

**ЭНЕРГЕТИКА МУАММОЛАРИ ИНСТИТУТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.02/30.12.2021.Т.143.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ФАНЛАР АКАДЕМИЯСИ
ЭНЕРГЕТИКА МУАММОЛАРИ ИНСТИТУТИ**

ТУРАЕВ АКРАМЖОН ИКРОМЖОНОВИЧ

**ТАҚСИМЛАНГАН ГЕНЕРАЦИЯ МАНБАЛАРИ АСОСИДА
ЗАМОНАВИЙ ЭЛЕКТР ТАРМОҚЛАРИНИ ШАКЛЛАНТИРИШ
МУАММОЛАРИ ВА ЕЧИМЛАРИ**

05.05.01 – Энергетика тизимлари ва мажмуалари

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2025

**Техника фанлари доктори (DSc)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации
доктора (DSc) технических наук**

**Content of the dissertation abstract of Doctor of Science
(DSc) on Technical Sciences**

Тураев Акрамжон Икромжонович

Тақсимланган генерация манбалари асосида замонавий электр тармоқларини шакллантириш муаммолари ва ечимлари..... 3

Тураев Акрамжон Икромжонович

Проблемы и решения формирования современных электрических сетей на основе источников распределенной генерации..... 33

Turaev Akramjon Ikromjonovich

Problems and solutions in the development of modern power systems based on distributed generation sources..... 65

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 70

**ЭНЕРГЕТИКА МУАММОЛАРИ ИНСТИТУТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.02/30.12.2021.Т.143.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ФАНЛАР АКАДЕМИЯСИ
ЭНЕРГЕТИКА МУАММОЛАРИ ИНСТИТУТИ**

ТУРАЕВ АКРАМЖОН ИКРОМЖОНОВИЧ

**ТАҚСИМЛАНГАН ГЕНЕРАЦИЯ МАНБАЛАРИ АСОСИДА
ЗАМОНАВИЙ ЭЛЕКТР ТАРМОҚЛАРИНИ ШАКЛЛАНТИРИШ
МУАММОЛАРИ ВА ЕЧИМЛАРИ**

05.05.01 – Энергетика тизимлари ва мажмуалари

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2025

Техника фанлари доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Олий таълим, фан ва инновациялар вазирлиги хузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2023.1.DSc/T592 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Энергетика муаммолари институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси (www.energetika.uz) ҳамда «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:

Муратов Хаким Махмудович
техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Хамидов Шухрат Вахидович
техника фанлари доктори, профессор

Таслимов Абдурахим Дехканович
техника фанлари доктори, профессор

Садуллаев Насулло Нематович
техника фанлари доктори, профессор

Ётақчи ташкилот:

“O’zenergoingining” акциядорлик жамияти

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Энергетика муаммолари институти хузуридаги DSc.02/30.12.2021.T.143.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2025 йил 21 ноябр соат 10:00 даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 40. Тел.: (99855) 520-01-52; e-mail: energetika_in@mail.ru).

Диссертация билан Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Энергетика муаммолари институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (0 рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 40. Тел.: (99855) 520-01-52).

Диссертация автореферати 2025 йил 07 ноябр куни тарқатилди.

(2025 йил 06 ноябр даги 6 рақамли реестр баённомаси).



Х. М. Муратов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси, техника фанлари доктори, профессор

Ж. Н. Толипов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби, техника фанлари бўйича фалсафа доктори PhD, катта илмий ходим

О. Х. Ишназаров
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, техника фанлари доктори, профессор

КИРИШ (фан доктори (DSc) диссертациясига автореферат)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда энергияга бўлган талабнинг ортиб бориши ва қайта тикланувчи манбалардан кенг фойдаланишни такомиллаштириш учун электр тармоқларини такомиллаштириш масалаларига алоҳида аҳамият берилмоқда. Ҳозирги кунда ривожланган мамлакатларда «... қайта тикланувчи энергия манбалардан электр энергияни ишлаб чиқариш йилига 10% га ўсиб келмоқда, шундан шамол ва қуёш энергетикасининг улуши 60% ни ташкил этмоқда. 2030 йилга келиб, нол эмиссия сценарийсида ишлаб чиқаришнинг 5500 GW дан ортигини қайта тикланадиган энергия манбаларини ташкил этиши белгиланган»¹. Бу борада, жумладан интеллектуал тармоқлар, марказлашмаган бошқарув моделлари, энергия сақлаш технологияларини ривожлантириш ва уларни моделлаштириш асосида барқарор тармоқ самарадорлигини оширишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда тақсимланган генерация манбаларининг электр тармоқларига самарали интеграциялаш, хусусан тақсимлаш электр тармоқларининг барқарорлигини таъминлаш, уларни туғри бошқариш орқали кучланиш тебранишларини камайтириш ҳамда частота мувозанатсизлигида электр энергияси сифатини оширишга қаратилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда, жумладан, замонавий интеллектуал бошқарув тизимларини энергия сақлаш технологияларини жорий қилиш орқали такомиллаштириш ва тақсимланган генерация манбаларини электр тармоқларига уйғун тарзда интеграция қилиш бўйича тадқиқотлар устивор ҳисобланмоқда. Шу билан бирга, тақсимланган генерация манбаларининг динамик моделларини такомиллаштириш усули, тақсимлаш электр тармоқларида реактив қувватни бошқариш усули ҳамда тақсимланган генерация манбасининг имкониятига қараб қувват балансини таъминлаш усули долзарб вазифалардан ҳисобланмоқда.

Республикамизда қайта тикланувчи энергия манбаларини кенг жорий этиш ва паст кучланишли электр тармоқларига тақсимланган генерация манбаларини самарали интеграция қилиш бўйича тадқиқотлар ўтказиш ва уларни амалда қўллаш бўйича кенг кўламли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. 2030 йилгача мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегиясида, жумладан «Ўтказиб бериладиган электр энергия миқдорини йилига 120 миллиард кВт*соатга етказиш ва республикада қайта тикланувчи энергия манбаларининг улушини 54% га етказиш, ўзгарувчан ишлаб чиқариш қувватлари қўшилишини инобатга олган ҳолда электр энергетика тизимининг барқарор ишлашини таъминлаш»² бўйича вазифалари белгиланган. Ушбу вазифаларни амалга оширишда, хусусан, тақсимланган генерация манбалари ва энергия сақловчи тизимларнинг тармоқдаги улушини кўпайтириш ҳамда

¹<https://www.iea.org/news/massive-global-growth-of-renewables-to-2030-is-set-to-match-entire-power-capacity-of-major-economies-today-moving-world-closer-to-tripling-goal>

²Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2023 йил 9 сентябрдаги ПФ-158-сон “Ўзбекистон — 2030» стратегияси тўғрисида”ги Фармони.

интеллектуал бошқарув технологияларини татбиқ этиш, жумладан тақсимланган генерация манбаларини самарали интеграция қилиш усуллари ишлаб чиқиш, илмий-техникавий ечимларни шакллантириш ва электр тармоқларига янги турдаги манбаларни самарали интеграция қилиш муҳим ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2023 йил 16 февралдаги ПҚ-57-сон «2023 йилда қайта тикланувчи энергия манбаларини ва энергия тежовчи технологияларни жорий этишни жадаллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида» ги Фармони, 2023 йил 14 июндаги 247-сон Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамасининг «Жисмоний шахслар ва тадбиркорлик субъектлари томонидан қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланган ҳолда ишлаб чиқарилган электр энергиясининг эҳтиёждан ортиқча қисмини сотиш тартибини белгилаш тўғрисида» ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республикада фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Диссертация иши бўйича тадқиқотлар республикаси фан ва технологиялари ривожланишининг II «Энергетика, энергия тежамкорлик ва муқобил энергия манбалари» устувор йўналишига мос келади.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи³. Энергетика тизимида тақсимланган генерация манбалари ва уларнинг иш режимларини ҳисобга олган ҳолда электр тармоқларини такомиллаштиришга қаратилган илмий тадқиқотлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари, жумладан Massachusetts Institute of Technology (АҚШ), Stanford University (АҚШ), Tokyo Technology Institute (Япония), Georgia Institute of Technology (АҚШ), Imperial College London (Англия), Technical University of Munich (Германия), Tsinghua University (Хитой), Беларусия энергетика институти (Белоруссия), Delft University of Technology (Нидерландия), Олмота энергетика ва алоқа университети (Қозғистон), National University of Singapore (Сингапур), Kyoto University (Япония) ва бошқаларда амалга оширилмоқда.

Энергетика тизимида электр энергияси сифат кўрсаткичларини ўрганиш ва тармоқ турғунлигини ошириш бўйича дунё миқёсида жумладан, куйидаги муҳим илмий натижалар олинган: интеллектуал бошқарув алгоритмларини жорий этиш орқали тақсимланган генерация манбалари иштирокида тармоқ параметрларини барқарор ушлаб туриш мумкинлиги исботланган (Фраунгофер энергетика институти, Германия; Массачусетс технология институти, АҚШ); микроинвертор ва локал энергия сақлаш тизимларини биргаликда қўллаш асосида кучланишнинг тезкор тикланишини таъминловчи рақамли моделлар яратилган (Империял Колледж Лондон, Буюк Британия); паст кучланишли тармоқларда тақсимланган генерациянинг ўзгарувчан юкламаларга таъсирини аниқлаш ва оптимал бошқариш бўйича нейрон тармоқ

³ www.per.mit.edu, www.titech.ac, www.wikipedia.org, www.orbit.dtu.dk

моделлари ишлаб чиқилган (Цинхуа университети, Хитой); шунингдек, тақсимланган генерация манбалари интеграциясида частота барқарорлигини таъминловчи адаптив бошқарув стратегиялари амалиётга татбиқ этилган (Токио технологик институти, Япония).

Дунёда паст кучланишли электр тармоқларига уланадиган тақсимланган генерация манбаларининг ишончлилиги ва самарадорлигини ошириш билан боғлиқ муаммоларнинг ечимини топишга қаратилган бир қатор, жумладан қуйидаги устувор йўналишларда: паст кучланишли тармоқларда кучланиш ва частота барқарорлигини таъминлаш; тақсимланган генерация манбалари билан энергия сақлаш тизимларининг биргаликдаги ишини оптималлаштириш; интеллектуал бошқарув алгоритмлари асосида реактив қувват тақсимотини такомиллаштириш; локал юкламаларда энергия оқимларини рақамли бошқариш ва тармоқ йўқотишларини камайтиришга оид тадқиқотлар олиб борилмоқда.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Энергетика тизимининг замонавий электр тармоқларини бошқариш, қайта тикланувчи энергия манбаларини тизимга интеграциялаш, энергетик ресурслардан оқилона фойдаланиш, тақсимланган генерация манбаларини умумий иш режими самарадорлигини ошириш каби масалаларни ҳал қилишда бир қатор таниқли хорижий олимлар катта ҳисса қўшганлар, жумладан Charlz Franklin Kettering, Kannan M. Krishnan, Wilsun Xu, Mani Venkatasubramanian, Chanan Singh, Liuchen Chang, Vijay Vittal, Prabha Kundur, Mladen Kezunovic, Mani Venkataramanan, Mohammad Shahidehpour, Arkady Pikovsky, Raja Ayyanar, George Gross, Yousef Mahmoud, А.Х. Аvezов, Г.А. Гараханова⁴ ва бошқалар.

Электр тармоқларига қайта тикланувчи энергия манбаларини интеграция қилиш усулларини ишлаб чиқиш ва такомиллаштиришга Ўзбекистоннинг таниқли олимларини илмий ишлари бағишланган. Булардан: Т.Х. Носиров, Р.А. Захидов, Х.М. Муратов, Ф.А. Хошимов, Ш.В. Хамидов, Т.Ш. Гайибов, О.Х. Ишназаров, А.Д. Таслимов. Олиб борилган илмий тадқиқотлар натижасида тақсимланган генерация манбаларини тармоққа самарали интеграция қилиш масалаларини ечишда салмоқли натижаларга эришилди.

Шу билан бирга, Ўзбекистон Республикаси энергетика тизимида тақсимланган генерация манбаларини кенг жорий қилиш ҳамда уларни самарали интеграция қилиш, тақсимланган генерация манбаларидан фойдаланиш орқали электр тармоқларини тубдан такомиллаштириш, турли энергия манбаларига эга тизимни шакллантириш, қайта тикланувчи энергия манбаларининг салбий таъсирларини олдини олиш, қувват балансини

⁴Диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий тадқиқотлар шарҳи куйидагилар асосида амалга оширилди: Prabha Kundur "Power System Stability and Control" Toronto 1993; B. Zhang, P. Dehghanian and M. Kezunovic, "Optimal Allocation of PV Generation and Battery Storage for Enhanced Resilience," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 1, pp. 535-545, Jan. 2019; Y. Wang and V. Vittal, "Data Driven Real-Time Dynamic Voltage Control Using Decentralized Execution Multi-Agent Deep Reinforcement Learning," in IEEE Open Access Journal of Power and Energy, vol. 11, pp. 508-519, 2024; L. F. Wang, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 3, August, 2008, pp. 1336-1345; M. Mao, P. Jin, N. D. Hatziargyriou and L. Chang, "Multiagent-Based Hybrid Energy Management System for Microgrids," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, no. 3, pp. 938-946, July 2014;

таъминлаш бўйича тақсимлаш тармоқларининг имкониятларини ошириш муаммолари етарли даражада ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Энергетика муаммолари институтининг “Электротехнологиялар ва энергетик ускуналарни эксплуатация қилиш” лабораторияси илмий тадқиқот ишлари режасига мувофиқ «Тақсимланган генерациялар асосидаги замонавий электр тармоқлари эксплуатация шароитларини шакллантириш муаммолари ва ечимлари» (2024-йил) лойиҳаси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади тақсимланган генерация манбаларининг электр тармоқлари учун интеграцияланган иш режими моделини яратиш, интеллектуал бошқарув тизимини такомиллаштириш, ҳамда актив ва реактив қувват балансини самарали бошқариш асосида замонавий электр тармоқларини такомиллаштиришдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

тақсимланган генерация манбалари асосида замонавий электр тармоқларини шакллантиришда фойдаланиладиган усулларни таҳлил қилиш ва муаммоларни аниқлаш;

тақсимланган генерация манбаларининг паст кучланишли электр тармоқларида интеграцияланган иш режимини моделлаштириш;

замонавий электр тармоқлари учун асосланган илмий-техник ечимлар асосида тақсимланган генерация манбаларининг рақамли динамик моделларини такомиллаштириш;

паст кучланишли тармоқларда кучланишни ростлаш тизимини тақсимланган генерация манбаларининг реактив қуввати асосида такомиллаштириш;

тақсимланган генерация манбаларини марказлашмаган актив қувват балансининг бошқарув тизимига интеграция қилиш орқали тармоқ иш режимини яхшилаш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида қуёш фотоэлектрик станциялари (ҚФЭС), шамол турбиналари (ШТ), дизель генераторлари (ДГ), энергия сақлаш тизимлари (ЭСАБТ) интеграциялашган, уларнинг хусусиятлари ҳамда параметрлари билан жиҳозланган тақсимлаш электр тармоқлари олинган.

Тадқиқотнинг предметини тақсимланган генерация манбаларининг электр тармоқларига интеграция қилиниши, уларнинг бошқарув усуллари ва иш режимини такомиллаштирувчи параметрлар ташкил қилади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида математик моделлаштириш, оптималлаштириш, тажриба ва экспериментал тадқиқотлар, ҳамда имитацион моделлаштиришнинг замонавий усулларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгиллиги қуйидагилардан иборат:

паст кучланишли электр тармоқлари учун тақсимланган генерация манбалари бирлашган иш режимининг математик ва рақамли модели тармоқ параметрлари асосида ишлаб чиқилган;

тақсимланган генерация манбаларини паст кучланишли электр тармоқларида оптимал ўрнатиш ва ўрнатиладиган қувватларини ҳисоблаш асосида тизимдаги ортиқча юкланишларни бартараф этиш усули ишлаб чиқилган;

тақсимланган генерация манбаларини самарали интеграция қилиш асосидаги умумий иш режимининг уланиш нуқтасидаги тармоқ параметрларини ҳисобга олган ҳолда Multi-Agent Systems тизимида ишлайдиган рақамли модели ишлаб чиқилган;

тақсимланган генерация манбалари орқали паст кучланишли электр тармоқлари кучланишини реактив қувват асосида бошқаришнинг интеллектуал тизими манбанинг реактив қувват имконияти ҳисобига такомиллаштирилган;

тақсимланган генерация манбаларини марказлашмаган актив қувват балансининг биринчи ва иккинчи поғонали бошқаруви тизимига манбанинг актив қувват имконияти асосида интеграция қилиш усули такомиллаштирилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

тақсимланган генерация манбаларини электр тармоқларига интеграция қилиш ва интеллектуал бошқарувни таъминлаш учун математик моделлар ва алгоритмлар ишлаб чиқилган;

энергия сақлаш тизимлари (ЭСАБТ), қайта тикланувчи энергия манбалари (ҚФЭС, ШТ) ва дизель генераторлари ўртасидаги ўзаро таъсирни яхшилаш учун марказлашмаган бошқарув механизмлари ва усуллари таклиф этилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги тадқиқот давомида қўлланилган моделлар, алгоритмлар ва ҳисоблаш усуллари халқаро стандартлар, илмий тадқиқотлар ва реал электр тармоқларига оид маълумотларга асосланган. Таклиф этилган усуллар DIGSILENT PowerFactory- электр тизимларини моделлаштириш дастурида симуляция қилиш орқали текширилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти тақсимланган генерация манбаларининг электр тармоқларига интеграциясини математик моделлаштириш, интеллектуал бошқарув тизимларини такомиллаштириш ва барқарор иш режими учун янги усулларни ишлаб чиқилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти электр энергетика соҳасида реал вақтда марказлашмаган бошқарувни такомиллаштириш, тақсимланган генерация манбаларини тармоққа уйғун тарзда интеграция қилиш, электр тармоқ кучланиши ва барқарорлигини таъминлангани билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Тақсимланган генерация манбаларини орқали электр тармоқларини такомиллаштириш ечимларини қўллаш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

тармоқдаги ортиқча юкланишларни бартараф этиш учун тақсимланган генерация манбаларини оптимал уланиш нуқтасини аниқлаш усули “Бахмал туман электр таъминоти корхонаси”да жорий этилган (“Жиззах ҳудудий

электр тармоқлари” АЖнинг 2023 йил 23- ноябрдаги маълумотномаси). Натижада “Мугол” ПСнинг 10 кВ томонида жами 1600 кВт қувватли тақсимланган генерация манбаларини уланиши зарур бўлган ҳудудлар аниқланди. Бу орқали 4000 кВА қувватга эга трансформаторларнинг юкланишини 16% га ва электр узатиш тармоқларида йўқотишларни 6% гача пасайтириш имконини берган;

трансформаторлардаги ортиқча юкланишларни бартараф этиш учун тақсимланган генерация манбаларини ўрнатилиш қувватини аниқлаш усули ва алгоритми “RODMAN” МЧЖда жорий этилган (“Наманган ҳудудий электр тармоқлари” АЖнинг 2023 йил 10- ноябрдаги 35-25/4056- сонли маълумотномаси). Натижада умумий қуввати 1050 кВт бўлган тақсимланган генерация манбаларини ўрнатилиши “МегаТекстил” ПСда ўрнатилган 6300 кВА трансформаторни юкланишини 12% га, 10 кВ ва ундан паст кучланишли электр узатиш тармоқларининг йўқотишлари 7% гача пасайтириш имконини берган;

тармоқ параметрларини ҳисобга олган ҳолда рақамли динамик моделларни такомиллаштириш методологияси “Сурхондарё ҲЭТ” АЖда жорий этилган (“Сурхондарё ҳудудий электр тармоқлари” АЖнинг 2023 йил 16- ноябрдаги № 39-20/9285 сон маълумотномаси). Натижада 35 кВ ва ундан паст кучланишли электр узатиш тармоқларининг йўқотишларини 6% га, 2500 кВА трансформатор юкланишини 18 % гача камайтиришга эришилган;

тақсимланган генерация манбаларини оптимал ўрнатиш ва ўрнатилиш қувватларини ҳисоблашнинг рақамли модели “Хоразм МЭТ” АЖда жорий этилган (Ўзбекистон Республикаси “Ўзбекистон миллий электр тармоқлари” АЖ 2023 йил 5 декабрдаги 01-02-22/4924-сонли маълумотномаси). Натижада кутилаётган йиллик иқтисодий самарадолик 435 000 000 (тўрт юз ўттиз беш миллион) сўмни ташкил этган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг натижалари 4 та халқаро ва 5 та республика илмий-техник анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 23 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фан доктори (DSc) диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 12 та мақолалар, жумладан 10 та республика ва 2 та чет эл илмий журналларида нашр этилган ва 2 та ЭҲМ учун дастурга гувоҳнома олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар руйхати ва иловалардан иборат. Диссертация ҳажми 195 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти, тадқиқот мақсади ва вазифалари асосланган, тадқиқот объекти ва предмети ифодаланган, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялар ривожланиши

устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган, назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, диссертация тадқиқоти натижаларининг ишлаб чиқаришга жорий қилиниши ҳамда синов натижалари кўрсатилган, чоп этилган илмий ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **“Ўзбекистон энергетика тизими ва замонавий электр тармоқларида тақсимланган генерация манбаларининг ривожланиши”** деб номланган биринчи бобида Ўзбекистон электр энергетика тизимининг ҳолати, мавжуд муаммолар таҳлили ва тадқиқот методологияси, замонавий электр тармоқлари ва тақсимланган генерация манбалари бўйича асосий тушунчалар, тақсимланган генерация манбаларини электр тармоқларига интеграциялаш бўйича жаҳон тажрибаси, замонавий электр тармоқларини шакллантириш, бошқариш ва қувват балансини сақлаш усуллари бўйича адабиётлар таҳлил қилинган.

Таҳлил натижаларига кўра, бугунги кунда мамлакатимизда ўрнатилаётган тақсимланган генерация манбалари билан боғлиқ муаммолар қуйидагиларни ташкил этмоқда:

- тақсимланган генерация манбаларининг иш режими истеъмолчилар талабига мос келмаслиги;

- тақсимлаш тармоқларида кучланиш оғишлари кузатилганда тақсимланган генерация манбаларининг тармоқдан узилиб қолиши;

- электр энергиясига талаб юқори бўлмаган тақсимлаш тармоқларида тақсимланган генерация манбаларининг ўрнатилиши оқибатида электр энергияси сифат кўрсаткичларининг пасайиши;

- бир фазага уланган тақсимланган генерация манбаларининг кўпайиши ва фазалараро носимметриянинг ҳаддан зиёд ортиши;

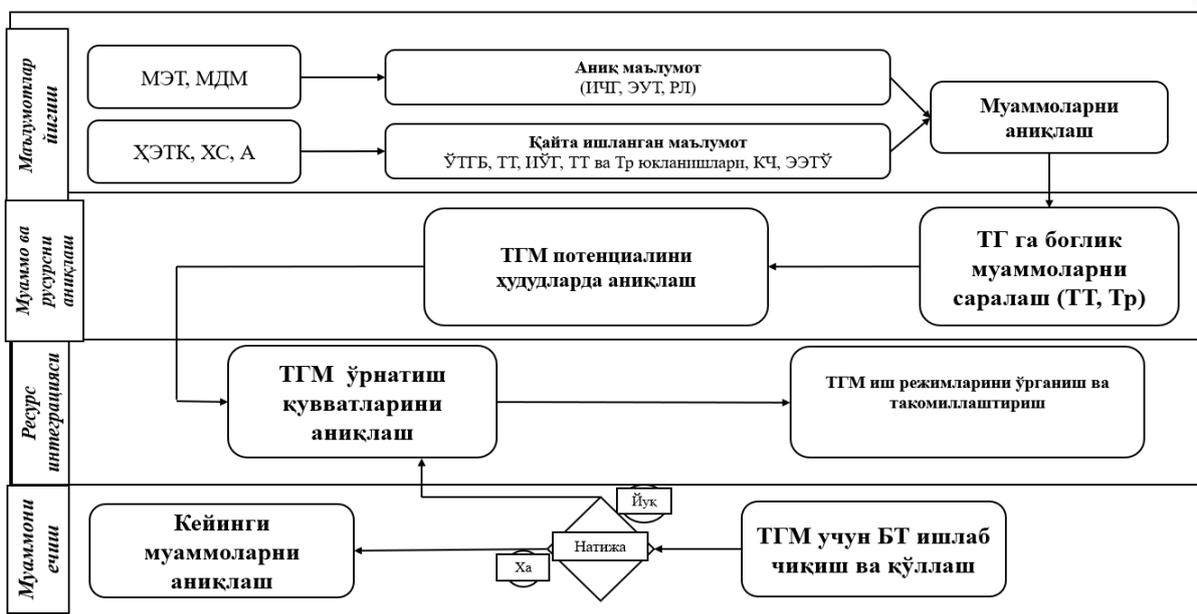
- тақсимланган генерация манбалари чиқиш параметрларининг тақсимлаш электр тармоғи параметрларидан кескин фарқ қилиши, натижада тенглаштирувчи ортиқча тоқларнинг ортиб бораётгани.

Юқоридаги муаммоларга тўғри ечим топиш тадқиқот ишимизнинг асосий натижаси сифатида баҳоланади.

1- расм тадқиқот методологиясини ифодалайди, бунда барча босқичлар кўрсатиб ўтилган ва жараён қандай амалга оширилиши изоҳлаб берилган.

Маълумотлар йиғиш босқичи:

Бу ерда асосий маълумотлар ва қайта ишланган маълумотлар тўпланган. Маълумотлар турли манбалардан олинган жумладан, МЭТ (Миллий электр тармоқлари), МДМ (Марказий диспетчерлик маркази), ХЭТК (Худудий электр тармоқлари корхонаси), ХС (Хизмат кўрсатувчи), А (Аҳоли). Аниқ маълумотлар олинган, масалан, ишлаб чиқариш қувватлари (ИЧГ), электр узатиш тармоқлари (ЭУТ), режадаги лойиҳалар (РЛ). Қайта ишланган маълумотларга эса ўрнатилган тақсимланган генерация манбалари (ЎТГМ), истеъмол ўзгариш графиги (ИЎГ), тақсимлаш тармоғи ва трансформаторлар юкланиши (ТТ ва Тр юкланиши), кучланиш тушуви (КЧ) (қайта чиқишлар), электр энергияси таъминоти узилишлари (ЭЭТЎ) киритилган.



1-расм. Тақсимланган генерация манбасининг қувват бошқарувидаги аҳамияти

Муаммоларни аниқлаш: Тўпланган маълумотлар асосида мавжуд муаммоларни аниқлаш амалга оширилди. Ҳудудлардаги тақсимлаш тармоқлари ва трансформатор пунктларида ТГМга боғлиқ муаммоларни саралаш амалга оширилган.

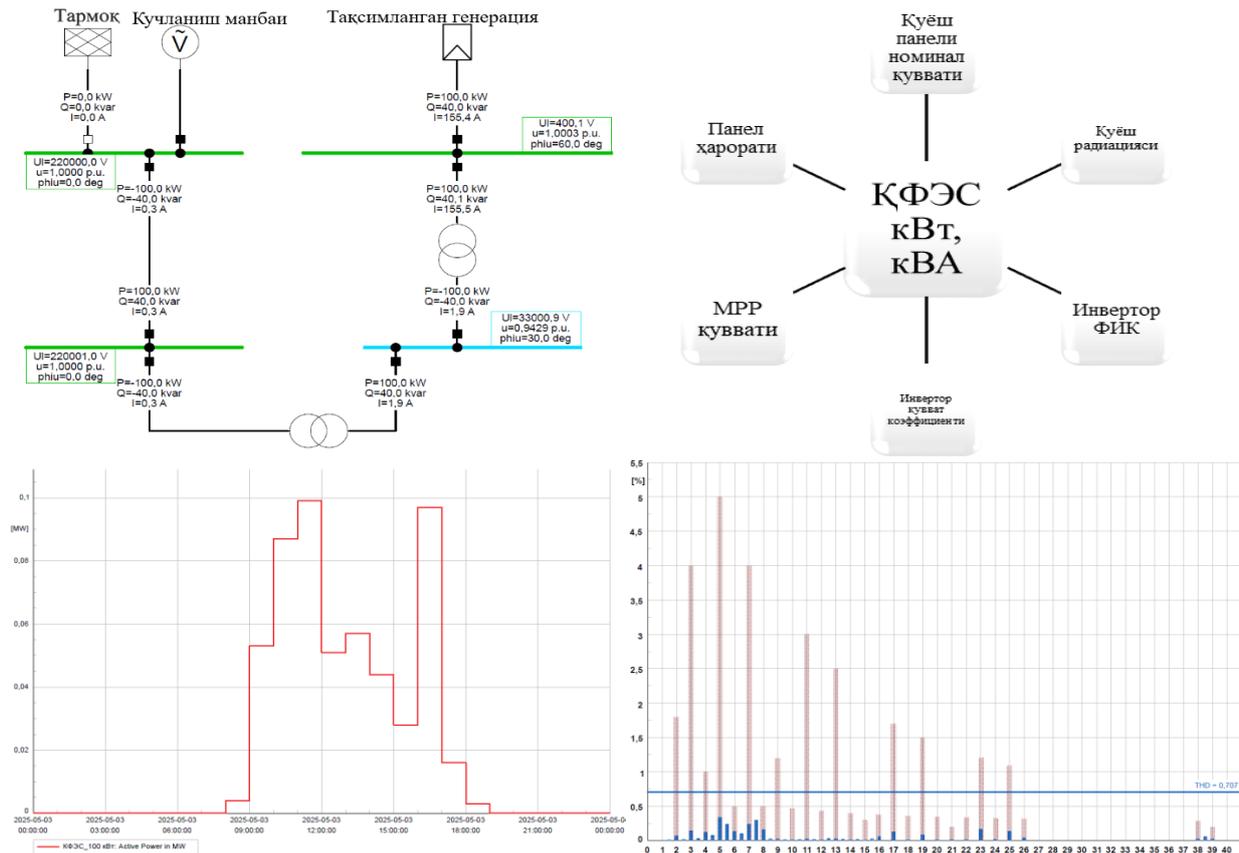
Муаммоларни ҳал қилиш: Ҳудудлар бўйлаб ТГМ потенциали ва уни ўрнатиш имкониятлари аниқланган. ТГМ учун БТ (бошқарув тизими) қўлланилган ва бу орқали технологик ечимларга эришилган. Юқоридаги жараён кўзланган натижага эришилмагунча давом эттирилган.

Диссертациянинг “Тақсимланган генерация манбаларининг электр тармоқларидаги мустақил иш режимлари асосида умумий интеграция иш режимини моделлаштириш” деб номланган иккинчи боби кичик қувватли қуёш фотоэлектрик ва шамол станцияларининг паст кучланишли электр тармоғидаги аҳамияти ҳамда мустақил интеграция иш режимлари, энергия сақловчи аккумулятор батарея тизимларининг ишончли электр таъминотидаги аҳамияти ва мустақил иш режимлари, паст кучланишли тармоқларда тақсимланган генерация манбалари билан боғлиқ электр энергиясининг сифат кўрсаткичлари ва тақсимланган генерация манбаларининг паст кучланишли тармоқларда умумий иш режимини моделлаштиришга бағишланган.

Умумий ишлаб чиқариш қуввати 100 кВт бўлган қуёш фотоэлектрик станциясининг PF DigSilent дастури ёрдамида яратилган модели 2- расмда кўрсатиб ўтилган. Электр тармоғига узатилган қувватни аниқлашда мавжуд математик моделлардан фойдаланилган, ҳамда якуний натижаларни олишда қўшимча ташқи муҳит шароитлари инобатга олинган.

Таҳлил натижалари ўзгартиргич орқали ўзгармас ток машинаси уланган 10 кВ ёпиқ тақсимлаш қурилмалари (ЁТҚ)га тегишли юқори гармоника сигналларини филтр ўрнатилгандан олдинги ва кейинги ҳолатини ифодалайди. 5-юқори гармоника сигнали 3,3 % дан 0,4 % га, 7-юқори гармоника сигнали 5,9 % дан 1,8 % га, 10-юқори гармоника сигнали 2,87 % дан

0,2 % га, 11-юқори гармоника сигнали 16,9 % дан 1,5 % га ва 13-юқори гармоника сигнали 4,6 % дан 1,4 % га пасайганлиги, ҳамда барча юқори гармоника сигналлари талаб даражасида эканлиги кузатилган.



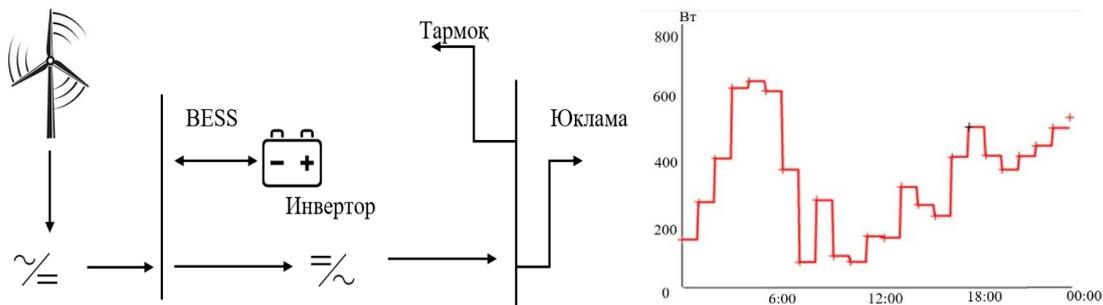
2-расм. Моделлаштирилган ҚФЭС чиқиш параметрлари ва унга боғлиқ факторлар

Қуёш панелларининг ишлаб чиқариш қуввати W_p қуйидагича аниқланган:

$$W_p = \frac{G_p * W_{pmax} * \mu_p * \mu_i}{G_s} \quad (1)$$

$$W_{pu} = W_p * panel_{soni} \quad (2)$$

бу ерда W_{pu} - ҚФЭСда жойлашган барча панелларнинг умумий қуввати, $panel_{soni}$ -қуёш панелларининг сони, G_p -қуёш панелига тушаётган қуёш радиацияси (W/m^2), G_s -стандарт қуёш радиацияси, W_{pmax} -қуёш панелининг максимал ишлаб чиқариш қуввати, μ_p -қуёш панелининг фойдали иш коэффициенти, μ_i -инверторнинг фойдали иш коэффициенти.



3-расм. Кичик қувватли шамол турбинасининг кунлик генерацияси

3-расмда 1 кВт кичик қувватли шамол турбинасининг Жиззах вилояти худудларидаги кун давомидаги генерацияси тасвирланган. Унга кўра кун давомида шамол турбинасининг энг паст генерацияси эрталабги соат 7-8 ларга тўғри келмоқда ва бу соатига 0,1 кВтни ташкил этган.

Кичик ўлчамли энергиясини сақловчи батарея тизимлари (ЭСАБТ) (4-расм) одатда кундузги максимум бўлмаган вақтларда ортиқча электр энергиясини истеъмол қилиши ва кечаси қуёш фотоэлектрик станциялари бўлмаган вақтларда истеъмолчиларга қувват узатишини қуйидаги ифодалар орқали аниқлаштирилди.

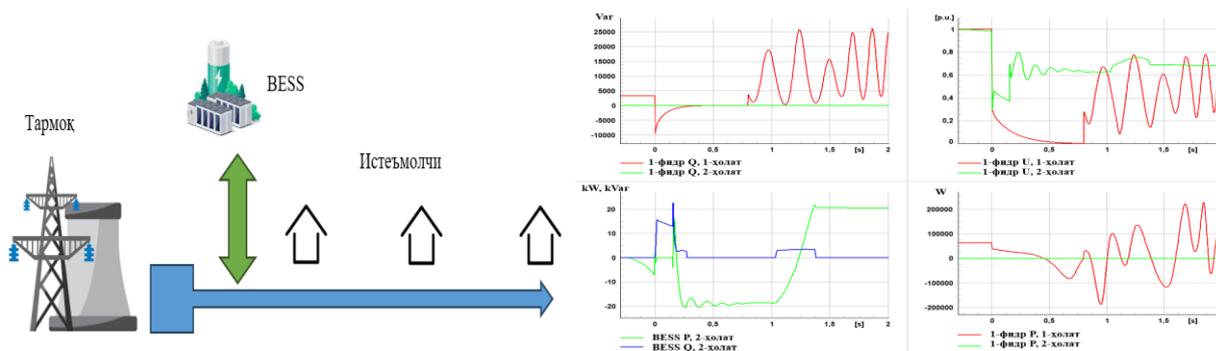
$$W_{bess} = \max(W_{ist} - (W_{qtem} + W_t)) \quad (3)$$

бу ерда W_{bess} -аккумулятор батареясининг олиши керак бўлган электр энергияси, W_{ist} - максимум бўлмаган вақтларда керак бўладиган истеъмолчиларнинг электр энергиясига бўлган талаби, W_{qtem} - тақсимланган генерация манбаларидан олинadиган электр энергияси, W_t - марказий электр тармоқлари орқали берилаётган электр энергияси.

Аккумулятор батареясининг қувват олиш ёки узатиш имкониятини белгилашда қуйидаги ифодадан фойдаланилди:

$$W_{bess} = \max\left(\frac{|P_{besmak}|}{S_{bess} * H * \mu}, \frac{|P_{bessmin}|}{S_{bess} * H * \mu}\right) \quad (4)$$

бунда: P_{besmak} , $P_{bessmin}$ - бирлик вақт давомида максимал ва минимал қувват олиши ёки узата олиши, S_{bess} - аккумулятор захирасининг қиймати, μ - аккумулятор батареясининг фойдали иш коэффиценти, H - белгиланган қувватда аккумулятор батареясининг тўлиш муддати.



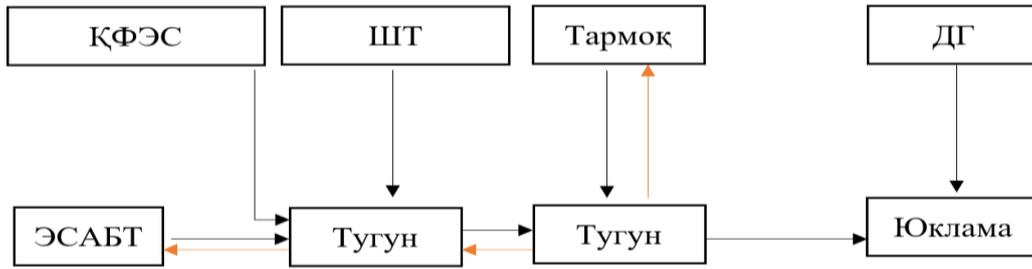
4-расм. ЭСАБТ чиқиш параметрлари ва истеъмолчилар талаби

Хонадонда ўрнатилган 1,3 кВт қувватга эга қуёш фотоэлектрик станцияси ҳамда ЭСАБТ қурилмасининг истеъмолчи талабини қондирилиши 4-расмда кўрсатилган, унга кўра тунги вақтларда ЭСАБТ томонидан истеъмолчи талаби тўлиқ қондирилмоқда. 2-холоат натижалари 1-холоат натижаларига нисбатан электр тармоқларининг турғунлиги жуда яхши эканлигини ва тармоқ талабларига тўлиқ жавоб беришини кўрсатади.

Тақсимланган генерация манбалари ёрдамида частота назоратини амалга ошириш самарали алоқа ва бошқарув тизимларини, шунингдек қайта тикланadиган энергия манбаларининг ўзгарувчанлигини бартараф этиш стратегияларини талаб қилади.

5-расмда таклиф этилган тақсимланган генерация манбаларининг умумий иш режими учун қандай тартибда уланиши кераклиги тасвирланган.

Айнан шу схема учун умумий иш режими параметрларини аниқлаймиз



5-расм. Таксимланган генерация манбаларининг умумий иш режимидаги уланиш схемаси

Топилиши керак бўлган қийматлар: Шамол турбинаси керакли актив қуввати $P_{ШТ}$, ЭСАБТнинг минимал керакли актив қуввати $P_{ЭСАБТ}$, тугунлардаги кучланиш қийматлари V_i , кучланиш бошқаруви учун керакли реактив қувват $Q_{компенсация}$. Бунинг учун маълум параметрлар сифатида юклама актив қуввати $P_{юк}$, қувват коэффициенти $\cos \phi$, дизель генератори актив ва реактив қуввати $P_{ДГ}$, ва $Q_{ДГ}$, дизель генератори частота параметрлари $f_{ДГ}$, ҚФЭС актив қуввати ва реактив қуввати- $P_{ҚФЭС}$ ва $Q_{ҚФЭС}$, тармоқ номинал кучланиши $V_{тармоқ}$, тармоқ актив ва индуктив қаршиликлари R ва X , тармоқ частотаси f_0 .

Барча манбалар ва юклама орасидаги актив қувват баланси қуйидаги кўринишда бўлади:

$$P_{ҚФЭС} + P_{ШТ} + P_{ДГ} + P_{ЭСАБТ} + P_{тармоқ} = P_{юк} + P_{исроф} \quad (5)$$

бу ерда $P_{исроф}$ - тармоқдаги йўқотишлар

$$P_{исроф} = \sum_i^n I_i^2 R_i \quad (6)$$

Қувват балансининг узлуксизлиги қуйидагича ифодаланади:

$$\frac{d}{dt} (P_{ген} - P_{юк} - P_{исроф}) = \alpha P_{ЭСАБТ} + \beta P_{ШТ} + \gamma P_{ҚФЭС} + \delta P_{ДГ} \quad (7)$$

бунда $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ - статик қувват таксимоти коэффицентлари,

$P_{ген}$ - генерация қилинган қувват.

Электр тармоқларида ҳар бир тугунда кучланиш ўзгаришини ҳисоблаш:

$$V_i = V_{ном} - \sum_i^n \frac{P_{ij}R_{ij} + Q_{ij}X_{ij}}{V_j} \quad (8)$$

Реактив қувват баланси қуйидаги кўринишда бўлади:

$$Q_{компенсация} = Q_{юк} + Q_{исроф} - (Q_{ҚФЭС} + Q_{ШТ} + Q_{ДГ} + Q_{тармоқ}) \quad (9)$$

Кучланиш орқали реактив қувват компенсациясини ҳисоблаш учун:

$$Q_{компенсация} = \frac{V_{ном}^2 - V_i^2}{X_i} \quad (10)$$

Агар компенсация қилиш учун аккумулятор тизими ишлатилса, унинг реактив қуввати:

$$Q_{компенсация} = -Q_{ЭСАБТ} \quad (11)$$

$P_{тармоқ} = 0$ шартни қабул қиламиз ва шу орқали шамол турбинасининг қувват етишмовчилигини қоплаши учун зарур қувватни ва аккумулятор тизими қувват мувозанатини таъминлай оладиган минимум керакли қувватни қуйидагича аниқлаймиз:

$$P_{\text{ШТ}} = P_{\text{юк}} + P_{\text{исроф}} - (P_{\text{ҚФЭС}} + P_{\text{ДГ}} + P_{\text{ЭСАБТ}}) \quad (12)$$

$$P_{\text{ЭСАБТ}} = P_{\text{юк}} + P_{\text{исроф}} - (P_{\text{ҚФЭС}} + P_{\text{ДГ}} + P_{\text{ШТ}}) \quad (13)$$

бунда қайси манба иқтисодий самарадор эканлиги инобатга олинади:

$$P_{\text{ШТ}} C_{\text{ШТ}} + P_{\text{ЭСАБТ}} C_{\text{ЭСАБТ}} = \text{мин} \quad (14)$$

бу ерда $C_{\text{ШТ}}$ - шамол турбинаси қувватини ишлаб чиқариш нархи,

$C_{\text{ЭСАБТ}}$ - ЭСАБТдан қувват узатиш харажатлари.

ЭСАБТнинг энергияни реал вақтда баланслаш қобилиятини ҳисоблаш қуйидагича ифодаланади:

$$\frac{d}{dt} P_{\text{ЭСАБТ}} = k_{\text{бериш}} (P_{\text{ШТ}} - P_{\text{юк}} - P_{\text{исроф}}) \quad (15)$$

бунда $k_{\text{бериш}}$ - ЭСАБТнинг заряд ҳолати коэффиценти.

Энг кам харажатли қувват тақсмотини қуйидагича ифодалаймиз:

$$\text{мин}(P_{\text{ШТ}} C_{\text{ШТ}} + P_{\text{ЭСАБТ}} C_{\text{ЭСАБТ}} + P_{\text{ҚФЭС}} C_{\text{ҚФЭС}} + P_{\text{ДГ}} C_{\text{ДГ}} + P_{\text{тамоқ}} C_{\text{тармоқ}} + P_{\text{ШТ}} C_{\text{ШТ}}) \quad (16)$$

Чекловлар:

$$\begin{aligned} P_{\text{ҚФЭС}}^{\text{мин}} &\leq P_{\text{ҚФЭС}} \leq P_{\text{ҚФЭС}}^{\text{макс}} \\ P_{\text{ШТ}}^{\text{мин}} &\leq P_{\text{ШТ}} \leq P_{\text{ШТ}}^{\text{макс}} \\ P_{\text{ЭСАБТ}}^{\text{мин}} &\leq P_{\text{ЭСАБТ}} \leq P_{\text{ЭСАБТ}}^{\text{макс}} \end{aligned} \quad (17)$$

Бу модел тақсимланган генерация манбалари мавжуд паст кучланишли электр тармоқларида қувват манбаларини иқтисодий жиҳатдан самарали тақсимлаш учун ишлатиш учун тавсия қилинади.

Диссертациянинг “**Муаммоли тақсимлаш тармоқларини аниқлаш ва уларни тақсимланган генерация манбалари орқали такомиллаштириш усуллари**” деб номланган учинчи боби электр таъминоти тизимида ўта юкланишда ишлаётган трансформатор пунктларини ва тармоқларини аниқлаш, электр таъминотида кузатилаётган кучланиш тушуви мавжуд ҳудудларни саралаш, тақсимланган генерация манбаларининг жойлашув ва ўрнатилиш қувватини ҳисобга олган ҳолда ўта юкланишларни олдини олиш, ҳамда реактив қувват асосида тақсимлаш тармоқларидаги кучланиш тушувларини бартараф этиш методларини такомиллаштиришга қаратилган ечимларни шакллантиришга бағишланган.

1-жадвалда ҳудудлар бўйлаб аниқланган ўта юкланишда ишлаётган трансформаторлар келтирилди.

1-жадвал

Вилоятларда ўта юкланган трансформаторлар

№	ПС номи	U, кВ	Исроф, МВт	Тр қуввати, МВА	Юкланиш, %	
					Реал вақт	Башорат
Жиззах вилояти						
1	Туркман	35/10	0.06	2.5	170	220
2	Ровот	35/10	0.0008	4	108	140
3	Фориш	35/10	0.006	2.5	102	136
4	Даштобод	110/35/10	0.6	16	121	156
Хоразм вилояти						
1	Досов	35/10	0.07	2.5	Т-1 102	Т-1 133
2	Беруни	35/10	0.9	4	Т-1 100	Т-1 130

Вилоятларда паст кучланишли тақсимлаш тармоқларида аниқланган ўта юкланиш ҳолатлари 2-жадвалда келтирилган. Бу ҳудудлардаги кучланиш даражалари ҳам қониқарли ҳолатда эмас.

2-жадвал

Вилоятлардаги ўта юкланган тармоқлар

№	Тармоқ номи	U, кВ	Узунлик, км	Ном ток, А	Юкланиш, %	Исроф, МВт
Андижон вилояти						
1	Л-Яйилма-2	110	12	610	141	0.6
2	Л-Холдавонбек	35	13.01	280	163	0.41
3	Л-Бирлашган	110	40.41	280	109	0.26
4	Л-5X	110	11.06	380	106	0.06
5	Л-Бакиров	35	7.42	280	121	0.02
Қорақалпоғистон Республикаси						
1	Л-Орайлик	110	14.88	340	112	1.42
2	Л-Турткул-2	110	39.8	220	154	0.5

Паст кучланишли электр тармоқларида трансформаторларнинг ортиқча юкланишини ҳисобга олиб ўрнатиладиган тақсимланган генерация қувватини аниқлаш алгоритми б-расмда келтирилган. Унга кўра трансформаторнинг юкланиши нормал истеъмол даврида истеъмолнинг максимал қийматга эришганлигида, истеъмолнинг максимал даврида ўрнатилган батарея қурилмалари зарядланиш вақтида ҳамда тескари оқим вужудга келганда ҳисоблаб чиқилган. Қуйидаги ифодалар орқали ўрнатиладиган тақсимланган генерация манбалари қуввати аниқланган.

Трансформатор нагрукаси (YUK_{TR}) 100% дан ошганда ва истеъмолчиларнинг қуввати (P_{ist}) трансформатор номинал актив қувватидан (P_{TRnom}) катта бўлган ҳолат учун:

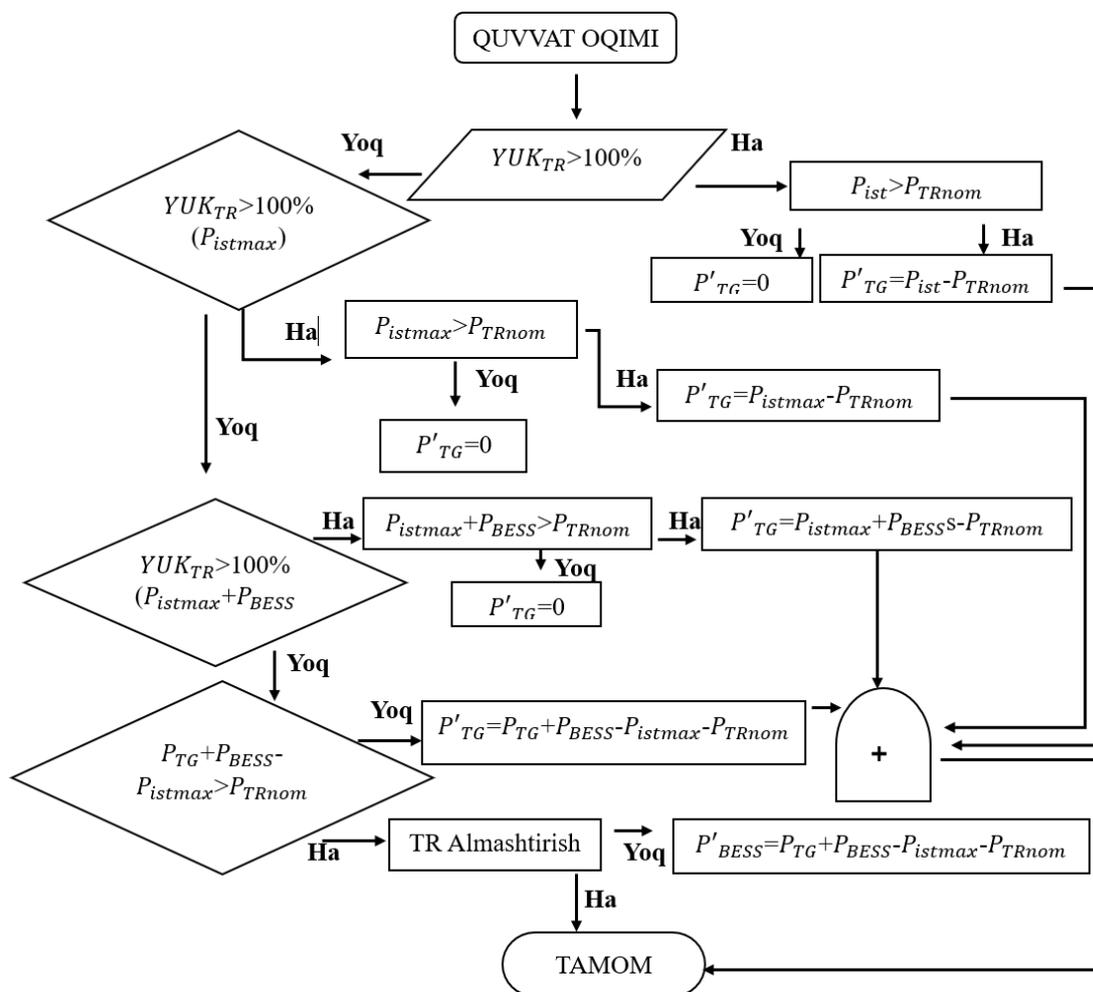
$$P'_{TG} = P_{ist} - P_{TRnom} \quad (18)$$

Трансформатор нагрукаси (YUK_{TR}) 100% дан ошганда ва истеъмолчиларнинг максимал қуввати (P_{istmax}) трансформатор номинал қувватидан (P_{TRnom}) катта бўлган ҳолат учун:

$$P'_{TG} = P_{istmax} - P_{TRnom} \quad (19)$$

Трансформатор нагрукаси (YUK_{TR}) 100% дан ошганда ва истеъмолчиларнинг максимал қуввати (P_{istmax}) билан аккумулятор батареяларининг зарядланиш қуввати (P_{BESS}) биргаликда трансформатор номинал қувватидан (P_{TRnom}) катта бўлган ҳолат учун:

$$P'_{TG} = P_{istmax} + P_{BESS} - P_{TRnom} \quad (20)$$



6-расм. Тақсимланган генерация қувватини аниқлаш алгоритми

Олдин ўрнатилган тақсимланган генерация қуввати (P_{TG}) билан аккумулятор батареяларининг зарядсизланиш қуввати (P_{BESS}) йиғиндисидан истеъмолчиларнинг максимал қуввати (P_{istmax}) айирмаси трансформатор номинал қувватидан (P_{TRnom}) кичик бўлган ҳолат учун:

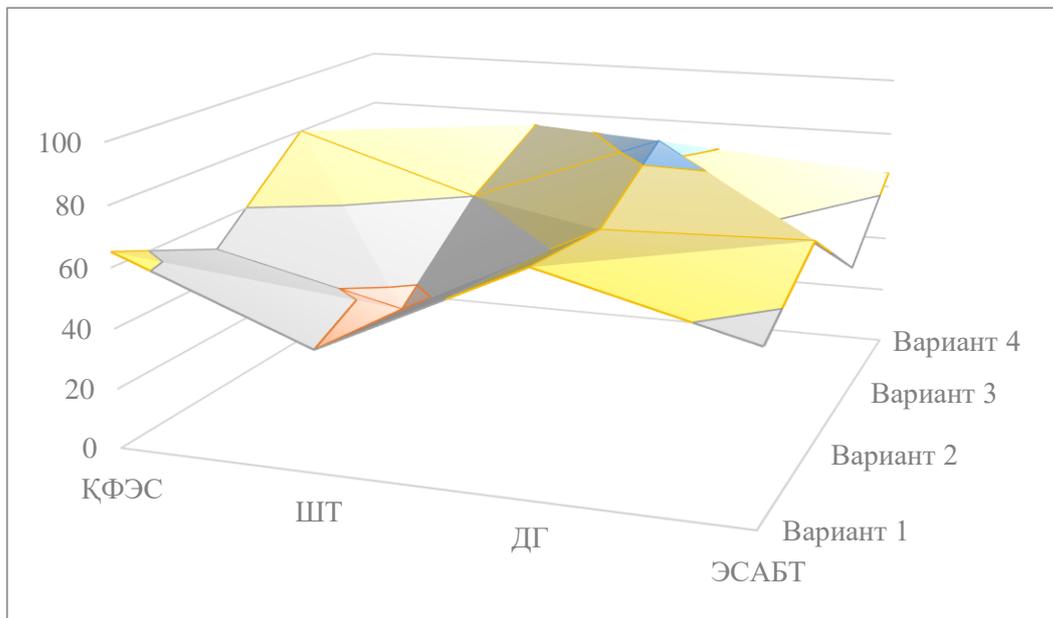
$$P'_{TG} = P_{TG} + P_{BESS} - P_{istmax} - P_{TRnom} \quad (21)$$

Олдин ўрнатилган тақсимланган генерация қуввати (P_{TG}) билан аккумулятор батареяларининг зарядсизланиш қуввати (P_{BESS}) йиғиндисидан истеъмолчиларнинг максимал қуввати (P_{istmax}) айирмаси трансформатор номинал қувватидан (P_{TRnom}) катта бўлган ҳолатда трансформаторни алмаштириш имконияти мавжуд бўлмаган ҳолат учун ўрнатилиш қуввати қуйидагича бўлган аккумулятор батареялари зарур:

$$P'_{BESS} = P_{TG} + P_{BESS} - P_{istmax} - P_{TRnom} \quad (22)$$

Оптималь ўрнатилиш нуқтасини аниқлаш усулида 4 та турдаги тақсимланган генерация манбалари: қуёш фотоэлектрик станцияси, шамол турбинаси, дизел генератори ва энергия сақлаш тизимлари Жиззах вилоятида 0,4 кВ тақсимлаш электр тармоғига улаш учун 4 та турли уланиш нуқталари бўйича таҳлил қилинган. Бу усулда ТГМ нинг ўрнатилиш қувватлари аниқланган бўлиши талаб этилади.

Энг оптималь уланиш нуқтаси: 2-ҳолатда кузатилди, чунки бунда ўртача юкланиш 55,75% ни ташкил этади (7-расмга қаранг).



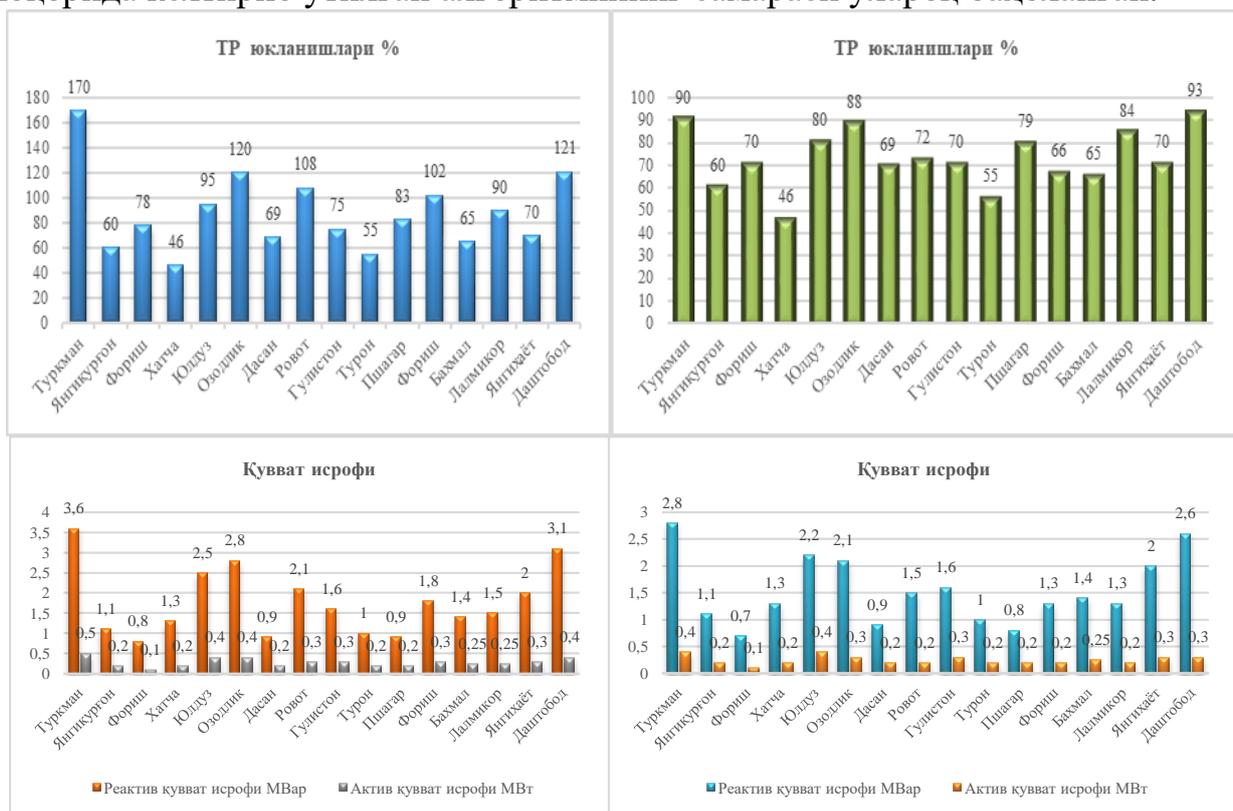
7-расм. Оптимал уланиш нуқтасини аниқлаш усули натижаси

X ўқи: генерация турлари – электр тармоғига уланадиган манбалар тури.

Y ўқи: уланиш нуқталари – генерация манбалари уланиши мумкин бўлган алтернатив жойлар.

Z ўқи: тармоқ юкланиши – ҳар бир генерация тури ва уланиш жойи комбинациясидаги электр тармоғининг юкланиш даражаси, (%).

8-расмда келтирилган трансформатор юкланиши ва актив, реактив қувват исрофларининг тақсимланган генерациялар манбалари ҳисобига ўзгариши юқорида келтириб ўтилган алгоритмнинг самараси ўлароқ баҳоланган.

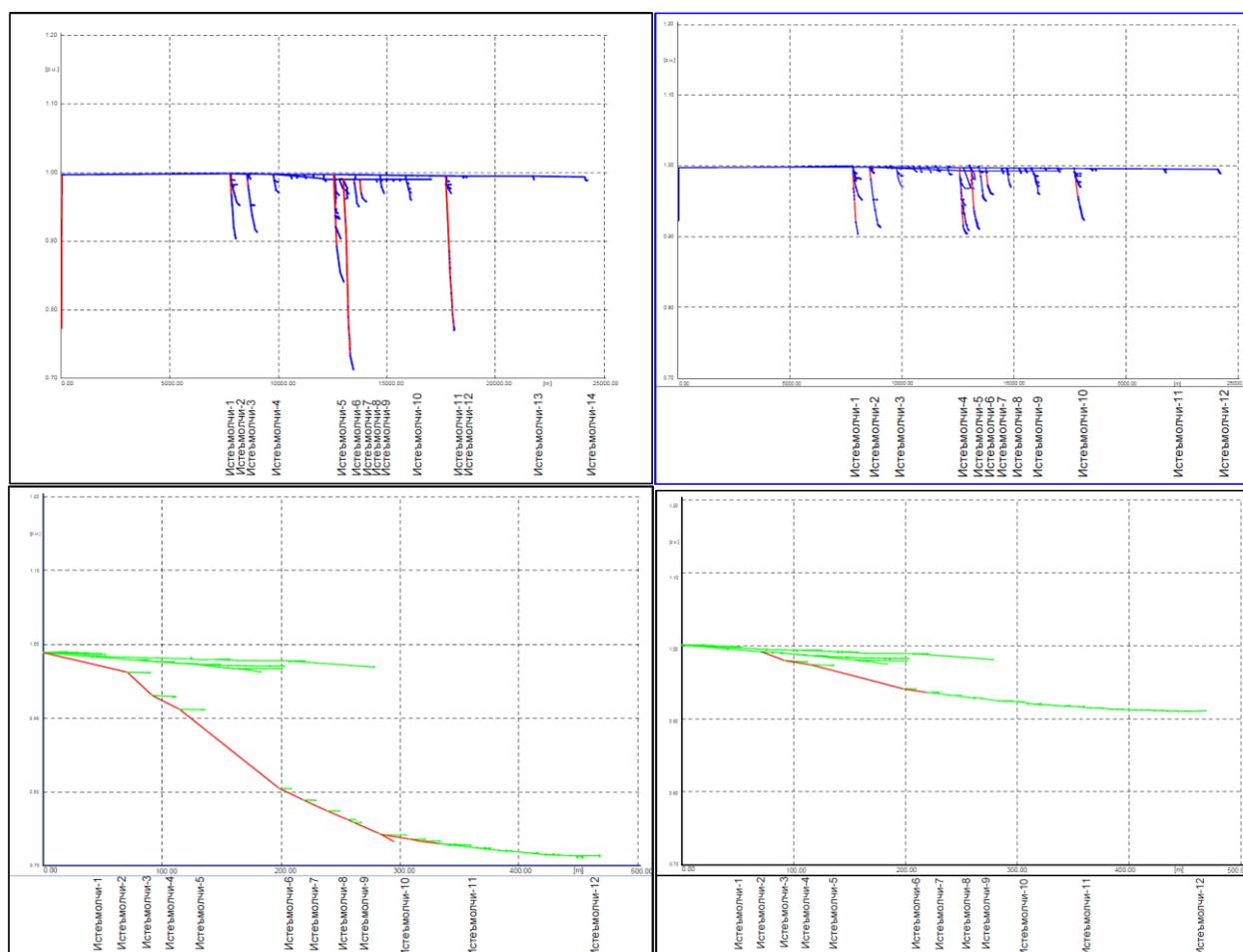


8-расм. Трансформатор юкланиши ва қувват исрофининг тақсимланган генерация манбалари туфайли ўзгариши

Хоразм вилоятидаги баъзи подстанцияларнинг истеъмоли

ПС номи	16.07.2022, 9pm		16.07.2022, 2am		23.12.2022, 6pm		23.12.2022, 3am		ТР куват
	P МВт	Q МВар	ВА						
Хазорасп	5,1	1,5	3,4	0,9	6	1,8	3,8	1	6,3
	6,8	2,1	4,6	1,4	9	2,8	4,8	1,4	10
Беруни	5,3	2,5	2,2	1,7	5	1,5	3,4	0,9	6,3
	3,6	1,7	1,9	1,2	3	1	2,3	0,6	4
	1,1	0,3	0,9	0,2	1,1	0,3	0,5	0,2	1

Хоразм вилоятининг ҳудудий электр тармоқларидаги кучланиш тушуви мавжуд бўлган подстанцияларнинг юкланиши ёз ва қиш кунларидаги максимал, ҳамда минимал истеъмол даврлари 3-жадвалда келтирилди. Шунга таъкидлаш жоизки, бу ерда ҳам кучланиш тушувининг сабаби трансформаторларнинг ортиқча юкланиши эмаслиги аниқланди. Кўриб чиқилган бешта подстанциядаги ўнта трансформатордан атига биттасида кучланиш тушувининг сабаби трансформаторнинг ортиқча юкланишидир.

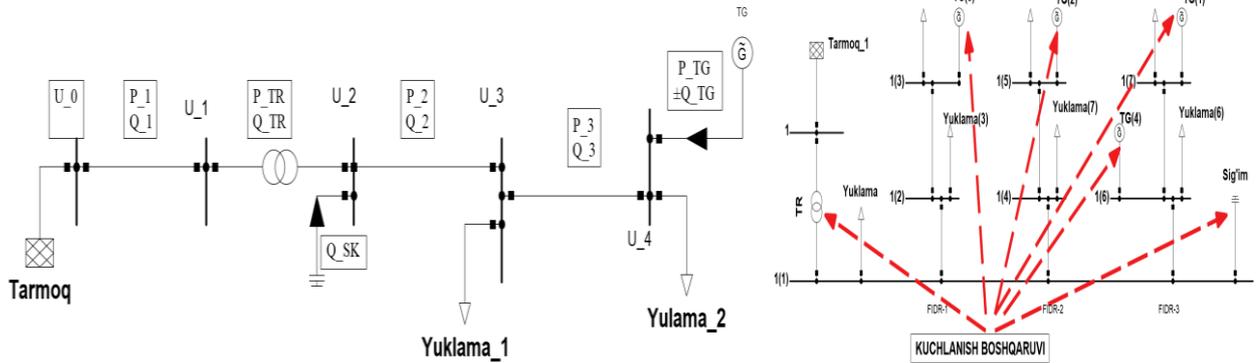


9-расм. Таксимлаш электр тармоғида ўтказгичлар ўзгарганда кучланиш тушуви ўзгариши (Жиззах ва Тошкент мисолида)

9-расмда Жиззах вилояти Зарбдор подстанциясининг Юксалиш, Хоқимият, Оқбулоқ, Нихол, Насилчилик ва Донхона фидерлари, ҳамда Бахмал

подстанциясининг деярли барча 10 кВ шинасидаги фидерлар бўйлаб кучланиш тушуви таҳлили келтирилган.

Нагрузки ва тақсимланган генерация манбаси мавжуд тақсимлаш тармоғидаги (10-расмга қаранг) кучланиш тушувини қуйидагича аниқланган:



10-расм. Тақсимланган генерациясининг кучланиш назоратига таъсири

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \frac{R_{Tarmoq}(P_{yuklama} - P_{TG}) + X_{Tarmoq}(Q_{yuklama} - (\pm Q_{TG}))}{U_2} \quad (23)$$

бу ерда P_{TG} тақсимланган генерация манбалари узатадиган актив қувват, Q_{TG} тақсимланган генерация манбалари узатадиган ёки истеъмол қиладиган реактив қувват.

Тақсимланган генерация манбаларининг кучланишга таъсири қуйидагича аниқланган.

$$U_{2.1} - U_{2.2} = \frac{R_{Tarmoq}(P_{yuklama.2} - P_{TG}) + X_{Tarmoq}(Q_{yuklama.2} - (\pm Q_{TG}))}{U_{2.2}} - \frac{R_{Tarmoq}(P_{yuklama.1} - P_{TG}) + X_{Tarmoq}(Q_{yuklama.1} - (\pm Q_{TG}))}{U_{2.1}} \quad (24)$$

Тақсимланган генерация кўзгатиш тизимидаги td_{TG} сифим конденсаторларниқидан $td_{СК}$ анча тез ҳисобланади. Шу билан бирга трансформатор нагрузка остида кучланиш назоратидан $td_{ТР}$ ҳам анча кам вақтни талаб этади, уларнинг ўзаро боғлиқлиги қуйидагича:

$$td_{TG} < td_{СК} < td_{ТР} \quad (25)$$

Тақсимланган генерация манбалари иштироки билан бир қаторда трансформаторларнинг нагрузка остида кучланиш назорати ва сифим конденсаторлари орқали амалга ошириладиган кучланиш назорати қуйидагича амалга оширилган:

$$YOKR_{n+1} = \begin{cases} YOKR_n + 1 & \text{агар } U_{1,n} > U_{KO} \\ YOKR_n & \text{агар } U_{KP} \leq U_{1,n} \leq U_{KO} \\ YOKR_n - 1 & \text{агар } U_{1,n} < U_{KP} \end{cases} \quad (26)$$

$$SKS_{n+1} = \begin{cases} \text{УЛАНГАН} & \text{агар } SKS_n = \text{УЗИЛГАН} & Q_{TR,n} < Q_{ON} \\ SKS_n & \text{агар } Q_{ON} \leq Q_{TR,n} \leq Q_{OFF} \\ \text{УЗИЛГАН} & \text{агар } SKS_n = \text{УЛАНГАН} & Q_{TR,n} > Q_{OFF} \end{cases} \quad (27)$$

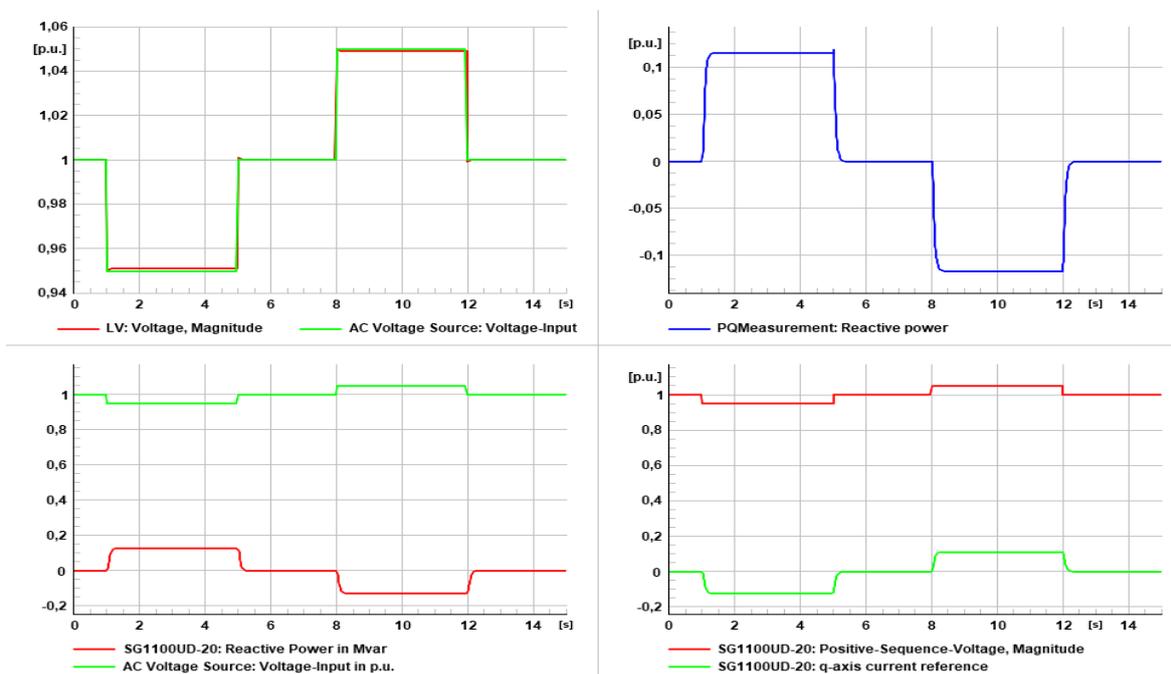
$$TG_{n+1} = \begin{cases} \text{УЛАНГАН} & \text{агар } TG_n = \text{УЗИЛГАН} & U_{TG,n} < U_{ON} \\ TG_n & \text{агар } U_{ON} \leq U_{TG,n} \leq U_{OFF} \\ \text{УЗИЛГАН} & \text{агар } TG_n = \text{УЛАНГАН} & U_{TG,n} > U_{OFF} \end{cases} \quad (28)$$

бу ерда $YOKR_n$ – трансформаторнинг n вақтдаги нагрузка остида кучланишни ростлаш поғонаси, U_{KP} - $YOKR$ нинг энг қуйи кучланиши, U_{KO} - $YOKR$ нинг энг юқори кучланиши, TG_n – фидердаги тақсимланган генерация манбаининг n вақтдаги ҳолати, SKS_n - подстанциядаги сиғим конденсаторининг n вақтдаги ҳолати, U_{ON} – фидердаги сиғим конденсаторининг уланган ҳолатдаги кучланиши, U_{OFF} - фидердаги тақсимланган генерация манбаининг узилган ҳолатдаги кучланиши, Q_{ON} - подстанциядаги сиғим конденсаторининг уланган ҳолатдаги реактив қуввати, Q_{OFF} - подстанциядаги сиғим конденсаторининг узилган ҳолатдаги реактив қуввати. Трансформатор ва сиғим конденсаторларининг кучланиш назоратидаги имкониятлари албатта чекланган, аммо тақсимланган генерация манбалари ёрдамида бу имконият қуйидагича ортади:

$$Q_{TG,k}|min \leq Q_{TG,k,t} \leq Q_{TG,k}|max \quad (29)$$

бунда $Q_{TG,k,t}$ – k тақсимланган генерация манбаининг t вақтдаги реактив қуввати узатиши, $Q_{TG,k}|min$ - k тақсимланган генерация манбаининг минимум қувват узатиши, $Q_{TG,k}|max$ - k тақсимланган генерация манбаининг максимум қувват узатиши.

11-расмда SG1100UD-20 инверторининг кучланиш ва реактив қувват ўзгаришларига қандай жавоб бериши кўрсатилган. Биринчи графикда 2 сонияда кучланишнинг 0,96 н.б га тушгани, 8 сонияда эса 1,06 н.б га ошгани, Бу инверторнинг кучланиш ўзгаришига бўлган реакциясини кўрсатади. Иккинчи графикда 4 сонияда реактив қувват кескин ошган ва 0,1 н.б гача етган, кейин 8 сонияда салбий қийматга тушиб, қайтадан тикланган. Учинчи графикда реактив қувватнинг 0,2 Mvarдан салбий қийматларга тушгани, кейин тиклангани кўрсатилган. Тўртинчи графикда q-axis кучланиш қиймати 1 н.б атрофида сақланган, лекин токнинг q-ўқи бўйича эталон қиймати салбий қийматларга тушган ва кейин қайта тикланган.



11-расм. Тақсимланган генерация манбасининг кучланиш назоратига таъсири

Диссертациянинг “Тармоқ параметрлари асосида тақсимланган генерация манбаларининг динамик моделларини такомиллаштириш” деб номланган тўртинчи боби куёш фотозэлектрик станциясининг, энергия сақловчи батарея ва бошқарув тизимининг, шамол турбинали станциянинг ҳамда дизел генераторларининг иш режими ва бошқарув тизимини моделлаштиришга бағишланган.

Бошқарув марказида таклиф этилган қийматлар 12-расмда келтириб ўтилган. Бошқариш тизимини моделлаштириш учун қуйидаги омилларни инобатга олган ҳолда, “Градиент тушиши” (Gradient Descent) усулидан фойдаланилган. Бунда қувват бошқарув тизимини симуляция қилиш дастуридаги "Controller" учун DSL (Dynamic Simulation Language) модели конфигурация экрани кўрсатилган. Ушбу моделни PI бошқариш учун қуйидаги параметрлар киритилган:

Бошқарув маркази		
Nom	Parametr	
Ti , Konvertor PI контроллери [с]	0,05	
Tfilter , PT1-филтр вақт доимийси [с]	0,006	
FRTen , Химояни ёқиш белгиси [0/1]	1	qref
LVRT_V , LVRT кучланиш пасайиши [pu]	0.7	
HVRT_V , HVRT кучланиш ортиши [pu]	1.1	
kfactor , k фактор [-]	3	
Pre , авариядан олдинги реактив токни инобатга олиш [0,1]	1	
vref0 , Фойдаланувчи томонидан белгиланган vref: =0, бошланғич терминал кучланиши =1, 1.0 p.u.	1	
Qpriority , Нормал ҳолат учун Q афзаллик [0/1]	1	pref
kdr , Хато давомидидаги амалдаги ток ортиши (FRT) [p.u./s]	10	prof
Tde1t , Вақт оралиги [с] 0,05	0.05	
Iqmin , Мин. реактив ток лимити [pu]	-1	
Irpmn , Макс. реактив ток лимити [pu]	0	
Iqmax , Макс. реактив ток лимити [pu]	1	
Imax , Макс. умумий ток [pu]	1	
Ipmx , Макс. актив ток лимити [pu]	1.1	csb

12-расм. ҚФЭС инверторининг базавий ва бошқарув тизими маълумотлари

Ti конверторнинг PI (Proportional-integral) бошқаруви учун интеграция вақт доимийси, 0,05 сонияга тенг. Tfilter тизимда сигналларни юмшатиш учун филтр вақт доимийси 0,006 сонияга тенг. FRTen нол ёки бирлик билан белгиланадиган белги, бу ўткинчи жараён функциясини ишга туширади, 1 (ишга туширилган) ҳолатда ўрнатилган. LVRT_V тизимда паст кучланишга мослашиш учун таъсир, 0,7 н.б га тенг. HVRT_V юқори кучланишга мослашиш учун таъсир, 1,1 н.б га тенг. Kfactor бошқарувда қўлланиладиган доимий қиймат 3 га тенг. Pre авариядан олдин реактив токни ҳисобга олиш ёки олмасликни кўрсатадиган белги 1 (ишга туширилган)да ўрнатилган. vref0 тугун кучланиши, 1,0 н.б га тенг. Qpriority оддий шароитларда реактив қувватга устуворлик беришни кўрсатадиган параметр 1 да ўрнатилган. kdr авариядан кейин актив токнинг ошиш тезлиги 10 н.б сонияга тенг. Tdelet тизимнинг қадамли вақт доимийси, 0.05 сония. Iqmin минимал реактив ток

чегараси -1 н.б. I_{pmin} минимал актив ток чегараси, 0 н.б. I_{qmax} максимал реактив ток чегараси 1 н.б. I_{max} абсолют энг кўп рухсат этилган ток 1,1 н.б. I_{rmax} максимал актив ток чегараси 1,1 н.б.

Бу параметрлар динамик ўзгаришлар пайтида (масалан, авариялар ёки одатий ҳолатда) конверторлар ва инверторларнинг симуляция қилинган ишлаш тартибини аниқлаш учун фойдаланилади. Тизимнинг кучланиш ўзгаришларига, аварияларга ва ток чегараларига қандай жавоб бериши белгилаб берилган.

4-жадвалда инвертор ҳимоя тизимининг таклиф этилган қийматлари келтирилган. PRTen ҳимояни ёқиш белгиси (1) билан тизим ҳимоя режимига киритилади. Tfilter PT1 филътрининг вақт доимийси (0,01 с) сигналларни филътрлаш учун қўлланилади. Кучланиш ўзгаришлари учун учта паст кучланиш поғоналари (UV1, UV2, UV3) ва уларнинг ўчириш вақтлари (1800000 мс, 3000 мс, 600 мс) белгиланди, бу эса паст кучланишларда қувватни ўчириш механизмларини ишга тушириш учун керак. Шунингдек, юқори кучланиш учун ҳам икки хил поғона (OV1 ва OV2) ва уларнинг ўчириш вақтлари (250 мс) белгиланди.

4-жадвал.

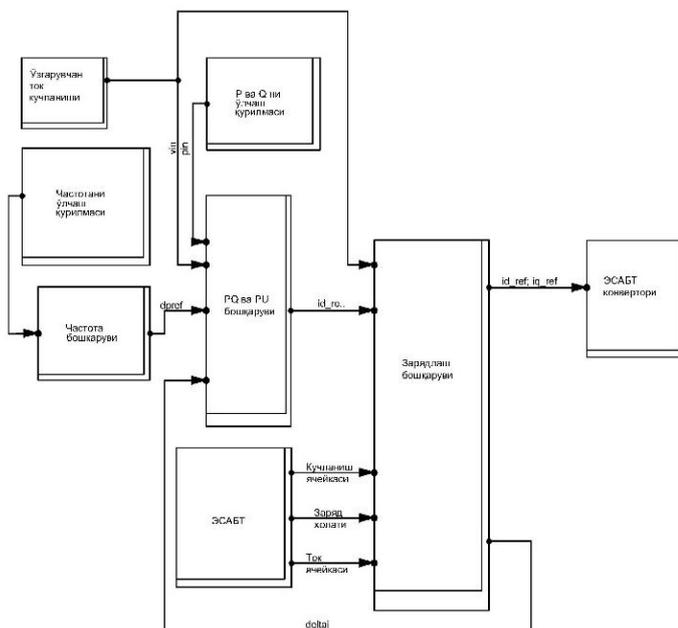
Инвертор ҳимоя тизимининг таклиф этилган қийматлари

PRTen ҳимояни ёқиш белгиси [0/1]	1,
T	0,01
U	0,9
tU1 ўчириш вақти [мс]	1800000
U	0
tU2 ўчириш вақти [мс]	3000,
U	0,15
tU3 ўчириш вақти [мс]	600,
O	1,1
tO1 ўчириш вақти [мс]	250,
O	1,15
tO2 ўчириш вақти [мс]	250,
U	49,5
tUF1 ўчириш вақти [мс]	1800000
U	48,
tUF2 ўчириш вақти [мс]	900000,
U	47,5
tUF3 ўчириш вақти [мс]	200,
U	47,
tUF4 ўчириш вақти [мс]	100,
O	50,5
tOF1 ўчириш вақти [мс]	1800000
O	51,
tOF2 ўчириш вақти [мс]	200,
O	52,
tOF3 ўчириш вақти [мс]	100,
O	52,
tOF4 ўчириш вақти [мс]	100,

Частота ўзгаришлари учун тўртта паст частота (UF1 - UF4) ва тўртта юқори частота (OF1 - OF4) поғоналари берилган, ҳар бир поғона учун ўчириш вақтлари ҳам кўрсатилган. Бу параметрлар орқали паст ёки юқори частоталарга нисбатан тизим қувватини қандай муддатда ўчириши белгиланган бўлиб, масалан, UF1 паст частота (49,5 Гц)да қувватни 1800000 мс (300 сония) ичида ўчиришни кўрсатади, бу эса узок муддатли паст частота ҳолатларига мослашувни ифода этади.



Техник параметр	Қиймат
Номинал қувват (кВА)	30
Номинал DC кучланиш	900 В
Номинал AC кучланиш	400 В (уч фазали)
Номинал частота	50 Гц
Ишлаш самарадорлиги	>95%
Ишлаш харорати	-10°Сдан +50°Сгача
PWM ўзгариш частотаси	2-15 Hz



13-расм. ЭСАБТ конвертори базавий ва бошқарув тизими маълумотлари

ЭСАБТда жойлашган инвертор қуввати, ўзгарувчан ток кучланиши, ўзгармас ток кучланиши ҳамда параллел уланган инверторлар сони базавий маълумотлар ойнасига 13-расмда кўрсатилганидек киритилади. Энергия сақловчи аккумулятор батареялари тизими (ЭСАБТ) иш режимини моделлаштириш учун унинг турли шароитларда қандай ишлашини инобатга олиб, квадратик оптималлаштириш (Quadratic Programming - QP) усули орқали такомиллаштирилган. Қуввати 30 кВА бўлган инвертор 0,4 кВ кучланишда ишлай олиши маълумотлар базасига киритилди.

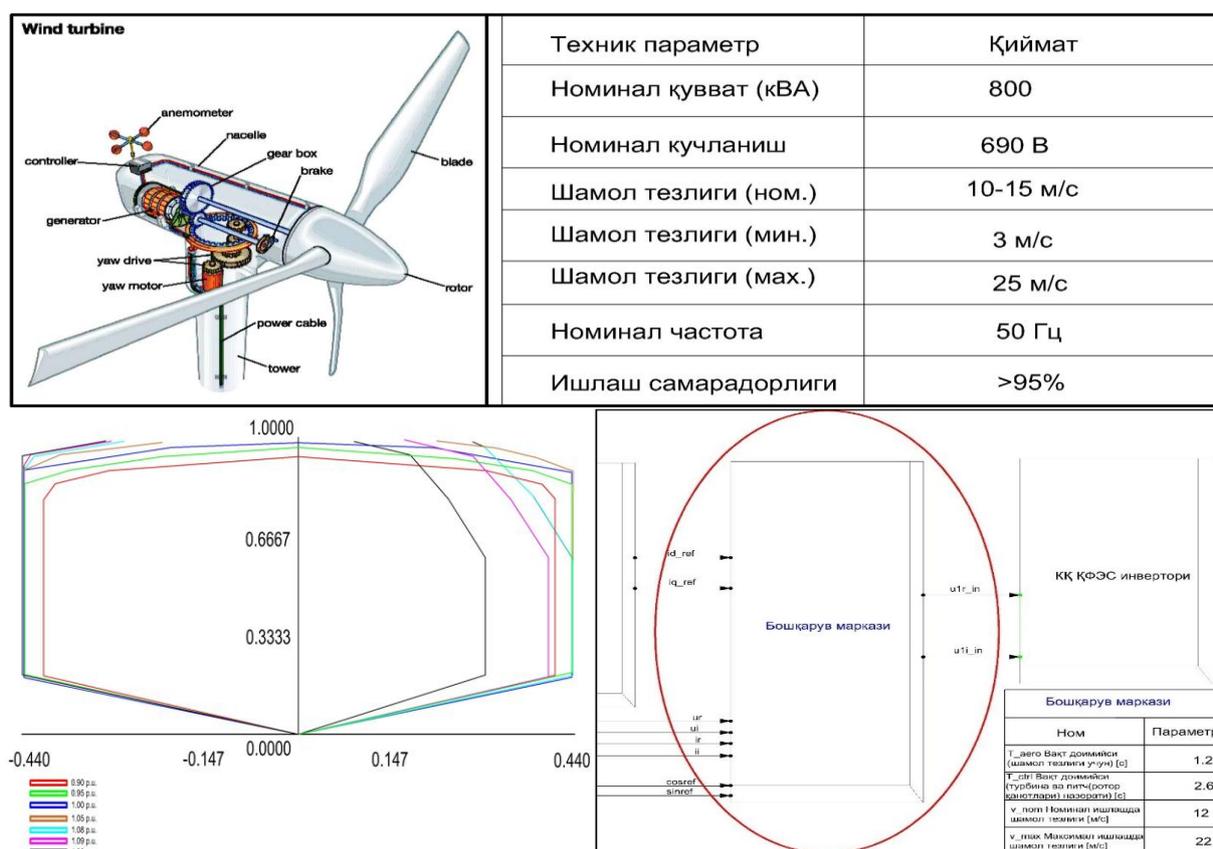
5-жадвал.

Инвертор реактив қувват назорати таклиф этилган қийматлари

T _r Фильтр вақти доимийси, актив [с]	0,07
T _{rq} Фильтр вақтининг доимийси, реактив [с]	0,02
K _p Пропорционал фойда– id-PI- контроллер [н.б]	3
T _i Интеграция вақти доимийси – id-PI-контроллер [с]	0.2
A	0.2
K	2.5
T _{iq} Интеграция вақтининг доимийси – iq-I-контроллер [с]	1.3
i	-1
i	1
I	-1
i	1

Аввал бошланғич блокларда ўзгарувчан ток ва частота ўлчанган, улар бўйича маълумотлар частота бошқаруви ва PQ ўлчов блокларига узатилган. частотани бошқариш блогк тизимдаги частота ўзгаришларига қараб қувватни назорат қилади. Шунингдек, PQ назорат блоки актив ва реактив қувват ўртасидаги муносабатни бошқариб, тизимнинг энергия тақсимотини таъминлайди.

PWM конверторнинг PQ назоратида таклиф этилган қийматлари 5-жадвалда акс этирилган. T_r (0.07 с) ва T_{r_q} (0.02 с) — актив ва реактив қувват йўналишлари учун филтрларнинг вақт доимийси K_p (3 н.б) ва K_q (2.5 н.б) — актив ва реактив қувват бошқаруви учун пропорционал қувват коэффицентлари. T_{i_p} (0.2 с) ва T_{i_q} (1.3 с) — интеграция вақт доимийлари бўлиб, улар контроллерларнинг сигналларга жавоб бериш тезлигини аниқлаб беради. i_{d_min} , i_{d_max} , i_{q_min} , ва i_{q_max} — актив ва реактив қувват учун минимал ва максимал ток қийматлари.



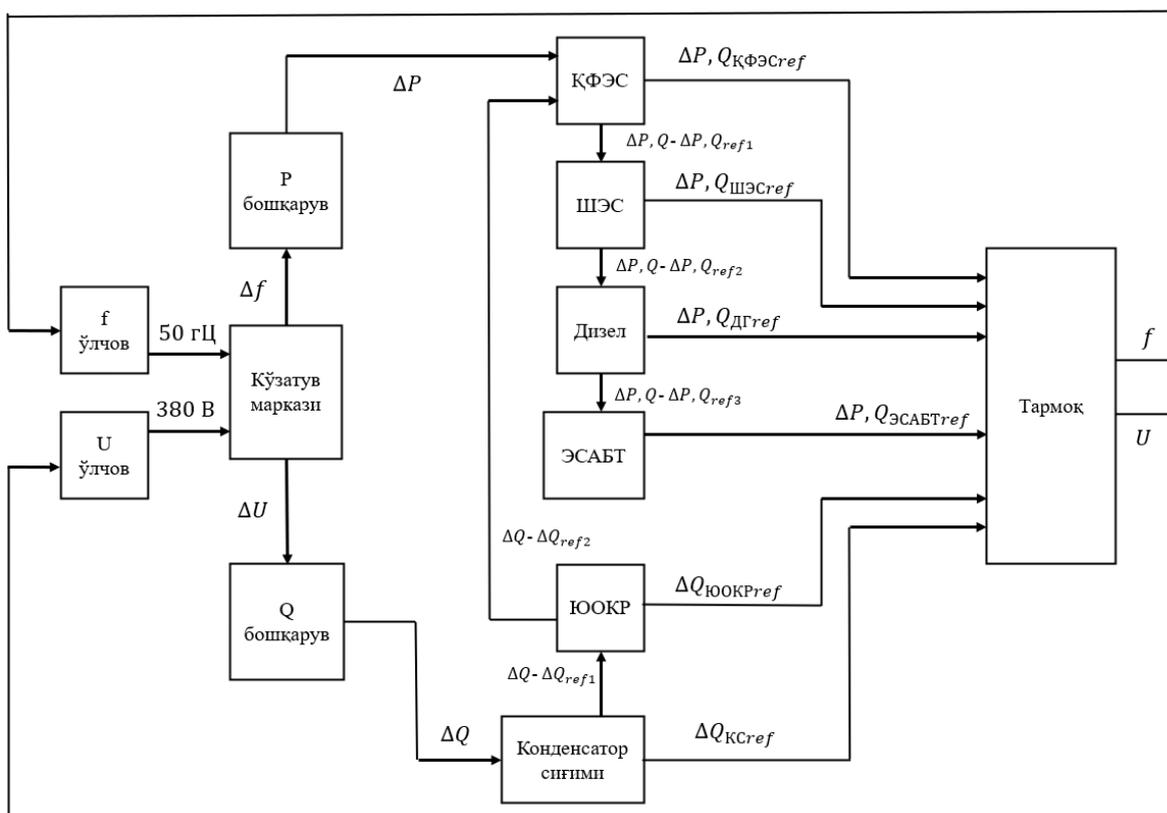
14-расм. Шамол турбинаси ва бошқарув тизими маълумотлари

Шамол турбинасининг номинал қуввати, уларнинг сони ва турбинанинг қувват коэффицентлари базавий маълумотлар ойнасига 14-расмда кўрсатиланидек киритилади. Қуввати 800 кВА бўлган турбина 0,98 қувват коэффицентига ишлай олиши маълумотлар базасига киритилди. Шу ойнанинг ўзида шамол турбинасининг бошқарув модели ҳам жойлаштирилади. T_{aero} (1.2 с) — шамол тезлигини юмшатиш учун вақт доимийси бўлиб, шамол тезлиги ўзгаришларини қандай мослаштириш аниқланади. T_{ctrl} (2.6 с) — турбина бошқаруви ва қувват ишлаб чиқариш бурчагини бошқариш учун вақт доимийси. v_{nom} (12 м/с) — шамолнинг

номинал ишлаш тезлиги, яъни шамол турбинаси 12 м/с тезликда ишлаганда, у оптимал ишлаб чиқариш ҳолатида бўлади. v_{max} (22 м/с) — шамол турбинасининг максимал ишлаш тезлиги, бу шамол тезлиги 22 м/с бўлганида турбина тўхташи ёки ҳимояга кириши мумкинлигини англатади.

Диссертациянинг **“Паст кучланишли тармоқларни бошқаришнинг тақсимланган генерация манбалари асосидаги ечимлари ва техник иқтисодий самарадорлик”** деб номланган бешинчи боби электр тармоқлари ва тизимларида марказлашмаган бошқарув тизимини такомиллаштириш усуллари, актив қувват балансининг марказлашмаган бошқарув тизимига тақсимланган генерация манбаларини интеграция қилиши, замонавий электр тармоқларини шакллантиришда энергетика тизимининг стратегик бошқарув асослари учун тавсиялар ишлаб чиқиш ва шу билан бирга тақсимланган генерация манбалари орқали замонавий электр тармоқларини шакллантиришда техник- иқтисодий самарадорликни ҳисоблаш бўйича ишлар олиб борилган.

15-расм тақсимланган генерация манбалари учун ишлаб чиқилган бошқарув тизими бўлиб, асосан актив ва реактив қувватларни назорат қилиш ва уларни тақсимлаш тармоғига оптимал тарзда узатиш мақсадида хизмат қилади. Тизимдаги "f ўлчов" ва "U ўлчов" блоклари орқали тармоқдаги частота (50 Гц) ва кучланиш (380 В) ўлчанади ва кузатилади. Бу кўрсаткичлар "Кузатув маркази"га узатилади, у эса частота ўзгариши (Δf) ва кучланиш ўзгаришини (ΔU) таҳлил қилиб, қувват бошқарув блокларига юборилади.



15-расм: Тақсимланган генерация манбалари учун ишлаб чиқилган бошқарув тизими

Актив қувватни бошқариш "P бошқарув" блоки орқали амалга оширилади, бу блок тармоқдаги қувват балансига кўмаклашади ва актив қувватни (ΔP) бошқариб туради. Шунингдек, реактив қувватни бошқариш учун "Q бошқарув" блоки мавжуд бўлиб, у тармоққа узатилаётган реактив қувватни (ΔQ) мослаштиради ва оптималлаштиради. Қуёш фотоэлектрик станцияси (ҚФЭС) қуёшдан олинган энергияни тармоққа актив қувват (ΔP) ва реактив қувват ($\Delta P, Q_{\text{ҚФЭС}ref}$) шаклида узатиш имкони мавжуд. Шамол электр станцияси (ШЭС) ҳам шамолдан ишлаб чиқарилган энергияни тармоққа актив ва реактив қувват ($\Delta P, Q_{\text{ШЭС}ref}$) кўринишида юбориб, бошқарув тизимига ўз хиссасини қўшади.

Дизел генераторлари актив қувват (ΔP) ва реактив қувватни ($\Delta P, Q_{\text{ДГ}ref}$) таъминлайди ва тармоққа узатади. Энергия сақловчи аккумулятор батареяси тизими (ЭСАБТ) эса энергияни сақлаш ва қайта узатиш имкониятига эга бўлиб, актив ва реактив қувватни ($\Delta P, Q_{\text{ЭСАБТ}ref}$) бошқаришни амалга оширади. Трансформаторнинг юклама остида кучланишини ростлаш қурилмаси (ЮОКР) эса трансформатордаги кучланишни назорат қилиб, тармоққа мувофиқ қувват ($\Delta Q_{\text{ЮОКР}ref}$) узатади, бу эса тармоқда кучланиш барқарорлигини таъминлашга ёрдам беради. Шунингдек, конденсатор сифими блоки орқали тармоққа қўшимча реактив қувват ($\Delta Q_{\text{К}ref}$) юборилиб, қувват балансини янада яхшилашга хизмат қилади.

Тизимдаги генерация ва юклама балансини сақлаш учун қуйидаги тенглама таклиф этилади:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \alpha_{\text{ҚФЭС}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{\text{ШТ}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{\text{ДГ}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_{\text{ЭСАБТ}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{\text{ҚФЭС}} \\ P_{\text{ШТ}} \\ P_{\text{ДГ}} \\ P_{\text{ЭСАБТ}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\text{юклама}} \\ P_{\text{ҚФЭС}}^{\text{макс}} \\ P_{\text{ШТ}}^{\text{макс}} \\ P_{\text{ДГ}}^{\text{макс}} \\ P_{\text{ЭСАБТ}}^{\text{макс}} \end{bmatrix} \quad (30)$$

бу ерда $\alpha_{\text{ҚФЭС}}$, $\alpha_{\text{ШТ}}$, $\alpha_{\text{ДГ}}$, $\alpha_{\text{ЭСАБТ}}$ – тақсимланган генерация манбаларидаги реакция коэффициентлари, $P_{\text{ҚФЭС}}$, $P_{\text{ШТ}}$, $P_{\text{ДГ}}$, $P_{\text{ЭСАБТ}}$ - тегишли генерация манбалари ишлаб чиқараётган актив қувват, $P_{\text{юклама}}$ - тармоқдаги умумий юклама, $P_{\text{ҚФЭС}}^{\text{макс}}$, $P_{\text{ШТ}}^{\text{макс}}$, $P_{\text{ДГ}}^{\text{макс}}$, $P_{\text{ЭСАБТ}}^{\text{макс}}$ - тегишли манбаларнинг максимал ишлаб чиқара оладиган қуввати.

Реактив қувватни оптимал тақсимлаш учун қуйидаги модел қўлланилади:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ X_{\text{ҚФЭС}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X_{\text{ШТ}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{\text{ДГ}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_{\text{ЭСАБТ}} & X_{\text{КОМП}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{\text{Тармоқ}} \\ Q_{\text{ҚФЭС}} \\ Q_{\text{ШТ}} \\ Q_{\text{ДГ}} \\ Q_{\text{ЭСАБТ}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{\text{юклама}} \\ Q_{\text{ҚФЭС}}^{\text{макс}} \\ Q_{\text{ШТ}}^{\text{макс}} \\ Q_{\text{ДГ}}^{\text{макс}} \\ Q_{\text{ЭСАБТ}}^{\text{макс}} \end{bmatrix} \quad (31)$$

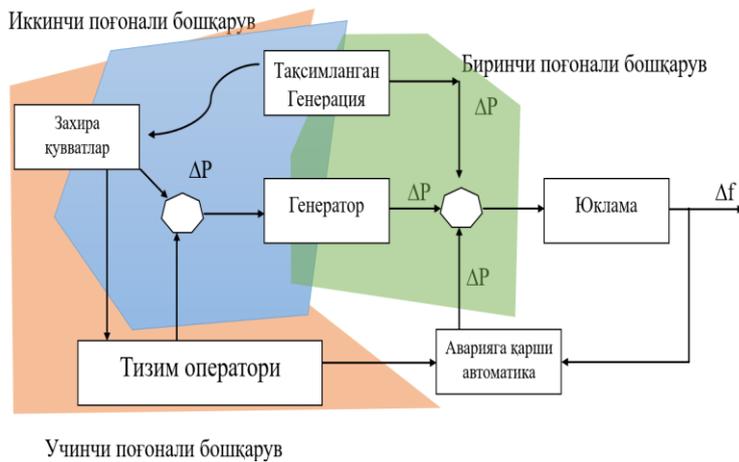
бунда $Q_{\text{Тармоқ}}$ - марказий тармоқдан олинadиган реактив қувват, $Q_{\text{ҚФЭС}}$, $Q_{\text{ШТ}}$, $Q_{\text{ДГ}}$, $Q_{\text{ЭСАБТ}}$ - ҚФЭС, шамол турбинаси, дизель генератори ва ЭСАБТ орқали таъминланadиган реактив қувват, $X_{\text{ҚФЭС}}$, $X_{\text{ШТ}}$, $X_{\text{ДГ}}$, $X_{\text{ЭСАБТ}}$ - тақсимланган

генерация манбаларининг реактив қувват узатиш характеристикалари, $X_{\text{КОМП}}$ - реактив қувват компенсаторлари (SVC, STATCOM) ҳисобига қўшимча қувват компенсацияси, $Q_{\text{ЮКЛАМА}}$ - юкламалар талаб қиладиган реактив қувват, $Q_{\text{ҚФЭС}}^{\text{макс}}$, $Q_{\text{ШТ}}^{\text{макс}}$, $Q_{\text{ДГ}}^{\text{макс}}$, $Q_{\text{ЭСАБТ}}^{\text{макс}}$ - ҳар бир тақсимланган генерация манбаининг реактив қувват узата олиш чегаралари.

Мазкур бошқарув тизими орқали актив ва реактив қувватлар оптимал бошқарилиб, электр тармоғининг барқарор ва самарали ишлаши учун тақсимланган генерация манбаларининг ҳиссасини қўша олади.

16-расмда уч босқичли қувват бошқарувида тақсимланган генерация манбаларининг иштироки тасвирланган.

Иккинчи поғонали бошқарув — бу ерда захира қувватлар ва тақсимланган генерация манбалари иштирок этади. Тизим оператори частота ўзгаришига мос равишда қувват тақсимотини назорат қилади ва захира қувватлар билан генераторнинг қувватини мувофиқлаштиради.



16-расм. Тақсимланган генерация манбалари орқали частота бошқаруви

Бу диаграмма электр тармоғида 3 босқичли бошқарув тизимини ифодалайди. Биринчи поғонали бошқарув — бу босқичда генератор ва юклама ўртасида қувват (ΔP) тақсимоти амалга оширилади. Юкламадаги ўзгаришлар натижасида частота (Δf) ўзгариши кузатилади ва генератор бу ўзгаришга жавоб қайтаради.

Частота бошқарувини таҳлил қилишда электр энергетика тизимининг одатда эквивалент схемасидан фойдаланилди. Шунга кўра, тизимнинг эквивалент инерция доимийси M_{EID} қуйидагича аниқланади:

$$M_{EID} = \frac{\sum_{i=1}^{SGS} M_i S_{SGQ,i}}{S_{SGQ}} \quad (32)$$

бунда M_i – инерция доимийси, $S_{SGQ,i}$ - i синхрон генераторнинг тўла қуввати, GS – электр энергетика тизимига уланган синхрон генераторлар сони, S_{SGQ} – электр энергетика тизимининг тўла қуввати. Шунга кўра электр энергетика тизимининг частота тебраниши қуйидагича кўринишга эга:

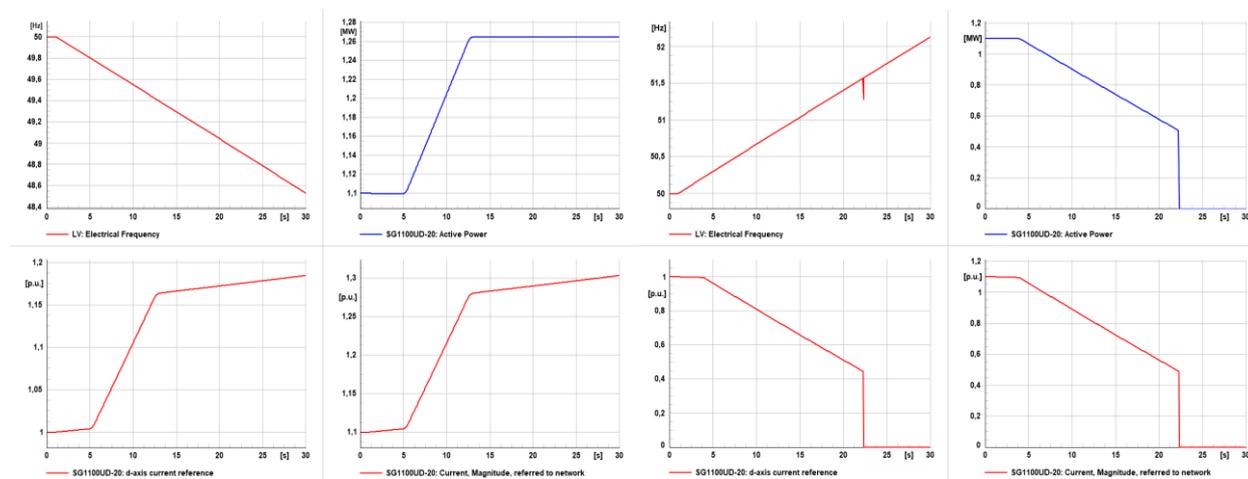
$$\Delta f = \frac{1}{2 * M_{EID} + D} * (\Delta P_G - \Delta P_{YUK}) \quad (33)$$

бунда M_{EID} – эквивалент инерция доимийси, D – амортизация фактори [W/Hz], GS – электр энергетика тизимига уланган синхрон генераторлар сони, S_{SGQ} – электр энергетика тизимининг тўла қуввати. Бу ифодани қуйидагича кўриниши ҳам мавжуд:

$$\Delta f = \frac{K_p}{T_p * s + 1} * (\Delta P_G - \Delta P_{YUK}) \quad (34)$$

бунда $K_p = \frac{1}{D} [Hz/W]$ ва $T_p = 2 * \frac{M_{EID}}{D} [W^{-1}]$. Частота турғунлиги таҳлили учун барча K_p , D , M_{EID} , параметрлар электр энергиясини ишлаб чиқарувчи анъанавий станциялар учун йиллар кесимида доимий маълумот бериб борилади. Аммо турли хил электр энергетика тизимларида бу кўрсаткичлар фарқли бўлади.

17 - расмда SG1100UD-20 инверторининг частота, актив қуввати ва ток параметрларига бўлган жавоби келтирилган. Биринчи графикда вақт ўтган сайин частота пасайиб, 30 сонияда 50 Гц дан 48,4 Гц га тушганини кўриш мумкин. Бунда 10 сонияда актив қувват 1,1 МВт дан 1,26 МВт га ошади ва 30 сония давомида барқарор ҳолатда қолади, d-axis current reference ток қиймати 10 сониягача 1 н.б бўлиб, кейин 1.18 н.б гача ошди ва 30 сониягача тикланган ҳолда сақланиб қолди. Ток кучи 10 сониядан кейин 1.3 н.б гача ошди ва шу ҳолатда қолди. Иккинчи графикда 30 сония давомида частотанинг 50 Гц дан 52 Гц гача ошгани кўрсатилди, актив қувват 10 сониядан кейин пасайиб, 20 сонияда 0 МВтга тушиб кетди. Бу қувватни камайиб боришини намоён қилади. d-ўқи бўйича ток ташкил этувчиси 10 сониядан кейин ток қиймати тушиб, 20 сониядан кейин 0 н.б га етди. Ток кучи қиймати 10 сониядан кейин пасайиб, 20 сонияда 0,3 н.б га тушди.



17-расм. Инвертор чиқиш параметрининг частотага нисбатан ўзгариши

Ўзбекистон электр тармоқларининг шимолий-ғарб қисмида жойлашган номинал қуввати 6300 ва 10000 кВА га тенг бўлган трансформаторлар ва унга уланган 10 кВ фидер истеъмолчилари учун тақсимланган генерация манбалари имконияти аниқланиб, керакли таклифлар киритилди ва қувват исрофлари қайта кўриб чиқилди. Таҳлил икки босқичда амалга оширилди. Биринчи босқичда реал тақсимлаш тармоғининг қувват исрофлари ҳисобланган бўлса, иккинчи босқичда тақсимланган генерация манбалари орқали қувват исрофлари ҳисоблаб чиқилди.

Тадқиқот натижаси улароқ 11-саҳифада келтирилган муаммолар қуйидагича ўз ечимини топди:

- тақсимланган генерация манбаларининг иш режими истеъмолчилар талабига мос равишда иш фаолиятини олиб боришига эришилди;
- тақсимлаш тармоқларида кучланиш оғишлари кузатилганда

тақсимланган генерация манбалари кучланиш огишини бартараф этиш режимида ишлашига эришилди;

- электр энергиясига юқори талаб мавжуд бўлмаган тақсимлаш тармоқларида тақсимланган генерация манбаларининг ўрнатилиши оқибатида электр энергияси сифат кўрсаткичларининг яхшиланишига эришилди;

- уч фазага уланган тақсимланган генерация манбаларининг таклиф этилиши фазалараро носимметрия ортишининг олдини олди;

- тақсимланган генерация манбалари чиқиш параметрларининг тақсимлаш электр тармоғи параметрларига нисбатан эргашувчи функцияси танланиб, натижада тенглаштирувчи ортиқча тоқлар пайдо бўлмаслигига эришилди.

Трансформаторнинг 10 кВ чулғамидан узатилаётган фидерларга жами 3200 кВт қувватга эга тақсимланган генерация манбалари таклиф этилди. Натижада трансформаторларнинг юкланиши ўртача 35%га, қувват истрофлари 3% га камайишига эришилди.

Тақсимланган генерациялар манбалари орқали ишлаб чиқариладиган электр энергиясининг йиллик миқдори қуйидагича аниқланади.

$$E_{\text{қфэс}} = P_{\text{kunlik}} * 8760 \text{соат} / 11.7 \frac{P_{\text{max}}}{2} * 750 \text{соат} \approx \frac{3200 \text{ кВт}}{2} * 750 \text{соат} \\ \approx 1199000 \text{ кВт} * \text{соат}$$

Йил давомидаги электр энергияси исрофи камайиши билан тақсимланган генерация манбалари орқали ишлаб чиқарилган электр энергиясининг умумий қиймати $275800 \text{ кВт} * \text{соат} + 1199000 \text{ кВт} * \text{соат} = 1474000 \text{ кВт} * \text{соат}$ ни ташкил этган.

Йиллик даромадни электр энергиясининг 06.01.2023 даги нархи (<https://www.het.uz/oz/lists/view/1919> 295 сўм кВт соатига деб белгиланган) билан ҳисобланганда қуйидаги қиймат келиб чиқади.

$$D = (275800 \text{ кВт} * \text{соат} + 1199000 \text{ кВт} * \text{соат}) * 295 \frac{\text{сўм}}{\text{кВт} * \text{соат}} \\ = 435 \text{ млн сўм/йил}$$

ПС Хазораспда 6300 ва 10000 кВА қувватга эга трансформаторлар учун тақсимлаш тармоқларига 3200 кВт қувватга эга тақсимланган генерация манбалари ўрнатилса йилига 435 млн сўм фойда келтирилиши аниқланган.

ХУЛОСА

“Тақсимланган генерация манбалари асосидаги замонавий электр тармоқларини шакллантириш муаммолари ва ечимлари” номли докторлик (DSc) диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги натижалар олинди ва хулосалар қилинди:

1. Ўзбекистон электр энергетика тизимининг юқори ва паст кучланишли тармоқлари таҳлил қилинган ҳамда кичик қувватли станцияларни тармоққа интеграция қилишдаги муаммолар аниқланган. Жаҳон тажрибасидан келиб чиқиб замонавий электр тармоқларини шакллантириш учун мавжуд усуллар таҳлил қилиниб, натижада Ўзбекистон учун самарали тақсимланган генерация манбалари интеграциясини амалга ошириш тизими тавсия этилди ва

инфратузилмаларни ривожлантириш бўйича ечимлар таклиф этилган.

2. Кичик қувватли қуёш фотоэлектрик ва шамол станциялари чиқиш қувватига таъсир этувчи омиллар таҳлил қилиниб, уларнинг паст кучланишли электр тармоғидаги мустақил интеграция иш режимлари моделлаштирилган. Энергия сақловчи аккумулятор тизимларининг қувват балансидаги иштироки таҳлил қилиниб ҳамда электр энергияси сифат кўрсаткичлари баҳоланиши натижасида тақсимланган генерация манбалари интеграциясининг умумий иш режимини моделлаштириш орқали такомиллаштиришга эришилган ва иқтисодий самарадор қувват оқимларини аниқлаш имконияти яратилган.

3. Вилоятлар бўйлаб электр таъминоти тизимида ўта юкланиш ва кучланиш тушувлари кузатилаётган ҳудудлар сараланган ҳамда уларнинг асосий сабаблари таҳлил қилинган. Тақсимланган генерация манбаларининг жойлашуви ҳамда ўрнатилиш қувватини оптималлаштириш ва кучланишни автоматик ростлаш усулларини тақсимланган генерация манбалари асосида такомиллаштириш натижасида ўта юкланишларни ва кучланиш тушувларини камайтириш имкониятига эришилган.

4. Тақсимланган генерация манбаларининг динамик иш режимлари таҳлил қилиниб, мавжуд усуллар орқали бошқарув тизими такомиллаштирилган. Натижада, ҳудудий электр тармоқлари параметрлари асосида тақсимланган генерация манбаларини интеграциялаш самарадорлиги кўрсатилган.

5. Марказлашмаган бошқарув тизимини такомиллаштириш асосидаги бошқарув усуллари таҳлил қилиниб, шу асосда актив қувват балансининг марказлашмаган бошқарув тизимини тақсимланган генерация манбалари билан интеграция қилиш имконияти илмий асосланган. Натижада, тақсимланган генерация манбалари учун янги бошқарув тизими таклиф этилган, шунингдек, замонавий энергетика тизимини шакллантиришда стратегик бошқарув асослари ишлаб чиқилиб, тақсимланган генерация манбалари улушини ошириш бўйича тавсиялар ишлаб чиқилган.

6. “Ўзбекистон миллий электр тармоқлари” АЖ Хоразм вилоятидаги ПС Хазорасп учун паст кучланишли электр тармоқларига “тақсимланган генерация манбаларининг уланиш нуқтаси ва ўрнатиш қувватларини аниқлаш” методи жорий қилиниши натижасида жами 3200 кВт қувватга тақсимланган генерация манбалари таклиф қилинган, натижада йиллик иқтисодий самарадорлик 435 млн сўмни ташкил этган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
НАУЧНУЮ СТЕПЕНЬ ПО НОМЕРУ DSc.02/30.12.2021.Т.143.01
ПРИ ИНСТИТУТЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ**

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЭНЕРГЕТИКИ
АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

ТУРАЕВ АКРАМЖОН ИКРОМЖОНОВИЧ

**ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ИСТОЧНИКОВ
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ**

05.05.01 – Энергетические системы и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА НАУК (DSc)
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2025

Тема диссертации доктора (DSc) технических наук зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан под номером B2023.1.DSc/T592.

Диссертация выполнена в Институте проблем энергетики Академии Наук Республики Узбекистан.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета (www.energetika.uz) и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный консультант

Муратов Хаким Махмудович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты

Хамидов Шухрат Вахидович
доктор технических наук, профессор

Таслимов Абдурахим Дехканович
доктор технических наук, профессор

Садуллаев Насулло Нематович
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация

Акционерное общество
“O’zenergoinjining”

Защита диссертации состоится на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2021.T.143.01 при Институте проблем энергетики АН РУз 2025 г. «01» ноября в 10⁰⁰ часов. (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йўли, 40. Тел.: (99855) 520-01-52; e-mail: energetika_in@umail.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института проблем энергетики АН РУз (зарегистрирован под номером 6). (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йўли, 40. Тел.: (99855) 520-01-52).

Автореферат диссертации разослан «07» ноября 2025 года.

(протокол рассылки № 6 от «06» ноября 2025 года).



Х. М. Муратов
Председатель научного совета по присуждению ученых степеней, доктор технических наук, профессор

Ж. Н. Толипов
Ученый секретарь научного совета по присуждению учёных степеней, доктор философии (PhD) по техническим наукам, старший научный сотрудник.

О. Х. Ишназаров
Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученых степеней, доктор технических наук, профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора наук (DSc))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире рост спроса на энергию и расширение использования возобновляемых источников энергии обусловили необходимость совершенствования электрических сетей, и данным вопросам уделяется особое внимание. В настоящее время в развитых странах «...производство электроэнергии с возобновляемых источников энергии растет на 10% в год, из которых доля энергии ветра и солнца составляет 60%. К 2030 году в рамках сценария достижения нулевых выбросов более 5500 GW производства будет обеспечиваться за счёт возобновляемые источники энергии»¹. В этом направлении, в частности, особое внимание уделяется развитию интеллектуальных сетей, децентрализованных моделей управления, технологий накопления энергии и их моделированию с целью повышения эффективности и надёжности работы энергосистемы.

В мире ведутся научные исследования, направленные на эффективную интеграцию распределённых источников генерации в электрические сети. В частности, они ориентированы на обеспечение устойчивости распределительных сетей, снижение колебаний напряжения посредством их правильного управления, а также на повышение качества электроэнергии в условиях частотного дисбаланса. В этом направлении, в частности, приоритетными считаются исследования, посвящённые совершенствованию современных интеллектуальных систем управления, внедрению технологий накопления энергии и разработке методов согласованной интеграции распределённой генерации в электрические сети. Кроме того, к актуальным задачам относятся совершенствование методов динамического моделирования распределённых источников генерации, разработка методов управления реактивной мощностью в распределительных сетях, а также обеспечение баланса мощности в зависимости от потенциала источников распределённой генерации.

В Республике проводятся масштабные исследования по эффективной интеграции распределённых источников генерации в низковольтные электрические сети, а также реализуются практические меры по их внедрению. В Стратегии развития Нового Узбекистана до 2030 года, поставлены задачи «доведение годового объёма вырабатываемой электроэнергии до 120 млрд кВт*ч, увеличения доли возобновляемых источников энергии в республике до 54%, также обеспечение устойчивой работы энергосистемы с учётом подключения переменных генерирующих мощностей»². Для реализации этих задач особое внимание уделяется увеличению доли распределённых генерации и систем накопления энергии в

¹ <https://www.iea.org/news/massive-global-growth-of-renewables-to-2030-is-set-to-match-entire-power-capacity-of-major-economies-today-moving-world-closer-to-tripling-goal>

² Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2023 йил 9 сентябрдаги ПФ-158-сон “Ўзбекистон — 2030» стратегияси тўғрисида”ги Фармони.

энергосистеме, внедрение технологий интеллектуального управления, а также разработка методов эффективной интеграции распределённых генерации. Важное значение имеет разработка научно-технических решений и создание условий для эффективного подключения новых типов источников энергии к электрическим сетям, что является важным направлением для дальнейшего развития энергетической системы страны.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлением Президента Республики Узбекистан № ПП-57 от 16 февраля 2023 года «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий в 2023 году», Постановлением Кабинета Министров Республики Узбекистан № 247 от 14 июня 2023 года «Об установлении порядка реализации излишков электрической энергии, произведенной физическими лицами и субъектами предпринимательства с использованием возобновляемых источников энергии» и других нормативно-правовых актов, регулирующих данную сферу деятельности.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование проводилось в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики: П. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Обзор зарубежных исследований по теме диссертации³. Научные исследования, направленные на совершенствование электрических сетей с учетом источников распределенной генерации и режимов их работы в энергосистеме, проводятся в ведущих научных центрах мира, включая Массачусетский технологический институт (США), Стэнфордский университет (США), Токийский технологический институт (Япония), Технологический институт Джорджии (США), Имперский колледж Лондона (Англия), Мюнхенский технический университет (Германия), Университет Цинхуа (Китай), Белорусский энергетический институт (Беларусь), Делфтский технологический университет (Нидерланды), Алматинский университет энергетики и связи (Казахстан), Национальный университет Сингапура (Сингапур), Киотский университет (Япония) и другие.

В области энергетики, направленной на изучение показателей качества электроэнергии и повышение устойчивости сетей в энергосистеме в мире получены следующие важные научные результаты: доказана возможность поддержания стабильных параметров сети с участием распределенных источников генерации за счет внедрения интеллектуальных алгоритмов управления (Институт энергетики Фраунгофера, Германия; Массачусетский технологический институт, США); разработаны цифровые модели, обеспечивающие быстрое восстановление напряжения на основе комбинированного использования микроинверторов и локальных систем накопления энергии (Имперский колледж Лондона, Великобритания);

³www.per.mit.edu, www.titech.ac, www.wikipedia.org, www.orbit.dtu.dk

разработаны модели нейронных сетей для анализа влияния распределённой генерации на переменные нагрузки в низковольтных сетях и их оптимального управления напряжением (Университет Цинхуа, Китай); внедрены адаптивные стратегии управления для обеспечения стабильности частоты при интеграции источников распределенной генерации (Токийский технологический институт, Япония).

В мире ведутся исследования, направленные на решение проблем, связанных с повышением надежности и эффективности источников распределенных генерации, подключаемых к низковольтным электрическим сетям, включая: обеспечение стабильности напряжения и частоты в сетях низкого напряжения; оптимизацию совместной работы источников распределенной генерации с системами накопления энергии; совершенствование распределения реактивной мощности на основе интеллектуальных алгоритмов управления; исследования в области цифрового управления потоками энергии в локальных нагрузках и снижения потерь в сетях.

Степень изученности проблемы. Ряд известных зарубежных учёных внесли значительный вклад в решение таких вопросов, как управление современными электрическими сетями энергосистемы, интеграция возобновляемых источников энергии в систему, рациональное использование энергоресурсов и повышение общей эффективности источников распределённой генерации, среди которых Charlz Franklin Kettering, Kannan M. Krishnan, Wilsun Xu, Mani Venkatasubramanian, Chanan Singh, Liuchen Chang, Vijay Vittal, Prabha Kundur, Mladen Kezunovic, Mani Venkataramanan, Mohammad Shahidehpour, Аркадий Пиковский, Raja Ayuunar, George Gross, Yousef Mahmoud, А.Х. Авезов, Г.А. Гараханова⁴ и другие.

Разработке и совершенствованию методов интеграции возобновляемых источников энергии в энергосистемы посвящены научные труды известных учёных Узбекистана. К ним относятся: Т.Х. Носиров, Р.А. Захидов, Х.М. Муратов, Ф.А. Хошимов, Ш.В. Хамидов, Т.Ш. Гаибов, О.Х. Ишназаров, А.Д. Таслимов. В результате проведенных научных исследований достигнуты результаты в решении вопросов эффективной интеграции источников распределенной генерации в энергосистему.

В то же время, недостаточно изучены вопросы широкого внедрения источников распределенной генерации в энергосистему Республики Узбекистан и их эффективной интеграции, кардинального совершенствования энергосистем за счет использования источников распределенной генерации,

⁴Обзор международных научных исследований по теме диссертации проводился исходя из следующих источников: Prabha Kundur "Power System Stability and Control" Toronto 1993; B. Zhang, P. Dehghanian and M. Kezunovic, "Optimal Allocation of PV Generation and Battery Storage for Enhanced Resilience," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 1, pp. 535-545, Jan. 2019; Y. Wang and V. Vittal, "Data Driven Real-Time Dynamic Voltage Control Using Decentralized Execution Multi-Agent Deep Reinforcement Learning," in IEEE Open Access Journal of Power and Energy, vol. 11, pp. 508-519, 2024; L. F. Wang, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 3, August, 2008, pp. 1336-1345; M. Mao, P. Jin, N. D. Hatziargyriou and L. Chang, "Multiagent-Based Hybrid Energy Management System for Microgrids," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, no. 3, pp. 938-946, July 2014;

формирования системы с диверсифицированными источниками энергии, предотвращения негативного влияния возобновляемых источников энергии, повышения возможностей распределительных сетей по обеспечению энергобаланса.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с планом научно-исследовательских работ лаборатории «Электротехнологии и эксплуатация энергетического оборудования» Института проблем энергетики Академии наук Республики Узбекистан в рамках проекта «Проблемы и решения формирования условий эксплуатации современных электрических сетей на основе распределенных генерации» (2024 год).

Целью исследования является создание модели интегрированного режима работы распределённых источников генерации для электрических сетей, совершенствование системы интеллектуального управления, также модернизация современных электрических сетей на основе эффективного управления балансами активной и реактивной мощности.

Задачи исследования:

провести анализ методов формирования современных электрических сетей на основе распределённых источников генерации и выявить ключевые проблемы их внедрения;

разработать модель интегрированного режима работы распределённых источников генерации в сетях низкого напряжения;

совершенствовать цифровых динамических моделей распределённых источников генерации на основе научно-технических решений для современных электрических сетей.

оптимизировать систему регулирования напряжения в сетях низкого напряжения с использованием реактивной мощности распределённых источников генерации;

повысить эффективность режимов работы сети путём интеграции распределённых источников генерации в децентрализованную систему управления балансом активной мощностью.

Объектом исследования являются распределительные электрические сети, интегрированные с распределёнными источниками генерации, включая солнечные фотоэлектрические станции (СФЭС), ветроэнергетические установки (ВЭУ), дизельные генераторы (ДГ), а также аккумуляторные системы хранения энергии (АСХЭ), оснащённые соответствующими техническими характеристиками и параметрами.

Предметом исследования являются процессы интеграции распределённых источников генерации в электрические сети, методы их управления и параметры, способствующие оптимизации режимов работы.

Методы исследований. В процессе исследования применялись современные методы математического моделирования, оптимизации, экспериментальные исследования, также методы имитационного

моделирования.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработана математическая и цифровая модель комбинированного режима работы источников распределенных генерации для низковольтных электрических сетей с учетом параметров сети;

разработан метод устранения перегрузок в системе, основанный на расчете оптимального размещения источников распределенных генерации в низковольтных электрических сетях и их установленной мощности;

разработана цифровая модель общего режима работы, основанная на эффективной интеграции источников распределенной генерации, работающих в системе Multi-Agent Systems, с учетом параметров сети в точке подключения;

усовершенствована интеллектуальная система управления мощностью низковольтных электрических сетей через источники распределенных генерации с учетом реактивной мощности источника;

усовершенствован метод интеграции источников распределенных генерации в систему децентрализованного управления балансом активной мощности первой и второй ступеней с учетом активной мощности источника.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработаны математические модели и алгоритмы для интеграции распределённых источников генерации в электрические сети, а также обеспечения их интеллектуального управления;

предложены децентрализованные механизмы и методы управления для совершенствования взаимодействия между аккумуляторными системами хранения энергии (АСХЭ), возобновляемыми источниками энергии (СФЭС, ВЭУ) и дизельными генераторами.

Достоверность результатов исследования подтверждается:

модели, алгоритмы и методы расчетов, использованные в ходе исследования, основаны на международных стандартах, научных исследованиях и данных, полученных из реальных электрических сетей. Предложенные методы подтверждены путем проведения имитационного моделирования в программном комплексе DIgSILENT PowerFactory, предназначенном для анализа и проектирования электрических систем.

Научная и практическая значимость диссертации. Научная значимость результатов исследования заключается в разработке новых методов математического моделирования для интеграции распределённых источников генерации в электрические сети, совершенствовании систем интеллектуального управления и обеспечении устойчивых режимов работы энергосистем.

Практическая значимость результатов исследования объясняется совершенствованием децентрализованного управления в реальном времени в области электроэнергетики, согласованной интеграцией распределённых источников генерации в сеть, а также обеспечением напряжения и стабильности электрической сети.

Внедрение результатов исследования. На основании научных

результатов, полученных при разработке решений по совершенствованию электрических сетей с использованием распределённых источников генерации:

Метод определения оптимальной точки подключения распределённых источников генерации для устранения перегрузок в сети внедрён в предприятии «Бахмалской региональной электрической сети» (справка от АО «Жиззахский областной электрической сеть» от 23 ноября 2023 года). В результате были определены участки сети на стороне ПС «Мугул» напряжением 10 кВ, где целесообразно подключение распределённых источников общей мощностью 1600 кВт. Это позволило снизить загрузку трансформаторов мощностью 4000 кВА на 16 % и уменьшить потери в линиях электропередачи на 6 %;

Методика и алгоритм определения мощности распределённых источников генерации для устранения перегрузок трансформаторов внедрены в ООО «RODMAN» (справка от Наманганской областной электрической сети №35-25/4056 от 10 ноября 2023 года). В результате установка распределённых источников суммарной мощностью 1050 кВт на ПС «Мегатекстиль» позволила снизить загрузку трансформатора мощностью 6300 кВА на 12 %, а также уменьшить потери в воздушных и кабельных линиях напряжением 10 кВ и ниже на 7 %;

Методология совершенствования цифровых динамических моделей с учётом параметров электрической сети внедрена в АО «Сурхандарьинский областной электрической сеть» (справка № 39-20/9285 от 16 ноября 2023 года). В результате применения данной методологии потери в сетях передачи электроэнергии напряжением 35 кВ и ниже удалось снизить на 6 %, а загрузку трансформаторов мощностью 2500 кВА — уменьшить на 18 %;

Цифровая модель оптимального размещения и расчёта установленной мощности распределённых источников генерации применена в АО «Хорезмский областью электрическая сеть» (справка № 01-02-22/4924 от 5 декабря 2023 года АО «Национальная электрическая сеть Узбекистана»). В результате ожидаемая годовая экономическая эффективность составила 435 000 000 (четыреста тридцать пять миллионов) сумов.

Апробация научных исследований. Результаты исследования обсуждались и апробировались 4 международные и 5 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследований. По теме диссертации опубликовано всего 23 научных работ, а также 12 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций из них 2 в международных и 10 в республиканских научных журналах, также получены 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объём диссертации составляет 195 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении рассматривается актуальность и необходимость темы диссертационного исследования, его обоснованность, цель и задачи исследования, характеризуется объект и предмет, показана соответствие приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, излагаются научная новизна и практические результаты исследования, раскрываются научная и практическая значимость полученных результатов, внедрение в производство результатов исследования, приводятся сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Состояние энергетической системы Узбекистана и развитие распределённых источников генерации в современных электрических сетях»** представлен анализ современного состояния электроэнергетической системы Республики Узбекистан, выявлены существующие проблемы, изложена методология исследования. Рассмотрены основные понятия, связанные с современными электрическими сетями и распределёнными источниками генерации, проанализирован мировой опыт интеграции распределённых источников в электрические сети. Также проведен обзор литературы по методам формирования, управления и обеспечения баланса мощности в современных электрических сетях.

По результатам анализа, основные проблемы, связанные с внедрением распределённых источников генерации в Республике Узбекистан, на сегодняшний день включают следующие аспекты:

- несоответствие режимов работы распределённых источников генерации потребительскому спросу;
- отключение распределённых источников от сети при возникновении отклонений напряжения в распределительных сетях;
- ухудшение показателей качества электроэнергии вследствие установки распределённых источников в сетях с низким уровнем электропотребления;
- рост числа однофазных подключений распределённых источников генерации, вызывающий к значительное увеличение межфазной несимметрии;
- значительное различие выходных параметров распределённых источников генерации и параметров распределительной сети, что способствует к росту уравнивающих токов.

Решение указанных проблем представлено как основной результат проведённого исследования.

На рисунке 1 представлена методология исследования, включающая все этапы работы с подробными пояснением их реализации. Процесс изложен последовательно следующим порядком:

Этап сбора данных: На данном этапе собраны и обработаны основные данные. Информация получена из различных источников, включая Национальную электрическую сеть (НЭС Узб), Центральный диспетчерский центр (НДЦ), региональные энергетические сети (РЭС), обслуживающие организации (ПУ) и население (Н). Используются конкретные данные, такие как установленные мощности генерации (УМГ), параметры линий электропередачи (ЛЭП) и проектируемые объекты (ПО). К обработанным

данным относятся установленные распределённые источники генерации (УРГ), график изменения нагрузки потребления (ГИН), нагрузка распределительных сетей (РС) и трансформаторов (Тр), величины падения напряжения (ПН), частота и продолжительность перебоев в подаче электроэнергии (ПсЭ).

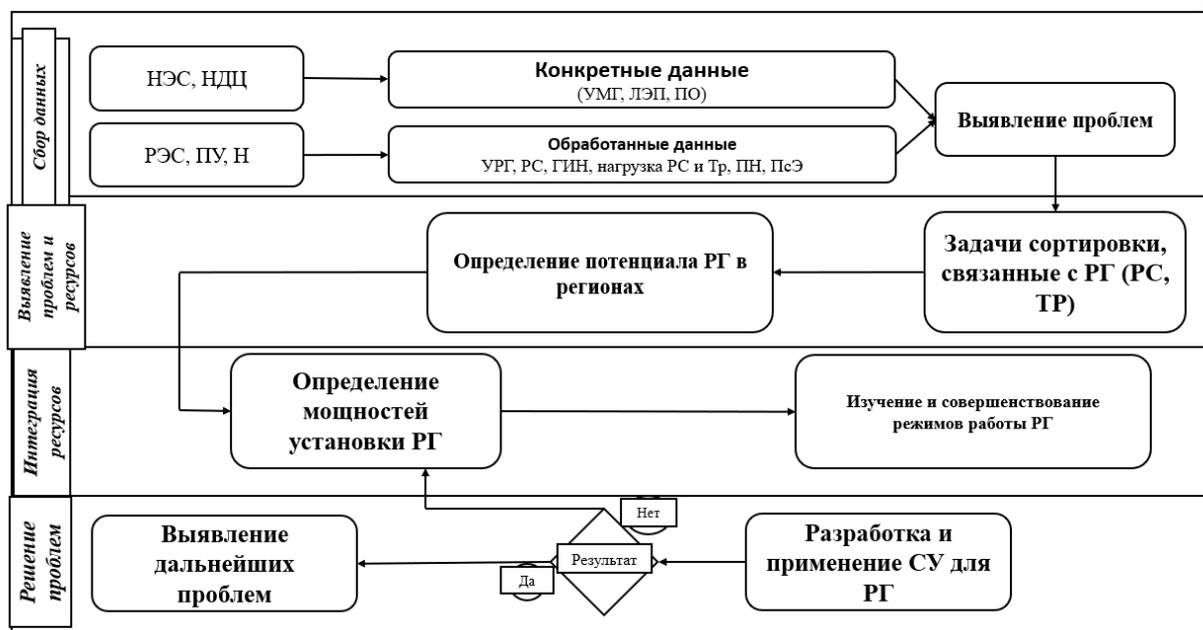


Рисунок 1. Значение управления мощностью распределённого источника генерации

Выявление проблем: На основе собранных данных проведён анализ и выявлены существующие проблемы. Выполнено ранжирование проблем, связанных с распределёнными источниками генерации (РГ), по регионам с учетом состояния распределительных сетей и трансформаторных подстанций.

Решение проблем: Для каждого региона определён потенциал установки РГ и возможности их размещения. Для управления распределёнными источниками внедрена система управления (СУ), что позволило реализовать технологические решения. Процесс продолжался до полного достижения поставленных целей и получения требуемых результатов.

Во второй главе **«Моделирование общего режима интеграции распределённых источников генерации на основе автономных режимов работы в электрических сетях»** рассмотрены особенности функционирования маломощных солнечных фотоэлектрических и ветровых станций, их автономные режимы интеграции, роль аккумуляторных систем хранения энергии в обеспечении надёжного электроснабжения, показатели качества электроэнергии в низковольтных сетях и моделирование общего режима работы распределённых источников генерации.

Модель солнечной фотоэлектрической станции общей мощностью 100 кВт, разработанная в программном комплексе PowerFactory DigSilent, представлена на рис.2. При определении мощности, передаваемой в электрическую сеть, использовались существующие математические модели, а также учтены дополнительные внешние факторы, такие как климатические условия региона.

Результаты анализа демонстрируют состояние высших гармоник до и после установки фильтра в закрытых распределительных устройствах (ЗРУ) напряжением 10 кВ, к которым подключена машина постоянного тока через преобразователь. Наблюдается снижение высших гармонических составляющих, а именно 5-я гармоника снизилась с 3,3 % до 0,4 %, 7-я гармоника — с 5,9 % до 1,8 %, 10-я гармоника — с 2,87 % до 0,2 %, 11-я гармоника — с 16,9 % до 1,5 %, 13-я гармоника — с 4,6 % до 1,4 %. Кроме того, установлено, что уровень всех высших гармоник после установки фильтра соответствует установленным требованиям и стандартам.

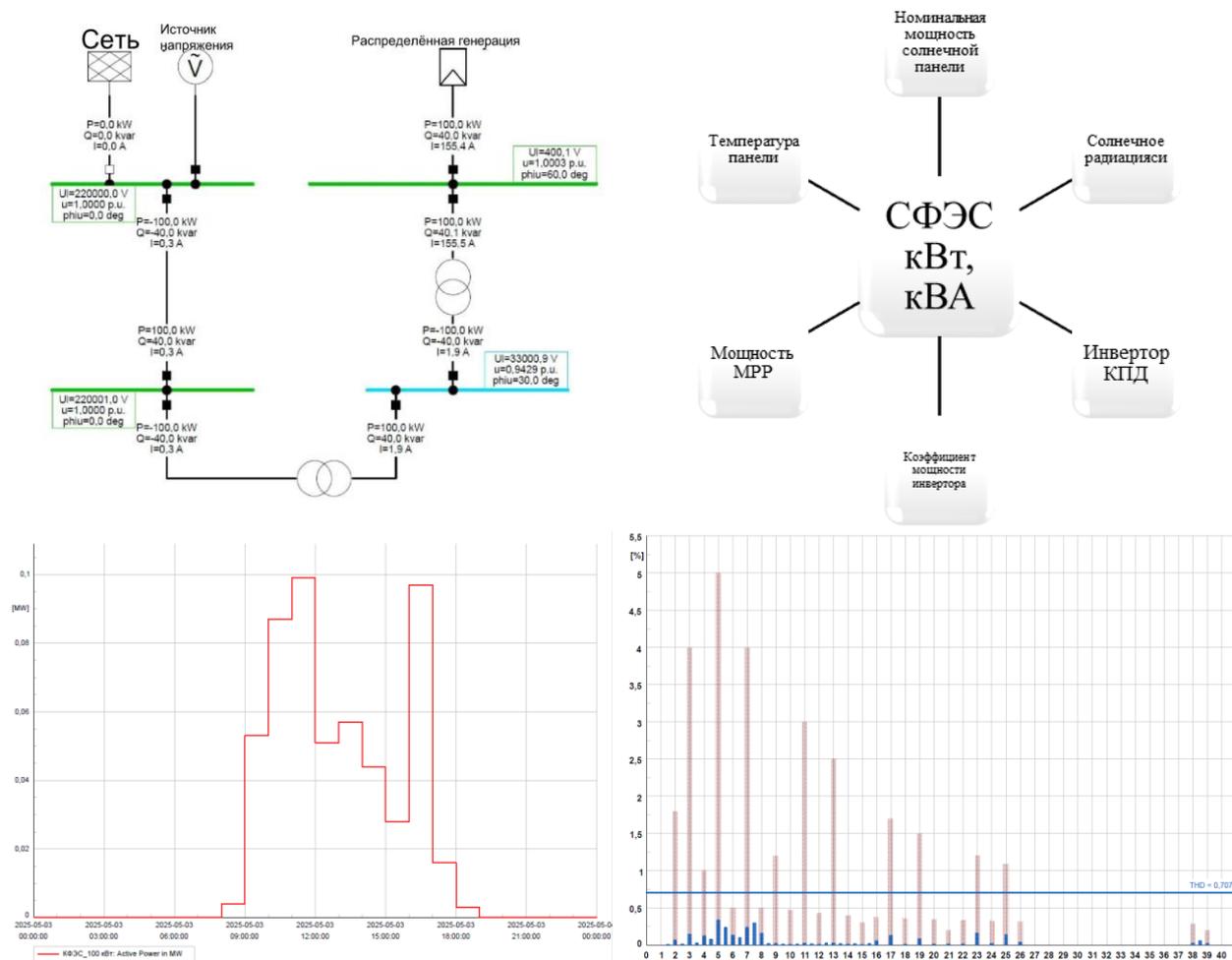


Рисунок 2. Моделируемые выходные параметры СФЭС и зависящие от них факторы

Мощность, вырабатываемая солнечными панелями W_p определяется следующим образом:

$$W_p = \frac{G_p * W_{pmax} * \mu_p * \mu_i}{G_s} \quad (1)$$

$$W_{pu} = W_p * panel_{soni} \quad (2)$$

где W_{pu} - общая установленная мощность всех панелей, используемых на СФЭС, $panel_{soni}$ - количество солнечных панелей, G_p - плотность солнечной радиации, падающей на поверхность панели (W/m^2), G_s - стандартное значение солнечной радиации, W_{pmax} - максимальная выходная мощность солнечной

панели, μ_p -коэффициент полезного действия солнечной панели, μ_i -коэффициент полезного действия инвертора.

На рисунке 3 представлен суточный график генерации маломощной ветротурбины мощностью 1 кВт на территории Жиззахской области. Согласно данным, минимальная выработка электроэнергии ветротурбиной наблюдается утром, с 7:00 до 8:00, и составляет около 0,1 кВт·ч в час.

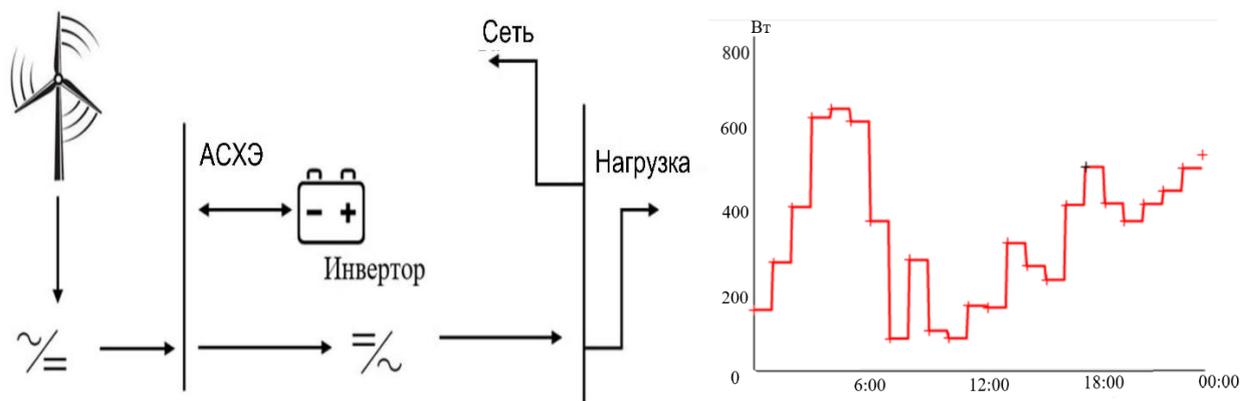


Рисунок 3. Суточная генерация маломощной ветротурбины

Малогабаритные аккумуляторные системы хранения энергии (АСХЭ) обычно аккумулируют избыточную электроэнергию в дневное время, когда спрос минимален, а ночью обеспечивают подачу мощности потребителям, когда фотоэлектрические станции не производят энергию. Это определяется следующими выражениями

$$W_{bess} = \max(W_{ist} - (W_{qtem} + W_t)) \quad (3)$$

где W_{bess} - объём электроэнергии, который должен быть принят системой хранения энергии (аккумуляторной батареей), W_{ist} - потребность потребителей в электроэнергии в периоды минимального спроса, W_{qtem} - объём электроэнергии, получаемой от распределённых источников генерации, W_t объём электроэнергии, поставляемой через центральные электрические сети.

Для определения возможности аккумуляторной батареи принимать или отдавать мощность использовалось следующее выражение:

$$W_{bess} = \max\left(\frac{|P_{besmak}|}{S_{bess} \cdot H \cdot \mu}, \frac{|P_{bessmin}|}{S_{bess} \cdot H \cdot \mu}\right) \quad (4)$$

где P_{besmak} , $P_{bessmin}$ - максимальная и минимальная мощность, которую аккумуляторная батарея может принять или отдать в единицу времени, S_{bess} - ёмкость (запас) аккумуляторной батареи, μ - коэффициент полезного действия аккумуляторной батареи, H - время зарядки аккумуляторной батареи при заданной мощности.

На рисунке 4 показано удовлетворение потребности потребителя за счёт установленной в доме солнечной фотоэлектрической станции мощностью 1,3 кВт и аккумуляторной системы хранения энергии (АСХЭ). Согласно данным, в ночное время вся потребность потребителя обеспечивается за счёт энергии, накопленной в системе хранения. Результаты второго сценария демонстрирует, что по сравнению с первым случаем устойчивость

электрической сети значительно повышена. Все параметры полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к сетям электроснабжения.

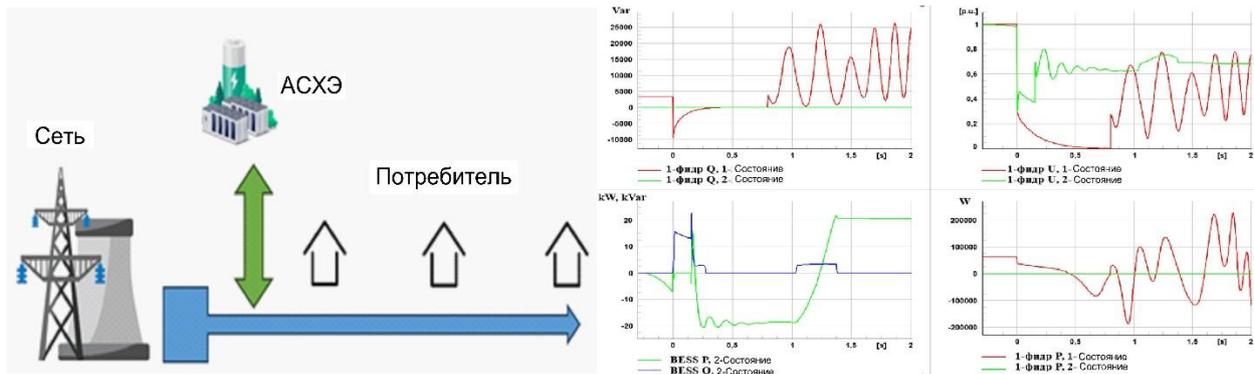


Рисунок 4. Параметры выхода АСХЭ и спрос потребителей

Осуществление контроля частоты с помощью источников распределённой генерации требует наличия эффективных систем связи и управления, а также разработки стратегий компенсации изменчивости возобновляемых источников энергии.

На рисунке 5 представлена схема, описывающая порядок подключения распределённых источников генерации для их общего режима работы. Именно для этой схемы определим параметры общего режима работы.

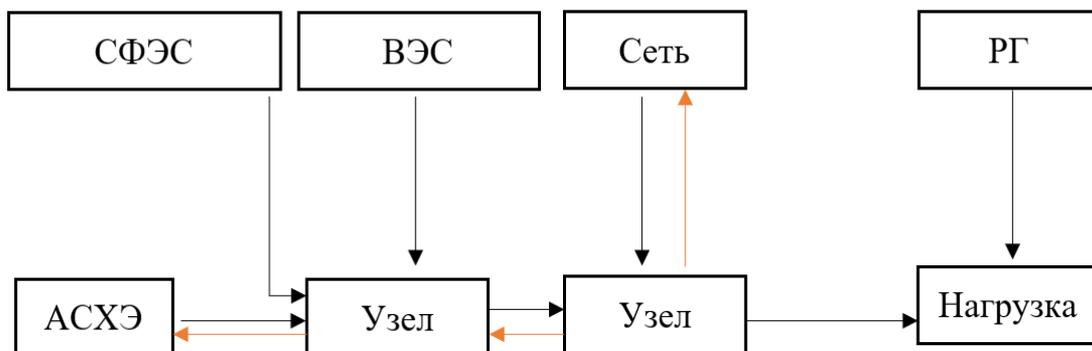


Рисунок 5. Схема подключения распределённых источников генерации в общий режим работы

Необходимо определить следующие значения: требуемая активная мощность ветроэнергетической установки $P_{ШТ}$, минимальная требуемая активная мощность АСХЭ $P_{ЭСАБТ}$, значения напряжения в узлах V_i , требуемая реактивная мощность для управления напряжением $Q_{компенсация}$. Для этого в качестве известных параметров используются активная мощность нагрузки $P_{юк}$, коэффициент мощности $\cos \phi$, активная и реактивная мощность дизельного генератора $P_{ДГ}$ и $Q_{ДГ}$, параметры частоты дизельного генератора $f_{ДГ}$, активная и реактивная мощности СФЭС $P_{КФЭС}$ и $Q_{КФЭС}$, номинальное напряжение сети $V_{тармоқ}$, активное и индуктивное сопротивления части R и X , частота сети f_0 .

Баланс активной мощности между всеми источниками и нагрузкой имеет следующий вид:

$$P_{КФЭС} + P_{ШТ} + P_{ДГ} + P_{ЭСАБТ} + P_{тармоқ} = P_{юк} + P_{исроф} \quad (5)$$

где $P_{\text{исроф}}$ – потери мощности в сети

$$P_{\text{исроф}} = \sum_i^n I_i^2 R_i \quad (6)$$

Условие непрерывности баланса мощности выражается следующим образом:

$$\frac{d}{dt}(P_{\text{ген}} - P_{\text{юк}} - P_{\text{исроф}}) = \alpha P_{\text{ЭСАБТ}} + \beta P_{\text{ШТ}} + \gamma P_{\text{КФЭС}} + \delta P_{\text{ДГ}} \quad (7)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – распределительные коэффициенты статического мощности, $P_{\text{ген}}$ – генерируемая активная мощность.

Расчет изменения напряжения в каждом узле электрической сети:

$$V_i = V_{\text{ном}} - \sum_i^n \frac{P_{ij}R_{ij} + Q_{ij}X_{ij}}{V_j} \quad (8)$$

Баланс реактив мощности определяется следующим образом:

$$Q_{\text{компенсация}} = Q_{\text{юк}} + Q_{\text{исроф}} - (Q_{\text{КФЭС}} + Q_{\text{ШТ}} + Q_{\text{ДГ}} + Q_{\text{тармоқ}}) \quad (9)$$

Для расчета компенсации реактивной мощности по напряжению:

$$Q_{\text{компенсация}} = \frac{V_{\text{ном}}^2 - V_i^2}{X_i} \quad (10)$$

Если для компенсации используется аккумуляторная система, то её реактивная мощность:

$$Q_{\text{компенсация}} = -Q_{\text{ЭСАБТ}} \quad (11)$$

Применяя условие $P_{\text{тармоқ}} = 0$ и определяем необходимую мощность для компенсации дефицита мощности ветроэнергетической установки, и минимальную требуемую мощность аккумуляторной системы, которая может обеспечить баланс мощности, следующим образом:

$$P_{\text{ШТ}} = P_{\text{юк}} + P_{\text{исроф}} - (P_{\text{КФЭС}} + P_{\text{ДГ}} + P_{\text{ЭСАБТ}}) \quad (12)$$

$$P_{\text{ЭСАБТ}} = P_{\text{юк}} + P_{\text{исроф}} - (P_{\text{КФЭС}} + P_{\text{ДГ}} + P_{\text{ШТ}}) \quad (13)$$

при этом учитывается, какой источник является экономически выгодным:

$$P_{\text{ШТ}}C_{\text{ШТ}} + P_{\text{ЭСАБТ}}C_{\text{ЭСАБТ}} = \text{мин} \quad (14)$$

где $C_{\text{ШТ}}$ – стоимость производства мощности ветроэнергетической устновки,

$C_{\text{ЭСАБТ}}$ –затраты на передачу мощности от АСХЭ:

$$\frac{d}{dt}P_{\text{ЭСАБТ}} = k_{\text{бериш}}(P_{\text{ШТ}} - P_{\text{юк}} - P_{\text{исроф}}) \quad (15)$$

где $k_{\text{бериш}}$ – коэффициент состояния заряда.

Наименее затратное распределение мощности выражается следующим образом:

$$\text{мин}(P_{\text{ШТ}}C_{\text{ШТ}} + P_{\text{ЭСАБТ}}C_{\text{ЭСАБТ}} + P_{\text{КФЭС}}C_{\text{КФЭС}} + P_{\text{ДГ}}C_{\text{ДГ}} + P_{\text{тамоқ}}C_{\text{тармоқ}} + P_{\text{ШТ}}C_{\text{ШТ}}) \quad (16)$$

Ограничения:

$$\begin{aligned} P_{\text{КФЭС}}^{\text{мин}} &\leq P_{\text{КФЭС}} \leq P_{\text{КФЭС}}^{\text{макс}} \\ P_{\text{ШТ}}^{\text{мин}} &\leq P_{\text{ШТ}} \leq P_{\text{ШТ}}^{\text{макс}} \\ P_{\text{ЭСАБТ}}^{\text{мин}} &\leq P_{\text{ЭСАБТ}} \leq P_{\text{ЭСАБТ}}^{\text{макс}} \end{aligned} \quad (17)$$

Эта модель рекомендуется для использования в существующих низковольтных электрических сетях с распределёнными источниками генерации с целью экономически эффективного распределения источников мощности.

Третья глава «Методы выявления проблемных участков распределительных сетей и их оптимизация с помощью распределённых источников генерации», направлена на решение выявления трансформаторных подстанций и сетевых участков, работающих в режиме перегрузки; анализ районов, где наблюдаются пониженные уровни напряжения в системах электроснабжения; предотвращение перегрузок с учётом местоположения и установленной мощности распределённых источников генерации; устранение отклонений напряжения в распределительных сетях за счёт использования реактивной мощности.

Глава посвящена разработке и совершенствованию методов, направленных на повышение устойчивости и эффективности функционирования распределительных электрических сетей.

В таблице 1 приведены трансформаторы, работающие в режиме перегрузки, выявленные по регионам.

Таблица 1

Перегруженные трансформаторы по областям

№	Название ПС	U, кВ	Потери, МВт	Мощность Тр, МВА	Нагрузка, %	
					Реал. время	Прогноз
Жиззахская область						
1	Туркмен	35/10	0.06	2.5	170	220
2	Ровот	35/10	0.0008	4	108	140
3	Фориш	35/10	0.006	2.5	102	136
4	Даштабад	110/35/10	0.6	16	121	156
Хоразмская область						
1	Досов	35/10	0.07	2.5	T-1 102	T-1 133
2	Беруни	35/10	0.9	4	T-1 100	T-1 130

В таблице 2 представлены выявленные случаи перегрузки в распределительных сетях низкого напряжения по областям. В указанных районах уровень напряжения также находится ниже допустимых пределов.

Таблица 2

Перегруженные сети по областям

№	Название ЛЭП	U, кВ	Длина, км	Ном ток, А	Нагрузка, %	Потери, МВт
Андижанская область						
1	Л-Яйилма-2	110	12	610	141	0.6
2	Л-Холдавонбек	35	13.01	280	163	0.41
3	Л-Бирлашган	110	40.41	280	109	0.26
4	Л-5X	110	11.06	380	106	0.06
5	Л-Бакиров	35	7.42	280	121	0.02
Республика Каракалпакстан						
1	Л-Орайлик	110	14.88	340	112	1.42
2	Л-Турткул-2	110	39.8	220	154	0.5

На рисунке 6 представлен алгоритм определения установленной мощности распределенных источников генерации с учетом перегрузки трансформаторов в сетях низкого напряжения. Согласно данному алгоритму, нагрузка трансформатора рассчитывалась в период нормального энергопотребления, при достижении максимального значения нагрузки, во время зарядки установленных аккумуляторных систем в пиковый период потребления и при возникновении обратного потока энергии. Установленная мощность распределенных источников генерации определялась с использованием следующих выражений.

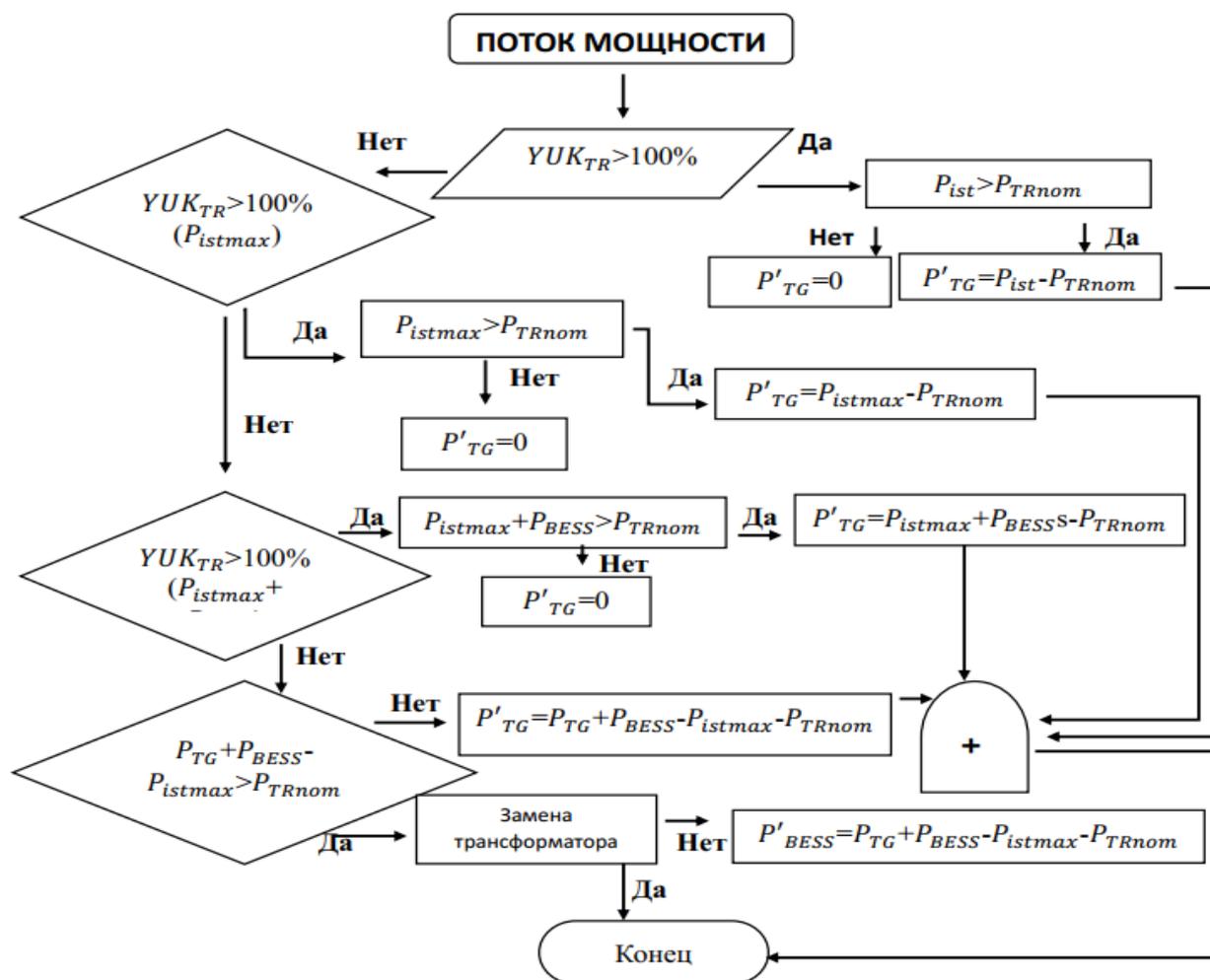


Рисунок 6. Алгоритм определения мощности распределённых источников генерации

Если нагрузка трансформатора (YUK_{TR}) превышает 100%, а мощность потребителей P_{ist} больше номинальной активной мощности трансформатора P_{TRnom} :

$$P'_{TG} = P_{ist} - P_{TRnom} \quad (18)$$

Для случая, когда нагрузка трансформатора YUK_{TR} превышает 100%, а максимальная мощность потребителей P_{istmax} больше номинальной мощности трансформатора P_{TRnom} :

$$P'_{TG} = P_{istmax} - P_{TRnom} \quad (19)$$

Для случая, когда суммарная мощность максимального потребления

(P_{istmax}) и зарядной мощности аккумуляторных батарей (P_{BESS}) превышает номинальную мощность трансформатора (P_{TRnom}):

$$P'_{TG} = P_{istmax} + P_{BESS} - P_{TRnom} \quad (20)$$

Для случая, когда разность между суммарной мощностью установленных распределённых источников генерации (P_{TG}) и разрядной мощностью аккумуляторных батарей (P_{BESS}), с одной стороны, и максимальной мощностью потребителей (P_{istmax}) с другой стороны, меньше номинальной мощности трансформатора (P_{TRnom}):

$$P'_{TG} = P_{TG} + P_{BESS} - P_{istmax} - P_{TRnom} \quad (21)$$

Для случая, когда разность между суммарной мощностью ранее установленных распределённых источников генерации (P_{TG}) и разрядной мощностью аккумуляторных батарей (P_{BESS}), с одной стороны, и максимальной мощностью потребителей (P_{istmax}), с другой стороны, превышает номинальную мощность трансформатора (P_{TRnom}), и при отсутствии возможности замены трансформатора, требуемая мощность устанавливаемых аккумуляторных батарей определяется следующим образом:

$$P'_{BESS} = P_{TG} + P_{BESS} - P_{istmax} - P_{TRnom} \quad (22)$$

Методом определения оптимальной точки подключения проанализированы четыре типа распределённых источников генерации – солнечная фотоэлектрическая станция, ветроустановка, дизельный генератор и система хранения энергии. Анализ проводился для четырёх различных точек подключения к распределительной электрической сети напряжением 0,4 кВ в Жиззахской области. Данный метод предполагает предварительное определение установленных мощностей распределённых источников генерации.

Наиболее оптимальной точкой подключения оказалось состояние № 2, поскольку в данном случае средняя загрузка составила 55,75 % (см. рис. 7).

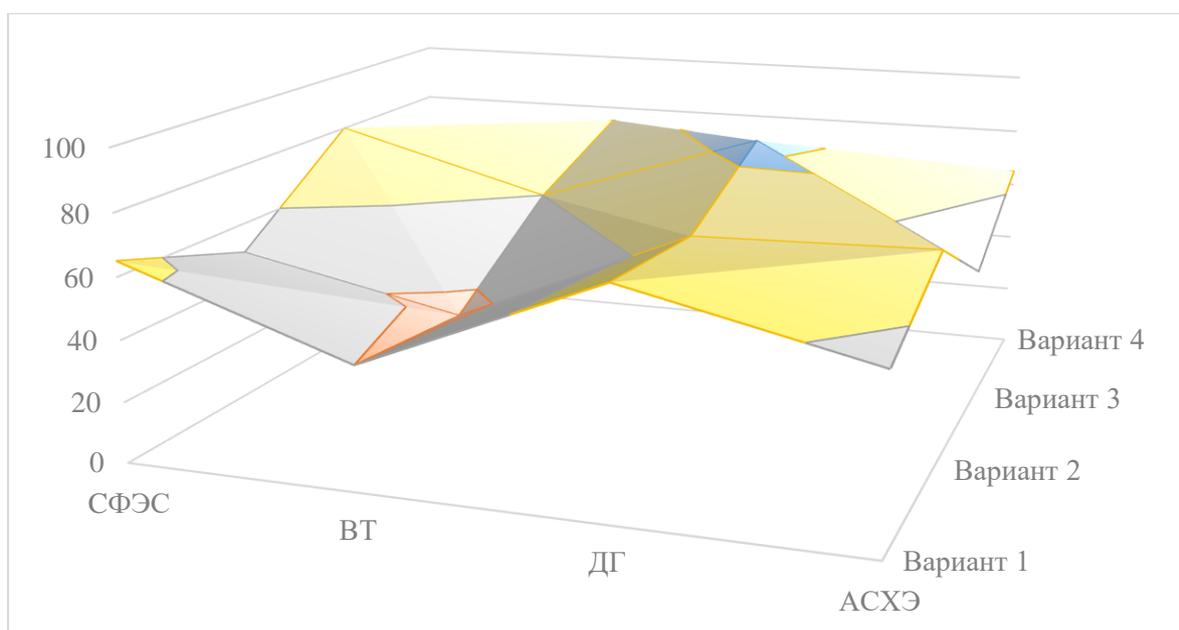


Рисунок 7. Результат применения метода определения оптимальной точки подключения

Ось X (горизонтальная): Типы генерации – виды источников, подключаемых к электрической сети.

Ось Y (вертикальная): Точки подключения – альтернативные места, где возможно подключение источников генерации.

Ось Z (глубина графика или цветовая интенсивность): Загрузка сети – уровень загрузки электрической сети для каждой комбинации типа генерации и точки подключения, выраженный в процентах.

На рисунке 8 представлены изменения уровня загрузки трансформатора, а также потерь активной и реактивной мощности, обусловленных интеграцией распределённых источников генерации. Полученные результаты оценены как эффективность вышеописанного алгоритма.

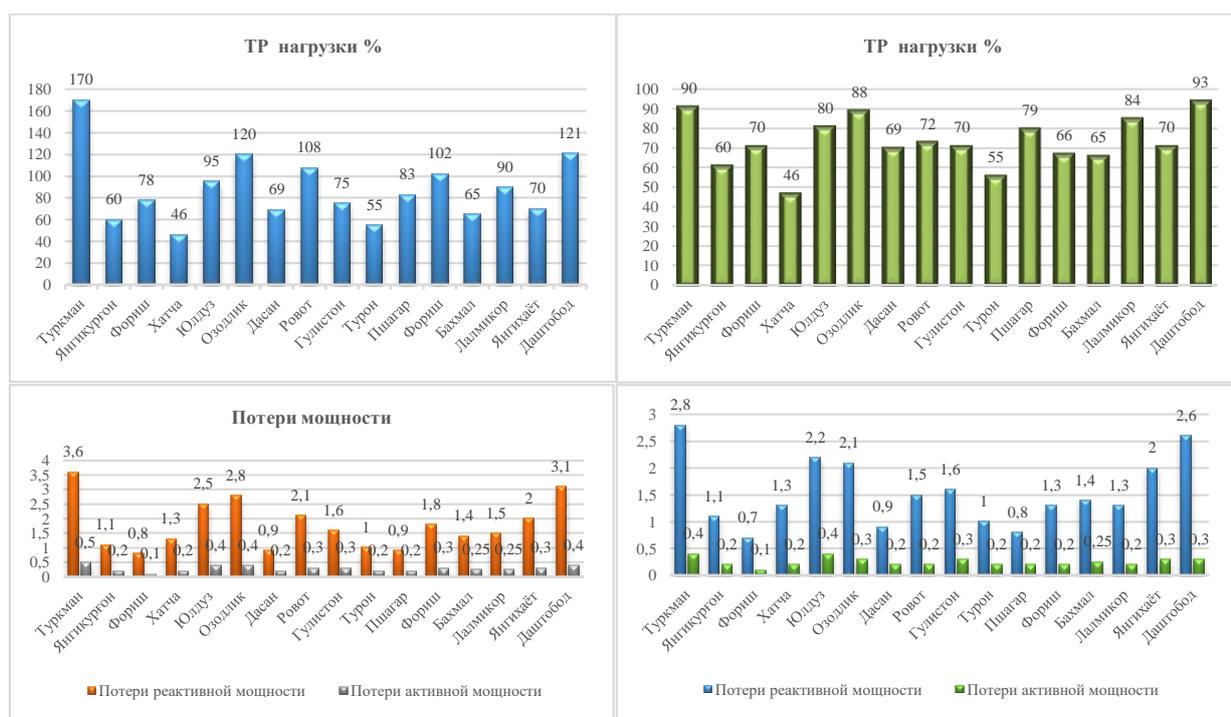


Рисунок 8. Изменение загрузки трансформатора и потерь мощности при интеграции распределённых источников генерации

Таблица 3

Потребление отдельных подстанций в Хорезмской области

Название ПС	16.07.2022, 21:00		16.07.2022, 02:00		23.12.2022, 18:00		23.12.2022, 03:00		Мощность ТР ВА
	P МВт	Q МВар							
Хазарасп	5,1	1,5	3,4	0,9	6	1,8	3,8	1	6,3
	6,8	2,1	4,6	1,4	9	2,8	4,8	1,4	10
Беруни	5,3	2,5	2,2	1,7	5	1,5	3,4	0,9	6,3
	3,6	1,7	1,9	1,2	3	1	2,3	0,6	4
	1,1	0,3	0,9	0,2	1,1	0,3	0,5	0,2	1

Загрузка подстанций, в которых наблюдаются отклонения напряжения в распределительных сетях Хорезмской области за летние и зимние периоды - в режимах максимального и минимального потребления представлена таблице

3. Анализ показал, что в большинстве случаев падение напряжения не связано с перегрузкой трансформаторов. Исследование пяти рассмотренных подстанций выявило, что из десяти трансформаторов только один работает в режиме перегрузки, что является причиной снижения напряжения.

На рисунке 9 представлен анализ падения напряжения по фидерам Зарбдорской подстанции Жиззахской области - Юксалиш, Хокимият, Окбулок, Нихол, Насилчилик и Донхона, а также по большинству фидеров 10 кВ шин Бахмальской подстанции.

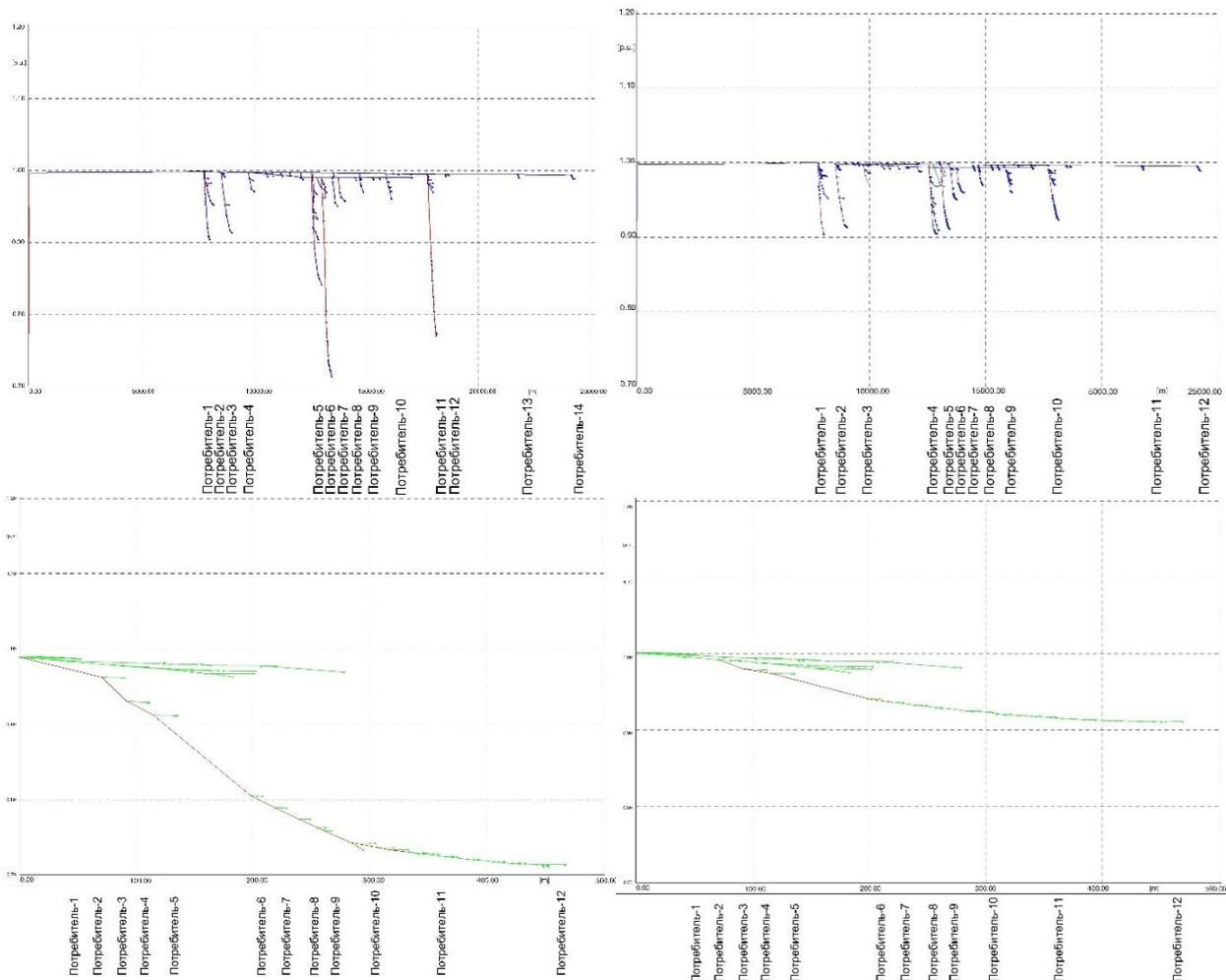


Рисунок 9. Изменение падения напряжения в распределительной электрической сети при замене проводников (на примере Жиззаха и Ташкента)

Падение напряжения в распределительной сети, в которой имеются нагрузки и распределённые источники генерации (рис. 10), определяется следующим образом:

Влияние распределённой генерации на напряжение сети определяется следующим образом:

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \frac{R_{Tarmoq}(P_{yuklama} - P_{TG}) + X_{Tarmoq}(Q_{yuklama} - (\pm Q_{TG}))}{U_2} \quad (23)$$

где P_{TG} активная мощность, передаваемая распределённым источником генерации, Q_{TG} реактивная мощность, передаваемая или потребляемая распределённым источником генерации.

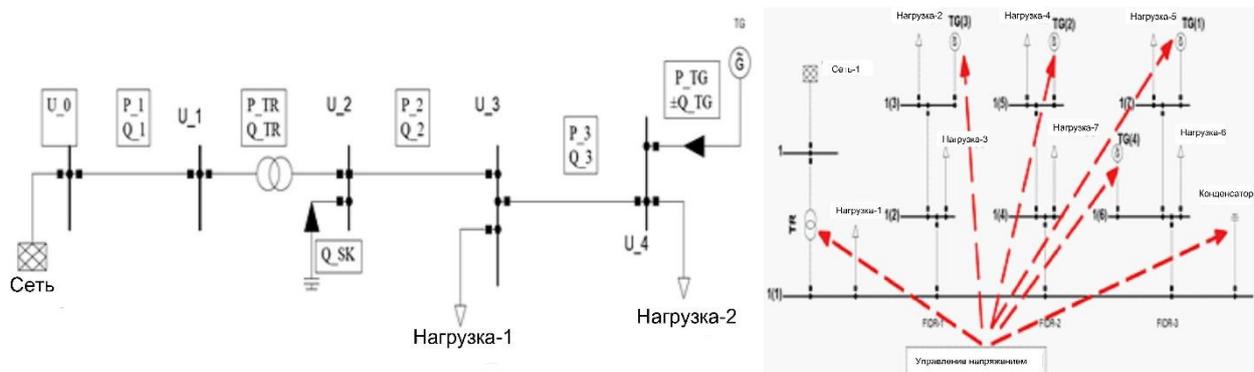


Рисунок 10. Влияние распределённой генерации на контроль напряжения

$$U_{2.1} - U_{2.2} = \frac{R_{Tarmoq}(P_{yuklama.2} - P_{TG}) + X_{Tarmoq}(Q_{yuklama.2} - (\pm Q_{TG}))}{U_{2.2}} - \frac{R_{Tarmoq}(P_{yuklama.1} - P_{TG}) + X_{Tarmoq}(Q_{yuklama.1} - (\pm Q_{TG}))}{U_{2.1}} \quad (24)$$

Время реакции системы возбуждения распределённой генерации td_{TG} значительно меньше, чем время срабатывания конденсаторных установок $td_{СК}$. В то же время, при нагрузке трансформатора, контроль напряжения занимает ещё меньшее время $td_{ТР}$. Их взаимосвязь выражается следующим образом:

$$td_{TG} < td_{СК} < td_{ТР} \quad (25)$$

Контроль напряжения с участием распределённых источников генерации, а также контроль напряжения под нагрузкой трансформаторов и с помощью конденсаторных установок осуществляется следующим образом:

$$YOKR_{n+1} = \begin{cases} YOKR_n + 1 & \text{если } U_{1,n} > U_{KO} \\ YOKR_n & \text{если } U_{KP} \leq U_{1,n} \leq U_{KO} \\ YOKR_n - 1 & \text{если } U_{1,n} < U_{KP} \end{cases} \quad (26)$$

$$SKS_{n+1} = \begin{cases} \text{ПОДКЛЮЧЕН} & \text{если } SKS_n = \text{ОТКЛЮЧЕН} \quad Q_{TR,n} < Q_{ON} \\ SKS_n & \text{если } Q_{ON} \leq Q_{TR,n} \leq Q_{OFF} \\ \text{ОТКЛЮЧЕН} & \text{если } SKS_n = \text{ПОДКЛЮЧЕН} \quad Q_{TR,n} > Q_{OFF} \end{cases} \quad (27)$$

$$TG_{n+1} = \begin{cases} \text{ПОДКЛЮЧЕН} & \text{если } TG_n = \text{ОТКЛЮЧЕН} \quad U_{TG,n} < U_{ON} \\ TG_n & \text{если } U_{ON} \leq U_{TG,n} \leq U_{OFF} \\ \text{ОТКЛЮЧЕН} & \text{если } TG_n = \text{ПОДКЛЮЧЕН} \quad U_{TG,n} > U_{OFF} \end{cases} \quad (28)$$

где $YOKR_n$ – степень регулирования напряжения под нагрузкой трансформатора в момент времени n , U_{KP} – минимальное значение напряжения $YOKR$, U_{KO} – максимальное значение напряжения $YOKR$, TG_n – состояние источника распределенной генерации на фидере в момент времени n , SKS_n – состояние конденсаторной установки на подстанции в момент времени n , U_{ON} – напряжение на фидере после подключения конденсаторов, U_{OFF} – напряжение на фидере после отключения конденсаторов, Q_{ON} – реактивная мощность, поступающая от конденсаторной установки при ее включении, Q_{OFF} – реактивная мощность, потребляемая

конденсаторной установкой при ее выключении. Трансформаторы и конденсаторные установки имеют ограниченные возможности регулирования напряжения. Однако использование распределённых источников генерации позволяет расширить эти возможности следующим образом:

$$Q_{TG,k}|min \leq Q_{TG,k,t} \leq Q_{TG,k}|max \quad (29)$$

где $Q_{TG,k,t}$ – реактивная мощность, передаваемая k -м распределённым источником генерации в момент времени t , $Q_{TG,k}|min$ – минимальная передаваемая мощность k -го распределённого источника генерации, $Q_{TG,k}|max$ – максимальная передаваемая мощность k -го распределённого источника генерации.

На рисунке 11 представлены реакции инвертора SG1100UD-20 на изменения напряжения и реактивной мощности. Первый график демонстрирует динамику изменения напряжения. Через 2 секунды напряжение снижается до 0,96 о.е., а через 8 секунд увеличивается до 1,06 о.е. Это показывает способность инвертора реагировать на колебания напряжения. Второй график показывает изменение реактивной мощности. Через 4 секунды реактивная мощность резко возрастает, достигая значения 0,1 о.е., после чего к 8 секунде снижается до отрицательных значений и затем снова восстанавливается. Третий график демонстрирует снижение реактивной мощности с 0,2 МВар до отрицательных значений и впоследствии восстанавливается. На четвёртом графике значение напряжения по оси q остаётся практически постоянным на уровне 1 о.е., в то время эталонное значение тока по оси q сначала снижается до отрицательных значений, а затем восстанавливается.

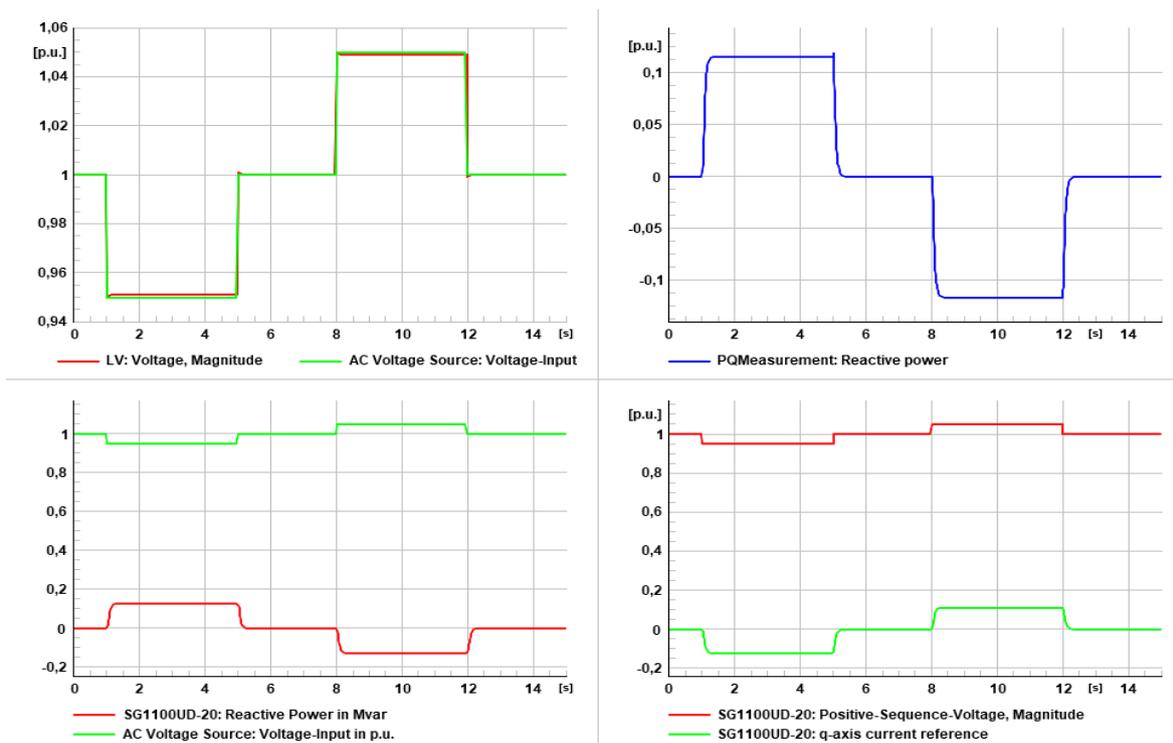


Рисунок 11. Влияние источников распределённой генерации на контроль напряжения

Четвёртая глава «Совершенствование динамических моделей распределённых источников генерации на основе параметров сети», посвящена моделированию режимов работы и систем управления солнечными фотоэлектрическими станциями, системами хранения энергии, ветроустановками и дизельными генераторами.

Предложенные значения для центра управления представлены на рисунке 12. Для моделирования системы управления был использован метод градиентного спуска (Gradient Descent) с учетом следующих факторов. На нём показан экран конфигурации модели DSL (Dynamic Simulation Language) для блока "Controller" в программном обеспечении, используемом для симуляции системы управления мощностью. Для реализации PI -регулирования (пропорционально-интегрального управления) в модель были введены следующие параметры:

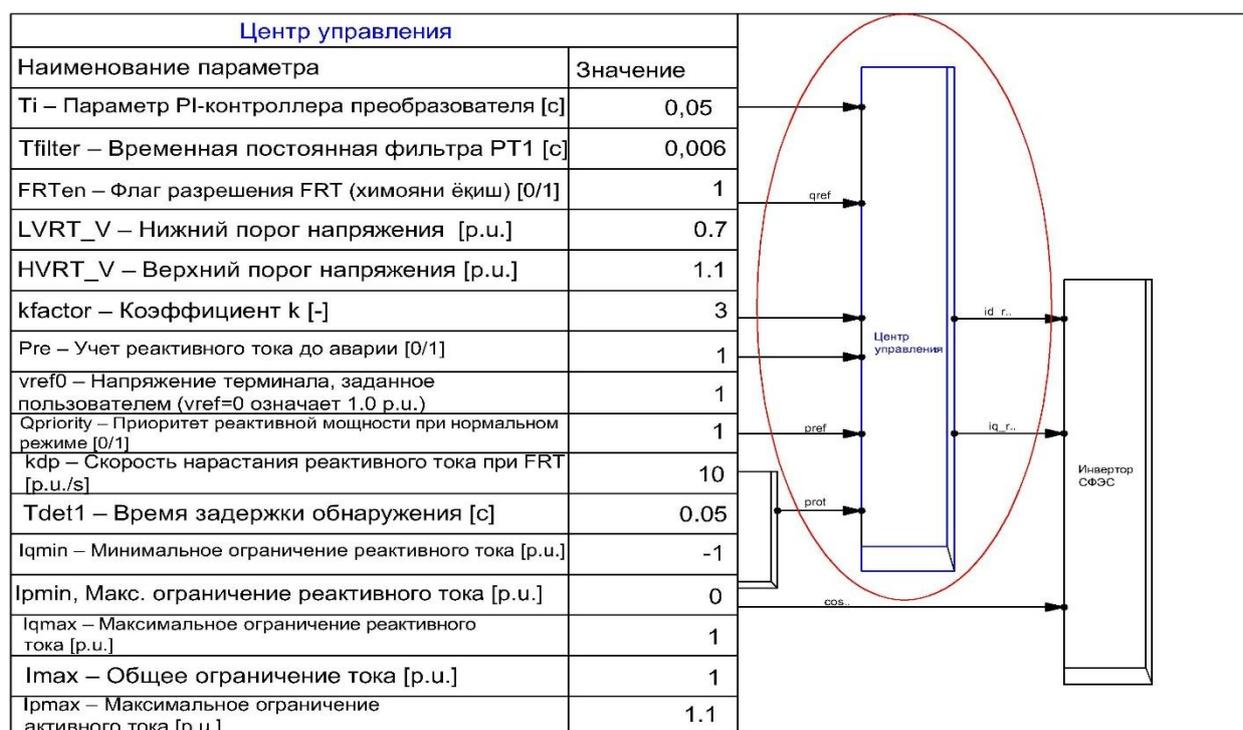


Рисунок 12. Базовые данные и информация о системе управления инвертора солнечной фотоэлектрической станции

Постоянная времени интегрирования для PI -управления (пропорционально-интегрального) конвертером T_i составляет 0,05 секунды. Постоянная времени фильтрации T_{filter} , используемая в системе для сглаживания сигналов, равна 0,006 секунды. Знак FRT_{en} , который может принимать значение 0 или 1, активирует переходную функцию; в данном случае установлен в состояние 1 (активирован). Величина $LVRT_V$, характеризующая адаптацию системы к низкому напряжению, составляет 0,7 о.е. Значение $HVRT_V$, отражающее адаптацию к высокому напряжению, равно 1,1 о.е. Коэффициент $kfactor$ являющийся постоянной величиной, используемой в управлении, установлен равным 3. Знак Pre , указывающий на учет или игнорирование реактивного тока до возникновения аварии,

установлен в состояние 1 (активирован). Опорное напряжение узла vref0 составляет 1,0 о.е. Параметр Qpriority, указывающий на приоритет реактивной мощности в нормальных условиях, установлен равным 1. Коэффициент kdr, характеризующий скорость нарастания активного тока после аварии, составляет 10 о.е. секунду. Постоянная времени шага системы Tdelet равна 0,05 секунды. Минимальное ограничение реактивного тока Iqmin составляет -1 о.е. Минимальное ограничение активного тока Ipmn равно 0 о.е. Максимальное ограничение реактивного тока Iqmax составляет 1 о.е. Абсолютное максимально допустимое значение тока Imax равно 1,1 о.е. Максимальное ограничение активного тока Ipmx составляет 1,1 о.е.

Эти параметры были использованы для определения режима работы симулируемых преобразователей и инверторов во время динамических изменений (например, при авариях или в нормальных условиях). Было установлено, как система реагирует на изменения напряжения, аварийные ситуации и ограничения по току.

Таблица 4

Предлагаемые значения системы защиты инвертора

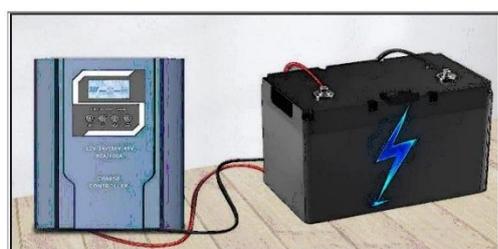
PRTen знак включения защиты [0/1]	1,
Tfilter, постоянная времени фильтра PT1 [с]	0,01
UV1 уровень пониженного напряжения 1-й ступени [о.е.]	0,9
t	1800000
UV2 уровень пониженного напряжения 2-й ступени [о.е.]	0
t	3000,
UV3 уровень пониженного напряжения 3-й ступени [о.е.]	0,15
t	600,
OV1 уровень повышенного напряжения 1-й ступени [о.е.]	1,1
t	250,
OV2 уровень повышенного напряжения 2-й ступени [о.е.]	1,15
t	250,
UF1 уровень пониженной частоты 1-й ступени [о.е.]	49,5
t	1800000
UF2 уровень пониженной частоты 2-й ступени [о.е.]	48,
t	900000,
UF3 уровень пониженной частоты 3-й ступени [о.е.]	47,5
t	200,
UF4 уровень пониженной частоты 4-й ступени [о.е.]	47,
t	100,
OF1 уровень повышенной частоты 1-й ступени [о.е.]	50,5
t	1800000
OF2 уровень повышенной частоты 2-й ступени [о.е.]	51,
t	200,
OF3 уровень повышенной частоты 3-й ступени [о.е.]	52,
t	100,
OF4 уровень повышенной частоты 4-й ступени [о.е.]	52,
t	100,

В таблице 4 представлены предлагаемые значения системы защиты инвертора. Постоянная времени фильтра PT1 (Tfilter = 0,01 с) использовалась

для фильтрации сигналов. Для изменения напряжения установлены три уровня пониженного напряжения (UV1, UV2, UV3) и соответствующие времена отключения (1 800 000 мс, 3000 мс, 600 мс), что необходимо для запуска механизмов отключения питания при низком напряжении. Также определены два уровня повышенного напряжения (OV1 и OV2) и их времена отключения (250 мс).

Изменения частоты охватываются четырьмя уровнями пониженной частоты (UF1–UF4) и четырьмя уровнями повышенной частоты (OF1–OF4), для каждого из которых указаны соответствующие времена отключения. Эти параметры определяют продолжительность, в течение какого времени система должна отключать подачу мощности при возникновении пониженной или повышенной частоты. Например, для уровня пониженной частоты UF1 (49,5 Гц) установлено время отключения мощности 1 800 000 мс (300 секунд), что обеспечивает адаптацию системы к длительному состоянию пониженной частоты.

Мощность инвертора, установленного в АСХЭ, переменное напряжение, постоянное напряжение, а также количество параллельно подключенных инверторов вводятся в базовое информационное окно, как показано на рисунке 13. Для моделирования режима работы системы аккумуляторных систем хранения энергии (АСХЭ) с учетом их функционирования в различных условиях был применен усовершенствованный метод квадратичного программирования (Quadratic Programming - QP). Инвертор мощностью 30 кВА, способный работать при напряжении 0,4 кВ, был внесен в базу данных.



Технический параметр	Значение
Ном. мощность (кВА)	30
Ном. DC напряжение	900 В
Ном. AC напряжение	400 В (трёхфазное)
Номинальная частота	50 Гц
КПД работы	>95%
Рабочая температура	от -10 °С до +50 °С
Частота изменения (PWM)	2–15 Гц

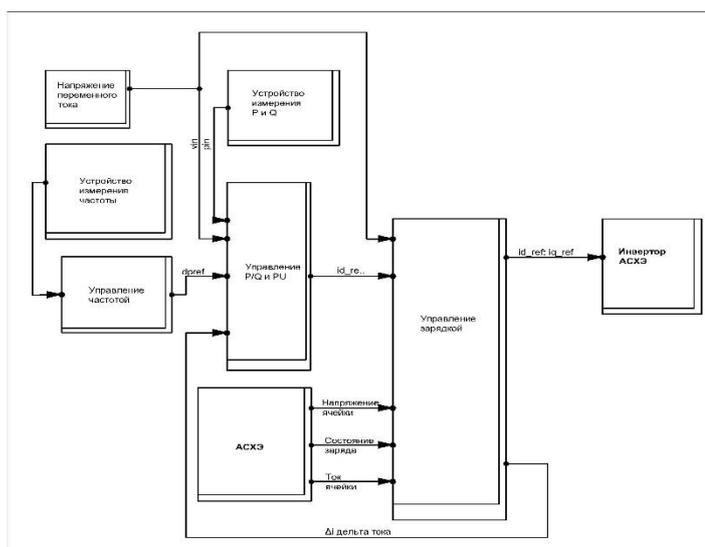


Рисунок 13. Базовые данные и информация о системе управления конвертора АСХЭ

Изначально в начальных блоках выполнялось измерение переменного тока и частоты, после чего данные передавались в блок управления частотой и блок измерения P и Q (активной и реактивной мощности). Блок управления частотой контролировал мощность системы на основе изменений частоты. В свою очередь, блок контроля PQ управлял соотношением активной и реактивной мощности, обеспечивая распределение энергии в системе.

Таблица 5

Предлагаемые значения для контроля реактивной мощности инвертора

Tr постоянная времени фильтра, активная составляющая [с]	0,07
Trq постоянная времени фильтра, реактивная составляющая [с]	0,02
K	3
Tir постоянная времени интегрирования– id-PI-контроллера [с]	0.2
АС нейтральная зона для разницы напряжений АС [о.е.]	0.2
Kq коэффициент поддержки напряжения АС для реактивной мощности [о.е.]	2.5
Tiq постоянная времени интегрирования– iq-I-контроллера [с]	1.3
i	-1
i	1
I	-1
i	1

Предлагаемые значения для контроля активной и реактивной мощности (PQ) в PWM-конвертере отражены в таблице 5. Параметры Tr (0,07 с) и Trq (0,02 с) представляют собой постоянные времена фильтров для активной и реактивной составляющих мощности соответственно. Коэффициенты Kp (3 о.е.) и Kq (2,5 о.е.) являются пропорциональными коэффициентами для управления активной и реактивной мощностью. Постоянные времена интегрирования Tir (0,2 с) и Tiq (1,3 с) определяют скорость реакции контроллеров на входные сигналы. Значения id_min, id_max, Iq_min и iq_max задают минимальные и максимальные токи для активной и реактивной составляющих мощности.

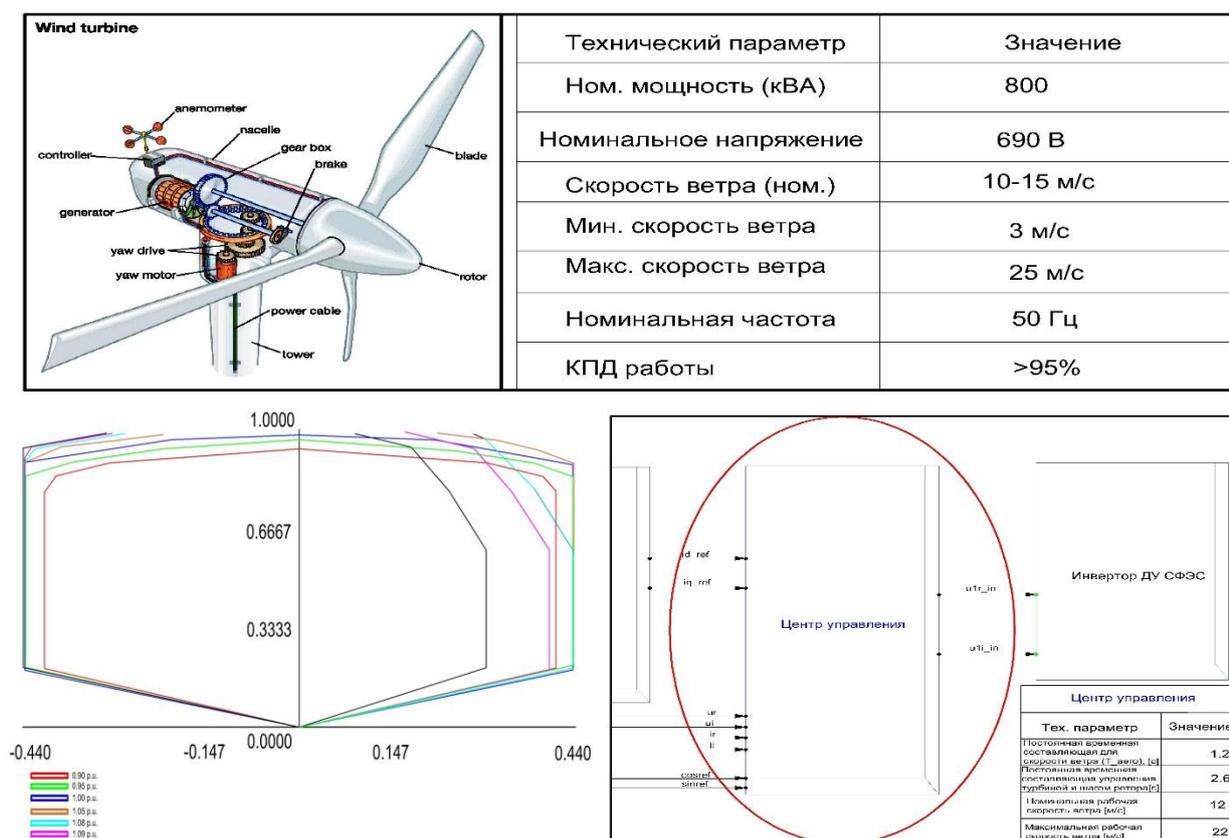


Рисунок 14. Данные ветряной турбины и системы управления

На рисунке 14 представлены базовые данные ветряной турбины, включая номинальную мощность, количество турбин и коэффициент мощности, которые вводятся в информационное окно системы. Турбина мощностью 800 кВА способна работать с коэффициентом мощности 0,98, что также занесено в базу данных. В этом же окне размещена модель управления ветряной турбиной. T_{aero} (1,2 с) – постоянная времени для сглаживания скорости ветра, определяющая, как система адаптируется к изменениям скорости ветра.

T_{ctrl} (2,6 с) – постоянная времени для управления турбиной и регулирования угла выработки мощности. v_{nom} (12 м/с) – номинальная рабочая скорость ветра, при которой турбина работает в оптимальном режиме генерации энергии. v_{max} (22 м/с) – максимальная рабочая скорость ветра, при достижении которой турбина может остановиться или перейти в режим защиты для предотвращения повреждений.

На пятой главе **"Решения для управления сетями с низким напряжением на основе распределенных источников генерации и их технико-экономическая эффективность"** выполнены исследования по усовершенствованию методов децентрализованного управления в электрических сетях и системах, интеграция распределенных источников генерации в децентрализованную систему управления балансом активной мощности, разработка рекомендаций по стратегическому управлению формированию современных электрических сетей, и оценка технико-экономической эффективности формирования современных электрических сетей с использованием распределенных источников генерации.

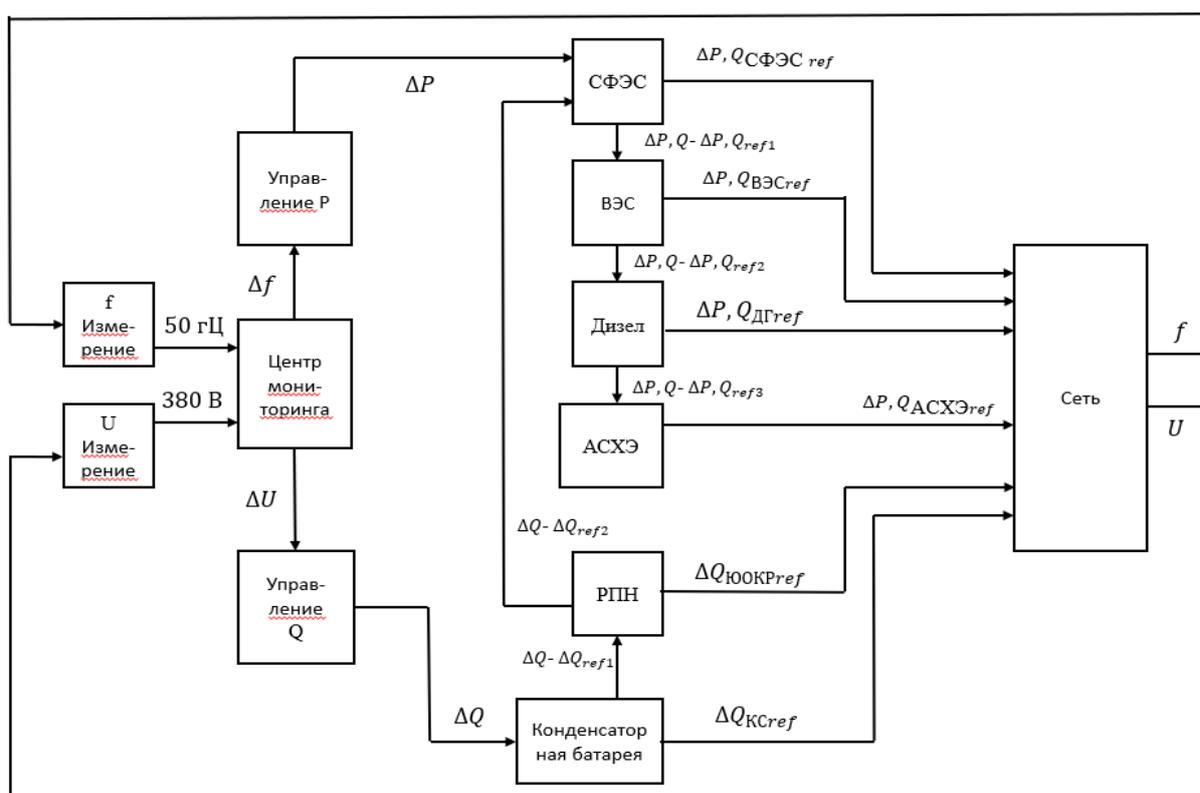


Рисунок 15. Система управления, разработанная для распределенных источников генерации

Рисунок 15 представляет собой систему управления, предназначенную для распределенных источников генерации. Данная система обеспечивает контроль активной и реактивной мощности, а также их оптимальное распределение в электрическую сеть. В системе через блоки "f измерение" и "U измерение" были измерены и проконтролированы частота сети (50 Гц) и напряжение (380 В). Эти показатели передаются в Центр мониторинга, где анализируются изменения частоты (Δf) и напряжения (ΔU). После анализа полученные данные отправляются в блоки управления мощностью для принятия решений по регулированию параметров системы.

Управление активной мощностью осуществлялось через блок "P управление", который способствует поддержанию баланса мощности в сети и регулированию активной мощности (ΔP). Кроме того, для управления реактивной мощностью был предусмотрен блок "Q управление", который корректирует и оптимизирует передаваемую в сеть реактивную мощность (ΔQ). Фотоэлектрическая солнечная станция (ФЭС) обеспечивает возможность передачи энергии, полученной от солнца, в сеть в виде активной мощности (ΔP) и реактивной мощности ($\Delta P, Q_{\text{ФЭСref}}$). В свою очередь, ветроэлектростанция (ВЭС) также направляет энергию, выработанную за счет ветра, в сеть в виде активной и реактивной мощности ($\Delta P, Q_{\text{ВЭСref}}$), внося свой вклад в работу системы управления.

Дизель-генераторы обеспечивают подачу активной (ΔP) и реактивной мощности ($\Delta P, Q_{\text{ДГref}}$) в сеть. Система аккумуляторных батарей для АСХЭ обладает возможностью накопления и повторной передачи энергии, управляя активной и реактивной мощностью ($\Delta P, Q_{\text{АСХЭref}}$). Устройство регулирования напряжения под нагрузкой трансформатора (ЮОКР) контролирует уровень напряжения на трансформаторе и обеспечивает передачу соответствующей реактивной мощности ($\Delta Q_{\text{ЮОКРref}}$) в сеть, что способствует поддержанию стабильности напряжения в сети. Кроме того, за счет блока конденсаторной батареи в сеть передается дополнительная реактивная мощность ($\Delta Q_{\text{КCref}}$), что помогает улучшить баланс мощности и повысить эффективность работы системы. На рисунке 16 показано участие распределенных источников генерации в трехуровневой системе управления мощностью.

Для обеспечения баланса между генерацией и нагрузкой в системе предложено следующее уравнение:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \alpha_{\text{КФЭС}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{\text{ШТ}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{\text{ДГ}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_{\text{ЭСАБТ}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{\text{КФЭС}} \\ P_{\text{ШТ}} \\ P_{\text{ДГ}} \\ P_{\text{ЭСАБТ}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\text{юклама}} \\ P_{\text{КФЭС}}^{\text{макс}} \\ P_{\text{ШТ}}^{\text{макс}} \\ P_{\text{ДГ}}^{\text{макс}} \\ P_{\text{ЭСАБТ}}^{\text{макс}} \end{bmatrix} \quad (30)$$

где $\alpha_{\text{КФЭС}}$, $\alpha_{\text{ШТ}}$, $\alpha_{\text{ДГ}}$, $\alpha_{\text{ЭСАБТ}}$ - коэффициенты реакции распределённых источников генерации, $P_{\text{КФЭС}}$, $P_{\text{ШТ}}$, $P_{\text{ДГ}}$, $P_{\text{ЭСАБТ}}$ - активная мощность, вырабатываемая соответствующими источниками генерации, $P_{\text{юклама}}$ - общая

нагрузка в сети, $P_{\text{КФЭС}}^{\text{макс}}$, $P_{\text{ШТ}}^{\text{макс}}$, $P_{\text{ДГ}}^{\text{макс}}$, $P_{\text{ЭСАБТ}}^{\text{макс}}$ - максимальная вырабатываемая мощность соответствующих источников.

Для оптимального распределения реактивной мощности используется следующая модель:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ X_{\text{КФЭС}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X_{\text{ШТ}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{\text{ДГ}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_{\text{ЭСАБТ}} & X_{\text{КОМП}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{\text{Тармок}} \\ Q_{\text{КФЭС}} \\ Q_{\text{ШТ}} \\ Q_{\text{ДГ}} \\ Q_{\text{ЭСАБТ}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{\text{Юклама}} \\ Q_{\text{КФЭС}}^{\text{макс}} \\ Q_{\text{ШТ}}^{\text{макс}} \\ Q_{\text{ДГ}}^{\text{макс}} \\ Q_{\text{ЭСАБТ}}^{\text{макс}} \end{bmatrix} \quad (31)$$

где $Q_{\text{Тармок}}$ - реактивная мощность, получаемая из центральной сети, $Q_{\text{КФЭС}}$, $Q_{\text{ШТ}}$, $Q_{\text{ДГ}}$, $Q_{\text{ЭСАБТ}}$ - реактивная мощность, обеспечиваемая СФЭС, ветроэнергетической установкой, дизельным генератором и АСХЭ, $X_{\text{КФЭС}}$, $X_{\text{ШТ}}$, $X_{\text{ДГ}}$, $X_{\text{ЭСАБТ}}$ - характеристики передачи реактивной мощности распределённых источников генерации, $X_{\text{КОМП}}$ - дополнительная компенсация мощности за счёт компенсаторов реактивной мощности (SVC, STATCOM), $Q_{\text{Юклама}}$ - требуемая реактивная мощность, $Q_{\text{КФЭС}}^{\text{макс}}$, $Q_{\text{ШТ}}^{\text{макс}}$, $Q_{\text{ДГ}}^{\text{макс}}$, $Q_{\text{ЭСАБТ}}^{\text{макс}}$ - предельные значения передаваемой реактивной мощности для каждого распределённого источника генерации.

Благодаря данной системе управления активная и реактивная мощности оптимизируются, что позволяет повысить стабильность и эффективность работы электрической сети за счёт участия распределённых источников генерации.

На рисунке 16 описана роль распределённой генерации в трёхуровневой системе управления мощностью.

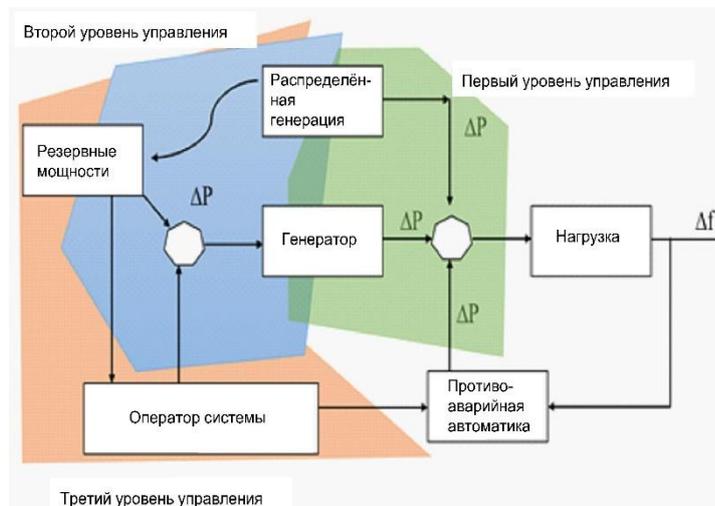


Рисунок 16. Управление частотой с помощью источников распределенной генерации

Эта диаграмма отображает трехуровневую систему управления в электрической сети. Первый уровень управления – на этом этапе осуществлялось распределение мощности (ΔP) между генератором и нагрузкой. В результате изменения нагрузки наблюдались колебания частоты (Δf), на которые генератор реагирует соответствующей корректировкой.

Второй уровень управления – на этом этапе в процессе участвуют резервные мощности и распределенная генерация. Оператор системы контролировал распределение мощности в зависимости от изменений частоты и согласовывал мощность генераторов с резервными мощностями.

При анализе управления частотой обычно использовалась

эквивалентная схема электроэнергетической системы. На основе этого был определен эквивалентный коэффициент инерции системы M_{EID} следующим образом:

$$M_{EID} = \frac{\sum_{i=1}^{SGS} M_i S_{SGQ,i}}{S_{SGQ}} \quad (32)$$

где M_i – коэффициент инерции i -го генератора, $S_{SGQ,i}$ – i полная мощность i -го синхронного генератора, GS – количество синхронных генераторов, подключенных к электроэнергетической системе, S_{SGQ} – общая полная мощность электроэнергетической системы. С учетом этого колебания частоты в электроэнергетической системе могут быть представлены в следующем виде:

$$\Delta f = \frac{1}{2 * M_{EID} + D} * (\Delta P_G - \Delta P_{YUK}) \quad (33)$$

где M_{EID} – эквивалентный коэффициент инерции системы, D – фактор демпфирования (амортизации) [Вт/Гц], GS – количество синхронных генераторов, подключенных к электроэнергетической системе, S_{SGQ} – общая полная мощность электроэнергетической системы. Данное выражение также может быть представлено в следующем виде:

$$\Delta f = \frac{K_p}{T_p * s + 1} * (\Delta P_G - \Delta P_{YUK}) \quad (34)$$

где $K_p = \frac{1}{D}$ [Гц/Вт] и $T_p = 2 * \frac{M_{EID}}{D}$ [Вт⁻¹]. Для анализа устойчивости частоты параметры K_p , D , M_{EID} , традиционно предоставляются энергетическими станциями на протяжении многих лет в виде постоянных данных. Однако в различных электроэнергетических системах эти показатели могут существенно различаться.

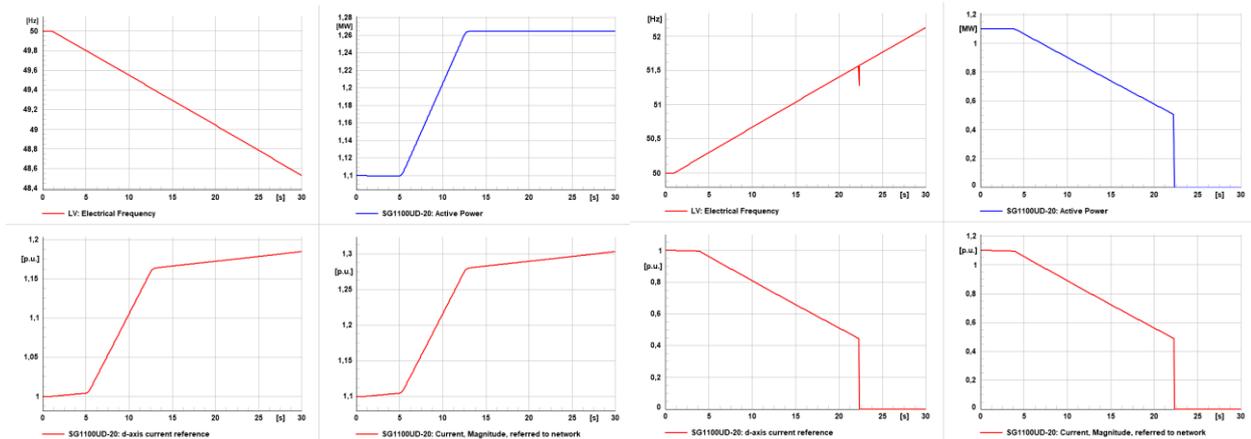


Рисунок 17. Зависимость выходных параметров инвертора от частоты

На рисунке 17 представлены реакции инвертора SG1100UD-20 на изменения частоты, активной мощности и тока. На первом графике видно, с течением времени частота снижается с 50 Гц до 48,4 Гц за 30 секунд. При этом на 10-й секунде активная мощность увеличивается с 1,1 МВт до 1,26 МВт и остается стабильной на этом уровне вплоть до 30-й секунды. Справочное значение тока по оси d (d-axis current reference) составляет 1 о.е. до 10-й секунды, затем возрастает до 1,18 о.е. и сохраняется на этом уровне до конца

временного интервала. Значение тока также увеличивается после 10-й секунды до 1,3 о.е. и остается неизменным до 30-й секунды. На втором графике показано, что в течение 30 секунд частота увеличивается с 50 Гц до 52 Гц. При этом активная мощность начинает снижаться после 10-й секунды и достигает 0 МВт к 20-й секунде, что демонстрирует постепенное отключение генерации. Составляющая тока по оси d (d-axis current) также уменьшается после 10-й секунды, достигая значения 0 о.е. к 20-й секунде. Значение силы тока снижается после 10-й секунды и достигает 0,3 о.е. к 20-й секунде.

В северо-западной части электрических сетей Узбекистана, где установлены трансформаторы номинальной мощностью 6300 и 10000 кВА, а также подключенные к ним потребители на линиях 10 кВ, были изучены возможности использования распределенных источников генерации. По результатам анализа были внесены необходимые предложения, и заново рассмотрены потери мощности. Анализ проводился в два этапа. На первом этапе были рассчитаны потери мощности в реальной распределительной сети. На втором этапе были выполнены расчеты потерь мощности с учетом интеграции распределенных источников генерации.

В результате исследования проблемы, изложенные на странице 11, получили следующие решения:

- режим работы распределенных источников генерации был налажен в соответствии с потребностями потребителей, что обеспечило их эффективное функционирование.

- в случаях наблюдения падения напряжения в распределительных сетях распределенные источники генерации были настроены на работу в режиме компенсации снижения напряжения.

- установка распределенных источников генерации в распределительных сетях, где отсутствует высокий спрос на электроэнергию, позволила улучшить показатели качества электрической энергии.

- предложение использования трехфазных распределенных источников генерации позволило предотвратить усиление межфазной асимметрии.

- выбрана адаптивная функция выходных параметров распределенных источников генерации относительно параметров распределительной электросети, что позволило избежать возникновения компенсирующих сверхтоков.

В фидеры, подключенные к 10 кВ обмотке трансформатора, было предложено интегрировать распределенные источники генерации общей мощностью 3200 кВт. В результате загрузка трансформаторов в среднем снизилась на 35%, а потери мощности уменьшились на 3%.

Годовое количество электроэнергии, вырабатываемой с помощью распределенных источников генерации, было определено следующим образом.

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{сфэс}} &= P_{\text{день}} * \frac{8760 \text{ час}}{11.7} \approx \frac{P_{\text{max}}}{2} * 750 \text{ час} \approx \frac{3200 \text{ кВт}}{2} * 750 \text{ час} \\ &\approx 1199000 \text{ кВт} * \text{ч} \end{aligned}$$

С учетом снижения потерь электроэнергии в течение года общий объем

электроэнергии, выработанной с помощью распределенных источников генерации, составил $275\,800 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 1\,199\,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 1\,474\,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

При расчете годовой выручки на основе текущей (по состоянию на 06.01.2023) стоимости электроэнергии, которая согласно официальному источнику (<https://www.het.uz/oz/lists/view/1919> от 07.11.2023 составляет 295 сум за кВт*ч) получен следующий результат.

$$D = (275800 \text{ кВт} \cdot \text{ч} + 1199000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}) \cdot 295 \text{ сум} / \text{кВт} \cdot \text{ч} \\ = 435 \text{ млн сум/год}$$

В подстанции Хазорасп установлены трансформаторы мощностью 6300 и 10000 кВА, а также предложено интегрировать в распределительные сети распределенные источники генерации общей мощностью 3200 кВт. Расчеты показали, что это позволит получать годовую прибыль в размере 435 млн сум.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов диссертационной работы (DSc) по техническим наукам на тему: «Проблемы и решения формирования современных электрических сетей на основе источников распределенной генерации» представлено следующее заключение:

1. Проведен анализ высоковольтных и низковольтных сетей системы электроэнергетики Узбекистана, выявлены проблемы интеграции малых электростанций в сеть. На основе анализа мирового опыта рассмотрены современные методы формирования электрических сетей. В результате предложены эффективные системы интеграции распределенных генерирующих мощностей (РГМ), адаптированных для условий нашей страны, а также разработаны предложения по развитию инфраструктуры.

2. Проанализированы факторы, влияющие на выходную мощность малых солнечных фотоэлектрических и ветровых станций, а также смоделированы режимы их автономной интеграции в низковольтные электрические сети. Проведен анализ участия систем накопления энергии (аккумуляторных батарей) в балансе мощности, оценены показатели качества электроэнергии. В результате усовершенствована общая модель рабочих режимов интеграции распределенных источников генерации, что позволило определить экономически эффективные потоки мощности.

3. Выявлены регионы в областях страны, где наблюдаются перегрузки и снижения напряжения в системе электроснабжения и проанализированы их основные причины. Благодаря оптимизации размещения и установленной мощности распределенных источников генерации, а также совершенствованию методов автоматического регулирования напряжения на основе этих источников, удалось добиться снижения перегрузок и падений напряжения.

4. Проведен анализ динамических режимов работы распределенных источников генерации, и на основе существующих методов усовершенствована система управления. В результате продемонстрирована эффективность интеграции распределенных источников генерации на основе

параметров региональных электрических сетей.

5. Проанализированы методы управления на основе совершенствования децентрализованной системы управления. На этом основании научно обоснована возможность интеграции децентрализованной системы управления балансом активной мощности с распределенными источниками генерации. В результате предложена новая система управления для распределенных источников генерации. Разработаны основы стратегического управления для формирования современной энергетической системы, а также выработаны рекомендации по увеличению доли распределенной генерации.

6. В результате внедрения метода «Определение точек подключения и установленной мощности распределенных источников генерации» для низковольтных электрических сетей подстанции Хазорасп Хорезмской области, реализованного АО «НЭС Узбекистан» предложены распределенные источники генерации общей мощностью 3200 кВт. Это позволило достичь годового экономического эффекта в размере 435 млн сумов.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2021.T.143.01
ON THE SCIENTIFIC DEGREE GUIDE AT THE
INSTITUTE OF ENERGY PROBLEMS**

**INSTITUTE OF ENERGY PROBLEMS OF THE ACADEMY OF
SCIENCES OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN**

TURAEV AKRAMJON IKROMJONOVICH

**PROBLEMS AND SOLUTIONS IN THE DEVELOPMENT OF MODERN
POWER SYSTEMS BASED ON DISTRIBUTED GENERATION SOURCES**

05.05.01-Energy systems and complexes

**ABSTRACT OF DOCTOR OF SCIENCE (DSc) DISSERTATION IN
TECHNICAL SCIENCES**

Tashkent – 2025

The theme of doctor of philosophy (DSc) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Ministry of Higher education, science and innovations of the Republic of Uzbekistan under number B2023.1.DSc/T592.

Dissertation has been prepared at the Institute of Energy Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific council (ww.energetika.uz) and on Information-educational portal «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Scientific consultant:

Muratov Khakim Makhmudovich
Doctor of technical sciences, Professor

Official opponents:

Khamidov Shukhrat Vakhidovich
doctor of technical sciences, professor

Taslimov Abdurakhim Dekhkanovich
doctor of technical sciences, professor

Sadullayev Nasullo Nematovich
Doctor of technical sciences, Professor

Lead organization:

“O‘zenergoinjining” Joint-Stock

The defense will take 21» november 2025 y. in 10⁰⁰ at the meeting of Scientific Council DSc 02/30.12.2021.T.143.01 at the Institute of Energy Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan. (Address: 40, Durmon yuli str., Tashkent, 100125, Uzbekistan. Phone number: (+99855) 520-01-52, e-mail: energetika_in@umail.uz).

The dissertation can be found at the Information Resource Centre of the Institute of Energy Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (Registration number 6). (Address: 40, Durmon yuli str., Tashkent, 100125, Uzbekistan. Phone number: (+99855) 520-01-52).

Abstract of the dissertation was distributed on «07» november 2025 year.

(mailing report № «6» on «06» november 2025 year).



Kh.M. Muratov
Chairman of the Scientific Council for the awarding scientific degrees, Doctor of technical sciences, Professor

J. N. Tolipov
Scientific secretary of the scientific council for awarding scientific degrees, Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Senior researcher

O.Kh. Ishnazarov
Scientific Secretary of the Scientific Council for the Award of Scientists degrees, Doctor of technical sciences, Professor

INTRODUCTION (annotation of doctoral (DSc) dissertation)

The purpose of the study. The aim of the research is to develop optimized methods for integrating distributed generation sources into electrical grids, enhance intelligent control systems, and improve the efficiency of active and reactive power management in modern low-voltage distribution networks. The ultimate goal is to ensure grid stability, reduce voltage fluctuations, mitigate frequency imbalances, and increase the overall reliability and economic efficiency of power systems under high penetration of variable renewable energy sources.

Research objectives:

Analyze existing methods for forming modern electrical grids based on distributed generation and identify key technical and operational challenges;

Model the integrated operating mode of distributed generation sources (solar PV, wind turbines, diesel generators, and energy storage systems) within low-voltage distribution networks;

Improve digital dynamic models of distributed generation units tailored to the parameters of specific distribution grids using scientifically grounded solutions;

Enhance voltage regulation systems in low-voltage networks by leveraging reactive power capabilities of distributed generation sources;

Improve network operating modes through integration of distributed generation into decentralized active power balance control systems at primary and secondary levels.

The object of the research comprises low-voltage distribution networks equipped with integrated distributed generation sources – solar photovoltaic stations (SPS), wind turbines (WT), diesel generators (DG), and energy storage systems (ESS) – considering their technical characteristics, operational parameters, and interconnections.

The subject of the research is Integration mechanisms of distributed generation sources into electrical distribution grids; control methodologies for managing active and reactive power flows; parameters influencing the stable and efficient operation of networks with high penetration of distributed generation

The methodological basis of the dissertation work includes mathematical modeling and simulation using DIgSILENT PowerFactory software, optimization techniques (including particle swarm optimization and multi-agent system algorithms), experimental and field data analysis from real-world distribution networks in Uzbekistan, digital modeling of transient processes and steady-state conditions, application of adaptive control principles and smart grid technologies.

The scientific novelty of the research is as follows:

A mathematical and digital model of the combined operation mode of distributed generation sources for low-voltage power grids has been developed based on network parameters;

A method for eliminating overloads in the system based on the calculation of the optimal installation of distributed generation sources in low-voltage power grids and their installed capacity has been developed;

A digital model of the general operation mode based on the effective integration of distributed generation sources, operating in the Multi-Agent Systems system, taking into account the network parameters at the connection point, has been developed;

An intelligent system for controlling the power of low-voltage power grids through distributed generation sources based on reactive power has been improved based on the reactive power capability of the source;

A method for integrating distributed generation sources into the first and second-stage decentralized active power balance control system based on the active power capability of the source has been improved.

Implementation of research results. Based on the scientific results obtained on the formation of modern power networks based on distributed generation sources:

In determining the areas where the installation of distributed generation sources is necessary, it was carried out in "Bakhmal District Power Supply Company" PS of Jizzakh Regional Electric Networks. (Reference and document of JSC "Regional Electric Networks" dated November 23, 2023). A method for determining optimal connection points for distributed generation was implemented. As a result, areas requiring installation of 1600 kW of distributed generation were identified along the 10 kV side of "Mugol" substation. This led to a 16% reduction in loading of 4000 kVA transformers and a 6% decrease in transmission losses.

The installation of distributed generation sources with a total capacity of 1050 kW is proposed at the "Megatekstil" PS of Namangan region (Reference No. 35-25/4056 of November 10, 2023 of "Regional Power Networks" JSC "Namangan Regional Power Networks Enterprise" and "RODMAN" JSC dated 2023 Act of November 10) As a result, the installation of distributed generation sources for consumers creates an opportunity to reduce regional overloads and 6300 kVA transformer load by 12%, and as a result of the installation of 1050 kW distributed generation sources, there is an opportunity to reduce losses of 10 kV and lower power transmission networks by 7% ;

It was proposed to install distributed generation sources with a total capacity of 550 kW at the Baldir 10 kV substation of Surkhandarya region, where it is necessary to connect distributed generation sources (No. 39-20 of November 16, 2023 of JSC "Regional Power Grids Enterprise of Surkhandarya" with a total capacity of 550 kW). /9285 reference and document). As a result, it is possible to reduce the losses of power transmission networks with a voltage of 35 kV and lower to 6%, to reduce the load of the 2500 kVA transformer to 18%;

By installing distributed generation sources in low-voltage power grids, it is possible to reduce power loss in main power grids (Reference No. 01-02-22/4924 dated December 5, 2023 of the Republic of Uzbekistan "Uzbekistan National Electric Grids" JSC). As a result, the expected annual economic efficiency amounted to 435,000,000 (four hundred thirty-five million) soums.

Alignment of the dissertation with the specialty:

The dissertation research corresponds to the II priority area of science and technology development of the Republic – “Energy, Energy Efficiency, and Renewable Energy Sources”.

Approval of the results of the study. The research results were discussed and approved 4 international and 5 republican scientific and practical conferences.

Publication of research results. A total of 23 scientific papers have been published on the dissertation topic, including 12 scientific articles in scientific publications recommended by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan for publishing the main scientific results of doctoral dissertations, of which 10 were published in republican and 2 in international scientific journals. 2 certificates for computer programs were obtained.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of references and appendices. The volume of the dissertation is 195 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Сагтаров Х.А., Суяров А.О., Тураев А.И., “Носимметрик юклаган тақсимлаш электр тармоқларида филтрларни қўллаш орқали юқори гармоникаларни бартараф этиш”, Энергия ва ресурс тежаш муаммолари илмий – техника журнали. Тошкент ш., 2022 йил, 2-сон, 41–49-б. (05.00.00; № 5)

2. Муратов Х.М., Қаракулов Ш.Ю., Тураев А.И., “Автомобилсозлик саноати корхоналарида электр энергияси истеъмолининг тақсимланган генерация манбаларига бўлган талабини баҳолаш”, Фан ва технология илмий журнали, Бухоро ш., 2023 йил, 4-сон, 3-9-б. (05.00.00; № 24)

3. Yokubjonov R., Turaev A., “Distribution network analysis with small static generator integration”, International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. (India). Vol. 10, Issue 10, October 2023, pp.21124-21128. (05.00.00. № 8)

4. Муратов Х.М., Тураев А.И “Тақсимланган генерация манбаларининг тақсимлаш электр тармоқларидаги кучланиш тушишини бартараф этишдаги аҳамияти”, Фарғона политехника институти илмий-техника журнали, том 27 № 4. Фарғона ш., 2023 йил, 156-162-б. (05.00.00.; №20)

5. Муратов Х.М., Қаракулов Ш.Ю., Тураев А.И., “Машинасозлик корхоналарида тақсимланган нагрузкаларни меъёрлаштириш орқали электр тармоғида ўта юкланишни олдини олиш”, Фан ва технология илмий журнали, Бухоро ш., 2-сон, 2024 йил, 5-10-б. (05.00.00; № 24)

6. Муратов Х.М., Тураев А.И, Махаммадиев Ф.М., “Электр энергияси истеъмолчилари талабини кичик қувватли шамол электр станциялари орқали таъминлаш истиқболлари”, Фан ва технология илмий журнали, Бухоро ш., 2-сон, 2024 йил, 51-57-б. (05.00.00; № 24)

7. Муратов Х.М., Тураев А.И, Махаммадиев Ф.М., “Электр тармоқларининг бугунги ҳолати тақсимланган генерацияларга бўлган талабини баҳолаш”, Фан ва технология илмий журнали, Бухоро ш., 2-сон, 2024 йил, 28-34-б. (05.00.00; № 24)

8. Муратов Х.М., Тураев А.И, Махаммадиев Ф.М., “Замонавий электр тармоқларини шакллантиришда кучланиш бошқарувининг ишончилигини ошириш”, Энергия ва ресурс тежаш муаммолари илмий – техника журнали. Тошкент ш., 2024 йил, № 1-сон, 41–49-б. (05.00.00; № 5)

9. Муратов Х.М., Тураев А.И, Махаммадиев Ф.М., “Электр тармоқларида кучланишни автоматик ростлаш тизимини тақсимланган генерациялар орқали такомиллаштириш”, Фарғона политехника институти илмий-техника журнали, Махсус сон № 8. Фарғона ш., 2024 йил, 64-69-б. (05.00.00.; №20)

10. Муратов Х.М., Тураев А.И, Махаммадиев Ф.М., “Энергия сақловчи аккумулятор батарея ва бошқарув тизимининг иш режимини моделлаштириш орқали тармоқ талабларига мослаштириш”, Фарғона политехника институти

илмий-техника журнали, Махсус сон № 9. Фарғона ш., 2024 йил, 60-67-б. (05.00.00.; №20)

11. Muratov X.M., Turayev A.I., “Consumer demand and usage benefits of electrical energy storage battery systems”, Science and innovation international scientific journal, Seria A, Volume 3, Issue 2, February 2024, pp. 66-71. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10694199>. (01.00.00; №12)

12. Муратов Х.М., Тураев А.И, Тураев А.И, Мурадов Р. Х., “Замонавий электр тармоқларини шакллантиришда мавжуд имкониятлар ва улардан фойдаланиш истиқболлари”, Наманган муҳандислик-қурилиш институти Механика ва технология илмий журнали, № 1(14). 2024 йил, 199–207-б. (05.00.00.; №20).

II бўлим (II часть; part II)

13. Sattarov Kh., Sapayev M., Suyarov A., Turaev A., “Improving efficiency in a distribution network with asymmetric load due to connected solar panels with a phase relationship”, E3S Web of Conferences Volume 401, 04001, July 2023, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340104001>.

14. Sattarov Kh., Turaev A., Suyarov A., “Evaluation of the power transfer capability of inverters connected to solar panels, depending on the change in grid voltage”, International Conference on New Approaches in Engineering (ICNAE) October 6-7, Konya Turkey 2022, pp. 43-46.

15. Муратов Х.М., Тураев А.И, “Функционал стратегияларни қўллаш орқали замонавий электр тармоқларини шакллантириш”, Рақамли иқтисодиёт шароитида капитал бозорини ривожлантириш ва бошқариш: муаммолар ва замонавий йечимлар, 2 Феврал 2024, 679-681-б.

16. Муратов Х.М., Тураев А.И, “Электр энергетика тизимида тақсимланган генерация манбаларининг яшил иқтисодиётдаги ўрни”, Рақамли иқтисодиёт шароитида капитал бозорини ривожлантириш ва бошқариш: муаммолар ва замонавий йечимлар, 2 Феврал 2024, 530-532-б.

17. Муратов Х.М., Тураев А.И. “Тақсимланган генерация манбалари асосида замонавий электр тармоқларини шакллантиришда бошқарув асосларини такомиллаштириш”, Рақамли иқтисодиёт шароитида капитал бозорини ривожлантириш ва бошқариш: муаммолар ва замонавий йечимлар, 2 Феврал 2024, 439-442-б.

18. Муратов Х.М., Тураев А.И. “Электр энергияси истеъмолчиларида мавжуд “тақсимланган генерация” манбаларидан фойдаланиш имконияти”, Modern problems and prospects of development of energy supply of digital technology facilities", March, 2024, pp. 385-390, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10723733>.

19. Turaev A.I., “Consumer demand and usage benefits of electrical energy storage battery systems”, «Российская наука в современном мире» LX Международная научно-практическая конференция 29 февраля 2024 Научно-издательский центр «Актуальность.РФ» ст. 47-49.

20. Muratov Kh. M., Turaev A. I., “Prospects for using small wind power plants as distributed generation”, «Цифровая индустрия и развития энергетика глазами ученых», Международная научно-практическая конференция 25 апреля 2024 г. 735162, Республика Таджикистан, Институт энергетики Таджикистана, ст. 33–39.

21. Muratov Kh. M., Turaev A. I., “Opportunities to increase the reliability of frequency control via distributed generations”, «Цифровая индустрия и развития энергетика глазами ученых», Международная научно-практическая конференция 25 апреля 2024 г. 735162, Республика Таджикистан, Институт энергетики Таджикистана, ст. 57–60.

22. Тураев А.И., Махаммадиев Ф.М., “Тақсимланган генерация бошқарув тизимларининг электр тармоқларида кучланиш ва частотага таъсирини аниқлаш”, Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги “Интеллектуал мулк маркази” давлат муассаси, ЭҲМ дастури учун гувоҳнома DGU 33441, рўйхатдан ўтказилган сана 13.02.2024 й.

23. Тураев А.И., Махаммадиев Ф.М., “Паст кучланишли элект тармоқларининг тақсимланган генерациялар мавжуд бўлгандаги тескари қувват оқимларини ҳисоблаш”, Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги “Интеллектуал мулк маркази” давлат муассаси, ЭҲМ дастури учун гувоҳнома DGU 33440, рўйхатдан ўтказилган сана 13.02.2024 й.

Босишга рухсат этилди: 06.11.2025 йил
Бичими 60x84 1/16, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 4,75. Адади:60. Буюртма: № 125.
Тошкент тўқимачилик ва енгил саноат босмаҳонасида чоп этилган.
Манзил: 100100, Тошкент ш., Шохжаҳон кўчаси, 5- уй.

