012. Teheran: Iranian Association of Electrical & Electronics Engineers, 2012, pp. 1–5. Available from: http://www.ipaps.ir/files/archive/6/Arc6_259.pdf [viewed 10.09.2019].
107. K. M. C. Dantas, W. L. A. Neves, and D. Fernandes. An Approach for controlled reclosing of shunt-compensated transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, No. 3, Jun. 2014, pp. 1203–1211. ISSN: 1932-5517. Available from: DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2289394.
108. X. Luo, C. Huang, Y. Jiang, and S. Guo. An adaptive three-phase reclosure scheme for shunt reactor-compensated transmission lines based on the change of current spectrum. *Elsevier Electric Power Systems Research*, vol. 158, May 2018, pp. 184–194. ISSN: 0378-7796. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.01.011>.
109. A. Dolgicers and I. Zalitis. Numerical calculation method for symmetrical component analysis of multiple simultaneous asymmetrical faults. In: *Proceedings 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*, Riga, Latvia, 12–13 October 2017. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 1–7, ISBN: 978-1-5386-3847-7. Available from: DOI: 10.1109/RTUCON.2017.8124748.
110. G. I. Atabekov. *The Relay protection of High Voltage Networks*, London: Pergamon Press, 1960, p. 576.
111. С. А. Ульянов. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Москва: Энергия, 1970, 520 с.
112. E. Clarke. *Circuit analysis of A-C power systems*, New York: Wiley, 1943, p. 936.
113. Л. А. Бессонов. *Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник для электротехнических, энергетических, приборостроительных специальностей вузов. 9-е изд.* Москва: Высшая школа, 1996, 638 с. ISBN: 5-06-002160-2.
114. A. Agarwal and J. H. Lang. *Foundations of analog and electronic circuits*, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2005, p. 1008. ISBN: 1-55860-735-8.
115. A. Dolgicers and J. Kozadajevs. Phase plane usage for convergence analysis of Seidel method applied for network analysis. In: *Proceedings 2014 IEEE 2nd Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering*, Vilnius, Lithuania, 28–29 November, 2014. Piscataway: IEEE, 2015, pp. 1-6, ISBN: 978-1-4799-7122-0. Available from: DOI: 10.1109/AIEEE.2014.7020321.
116. А. А. Самарский, А. В. Гулин. *Введение в численные методы*. Москва: Наука, 1987, 286 с.
117. S. C. Chapra and R. P. Canale. *Numerical methods for engineers*. 6th ed., London: McGraw-Hill Higher Education, 2010, p. 960.
118. В. И. Крылов, Н. С. Скобля. *Методы приближенного преобразования Фурье и обращения преобразования Лапласа. Справочная книга*. Москва: Наука, 1974, 224 с.
119. Б. А. Калабеков, В. Ю. Лapidус, В. М. Малафеев. *Методы автоматизированного расчета электронных схем в технике связи*. Москва: Радио и связь, 1990, 272 с. ISBN: 5-256-00674-6.
120. P. Taklaja, R. Oidram, J. Niitsoo, and I. Palu. Causes of indefinite faults in Estonian 110 kV overhead power grid. *Oil Shale*, vol. 30, No. 2S, 2013, pp. 225-243. ISSN: 0208-189X. Available from: DOI: 10.3176/oil.2013.2S.04.
121. S. Šeikins. Pārejas pretestības ietekme uz distances aizsardzību. Maģistra darbs, Rīga: RTU, 2014, 72. lpp.

122. M. Silarajs, A. Utans, L. Leite, and A. Sauhats. Multifunction relay protection device for power transmission lines LIDA. In: *Proceedings 2007 The 2nd International conference on Electrical and Control Technologies*, Kaunas, Lithuania, 3–4 May 2007. Kaunas: Kaunas University Of Technology, 2007, pp. 120–125, ISBN: 978-1-6343-9796-4. Available from: <http://www.proceedings.com/25048.html> [viewed 10.09.2019].
123. I. Zalitis, A. Dolgicers, and J. Kozadajevs. Experimental testing of distance protection performance in transient fault path resistance environment. In: *Proceedings 2017 5th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering*, Riga, Latvia, 24–25 November 2017. Piscataway: IEEE, 2018, pp. 1–6, ISBN: 978-1-5386-4138-5. Available from: DOI: 10.1109/AIEEE.2017.8270526.
124. W. C. New. Combined phase and ground distance relaying. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 69, No. 1, Jan. 1950, pp. 37–44. ISSN: 0096-3860. Available from: DOI: 10.1109/T-AIEE.1950.5060117.
125. I. Zalitis, A. Dolgicers, J. Kozadajevs. A distance protection based on the estimation of system model parameters. In: *Proceedings 2017 IEEE Manchester PowerTech*, Manchester, UK, 18–22 June 2017. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 1–6, ISBN: 978-1-5090-4238-8. Available from: DOI: 10.1109/PTC.2017.7981277.
126. I. Zalitis, A. Dolgicers, J. Kozadajevs. A power transmission line fault locator based on the estimation of system model parameters. In: *Proceedings 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Milan, Italy, 6–9 June 2017. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 1–6, ISBN: 978-1-5386-3918-4. Available from: DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977459.
127. S. S. Geramian, H. A. Abyane, and K. Mazlumi. Determination of optimal PMU placement for fault location using genetic algorithm. In: *Proceedings 2008 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Wollongong, Australia, 28 September to 1 October 2008. Piscataway: IEEE, 2008, pp. 1–5, ISBN: 978-1-4244-1771-1. Available from: DOI: 10.1109/ICHQP.2008.4668810.
128. L. He, K. Jia, and Z. Fan. The immune genetic algorithm in fault diagnosis of modern power system. In: *Proceedings 2010 2nd International Conference on Education Technology and Computer*, Shanghai, China, 22–24 June 2010. Piscataway: IEEE, 2010, pp. 26–29, ISBN: 978-1-4244-6367-1. Available from: DOI: 10.1109/ICETC.2010.5529742.
129. Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. *Генетические алгоритмы. Учебное пособие*. 2-е изд. Москва: Физматлит, 2006, 320 с. ISBN: 5-9221-0510-8.
130. Т. В. Панченко. *Генетические алгоритмы. Учебно-методическое пособие*. Астрахань: АГУ, 2007, 87 с. ISBN: 5-88200-913-8.
131. I. Plummer. *Asymmetry in distribution systems: causes, harmful effects and remedies*. M. Sc. Eng. thesis, Dept. Electrical and Computer Engineering, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Louisiana, 2011, p. 130. Available from: https://digitalcommons.lsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2489&context=gradschool_theses [viewed 12.09.2019].
132. *Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения*, ГОСТ 32144-2013, Март 2013, 20 с. Доступно: <https://www.elec.ru/files/2014/05/06/GOST-32144-2013-Elektricheskaja-energija.pdf>.
133. C. Preve. *Protection of electrical networks*, London: ISTE Ltd., 2006, p. 508. ISBN: 978-1-905209-06-4.
134. D. P. Kothari and I. J. Nagrath. *Modern Power System Analysis*, New Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Limited, 3rd. ed., 2009, p. 694. ISBN: 978-0-07-049489-3.

135. I. Zalitis, A. Dolgicers, J. Kozadajevs. An adaptive single-pole automatic reclosing method for uncompensated high-voltage transmission lines. *Electric Power Systems Research*, vol. 166, Jan. 2019, pp. 210–222. ISSN: 0378-7796. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.10.012>.
136. C. F. Wagner, R. D. Evans. *Symmetrical components as applied to the analysis of unbalanced electrical circuits*. 1st ed., New York: McGraw-Hill, p. 437, 1933.
137. E. R. Bussy, N. M. Ljumb, and A. C. Britten. Effect of ADLash optical fibre cable on corona inception gradient and electric fields around the earth wire of the Apollo-Cahora Bassa HVDC transmission line. In: *Proceedings 2004 IEEE AFRICON. 7th Africon Conference*, Gaborone, Botswana, 15–17 September 2004. Piscataway: IEEE, 2005, pp. 607–612, ISBN: 0-7803-8605-1. Available from: DOI: 10.1109/AFRICON.2004.1406751.
138. A. T. Johns and A. M. Al-Rawi. Digital simulation of EHV systems under secondary arcing conditions associated with single-pole autoreclosure. *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 129, No. 2, Mar. 1982. pp. 49–58. ISSN: 0143-7046. Available from: DOI: 10.1049/ip-c.1982.0009.
139. A. T. Johns, R. K. Aggarwal, and Y. H. Song. Improved techniques for modelling fault arcs on faulted EHV transmission systems. *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 141, No. 2, Mar. 1994, pp. 148–154. ISSN: 1350-2360. Available from: DOI: 10.1049/ip-gtd:19949869.
140. A. Pereira, F. Perez-Yauli, F. L. Quilumba. Three-phase recloser time delays determination in 138 kV and 46 kV lines of the Empresa Electrica Quito. In: *Proceedings 2017 IEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, Gaborone, Botswana, 16–20 October 2017. Piscataway: IEEE, 2018, pp. 1–6, ISBN: 978-1-5386-3895-8. Available from: DOI: 10.1109/ETCM.2017.8247514.