

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Artjoms OBUŠEVS

Doktora studiju programmas „Enerģētika un elektrotehnika” doktorants

**PĀRVADES TĪKLA ATTĪSTĪBAS PLĀNOŠANAS METODOLOĢIJA
IEVĒROJOT ELEKTROENERĢIJAS TIRGU**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
Dr. sc. ing., Profesore
I. OĻEINIKOVA

RTU Izdevniecība
Rīga 2014

Obuševs A. Pārvades tīkla attīstības plānošanas metodoloģija ievērojot elektroenerģijas tirgu. Promocijas darba kopsavilkums.– R.: RTU Izdevniecība, 2014.– 32 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Promocijas padomes P-05 (Enerģētika) 2014. gada 20. oktobra lēmumu Nr. 14/14



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

ISBN 978-9934-10-624-8

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2014.gada 27. novembrī plkst. 15:00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 306. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, *Dr. habil. sc. ing.* **Antans Sauhats**
Rīgas Tehniskā universitāte/Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte

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

Vadošais pētnieks, *Dr. sc. ing.* **Arturas Klementavičius**
Lietuvas enerģētikas institūts/Sistēmu kontroles un automatizācijas laboratorija

APSTIPRINĀJUMS

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

Artjoms Obuševs

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 3 nodaļas, secinājumus un rekomendācijas turpmākam darbam, izmantoto informācijas avotu sarakstu, 4 pielikumus, 28 tabulas un 43 attēlus, kopā 110 lappuses. Izmantoto informācijas avotu sarakstā ir 70 nosaukumi.

SATURS

Saturs.....	4
Promocijas darba aktualitāte.....	5
Promocijas darba mērķis un uzdevumi.....	5
Pētījuma līdzekļi un metodes.....	6
Promocijas darba zinātniskā nozīme.....	6
Promocijas darba praktiskā nozīme.....	6
Promocijas darba aprobācija.....	7
Publikācijas.....	8
Promocijas darba struktūra un apjoms.....	9
1. Pārvades tīkla plānošanas apsvērumi.....	9
1.1. Pārvades tīklu plānošana liberalizētā vidē.....	10
1.2. Mūsdienīgu enerģosistēmu attīstība ievērojot atjaunojamās enerģoresursus, Eiropas mērķus un Pārvades tīklu attīstību.....	11
2. Attīstības procesa modelēšana.....	12
2.1. Pamatnostādnes.....	12
2.1.1. Sociālā labklājība.....	13
2.1.2. Elektroenerģijas cenas noteikšanas mehānismi.....	13
2.2. Ilgtermiņa plānošanas metodoloģija regulēšanas un konkurences apstākļos.....	15
2.3. AC/DC SCOPF formulējums.....	17
2.4. ACOPF un DCOPF modeļu salīdzinājums attīstības plānošanai.....	20
2.5. Optimālais jaudas plūsmu sadalījums ievērojot drošības ierobežojumus.....	22
2.6. Vienkāršotā ģenerējošo vienību optimālā izvēle.....	23
3. Modelēšanas tehnika.....	24
3.1. Elektrisko tīklu dinamiskā modelēšana.....	24
3.2. Piemēra izpēte. Piemērošana uz modificētās Garver 6-mezglu sistēmas.....	26
3.3. Piemēra izpēte. Piemērošana uz Baltijas enerģosistēmas.....	27
Secinājumi un rekomendācijas turpmākajam darbam.....	29
Izmantoto informācijas avotu saraksts.....	29

PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE

Lai sekmēt 2020. gada mērķus klimata jomā un novērtēt atjaunojamas enerģijas avotu tehnisko un ekonomisko ietekmi uz pārvades tīkliem, ir izveidotas dažas teorijas, kas balstās uz investīciju ietekmi uz sociālo izmaiņu konkurētspējīgā tirgū un noslēdzošām izmaksām. Elektroenerģijas tirgus un viedo tīklu tehnoloģijas (SGT) integrācija enerģētikas nozarē daudzās valstīs rada pavisam jaunas problēmas no dažādām perspektīvām:

- Energosistēmu vadība un drošums;
- Tīklu plānošana ievērojot nākotnes nenoteiktības;
- Atjaunojamo energoresursu integrācija dažādos sprieguma līmeņos;
- Eiropas Savienības iekšējā elektroenerģijas tirgus liberalizācija;
- Viedo tīklu, informācijas un komunikāciju tehnoloģiju (ICT) risinājumu ieviešana.

Eksistē vairākas pārvades tīklu attīstības plānošanas metodikas un instrumenti, lai iegūtu optimālo risinājumu pārvades attīstības problēmā: Pārsvārā izmantojot klasiskās optimizācijas metodes: lainerā programmēšana, dinamiskā programmēšana, nelineārā programmēšana, jaukto veselo skaitļu programmēšana, Bendera un hierarhiskas dekompozīcijas metodes utt. [1,2].

Pārvades tīklu attīstības metodes atrod optimālo attīstības plānu, izmantojot aprēķinu procedūras, kuras atrisina matemātiski formulēto problēmu. Informācija par attīstību aprēķina periodā ir nenoteikta, tādēļ pieņemtos lēmumus nepieciešams regulāri precizēt. Attīstības problēmu operatīvai risināšanai nenoteiktības apstākļos izmanto optimizāciju ar mērķa funkciju, lai novērtētu katra attīstības plāna labumu, ievērojot ierobežojumu kopu. Ierobežojumi iekļauj daļu no tehniskiem, ekonomiskiem un drošuma rādītājiem energosistēmas attīstības procesa modelēšanai [1].

Vairākums pētījumu apraksta tikai statiskos modeļus un neievēro papildus faktoros, kuri var ietekmēt tīklu attīstību nākotnē. Mūsdienas tīkla darbības apstākļi rada jaunas prasības pārvades tīklu plānošanā, kuras ietver jauno metožu un algoritmu izstrādi. Piedāvāta metodoloģija var tikt izmantota dažādiem mērķiem to starp attīstības plānošanā un energosistēmu drošuma analizē. Tās izmantošana ļaus pārvades tīkla inženierim pieņemt lēmumus, izvērtēt projektēšanas variantus, veikt tehnoloģiju izvēli, apkopot reģionālo sistēmu, noteikt caurlaides spējas starp sistēmām, ņemot vērā piedāvājumu un pieprasījumu dinamiku.

Dotā darbā ir parādīta jauna deterministiska koncepcija ar dinamisku pieeju pārvades tīklu attīstības plānošanai pilnīgās konkurences liberalizētos elektroenerģijas tirgus apstākļos, pamatojoties uz tehniskiem un ekonomiskiem regulēšanas principiem.

PROMOCIJAS DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt pārvades tīkla plānošanas metodoloģiju ilgtermiņā, ņemot vērā energosistēmas tehniskus un ekonomiskus regulēšanas principus.

Koordinēta pieeja iekļauj optimālā jaudas plūsmas sadalījumu pārvades līniju caurlaides jaudu aprēķinam, pārvades līniju optimālai izmantošanai, kas savukārt dos papildus iespējas attīstības plānošanai un sociālās labklājības noteikšanai.

Mērķa sasniegšanai promocijas darbā tika risināti galvenie uzdevumi, kuru rezultātā ir:

1. Piedāvāta, pamatota un testēta pārvades tīklu attīstības plānošanas metodoloģija, atbilstoši vajadzībām pēc jaunām metodēm un instrumentiem nākotnes Eiropas energosistēmas plānošanai ar ievērojamu atjaunojamo energoresursu īpatsvaru;
2. Izstrādāts pārvades tīklu analīzes maiņstrāvas modelis, iekļaujot mainīgo ģenerāciju un brīvo elektroenerģijas tirgu;
3. Izstrādātas metodes straujākam optimālās jaudas plūsmas sadalījuma aprēķinam ar līdzstrāvas metodi, ievērojot sarežģītības un dimensiju apsvērumus attīstības un optimizācija uzdevumos ilgtermiņā;
4. Kompilēts maiņstrāvas (AC) un līdzstrāvas (DC) optimālo jaudas plūsmu sadalījumu (OPF) modelis attīstības plānošanas metodoloģijas izstrādei.

Metodoloģijai jākalpo kā zinātniskai un praktiskai bāzei, risinot pārvades tīklu attīstības problēmu brīvā elektroenerģijas tirgus apstākļos.

PĒTĪJUMA LĪDZEKĻI UN METODES

Lai varētu praktiski sasniegt ierosināto mērķi, tika izdarīti sekojoši pieņēmumi:

1. Pētījums ir vērst uz perspektīvām attīstības stratēģijām, kuras ir izstrādātas pēc dotās metodoloģijas, kas dos ieguldījumu nākotnes elektroapgādē;
2. Dotā metodoloģija neievēro sadales/pārvades sistēmu elektromagnētisko un elektromehānisko pārejas procesu dinamiku;
3. Promocijas darbs piedāvā jauno metodoloģiju mūsdienu pārvades sistēmu plānošanai saskaņā ar energosistēmas un elektroenerģijas tirgus kopējām īpatnībām lai sasniegtu 20-20-20 mērķus, kā arī SRA 2035, R&D Roadmap ENTSO-E un EK direktīvām;
4. Ilgtermiņa attīstības plānošanas metodoloģija tika attīstīta ņemot vērā informācijas nenoteiktību, pieņēmumus un ierobežojumus, kas var ietekmēt izstrādāto metodoloģiju.

Promocijas darbā piedāvātie algoritmi sastāv no maiņstrāvas/līdzstrāvas optimāliem jaudas plūsmu sadalījumu modeļiem un tiek realizēti ar matemātisko simulāciju datorprogrammas MatLab vidē. Attīstības procesa modelēšanas algoritmi tika testēti un izmantoti daudz-soļu attīstības plānošanas uzdevumos.

PROMOCIJAS DARBA ZINĀTNISKĀ NOZĪME

Zinātniskā novitāte ietver pārvades tīkla attīstības plānošanas metodoloģiju liberalizētos apstākļos. Ir izpētīts jauns objekts – pārvades tīkla attīstības plānošana ar mainīgās ģenerācijas palielināto daudzumu elektroenerģijas tirgus liberalizācijas apstākļos.

Pētījums ietver:

1. Stratēģiskās solīšanas analīzi un cenu veidošanās mehānismus;
2. Optimālās jaudas plūsmu sadalījuma paņēmienus un salīdzinājumu starp līdzstrāvas un maiņstrāvas modeļiem;
3. Optimālās jaudas plūsmas metodes un attīstības procesa algoritma izstrādi;

4. Ilgtermiņa enerģijas bilances novērtējums;
5. Ilgtermiņa pilnīgās konkurences elektroenerģijas cenu un labklājības prognozēšanu dažādiem scenārijiem.

PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

Elektroenerģijas sektora liberalizācija un atjaunojamo energoresursu īpatsvara palielināšana tīklā, visos sprieguma līmeņos, rāda nepieciešamību pēc radikāli jaunām pārvades sistēmas modelēšanas pieejām, kuras varēs ievērot miljonu ierīču koordinētu darbību un dažādas tehnoloģijas, dažādos mērogos, kas ir teritoriāli izkliedētas visā energosistēmā.

Izstrādātā metodoloģija piedāvā augstāk minētu problēmu risinājumu. Lēmumu pieņēmējiem un plānotājiem, pārvades attīstības plānošanai, kas ļauj modelēt energosistēmas darbību, elektroenerģijas tirgu, ar ģenerācijas un pārvades jaudas prasībām, nodrošinot optimālus attīstības risinājumus.

PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

Par darba izstrādē iegūtiem rezultātiem tika ziņots un tie tika apspriesti 8 starptautiskajās konferencēs:

1. Interstate DC Line Performance Assessment Methods // The 3rd International Youth Conference on Energetics 2011 // Leiria, Portugal, July 7–9, 2011.
2. Modeling of Zonal Prices with Application in Long-Term Development Planning Strategies // Conference of Young Scientists on Energy Issues “CYSENI 2012”, Kaunas, Lithuania, May 24–25, 2012.
3. Assessment of the Network Reliability Calculation in Transmission System Development Tasks // PMAPS'2012 (12th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems). Istanbul, Turkey, June 10–14, 2012.
4. Dynamic Management of Power System Sustainable Development with application for Smart Grids // Proceedings of the 5th International Conference on Liberalization and Modernization of Power Systems: Smart Technologies for Joint Operation Of Power Grids. Irkutsk, Russia, August 6–10, 2012.
5. Assessment of Wind Production Impacts to a Power System and Market Formation in Baltic // Riga Technical University 53rd International Scientific Conference dedicated to the 150th anniversary and The 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute / RTU Alumni. Riga, RTU, 2012.
6. Assessment of optimal power flow application in long-term development planning // 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (PowerEng'2013) Istanbul, Turkey, 13–17 May 2013 ISBN:978-1-4673-6390-7.
7. AC and DC optimal power flow models for long-term development planning // Conference of Young Scientists on Energy Issues “CYSENI 2013”, Kaunas, Lithuania, May 29–31, 2013.
8. Transmission Expansion Planning Considering Wholesale Electricity Market and Integration of Renewable Generation // 11th International Conference on the European Energy Market “EEM14”, Krakow, Poland, May 28–30, 2014.

PUBLIKĀCIJAS

Darba rezultāti tika publicēti 11 starptautiskos izdevumos:

1. A. Obushevs, M. Turcik, I. Oleinikova. Interstate DC Line Performance Assessment Methods // The 3rd International Youth Conference on Energetics 2011 // Leiria, Portugal, July 7–9, 2011.– Conference Proceedings (on CD 7 pp.). ISBN 978-1-4577-1494-8
2. A. Obusevs, I. Oleinikova. Modeling of Zonal Prices with Application in Long-Term Development Planning Strategies // Conference of Young Scientists on Energy Issues “CYSENI 2012”, Kaunas, Lithuania, May 24–25, 2012 – Conference Proceedings ISSN 1822-7554
3. A. Obushev, M. Turcik, I. Oleinikova, Kolcun. Probabilistic Method for Wind Production Forecasting and Energy Markets Trades Optimization in Power System with Large Wind Specific Gravity// PMAPS'2012 (12th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems). Istanbul, Turkey, June 10–14, 2012.– Symposium Proceedings (on USB 5 pp.).
4. A. Obushevs, I. Oleinikova, Z. Krishans. Assesment of the Network Reliability Calculation in Transmission System Development Tasks // PMAPS'2012 (12th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems). Istanbul, Turkey, June 10–14, 2012.– Symposium Proceedings (on USB 5 pp.).
5. I. Oleinikova, M. Turcik, A. Obusev, Dynamic Management of Power System Sustainable Development with application for Smart Grids // Proceedings of the 5th International Conference on Liberalization and Modernization of Power Systems: Smart Technologies for Joint Operation of Power Grids. Irkutsk, Russia, August 6–10, 2012. ISBN 978-5-93908-081-1.
6. I. Oleinikova, M. Turcik, A. Obushev Dynamic Management of Power System Sustainable Development with Smart Grids application on Transmission Level // The 3rd IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (IEEE ICSET 2012) Kathmandu, Nepal, 24–27 September 2012. ISBN: 978-1-4577-1869-4
7. A. Obushevs, M. Turcik, I. Oleinikova, G. Junghans. Assessment of Wind Production Impacts to a Power System and Market Formation in Baltic // Riga Technical University 53rd International Scientific Conference dedicated to the 150th anniversary and The 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute / RTU Alumni. Section of Power and Electrical Engineering Paper 8 of Subsection of Power Systems. Rīga, RTU, 2012. ISSN 1407-7345
8. A. Obushevs, I. Oleinikova. Assessment of optimal power flow application in long-term development planning // 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (PowerEng'2013) Istanbul, Turkey, 13–17 May 2013 ISBN:978-1-4673-6390-7.
9. A. Obushevs, I. Oleinikova. AC and DC optimal power flow models for long-term development planning // Conference of Young Scientists on Energy Issues “CYSENI 2013”, Kaunas, Lithuania, May 29–31, 2013 – Conference Proceedings ISSN 1822-7554
10. A. Obushevs, I. Oleinikova. Transmission Expansion Planning Considering Wholesale Electricity Market and Integration of Renewable Generation // 11th

International Conference on the European Energy Market “EEM14”, Krakow, Poland, May 28–30, 2014

11. A. Obushevs, I. Oleinikova, A. Mutule. Infrastructure of Baltic Region Transmission System: Analysis of Technical and Economic Factors of it's Development // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2014, No 4, P.3–14. DOI: 10.2478/lpts-1014-0023

PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 3 nodaļas, secinājumus un rekomendācijas turpmākam darbam, izmantoto informācijas avotu sarakstu, 4 pielikumus, 28 tabulas un 43 attēlus, kopā 110 lappuses. Izmantoto informācijas avotu sarakstā ir 70 nosaukumi.

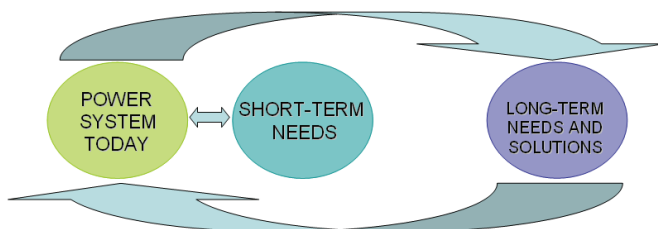
Pirmajā nodaļā tiek izanalizēti jaunie tīkla ekspluatācijas apstākļi, kuri rada jaunas prasības pārvades tīklu attīstības plānošanā.

Otrajā nodaļā tiek analizēti galvenie faktori, kuri ietekmē visu pārvades tīkla un elektroenerģijas tirgus darbību, no perspektīvās attīstības viedokļa un ir piedāvāta nepieciešamība pēc pārvades tīklu attīstības plānošanas metodēm un modeļiem.

Trešajā nodaļā tiek demonstrēta darbā izstrādātā jauna metodoloģija ar dinamisku pieeju pārvades tīklu attīstības plānošanai pilnīgās konkurences liberalizētos elektroenerģijas tirgus apstākļos, pamatojoties uz tehniskiem un ekonomiskiem regulēšanas principiem.

1. PĀRVADES TĪKLA PLĀNOŠANAS APSVĒRUMI

Pārvades tīklu plānošana var būt klasificējama kā statiska vai dinamiska, atkarībā no risināmiem uzdevumiem. Statiskajā pārvades sistēmas plānošanā, plānošanas speciālisti meklē optimālo risinājumu vienam laika periodam (piemēram, vienam gadam) ar mērķi noteikt optimālo tīkla stāvokli iepriekš noteiktajā vienā laika periodā. Promocijas darbā ir apskatīta ilgtermiņa optimālā attīstības stratēģija, ņemot vērā visu plānošanas periodu kopumā, kas savukārt klasificējama kā dinamiskā plānošana (skat. 1. att.):

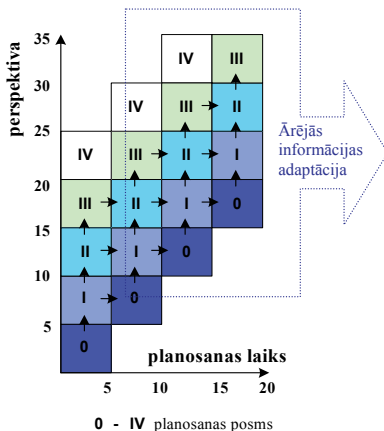


1. att. Plānošanas horizonti

Optimālās attīstības stratēģijas izveidei nepieciešams pielietot sistēmu analīzes un dinamiskās daudz soļu optimizācijas metodes, lai ievērotu sistēmas elementu likumsakarības laika gaitā. Tīkla analīze ir raksturīga ar dinamiskas attīstības procesa optimālā risinājuma izvēli, nosakot sarežģītas sistēmas un parametrus ar vairākiem mainīgiem

Par pamatu energosistēmas daudz soļu attīstības pieejai kalpo sekojošie galvenie faktori (skat. 2. att.) [3, 4]:

- Laika līmeņu/sprieguma līmeņu/slodzes, ģenerācijas, utt. modelēšana;
- Lēmuma pieņemšana informācijai precizējoties tiek veikta tikai (horizontālā informācijas plūsma) 2–5 gadu laika periodam;
- Novērtēšanas periodam jāatbilst vidējam dzīves cikla periodam, elektroiekārtai tas ir aptuveni 20–30 gadi



2. att. Attīstības plānošanas struktūra

Lai realizētu minēto pieeju, esošās sistēmu modelēšanas metodes tika papildinātas ar jauniem tehniskiem un tirgus ekonomikas regulēšanas kritērijiem un funkcijām.

Modelēšanas metodēm ir jāatspoguļo reālas sistēmas raksturlielumus, kā arī jāiekļauj iespējas ņemt vērā mainīgo ģenerāciju, veikt sistēmas tehniskus, ekonomiskus un ekoloģiskus kritēriju aprēķinus. Turklāt efektīvām optimizācijas metodēm nepieciešams risināt optimizācijas uzdevumus ar diskrētiem mainīgiem [3].

1.1. Pārvades tīklu plānošana liberalizētā vidē

Elektroenerģētikas industrijas deregulācija veicina globālās attīstības elektroenerģijas biržu virzienā [5, 6]. Elektroenerģijas sektora liberalizācija un privatizācija aizsākusies Čīlē 1982. gadā un attīstījās Latīņu Amerikas valstīs, ka arī visā pasaulē 1990-jos gados [7]. Šī tendence palielinājās Eiropā un Ziemeļamerikā, kur tirgus spēki pamudināja likumdevējus noņemt mākslīgas barjeras, kas pasargāja elektroenerģētikas uzņēmumus no konkurences. Elektroenerģijas cenai piemīt daudz lielākais mainīgums nekā citām precēm [6]. Salīdzinoši nelielas izmaiņas slodzē vai ģenerācijā var izraisīt lielas izmaiņas elektroenerģijas cenās uz dažām stundām (gadījumā ar reāla laika dinamiskajām cenām – uz vairākām sekundēm līdz minūtēm) [8]. Atšķirībā no citiem finanšu tirgiem, elektroenerģija tiek tirgota katrai dienas stundai un to nav iespējams efektīvi uzglabāt. Tādejādi līdzsvaram starp elektroenerģijas patēriņu un ģenerāciju jāsaplabājas katru stundu gadā [9]. Elektroenerģijas tirgi atšķiras no citiem tirgiem. Par iemeslu tirgus atšķirībai kalpo elektroenerģijas ražošanas izmaksu/cenas dažādība. Hidro, saules un vēja ģenerācijai

gandrīz nav mainīgo ģenerācijas izmaksu, bet, savukārt, ogļu, gāzes un citu derīgo izrakteņu stacijās saražotās elektroenerģijas cenā ir liela daļa mainīgo izmaksu. Lai apmierinātu pieprasījumu pēc lētās enerģijas, ir nepieciešams liels daudzums ģenerācijas avotu. Dažām ģenerācijas iekārtām ir augstas izbūves izmaksas, tomēr tie var darboties visu gadu, pastāvīgi uzturot ģenerēšanas procesu [10]. Citi ģenerāciju tipi, kā koģenerācijas stacijas tiek izmantotas pārsvarā lai segtu siltumslodzi ziemas laikā, kā arī augstu elektroenerģijas cenu periodos. Gāzes turbīnas tiek izmantotas tikai konkrētiem periodiem ar augstu cenu un elektroenerģijas patēriņu to energoietilpīguma dēļ [11]. Neskatoties uz dažādiem deregulācijas procesiem, tirgus koncepcijas ir salīdzinoši vienādas. Galvenie tirgus uzdevumi ir: izdalīt konkurējošas funkcijas no monopola funkcijām un izveidot brīvu vairumtirdzniecības un mazumtirdzniecības tirgu.

Eiropas elektrotīklu lielākā daļa bija starpsavienota ar mērķi realizēt ilgtermiņa elektroenerģijas importa/eksporta kontraktus [12]. Tomēr, mūsdienu liberalizētā elektroenerģijas tirgū, starpsavienojumu loma ir mainījusies. Šodien, starpsavienojumi veido atslēgas elementu starpsistēmu tirdzniecībai. Pēdējo gadu veiktie pētījumi parāda, ka lai palielinātu konkurenci ir nepieciešams vairāk starpsavienojumu, lai atvieglotu energouzņēmumiem paplašināt savu darbību citos reģionos ārpus savām tradicionālajām teritorijām [13].

Sakarā ar augstu koncentrācijas līmeni elektroenerģijas tirgū, pēdējās desmitgadēs ir dziļi analizēta stratēģiskā solīšana, izmantojot spēļu teorijas imitācijas modeļus. Pašreizējā Literatūra norāda četrus galvenos modeļus, kas tiek izmantoti elektroenerģijas tirgū: *Bertrand* modeļus, *Cournot* modeļus, *Stackelberg* modeļus, uz piegādes funkciju balstītus (*Supply function-based*) modeļus Piegādes funkcijas līdzsvara modelis ļoti labi piemērojams tirgus struktūrai daudzos pārstrukturētajos elektroenerģijas tirgos, piemēram, Jaunzēlandē, Austrālijā, Pensilvānijas-New Jersey-Maryland starpsavienojumam, Kalifornijas Elektroenerģijas biržai. Šajos tirgos, solīšanas formāts ir tieši piegādes funkcija [14]. Raksturīgi, ka visi šie modeļi simulē elektrības tirgu rezultātus stratēģiskiem piegādātājiem izmantojot tirgus varu, kas prasa sarežģītu matemātisko problēmu risinājumu ar ievērojamu skaitļošanas laiku. Tas parasti neder pārvades sistēmas un tīklu attīstības problēmas analīzei, ka vajadzētu palauties uz ātru un spēcīgu instrumentu, kas veic tirgus simulācijas ilgākiem laika periodiem [15]. Tipiska pieeja, kas tiek pielietota pārvades sistēmas plānošanai ir apsvērt pilnīgi konkurētspējīgu tirgu, kur visi piegādātāji veic solīšanu ar robežizmaksām.

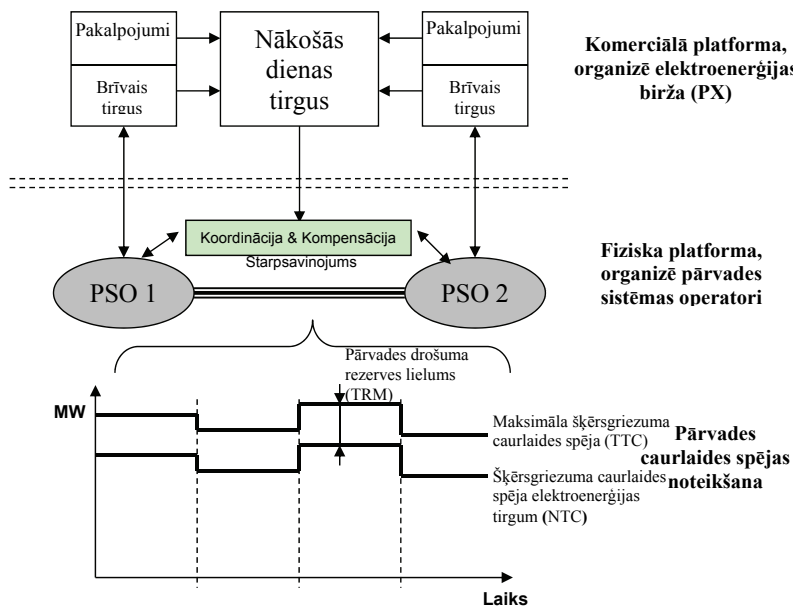
Pārvades elektrotīklu integrēšana, trans-Eiropas infrastruktūras un viena pilnībā integrētā elektroenerģijas tirgus izveidošana prasa ap 218.5 bn.EUR. [Komisijas aplēses 2012. gadā kā kopējie pašreiz nepieciešamie ieguldījumi elektrotīklu infrastruktūrā].

1.2. Mūsdienu energosistēmu attīstība ievērojot atjaunojamus energoresursus, Eiropas mērķus un Pārvades tīklu attīstību

Mūsdienu Eiropas likumdošana nosaka divus dažādus noteikumus Eiropas elektroenerģijas tirgus integrācijai [16]:

1. Elektroenerģijai jāplūst atbilstoši cenu starpībai pēc tirgus-balstītas caurlaides jaudas izsoles, un pārrobežu caurlaides spējām nevajadzētu samazināties, lai atrisinātu valsts iekšējus sastrēgumus;
2. Prioritāte tirgū jādod atjaunojamiem energoresursiem.

Augstākminēti noteikumi ir ļoti svarīgi nākotnes pārvades sistēmas plānošanas risinājumam, kas mūsdienās ir atkarīgs no tirgus struktūras (skat. 6. att.).



6. att. Elektroenerģijas tirgus struktūra

Elektroenerģijas sistēmai jānodrošina, lai pieprasījums tiktu nosepts jebkurā brīdī un pie dažādiem nosacījumiem. Atkarībā no sezonas, klimata un laika apstākļiem, pieprasījums var ievērojami mainīties dienas, nedēļas un mēneša laikā. Papildus prasībai par atbilstību mainīgumam, vienmēr pastāv nākotnes slodzes nenoteiktība, ka arī ģeneratoru pieejamības nenoteiktība. Mūsdienās pastāv dažādi darbības portfeli, kas iekļauj hidro un termālo ģenerācijas kombinācijas, lai pārvaldītu mainīgumu.

Lai noteiktu optimālo energosistēmas attīstības virzienu – un īpaši pārvades sistēmas attīstību – tirgus apstākļos, ir nepieciešamas ilgtspējīga pieeja, kura būtu spējīga atrast bilanci starp bieži vien pretrunīgām prasībām.

2. ATTĪSTĪBAS PROCESA MODELEŠANA

2.1. Pamatnostādnes

Šajā nodaļā ir analizēti galvenie pārvades tīklu un tirgus funkcionēšanas virzītājspēki no attīstības viedokļa.

Saskaņā ar jauniem nosacījumiem ir svarīgi papildināt esošo pārvades tīklu plānošanas teoriju un instrumentus ar vairākiem aspektiem:

- Raksturlielumi, lai novērtētu katra apskatāmā scenārija rezultāta labumu (piemēram, minimālās ekspluatācijas izmaksas, maksimālais labums, maksimālais sociālais labums, utt.);
- Cenas dinamika;

- Elastīgo viedo tīklu tehnoloģiju ieviešana;
- Pieaugošais nenoteiktības informācijas līmenis.

Promocijas pētījums tiek veikts, ņemot vērā sekojošus ierobežojumus: nav ievēroti tirgus struktūras aspekti, zudumu faktora iespaids uz DC/AC starpsavienojumiem, dinamiskā stabilitāte, utt.

Darbā izstrādāta metodoloģija ievēro sistēmas operatora pozīcijas, t. i. bez jebkādas ģenerācijas plānošanas kontroles. Lai izanalizētu un novērtētu dažādas iespējamās ģenerācijas kombinācijas un tās izmaiņas laika gaitā tika definētas caur scenārijiem. Katrs no scenārijiem dod tehnoloģisko risinājumu ģenerācijas vienībām: to jaudu, izmaksas un atrašanās vietu (scenāriji ir balstīti uz dažādām iespējamām enerģētikas likumdošanas izvēlēm).

2.1.1. Sociālā labklājība

Lai atrast piedāvājuma un pieprasījuma līdzsvaru katrā tirgus zonā ar mērķi palielināt patērētāju ieguvumus un ražotāju peļņu, tiek izmantots Sociālā labklājības jēdziens.

Sociālā labklājība ir mērs, ar kuru izvērtē alternatīva likumdošanas varianta potenciālo ietekmi. Sociālā labklājības vērtējumam jāiekļauj papildu ekonomisko labumu vai izmaksas, kas ir noteiktas kā papildus individuālo labumu un izmaksu summa, ko paredzēts iegūt attiecīgās likumdošanas opcijas ieviešanas dēļ salīdzinot ar sākotnējo stāvokli. Minētiem labumiem un izmaksām jābūt analizētām atsevišķi no lietotāju tarifa (kopumā un atsevišķi pamatojoties uz to spēju atļauties elektroenerģijas izmaksas), Tirgus dalībnieka un Sistēmas operatora viedokļa, ievērojot [17]:

- ieguvumu/peļņu pārdales nosacījumus;
- tirgus darbības nosacījumus, ieskaitot tirgus spēku un to likviditātes analīzi;
- ārējo faktoru ietekme.

$$\text{Sociālā labklājība} = \text{Ražošanas peļņa} + \text{Patērētāja ieguvums} \quad (1)$$

Patērētāja ieguvums ir starpība starp to, ko lietotāji būtu gatavi maksāt par produktu un to, ko viņi patiesībā maksās. Elektroenerģijas tirgū, lietotāja vēlme maksāt var būt novērtēta ar Zaudētās jaudas apjomu (angl. – Value of Lost Load (VOLL)). Šis rādītājs parāda aptuveno piespiedu elektroenerģijas ierobežošanas novēršanas vērtību. VOLL ir aplēsts lielums, ko lietotāji, kas saņem elektroenerģiju, būtu vēlējušies samaksāt lai izvairītos no elektroapgādes pārtraukuma. [18, 19].

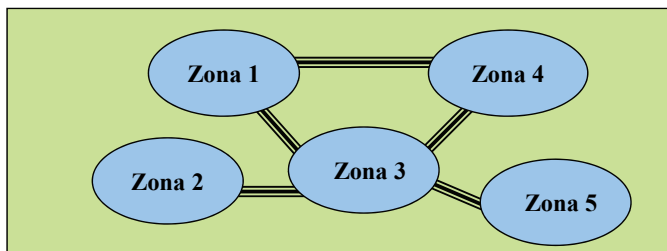
Ražošanas peļņa ir starpība starp to, ko ražotāji grib un ir spējīgi piegādāt un cenu, ko tie faktiski saņem.

2.1.2. Elektroenerģijas cenas noteikšanas mehānismi

Cenu noteikšanas mehānismi konkurējošiem elektroenerģijas tirgiem nosaka vai nu vienotu cenu (UP), mezglu cenu vai izvietošanas noslēdzošas cenas (LMP), vai tikai dažu zonu noslēdzošas cenas (ZMP). Katrs no iepriekš minētiem mehānismiem raksturojams ar noteikto sarežģītības līmeni, spēju atbilstoši noteikt investīcijas, ka arī pamatoti nosaka galalietotāju izmaksas [20].

Zonālās cenas. Zonālo cenu metode tika ieviesta ka reakcija, lai atrisinātu ļoti sliktu vienotas cenas noteikšanas mehānismu stimulējošo spēju. Pamatojoties uz

zonālo cenu pamatprincipu, visa tirgus teritorija tiek sadalīta vairākās zonās atkarībā no to attiecīgo sastrēgumu izmaksām (skat. 9.att.).



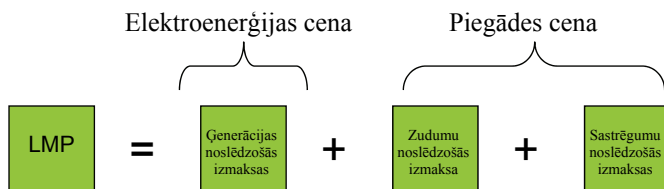
9. att. Zonu formēšanās

Augstākas cenas par elektroenerģiju maksā zonās, kur pieprasījums pārsniedz pārvades spējas un otrādi. Cena ir vienota visai zonai. Šīs zonas parasti ir ģeogrāfiski iepriekš noteiktas pamatojoties uz sagaidāmajām “šaurām vietām” elektrotīklā, tomēr, kā ir gadījuma ar Ziemeļvalstu tirgus darbību, zonu daudzums var mainīties gada laikā atkarībā no izmaiņām ģenerācijas jaudā, sevišķi hidroresursiem.

Cenu starpība starp zonām pēc caurlaides spēju izmantošanas starp tām izveido bezsaimnieka ieņēmumus spot tirgū, gadījumā ja plūsma iet no zemas cenu zonas uz augstās cenu zonu. Situācijās, kad plūsma iet no augstās cenu zonas uz zemo cenu zonu specifisko darbību vai dispečeru optimizāciju no pārvades sistēmas operatora puses dēļ, tiek veidoti bezsaimnieka izdevumi [21].

Šie bezsaimnieka ieņēmumi un izdevumi tiek saukti par sastrēgumu nomu (sastrēgumu ieņēmumiem). Ziemeļvalstu reģionā šie ieņēmumi tiek novirzīti pārvades sistēmas operatoram, kā pārvades tīkla īpašniekam.

Mezglu cenas. Šī metode nosaka tirgus cenu noteiktajam vietu skaitam pārvades tīklā – mezgliem; Mezgls atrodas pārvades tīklā un iekļauj sevī ģeneratorus un slodzes. Mezgla cena ir vienāda ar nākamā slodzes MW segšanas izmaksām (noslēdzošās izmaksas) dotajā vietā (mezglā):



11. att. Mezglu cenu komponentes

Mezglu cenas veidošanās principi:

- Cenu līdzsvara noteikšanas nepieciešamība (ietverot zaudējumus un sistēmas ierobežojumus);
- Ievērojot konkurencizsoles pamatu, drošības ierobežojumus, ekonomisko sadalījumu principus;
- Augstāks potenciāls sociālās labklājības maksimizācijā nekā UP vai ZMP.

Zonu vai mezglu cenu modeļos optimizācijas uzdevums balstīts uz patērētāju un ražotāju labuma apgabaliem sociālās labklājības maksimizācijai. Mērķa funkcijas maksimizēšanu var izteikt sekojoši:

$$\max \sum_n \left(\int_0^{d^a} D^a(x) dx - \int_0^{s^a} S^a(y) dy \right) \quad (3)$$

Kur (a) apzīmē zonu vai mezglu (apgabalū), d^a ir pieprasījums apgabalā (a) un D^a ir pieprasījuma funkcija apgabalā (a) , s^a ir piedāvājums apgabalā (a) un S^a ir piedāvājuma funkcija apgabalā (a) un (n) ir apgabalu skaits.

Zonālo cenu aizstāvji apgalvo, ka sistēma, kas, balstīta uz šādiem principiem, būs pietiekama, lai sasniegtu ekonomiskās efektivitātes mērķus ar mazākiem sarežģījumiem un tādējādi ar lielāku caurredzamību tirgus dalībniekiem. Tomēr, smagos noslodzes periodos, kad ir sagaidāmi sastrēgumi, pastāv pamatotas bažas par tirgus varas ļaunprātīgu izmantošanu no tirgus dalībniekiem. Papildus tam apstrīdama ir spēja jauno investīciju pareizai sadalei un pietiekamībai. Sakarā ar tirgus struktūru attīstību visā pasaulē, ievieš mezgla cenu principus, kā pasludināto etalonu sastrēgumu pārvaldībā, efektivitātē un atbilstību ekonomikas teorijai un fizikas likumiem.

Saskaņā ar iepriekš minētajām metodēm par cenu noteikšanu, optimālās cenas pārvades tīklā ir mezglu cenas, kuras tiek iegūtas no optimālās jaudas plūsmu sadalījuma ar centralizētā dispečera izpildījumu.

2.2. Ilgtermiņa plānošanas metodoloģija regulēšanas un konkurences apstākļos

Attīstības plānošana ir process lai noteiktu optimālo attīstības stratēģiju eksistējošam energosistēmas pārvades tīklam, kuram jāapmierina pieprasījuma iespējamais pieaugums ar ierosināto ģenerāciju, saglabājot drošības un drošuma veiktspēju elektroapgādes sistēmā. Energosistēmas pārvades tīkla attīstības plānošanas vispārējais mērķis ir noteikt ‘kur’, ‘cik daudz’ un ‘kad’ jauniem elementiem/iekārtām jābūt ieviestām ekspluatācijā, lai to darbība būtu dzīvotspējīga attīstības plānošanas noteiktā horizontā, ar izmaksu samazināšanu un sociālās labklājības maksimizēšanu optimālā attīstības plāna noteikšanai.

Attīstības plānošanas galvenā koncepcija balstās uz: Attīstības pasākums (D-action), Attīstības solis (D-step) un Attīstības plāns (D-plan).

$$\underbrace{\text{Eksistējošais stāvoklis}}_{e(t-1)} + \underbrace{\text{Realizētais D-pasākums(-i)}}_{(\dots \dots \dots)} = \underbrace{\text{Jaunais stāvoklis}}_{e(t)}$$

13. att. Attīstības stāvokļa formēšanās

Attīstības plāna veidošanās ir sarežģīts process, kas prasa apjomīgus pētījumus, lai noteiktu daudz jaunu tīkla elementu. Optimālā attīstības plāna Izveidošana nodrošinās tīkla, ražošanu un pieprasījumu atbilstību nākotnē.

Pārvades tīkla attīstības plāna mērķa funkcija attēlo un integrē tehniskos un ekonomiskos rādītājus, kā arī energoapgādes drošuma [22], ekoloģiskos un citus parametrus. Mērķa funkcija (4) pārstāv sociālo labklājību, kur labklājība ir izteiktā kā kopējā pieprasījuma lietderības funkcija mīnus kopējā ģenerācijas piedāvājuma funkcija, pievienojot kopējos sastrēguma ieņēmumi un atskaitot investīciju izmaksas

jaunā līnijā. Mērķa funkcija ir tīkla attīstības plāns g kvalitātes kritērijs, un apzīmēts kā $F(T, g)$ aprēķinu formulas:

$$\max F(T, g) = \max_{g \in \{G\}} \sum_{t=1}^T (SW(t, e(t), g) + CR(t, e(t), g) - IC(t, e(t), g)) \quad (4)$$

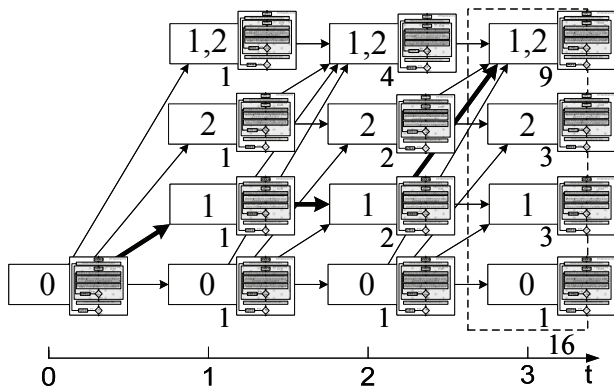
kur: t – attīstības soļa kārtas numurs; T – attīstības soļu skaits novērtēšanas periodā; g – attīstības process; $\{G\}$ – visu iespējamo attīstības plānu kopa; $SW(t, e(t), g)$ – sociālās labklājības kritērijs attīstības solī t , attīstības stāvoklī $e(t)$ un attīstības procesā g ; $CR(t, e(t), g)$ – PSO kopējie sastrēgumu ienākumi attīstības solī t , attīstības stāvoklī $e(t)$ un attīstības procesā g ; $IC(t, e(t), g)$ – investīciju izmaksas attīstības solī t , attīstības stāvoklī $e(t)$ un attīstības procesā g .

Nemot vērā pieņemtos nosacījumus, $F(t, e(t), g)$ nav atkarīga no attīstības plāna līdz attīstības stāvoklim $e(t)$. Līdz ar to, mērķa funkcija (4) ļauj piemērot dinamisko programmēšanu.

Laī ievērot liberalizētā elektroenerģijas tirgus ietekmi uz tehniskiem un ekonomiskiem kritērijiem, katrs attīstības stāvoklis jānovēro pie stundas pamata.

Stundas aprēķinu piemērošana, pamatojoties uz optimālo jaudas plūsmu sadalījumu, ļauj ievērot ražošanas un patēriņa tendences dienas laikā, ņemot vērā patēriņa laika novirzi apskatot vairākas laika zonas, pieprasījuma pārvaldību un pieprasījuma reakcijas programmas, izkļaidēto ģenerāciju u. c. [23–24].

Katrs attīstības process raksturojas ar realizēto pasākumu skaitu un tā realizācijas brīdi, kā arī katra attīstības pasākuma realizācijas veida. Neliels piemērs ar 2 attīstības pasākumiem parādīts 15. attēlā, ar attīstības soli 1 gads un 16 attīstības stāvokļiem. Kopējais attīstības plānu skaits dotajā piemērā būs 16.



15. att. Attīstības stāvokļu formēšanas shēmas piemērs

Reālos uzdevumos salīdzināmo attīstības plānu skaits sasniedz astronomiskus lielumus, tādēļ ir jāpiemēro specializētās dinamiskās optimizācijas metodes energosistēmas ilgtspējīgās attīstības vadības procesam [4]. Energosistēmas

dinamiskās optimizācijas uzdevuma ietvaros, plūsmu aprēķinus jāveic pēc iespējas ātrāk ar noteiktu precizitāti. Šī faktora dēļ ir nepieciešams izmantot specializētas metodes.

2.3. AC/DC SCOPF formulējums

Dotā nodaļa parāda ar optimālās jaudas plūsmas sadalījuma metodes teorētisko pieeju, kura tiek izmantota par pamatu sociālās labklājības/cenu aprēķinam un modelēšanai. OPF ietver drošības apsvērumus – optimālās jaudas plūsmu sadalījums ievērojot drošības ierobežojumus (SCOPF). SCOPF tiek izmantots kā pamats pārvades cenu veidošanā, ieskaitot drošības ierobežojumus koriģējot caurlaides jaudas robežas ar pārvades drošuma rezerves lielumu (TRM).

Optimālās jaudas plūsmas sadalījums ir ļoti liels un sarežģīts matemātiskās programmēšanas uzdevums. OPF galvenais mērķis ir noteikt optimālo enerģosistēmas līdzsvara stāvokli, kas vienlaikus minimizē vai maksimizē izvēlētajā mērķa funkcijas vērtību un ievēro fiziskos uz darbības ierobežojumus. Lai nodrošināt tīkla darbības problēmu komplekso risinājumu analīzi un to ievērošanai attīstībā tiek īstenots sekojošs matemātiskais formulējums.

OPF problēmas mērķa funkcija var būt ļoti dažāda, atkarībā no pielietojuma. Vispārējais mērķis ir maksimizēt sociālo labklājību, kura ietver ražotāju un patērētāju ieguvumus, vai minimizēt ražošanas izmaksas. Izmaksas un ieguvumi var tikt definēti kā polinomi vai gabala-lineārās funkcijas [26-28]. Problēmu shematiski var formulēt sekojoši:

$$\max_x SW(x) \quad (6)$$

ievērojot

$$g(x) = 0 \quad (7)$$

$$h(x) \leq 0 \quad (8)$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (9)$$

kur $SW(x)$ sociālās labklājības mērķa funkcija; $g(x)$ vienādības ierobežojumi pēc aktīvās un reaktīvās jaudas bilancēm; $h(x)$ nevienādības ierobežojumi pēc jaudu plūsmu robežām līnijās un sprieguma robežas; x_{\min}, x_{\max} aktīvās un reaktīvās jaudas ražošanas robežas. Viens no mezgliem tiek pieņemts ar fāzes leņķi vienādu ar nulli, iestatot augšējo un apakšējo fāzes leņķa robežas pie nulles (bāzes mezgls).

Mainstrāvas modeļa gadījumā OPF problēma ir vispārēja nelineāra ierobežota optimizācijas problēma, gan ar nelineārām izmaksām un ierobežojumiem. Sistēmā ar n_b mezgliem, n_g ģeneratoriem, n_l līnijām un n_c patērētājiem, optimizācijas mainīgais x tiek definēts sekojoši:

$$x = [\Theta; V; P_G; Q_G; P_L; Q_L] \quad (10)$$

Mērķa funkcija (6) ietver patērētāju lietderību atskaitot ražotāju izmaksas (attiecīgi attēlotas ar funkcijām $B_L^i(P_L^i)$ un $C_G^j(P_G^j)$) un tiek maksimizēta ievērojot vienādības un nevienādības ierobežojumus:

$$SW(P_G, P_L) = \left\{ \sum_{i=1}^{n_c} B_L^i(P_L^i) - \sum_{j=1}^{n_g} C_G^j(P_G^j) \right\} \rightarrow \max_{\Theta, V, P_G, Q_G, P_L, Q_L} \quad (11)$$

Vienādības ierobežojumi (7) sastāv no divām nelineāro mezglu jaudu bilances vienādojumu kopām, viena aktīvās jaudas un viena reaktīvās

$$g_P(\Theta, V, P_G, Q_G, P_L, Q_L) = 0 \quad (12)$$

$$g_Q(\Theta, V, P_G, Q_G, P_L, Q_L) = 0 \quad (13)$$

Nevienādību ierobežojumi (8) sastāv no divām n_l līniju plūsmu robežu kopām, kā nelineāra funkcija no mezglu spriegumu leņķiem un līmeņiem, katras līnijas sākumam un līnijas beigām.

$$h_f(\Theta, V, P_G, Q_G, P_L, Q_L) \leq 0 \quad (14)$$

$$h_t(\Theta, V, P_G, Q_G, P_L, Q_L) \leq 0 \quad (15)$$

Mainīgo robežās (9) iekļauj balsta mezgla fāzu leņķa vienādību robežas, visu mezglu augšējās un apakšējās sprieguma robežas, ģeneratoru un patērētāju robežas pēc aktīvām un reaktīvām jaudām

$$\theta_{ref} \leq \theta_i \leq \theta_{ref}, \quad l = l_{ref} \quad (16)$$

$$v_i^{\min} \leq v_i \leq v_i^{\max}, \quad l = 1 \dots n_b \quad (17)$$

$$P_{G,\min}^j \leq P_G^j \leq P_{G,\max}^j, \quad j = 1 \dots n_g \quad (18)$$

$$Q_{G,\min}^j \leq Q_G^j \leq Q_{G,\max}^j, \quad j = 1 \dots n_g \quad (19)$$

$$0 \leq P_L^i \leq P_{L,\max}^i, \quad i = 1 \dots n_c \quad (20)$$

$$0 \leq Q_L^i \leq Q_{L,\max}^i, \quad i = 1 \dots n_c \quad (21)$$

l_{ref} apzīmē bāzes mezglu un θ_{ref} ir bāzes leņķis.

Lietojot līdzstrāvas tīkla modelēšanas pieņēmumus, standarta OPF problēma vienkāršojas uz kvadrātisku formu, ar lineāriem ierobežojumiem. Šajā gadījumā DC modelis ievērojami vienkāršo plūsmu aprēķinu, ar tuvinājumu virkni, tostarp 1) pilnīgi ignorējot reaktīvās jaudas bilances vienādojumus, 2) pieņemot visas sprieguma līmeņa vērtības vienādas ar vienu (relatīvās vienībās), 3) ignorējot līnijas zudumus un 4) ignorējot transformatoru sprieguma regulēšanu [26, 29, 30].

OPF attīstība cieši seko skaitlisko optimizāciju metožu un datortehnoloģiju progresam. Ir piedāvātas daudz dažādas pieejas OPF problēmas atrisināšanai. Tās ietver nelineārās, kvadrātiskās, lineārās, jauktās programmēšanas metodes, kā arī iekšējā punkta un mērķīgā intelekta algoritmus u. c. [31–33]. Visveiksmīgāko iekšējo punktu metožu pamatā tiek izmantots tiešais-duālais formulējums un piemērojot Ņūtona metodi vienādojumu sistēmai, kura izriet no barjeras metodes. Nelineārās tiešais-duālais iekšējās punktu metodes (PDIPM) teorija tika izveidota balstoties uz trim sasniegumiem: Fiacco un McCormick barjeras metodes izstrāde nevienādību ierobežojumu optimizēšanai [34], Lagranža metode vienādību ierobežojumu optimizēšanai un Ņūtona metode nelineāro vienādojumu atrisināšanai [35]. Dotā metode tiek plaši pielietota energosistēmas problēmu optimizācijai, tai ir labvēlīga konverģence, robustums un neapjūgtums pret neiespējamiem sākuma nosacījumiem.

Tiešā-duālā iekšējā punktu metode tika izvēlēta par algoritmu ilgtermiņa attīstības plānošanas problēmas risināšanai. Ņemot vērā optimizācijas problēmu (6). PDIPM formulē Lagranža un barjeras funkciju sekojošā veidā:

$$L^{\gamma}(x, z, \lambda, \mu) \equiv SW(x) + \lambda^T \cdot g(x) + \mu^T (h(x) + Z) - \gamma^k \sum_{j=1}^{N_{ineq}} \ln(Z_j) \quad (24)$$

kur λ^T, μ^T Lagranža reizinātāji attiecībā uz ierobežojumiem (12)–(15); γ^k ir barjera parametrs, kurš tiecas samazināties līdz “0” algoritmam tiecoties pie atrisinājuma (k iterāciju skaitītājs); N_{ineq} ir nevienādību ierobežojumu skaits. Pieeja ietver nevienādību N_{ineq} konvertāciju vienādību ierobežojumos izmantojot barjera funkciju un pozitīvo atstarpes mainīgo vektoru Z_j .

Optimizācijas problēmai ar ierobežojumiem atrisinājuma nepieciešamais nosacījums ir lagranža funkcijas atvasinājumiem, attiecībā uz katru mainīgo, jābūt vienādām ar nulli.

Pirmās kārtas optimalitātes nosacījumi tiek risināti, izmantojot Ņutona metodi. Katrs Ņutona solis ietver samazinātas sistēmas risinājumu:

$$\begin{bmatrix} \nabla_x^2 L^{\gamma} & 0 & \nabla_x g(x) & \nabla_x h(x) \\ 0 & [\mu] & 0 & [Z] \\ \nabla_x g(x)^T & 0 & 0 & 0 \\ \nabla_x h(x)^T & I & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta Z \\ \Delta \lambda \\ \Delta \mu \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla_x f(x) + \nabla_x g(x)\lambda + \nabla_x h(x)\mu \\ \mu - \gamma^k [Z]^{-1} e \\ g(x) \\ h(x) + z \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\text{kur } [\mu] = \begin{bmatrix} \mu_1 & & & \\ & \mu_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \end{bmatrix} \text{ un } I = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \end{bmatrix}$$

Dotie mainīgie tiek atjaunoti saskaņā ar:

$$\begin{aligned} \alpha_p &= \min(\xi \min_{\Delta z_j < 0} (-Z_j / \Delta Z_j), 1) \\ \alpha_d &= \min(\xi \min_{\Delta \mu_j < 0} (-\mu_j / \Delta \mu_j), 1) \\ x &= x + \alpha_p \Delta x; \\ z &= z + \alpha_p \Delta z; \\ \lambda &= \lambda + \alpha_d \Delta \lambda; \\ \mu &= \mu + \alpha_d \Delta \mu; \end{aligned} \quad (28)$$

Parametrs ξ ir nemainīgs skalārs, kura vērtība ir nedaudz mazāka par vienu, lai nepieļautu pozitīvo mainīgo vienādību ar nulli un tiek iestatīts [0.995-0.99995] diapazonā. Ņutona iterāciju laikā, perturbācijas parametram jākonverģē līdz nullei lai apmierinātu sākotnējās problēmas pirmās kārtas optimalitātes nosacījumus. Barjeras parametru var novērtēt, izmantojot sekojošu izteiksmi pēc katras iterācijas un lielumu Z un μ atjaunošana:

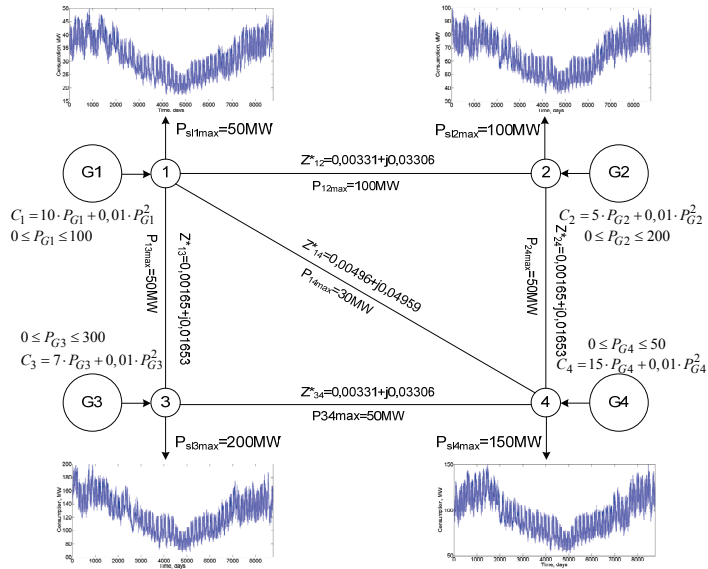
$$\gamma^k = \sigma(\mu^T Z) / N_{ineq} \quad (29)$$

kur σ ir nemainīgs skalārs lielums starp [0–1] un saucas par centra parametru un parasti apmierinošas konverģences iegūšanai tiek iestatīts ap 0,1.

2.4. ACOF un DCOF modeļu salīdzinājums attīstības plānošanai

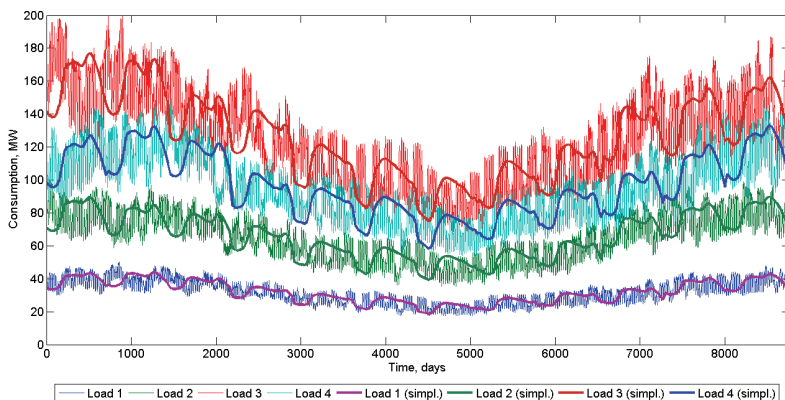
Lai salīdzinātu dažādas metodes, tika piemērotas divas pieejas: stundas aprēķins (uzskatīta visu gadu kopumā), un patēriņa/ražošanas tipisko grafiku izmantošana pa mēnešiem (mēnesi raksturot ar 24 stundu tendencēm). Tāpēc, lai noteiktu kritērijus vienam attīstības stāvoklī, nepieciešams veikt 8760 aprēķinus, izmantojot pirmo pieeju, un 288 aprēķinus, izmantojot otro pieeju. Metodes tiek salīdzinātas izmantojot 4 mezglu sistēmu.

4 mezglu sistēmas konfigurācija sastāv no 4 mezgliem, 4 ģeneratoriem ar kvadrātiskām un gabalu izmaksu funkcijām, 5 līnijām ar maksimāli pieļaujamām caurlaides spējām un gada neelastīgas slodzes. Apskatītās sistēmas parametri un konfigurācija parādīti 19. attēlā.



19. att. 4 mezglu sistēma ar tīkla parametriem

Aprēķina rezultāti, izmantojot augstāk aprakstīto līdzstrāvas modeļa pieeju un ievērojot enerģosistēmas ierobežojumus, parādīti 20. attēlā. Pieejas pielietošanas ar tipisko slodzi paātrina aprēķina procesu un ievēro galvenās sistēmas vadības tendences, bet patēriņa un ražošanas pīķu izlīdzināšana nedod attīstības soļa pilnu tehnisko novērtējumu.



20. att. 4 mezglu sistēmas patēriņa profils pie pilna un vienkāršota aprēķina

Aprēķina rezultāti 4 mezglu sistēmai, salīdzinot ACOPF un DCOPF modeļus ar dažādām pieejām, prezentēti 6. un 7. tabulās. Aprēķina tika veikti pie dažādiem tīkla nosacījumiem (ar ierobežojumiem un bez tiem), izmantojot polinoma vai gabala izmaksu funkcijas.

6. tabula

4 mezglu sistēmas piemērs bez vienkāršojumiem

Nosaukums	Ražošanas izmaksas, €	Kopējā saražotā enerģija gadā, MWh/year	Kopējais patēriņš gadā, MWh/year	Aprēķina laiks, sekundes
Bez ierobežojumiem				
DC bez ierobežo. (polinoms)	21250166	2805405	2805405	338,06
DC bez ierobežo. (gabala)	21265159	2805405		381,84
AC bez ierobežo. (polinoms)	21262709	2806701		1066,65
AC bez ierobežo. (gabala)	21277741	2806706		1204,02
Ar ierobežojumiem				
DC ar ierobežo. (polinoms)	22437402	2805405	2805405	338,61
DC ar ierobežo. (gabala)	22455709	2805405		385,10
AC ar ierobežo. (polinoms)	22447357	2806305		1103,53
AC ar ierobežo. (gabala)	22464853	2806371		1000,14

4 mezglu sistēmas piemērs ar vienkāršojumiem

Nosaukums	Ražošanas izmaksas, €	Kopējā saražotā enerģija gadā, MWh/year	Kopējais patēriņš gadā, MWh/year	Aprēķina laiks, sekundes
Bez ierobežojumiem				
DC bez ierobežo. (polinoms)	21234295	2805424	2805424	11,61
DC bez ierobežo. (gabala)	21249341	2805424		13,01
AC bez ierobežo. (polinoms)	21246743	2806709		27,66
AC bez ierobežo. (gabala)	21261863	2806716		32,81
Ar ierobežojumiem				
DC ar ierobežo. (polinoms)	22406685	2805424	2805424	11,70
DC ar ierobežo. (gabala)	22424455	2805424		13,22
AC ar ierobežo. (polinoms)	22415876	2806395		29,62
AC ar ierobežo. (gabala)	22433627	2806397		33,36

Tradicionāli, optimizējot regulētās enerģosistēmas darbību, mērķa funkcija (6) tiek pieņemta, kā vienkāršota un vienmērīga kvadrātiska forma. Tomēr elektroenerģijas tirgū kvadrātiskās izmaksas netiek izmantotas, jo tās neatbilst tirgus dalībnieku uzvedībai reālā pasaulē [36].

No augstāk prezentētiem rezultātiem, var būt redzams ievērojams aprēķina procesa paātrinājums vienam attīstības stāvoklim, izmantojot tipisko grafiku pieeju. No 6. un 7. tabulām var tikt secināts ka līdzstrāvas modeļa aprēķins bez vienkāršojumiem aizņem 338 s (5,63 min), pretstatā, aprēķins ar vienkāršojumiem aizņem 11,70 s (0,19 min), 29 reizes ātrāk nekā parasti. Dotā aprēķina gada vērtības būtiski neatšķiras. Ierosinātā pieeja ar tipisku grafikiem paātrina aprēķināšanas procesu 30 reizes un saglabā galvenās sistēmas tendences. Tomēr, patēriņa un ražošanas izlīdzināšana nedod attīstības stāvokļa pilnu tehnisko novērtējumu.

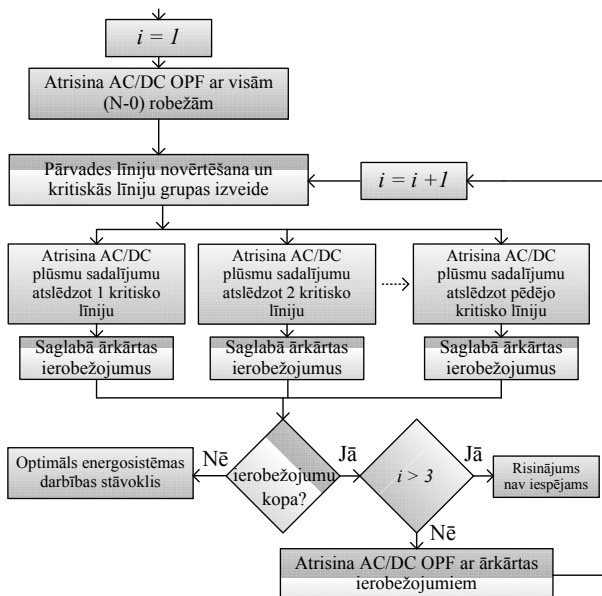
2.5. Optimālais jaudas plūsmu sadalījums ievērojot drošības ierobežojumus

SCOPF problēma ir OPF problēmas paplašinājums un satur svarīgas drošuma iezīmes optimizācijas modelī. Tā garantē visas enerģosistēmas stabili darbu, nemainot aktīvās jauda izstrādi, radoties iepriekš noteiktam un ievērotam neparedzētam notikumam (piemēram, pārvades līnijas atslēgšanās) [37]. SCOPF efektīvs risinājums ir būtisks sistēmas operatoriem, saistībā ar plānošanu, operatīvo plānošanu un reālā laika darbību.

Iteratīva SCOPF algoritma blokshēma parādīta 23. attēlā, kura sākas ar OPF aprēķinu ar (N-0) ierobežojumiem. Nākošā solī tiek uzsākta neparedzēto apstākļu analīze, kura izveido kritisko līnijas grupu un izvēlās līnijas saskaņā ar sekojošu kritēriju:

$$K_{L,rc}^* = \chi_L \cdot P_{S_{L,rc}}, \quad (33)$$

kur L pārvades līnijas kārtas numurs; $P_{S_{L, re}}$ pārvades līnijas plūsma darbības stāvoklī; χ_L līnijas L pārtraukšanas varbūtība;



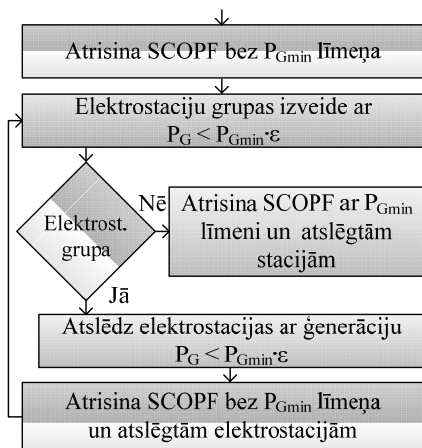
23. att. OPF ievērojot drošības ierobežojumus

Attīstības plānošanas uzdevumos, optimālā darbības stāvokļa noteikšanai, būtu jāņem vērā 10 % no pārvades līnijām, kurās pārvades līnijas plūsma, līnijas pārtraukuma varbūtība un tāpēc kritērijs K^* ir ar visaugstāko vērtību. Dotais kritērijs ir nepieciešams lai izveidotu līniju kritisko grupu un samazināt optimizācijas problēmas izmēru un aprēķinu laiku.

2.6. Vienkāršotā ģenerējošo vienību optimālā izvēle

Optimālā ģenerējošo vienību izvēles (UC) problēma ir saistīta ar palaišanas un atslēgšanas grafika noteikšanu, lai nosegt prognozēto nākotnes pieprasījumu īstermiņa periodā [38, 39]. Sakarā ar to ka UC problēma ir sarežģīta matemātiskās optimizācijas problēma un tā būtiski palielina attīstības plānošanas uzdevumu sarežģītību, tika pieņemti sekojoši vienkāršojumi: palaišanas un apstāšanās izmaksas, rezerves nepieciešamība un ātruma izmaiņas netiek ievērotas (katras stundas līdzsvara darba stāvoklis ir neatkarīgs no citām stundām).

Iteratīva vienkāršota UC-SCOPF algoritma blokshēma parādīta 30. attēlā, kura sākas ar SCOPF aprēķinu bez vienību apakšējām robežām. Nākošajā solī sākas elektrostaciju grupas izveide, ar ģenerāciju mazāku par ϵ (aprēķinos ϵ pieņemts 10 % no elektrostaciju minimālās robežas), lai identificēt stacijas kuras jāatslēdz. Iegūtais līdzsvara darbības stāvoklis, sociālās labklājības un mezglu cenas atspoguļo reālos tīkla procesus un tiek izmantoti attīstības modelēšanā.



30. att. Vienkāršotā ģenerējošo vienību optimālā izvēle

Vienkāršotā UC problēma tiek atrisināta vienam solim, neņemot vērā dinamiskās saites ar citiem soļiem. Dotās saites ir jāievēro, formējot ikstundas ģenerācijas pieejamību visam gadam.

3. MODELĒŠANAS TEHNIKA

3.1. Elektrisko tīklu dinamiskā modelēšana

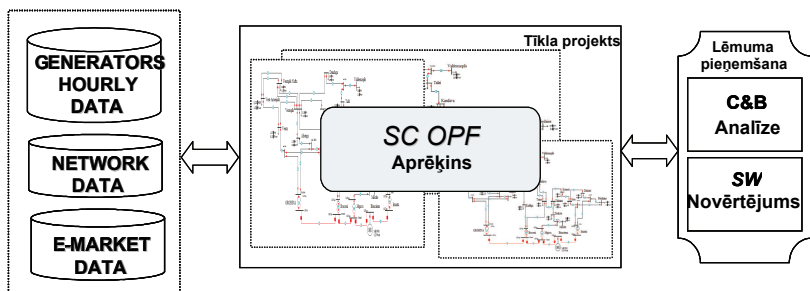
Dotajā nodaļā tiek demonstrēta jauna metodoloģija, kuras pamatā ir deterministiska koncepcija ar dinamisku pieeju pārvades tīklu attīstības plānošanai pilnīgās konkurences liberalizētos elektroenerģijas tirgus apstākļos, pamatojoties uz tehniskiem un ekonomiskiem regulēšanas principiem.

Energosistēmas matemātiskais modelis ir sistēma, un tās attīstības procesu konfigurācija un tīkla dinamiskās uzvedības ieviešanu datortehnikā sniegs iespēju aprēķināt un novērtēt sistēmas kritērijus, lēmumu pieņemšanai. Lai nodrošināt dotā uzdevuma aprēķinu ar datortehnikas darbību, ir nepieciešami sākumdati un attiecīgā programmatūra, ietverot optimizācijas algoritmus. Ņemot vērā aprēķina dimensiju, piemērojamām metodēm jābūt darbināmām ar samērā lielu ātrumu un līdzīgas prasības piemēro arī datiem. Attīstības modelēšanā jāiekļauj tīkla dinamisku uzvedību un pēc iespējas reālākus procesus, kuri notiek tīklos. Pamatojoties uz piedāvātā modeļa galvenajiem funkcionēšanas faktoriem tiek uzskatītas sekojošas funkcionālās specifikācijas (skatīt 33. att.).

Attīstības modeļa funkcionālā specifikācijas sastāv no trim galvenajiem blokiem:

- **Pirmais bloks** satur nepieciešamo ieejas datus: patērētāju, ražotāju, tīkla elements un elektroenerģijas tirgus informāciju.
- **Otrais bloks** sastāv no SCOPF algoritma, kurš veic lietotāja izveidoto scenāriju aprēķinu. Modelēšanas gaitā rezultātu iegūšana vienmēr tiek motivēta ar centienu sasniegt labākus rezultātus, jo tie, pielietojot attīstības plānošanas procesos, var būtiski ietekmēt lēmumu pieņemšanu un sistēmas attīstības ceļa optimalitātes pakāpi.

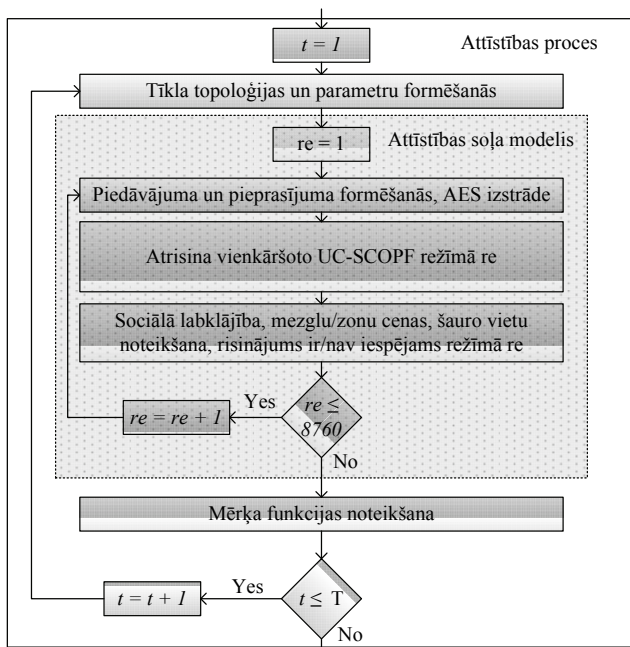
Pamatojoties uz galvenajiem funkcionēšanas faktoriem tika izstrādāts attīstības modelis (34. att.)



33. att. Ierosināta modeļa funkcionālā specifikācija

Šis process ļauj novērtēt atjaunojamo energoresursu ietekmi uz energosistēmu un tirgus formēšanos pa stundām. Atjaunojamo energoresursu integrācijas ietekmes novērtēšanas metodoloģija un algoritmi tiek apskatīti [40,41] darbos.

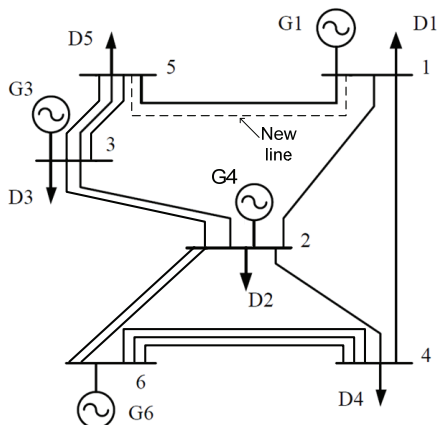
– **Trešais bloks** ir lēmumu pieņemšanas bloks. Lēmumu pieņemšana pati par sevi ir sarežģīta procedūra. Darbā zem lēmuma pieņemšanas tiek izskatīta sociālās labklājības un sastrēgumu ienākumu novērtēšana, atbilstoši (6) formulai. Turklāt, lai analizētu un salīdzinātu nākotnes investīcijas pārvades līnijās, tika definētas vērtības, kuras parāda tirgus dalībnieku labklājības un PSO ieņēmumu izmaiņas efektu.



34. att. Attīstības procesa matemātiskais modelis

3.2. Piemēra izpēte. Piemērošana uz modificētās Garver 6-mezglu sistēmas

Modificētā Garve 6-mezglu sistēma (35. att.) sastāv no 14 esošām līnijām, 5 slodzēm un 4 ģeneratoriem.



35. att. Modificētā Garver 6-mezglu sistēma ar 100MW vēja elektrostaciju

Prezentētā tīkla struktūrai pieņemtas četras attīstības stratēģijas:

- Bez vēja elektrostacijas un investīcijām;
- Bez vēja elektrostacijas un ar investīcijām jaunā līnijā starp 1–5 mezgliem;
- Ar vēja elektrostaciju un bez investīcijās;
- Ar vēja elektrostaciju un investīcijām jaunā līnijā starp 1–5 mezgliem.

Attīstības modelēšanas aprēķinos tika veikti šādi pieņēmumi:

1. Tiek apskatīts 10 gadu laika periods. Dotam laika periodam tiek noteiktas piedāvājuma un pieprasījuma izmaiņas. Modelis attēlo “Dinamiskās pārvades tīkla attīstības plānošanas” uzdevumu, kur sociālās labklājībā tiek maksimizēta;
2. Katrs attīstības solis tiek aprēķināts atbilstoši 34. attēlā prezentētam algoritmam (Tiek izmantoti maiņstrāvas un līdzstrāvas modeļi);
3. Ģenerācijas izmaksas mainās visa apskatāmā periodā: gāzes cenas pieaugums gadā sastāda 1 % un ogleš cenās 2 %. Ģeneratori piedalās tirgū ar noslēdzošām izmaksām (pilnīgās konkurences liberalizēts elektroenerģijas tirgus);
4. Katra slodze ir definēta ar individuālu patēriņa grafiku un pieaug katru gadu par 0,5 %;
5. 100MW vēja elektrostacijas gada izstrāde iegūta no [40, 41] algoritma. Izstrāde pieņemta nemainīga katram attīstības solim un nepiedalās automātiskās ģenerācijas kontrolē.

Gada sociālās vērtības rezultāti prezentēti 22. un 23. tabulās, parādot labklājības vērtību izmaiņu pa gadiem OPF un SCOPF modeļiem.

22. tabula

SW vērtības piemērā bez vēja elektrostacijas				
Solis	Bez investīcijām		Ar investīcijām	
	SW OPF, MEUR	SW SCOPF, MEUR	SW OPF, MEUR	SW SCOPF, MEUR
1	578.664	574.939	578.664	575.525
2	576.030	572.247	576.030	572.847
3	573.241	569.405	573.241	570.021
4	570.292	566.408	570.293	567.042
5	567.180	563.252	567.180	563.905
6	563.899	559.932	563.899	560.605
7	560.445	556.444	560.445	557.137
8	556.812	552.782	556.812	553.496
9	552.996	548.943	552.996	549.678
10	548.992	544.922	548.992	545.678
Kopā	5648.551	5609.274	5648.553	5615.934

23. tabula

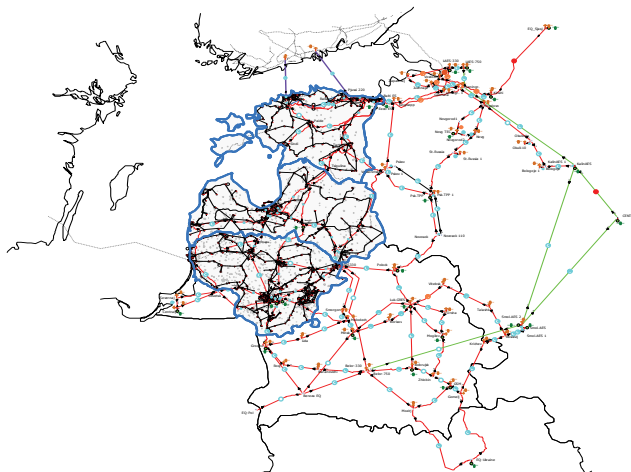
SW vērtības piemērā ar vēja elektrostacijas				
Step	Bez investīcijām		Ar investīcijām	
	SW OPF, MEUR	SW SCOPF, MEUR	SW OPF, MEUR	SW SCOPF, MEUR
1	649.103	644.525	649.175	645.317
2	646.845	642.193	646.919	643.000
3	644.440	639.715	644.514	640.538
4	641.884	637.087	641.958	637.927
5	639.171	634.303	639.247	635.162
6	636.299	631.360	636.375	632.238
7	633.261	628.252	633.338	629.151
8	630.054	624.977	630.131	625.896
9	626.672	621.528	626.750	622.469
10	623.110	617.902	623.189	618.865
Kopā	6370.839	6321.842	6371.596	6330.563

Rezultāti skaidri ilustrē enerģosistēmas uzvedību un izmaiņas, kuri jābūt ņemti vērā lēmumu pieņemšanā [42]. Jaunās līnijas būvniecība ir pamatota gadījumā kad atjaunojamo energoresursu tiek integrēti ģenerācijas portfelī un to var novērtēt kā pozitīvu, attiecībā uz labāku ražošanas un pārvades pietiekamību.

3.3. Piemēra izpēte. Piemērošana uz Baltijas enerģosistēmas

Detalizētāks Baltijas enerģosistēmas simulācijas modelis parādīts 39. attēlā, balstās uz BRELL enerģosistēmas modeļa datiem. Izstrādātais modelis ievēro pilnu elementu ģeogrāfisko piesaisti pa mezgliem un pārvades līnijā, starpsavienojumiem ar

Somiju Estlink 1 un 2 un atjaunotu informāciju par vēja parkiem un elektrostacijām [43].



39. att. Energosistēmas BRELL izstrādātais simulācijas modelis

Modeļa slodzes dati balstīti uz slodzes profiliem reģistrētiem 2012. gadā. Lai nodrošināt nepārtrauktu modeļa novērtēšanu, reālā laika dati tiek iegūti no Nord Pool spot un sadalīti atbilstoši 2012. gada sadalījumam starp esošiem BRELL mezgliem ar vidējo jaudas koeficientu. Izstrādātais modelis ir paredzēts simulēt prognozētās jauda plūsmas starp valstīm un novērtēt to iespējamo ietekmi uz normāliem un avārijas darba režīmiem.

Pamatojoties uz promocijas darbā izstrādātiem algoritmiem un metodēm, Baltijas pārvades sistēmas plānošana ir kļuvusi iespējama un ir izdarīts sekojošais rezultātu novērtējums:

- Baltijas pārvades sistēmas tīkla struktūrā ir lieli trūkumi, kas samazina atsevišķu reģionu energoapgādes drošumu, kā arī ierobežo tālāku energosistēmas attīstību. Esošais 110 kV tīkls nenodrošina pietiekami drošu enerģijas piegādi reģionos. Galvenais iemesls elektrolīniju atslēgšanai ir vēja slodzes (III un IV zonas). Tā rezultātā, pilnīga energoapgādes pārtraukšana, kas notika 2005. gadā var atkārtoties. Ar prioritāro projektu īstenošanu Baltijas reģionā, esošais 330 kV tīkls tiks pastiprināts un energoapgādes drošums gala patērētājiem palielināsies. Vienlaikus, prioritārie projekti sniedz iespēju plašākai vēja enerģijas izmantošanai, kā arī palielināt tranzīta plūsmas starp Ziemeļvalstīm un Centrāleiropu. Jaunās elektropārvades līnijas spēs nodrošināt pašreiz nepieciešamo pieprasījumu un nākotnes pieprasījumu pēc elektroenerģijas, veicot remontdarbus bez īpašiem ierobežojumiem.

Šī piemēra izpēte liecina ka koncepcija, kuras mērķis ir demonstrēt izstrādātas metodoloģijas spējas un piemērošanu, kura aptver visus posmus - no datu ievades un analīzes, līdz attīstības scenāriju novērtēšanai un lēmumu pieņemšanai ir iespējama.

SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS TURPMĀKAJAM DARBAM

Atjaunojamo energoresursu īpatsvara palielināšana un iekšējā elektroenerģijas tirgus attīstība ES valstīs veicina būtiskās izmaiņas pārvades tīklu plānošanā un to darbībā. Vēja un saules enerģijas mainīgā daba, jūras tīklu potenciāls, īpatnības hidroelektrostaciju optimālai izmantošanai un atomelektrostaciju jaudu saglabāšana liecina par izmaiņu nepieciešamību energosistēmas plānošanā. Tomēr, uzlabotā sistēmu uzraudzība un tiešsaistes stabilitātes robežu analīze kopā ar pieprasījuma regulēšanas izaugsmes potenciālu sistēmas robežvērtību risināšanā liecina, ka pie dotiem ģenerācijas un pieprasījuma modeļiem, rezerves, ko piedāvā tīklu esošās jaudas, var būt samazinātas, ar izredzēm samazināt tīkla pastiprinājumu. Augstāk minētais nozīmē to, ka uzmanība būtu jāpievērš jauniem sistēmas analīzes veidiem, ievērojot uzlabotās metodes, algoritmus, instrumentus un metodoloģijas, lai veicinātu analīzi kopā ar jauniem lēmumu pieņemšanas procesiem.

Dotā darbā ir izstrādāta jauna metodoloģija, kuras pamatā ir deterministiska koncepcija ar dinamisku pieeju pārvades tīklu attīstības plānošanai pilnīgās konkurences liberalizētos elektroenerģijas tirgus apstākļos, pamatojoties uz tehniskiem un ekonomiskiem regulēšanas principiem. Piedāvātā metodoloģija atvieglos mūsdienu energosistēmu darbību un kontroli, tai skaitā konkrēto mērķu atrisināšanu. Tā nodrošinās iespēju iekļaut pārdomātus risinājumus tehnisko, ekonomisko un vides mērķu sasniegšanā, iekļaujot izklaidēto ģenerāciju, slodzes reakciju, prognozēt slodzi un cenas.

Turpmāko izpēti var attiecināt ar ES enerģētikas politikas perspektīvām un izaicinājumiem. Energosistēmas un pārvades sistēmas optimālā attīstība liberalizētā tirgus apstākļos prasa uz nākotni vērstas pieejas, kas spēj atspoguļot un atrast līdzsvaru starp prasībām, kuras bieži ir pretrunā.

Kā nākotnes pētījumus var izvirzīt:

- Esošo OPF metožu paplašināšana ar operatīvo pārslodzes vadību, veicot elastīgu maiņstrāvas tehnoloģiju un augstsprieguma līdzstrāvas tehnoloģiju koordinētu kontroli;
- Dinamiskā OPF īstenošana vairākiem laika periodiem ar atjaunojamiem energoresursiem, ievērojot enerģijas uzglabāšanas iespējas un elastīgu pieprasījumu;
- Daudz kritēriju lēmumu pieņemšanas metodikas attīstība pārvades sistēmas ilgtspējīgas attīstības uzdevumos;
- Kompleksa izmaksu-ieguvumu analīze pārvades tīklu pastiprinājumiem, pamatojoties uz atlikušā sastrēguma ekonomiskā līmeņa novērtējuma.

IZMANTOTO INFORMĀCIJAS AVOTU SARAKSTS

1. G. Latore, R. Dario Cruz, J. Mauricio Areiza, A. Villegas, "Classification of Publication and Models on Transmission Expansion Planning," IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, no. 2, pp. 938–946, 2003.
2. P. Pancoatici, M. Debry, "High-level Definition of a New Methodology for Long-term Grid Planning" E-Highway 2050 – Modular Development Plan of the Pan-European Transmission System 2050, october 2013.

3. V. A. Dale, Z. P. Krishans, O. G. Paegle, „Dynamic Optimisation of Electric Power Networks Development”, Riga: Zinatne, 1990 (in Russian: „Динамическая оптимизация развития электрических сетей”).
4. Z. Krishans, A. Mutule, Y. Merkurjev, I. Oleinikova, “Dynamic management of Sustainable Development: Methods for Large Technical Systems”, in Hardcover, 1st ed., Springer, 2011. ISBN: 978-0-85729-062-5.
5. S. Strecker, C. Weinhardt, “Electronic OTC Trading in the German Wholesale Electricity Market”, Lecture Notes in Computer Science, 2000, Volume 1875/2000, 280–290.
6. R. Weron, „Energy price risk management”, *Physica A* 285 (2000) 127{134}.
7. Hiroaki Nagayama, „Effects of regulatory reforms in the electricity supply industry on electricity prices in developing countries”, *Energy Policy*, Volume 35, Issue 6, June 2007, Pages 3440–3462.
8. R. Weron, „Pricing derivatives in electricity markets”, International Conference on Stochastic Finance, 2004.
9. R. Weron, B. Przybylowicz, „Hurst analysis of electricity price Dynamics”, *Physica A* 283 (2000) 462{468}.
10. A. Kavkler, S. Repina, M. Festić „A Comparison of Electricity Generation Reference Costs for Different Technologies of Renewable Energy Sources”, *Energy Efficiency – A Bridge to Low Carbon Economy* (2012), ISBN: 978-953-51-0340-0.
11. Price formation in NPS. URL: <http://www.nordpoolspot.com/How-does-it-work/Day-ahead-market-Elspot-/Price-formation-in-Nord-Pool-Spot/>
12. Knops, H. P. A. and H. M. De Jong, "Merchant Interconnections in the European Electricity System." *Journal of Network Industries* 6(4): 261–292, 2005.
13. European Commission “Sector Inquiry under Article 17 of Regulation No 1/2003 on the gas and electricity markets”, final report COM(2006) 851 final.
14. C. M. Ruibal, M. Mazumdar, "Forecasting the Mean and the Variance of Electricity Prices in Deregulated Markets", *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 1, pp. 25–32, Feb. 2008.
15. S. Rossi, F. Careri, G. Migliavacca, Ö. Özdemir, M. van Hout, “Linear Estimation Approach for Including Strategic Competition in Market Simulations” 11th International Conference on the European Energy Market, Krakow, 28–30 may 2014.
16. J. M. Barroso, “Energy priorities for Europe”, Presentation to the European Council of 22 May 2013.
17. ENTSO-E “Network Code on Capacity Allocation and Congestion Management”, 27 September 2012.
18. S. Stoft, “Power System Economics: Designing Markets for Electricity”, IEEE Press, Wiley, 2002.
19. P. Vassilopoulos, “Models for the Identification of Market Power in Wholesale Electricity Markets”, *Industrial Organization*, D. E. A 129, September 2003.
20. F. Leuthold, I. Rumiantseva, H. Weigt, T. Jeske, C.v. Hirschhausen, “Nodal pricing in the German electricity sector – a welfare economics analysis, with particular reference to implementing offshore wind capacities”, *Electricity Markets Working Papers WP-EM-08a*, Dresden Germany (2005).
21. M. Turcik, A. Obushevs, I. Oleinikova, “Interstate DC Line Performance Assessment Methods”, The 3rd International Youth Conference on Energetics 2011, Leiria, Portugal, July 7–9, 2011, ISBN 978-1-4577-1494-8
22. A. Obushevs, I. Oleinikova, Z. Krishans, “Assesment of the Network Reliability Calculation in Transmission System Development Tasks”, PMAPS’2012 (12th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems). Istanbul, Turkey, June 10–14, 2012.– Symposium Proceedings (on USB 5 pp.)

23. I. Oleinikova, M. Turcik, A. Obusev, "Dynamic Management of Power System Sustainable Development with application for Smart Grids", Proceedings of the 5th International Conference on Liberalization and Modernization of Power Systems: Smart Technologies for Joint Operation Of Power Grids. Irkutsk, Russia, August 6-10, 2012. ISBN 978-5-93908-081-1.
24. I. Oleinikova, M. Turcik, A. Obushev, "Dynamic Management of Power System Sustainable Development with Smart Grids application on Transmission Level", The 3rd IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (IEEE ICSET 2012) Kathmandu, Nepal, 24–27 September 2012. ISBN: 978-1-4577-1869-4.
25. A. Obushevs, I. Oleinikova, "Assessment of optimal power flow application in long-term development planning", 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Istanbul, Turkey, 13–17 May 2013 ISBN:978-1-4673-6390-7.
26. A. Obusevs, I. Oleinikova, "Modeling of Zonal Prices with Application in Long-Term Development Planning Strategies", Conference of Young Scientists on Energy Issues "CYSENI 2012", Kaunas, Lithuania, May 24–25, 2012 – Conference Proceedings ISSN 1822-7554.
27. R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, "MATPOWER's extensible optimal power flow architecture", in Proc. IEEE Power and Energy Soc. General Meeting, 2009, Jul. 26–30, 2009, pp. 1–7.
28. R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, "MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education", IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 1, pp. 12–19, Feb. 2011.;
29. A. Obushevs, I. Oleinikova. "AC and DC optimal power flow models for long-term development planning", Conference of Young Scientists on Energy Issues "CYSENI 2013", Kaunas, Lithuania, May 29–31, 2013 – Conference Proceedings ISSN 1822-7554.
30. T. J. Overbye, X. Cheng, Y. Sun, "A Comparison of the AC and DC Power Flow Models for LMP Calculations", Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences – 2004.
31. X. Wang, Y. Song, M. Irving, "Modern Power Systems Analysis", Springer, 2008, 559 p. ISBN 978-0-387-72852-0.
32. A. J.Wood and B. F.Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control, 2nd Edition". New York: Wiley, 1996, 592 p. ISBN 978-81-265-0838-9.
33. Soliman Abdel-Hady Soliman, Abdel-Aal Hassan Mantawy, "Modern Optimization Techniques with Applications in Electric Power Systems", Springer, 2012, 414 p. ISBN 978-1-4614-1752-1.
34. A. V. Fiacco, G. P. McCormic, "Nonlinear Programming: Sequential Unconstrained Minimization Techniques", Wiley, New York, 1968.
35. El - Bakry S , Tapia RA , Tsuchiya T , Zhang Y, "On the formulation and theory of the Newton interior - point method for nonlinear programming", Journal of Optimisation Theory and Applications 1996 ; 89 (3) : 507–541.
36. H. Wang, R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, "On computational issues of market-based optimal power flow", Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 22, no. 3, pp. 1185–1193, August 2007.
37. O. Alsac, B. Stott "Optimal load flow with steady state security", IEEE Trans Pwr Appar Syst, PAS-93 (1974), pp. 745–751.
38. S. A. Kazarlis, A. G. Bakirtzis, ; V. Petridis, "A genetic algorithm solution to the unit commitment problem", Power Systems, IEEE Transactions on (Volume:11, Issue:1) Feb 1996, p. 83–92;
39. B. Wright, "A Review of Unit Commitment", 2013 URL: http://www.ee.columbia.edu/~lavaci/Projects/Brittany_Wright.pdf

40. A. Obushevs, M. Turcik, I. Oleinikova, G. Junghans, “Assessment of Wind Production Impacts to a Power System and Market Formation in Baltic”, Riga Technical University 53rd International Scientific Conference dedicated to the 150th anniversary and The 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute / RTU Alumni. Section of Power and Electrical Engineering Paper 8 of Subsection of Power Systems. Riga, RTU, 2012. ISSN 1407-7345.
41. M. Turcik, I. Oleinikova, A. Obusevs, M. Kolcun, “Probabilistic Method for Wind Production Forecasting and Energy Markets Trades Optimization in Power System with Large Wind Specific Gravity”, Proceedings of PMAFS, 12th, Istanbul (Turkey), 10–14 June, 2012, pp 134–139.
42. A. Obushevs, I. Oleinikova. Transmission Expansion Planning Considering Wholesale Electricity Market and Integration of Renewable Generation // 11th International Conference on the European Energy Market, Krakow, Poland, May 28–30, 2014.
43. A. Obushevs, I. Oleinikova, A. Mutule, “Infrastructure of Baltic Region Transmission System: Analysis of Technical and Economic Factors of it’s Development”, Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2014, No 4, P. 3–14. DOI: 10.2478/lpts-1014-0023.