

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Jevgeņijs Kucajevs

**LIELO ENERĢOSISTĒMU RISKU VADĪBAS
METODES UN IERĪCES**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2013

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Jevgeņijs Kucajevs
Enerģētikas un elektrotehnikas doktora programmas students

**Lielo energosistēmu risku
vadības metodes un ierīces**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. ing., profesors
A. Sauhats

RTU Izdevniecība
Rīga 2013

Kucajevs J. Lielo energosistēmu risku vadības metodes un ierīces
Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU, 2013. – 33 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Promocijas padomes P-05 (Enerģētika) 2013. gada 2. maija lēmumu Nr. 8/13

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 06.06.2013 14:00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un Elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 117, telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Attīstības daļas vadītājs, Dr.sc.ing. **Oļegs Liņkevičs**
AS „Latvenergo”

Vadošā pētniece, Dr.sc.ing. **Diāna Žalostība**
RTU EEF Enerģētikas institūts

Vadošais pētnieks, Dr.sc.ing. **Arturas Klementavicius**
Lietuvas enerģētikas institūts

APSTIPRINĀJUMS

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

Jevgenijs Kucajevs (Paraksts)
Datums

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, darbs satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, ka arī literatūras sarakstu un pielikumu. Darba kopējais apjoms ir 124 datorsalikuma lappuses. Darbā iekļautas 11 tabulas un 64 attēli. Literatūras sarakstā iekļauti 78 izmantotas literatūras avoti.

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

SATURS

	Lpp.
Darba aktualitāte	5
Darba mērķi un uzdevumi	6
Pētījuma metodes	7
Promocijas darba zinātniskā novitāte	7
Promocijas darba praktiskā nozīme	8
Promocijas darba aprobācija	8
Publikācijas	8
Darba struktūra un apjoms	9
1. Lielo energosistēmu vadības riska novērtēšanas metodes un paņēmieni	10
1.1. Elektroenerģētisko sistēmu avārijas, riski un to sekas	11
1.2. Kritērijs N-1. Priekšrocības un trūkumi	11
1.3. Varbūtiskā pieeja riska un drošuma novērtējumam	11
1.4. Riski no statistisko lēmumu pieņemšanas teorijas viedokļa	11
1.5. Vienkāršotie risku novērtēšanas paņēmieni un kritēriji	13
1.6. Spēļu teorijas kritēriji un paņēmieni	14
1.7. Drošuma teorijas kritēriji.	14
2. Risku vadības metodes, algoritmi, modeli un rīki	15
2.1. Risku vadības algoritma struktūra	15
2.2. Energosistēmas modeļu veidi	15
2.3. Varbūtiskie, nelineārie modeli	16
2.4. Monte-Karlo metode kā risku rādītāju aprēķina rīks	16
3. Relejaizsardzības un automātikas modeļi un to validācija	18
3.1. Relejaizsardzības un pretavāriju automātikas modeļu sintēze un lietošana	18
3.2. Galvenās prasības RAPA modeļiem	18
3.3. Modeļa validācijas metodoloģija	19
3.4. Validācijas procedūras realizācija	19
3.5. Uz Montekarlo metodi balstīts distantaizsardzības darba algoritms	21
4. Energosistēmu stabilitātes zaudējuma procesu modelēšanas piemēri	23
4.1. Asinhronās gaitas novēršanas automātikas darbības modelēšana	23
5. Izklidētas ģenerācijas avoti un energosistēmas stabilitāte	26
5.1. Nākotnes energosistēma ar lielu izklidēto ģenerācijas avotu skaitu	27
5.2. Nākotnes energosistēmas stāvokļu klasifikācija.	27
5.3. Atlasītie rezultāti	28
Secinājumi	30
Izmantotie informācijas avoti	32

DARBA AKTUALITĀTE

Drošuma problēma, kopīgi strādājošām enerģiju ražojošām un patērējošām sistēmām, iegūst īpašu aktualitāti sakarā ar elektroenerģētikas sistēmu dinamisku attīstību un sarežģītānu, pilsētu pieaugumu, jaunu infrastruktūru parādīšanos, kas nepieļauj pat īslaicīgus energoapgādes pārtraukumus.

Par šo nopietno faktu liecina daudzu energosistēmu liela mēroga avārijas, kas rada milzīgus zaudējumus un pat cilvēku upurus.[1,2,3,4,5] Tajā pašā laikā tiek novērots enerģijas ražošanas izdevumu pieaugums. Elektroenerģija vēl arvien nav pieejama miljoniem pat attīstīto valstu nabadzīgajiem iedzīvotāju slāņiem. Ražošanas efektivitātes paaugstināšanas mērķis un elektroenerģijas sadale noved līdz energosistēmu restrukturizācijas un tirgus noteikumu izmantošanas rīku pielietošanas. Taču parādījās arī jaunas problēmas pretrunu starp drošumu (kura nepieciešamā līmeņa dēļ nepieciešamas būtiskas izmaksas) un efektivitāti.

Patiesi, dažādu veidu rezervju, pretavārijas automātikas sistēmas uzturēšana, līnijas caurlaides spējas paaugstināšana, aparatūras pārbaude un atjaunošana pieprasa lielas izmaksas. Nepieciešamais drošuma līmeņa uzturēšanas uzdevums tiek risināts nepārtraukti mainīgos nosacījumos. Sen zināms, ka energosistēmu funkcionēšanas nosacījumu izmaiņu procesi attīstās ar ātrumu, kas aptver ievērojami plašu laika diapazonu. No viļņu procesiem, kas attīstās laikā, kuru mēra mikrosekundēs un līdz jaunu jaudu patērētāju ievadīšanas procesiem kad procesu norises laiks var ilgt gadiem. Atkarībā no energosistēmu funkcionēšanas nosacījumu izmaiņu ātruma mainās arī drošuma līmeņa sasniegšanas rīki. Ātrus procesu rašanās gadījumā cilvēks nespēj pieņemt atbilstošu, racionālu vadības lēmumu. Vadības iedarbība tiek ģenerēta automātiski. Izskatot lēnos procesus lai pieņemtu pamatotus lēmumus, ir iespējams veikt sarežģītus aprēķinus, procesu modelēšanu, jo var nerēķināties ar laiku, kurš ir nepieciešams aprēķinu sagatavošanai un veikšanai. Dotajā promocijas darbā aprobežojamies ar ātriem norisināšanās procesiem, kad lēmumi par vadības iedarbības ģenerēšanu tiek pieņemti ar automātikas līdzekļiem.

Tirgus nosacījumu ieviešana energosistēmu operatīvās vadības režīmiem praksē izraisa pretrunas starp centieniem nodrošināt ekonomisko efektivitāti un drošumu. Piemēram, tiecoties paaugstināt ekonomisko efektivitāti, var nonākt līdz rekomendācijām palielināt pieļaujamās līniju transformatoru, augstsprieguma līniju un citu pārslodzes, kas samazinās statiskās, dinamiskās un termiskās stabilitātes nosacījumu izpildes rezerves.

Var apgalvot, ka mūsdienīgas energosistēmas vadība notiek risinot optimizācijas daudz kritēriju uzdevumus[5,6], kam vienlaicīgi ir vismaz divi mērķi:

1. Efektivitātes paaugstināšana;
2. Drošuma līmeņa paaugstināšana.

Viena no visaptverošām un pazīstamākām energosistēmas vadības metodēm ir zināma pēc nosaukuma - "kritērijs N-1".[7,8] Vienkāršs pielietojumā un vienlaicīgi sarežģīts pēc būtības kritērijs nodrošina tādu energosistēmas režīmus, kas pieļauj negaidītu jebkāda elementa atteici. Tam arī nevajadzētu izraisīt ievērojamus ekonomiskos zaudējumus. Kā jau minējām, šī kritērija vienkāršība ir, maigi sakot, nosacīta. Izmantojot šo kritēriju, praktiski rodas pretrunas un ir nepieciešami dažādi tā skaidrojumi. Ko nozīmē viena elementa atteice? Ko uzskata par lieliem zudumiem? Kādēļ N - 1, bet ne, piemēram, N - 3? Var notikt, ka 3 nedrošu elementu bojājumu varbūtība ir lielāka nekā 1, bet droša elementa atteices varbūtība!

Var pieļaut, ka drošumu var novērtēt stingrāk, piemēram, izrēķinot sistēmas avārijas iespējamības varbūtību. Taču arī šajā gadījumā paliek jautājums - kāds varbūtības lielums ir pieņemams?

Teorētiski ir iespējams formulēt optimizācijas uzdevumu vienkriteriālā nostādņē. Šajā gadījumā abiem mērķiem (efektivitātei un drošumam) jābūt izteiktām vienās mērvienībās. Par tādu mērvienību var kalpot nauda, kas atspoguļo peļņu vai zaudējumus. Ņemot vērā daudzu gadījuma faktoru ietekmi uz iespējamo peļņu vai zaudējumu, var apgalvot, ka energosistēmas darbības rezultātā rodas peļņa vai zudumi un, ka šiem lielumiem piemīt varbūtisks raksturs. Rodas risku novērtēšanas, un to vadības uzdevums. Atzīmēsim, ka riskiem, kas rodas vadot energosistēmu ir veltīti ļoti daudz darbu [8,9,10,11,12]. Ievērojamu ieguldījumu risku novērtēšanā, procesu modelēšanā, atbilstošu automātisko iekārtu sintēzē ienesa arī Latvijas zinātnieki: Jānis Bubenko, Venjamins Fabrikants, Jēkabs Kuzmins, Jānis un Voldemārs Putniņi, Jānis Gerhards, Zigurds Krišāns, Vilnis Krēsliņš, Kārlis Brinkis, Jēkabs Barkāns, Antans Sauhats, Vladimirs Čuvičins, Anatolijs Mahnitko. Tomēr lielāka darbu daļa ir veltīta drošuma līmeņa novērtēšanai vai tā paaugstināšanas paņēmieniem, vai iespējamo zudumu lieluma aprēķiniem. Šajā promocijas darbā apskatīts drošums un efektivitāte vienlaicīgi. Darbā izvirzītais mērķis virzīts risku samazināšanai un tādejādi ir aktuāls.

DARBA MĒRĶI UN UZDEVUMI

Dotā darba mērķis ir energosistēmu risku, kas rodas to dinamiskās stabilitātes traucējumu dēļ, samazināšana.

Lai sasniegtu definēto mērķi darbā **tiek risināti šādi uzdevumi:**

1. Tiek analizētas energosistēmu risku novērtēšanas metodes un algoritmi.
2. Uz automātikas un distantaizsardzības vienkāršoto modeļu pamata tiek izstrādāts un modelēts dinamiskās stabilitātes traucējumu process lielās energosistēmās.
3. Tiek sintezēta asinhrona režīma novēršanas un likvidācijas automātikas jauna struktūra.
4. Tiek izstrādāts distantaizsardzības funkcionēšanas algoritms, spējīgs izskaitļot nostrādes riska īsslēguma momentā vērtību.
5. Tiek izstrādāta asinhronā režīma novēršanas automātikas vienkāršoto modeļu derības novērtējuma metodika.

PĒTĪJUMA METODEDES

- Lai modelētu dinamiskus procesus energosistēmās, tiek veikti lielu nelineāru diferenciālo un algebrisko vienādojumu sistēmu aprēķini, kas tiek realizēti ar EUROSTAG programmas palīdzību;
- Ģeogrāfiski attālināto mērījumu sinhronizācijas nolūkos tiek, izmantoti globālā pozicionēšanas sistēma (GPS) un optiskie sakaru kanāli;
- Varbūtību un statistisko lēmumu pieņemšanas teorijas paņēmieni un Monte-Karlo metode;
- Mikroprocesoru ierīču sintēzes metodes un rīki.

PROMOCIJAS DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

- Veikta iespējamo pieeju riska novērtēšanai analīze un salīdzinājums, pamatota varbūtiska pieeja ar drošuma un statistisko lēmumu teoriju paņēmieni un Monte-Karlo metodes izmantošanu.
- Lielo energosistēmu dināmiskas stabilitātes zuduma modelēšanas nolūkos pamatoti vienkāršotie varbūtiskie relejaizsardzību un automātikas darbības algoritmi un izstrādāta to verifikācijas metodika.
- Izmantojot globālo pozicionēšanas sistēmu un optisko-šķiedru sakaru kanālus sintezēta jauna asinhronas gaitas novēršanas automātikas struktūra.
- Veikta liela apjoma izkliedēto enerģijas avotu ietekmes uz energosistēmas stabilitāti novērtēšana.
- Piedāvāts jauns distantaizsardzības algoritms ar riska līmeņa novērtēšanu īsslēguma likvidācijas gaitā.

PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

- Riska novērtēšanas metodika tika izmantota Eiropas projektā ICOEUR, novērtējot Eiropas un Krievijas enerģosistēmu apvienošanas iespējas un labumus.
- Asinhronas gaitas novēršanas automātikas struktūra tiek realizēta mikroprocesoru terminālu izpildījumā un tiks ieviesta ekspluatācijā Baltijas valstu enerģosistēmās.
- Vienkāršotie relejaizsardzību un automātikas varbūtiskie modeļi var būt izmantoti novērtējot riskus praktiskos enerģosistēmu vadības uzdevumos.
- Sintezētais distantaizsardzības algoritms ar riska novērtējumu reālā laikā atļaus uzlabot augstsprieguma līniju aizsardzību selektivitāti vienfāzīgo īsslēgumu caur pārējas pretestību gadījumos.

PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

Promocijas darbs tika prezentēts un apspriests konferencēs:

1. Riga Technical University The 49th International Scientific Conference Power and Electrical Engineering and Environmental Sciences, Rīga 2008.
2. 3rd International conference on integration of Renewable and distributed Energy Resources Francija, Nica 10.-12.. decembris, 2008.
3. IEEE Power Tech 2009 International Conference, Rumānija , Bukareste, 28.jūnijs-2. jūlijs, 2009.
4. The 5th International Conference on Electrical and Control Technologies, Lietuva, Kaunas, 6.-7. maijs, 2010.
5. 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Italija, Roma, 8-11. maijs, 2011.

PUBLIKĀCIJAS

Promocijas darba rezultāti aprakstīti šados rakstos

1. Sauhats A., Kucajevs J., Svalova I., Svalovs A. Distributed Energy Resources and Power System Stability // RTU zinātniskie raksti. 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika. - 23. sēj. (2008), 54.-65. lpp.
2. Sauhats A., Haļilova N., Kucajevs J., Use of Phasor Measurement for Line Protection // RTU zinātniskie raksti. 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika. - 23. sēj. (2008), 66.-73. lpp.

3. Zima-Bockarjova M., Sauhats A., Kucajevs J., Haļilova N., Pašņins G. Distance Protection Algorithm for Power Transmission Lines Based on Monte-Carlo Method // Thesis of the IEEE Bucharest Power Tech Conference, Rumānija, Bukareste, 28.jūnijs-2. jūlijs, 2009. - 1.-7. lpp.
4. Sauhats A., Kucajevs J., Čuvičins V., Utāns A., Bočkarjova G., Leite L., Antonovs E. Verification of Models of Automatic Devices for Elimination of Asynchronous Operation in Power Systems // The 5th International Conference on Electrical and Control Technologies, Lietuva, Kaunas, 6.-7. maijs, 2010. - 182-186.-5. lpp.
5. Sauhats A., Silarajs M., Kucajevs J., Pašņins G., Antonovs D., Bieļa E. Testing of Protection and Automation Devices Using Dynamical Simulation Processes of Power System // Electrical and Control Tehnologies.5 - 6. maijs(2011) 184.-189. lpp.
6. Sauhats A., Kucajevs J., Leite L., Bočkarjova G., Utāns A., Out-of-step Automation Device Model Validation Methodology // 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Italija, Roma, 8.-11. maijs, 2011. - 296-301.-6. lpp.
7. Sauhats A., Utāns A., Kucajevs J., Pašņins G., Antonovs D., Bieļa E. Protection and Automation Devices Testing Using the Modeling Features of EUROSTAG // RTU zinātniskie raksti. 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika. - 28. sēj. (2011), 7.-12. lpp.
8. Sauhats A., Utāns A., Silarājs M., Kucajevs J., Antonovs D., Bieļa E., Moškins I. Power System Dynamical Simulation Application for Out-of-Step Relay Testing // Journal of Energy and Power Engineering. (2012) 1343.-1348. lpp.

PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, darbs satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, kā arī literatūras sarakstu. Darba kopējais apjoms ir 124 datorsalikuma lappuses. Darbā iekļautas 11 tabulas un 58 attēlu. Literatūras sarakstā iekļauti 78 izmantotas literatūras avoti.

1. LIELO ENERGO SISTĒMU VADĪBAS RISKA NOVĒRTĒŠANAS METODES UN PAŅĒMIENI

1.1. Elektroenerģētisko sistēmu avārijas, riski un to sekas

Galvenais energosistēmas darbības vadības uzdevums ir garantēt patērētājiem drošu un efektīvu elektroenerģijas piegādes režīmu. Daudzu gadījuma un nenoteiktu faktoru ietekmes rezultātā energosistēmas parametri, konfigurācija un režīms nepārtraukti mainās. Energosistēmas elementi, piemēram, slodzes, ģeneratori, transformatori, pārvades līnijas tiek ieslēgti un izslēgti, kas izraisa izmaiņas enerģijas plūsmās. Šādas izmaiņas, varbūt ierosinātas pēc energosistēmu operatora iniciatīvas sakarā ar nepieciešamību izpildīt tehniskos ierobežojumus, nodrošināt enerģijas kvalitāti un efektivitāti. No otras puses, izmaiņas ietekmē daudzi ārējie faktori, kurus var uzskatīt par nenoteiktiem un varbūtiskiem. Vadības ietekmes būtiska daļa ir ģenerēta aizsardzības un energosistēmas automātikas ierīču darbības rezultātā. Jebkurā darba stāvoklī var rasties avārijas situācijas, kas rada ekonomiskus, sociālus un ekoloģiskus zaudējumus [1,2,3,4]. Svarīgi uzsvērt, ka zaudējumi ir atkarīgi no gadījuma faktoriem un rādītājiem, un tāpēc tie savukārt var būt uzskatīti par varbūtiskiem lielumiem. Var apgalvot, ka energosistēmas risks ir kombinācija no avārijas varbūtības un tās sekām [8,9]. Vēlme samazināt zaudējumus ir acīmredzama. Tieši šī vēlme un zaudējumu gadījuma raksturs sastāda riska novērtēšanas un vadības metožu sintēzes pamatu.

Viens no svarīgākajiem uzdevumiem, kuru atrisinājums ir virzīts lai novērstu lielos zaudējumus, ir izveidot risku novērtējuma metodiku, kas raksturo iespējamus zudumus un to iespējamību. Nākamais uzdevums ir ģenerēt darbības, lai samazinātu režīma risku. Energosistēmu liels apmērs, izmantojamo iekārtu un apakšsistēmu skaits nosaka riska novērtēšanas uzdevuma sarežģītību. Tomēr pastāv daudzas metodes un līdzekļi, kas ir veltīti energosistēmas vadības risku novērtēšanai un novēršanai [10].

Ir daudz iespējamo riska indikatoru, kas paredzēti dažādiem mērķiem. Lielākā daļa no tiem tiek rēķināti kā varbūtisko likumu matemātiskā cerība, citos gadījumos izmanto varbūtības sadalījumu, kurš var būt aprēķināts vairākos veidos. Riska indikatori atspoguļo vairākus faktorus, ieskaitot jaudas un pārtraukumu komponentes, slodzes aprakstu un prognožu nenoteiktības, sistēmas konfigurāciju un stāvokli u.c.

1.2. Kritērijs N-1. Priekšrocības un trūkumi

Kritēriju (N-1) var definēt šādi:

Sistēmas stāvoklis tiek uzskatīts par drošu, ja jebkura sistēmas elementa darbības pārtraukšana nepieved pie ievērojamas slodzes pazaudēšanas, sprieguma lavīnas vai asinhronas gaitas režīma.

Īss un, no pirmā skata skaidrs, kritērija definējums, to pielietojot, izsauc ļoti daudzus jautājumus.

Lai noņemtu šos jautājumus kritērija „N-1” definīcijai, praksē tiek pievienotas garās instrukcijas un operatoru darbības noteikumi. Rezultātā var apgalvot, ka vienotas pieejas nav. Dažādās energosistēmās kritērija „N-1” pielietošana atšķiras.

1.3. Varbūtiskā pieeja riska un drošuma novērtējumam

Kā parādīts [8], ka varbūtiskās metodes var būt uzskatītas par spēcīgu darbarīku, ko var izmantot dažādu energosistēmu problēmu atrisinājumam. Varbūtisko metožu pielietojumam energosistēmas katros divos gados tiek rīkota pasaules mēroga konference PMAPS (Probabilistic Methods Applied to Power systems).

Sarežģīto sistēmu risku novērtēšanas pieeju daudzveidība, savukārt, kļūva par pamatu vērsties pie teorētiskiem darbiem, kas bija veltīti apskatāmajai problēmai.

Vispamatotākā pieeja, mūsdiā, ir izstrādāta statistisko lēmumu pieņemšanas teorijas[6] ietvaros.

1.4. Riski no statistisko lēmumu pieņemšanas teorijas viedokļa

Lai definēt riska jēdzienu pieņemsim šādas četras hipotēzes:

1. Apskatāmās sistēmas (šajā paragrāfā jēdziens „sistēma” ir plašāka par energosistēmu) pamatmērķis ir iegūt peļņu R.
2. Iegūstamā peļņa ir atkarīga no gadījuma X un nenoteiktiem parametriem X_n (gadījuma parametriem ir zināma varbūtības sadales funkcija; nenoteiktiem parametriem sadales funkcija nav zināma).
3. Lēmuma pieņēmējs (decision maker) nenoteiktiem parametriem var izvēlēties subjektīvās varbūtības funkcijas un, ar šo paņēmieni, pārvērst nenoteiktus parametrus gadījuma parametru klasē.
4. Sistēmas peļņa R ir atkarīga ne tikai no neatkarīgiem no lēmuma pieņēmēja parametriem X un X_n , bet arī no izvēlamajām struktūrām Σ un struktūru parametriem Π .

Uz formulēto hipotēžu pamata, varam apgalvot, ka sistēmas peļņa R var būt aprakstīta ar funkciju:

$$R = F_R(X, X_m, \Sigma, \Pi) = F(X, \Sigma, \Pi) \quad (1.1)$$

Funkcija $F(X, \Sigma, \Pi)$ ir atkarīga no gadījuma parametriem X un, tādejādi var apgalvot, ka zinot (izvēloties) Σ un Π var izrēķināt peļņas R sadales funkciju, teiksim, sadales blīvuma veidā [6]. Protams, var izrēķināt arī sadales funkcijas skaitliskās vērtības, teiksim matemātisko cerību $E(R)$:

$$E(R) = \left(\int_{\Omega} R(X, \Sigma, \Pi) d\varphi(X) \right), \quad (1.2)$$

kur $\varphi(X)$ – parametru X varbūtības sadales funkcija;

Ω – parametru X eksistēšanas robežas.

\int - daudzmerīgais Stiltesa-Lebega integrālis.

Ja tiek stādīts peļņas R varbūtības sadales funkcijas aprēķināšanas uzdevums, tad šī funkcija $\int(R)$ var būt izteikta šādi:

$$f(R) = \int_{\Omega} XR(X, \Sigma, \Pi) d\varphi(X) \quad (1.3)$$

Izteiksmes (1.2) un (1.3) var būt izmantotas risku novērtēšanas un vadības nolūkos.

Vienkāršots uzdevums rodas (1.2.) izmantošanas gadījumā, tas ir, ja peļņas (vai zaudējumu) matemātiskā cerība tiek pieņemta par risku un sistēmas vadības optimizācijas uzdevuma kritēriju. Šinī gadījumā optimizācijas uzdevums var būt uzstādīts šādi:

$$(\Sigma, \Pi)_{opt} = \operatorname{argmax} E(R(X, \Sigma, \Pi)), \quad (1.4)$$

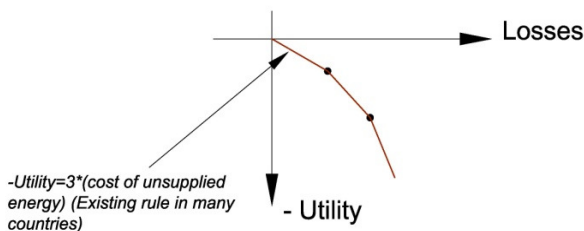
kur $(\Sigma, \Pi)_{opt}$ – optimālās maksimizējošās peļņas matemātisko cerību struktūras Σ un parametri Π .

Apskatītais optimizācijas uzdevums formulējums no risku vadības problēmas skata dod iespēju izmantot vienīgu kritēriju – peļņas matemātisko cerību un, šinī nozīmē ir ļoti izdevīgs pielietošanā (atšķirībā no uzdevumiem ar daudziem kritērijiem).

Diemžēl, kā pierāda statistisko lēmumu pieņemšanas teorija (un „dzīve” apstiprina) izteiksmes (1.2) pielietošana ir ierobežota. Peļņas matemātiskā cerība ir nespējīga aprakstīt ļoti būtisko fenomenu: lēmumu pieņēmēji daudzos gadījumos un dažādu apstākļu dēļ dod priekšroku risinājumiem ar mazākām peļņas matemātiskām cerībām pie nosacījuma, ka šīs peļņas būs saņemtas drošāk, nekā citas, kaut vidēji pat lielākas. Atzīmētais fenomens izpaužas īpaši skaidri apdrošināšanas biznesā. Var apgalvot, ka vidēji visi apdrošināšanas ņēmēji cieš zaudējumus. Tas ir, apdrošināšanas ņēmēja matemātiskā cerība ir ar mīnusa zīmi. Šo apgalvojumu pierāda apdrošināšanas kompāniju dzīvotspēja.

Lai izvairītos no aprakstītajām grūtībām, tiek ieviesta vēl viena funkcija, kura apraksta lēmuma pieņēmēja „gaumi”, salīdzinot dažādas blīvuma funkcijas un atdodot priekšrocību vai nu vidējas peļņas palielināšanai, vai lielo zudumu samazināšanai. Šo funkciju sauc par lietderīguma funkciju L_F (utility function).[6]

Izmantojot ekspertu pieredzi un lēmumu pieņemšanas uzdevumu atrisināšanas rezultātus, var attēlot lietderīguma funkcijas raksturu skaties 1.1. att.



1.1. att. Lietderīguma funkcijas raksturs

Att.1.1. grafikā ir redzams, un tas ir galvenais lietderīguma funkcijas raksturā, – lietderīgums pie negatīvas peļņas R samazinājās ātrāk par šīs peļņas (negatīvā peļņa faktiski ir zudumi) samazināšanu. Ja ir zināma lietderīguma funkcija L_{\uparrow} :

$$L_F = L_F(R) = L_F(X, \Sigma, \Pi), \quad (1.5)$$

tad ļoti viegli definēt risku novērtēšanas kritēriju:

$$E(L_F) = \int_{\Omega} L_F(X, \Sigma, \Pi) d\varphi(X) \quad (1.6)$$

un uzstādīt risku vadības uzdevumu:

$$(\Sigma, \Pi)_{opt} = \operatorname{argmax} E(L_F(X, \Sigma, \Pi)). \quad (1.7)$$

Ir acīmredzams, ka (1.4) un (1.7) atļauj ievērot lēmumu pieņēmēju vēlmi mazināt lielo zaudējumu iespējas.

1.5. Vienkāršotie risku novērtēšanas paņēmieni un kritēriji

Tehniskais risks. Tehnisko sistēmu risku novērtēšanai salīdzinoši plaši tiek izmantots tehniskā riska jēdziens:

$$R_T = \Sigma P_i R_i, \quad (1.8)$$

kur P_i – nevēlama, saistīta ar negatīvo peļņu R_i notikuma varbūtība;

$i=1, \dots$ nevēlamo notikumu numuri to sarakstā.

Tehniskais risks ir zudumu matemātiskā cerība, un šim jēdzienam piemīt iepriekš pieminētie trūkumi. Protams, ja ir zināma lietderīguma funkcija L_F , tad arī (1.6.) var būt transformēta diskrētiem gadījumiem:

$$E(L_F) = \sum P_i L_{Fi}(X, \Sigma, \Pi), i=1 \quad (1.9)$$

1.6. Spēļu teorijas kritēriji un paņēmieni

Iepriekš aprakstītās riska kritēriju formulēšanas metodes bija pamatotas ar pieņemto hipotēzi, ka ir zināma ietekmējošo parametru un faktoru varbūtības sadales funkcija. Ir iespējama un, salīdzinoši plaši izmantojama, principiāli cita pieeja. Šinī pieejā tiek pieņemta hipotēze par to, ka ietekmējošo faktoru varbūtības sadales funkcija nav zināma. Acīmredzams, ka pazūd iespēja stādīt optimizācijas uzdevumus izteiksmju (1.4.) vai (1.7.) veidā, atbilstošie riska kritēriji arī nevar būt aprēķināti. Atteicoties no varbūtības sadales funkciju izmantošanas, tiek saglabāta iespēja aprēķināt peļņu R pie zināmiem lielumiem X , struktūrām Σ un parametriem Π un tiek izmantota „scenāriju” pieņemšanas metode. Nenoteiktie parametri X tiek aizvietoti ar determinētiem lielumiem X_j , kuri ir izvēlēti tā, lai pēc iespējas aptvertu visu parametru X eksistences diapazonu. Visiem X_j tiek aprēķināta (peļņa) zaudējumi $R_j(X_j, \Sigma, \Pi)$ un rezultāti tiek atdoti lēmuma pieņēmējam. Rodas problēma: kā izvēlēties scenāriju? Problēmas atrisinājumam tiek izmantotas spēļu teorijas metodes un kritēriji [6]: Minimaksa, Gurvica, Laplasa un citi.

1.7. Drošuma teorijas kritēriji.

Attīstīta un plaši pielietojama drošuma teorija ir veltīta tehnisko sistēmu spēju saglabāt definētos parametrus un funkcijas uzdotos apstākļos un režīmos izpētei [8]. Šī spēja var būt aprakstīta ar virkni partikulāro, vai komplekso kritēriju. Viens no teorijas pamatjēdzieniem ir veltīts elementu atteicei, bet atteicu raksturojumam bieži izmanto to varbūtību lielumus uzdotā laika periodā. Atteicu varbūtību aprēķiniem tiek pielietotas divas pamatpieejas:

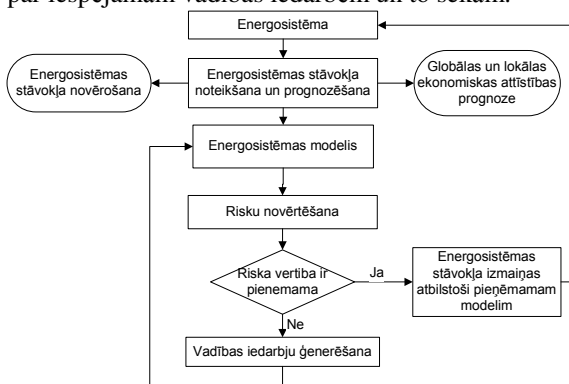
1. Analītiskā. Pierādīts, ka daudzas tehniskas sistēmas no drošuma viedokļa var būt atspoguļotas ar shēmām, kuras sastāv no atsevišķu elementu virknes, paralēliem vai jauktiem savienojumiem. Partikulāriem, bet izplatītiem praksē uzdevumiem var pieņemt, ka elementu atteices var būt aprakstītas ar eksponenciālo drošuma likumu. Šinī gadījumā, zinot elementu atteicu varbūtības izdodas analītiski aprēķināt visas sistēmas atteices varbūtību.

2. Simulācijas. Sarežģītām sistēmām analītiskā pieeja ir nepielietojama un ir jāizmanto skaitliskas metodes, ieskaitot Monte-Karlo metodi.

2. RISKU VADĪBAS METODES, ALGORITMI, MODELI UN RĪKI

2.1. Risku vadības algoritma struktūra

Energosistēmas vadības procesa pirmais etaps iekļauj (šis etaps ir raksturīgs jeb kurai reālā laikā strādājošai tehniskai sistēmai) objekta stāvokļa un ietekmējošo apkārtējās vides faktoru novērošanu un prognozēšanu. Rezultātā tiek veidots energosistēmas modelis 2.1.att. Eksperimenti ar modeli dod iespēju novērtēt risku lielumus, pieņemt lēmumus par iespējamām vadības iedarbēm un to sekām.



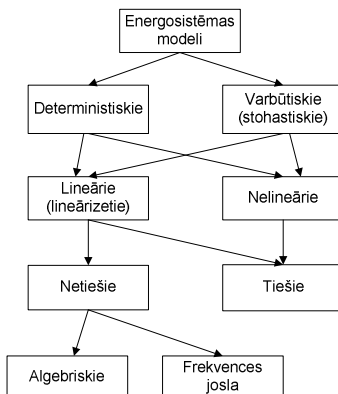
2.1. att. Risku vadības vispārinātais algoritms

Vadības iedarbes, to izvēles metode un realizācijas rīki ir stipri atkarīgi no izmaiņu energosistēmas darbības apstākļos ātruma. Izejot no procesu ātruma ir pieņemts dalīt vadības uzdevumu trijās daļās:

- Stratēģiskā plānošana;
- Operatīvā plānošana un procesu vadība;
- Procesu vadība avāriju gaitā.

2.2. Energosistēmas modeļu veidi

Energosistēmas darbības procesu sarežģītība un to vadības uzdevuma svarīgums kļuva par pamātu daudzu modeļu izstrādei. Pielietojamu dināmiskās stabilitātes novērtējumam modeļu klasifikācija dota attēlā 2.2.



2.2. att. Energosistēmas modeļu klasifikācija

Daudzus gadus energosistēmu stabilitātes novērtējumam tika izmantotas deterministiskās pozīcijas un lineārizetie energosistēmu modeļi. Tika izmantotas netiešas metodes, kuras atļauj stabilitātes novērtējuma uzdevumos apiet nepieciešamību risināt augstas pakāpes diferenciālos vienādojumus.

2.3. *Varbūtiskie, nelineārie modeļi*

Pieņemsim, ka energosistēmas sākumstāvoklis ir zināms un stacionārs, ražojama enerģija sakrīt ar patērējamo. Sistēmas topoloģija arī ir zināma. Laika momentā $t=0$ tiek sākta sistēmas procesu simulācija. Tiek uzdots režīma plānošanas laiks t_{pl} , kura garumā var notikt (vai nenotikt) virkne notikumu, kuro saraksts un varbūtības ir zināmas. Ietekmējošo energosistēmu notikumu rezultātā var būt zaudēta stabilitāte, sistēma var būt sadalīta daļās, kurās ražojama un patērējama enerģija vairs neatrodas līdzsvara stāvoklī. Tiek atslēgta slodze. Rodas ekonomiskie, vai citi zudumi. Simulācijas mērķis- lietderīguma funkcijas matemātiskās cerības noteikšana, izmantojot (1.8). Ņemot vērā lielu gadījuma faktoru skaitu var apgalvot, ka integrāla (1.8) aprēķināšanai ir jāizmanto Monte-Karlo metodi.

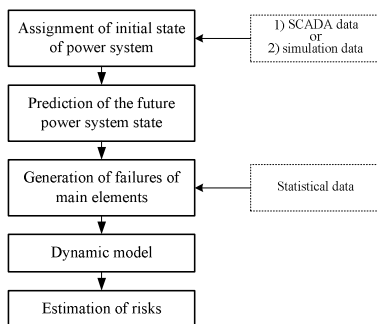
2.4. *Monte-Karlo metode kā risku rādītāju aprēķina rīks*

Algoritms sastāv no šādiem pamatblokiem:

- Energosistēmas sākumstāvokļa uzdošana. Iespējams izmantot divus pamatvariantus. Pirmais no variantiem balstās uz SCADA datu izmantošanu (topoloģija, jaudas patēriņš, ģenerējošā jauda un jaudas plūsmas). Otrajā variantā energosistēmas stāvokli uzdod persona, kas

veic darba režīma aprēķinu, izmantojot specifisku programmatūru. Attiecīgā persona pārbauda risku pieļaujamību konkrētiem darba režīmiem.

- Energosistēmas nākotnes stāvokļa prognozēšana uz konkrētu laika intervālu. Šajā stadijā visi elementi uzskatāmi par nebojātiem, un prognozētais darba režīms ir pieļaujams pārslodžu neesamības ziņā un nodrošina statisko stabilitāti (pretējā gadījumā tiek ieplānoti pasākumi nepieļaujamā režīma novēršanai).
- Ģenerators, kas modelē energosistēmas elementu atteici. Tiek modelēti energosistēmas galveno elementu īsslēgumi un atvienojumi. Tiek izmantoti energosistēmas statistiskie dati.
- Dinamiskie modeļi, kas apraksta elementu atslēgšanās izraisītos procesus energosistēmā. Šis modelis tiek izmantots atslēgšanās seku pārbaudei, ņemot vērā enerģijas piegādes neiespējamību.
- Risku novērtēšana. Tiek ņemta vērā avārijas situāciju attīstības varbūtība un nepiegādātās enerģijas izmaksas (tiek pieņemts, ka izmaksas ir zināmas).



2.3. att. Risku rādītāju aprēķina algoritms

Jāatzīmē, ka lielā mēroga avāriju izraisīto risku novērtēšanai nepieciešams ievērot pat reti notiekošus gadījumus. Šajā gadījumā Montekarlo metodes pārbažu skaits var būt ļoti liels (100 000 vai vairāk).

3. RELEJAIZSARDZĪBAS UN AUTOMĀTIKAS MODEĻI UN TO VALIDĀCIJA

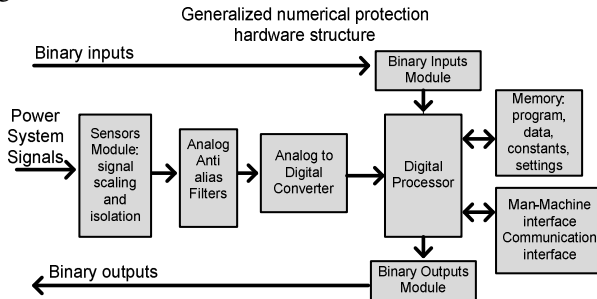
3.1. Relejaizsardzības un pretavāriju automātikas modeļu sintēze un lietošana

Apkopojot izklāstīto pirmajā nodaļā varam apgalvot:

1. Relejaizsardzība un pretavāriju automātika (RAPA) būtiski ietekmē enerģosistēmu darbību un vēlot veikt enerģosistēmas darbības simulāciju ir nepieciešams modelēt ne tikai primāro iekārtu, bet arī sekundāro, tas ir RAPA darbību. Tādējādi ir nepieciešami atbilstošie modeļi.
2. RAPA iekārtas pēc skaita ir visizplatītākais enerģosistēmu elements. Attiecīgi, modelējot lielas enerģosistēmas darbību ir jārēķinājās ar lielu RAPA modeļu skaita izmantošanas nepieciešamību. Pat salīdzinoši maza Latvijas enerģosistēma satur tūkstošus RAPA iekārtas.

Enerģosistēmās tiek ekspluatētas daudzu paaudžu iekārtas: sākot no elektromehāniskiem relējiem līdz mikroprocesoru termināliem. Attiecīgi ir nepieciešami visu veidu iekārtu modeļi. Mikroprocesoru termināli strādā uz digitālo signālu apstrādes algoritmu bāzes, ar tāda veida algoritmiem var būt aprakstīta arī analogo, ieskaitot elektromehāniskos relejus, iekārtu darbība, tāpēc, tālāk, apskatīsim tikai tādas iekārtas.

Neskatoties uz lielu RAPA iekārtu skaitu, to struktūra praktiski paliek nemainīga un atbilst attēlam 3.1.



3.1. att. RAPA iekārtu struktūra

3.2. Galvenās prasības RAPA modeļiem

Galvenās prasības ir šādas:

- RAPA modeļu reakcijai uz ieejas signāliem, kas nepieciešams katrai no aplūkojamām iekārtām, ir jāatbilst reālās iekārtas reakcijai uz ieejas signālu, kurš rodas pie uzdotiem enerģosistēmas režīma parametriem.

- Modelim kā programmatūras produktam ir jābūt viegli integrējamam programmatūras sistēmās, kas tiek izmantotas energosistēmas procesa simulācijā;
- Ja energosistēmas parametri ietekmē iekārtas reakciju un otrādi, tad iekārtas un energosistēmas modelim jābūt apvienotiem slēgta ciklā;
- Energosistēmas un dažādu aizsardzības tipu uzvedības simulācijā jāparedz mijiedarbību starp dažādiem modeļiem;

3.3. Modeļa validācijas metodoloģija

Lai atrisinātu modeļa validācijas problēmu, ir nepieciešams izstrādāt kritēriju modeļu atbilstības noteikšanai. Noformulēsim prasības RAPA iekārtām:

1. Ātrās nostrādes prasības apstākļos, kad nostrāde ir vēlama;
2. Nenostāde tad, kad nostrāde nav vēlama (nav īsslēguma un citu normālo ekspluatācijas apstākļu gadījumos).

Konkrētas iekārtas atbilstību prasības var izteikt ar efektivitātes kritēriju, kas formulēts kā divas varbūtības :

- Atteices varbūtība nostrādes nepieciešamības gadījumos – Par;
- Nostrādes varbūtība apstākļos, kad nostrāde nav vēlama (liekā nostrāde) – Pnr,

Kā papildu apstākli var izmantot:

- Nostrādes laika matemātiskā cērība – M(Tr).

RAPA modeļiem var izmantot līdzīgus kritērijus, atbilstoši Pmar, Pmnr un M(Tmr). Modeļa atbilstības pakāpi var izteikt parametru atšķirībās:

$$\begin{aligned} Da &= Par - Pmar, \\ Dn &= Pnr - Pmnr, \\ M(DT) &= M(Tr) - M(Tmr) \end{aligned} \quad (3.1)$$

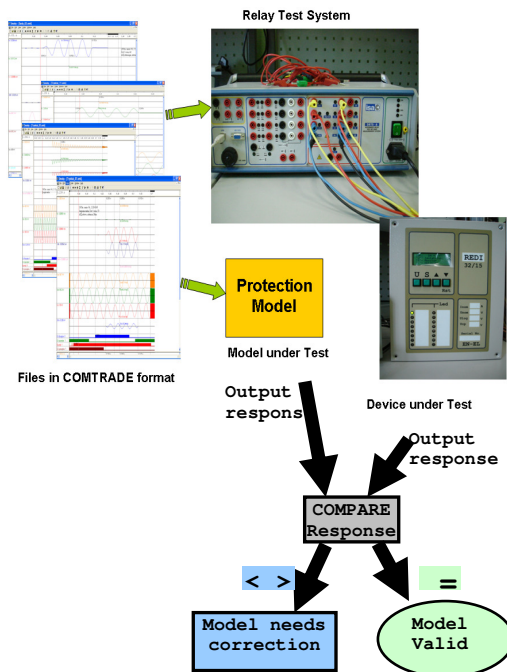
Ir redzams, ka pie nelielām atšķirībām (3.1.) atbilstošais modelis nodrošinās nepieciešamo procesu modelēšanas precizitāti. Varbūtējā problēmas formulējuma formā tas nozīmē, ka ar lielu varbūtības pakāpi procesi tiks simulēti precīzi. Par nelielām atšķirībām tiek uzskatītas atšķirības, kas ietilpst izvēlēto kritēriju Par, Pnr un M(Tr) noteikšanas precizitātes robežās. Tādējādi modeļa validācijai ir nepieciešams aprēķināt reālas iekārtas un tās modeļa atteices vai liekās nostrādes varbūtību, kā arī nostrādes laika matemātisko cerību un kritēriju (3.1.) atšķirības.

3.4. Validācijas procedūras realizācija

Pamatota uz varbūtību lieluma novērtēšanas modeļa validācijas metodoloģija var būt realizēta izmantojot Monte-Karlo metodi. Šinī gadījumā ir jāparedz vienādu testa signālu pārraidi gan uz programmatūras

modeļi, gan uz reālu iekārtu. Turklāt pietiek novērojot reālas iekārtas un modeļa reakciju, kas ļauj aprēķināt varbūtības (3.1). Reālas iekārtas un modeļa aprēķināto varbūtību atšķirību vērtība nosaka modeļa piemērotību un atbildi uz jautājumu- vai modelis ir derīgs. Testa signālu (strāvu un spriegumu analogie signāli, binārie signāli) avoti, kurus izmantojot ir iespējams novērtēt RAPA modeļa efektivitāti, var būt:

- Aizsargāta objekta vai energosistēmas sastāvdaļas programmatūras modelis, kas izveidots, izmantojot atbilstošu programmu (EMTP, EUROSTAG) un ļauj ģenerēt aizsargāta objekta testa signālus dažādos ekspluatācijas apstākļos, ieskaitot ārkārtas situācijas[3]. Programmatūras modeļa izmantošanas priekšrocība ir ierobežojumu neesamība, veicot simulāciju mainīgos apstākļos.
- Kā testa signālus var izmantot reālos, energosistēmas ekspluatācijas gaitā ierakstītos datus (oscilogrammas). Par šādu signālu avotu var kalpot digitālās avārijas procesu reģistrējošās iekārtas un RAPA ierīces, kurām ir procesu ieraksta funkcija. Diemžēl salīdzinājumā ar iespējamo simulācijas gadījumu skaitu oscilogrammu skaits ir ierobežots. No otras puses, ierakstītu testa signālu izmantošana ļauj mainīt reālas iekārtas darbību reālos apstākļos un atklāt trūkumus, kurus nevar atklāt, izmantojot modelēšanu. Testa signāli jāattēlo digitālā formātā (modeļa testēšanai) un kā reālas strāvas un spriegumus (iekārtas testēšanai). Visiem iepriekš minētajiem avotiem testa signāli tiek attēloti kā digitāli to ekvivalenti. Signāla, kas attēlots kā digitāla ekvivalenta nemainīga vērtība, konversijas funkciju var pielietot ar jebkuras mūsdienīga releja testa sistēmas palīdzību (FREJA 300 vai ISA-DRTS). Sākotnējie digitālie dati jāattēlo kā datu faili COMTRADE formātā. Vienota COMTRADE standarta esamība ļauj izveidot testa signālu bibliotēku, kurā var izmantot gan failus, kas izveidoti programmatūras modeļa simulācijas rezultātā, gan pārejas procesā iegūtas reālas oscilogrammas. Modeļa validācijas process redzams 3.2. attēlā



3.2. att. Modeļa validācijas procedūra

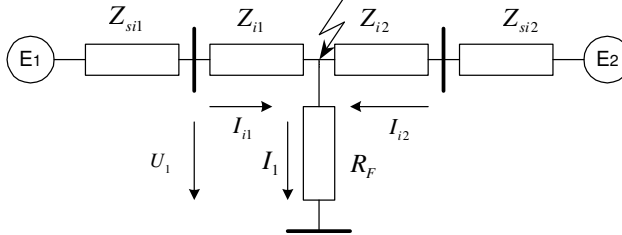
3.5. Uz Monte-Karlo metodi balstīts distantaizsardzības darba algoritms

Distantaizsardzība ir visizplatītākais augstsprieguma elektropārvades līniju aizsardzības veids. Aizsardzības pamatprincips balstās uz strāvu un spriegumu mērīšanu, kā arī pretestības aprēķināšanu starp aizsardzības terminālu un bojājuma vietu elektropārvades līnijā. Aizsardzības darba efektivitātes palielinājums iespējams, izmantojot adaptīvo pieeju. Šajā gadījumā aizsardzība atkarībā no kontrolējamā procesa parametriem var mainīt aizsardzības zonu iestatījumus. Mikroprocesoru tehnikas straujā attīstība palielina iespējas ieviest sarežģītākas lēmuma par aizsardzības nostrādi vai nenostādi pieņemšanas procedūras.

Kā piemērs tiek aplūkota pirmā aizsardzības zona no visbiežāk sastopamā bojājuma veida – vienfāzes zemesslēguma. Tiek apskatīta iespēja aizstāt deterministisko pieeju ar mūsdienīgu – varbūtisko – pieeju, kuras

izmantošanas gadījumā var būt nepieciešams izmantot Monte-Karlo metodi reālā laika režīmā.

Algoritms izmanto statistisko informāciju par nejausiem parametriem un lielumiem (sistēmas ekvivalentās pretestības elektropārvades līnijas nenovērojamajā galā un strāvas un sprieguma vektoru mērījumu kļūdas).



3.3. att. Pārvades sistēmas ekvivalenta vienlīnijas shēma vienas fāzes-zeme bojājuma gadījumiem.

Attālumi līdz bojājumiem L_F un R_F saistīti ar mērāmajiem strāvu I un spriegumu U vektoriem un līnijas tālā gala nezināmo ekvivalento pretestību, Z_{si2} , ko tuvāk var raksturot ar sekojošu attiecību:

$$L_F = \Phi(I, U, Z_{si2}) \quad (3.2)$$

kur Φ – procedūra, pēc kuras aprēķina L_F un R_F atrašanās attālumu. Procedūra izmanto kontrolējamo strāvu un spriegumu mērījumu rezultātus un informāciju par pretestības Z_{si2} vērtību.

Ņemot vērā, ka mērāmās strāvas un sprieguma vērtības satur gadījuma kļūdas – attiecīgi ΔI un ΔU – un ka nekontrolējamās pretestības Z_{si2} vērtības var uzskatīt par nejausām, izteiksmei (3.2) var uzskatīt par galveno, aprēķinot attālumu līdz bojājuma L_{Fest} un R_{Fest} vietai vai tā skaitliskās vērtības.

Lai aprēķinātu L_{Fest} sadalījuma blīvumu $g(L_{Fest})$, pamatojoties uz (3.2), nepieciešams zināt relatīvo sadalījuma blīvuma funkciju $g(I, U, Z_{si2}/I_{est}, U_{est})$, kā arī strāvas, sprieguma un pretestības sadalījuma blīvumu, kas atbilst iegūtajiem I_{est} , U_{est} mērījumiem.

Taču, lai nodrošinātu šo uzdevumu izpildi, nepieciešams veikt daudzus izmēģinājumus un aprēķinus, kas prasa ievērojamu laiku.

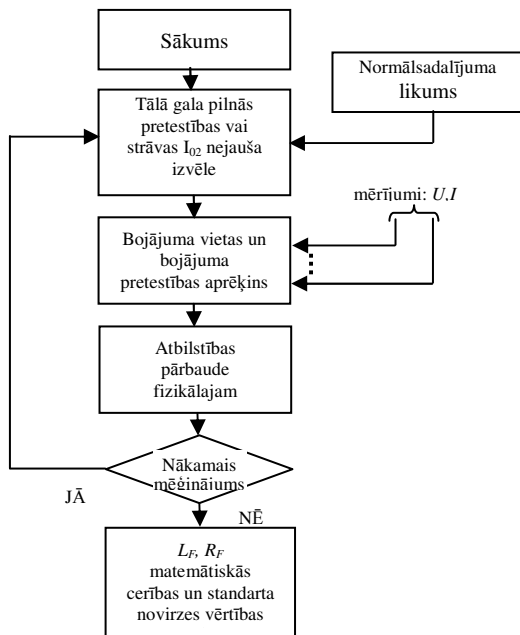
Lai efektīvāk aprēķinātu nosakāmo sadalījumu, nepieciešams izmantot linearizācijas metodi, ņemot vērā mērāmo lielumu fizikālo raksturu, kā arī relatīvi nelielās kļūdu vērtības; ja matemātiskās cerības vērtība ir nulle, var noformulēt sekojošo:

$$\begin{aligned} E[\Phi(I, U, Z_{si2})] &\cong E[\Phi(I_{est}, U_{est}, Z_{si2})] \\ \sigma[\Phi(I, U, Z_{si2})] &\cong \sigma[\Phi(I_{est} + \Delta I, U_{est} + \Delta U, Z_{si2})] \end{aligned} \quad (3.3)$$

kur $E(\dots)$ apzīmē matemātisko cerību, $\sigma(\dots)$ apzīmē standartnovirzi. Izteiksme(3.2) piemērojama vienīgi lineārām funkcijām. Aplūkojamajā

nelineārajā gadījumā izteiksmes (3.3) izmantošana pieļaujama praktisku uzdevumu risināšanai. Iespējams efektīvāk izmantot Monte-Karlo metodes procedūras.

Matemātiskās cerības $E[L_F]$, $E[R_F]$ un standartnovirzes $\sigma[L_F]$, $\sigma[R_F]$, kas pamatojas uz Montekarlo metodes izmantošanu, novērtēšanas algoritms parādīts 3.4. attēlā.



3.4. att. Attāluma līdz bojājumam un išslēguma pārejas pretestības novērtēšanas algoritms

4. ENERĢOSISTĒMU STABILITĀTES ZAUDĒJUMA PROCESU MODELĒŠANAS PIEMĒRI

4.1. Asinhronās gaitas novēršanas automātikas darbības modelēšana

Asinhronās gaitas novēršanas automātikas (AGNA) darbības mērķis ir atklāt nestabilas enerģijas plūsmas un sadalīt enerģosistēmas tīklu iepriekš noteiktās zonās, gadījumā, ja parādās pārmērīga fāzes leņķa starpība starp enerģosistēmas ģeneratoriem. Lai izpildītu šo uzdevumu AGNAi ir jādiferecē enerģijas svārstības, kuras pāriet uz asinhronās gaitas

režīmu, no procesiem, kuri neved pie stabilitātes pārtraukšanas un no cita veida traucējumiem, pirmkārt, no īsslēgumiem.

Var tikt izmantoti dažī AGNA algoritmi:

- Pretestības, kura ir mērāma releja uzstādīšanas vietā, izmaiņas kontrole. Enerģijas svārstības raksturojas ar lēnu pretestības kustību pretestības plaknē. Pretestības izmaiņas ātrumu parasti nosaka slīdes starp līdzvērtīgiem sistēmas avotiem lielums. Praksē šī jēdziena realizācija tiek panākta ar pretestības kustības kontrolējamā līnijā mērījumiem.
- Sprieguma svārstību kontrolējamā līnijā izmaiņu kontrole. Kad enerģijas svārstību centrs atrodas uz kontrolētās līnijas, tad sprieguma svārstību centru var aprēķināt, zinot vietējo spriegumu un leņķi starp spriegumu un līnijas strāvu. Sprieguma vērtība svārstību centrā mainās no nulles (ja leņķis starp diviem avotiem ir 180 grādi) līdz maksimālai vērtībai (ja leņķis starp diviem avotiem ir 0 grādi).
- Fāzes leņķa starptību kontrole starp ģeneratoru spriegumiem. Spriegumi tiek modelēti, izmantojot kontrolējamās līnijas spriegumu un strāvu, kā arī sistēmas ekvivalentās pretestības no ierīces atrāšanas vietas līdz ģeneratoriem;
- Sinhrono sprieguma mērījumu izmantošana. Spriegumu sinhronie mērījumi, kas var būt veikti ar globālas pozicionēšanas sistēmas (GPS), ļauj veikt leņķa starp spriegumiem aprēķinu un novērtēt enerģijas svārstību procesa esamību.

Zemāk izskatīsim pamatotu uz leņķa φ starp diviem modelētiem spriegumiem U_1 un U_2 kontroles [9, 10] AGNA darbības principu. Lai modelētu šos spriegumus, tiek izmantota divu agregātu ķēde - reālās sistēmas ekvivalents (attēls 4.1.). Spriegumi U_1 un U_2 tiek modelēti saskaņā ar šādu vienādojumu sistēmu:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= k_1 \cdot \underline{U} + \underline{Z}_{K1} \cdot \underline{I} \\ \underline{U}_2 &= k_2 \cdot \underline{U} + \underline{Z}_{K2} \cdot \underline{I} \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

kur : U – spriegums kontrolējamā elektrolīnijā;
 I – elektrolīnijas strāva ;
 $k_1, k_2, \underline{Z}_{K1}$ un \underline{Z}_{K2} ir iestatījumi, kas tiek izvēlēti atkarībā no attiecīgās pārvades līnijas parametriem un energosistēmas ekvivalentiem parametriem.

shēmas: 3 ģeneratoru un 8 spēka kopņu sistēmu, kā arī sarežģītāku IEEE 39 spēka kopņu enerģosistēmas piemēru.

Dažādi enerģosistēmu režīmi (īsslēgums uz pārvades līnijām, slodzes/ģenerācijas nesankcionēta atslēgšana, līniju atslēgšana un slodzes izmaiņas) tika modelēti, izmantojot EUROSTAG [17] programmu.

5. IZKLIEDĒTAS ĢENERĀCIJAS AVOTI UN ENERĢOSISTĒMAS STABILITĀTE

5.1. Nākotnes enerģosistēma ar lielu izkliedēto ģenerācijas avotu skaitu

Vēlme palielināt primāro enerģijas avotu efektivitāti, samazināt enerģijas zudumus tīklos, nodrošināt enerģētikas attīstības ilgtspēju ir radījusi interesi pētījumiem, veltītiem izkliedētās ģenerācijas plašas izmantošanas iespējām enerģosistēmās.

Mazas jaudas ģeneratoru, kuri izmanto tvaika-gāzes tehnoloģijas koģenerācijas režīmā, vēja vai saules enerģiju, degvielas šūnas, izstrāde un ražošana ļoti strauji attīstās. Šādi enerģijas avoti var nodrošināt pilnībā, vai gandrīz pilnībā, augošās elektroenerģijas piegādes prasības. Alternatīvu enerģijas avotu izmantošana, to izvietošana blakus patērētājiem var samazināt strāvas un jaudas, kas tiek pārraidītas pa augstsprieguma vai supraugstsprieguma tīkliem, tādējādi ietaupot kapitālieguldījumus tīklu attīstībai un ekspluatācijai, enerģijas zudumu atmaksāšanai u drošuma līmeņa uzturēšanai.

Šajā sadaļā atspoguļoti rezultāti, kuri iegūti pētot nākotnes enerģosistēmas, kas satur ievērojamu izkliedēto enerģijas avotu (IEA) (angļu valodā pieņemtais saīsinājums – DER) skaitu. Tiek saglabāts galvenais šī darbā uzdevums un jautājums - kā IEA ietekmē enerģosistēmu stabilitātei un lielā mēroga avāriju iespējamībai..

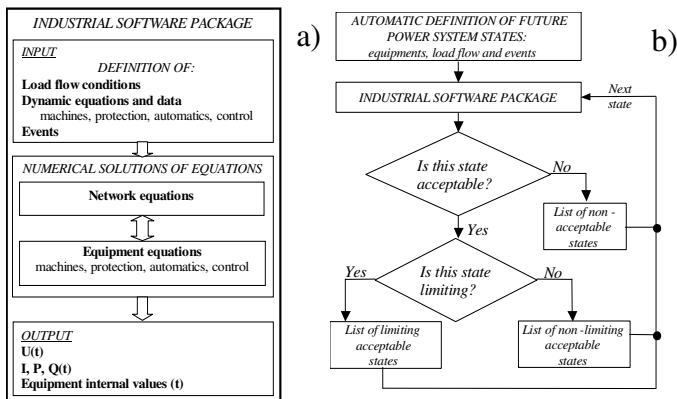
Vēl viens jautājums, kurš tiek uzdots pēdējā laikā: vai ir iespēja turpināt IEA ekspluatāciju pēc neparedzētas enerģosistēmas dalīšanās un vai ir iespēja veikt automātiski atkārtoto atpakaļ ieslēgšanos uz augstsprieguma līniju pēc tās darbības atjaunošanas? Lai atbildēt uz šiem jautājumiem šinī nodaļā izmantota pieeja, kas ir atšķirīga no iepriekšējām [2].

Tiek meklētas atbildes uz šādiem jautājumiem:

1. Kā pārvades elektrotīkla stabilitāti ietekmēs IEA ieviešana?
2. Kādām jābūt simulācijas metodēm?
3. Kā mainās tehniskas prasības sadales elektrotīklam ar IEA?

Šim nolūkam mēs piedāvājam izmantot rūpniecisko programmatūru, kas simulē elektromehāniskos pārejas procesus sistēmās, kuras satur gan tradicionālos, gan IEA ģeneratorus un ir papildinātas ar:

- bloku (procedūru), kas automātiski paredz iespējamās turpmākos nākotnes enerģosistēmas stāvokļus, ieskaitot slodzes plūsmas, aprīkojumu ar dinamisko aprakstu un notikumus;
- bloku (procedūru), kas nosaka vai no leņķa stabilitātes viedokļa enerģosistēmas stāvokļi ir pieņemami vai nepieņemami.



5.1. att. a) Pārejas simulācijas posmi, izmantojot rūpnieciskās programmatūras paketes; b) Paplašināti bloki nākotnes enerģosistēmas dinamisko ierobežojumu novērtēšanai

5.2. Nākotnes enerģosistēmas stāvokļu klasifikācija

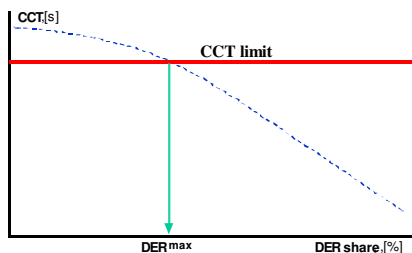
Nākotnes enerģosistēmas pieņemamu vai nepieņemamu stāvokļu klasifikācija ir balstīta uz pārvades elektrotīkla stabilitātes rezervju pietiekamības novērtēšanu. Par pietiekamības kritēriju tiek pieņemts pieļaujama (kritiskais) īsslēguma atslēgšanas laiks (critical clearing time-CCT).

CCT ir noteikts kā maksimālais bojājuma ilgums, kura rezultātā nerodas viena vai vairāku ģeneratoru sinhronizācijas zudums [9].

Minimālo CCT vērtību ierobežo relejaizsardzības darbības laiks un jaudas slēdžu ātrdarbība.

Pieļaujami stāvokļi ir tādi, kuros CCT vērtība pārsniedz CCT ierobežojumu. Nepieļaujami stāvokļi ir tādi, kuros CCT ir zemāks par CCT ierobežojumu vērtību. IEA pielietojums nevar būt lielāks par to, kurš prasa maksimāli ātrdarbīgo relejaizsardzību un jaudas slēdžu izmantošanu (skatīt 5.2. attēlu).

Aprakstītais algoritms tika izmantots, lai izpētītu Baltijas valstu (Igaunijas, Latvijas un Lietuvas) enerģosistēmu ar savienotajām Krievijas Ziemeļrietumu un Baltkrievijas daļām.



5.2. att. Maksimāli iespējama IEA pielietošana

5.3. Atlasītie rezultāti Igaunijas, Latvijas, Lietuvas, kā arī kaimiņvalstu – Krievijas un Baltkrievijas - elektroenerģijas tīkli veido elektrisko gredzenu, kas sastāv no 330 un 750kV līnijām[10]. Apskatāmajā integrētajā enerģosistēmā 750kV tīkls nav noslēgts cilpā.

Konkrētajā sistēmā bīstamākais traucējums no stabilitātes viedokļa ir pēkšņs 750kV līnijas pārrāvums, kas savieno Ļeņingradas s/st un Kaļiņinas atomelektrostaciju (AES).

Ja 750 kV līnija tiek atslēgta, tad elektroenerģija, kas plūda pa šo elektrolīniju pirms avārijas stāvokļa, tiks nekavējoties sadalīta starp daudziem citiem tīkla elementiem, ieskaitot līnijas ar zemākiem spriegumiem. Elektrotīklam 330kV nav pietiekami augsts stabilitātes līmenis, lai pārraidītu pamatīgi paaugstinātas strāvas vērtības (salīdzinot ar strāvas vērtību pirms avārijas apstākļos). Tādējādi 750kV tīkla elementu avārijas atslēgšanās rezultātā var pazust 330kV tīkla stabilitāte.

Monte-Karlo simulācijai tika sagatavots 110 kV mezglu saraksts, kuriem var tikt pievienoti elektrotīkli ar IEA. Iespējamie mezgli ar sadales elektrotīkliem, kas satur IEA, tika izvietoti Igaunijā, Latvijā, Lietuvā, Baltkrievijā un Krievijas Pleskavas apgabalā, kopumā aptuveni 130 mezgli.

Pārejas procesu mijiedarbība pārvades un sadales tīklos var ietekmēt pārvades sistēmas stabilitāti gan pozitīvi, gan negatīvi. IEA generatoru apstāšanās var palielināt vai arī samazināt elektroenerģijas plūsmu pārvades līnijā, tādēļ rodas sistēmas stabilizācija vai destabilizācija.

Pozitīvos gadījumos, ja IEA ir izvietoti galvenokārt pārvades koridora ievades pusē (attēlā 5.3. a. apskatāms šis ir gadījums).

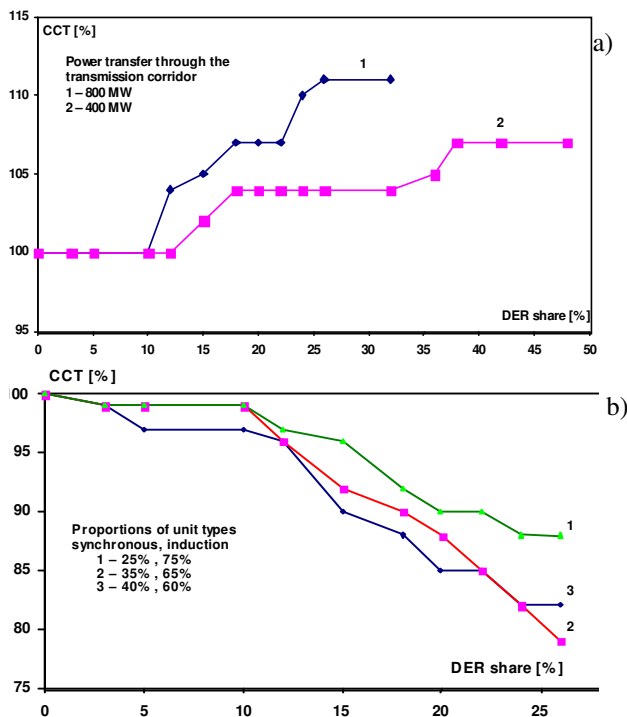
Negatīvā CCT samazināšanās ietekme tika konstatēta citās veiktajās šī darbā stimulācijās ietvaros. Šādas situācijas rodas divos gadījumos: ja IEA ir izvietoti galvenokārt pārvades koridora izvades pusē,

un ja IEA ir vienmērīgi izkļiedēti visā sistēmā. attēlā 5.3. b. redzama iepriekš minētā samazināšanās ietekme.

Lai paskaidrot aprakstīto fenomenu ir jāņem vērā IEA sinhrono ģeneratoru dinamiskā uzvedība pēc bojājumiem pārvades līnijā.

IEA vienības to mazas jaudas dēļ ir aprīkotas ar mazas mehāniskas inerces rotoriem un ir ļoti jutīgas pret bojājumiem, kas radušies pārvades līnijās. Pastāv divu veidu IEA reakcijas, kas ietekmē CCT vērtības:

- IEA darbības apturēšana, ko veic to aizsardzības sistēma, reaģējot uz atkārtotiem sprieguma kritumiem (svārstībām) augstsprieguma līnijās;
- Ievērojamu un pēkšņu pārvades tīklu ekspluatācijas apstākļu maiņu rezultātā IEA ģeneratoru nesinhronā darbība. Šādā gadījumā sistēmas sinhronizāciju var uzturēt lielle ģeneratori, bet šis režīms ir bīstams pašiem IEA. Ņemot vērā šo faktu visi IEA sinhronie ģeneratori veiktās simulācijas tika aprīkoti ar aizsardzībām, kuras novērš asinhronās gaitas režīmu apstākļus.



5.3. att. a) CCT līmeņa paaugstināšanās apstākļi, b) CCT pazemināšanās apstākļi

Pieņemamo stāvokļu robežjosla tika noteikta $IEA_{\max} \approx 25\%$ no kopējā Nākotnes energosistēmas ģenerētā enerģijas apjoma. Tas samazina CCT vērtību līdz 79% (ar 100% atdevi, ražojot bez IEA). 5.3. attēlā redzamas noskaidrotas tendences, kas atšķiras no atzīmētām proporcijām, ja mainās attiecība starp sinhroniem un indukcijas ģeneratoriem.

Robežu starp pieņemamu un nepieņemamu stāvokli iespējams paplašināt, ieviešot vienu no šīm opcijām:

6. SECINĀJUMI

1. Dažnedažādu iemeslu dēļ energosistēmās var notikt un regulāri notiek lielā mēroga avārijas un izsauc milzīgos ekonomiskos un sociālos zudumus.
2. Risku vadība energosistēmās ir plaši atzīts sava svarīguma dēļ uzdevums, kura atrisināšanai vēl nav izstrādātas vienotas un pietiekoši argumentētas metodikas.
3. Plaši pielietojamam, deterministiskām kritērijiem N-1 piemīt būtiskie trūkumi un nepilnības, to praktiski pielietojot parādās situācijas, kad ir jāpieņem subjektīvie, vāji pamatoti risinājumi. Šis kritērijs nedot iespēju novērtēt energosistēmu un pretavāriju automātikas uzvedību stabilitātes zuduma gadījumos.
4. Statistisko lēmumu teorija piedāvā risku vadības kritēriju-lietderīguma funkcijas matemātisko cerību, kurš dod iespēju aprakstīt energosistēmu vadības optimizācijas uzdevumus vienkriteriālā nostādnē, ņemot vērā vienlaicīgi nevēlamo notikumu varbūtību, to sekas un lēmuma pieņēmēja vēlmi aiziet no lieliem zaudējumiem, ja tie parādās pat retos gadījumos.
5. Drošuma teorijas pieejas var būt izmantotas risku lieluma noteikšanas uzdevumu atrisināšanas atvieglojumam, aprēķinājāt ar šīs teorijas paņēmieniem nevēlamo notikumu varbūtības.
6. Lielas grūtības izsauc avāriju izsaukto zudumu novērtējums. Nepiegādātas enerģijas izmaksas nevar kalpot par vienīgo indikatoru risku vadības uzdevumos. Zudumu novērtējumu aprakstam var izmantot pārbaudītos energoobjektu projektēšanas praksē lēmumu pieņemšanas noteikumus.
7. Risku novērtējums ir konjugēts ar nopietnām grūtībām, ko izraisa matemātiskās (lielais mainīgo skaits, sarežģīta struktūra un vienādojumi, nepieciešamība aprēķināt vairāk kārtējos integrālus) un informācijas

- (nenoteiktu parametru esamība, zaudējumu funkcijas reprezentācijas sarežģītība) pazīmes.
8. Risku novērtēšanai ir jāizmanto varbūtiskie energosistēmas modeli un Monte-Karlo metode.
 9. Risku novērtēšana prasa energosistēmas primāro (ģeneratori, transformatori, līnijas, slodzes...) un sekundāro (relejaizsardzības, pretavāriju automātika...) elementu darbības procesu modelēšanu.
 10. Monte-Karlo metodes izmantošana energosistēmu risku novērtēšanas uzdevumos prasa lielus izdevumus aprēķiniem. Lai tos samazināt var izmantot uzdevuma specifiku un atteikties no maz informatīvo procesu (normālais režīms) modelēšanas.
 11. Risku novērtēšanai ir jāizmanto statistiskie dati par īsslēgumiem un iekārtu un sistēmu bojājumiem energosistēmās.
 12. Digitālo signālu apstrādes algoritmi var būt izmantoti arī analogo iekārtu modelēšanai un tāpēc tie ir piemēroti risku novērtēšanas uzdevumu atrisināšanai.
 13. RAPA Iekārtu un attiecīgi to modeļu reakcijas noteikšanas problēmu var sadalīt trijās daļās:
 - Tehniskā pilnība, kura raksturo iekārtu atbilstību uzstādītiem mērķiem pie nosacījuma, ka tā ir darbderīgā stāvoklī.
 - drošums, kurš raksturo iekārtu atteicu varbūtību elementu bojājumu dēļ.
 - piemērotība ekspluatācijas apstākļiem, kura raksturo apkalpojoša personāla kļūdu iespējamību.
 14. Tehniskās pilnības modelēšana var būt veikta izmantojot dažādas sarežģītības modeļus. Modelēšanas gaitā var izmantot vienkāršotus ieejas ķēžu modeļus, kuru raksturlīknes, pateicoties tehnoloģiskiem sasniegumiem, tuvojas ideāliem.
 15. Modeļu izmantošanas pamatojumam ir nepieciešama modeļu validācijas metodika. RAPA modeļu validācija var būt veikta salīdzinājāt modeļa un reālās iekārtas reakciju uz vienādiem ieejas procesiem.
 16. Pat visprecīzākie RAPA tehniskās pilnības modeli neatspoguļo iekārtu drošumu un piemērotību ekspluatācijas apstākļiem.
 17. Energosistēmu sabrukuma procesa simulācija var būt veikta izmantojot EUROSTAG programmatūru.
 18. Sabrukuma procesu aprēķiniem nepieciešami asinhronas gaitas novēršanas automātikas modeli.
 19. Asinhronas gaitas novēršanas automātikas vienkāršotais modelis, kurš neizmanto iepriekš aprēķinātos iestatījumus, dod precīzus (no

varbūtiskas pieejas skata) energosistēmas sabrukuma procesu aprēķinu rezultātus.

20. Alternatīvu enerģijas avotu izmantošana, to izvietošana blakus patērētājiem var samazināt strāvas un jaudas, kas tiek pārraidītas pa augstsprieguma vai supraugsta sprieguma tīkliem, tādējādi ietaupot kapitālieguldījumus tīklu attīstībai un ekspluatācijai, enerģijas zudumu atmaksāšanai u drošuma līmeņa uzturēšanai.
21. Palielinājāties izkliedētu enerģijas avotu skaitam pieaugs arī to ietekme uz kopējo lielas energosistēmas stabilitāti. Ietekme var būt pozitīva un negatīva. Kopējā gadījumā būs nepieciešams pielietot speciālo automātiku, un ierobežot izkliedētu avotu jaudu.
22. Sadales tīkliem ar IEA ir iespējami salas režīmi, kuru nodrošināšana samazina zudumus sistēmu sabrukšanas gadījumos, bet uzturēšana prasa speciālas automātikas izveidi.
23. Salu apvienošanai vienotā energosistēmā var būt izmantotas dažādas pieejas, viena no tam ir tuva pēc būtības izmantojamiem energosistēmās līniju atkārtotas ieslēgšanas gaitā.

7. IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

- [1] Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada. U.S.-Canada Power System Outage Task Force, April 2004/ Available at <https://reports.energy.gov/>
- [2] Final report of System disturbance on 4 November 2006. UCTE, 2006. – 84 p./ Available at <https://www.entsoe.eu/index.php?id=59>
- [3] Final Report of the Investigation Committee on the 28 September 2003 Blackout in Italy. UCTE, 2004. – 128 p./ Available at <https://www.entsoe.eu/index.php?id=59>
- [4] Final report on the course of events of Power failure in Eastern Denmark and Southern Sweden on 23 September 2003. UCTE, 2003. – 24 p./ Available at <http://www.energinet.dk/NR/rdonlyres/BC99F243-304D-4ADD-B769-46351A959C85/0/Powerfailurereportsept2003.pdf>
- [5] Makarov, Y.V. et al. Blackout Prevention in the United States, Europe, and Russia // Proceedings of the IEEE, Vol. 93, NO. 11, Nov. 2005. – p. 1942 – 1955
- [6] M. DeGroot, “Optimal Statistical Decisions”, McGraw-Hill Series in Probability and Statistics, 1970
- [7] UCTE Operation handbook – Policy 3: Operational Security. UCTE, 2009/ Available at <https://www.entsoe.eu/index.php?id=57>

- [8] W. Li, "Risk assessment of power systems: Models, methods, and applications" IEEE press series, 2005, 325 p
- [9] Brian Stott, Ongun Alsac, Alcir J Monticelli. Security analysis and Optimization // Proceedings of IEEE. – Dec.1987. - vol.75, iss.12. – p.1633-1644
- [10] Совалов С.А., Семенов В.А. Противоаварийное управление в энергосистемах. Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 416 с.
- [11] Task force on probabilistic aspects of reliability criteria, "Probabilistic security assessment for power system operations", IEEE PES General meeting Proc., vol.1, p.212-220, 2004
- [12] IEEE PES CAMS, task force, "Initial review of methods for cascading failure analysis in electric power transmission systems", IEEE PES General meeting Proc., Jul. 2004
- [13] M.Groetaers dos Santos, M.T. Schilling, R. Billinton, "Bibliography on Power Systems Probabilistic Security Analysis 1968-2008", The Berkeley Electronic Press: International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol.10, Iss. 3, Article 1, 2009
- [14] I. Dobson, "Where is the edge for cascading failure?: challenges and opportunities for quantifying blackout risk", IEEE PES General Meeting Proc., p.1-8, June 2007
- [15] J. Barkans, D. Zalostiba, "Protection against Blackouts and Self-Restoration of Power Systems", Riga, RTU Publishing House, 2009, p. 142
- [16] CIGRE TF 38.03.12 (R. J. Marceau and J. Endrenyi, Chairmen), "Power system security assessment: A position paper," Electra, no. 175, pp. 48-78, Dec. 1997
- [17] EUROSTAG Release 4.2 Package Documentation, October 2002
- [18] Bondarenko A., Gerikh V., Kreslins V. N-1 reliability criterion interpretation // Proceedings of CIGRE 2006, C2-106
- [19] G.A. Korn and Th.M. Korn. Mathematical handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems and Formulas for reference and Review. Second, Enlargend and revised edition. McGraw-Hill Book Company, 1968.