

**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ФАНЛАР АКАДЕМИЯСИ
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**

ТАНИРБЕРГЕНОВ РАСУЛБЕК МУРАТБЕКОВИЧ

**ЭНЕРГЕТИКА ТИЗИМЛАРИ ЭНЕРГИЯ САМАРАДОРЛИГИНИ
ҚУВВАТНИ РОСТЛОВЧИ ҚУРИЛМАЛАР АСОСИДА ОШИРИШ**

05.05.01 – Энергетика тизимлари ва мажмуалари

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2025

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по
техническим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on technical
sciences**

Танирбергенов Расулбек Муратбекович

Энергетика тизимлари энергия самарадорлигини қувватни ростловчи
қурилмалар асосида ошириш 3

Танирбергенов Расулбек Муратбекович

Повышение энергоэффективности энергетических систем на основе
устройств регулирования мощности 19

Tanirbergenov Rasulbek Muratbekovich

Increasing the energy efficiency of energy systems based on power control
devices..... 35

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ 39
List of published works.....

**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ФАНЛАР АКАДЕМИЯСИ
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**

ТАНИРБЕРГЕНОВ РАСУЛБЕК МУРАТБЕКОВИЧ

**ЭНЕРГЕТИКА ТИЗИМЛАРИ ЭНЕРГИЯ САМАРАДОРЛИГИНИ
ҚУВВАТНИ РОСТЛОВЧИ ҚУРИЛМАЛАР АСОСИДА ОШИРИШ**

05.05.01 – Энергетика тизимлари ва мажмуалари

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2025

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Олий таълим, фан ва инновациялар вазирлиги ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2022.1.PhD/T2677 рақами билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Энергетика муаммолари институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (рус, ўзбек, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасига (www.energetika.uz) ва «ZiyoNet» ахборот-таълим порталига (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Хамидов Шухрат Вахидович
техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Худаяров Музаффар Бурханович
техника фанлари доктори, профессор

Юсунов Дилмурод Турдалиевич
техника фанлари бўйича фалсафа доктори,
катта илмий ходим

Етакчи ташкилот:

Фарғона политехника институти

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Энергетика муаммолари институти ҳузуридаги DSc.02/30.12.2021.T.143.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2025 йил «28» февраль соат 10⁰⁰ 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 (1 рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 40. Тел.: (99855) 520-01-52).

Диссертация автореферати 2025 йил «13» февральда тарқатилди.

(2025 йил «12» февральдаги 1 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, катта илмий ходим

О.Х. Ишнароров

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, техника фанлари доктори, профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда энергия самарадорлигининг муҳим омилларидан бири энергетика тизими параметрларига интеллектуал таъсир кўрсатиш орқали электр режимларини бошқариш даражасини ошириш ҳисобланиб, электр тармоқлари параметрларига таъсир кўрсатишнинг янги тамойилларини ишлаб чиқишга алоҳида аҳамият берилмоқда. Ҳозирги кунда жаҳоннинг ривожланган мамлакатларда “...электр тармоқларида қувватларнинг нораціонал тақсимланиши туфайли электр энергияси исрофлари истеъмол қилинаётган электр энергияси умумий ҳажмининг ўртача 10-15% ташкил этади”¹. Бу борада электр тармоқлари параметрларини ростлашнинг замонавий қурилмаларини жорий этган ҳолда, жумладан, мослашувчан электр узатиш тизимлари технологияси асосида электр энергияси исрофларини камайтириш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда актив ва реактив қувватларни узатиш жараёнида энергия самарадорлиги ва ишончлилигини ошириш ҳамда энергетика тизимининг бошқарилувчанлигини яхшилашга қаратилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда, жумладан, кучланишни бошқаришнинг янги алгоритмлари ва усуллари ишлаб чиқиш, қувват исрофларини камайтириш бўйича тадқиқотлар устувор ҳисобланмоқда. Шу билан бирга, электр тизимининг самарадорлиги ва ишончлилигини оширишга қодир янги технологиялар ва тизимларни ишлаб чиқиш ва қўллаш, умуман электр энергетикасининг ривожланишига таъсир кўрсатувчи мослашувчан электр узатиш тизимлари технологияси (FACTS), Smart Grid (ақлли тармоқлар) ва қайта тикланувчи энергия манбалари каби замонавий технологиялар билан уйғунлаштириш масалалари долзарб вазифалардан бири ҳисобланади.

Республикамизда энергия ресурсларидан фойдаланиш самарадорлигини ошириш, маҳсулот таннархини пасайтириш мақсадида янги технологик ечимларни ишлаб чиқиш, такомиллаштириш ва жорий этиш бўйича кенг қўламли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. 2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистон тараққиёт стратегиясида, жумладан, «Иқтисодиётни электр энергияси билан узлуксиз таъминлаш ҳамда “Яшил иқтисодиёт” технологияларини барча соҳаларга фаол жорий этиш, иқтисодиётнинг энергия самарадорлигини 20 фоизга ошириш»² вазифалари белгиланган. Ушбу вазифаларни амалга оширишда, хусусан, электр тармоғида узатилаётган қувватларни бошқариш орқали энергия самарадорлиги ва ишончлилигини оширишни ҳал этишга қаратилган илмий-тадқиқот ишларини олиб бориш муҳим масалаларидан бири ҳисобланади.

¹IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) - Электроника, электротехника, компьютер технологиялари, телекоммуникациялар, автоматлаштириш ва тегишли фанлар бўйича мутахассисларни бирлаштирган дунёдаги энг йирик профессионал ташкилот. Ташкилот, шунингдек, техник стандартларни ишлаб чиқиш билан шуғулланади ва тадқиқот ва таълим ташаббуслари орқали инновацияларни қўллаб-қувватлайди.

²Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон “2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида”ги Фармони.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”, 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон “2022 - 2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида” ва 2023 йил 28 сентябрдаги ПФ-166-сон “Энергетика соҳасини ислох қилишнинг навбатдаги босқичини амалга ошириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги фармонлари, 2019 йил 22 августдаги ПҚ-4422-сон “Иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳанинг энергия самарадорлигини ошириш, энергия тежовчи технологияларни жорий этиш ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг тезкор чора тадбирлари тўғрисида” ва 2022 йил 6 июлдаги 307-сон “2022-2026 йилларда Ўзбекистон Республикасининг инновацион ривожланиш стратегиясини амалга ошириш бўйича ташкилий чора-тадбирлар тўғрисида”ги қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Диссертация иши бўйича тадқиқотлар республика фан ва технологиялари ривожланишининг 2. «Энергетика, энергия тежамкорлик ва муқобил энергия манбалари» устувор йўналишларига мос келади.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Дунёнинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасаларида мослашувчан электр узатиш тизимлари технологиясидан фойдаланган ҳолда энергетика тизимларининг энергия самарадорлиги ва ишончлилигини таъминлаш бўйича кенг кўламли тадқиқотлар олиб борилмоқда, жумладан, Россия Фанлар академиясининг Меленьтев номидаги Энергетика тизимлари институти (МЭТИ), «Москва энергетика институти» МТУ (Россия), Иваново давлат энергетика университети» (Россия), Electric Power Research Institute ва University of Michigan (АҚШ), Stafford shire University (БҚ), Tampere University (АҚШ), Pirkkanmaa (Финляндия), Унидад Гуадалахара (Мексика), ЎЗР ФА Энергетика муаммолари институти ва Тошкент давлат техника университетида олиб борилмоқда.

Электр тармоқларининг энергия самарадорлиги ва ишончлилигини ошириш ҳамда иш режимларини бошқариш бўйича дунёнинг бир қатор олимлари, жумладан: Веников В.А., Воропай Н.И., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н., Ситников В.Ф., Розанов Ю.К., Руденко Ю.Н., Соколов Н.И., Чемборисова Н.Ш., Чебан В.М., Шакарян Ю.Г., Андерссон Г., Ҳингорани Н.В., Ачажадаги Э., Лию Х., Сантос А. ва бошқалар ўз ҳиссаларини қўшганлар.

Республикада энергетика тизимлари энергия самарадорлиги, ишончлилиги ва барқарорлигини ошириш ҳамда электр режимларини ҳисоблаш, уларни оптималлаштиришга қаратилган усулларни ишлаб чиқиш ва такомиллаштиришга Фозилов Х.Ф., Заҳидов Р.А., Аллаев К.Р., Насиров Т.Х., Гайибов Т.Ш., Ситдиқов Р.А., Хамидов Ш.В., Шарипов У.Б., Худаяров М.Б., Мирзабаев А.М. каби маҳаллий олимлар катта ҳисса қўшиб келмоқдалар. Бироқ, сезиларли муваффақиятларга қарамай, узатилаётган қувватни ростлашда

замонавий қурилмаларини қўллаш усулларини ишлаб чиқиш ва ривожлантириш, шунингдек, турли хил тебранишларнинг электр тармоғи энергия самарадорлиги ва ишончилигига таъсири, математик моделлар ва симуляцион моделларни ишлаб чиқиш бўйича тадқиқотлар 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 2022-2025 йилларга мўлжалланган «Энергетикани ривожлантириш ишончилиги ва хавфсизлигини таъминлашнинг услубий асосларини ишлаб чиқиш» мавзусидаги илмий-тадқиқот дастури доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади FACTS технологиясидан фойдаланиб электр тармоқларининг қувват йўқотишларини камайтириш орқали энергетика тизимининг энергия самарадорлигини оширишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

энергетика тизимлари режимининг меъёрий параметрларини таъминлаш масалаларини ечиш учун FACTS қурилмалари турларини танлашни тадқиқ этиш;

FACTS қурилмалари билан электр тармоқларининг математик моделларини ишлаб чиқиш;

FACTS қурилмалари билан электр тармоғининг барқарорлашган режимини ҳисоблаш алгоритми, блок-схемаси ва дастурини яратиш;

тармоқларда тугун кучланишларини яхшилаш ва қувват исрофларини камайтириш учун FACTS қурилмаларини ўрнатиш жойини аниқлаш усулини ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида ўзгарувчан токни узатишнинг мослашувчан тизимлари қурилмали энергетика тизимининг электр тармоқлари олинган.

Тадқиқотнинг предмети FACTS технологиясини жорий этиш методикасини ишлаб чиқиш ва электр тармоғининг энергия самарадорлиги ҳамда ишончилигини ошириш моделларини яратишдан иборат.

Тадқиқот усуллари. Тадқиқот жараёнида тизимли таҳлил, математик моделлаштириш, электр тизимларининг иш режимларини ҳисоблаш, оптимал бошқариш назарияси ва усуллари ҳамда замонавий рақамли моделлардан фойдаланилган.

Тадқиқот натижаларининг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

қувватни ростловчи қурилмаларининг (STATCOM ва SVC) реактив қувват компенсациясида электр тармоғидаги асосий режим параметрларига таъсирини аниқлаш имконини берувчи математик моделлар Нютон-Рафсон усули асосида ишлаб чиқилган;

электр тармоқларида генерация ва юклама томонидан берилган ташқи таъсирлар асосида FACTS қувватни бошқариш қурилмаларининг функционал имкониятларини аниқлаш учун STATCOM ва SVC қурилмаларининг симуляцион моделлари яратилган;

энергетика тизимлари энергия самарадорлигини ошириш имконини берувчи усул қувватни ростловчи қурилмаларига (FACTS) эга тармоқларнинг барқарорлашган режим параметрлари ўзгаришини ҳисобга олиб Ньютон тенгламалари асосида ишлаб чиқилган;

энергетика тизимининг қувват йўқотишлари ва оғиш параметрларини баҳолаш учун тармоқнинг режимини ҳисоблаш орқали FACTS қурилмаларини ўрнатиш нуқтасини аниқлаш усули қувватлар баланси асосида ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

FACTS технологияси асосида энергетика тизимининг энергия самарадорлиги ва ишончлилигини ошириш имкониятлари аниқланган;

FACTS қурилмаларининг асосий параметрлари ва электр тармоғи параметрлари ўртасидаги боғлиқлик белгиланган;

FACTS технологияси белгиланган талаблар доирасида технологик жараённинг нормал режими ва энергия-ресурслари тежамкорлигини таъминловчи кучланиш ва реактив қувватни бошқариш объекти сифатида ўрганилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги энергетика тизимининг электр тармоқларида содир бўладиган жараёнларни моделлаштириш учун амалда синалган илғор математик ва симуляцион усуллардан фойдаланилганлиги ҳамда бажарилган ҳисоб-китоблар ва симуляция натижаларининг ўзаро мос келиши билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти электр тармоқлари режимларини бошқариш усулларини такомиллаштириш ва ривожлантириш ҳамда энергия самарадорлигини ошириш билан изоҳланади. Бу эса меъёрий иш режимларини таъминлаш учун интеллектуал технологияларни қўллаш орқали электр тармоқлари параметрларига таъсир кўрсатиш усули ва алгоритминини ишлаб чиқиш натижасида эришилади. Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти энергетика тизими параметрларига интеллектуал таъсир кўрсатиш орқали электр режимларини бошқариш даражасини ошириш асосида энергия йўқотишларини камайтириш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий этилиши. Электр тармоқларида қувватни бошқариш қурилмаларидан фойдаланиб, қувват йўқотилишларини камайтириш ва тармоқдаги кучланиш даражаларини ростлаш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

электр тармоқларининг барқарор режими параметрларини ҳисоблаш алгоритми ва дастурий маҳсулоти, электр тармоғида тебранишлар пайтида қувват йўқотилишларини камайтириш ва кучланишларни ростлаш бўйича тавсиялар Ўзбекистон энергетика тизимининг Шимолий-Ғарбий тугунига жорий этилган (“Ўзбекистон миллий электр тармоқлари” АЖнинг 2024 йил 28 октябрдаги 01-01-25/182-сонли маълумотномаси). Натижада Беруний подстанциясининг шиналардаги кучланишни 217,8 кВ дан 220 кВ гача ошириш ва Шимоли-Ғарбий тугун бўйича қувват йўқотилишларини ўртача 144 МВтга (1,25%) камайтириш имконини берган;

қувват ва кучланишни ростлаш технологияси (Flexible AC Transmission Systems) “Ўзбекистон миллий электр тармоқлари” АЖ Тахиатош худуди Беруний подстанциясига жорий этилган (“Ўзбекистон миллий электр тармоқлари” АЖнинг 2024 йил 28 октябрдаги 01-01-25/182-сонли маълумотномаси). Натижада Ўзбекистон энергетика тизимининг Шимоли-ғарбий тугунида қувватни ростловчи қурилмалар асосида ўртача қувват йўқотилишини камайтириш ва энергия самарадорлигини ошириш ҳисобига иқтисодий самарадорлик ойига 93 600 000 сўмни ташкил этган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари 12 та илмий-техник анжуманда, жумладан, 3 та халқаро ва 9 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилди.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 23 та илмий иш чоп этилди, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 8 та мақола, жумладан, 3 таси хорижий ва 5 таси республика журналларида нашр этилди, 1 та монография илмий нашрда чоп этилди, 2 та ЭҲМ учун дастурий маҳсулотга гувоҳнома олинди.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 105 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида танланган мавзунинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объекти ва предмети тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий ва амалий натижалари баён этилган, олинган натижаларнинг илмий-амалий аҳамияти ёритиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий этиш, чоп этилган ишлар ва диссертация тузилиши ҳақида маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Ўзгарувчан токли бошқариладиган мослашувчан электр узатиш технологияси – FACTS қўлланилиши таҳлили**» деб номланган биринчи бобида реактив қувватни тартибга солиш муаммолари, асосий параметрларни бошқариш, қайта тикланадиган энергия манбаларининг таъсири, реактив қувват етишмаслиги шароитида электр тизимларининг барқарорлиги ва FACTSнинг электр тармоқларидаги параметрларга таъсири соҳасида олиб борилган илмий тадқиқотлар таҳлил қилинган. FACTS технологиясини қўллаш масалалари, ишлаш принципи, энергетика тизими электр тармоқларининг режим параметрлари ва ишончилигини яхшилаш учун қурилмаларнинг асосий функциялари ҳамда хусусиятлари кўриб чиқилган.

Мамлакатимиз электр энергетикасининг ўзига хос хусусияти шундаки, юклама марказлари ва электр станциялари ўртасида катта масофалар мавжуд. Бу эса, паст қаршиликли кўп сонли қувватли электр узатиш линиялари туфайли қувват оқимининг жуда узун ҳалқалар бўйлаб ўтишига олиб келади. Амалда ҳар

бир магистраль электр узатиш тизимида бир нечта асосий ва кўп сонли иккинчи даражали ҳалқасимон оқимлар мавжуд.

FACTS технологияси аниқ бошқарув вазифаси талабларига кўра турли хил тузатиш ҳаракатларини амалга ошириш имконини беради. Таҳлиллар шуни кўрсатадики, электр тармоқларидаги компенсацияловчи қурилмалар қувватининг тахминан 2/3 қисмини 0,4 кВ ли тармоқларга, 25% ини 6-10 кВ ли тармоқларга, қолган 5% ини эса 110 кВ ва ундан юқори кучланишли тармоқларга ўрнатиш мақсадга мувофиқ.

Ўтказилган таҳлиллар асосида диссертация ишининг мақсад ва вазифалари шакллантирилган.

Диссертациянинг «**FACTS технологияларини қўллаган ҳолда энергетика тизимини математик моделлаштириш**» деб номланган иккинчи бобида FACTS технологиялари қурилмалари билан жиҳозланган энергетика тизимларининг ишлаш режимларини самарали ҳисоблашнинг асосий усуллари баён этилган.

Бошқариладиган куч қурилмаларида жараёнларни моделлаштириш учун қўлланиладиган математик усулларни икки тоифага бўлиш мумкин: кетма-кет ечимларни излаш усуллари ва бир вақтнинг ўзида ечимларни излаш усуллари.

Кетма-кет ёндашув Ньютон-Рафсон алгоритмларини амалга оширишни бошқариш нуқтаи-назаридан самаралидир.

Ньютон усули нозичиқли тенгламаларнинг илдизларини топишнинг итерацион усулидир. STATCOM (FACTS) контекстида ушбу усул тармоқ ҳолатини таҳлил қилишда юзага келадиган нозичиқли тенгламалар тизимини ечиш учун қўлланилади.

Тенгламалар тизимини шакллантириш:

$$F(x) = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} = 0$$

бу ерда F - тизим динамикасини тавсифловчи функциялар вектори.

Якобианни ҳисоблаш: x ўзгарувчилар бўйича F функцияларнинг хусусий ҳосилаларини ўз ичига олган Якоби матрицаси аниқланади.

Итерация жараёни: Ҳар бир итерацияда илдизга яқинлашиш янгиланади:

$$x_{k+1} = x_k - J^{-1}(F(x_k))$$

Бу қадам x нинг ўзгариши белгиланган чегарадан кичик бўлмагунча такрорланади.

STATCOM моделида тизимнинг бошланғич ҳолати (кучланиш, ток, юклама параметрлари) берилади ва тармоқда ўзгариш (кучланиш ёки юкломанинг кескин ўзгариши) дан кейин янги ҳолатни топиш учун Ньютон усули қўлланилади.

Тугун учун Кирхгоф қонунига кўра:

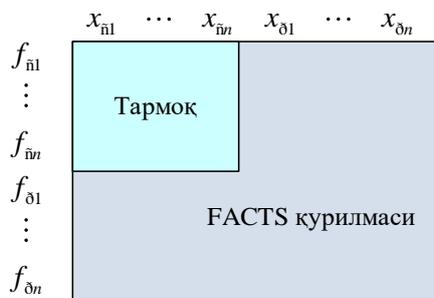
$$F_1: I_{STATCOM} + I_{юкл.} = I_{тарм.}$$

бу ерда $I_{\text{юкл.}}$ - юк токи, $I_{\text{тарм.}}$ эса тармоқдан келаётган ток ҳисобланади. Ушбу тенглама STATCOM токини юк токи ва тармоқдан келаётган ток билан боғлайди.

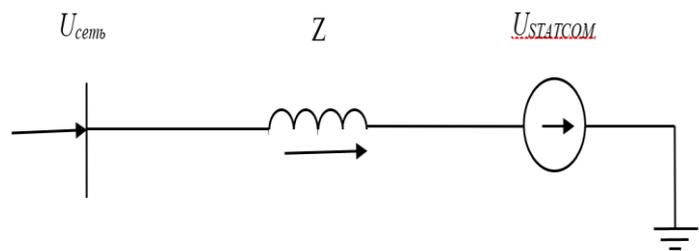
STATCOM уланиш нуқтасидаги кучланиш:

$$F_2: \quad U_{\text{юкл.}} = U_{\text{тарм.}} - I_{\text{STATCOM}} \cdot Z$$

бу ерда Z - чизик импеданси. Бу тенглама STATCOM токига боғлиқ равишда юкланишдаги кучланишнинг ўзгаришини тавсифлайди (1- ва 2-расмлар).



1-расм. FACTS қурилмаларига эга ЭЭТ Якобиан тузилиши



2-расм. STATCOM статик реактив қувват компенсаторининг алмаштириш схемаси

STATCOM томонидан ишлаб чиқарилган реактив қувват:

$$F_3: \quad Q = U_{\text{STATCOM}} \cdot I_{\text{STATCOM}} \cdot \sin(\theta)$$

бу ерда θ - STATCOM кучланиши ва у ҳосил қилган ток ўртасидаги фазалар фарқи.

STATCOM тескари алоқа тизими орқали бошқарилади. Бошқарув тенгламалари қуйидагиларни ўз ичига олади:

Юкламадаги жорий кучланишни берилган қиймат билан солиштирувчи ва U_{STATCOM} ни мослаштирадиган кучланиш ростлагичи;

Юклама ўзгаришларига асосланиб, зарур бўлган реактив қувват Q ни аниқлаш алгоритмлари.

Ростлагич учун тенглама:

$$F_4: \quad U_{\text{STATCOM}} = K(U_{\text{таянч}} - U_{\text{юкл.}})$$

бу ерда K - ростлагичнинг кучайтириш коэффиценти, $U_{\text{опор.}}$ - таянч кучланиши.

Матрицанинг ўлчами 4x4 бўлган Якобианни ҳисоблаймиз, чунки 4 та тенглама ва 4 та ўзгарувчи (I_{STATCOM} , U_{STATCOM} , $U_{\text{юкл.}}$, Q).

Хусусий ҳосилалар:

$$F_1 \text{ учун} \quad \frac{\partial F_1}{\partial I_{\text{STATCOM}}} = 1, \quad \frac{\partial F_1}{\partial I_{\text{юкл.}}} = 1, \quad \frac{\partial F_1}{\partial I_{\text{тарм.}}} = -1, \quad \frac{\partial F_1}{\partial Q} = 0;$$

$$F_2 \text{ учун:} \quad \frac{\partial F_2}{\partial I_{\text{STATCOM}}} = Z, \quad \frac{\partial F_2}{\partial U_{\text{юкл.}}} = -1, \quad \frac{\partial F_2}{\partial U_{\text{тарм.}}} = 1, \quad \frac{\partial F_2}{\partial Q} = 0;$$

$$F_3 \text{ учун:} \quad \frac{\partial F_3}{\partial I_{\text{STATCOM}}} = -U_{\text{STATCOM}} \cdot \sin(\theta),$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial U_{\text{STATCOM}}} = -I_{\text{STATCOM}} \cdot \sin(\theta),$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial \theta} = -QU_{\text{STATCOM}} \cdot \cos(\theta), \quad \frac{\partial F_{13}}{\partial Q} = 1;$$

$$F_4 \text{ учун: } \frac{\partial F_4}{\partial U_{STATCOM}} = I, \quad \frac{\partial F_4}{\partial U_{\text{юкл.}}} = K, \quad \frac{\partial F_4}{\partial U_{\text{таянч.}}} = -K, \quad \frac{\partial F_4}{\partial Q} = 0.$$

Якоби матрицаси (1-расм)

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ Z & -1 & 1 & 0 \\ -U_{STATCOM} \cdot \sin(\theta) & -I_{STATCOM} \cdot \sin(\theta) & -QU_{STATCOM} \cdot \cos(\theta) & 1 \\ 1 & K & -K & 0 \end{bmatrix}$$

Ўзгарувчилар учун бошланғич қийматлар берилди

$$x = [I_{STATCOM} \quad U_{\text{тарм.}} \quad U_{STATCOM} \quad Q]^T$$

$F(x)$ ва J ҳисобланади, кейин тузатишлар топилади

$$\Delta x = -J^{-1}F(x)$$

Ўзгарувчиларнинг қийматлари янгиланади

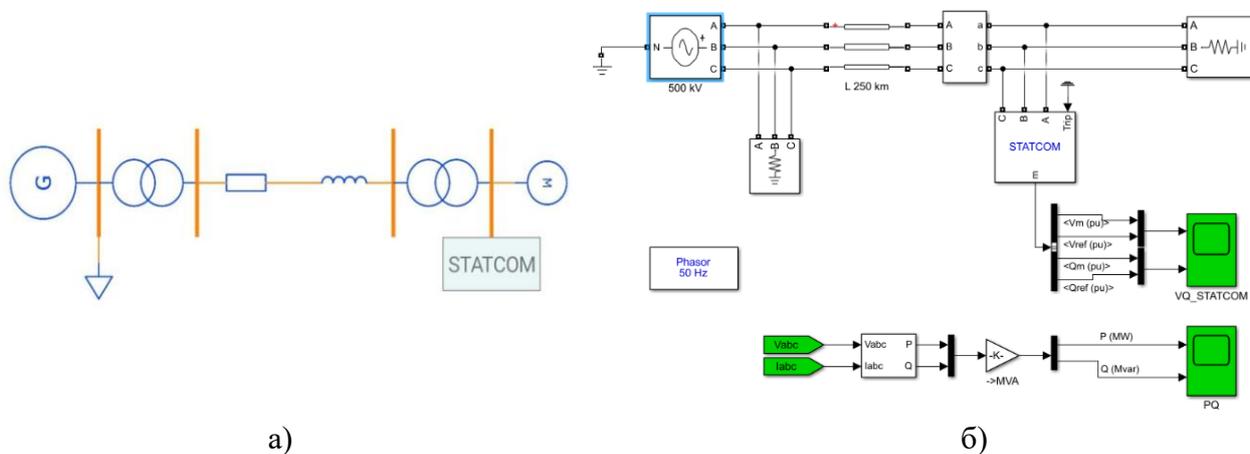
$$x_{\text{нов.}} = x + \Delta x$$

Ўзгариш белгиланган чегарадан кам бўлмагунча такрорланади

$$\|F(x_{\text{янг.}})\| < \varepsilon \text{ или } \|x_{\text{янг.}} - x\| < \varepsilon$$

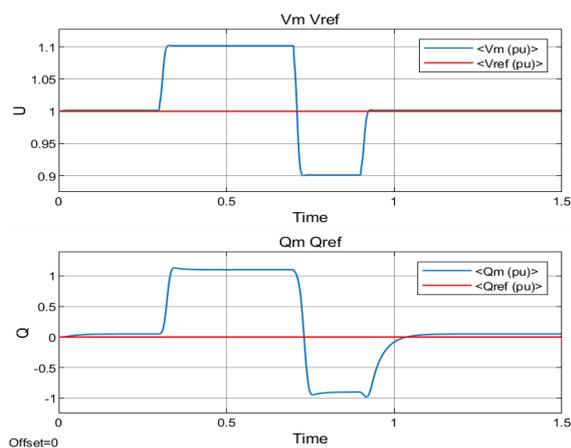
STATCOM билан электр тармоғининг бундай математик модели кўп параметрли тизимлардаги мураккаб ўзаро таъсирларни ўрганиш учун кучли воситадир ва реактив қувватни бошқаришнинг замонавий усуллари қўллаш имконини беради.

Диссертациянинг «FACTS қурилмалари билан электр тармоқларининг симуляцион моделларини ишлаб чиқиш» деб номланган учинчи бобда MATLAB/Simulink симуляцион муҳитида FACTS қурилмаларининг ишлаши таҳлил қилинган.

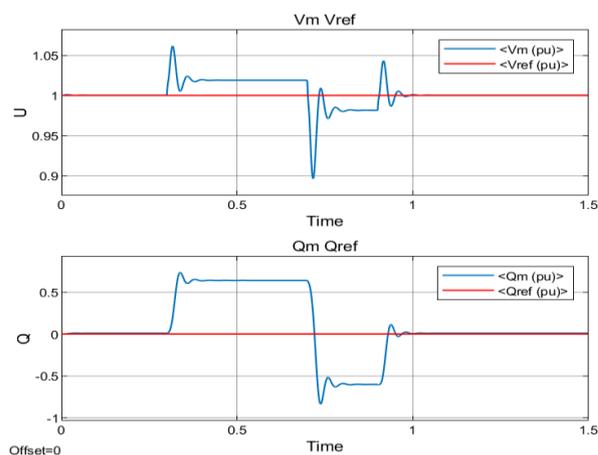


3-расм: а) - Электр тармоғини алмаштириш схемаси, б) - MATLAB/Simulink муҳитидаги модель

MATLAB/Simulink дастурида STATCOM қурилмаси моделини симуляция қилишнинг асосий шarti электр тизими кучланишининг юқори қисмини имитацияловчи кучланиш манбаи орқали электр тармоғига таъсир ўтказишдир. Кўриб чиқилаётган тармоқ таъминот манбаи, электр узатиш линиялари, ўлчов қурилмаси, иккита юкланма ва STATCOM қурилмасидан ташкил топган (3-расм).



а)



б)

4-расм. Тармоқнинг асосий параметрлари графиги: а) STATCOM сиз (қизил рангда кучланиш ва реактив қувватнинг таянч қийматлари, кўк рангда нисбий бирликда жорий қийматлар белгиланган); б) STATCOM билан

Моделда берилган ғалаёнланиш тури тармоқдаги кучланиш тебранишидир. STATCOM қурилмаси 1,5 сония давомида реактив қувватни компенсация қилиш орқали тармоқ параметрларининг ўзгаришига жавоб қайтаради. Кучланиш манбаи кўзғалишни [0 0,3 0,7 0,9] сония вақт оралиқларида, кучланиш тебранишларини эса [1 1,1 0,9 1] нисбий бирликларда 500 кВ кучланиш амплитудасига нисбатан беради (4-расм). STATCOM уланиш нуқтасидаги кучланишни бошқаради: тармоқ кучланиши пасайганда, STATCOM кучланишни талаб қилинган даражада ушлаб туриш учун реактив қувват ишлаб чиқаришни бошлайди; агар тармоқ кучланиши кўтарилса, STATCOM кучланишни пасайтириш учун реактив қувватни ютишни бошлайди.

STATCOM блоки созламаларида унинг чиқиш сигналларига таянч қийматлар берилади. Базис параметрларнинг қийматлари «Measurements» блоки орқали берилади, бу ерда $S_6=1000$ МВА, $V_6=500$ кВ. 1-жадвалда кучланиш ва реактив қувват сакрашларининг энг юқори қийматларини таққослаш келтирилган.

1-жадвал

Тармоқ параметрларининг энг юқори қийматлари

а) STATCOM қурилмаси билан

STATCOM	0-0.3 с.	0.3-0.7 с.	0.7-0.9 с.	0.9-1.5 с.
V_m (о.е. / кВ)	1 / 500кВ	1.061 / 530,5кВ	-(0.9 / 450кВ)	1.043 / 521,5кВ
V_{ref} (о.е. / кВ)	1 / 500кВ	1 / 500кВ	1 / 500кВ	1 / 500кВ
Q_m (о.е. / МВА)	0 / 0 МВА	0.736 / 736 МВА	-(0.837 / 837 МВА)	-(0.6 / 600 МВА)
Q_{ref} (о.е. / МВА)	-	-	-	-

б) STATCOM қурилмасисиз

FACTS қурилмасиз	0-0.3 м	0.3-0.7 с.	0.7-0.9 с.	0.9-1.5 с.
V_m (о.е. / кВ)	1 / 500кВ	1.093 / 546.5кВ	-(0.9 / 450кВ)	-(0.914 / 457кВ)
V_{ref} (о.е. / кВ)	1 / 500кВ	1 / 500кВ	1 / 500кВ	1 / 500кВ
Q_m (о.е. / МВА)	0 / 0 МВА	1.12 / 1120 МВА	-(0.963 / 963 МВА)	-(0.986 / 986 МВА)
Q_{ref} (о.е. / МВА)	-	-	-	-

Олинган натижалардан кўриниб турибдики, STATCOM сакрашларнинг тез сўнишига ёрдам беради:

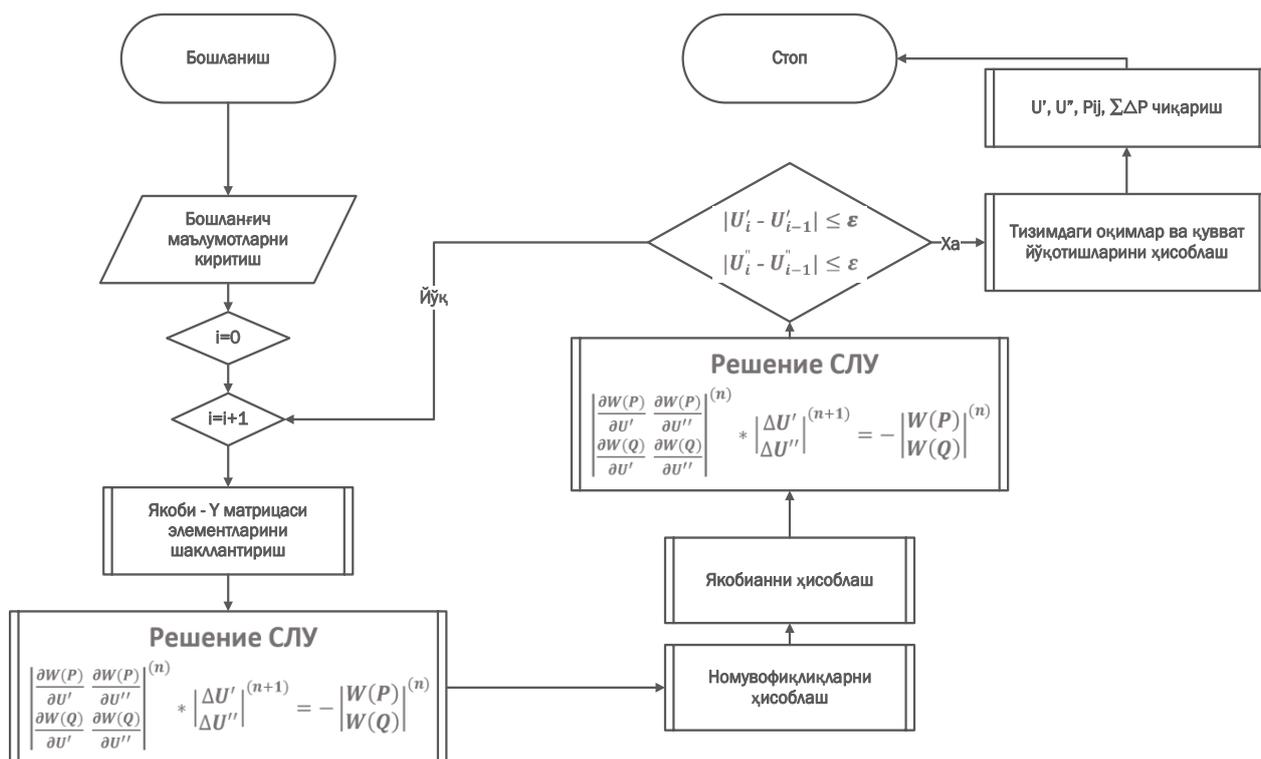
STATCOM билан тармоқ 0,93 сонияда барқарорлашади;

STATCOMсиз тармоқ 1,1 сонияда барқарорлашади.

Диссертациянинг «FACTS қурилмалари билан электр тармоғининг барқарорлашган режимини ҳисоблаш алгоритми, блок схемаси ва дастурини ишлаб чиқиш» деб номланган тўртинчи бобида блок схемаси ва тугун кучланишлар тенгламасини (ТКТ) ҳисоблаш дастури, қувватни ростлаш қурилмаларини ўрнатиш жойини аниқлаш усули ишлаб чиқилган, FACTS технологиясини қўллашнинг техник-иқтисодий самарадорлиги баҳоланган.

FACTS қурилмасини ўрнатиш жойини аниқлаш. FACTS қурилмаларини қўллашнинг техник мақсадга мувофиқлиги барқарорлашган режимларни, энергетика тизимининг турғунлигини ва турли аварияларда ўтиш жараёнларини ҳисоблаш натижалари асосида аниқланади.

FACTS қурилмасини оптимал ўрнатиш жойини топиш учун электр тармоғининг ўрнатилган режимини ҳисоблаш керак. Ушбу масалани ечиш учун тугун кучланишлар усули (ТКУ) танланди ва унинг асосида Декарт ва қутб координаталарида қувват баланси тенгламалари билан Ньютон усули орқали электр режимини ҳисоблаш алгоритми, блок схемаси ва дастури ишлаб чиқилди (5-расм).



5-расм. Электр режимини КТТ усули билан ҳисоблаш учун ишлаб чиқилган дастурнинг блок-схемаси

Ўрнатилган режимнинг чизикли бўлмаган тугунли тенгламаларини (ТТ) сонли ечишда шартли равишда тўрт гуруҳга бўлинадиган турли хил итерацион усуллардан фойдаланиш мумкин: тўғри итерация усуллари; чизикли бўлмаган ТТларни ҳар бир қадамда (Ньютон усули, градиент ва бошқалар) ТТ Якобианидан фойдаланган ҳолда чизикли бўлишига асосланган усуллар.

STATCOM ва SVC қурилмаларининг ишлашини таҳлил қилиш учун тугунли тест схемаси қабул қилинган. Техник баҳолаш учун FACTS

қурилмаларини жорий этишдан олдин ва кейин тармоқнинг максимал ва минимал иш режимлари учун бир қатор ҳисоб-китоблар ўтказилади.

ТТ ечимидан кейин олинган тармоқ тест схемасининг барқарорлашган режими параметрлари. 2 ва 3 жадвалларда умумий йўқотишлар ва параметрларнинг тебранишлари максимал бўлган нуқталар (тугунлар) кўрсатилган. Таъсир турига қараб FACTS қурилмаси танланади.

Ҳисоблашлар таҳлили шуни кўрсатадики, 5 ва 13 тугунлар энг катта оғишларга эга. STATCOM нинг 5-тугунга ва SVCнинг 13-тугунга ўрнатилиши кучланишнинг меъёрий чегарада барқарорлашувига, тармоқда умумий қувват йўқотишларининг камайишига олиб келди. Шу билан бирга, STATCOM ва SVC электр тармоғининг барқарорлигини таъминлаш учун тезкор жавоб берувчи қурилмалар сифатида ишлайди.

2-жадвал

FACTS қурилмаларисиз электр тармоғининг 32 тугунли схемасида йўқотишларни ҳисоблаш

i-j тармоқ	U _i , кВ	U _j , кВ	R, Ом	X, Ом	Z, Ом	Ктр	I _{ij} , А	i-даги P _{ij}	j-даги P _{ij}	Йўқотишлар МВт
0-1	525,00	514,01	3,00	32,50	32,64	1	0,34	176,7	173,08	3,70
1-2	514,01	494,98	0,58	61,10	61,10	1	0,31	160,0	154,16	5,93
2-3	494,98	260,48	1,45	56,75	56,77	1	0,00	0,58	0,58	0,00
2-4	494,98	126,82	1,45	56,75	56,77	3,9	0,01	3,33	3,33	0,00
3-5	245,48	257,88	0,60	4,13	4,17	1	0,62	162,3	160,72	1,62
.....
15-29	519,41	518,60	1,53	47,00	47,02	1	0,02	8,77	8,76	0,01
29-30	518,60	517,60	0,58	61,10	61,10	1	0,02	8,32	8,31	0,02
30-31	517,60	10,13	2,90	113,5	113,54	50	0,01	4,92	4,91	0,01
30-32	517,60	118,00	1,45	56,75	56,77	4,7	0,00	0,00	0,00	0,00
							Умумий йўқотишлар (МВт)			35,11

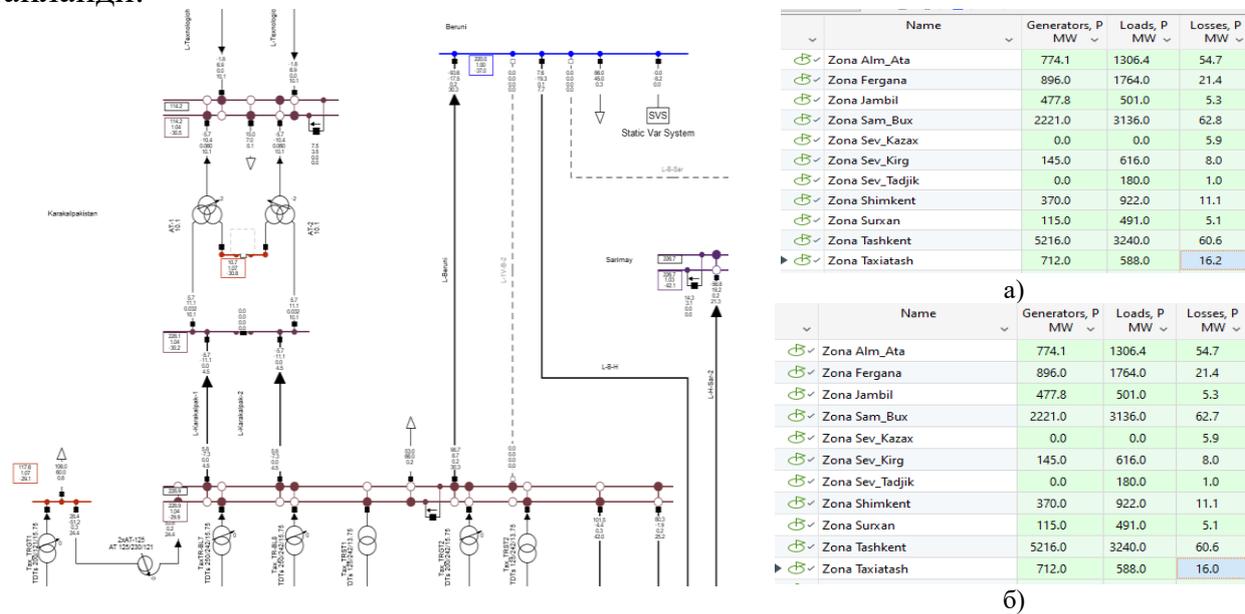
3-жадвал

STATCOM ва SVC ўрнатилган 32 тугунли электр тармоғи схемасидаги йўқотишларни ҳисоблаш

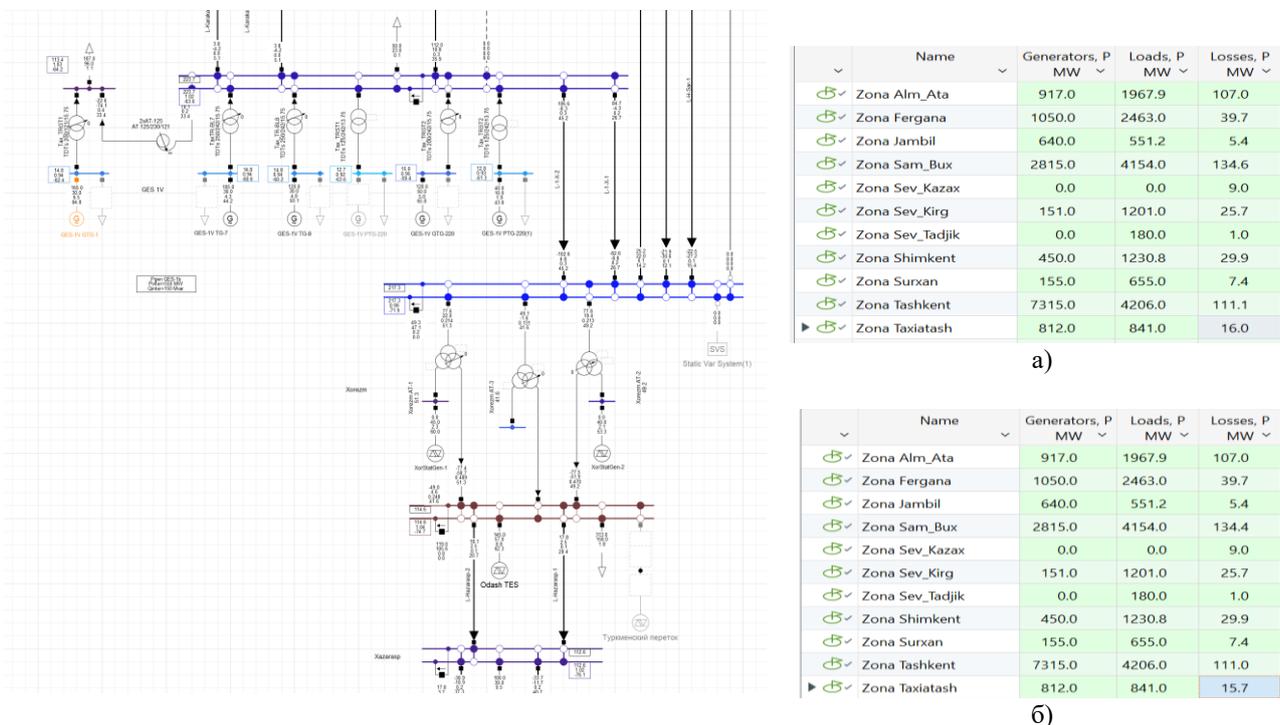
i-j тармоқ	U _i , кВ	U _j , кВ	R, Ом	X, Ом	Z, Ом	Ктр	I _{ij} , А	i-даги P _{ij}	j-даги P _{ij}	Йўқотишлар МВт
0-1	525,0	519,1	3,0	32,5	32,6	1,0	0,2	94,6	93,5	1,1
1-2	519,1	501,0	0,6	61,1	61,1	1,0	0,3	154,4	149,0	5,4
2-3	501,0	263,6	1,5	56,8	56,8	1,9	0,0	0,6	0,6	0,0
2-4	501,0	128,4	1,5	56,8	56,8	3,9	0,0	0,6	0,6	0,0
3-5	223,6	261,1	0,6	4,1	4,2	1,0	0,6	159,2	157,7	1,5
....
15-29	532,7	531,9	1,5	47,0	47,0	1,0	0,0	8,8	8,8	0,0
29-30	531,9	531,0	0,6	61,1	61,1	1,0	0,0	8,2	8,2	0,0
30-31	531,0	10,6	2,9	113,5	113,5	50,0	0,0	-0,2	-0,2	0,0
30-32	531,0	113,0	1,5	56,8	56,8	4,7	0,0	0,4	0,4	0,0
							Умумий йўқотишлар (МВт)			29,0

Ўзбекистон бирлашган энергетика тизимида (БЭТ) йўқотишларни камайтириш, энергетик тизим электр тармоғининг энергия самарадорлиги ва ишончлилигини ошириш учун: максимал ва минимал режимларнинг статистик параметрлари, шу жумладан Ўзбекистон БЭТнинг Шимоли-Ғарбий зонаси

(Тахиатош зонаси) таҳлил қилинди; кучланиш тебранишлари Тахиатош энергетика тизими ҳудудида максимал бўлган “муаммоли” шина аниқланди; тадқиқот натижаларига кўра, FACTS қурилмасининг тури ва қуввати Тахиатош энергетика тизими ҳудудида FACTS қурилмасини ўрнатиш жараёни бир қатор максимал ва минимал энергетика тизимлари режимларини ҳисобга олган ҳолда танланди.



6-расм. Тахиатош зонаси схемаси ва унинг параметрлари: а) FACTS қурилмасисиз, б) FACTS қурилмаси билан



7-расм. Хоразм ПС схемаси ва унинг параметрлари: а) FACTS қурилмасисиз, б) FACTS қурилмаси билан

FACTS қурилмаларини қўллашнинг техник мақсадга мувофиқлиги энергетика тизимидаги барқарор режимларнинг параметрлари, энергетика тизимининг барқарорлиги ва турли аварияларда ўтиш жараёнлари асосида белгиланади.

Кучланишнинг энг катта тушиши 220 кВ синфдаги Беруний подстанцияси (ПС) шиналарида кузатилади ва амалда 217,8 кВ ни ташкил этади (6-расм).

Йўқотишларни камайтириш ва кучланиш даражасини рухсат этилган чегараларда ушлаб туриш учун ҳисоблашлар серияси натижаларига кўра компенсация қуввати ± 20 МВАр бўлган FACTS қурилмаси танланди. Беруний ПС шиналаридаги FACTS қурилмаси билан тармоқ параметрлари 6-расмда келтирилган (қурилманинг қуввати ± 20 МВАр бўлган Хоразм ПС учун ҳам ҳисоб-китоблар амалга оширилди, маълумотлар 7-расмда келтирилган).

4-жадвал

Ўзбекистон электр тизимининг Тахиатош ҳудудида FACTS қурилмасининг кучланиш $\pm 5\%$ тебраниши режимидаги таъсири

Олинган натижалар	Жами йўқотишлар		Йўқотишлар фарқи
	FACTS қурилмасисиз	FACTS қурилмаси билан	
Максимал тармоқ режимида, [МВт]	15,6	15,4	0,2
Тармоқнинг минимал режимида, [МВт]	16,2	16	0,2
Ўртача йўқотиш қиймати, [МВт]	15,9	15,7	0,2
Ўртача ойлик йўқотишлар, [минг кВт*соат]	11448	11412	144

4-жадвалда FACTS қурилмасининг Ўзбекистон БЭТдаги Тахиатош ҳудудига таъсирини баҳолаш келтирилган.

4-жадвалда келтирилган натижалардан келиб чиқиб, бир ойдаги электр энергияси йўқотишларининг фарқи қуйидагича бўлди:

$$W_3 = W_1 - W_2 = (P_{\text{ўр.1}} - P_{\text{ўр.2}}) \times t_{\text{ой.с.}} = (15,9 - 15,7) \times 24 \times 30 = 144 \text{ МВт} \cdot \text{с}$$

бу ерда $P_{\text{ўр.1}}$ ва $P_{\text{ўр.2}}$ - FACTS қурилмалари билан ва уларсиз вақт бирлиги учун ўртача қувват йўқотишлари; $t_{\text{ой.с.}}$ - ойдаги соатлар сони; W_1 ва W_2 - FACTS қурилмалари билан ва уларсиз йиллик электр энергияси йўқотишлари (йўқотишлар фарқи 1,25%).

Саноат ва аҳоли учун ўртача тариф $T = 650 \frac{\text{сум.}}{\text{кВт} \cdot \text{соат}}$ бўлганда FACTS ўрнатишнинг бир ойдаги кутилаётган иқтисодий самарадорлик

$$E = T \times W_3 = 650 \frac{\text{сум.}}{\text{кВт} \cdot \text{соат}} \times 144 \times 103 \text{ кВт} \cdot \text{соат} = 93,6 \text{ млн сўмни ташкил этади.}$$

ХУЛОСА

“Энергетика тизимлари энергия самарадорлигини қувватни ростловчи қурилмалар асосида ошириш” мавзусидаги техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертация иши бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижалари асосида қуйидаги хулоса тақдим этилган:

1. Замонавий электр тармоқларида FACTS технологиясини қўллаш масалалари тадқиқ қилинди. FACTS технологиясининг функционал имкониятлари, уларнинг электр тармоғининг барқарорлиги ва ишлаш самарадорлигига таъсири таҳлил қилинган. Натижада электр тармоқларининг режим барқарорлиги ва бошқарилувчанлигини ошириш учун FACTS технологиясини қўллашнинг юқори самарадорлиги аниқланди.

2. Электр тармоқларининг режим параметрларини назорат қилиш ва бошқаришга мўлжалланган FACTS қурилмалари мажмуи тадқиқ қилинди. Натижада FACTS қурилмаларини қўллаш: энергетика тизимини бошқаришнинг

ишончлилиги ва мослашувчанлигини ошириш; кучланишларни оптимал ростлаш ва қувват оқимларини бошқариш, электр тармоқларида электр энергияси исрофларини камайтириш ва энергия самарадорлигини ошириш; электр узатиш линияларининг ўтказувчанлик қобилиятини ошириш ва электр тармоқларининг ортиқча юкланиш эҳтимолини камайтириш имконини бериши аниқланди.

3. MATLAB/Simulink дастурий муҳитида ҳар хил турдаги FACTS қурилмалари билан электр тармоқларининг симуляцион моделлари ишлаб чиқилди. Натижада электр тармоқлари режимларини самарали бошқариш, ростлаш ва оптималлаштирувчи таъсирларни амалга ошириш, энергетика тизимини бошқариш ва ишлаш самарадорлигини ошириш учун FACTS қурилмаларининг асосий турларини қўллаш имкониятлари аниқланди.

4. FACTS қурилмали электр тармоқлари учун қувват оқимларини ҳисоблашнинг математик моделлари ишлаб чиқилди. Натижада FACTS қурилмалари тармоқнинг динамик характеристикалари, кучланишларни ростлаш диапазонлари, актив ва реактив қувватларга таъсир кўрсатиш имконини бериши аниқланди.

5. Ишлаб чиқилган алгоритм ва электр режимларини тугун кучланиш тенгламалари билан ҳисоблаш дастури тармоқнинг барқарор режими параметрларини аниқлашни таъминлайди. Натижада ушбу параметрлардан фойдаланиш энергетик тизимининг кучланишлари меъёрий қийматлардан оған узелларини аниқлаш, тармоқ элементларида қувват оқимлари ва йўқотишларини ҳисоблаш имконини беради.

6. Бажарилган тест ҳисоблашлари FACTS қурилмаларининг ишлаш самарадорлигини ва уларнинг тармоқ режим параметрларига сезиларли таъсирини кўрсатди. Натижада 32 узелли схема учун электр тармоғида актив қувват йўқотилиши 35 МВтни ташкил этган бўлса, FACTS (умумий қуввати 305 МВАр бўлган STATCOM ва SVC) қурилмаларини жорий этиш орқали актив қувват йўқотилиши 29 МВт гача ёки 17% га камайиши аниқланди.

7. Ўзбекистон энергетика тизими Тахиатош худудининг оғирлашган ва нормал режимларини ҳисоблаш натижасида қувват исрофларини камайтиришга эришилди ва Беруний подстанциясида FACTS ўрнатишнинг иқтисодий самарадорлиги қуйидагича эканлиги аниқланди:

1044 млн сўм/ой, кучланиш тебраниши $\pm 10\%$ режимида (қурилманинг қуввати 200 МВАр);

93,6 / 117 млн сўм/ой, кучланиш тебраниши $\pm 5\%$ режимида (20 МВАр).

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК DSc.02/30.12.2021.Т.143.01 ПРИ ИНСТИТУТЕ
ПРОБЛЕМ ЭНЕРГЕТИКИ АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН**

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЭНЕРГЕТИКИ
АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

ТАНИРБЕРГЕНОВ РАСУЛБЕК МУРАТБЕКОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ НА ОСНОВЕ УСТРОЙСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

05.05.01 – Энергетические системы и комплексы

Ташкент – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан мером В2022.1.PhD /Т2677.

Диссертация выполнена в Институте проблем энергетики Академии Наук Республики Узбекистан.

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

Научный руководитель:	Хамидов Шухрат Вахидович доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Худаяров Музаффар Бурханович доктор технических наук, профессор Юсупов Дилмурод Турдалиевич доктор философии по техническим наукам, старший научный сотрудник
Ведущая организация:	Ферганский политехнический институт

Защита диссертации состоится «20» февраля 2025 г. в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2021.Т.143.01 при Институте проблем энергетики Академии наук Республики Узбекистан (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 40. Тел./факс: (99855) 520-01-52, e-mail: energetika_in@umail.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института проблем энергетики Академии Наук Республики Узбекистан (регистрационный номер 1). (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 40. Тел./факс: (99855) 520-01-52, e-mail: energetika_in@umail.uz).

Автореферат диссертации разослан «13» февраля 2025 года.

(протокол рассылки № 10 от «12» февраля 2025 года)



Х.М. Муратов

Председатель научного совета по присуждению ученой степени, 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 ученой степени, доктор технических наук, профессор.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии PhD)

Актуальность и необходимость темы диссертации. В мире одним из важных факторов энергоэффективности энергетических систем является повышение уровня управления электрическими режимами посредством интеллектуального воздействия на параметры энергосистемы, а разработкам новым принципам воздействия на параметры электрических сетей придается особое значение. В настоящее время в развитых странах мира «...потери электроэнергии из-за нерационального распределения мощностей в электрических сетях в среднем составляют от 10-15% от общего объема потребляемой электроэнергии»¹. В связи с этим особое внимание уделяется разработке методов и алгоритмов снижения потерь энергии на основе технологии гибких систем электропередачи с внедрением современных устройств регулирования параметров электрических сетей.

В мире проводятся научные исследования, направленные на повышение энергоэффективности и надёжности в процессе передачи активных и реактивных мощностей, а также улучшения управляемости энергосистемы. В этом направлении, в частности приоритетными считаются исследования по разработке новых алгоритмов и методов для управления напряжением, снижения потерь электроэнергии. В то же время актуальными задачами являются разработка и применение новых технологий и систем, способных повысить эффективность и надёжность работы электрической системы, вопросы интегрирования технологии гибких управляемых систем электропередач (Flexible AC Transmission Systems – FACTS) с современными технологиями, как Smart-Grid (умные сети) и ВИЭ, влияющих на развитие электроэнергетики в целом.

В республике проводятся масштабные мероприятия по повышению эффективности использования энергоресурсов, созданию и совершенствованию новых технологических решений и их внедрению в целях снижения себестоимости продукции. В стратегии развития Узбекистана на 2022-2026 годы поставлены задачи, в том числе «Бесперебойное обеспечение экономики электроэнергией, активное внедрение технологий «Зеленой экономики» во все сферы, увеличение энергоэффективности на 20 процентов»². При реализации этих целей, в частности, считается важным проведение научно-исследовательских работ, направленных на решение задач повышения энергоэффективности и надёжности за счет регулирования передаваемых мощностей в электрической сети.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит для практического выполнения задач, поставленных Указами Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии

¹IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) — это крупнейшая в мире профессиональная организация, объединяющая специалистов в области электроники, электротехники, компьютерных технологий, телекоммуникаций, автоматизации и смежных дисциплин. Организация также занимается разработкой технических стандартов и поддерживает инновации через исследовательские и образовательные инициативы.

²Указе Президента Республики Узбекистан № УП-60 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы».

действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», № УП-60 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022 - 2026 годы», № УП-166 от 28 сентября 2023 года «О мерах по проведению очередного этапа реформирования сферы энергетики», и Постановлениями № ПП-4422 от 22 августа 2019 года «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии», № ПП-307 от 6 июля 2022 года «Об организационных мерах по реализации стратегии инновационного развития Республики Узбекистан на 2022 - 2026 годы», а также другими нормативно-правовыми документами, связанных с деятельностью объектов энергетики.

Соответствие исследований приоритетам развития науки и технологии республики. Данное исследование проводилось в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологии республики, предусмотренными в разделе 2: «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. В ведущих научных центрах и высших образовательных учреждениях мира ведутся масштабные исследования по обеспечению энергоэффективности и надёжности энергосистем с применением технологии FACTS, в том числе в Институте систем энергетики имени Меленчёва (ИСЭМ) СО РАН, НИУ «МЭИ» (Россия), Ивановском государственном энергетическом университете» (Россия), Electric Power Research Institute и University of Michigan (США), Stafford shire University (ОБ), Tampere University, Pirkanmaa (Финляндия), Unidad Guadalajara (Мексика), Институте проблем энергетики АН РУз, Ташкентском Государственном техническом университете.

Ряд ученых мира внесли свой вклад по повышению энергоэффективности, надёжности и управления режимами работы электрических сетей, в том числе: Веников В.А., Воропай Н.И., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н., Ситников В.Ф., Розанов Ю.К., Руденко Ю.Н., Соколов Н.И., Чемборисова Н.Ш., Шакарян Ю.Г., Якимец И.В., Acha E., Akagi H., Andersson G., Hingorani N., Liu X., Santos E.V. и др.

Решению научных задач, направленных на разработку и совершенствование методов повышения энергоэффективности, надёжности, устойчивости, расчетов электрических режимов и их оптимизации, посвящены работы ученых Узбекистана: Фазылова Х.Ф., Захидова Р.А., Аллаева К.Р., Насырова Т.Х., Гайибова Т.Ш., Сытдыкова Р.А., Хамидова Ш.В., Шарипова У.Б., Худаярова М.Б., Мирзабаева А.М. В результате научных исследований достигнуты результаты по повышению управляемости режимов, энергоэффективности и надёжности электрических сетей с применением разработанных алгоритмов и методов управления для обеспечения устойчивого функционирования энергосистем. Однако, несмотря на значительные успехи, проведено недостаточно исследований по разработке и развитию методов применения современных устройств регулирования передаваемой мощности, а также влияние разного рода возмущений на энергоэффективность и надёжность

работы электрической сети, математических моделей и симуляционных моделей.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование осуществлялось в рамках научно-исследовательской программы Института проблем энергетики Академии наук Республики Узбекистан на 2022-2025 годы по теме «Разработка методических основ обеспечения надежности и безопасности развития энергетики».

Целью данной диссертационной работы является повышение энергоэффективности энергетической системы с применением технологии гибких управляемых систем электропередач FACTS за счет снижения потерь мощности электрической сети.

Задачи исследования:

исследование выбора типов устройств FACTS для решения задач обеспечения нормативных параметров режима энергосистем;

разработка математических моделей электрических сетей с устройствами FACTS;

разработка алгоритма, блок-схемы и программы расчета установившегося режима электрической сети с устройствами FACTS;

разработка метода определения места установки устройств FACTS для улучшения узловых напряжений и снижения потерь мощности в сетях.

Объектом исследования является электрические сети энергетической системы с устройствами гибких систем электропередачи переменного тока (FACTS).

Предметом исследования является разработка методики внедрения технологии FACTS и создание моделей для повышения энергоэффективности и обеспечения надежности работы электрической сети.

Методы исследования. В ходе исследования были использованы теория и методы системного анализа, математического моделирования, расчета режимов работы электрических систем, оптимального управления, а также современные цифровые модели.

Научная новизна результатов состоит в следующем:

разработаны математические модели на основе метода Ньютона-Рафсона, позволяющие определить влияние устройств регулирования мощности (STATCOM и SVC) на основные режимные параметры электрической сети при компенсации реактивной мощности;

на основе заданных возмущений со стороны генерации и нагрузки в электрических сетях разработаны симуляционные модели устройств STATCOM и SVC для определения функциональных возможностей устройств регулирования мощности FACTS;

разработан метод, позволяющий повысить энергоэффективность энергосистем на основе уравнений Ньютона с учетом изменения параметров установившегося режима сетей с устройствами регулирования мощности (FACTS);

разработан метод определения точки установки устройств FACTS путем расчета режима сети для оценки потерь мощности и параметров отклонения энергосистемы на основе баланса мощностей.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

выявлены возможности повышения энергоэффективности энергосистемы на основе технологии FACTS;

определены зависимость основных параметров устройств FACTS и параметров электрической сети;

изучена технология FACTS как объект управления напряжением и реактивной мощностью, обеспечивающая нормальный режим и энерго-ресурсосбережение технологического процесса при заданных требованиях.

Достоверность результатов исследования основывается на использовании апробированных на практике передовых математических и симуляционных методов моделирования процессов, происходящих в электрических сетях энергетической системы, а также взаимным совпадением расчетов и результатов симулирования.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования объясняется в совершенствовании и развитии методов управления режимами электрических сетей и повышении энергоэффективности. Это достигается путем разработки метода и алгоритма воздействия на параметры электрических сетей с применением интеллектуальных технологий для обеспечения нормативных режимов работы. Практическая значимость разработанных методов и рекомендаций заключается в снижении потерь энергии за счет повышения уровня управления электрическими режимами посредством интеллектуального воздействия на параметры энергосистемы.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных научных результатов по снижению потерь мощности и регулированию уровней напряжения в сети с использованием устройств регулирования мощности в электрических сетях:

алгоритм и программный продукт расчета параметров установившегося режима электрических сетей, рекомендации по снижению потерь мощности и регулированию напряжений при возмущениях на электрическую сеть, внедрены в Северо-Западном узле энергосистемы Узбекистана (справка АО «Национальные электрические сети Узбекистана» за № 01-01-25/182 от 28 октября 2024 года). В результате это позволило увеличить напряжение на шинах подстанции Беруни с 217,8 кВ до 220 кВ и снизить потери мощности по Северо-Западному узлу в среднем на 144 МВт (1,25%);

технология регулирования мощности и напряжения (Flexible AC Transmission Systems) внедрена на подстанции Беруни зоны Тахиаташ АО «Национальные электрические сети Узбекистана» (справка АО «Национальные электрические сети Узбекистана» за № 01-01-25/182 от 28 октября 2024 года). В результате экономическая эффективность, достигнутая за счет снижения средних потерь мощности и повышения энергоэффективности на основе

устройств регулирования мощности в Северо-западном узле энергосистемы Узбекистана, составила 93 600 000 сумов в месяц.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований апробированы в 12 научно-технических конференциях, в том числе на 3 международных и на 9 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано всего 23 научно исследованных работ, в том числе 8 научных статей, из них 3 в международных и 5 в республиканских журналах, рекомендованных для публикации основных научных результатов докторских диссертаций ВАК Республики Узбекистан, 1 монография в научном издании, получены 2 сертификата на программный продукт для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Структура диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 105 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность выбранной темы, описываются цели и задачи, объект и предмет исследования, их соответствие приоритетным направлениям развития науки и техники республики, излагаются научные и практические результаты исследования, освещается научно-практическая значимость полученных результатов, приводится информация по внедрению результатов исследования в практику, опубликованных работ и структура диссертации.

В первой главе диссертации под названием «**Анализ применения технологии управляемых гибких электропередач переменного тока – FACTS**» проанализированы научные исследования, проведенные в области проблем регулирования реактивной мощности, управления основными параметрами, влияние ВИЭ, устойчивости ЭС при недостатке реактивной мощности и влияния FACTS на параметры в электрических сетях.

Рассмотрены вопросы применения технологии FACTS, принцип работы, основные функции и свойства устройств для улучшения режимных параметров и надежности электрических сетей энергосистемы. Характерным для электроэнергетики нашей страны является тот факт, что между узлами нагрузки и электростанциями существуют большие расстояния, что приводит к прохождению потока мощности по очень длинным петлям из-за присутствия большого числа мощных ЛЭП с низким сопротивлением вдоль этих петель. Фактически в каждой системе магистральных ЛЭП существует несколько основных и большое количество второстепенных кольцевых потоков.

Проведенный анализ научной литературы показывает, что технология FACTS позволяет получить различные корректирующие действия в зависимости от условий конкретной задачи управления. Порядка 2/3 мощности компенсирующих устройств в электрических сетях следует устанавливать в сетях 0,4 кВ, 25 % - в сетях 6-10 кВ, остальные 5 % - в сетях 110 кВ и выше.

На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации под названием «**Математическое моделирование энергетической системы с применением FACTS**» описаны основные методы эффективного расчета режимов работ энергосистем с устройствами FACTS технологий.

Методы математического моделирования, используемые для формирования процессов в управляемом силовом оборудовании, можно разделить на две категории: методы последовательного поиска решений, методы одновременного поиска решений.

Последовательный подход выгоден с точки зрения управления реализацией алгоритмов Ньютона-Рафсона.

Метод Ньютона — это итерационный метод для нахождения корней нелинейных уравнений. В контексте STATCOM (FACTS) данный метод применяется для решения системы нелинейных уравнений, возникающих при анализе состояния сети.

Формулировка системы уравнений:

$$F(x) = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} = 0$$

где F - вектор функций, описывающих динамику системы.

Вычисление Якобиана: Определяется матрица Якоби J , которая содержит частные производные функций F по переменным x .

Итерационный процесс: На каждой итерации обновляется приближение к корню:

$$x_{k+1} = x_k - J^{-1}(F(x_k))$$

Этот шаг повторяется, пока изменение x не станет меньше заданного порога.

В модели STATCOM задается начальное состояние системы (напряжение, ток, параметры нагрузки) и применяется метод Ньютона для нахождения нового состояния после изменения в сети (резкое изменение напряжения или нагрузки).

Согласно закону Кирхгофа для узла:

$$F_1: \quad I_{STATCOM} + I_{нагр.} = I_{сеть}$$

где $I_{нагр.}$ — ток нагрузки, а $I_{сеть}$ — ток, поступающий из сети. Это уравнение связывает ток STATCOM с током нагрузки и током, идущим из сети.

Напряжение в точке подключения STATCOM:

$$F_2: \quad U_{нагр.} = U_S - I_{STATCOM} \cdot Z$$

где Z - импеданс линии. Это уравнение описывает изменение напряжения на нагрузке в зависимости от тока STATCOM (рис. 1 и 2).

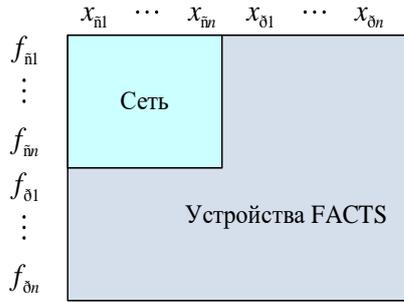


Рис. 1. Структура якобиана ЭЭС с устройствами FACTS

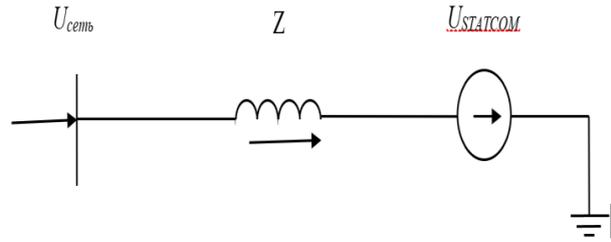


Рис. 2. Схема замещения статического компенсатора реактивной мощности STATCOM

Реактивная мощность, которую генерирует STATCOM:

$$F_3: \quad Q = U_{STATCOM} \cdot I_{STATCOM} \cdot \sin(\theta)$$

где θ — разница фаз между напряжением STATCOM и током, который он генерирует.

STATCOM управляется с помощью системы обратной связи. Уравнения управления включают:

- регулятор напряжения, который сравнивает текущее напряжение на нагрузке с заданным значением и корректирует $U_{STATCOM}$;
- алгоритмы для определения необходимой реактивной мощности Q , основываясь на изменениях нагрузки.

Уравнение для регулятора:

$$F_4: \quad U_{STATCOM} = K(U_{опор.} - U_{нагр.})$$

где K - коэффициент усиления регулятора, а $U_{опор.}$ - опорное напряжение (уставка).

Вычисляется Якобиан- J , с размером матрицы 4×4 , так как 4 уравнения и 4 переменные ($I_{STATCOM}$, $U_{STATCOM}$, $U_{нагр.}$, Q).

Частные производные:

$$\text{Для } F_1: \quad \frac{\partial F_1}{\partial I_{STATCOM}} = 1, \quad \frac{\partial F_1}{\partial I_{нагр.}} = 1, \quad \frac{\partial F_1}{\partial I_{сеть}} = -1, \quad \frac{\partial F_1}{\partial Q} = 0;$$

$$\text{Для } F_2: \quad \frac{\partial F_2}{\partial I_{STATCOM}} = Z, \quad \frac{\partial F_2}{\partial U_{нагр.}} = -1, \quad \frac{\partial F_2}{\partial U_{сеть}} = 1, \quad \frac{\partial F_2}{\partial Q} = 0;$$

$$\text{Для } F_3: \quad \frac{\partial F_3}{\partial I_{STATCOM}} = -U_{STATCOM} \cdot \sin(\theta),$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial U_{STATCOM}} = -I_{STATCOM} \cdot \sin(\theta),$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial \theta} = -QU_{STATCOM} \cdot \cos(\theta), \quad \frac{\partial F_{13}}{\partial Q} = 1;$$

$$\text{Для } F_4: \quad \frac{\partial F_4}{\partial U_{STATCOM}} = 1, \quad \frac{\partial F_4}{\partial U_{нагр.}} = K, \quad \frac{\partial F_4}{\partial U_{опор.}} = -K, \quad \frac{\partial F_4}{\partial Q} = 0.$$

Матрица Якоби (рис. 1)

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ Z & -1 & 1 & 0 \\ -U_{STATCOM} \cdot \sin(\theta) & -I_{STATCOM} \cdot \sin(\theta) & -QU_{STATCOM} \cdot \cos(\theta) & 1 \\ 1 & K & -K & 0 \end{bmatrix}$$

Задаются начальные значения для переменных

$$x = [I_{STATCOM} \quad U_{\text{сеть}} \quad U_{STATCOM} \quad Q]^T$$

Вычисляется $F(x)$ и J , следом находятся корректировки

$$\Delta x = -J^{-1}F(x)$$

обновляются значения переменных

$$x_{\text{нов.}} = x + \Delta x$$

повторяется итерация, пока изменение не станет меньше заданного порога

$$\|F(x_{\text{нов.}})\| < \varepsilon \text{ или } \|x_{\text{нов.}} - x\| < \varepsilon$$

Такая математическая модель электрической сети с STATCOM представляет мощный инструмент для исследования сложных взаимодействий в многопараметрических системах и позволяющий применить современные методы управления реактивной мощностью.

В третьей главе диссертации под названием «Разработка симуляционных моделей схем электрических сетей с устройствами FACTS» проанализирована работа устройств FACTS в симуляционной среде MATLAB/Simulink.

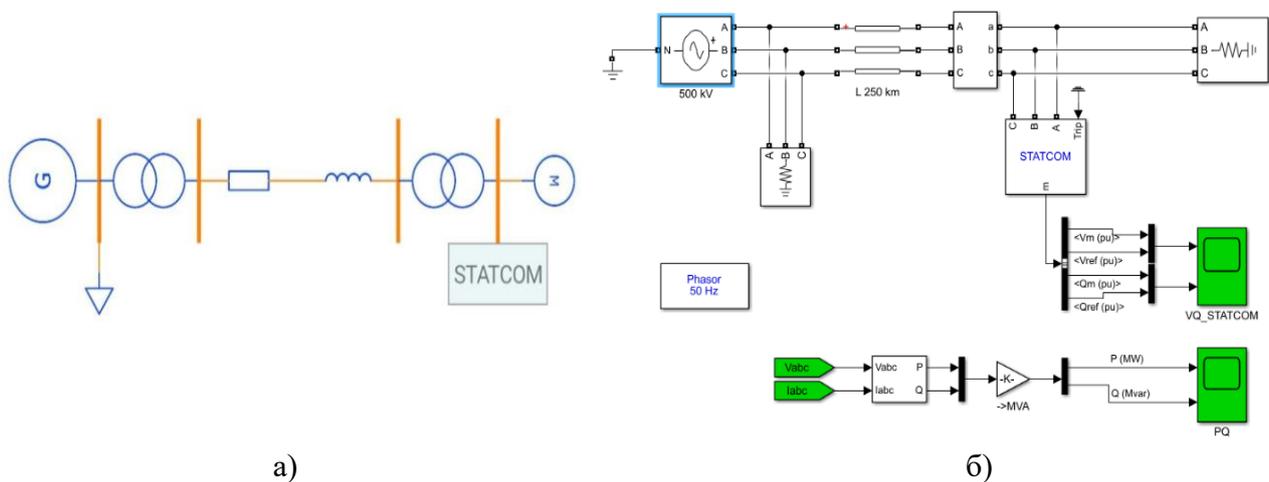


Рис. 3: а) - Схема замещения электросети, б) - модель в среде MATLAB/Simulink

Основным условием симуляции модели устройства STATCOM в MATLAB/Simulink является воздействие на электросеть через источник напряжения, который имитирует высокую сторону напряжения электрической системы. Рассматриваемая сеть состоит из источника питания, линий электропередачи, измерительного устройства, двух нагрузок и устройства STATCOM (рис. 3).

Заданным типом возмущения в модели является колебания напряжения в сети. Через компенсацию реактивной мощности в промежутке 1,5 секунды устройство STATCOM реагирует на изменения параметров сети. Источник напряжения задает возмущение в интервалах времени [0 0,3 0,7 0,9] в секундах, колебание напряжения [1 1,1 0,9 1] в относительных единицах от амплитуды напряжения 500 кВ (рис. 4). STATCOM регулирует напряжение в точке подключения: когда напряжение сети падает, STATCOM начинает генерировать реактивную мощность для поддержания напряжения на требуемом уровне, если

напряжение сети повышается, STATCOM начинает поглощать реактивную мощность, чтобы снизить напряжение.

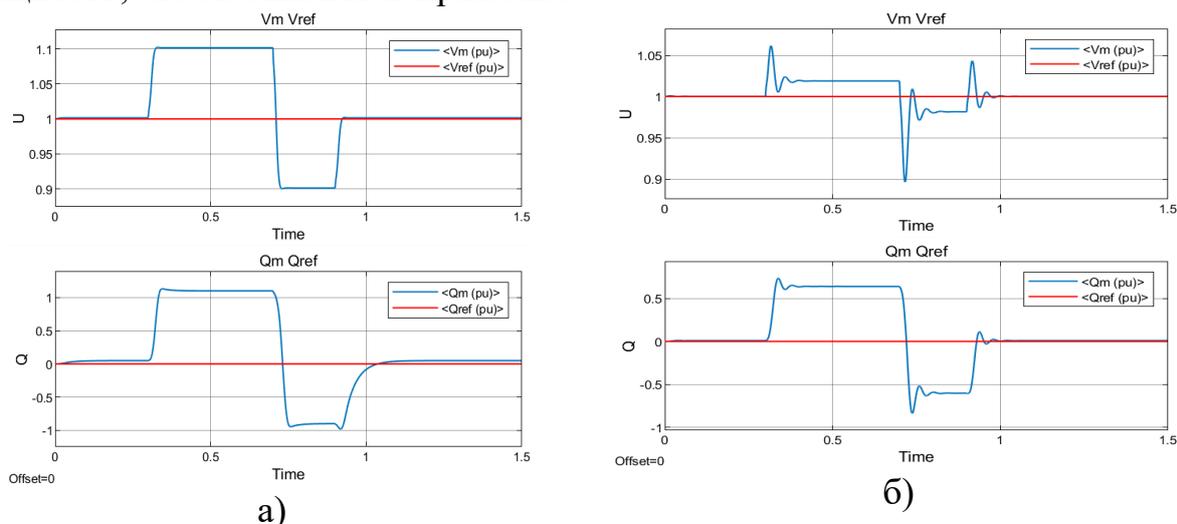


Рис. 4. График основных параметров сети: а) без STATCOM (красным отмечены опорные значения напряжения и реактивной мощности, синим текущие значения в о.е.); б) с STATCOM

В настройках блока STATCOM задаются опорные значения на ее выходные сигналы. Значения базисных параметров задается через блок «Measurements», где $S_б=1000$ МВА, $V_б=500$ кВ. В таблице 1 приведена сравнение пиковых значений скачков напряжения и реактивной мощности.

Таблица 1

Пиковые значения параметров сети
а) с устройством STATCOM

STATCOM	0-0.3 с.	0.3-0.7 с.	0.7-0.9 с.	0.9-1.5 с.
V_m (о.е. / кВ)	1 / 500kV	1.061 / 530,5kV	-(0.9 / 450kV)	1.043 / 521,5kV
V_{ref} (о.е. / кВ)	1 / 500kV	1 / 500kV	1 / 500kV	1 / 500kV
Q_m (о.е. / МВА)	0 / 0 MVA	0.736 / 736 MVA	-(0.837 / 837 MVA)	-(0.6 / 600 MVA)
Q_{ref} (о.е. / МВА)	-	-	-	-

б) без устройства STATCOM

Без FACTS	0-0.3 м	0.3-0.7 с.	0.7-0.9 с.	0.9-1.5 с.
V_m (о.е. / кВ)	1 / 500kV	1.093 / 546.5kV	-(0.9 / 450kV)	-(0.914 / 457kV)
V_{ref} (о.е. / кВ)	1 / 500kV	1 / 500kV	1 / 500kV	1 / 500kV
Q_m (о.е. / МВА)	0 / 0 MVA	1.12 / 1120 MVA	-(0.963 / 963 MVA)	-(0.986 / 986 MVA)
Q_{ref} (о.е. / МВА)	-	-	-	-

Как видно из полученных результатов, STATCOM способствует быстрому затуханию скачков:

- сеть с STATCOM стабилизируется уже на 0.93 секунде;
- сеть без STATCOM стабилизируется на 1.1 секунде.

В четвертой главе диссертации под названием «Разработка алгоритма, блок схема и программы расчета установившегося режима электрической сети с устройствами FACTS» разработана блок схема и программа расчета уравнения узловых напряжений (УУН), метод определения места установки устройств регулирования мощности, проведена оценка технико-экономической эффективности применения технологии FACTS.

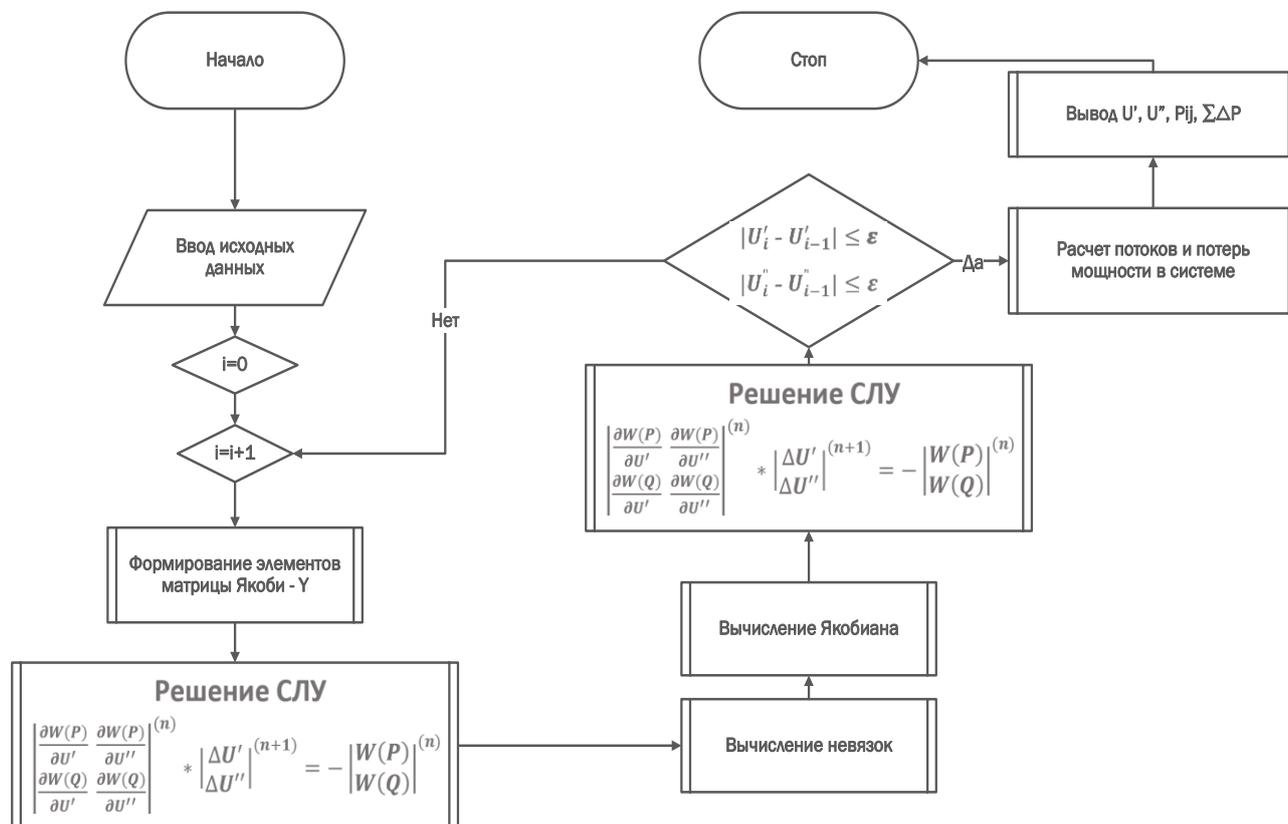


Рис. 5. Блок схема разработанной программы расчета электрического режима методом УУН

Метод определения точки установки устройства FACTS. Техническая целесообразность применения тех или иных устройств FACTS устанавливается на основании результатов расчетов установившихся режимов, устойчивости энергосистемы и переходных процессов при разных возмущениях в энергосистеме.

Чтобы найти оптимальную точку установки устройства FACTS необходимо рассчитать установившийся режим электрической сети. Для решения этой задачи был выбран метод узловых напряжений (УУН), на основе которого разработаны алгоритм, блок схема и программа расчета электрического режима методом Ньютона с уравнениями баланса мощности в декартовых и полярных координатах (рис. 5).

При численном решении нелинейных узловых уравнений (УУ) установившегося режима можно использовать различные итерационные методы, которые условно делятся на четыре группы: методы прямой итерации; методы, основанные на линеаризации нелинейных УУ на каждом шаге (метод Ньютона, градиентный и др.) с использованием Якобиана УУ.

Таблица 2

Расчёт потерь в 32-узловой схеме электросети без устройств FACTS

Ветвь i-j	U _i , кВ	U _j , кВ	R, ом	X, ом	Z, ом	Ктр	I _{ij} , А	P _{ij} в i	P _{ij} в j	Потери МВт
0-1	525,00	514,01	3,00	32,50	32,64	1	0,34	176,7	173,08	3,70
1-2	514,01	494,98	0,58	61,10	61,10	1	0,31	160,0	154,16	5,93
2-3	494,98	260,48	1,45	56,75	56,77	1	0,00	0,58	0,58	0,00
2-4	494,98	126,82	1,45	56,75	56,77	3,9	0,01	3,33	3,33	0,00
3-5	245,48	257,88	0,60	4,13	4,17	1	0,62	162,3	160,72	1,62
.....
15-29	519,41	518,60	1,53	47,00	47,02	1	0,02	8,77	8,76	0,01
29-30	518,60	517,60	0,58	61,10	61,10	1	0,02	8,32	8,31	0,02
30-31	517,60	10,13	2,90	113,5	113,54	50	0,01	4,92	4,91	0,01
30-32	517,60	118,00	1,45	56,75	56,77	4,7	0,00	0,00	0,00	0,00
							Общие потери [МВт]			35,11

Таблица 3

Расчёт потерь в 32-узловой схеме электросети с STATCOM и SVC

Ветвь i-j	U _i , кВ	U _j , кВ	R, ом	X, ом	Z, ом	Ктр	I _{ij} , А	P _{ij} в i	P _{ij} в j	Потери МВт
0-1	525,0	519,1	3,0	32,5	32,6	1,0	0,2	94,6	93,5	1,1
1-2	519,1	501,0	0,6	61,1	61,1	1,0	0,3	154,4	149,0	5,4
2-3	501,0	263,6	1,5	56,8	56,8	1,9	0,0	0,6	0,6	0,0
2-4	501,0	128,4	1,5	56,8	56,8	3,9	0,0	0,6	0,6	0,0
3-5	223,6	261,1	0,6	4,1	4,2	1,0	0,6	159,2	157,7	1,5
....
15-29	532,7	531,9	1,5	47,0	47,0	1,0	0,0	8,8	8,8	0,0
29-30	531,9	531,0	0,6	61,1	61,1	1,0	0,0	8,2	8,2	0,0
30-31	531,0	10,6	2,9	113,5	113,5	50,0	0,0	-0,2	-0,2	0,0
30-32	531,0	113,0	1,5	56,8	56,8	4,7	0,0	0,4	0,4	0,0
							Общие потери [МВт]			29,0

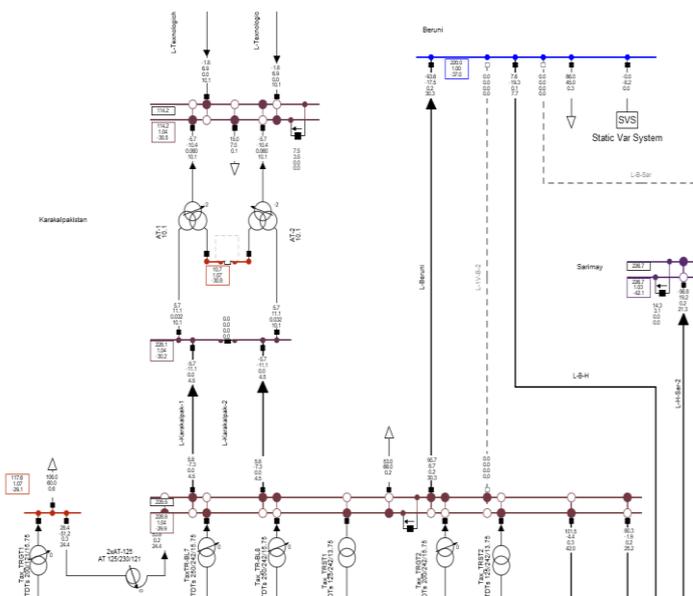
Для анализа работы устройств STATCOM и SVC принята 32 узловая тестовая схема.

Параметры установившегося режима тестовой схемы сети, полученные после решения УУ (табл. 2 и 3) показывают общие потери и точки (узлы) где колебания параметров максимальны. В зависимости типа возмущения подбирается устройство FACTS.

Анализ расчётов показывает, что узлы 5 и 13 имеют наибольшие отклонения. Установка STATCOM в узел 5 и SVC в узел 13 привели к стабилизации напряжения в пределах нормативных, сокращению суммарных потерь мощности в сети. При этом STATCOM и SVC действуют как устройства быстрого реагирования для поддержания устойчивости электрической сети. Для уменьшения потерь в объединенной энергосистеме Узбекистана (ОЭС), повышения энергоэффективности и надежности электрической сети энергетической системы: проанализированы статистические параметры максимальных и минимальных режимов, в том числе Северо-Западная зона (Тахиаташская зона) ОЭС Узбекистана; определена “проблемная” шина, где колебания напряжения являются максимальными в зоне Тахиаташской энергосистемы; по результатам исследования выбраны тип и мощность установки FACTS; определены потери мощности в Тахиаташской зоне с учетом

установки устройства FACTS с учетом серии расчетов максимальных и минимальных режимов энергосистемы.

Техническая целесообразность применения тех или иных устройств FACTS устанавливается на основании параметров установившихся режимов, устойчивости энергосистемы и переходных процессов при разных возмущениях в энергосистеме. Самая большая просадка напряжения наблюдается на шинах питающей Берунийской подстанции (ПС) класса 220 кВ и фактически составляет 217,8 кВ (рис. 6).



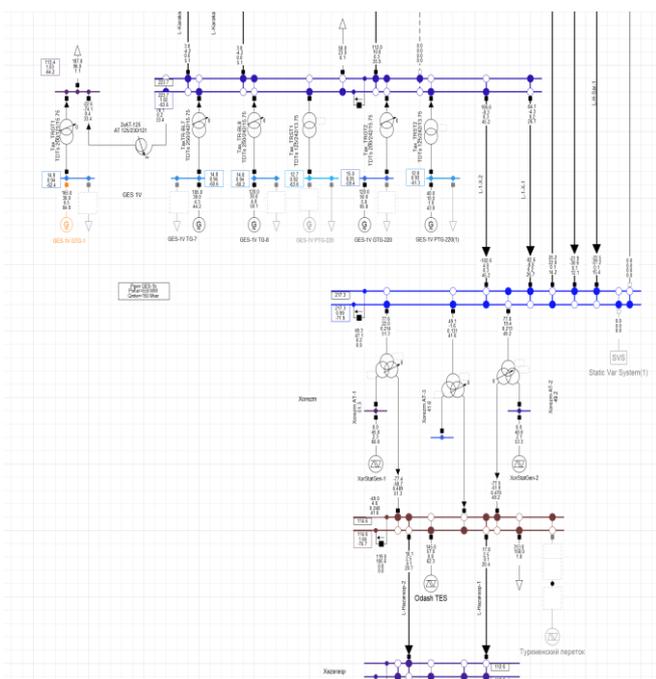
Name	Generators, P MW	Loads, P MW	Losses, P MW
Zona Alm_Ata	774.1	1306.4	54.7
Zona Fergana	896.0	1764.0	21.4
Zona Jambil	477.8	501.0	5.3
Zona Sam_Bux	2221.0	3136.0	62.8
Zona Sev_Kazax	0.0	0.0	5.9
Zona Sev_Kirg	145.0	616.0	8.0
Zona Sev_Tadjik	0.0	180.0	1.0
Zona Shimkent	370.0	922.0	11.1
Zona Surxan	115.0	491.0	5.1
Zona Tashkent	5216.0	3240.0	60.6
Zona Taxiataash	712.0	588.0	16.2

a)

Name	Generators, P MW	Loads, P MW	Losses, P MW
Zona Alm_Ata	774.1	1306.4	54.7
Zona Fergana	896.0	1764.0	21.4
Zona Jambil	477.8	501.0	5.3
Zona Sam_Bux	2221.0	3136.0	62.7
Zona Sev_Kazax	0.0	0.0	5.9
Zona Sev_Kirg	145.0	616.0	8.0
Zona Sev_Tadjik	0.0	180.0	1.0
Zona Shimkent	370.0	922.0	11.1
Zona Surxan	115.0	491.0	5.1
Zona Tashkent	5216.0	3240.0	60.6
Zona Taxiataash	712.0	588.0	16.0

б)

Рис. 6. Схема Тахияташской зоны и его параметры: а) без устройства FACTS, б) с устройством FACTS



Name	Generators, P MW	Loads, P MW	Losses, P MW
Zona Alm_Ata	917.0	1967.9	107.0
Zona Fergana	1050.0	2463.0	39.7
Zona Jambil	640.0	551.2	5.4
Zona Sam_Bux	2815.0	4154.0	134.6
Zona Sev_Kazax	0.0	0.0	9.0
Zona Sev_Kirg	151.0	1201.0	25.7
Zona Sev_Tadjik	0.0	180.0	1.0
Zona Shimkent	450.0	1230.8	29.9
Zona Surxan	155.0	655.0	7.4
Zona Tashkent	7315.0	4206.0	111.1
Zona Taxiataash	812.0	841.0	16.0

a)

Name	Generators, P MW	Loads, P MW	Losses, P MW
Zona Alm_Ata	917.0	1967.9	107.0
Zona Fergana	1050.0	2463.0	39.7
Zona Jambil	640.0	551.2	5.4
Zona Sam_Bux	2815.0	4154.0	134.4
Zona Sev_Kazax	0.0	0.0	9.0
Zona Sev_Kirg	151.0	1201.0	25.7
Zona Sev_Tadjik	0.0	180.0	1.0
Zona Shimkent	450.0	1230.8	29.9
Zona Surxan	155.0	655.0	7.4
Zona Tashkent	7315.0	4206.0	111.0
Zona Taxiataash	812.0	841.0	15.7

б)

Рис. 7. Схема ПС Хорезм и его параметры: а) без устройства FACTS, б) с устройством FACTS

Для понижения потерь и поддержания уровня напряжения в допустимых пределах, по результатам серии расчётов выбрано устройство FACTS с мощностью компенсации ± 20 МВАр. Параметры сети с устройством FACTS на шинах ПС Беруни показаны на рисунке 6 (также были проведены расчеты для ПС Хорезм с мощностью устройства ± 20 МВАр, данные приведены на рисунке 7).

В таблице 4 приведена оценка влияния устройства FACTS на Тахиаташскую зону ОЭС Узбекистана.

Таблица 4

Влияние устройства FACTS на Тахиаташскую зону ЭС Узбекистана при режиме с колебанием напряжения $\pm 5\%$

Полученные результаты	Суммарные потери		Разница в потерях
	без устройства FACTS	с устройством FACTS	
При максимальном режиме сети, [МВт]	15,6	15,4	0,2
При минимальном режиме сети, [МВт]	16,2	16	0,2
Среднее значение потерь, [МВт]	15,9	15,7	0,2
Средние месячные потери, [тыс. кВт*ч]	11448	11412	144

Исходя из результатов, показанных в таблице 4, разница потерь электроэнергии за месяц составила:

$$W_3 = W_1 - W_2 = (P_{\text{ср.1}} - P_{\text{ср.2}}) \times t_{\text{мес.ч.}} = (15,9 - 15,7) \times 24 \times 30 = 144 \text{ МВт*ч}$$

где $P_{\text{ср.1}}$ и $P_{\text{ср.2}}$ – средние потери мощности за единицу времени с и без устройств FACTS; $t_{\text{мес.ч.}}$ – число часов за месяц; W_1 и W_2 – годовые потери электроэнергии с и без устройств FACTS (разница потерь 1,25 %).

Ожидаемый экономический эффект за месяц от установки FACTS при среднем тарифе для промышленности и населения $T = 650 \frac{\text{сум.}}{\text{кВт*ч}}$ составляет:

$$\mathcal{E} = T \times W_3 = 650 \frac{\text{сум.}}{\text{кВт*ч}} \times 144 \times 10^3 \text{ кВт*ч} = 93,6 \text{ млн сум.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований диссертационной работы (PhD) на тему «Повышение энергоэффективности энергетических систем на основе устройств регулирования мощности»:

1. Определены вопросы применения технологии FACTS в современных электрических сетях. Проведен анализ функциональных возможностей технологии FACTS, их влияние на стабильность и эффективность работы электрической сети. В результате выявлена высокая эффективность применения технологии FACTS для повышения режимной устойчивости, управляемости электрическими сетями и достижения экономических выгод (снижение потерь электроэнергии, улучшение качества электроснабжения, сокращение затрат на строительство новых энергетических объектов).

2. Изучена совокупность устройств FACTS, предназначенных для контроля и управления режимными параметрами электрических сетей. В результате выявлено, что применение устройств FACTS способствует: повышению надежности и гибкости управления энергосистемой; оптимальному регулированию напряжений и управлению потоками мощности, уменьшению

потерь электроэнергии в электрических сетях и повышению энергоэффективности; увеличению пропускной способности линий электропередачи и уменьшению вероятности перегрузок электрических сетей.

3. Разработаны симуляционные модели электрических сетей с различными типами устройств FACTS в программной среде MATLAB/Simulink. В результате выявлены возможности применения основных типов устройств FACTS: для эффективного управления режимами электрических сетей; выполнения регулировочных и оптимизирующих воздействий, управляемости и эффективности функционирования энергосистемы.

4. Разработаны математические модели расчета потоков мощности для электрических сетей с устройствами FACTS. В результате установлено, что устройства FACTS позволяют воздействовать на динамические характеристики сети, диапазоны регулирования напряжений, активной и реактивной мощности.

5. Разработанный алгоритм и программа расчета электрических режимов уравнениями узловых напряжений обеспечивают определение параметров установившегося режима сети. В результате, использование данных параметров позволяет определить узлы энергосистемы с отклонениями напряжений от нормативных значений, рассчитать перетоки и потери мощности в элементах сети.

6. Выполненные тестовые расчёты показали эффективность работы устройств FACTS и их существенное воздействие на режимные параметры сети. Для 32-узловой схемы потери активной мощности в электрической сети составили 35 МВт, в результате внедрения устройств FACTS (STATCOM и SVC с общей мощностью 305 МВАр) потери активной мощности снизились до 29 МВт, или на 17%.

7. В результате расчета утяжеленных и нормальных режимов Тахиаташской зоны энергосистемы Узбекистана достигнуто уменьшение потерь мощности и определено, что экономический эффект от установки FACTS на подстанции Беруни составляет:

1044 млн сум/месяц при режиме с колебанием напряжения $\pm 10\%$ (мощность устройства 200 МВАр);

93,6 / 117 млн сум/месяц при режиме с колебанием напряжения $\pm 5\%$ (20 МВАр).

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING DEGREE OF DOCTOR OF
SCIENCE DCs.02/30.12.2021.T.143.01 AT INSTITUTE OF ENERGY
PROBLEMS OF ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN**

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

TANIRBERGENOV RASULBEK MURATBEKOVICH

**ENHANCING THE ENERGY EFFICIENCY OF ENERGY SYSTEMS BASED
ON POWER REGULATION DEVICES**

05.05.01 – Energy systems and complexes

**DISSERTATION ABSTRACT OF DOCTORAL OF PHILOSOPHY (PhD)
ON TECHNICAL SCIENCES**

Tashkent – 2025

The topic of the dissertation of the Doctor of Philosophy (PhD) in technical sciences is registered with the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under the number B2022.1.PhD/T2677.

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 supervisor: **Khamidov Shukhrat Vakhidovich**
Doctor of technical sciences, professor

Official opponents: **Khudayarov Muzaffar Burkhanovich**
Doctor of technical sciences, professor

Yusupov Dilmurod Turdalievich
PhD, senior researcher

Leading organization: **Fergana Polytechnic Institute**

The dissertation defense will take place on "28" February, 2025, at 10⁰⁰ o'clock during the meeting of the 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: 100125, Tashkent, Durmon Yuli Street, 40. Tel./Fax: (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 1). (Address: 40, Durmon yuli str., Tashkent, 100125, Uzbekistan. Phone number: (99855) 520-01-52).

Abstract of the dissertation was distributed on «13» February 2025 year.
(mailing report № «1» on «12» February 2025 year)



Kh.M. Muratov
Chairman of the Scientific Council for the award of scientists 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 (abstract of PhD dissertation)

The objective of this dissertation is to enhance the energy efficiency of the power system through the application of Flexible AC Transmission Systems (FACTS) technology, by reducing power losses in the electrical network.

Tasks of research:

investigation of the selection of FACTS device types to ensure compliance with standard operating parameters of the power system;

development of mathematical models for electrical networks incorporating FACTS devices;

development of an algorithm, flowchart, and program for calculating the steady-state operation of an electrical network with FACTS devices;

development of a method for determining the optimal placement of FACTS devices to improve nodal voltages and reduce power losses in networks.

The object of the research is the electrical networks of the power system equipped with Flexible AC Transmission Systems (FACTS) devices.

The subject of the research is the development of a methodology for implementing FACTS technology and the creation of models to enhance energy efficiency and ensure the reliable operation of the electrical network.

Research methods. The research utilized the theory and methods of systems analysis, mathematical modeling, power system operation mode calculations, optimal control, as well as modern digital models.

Scientific novelty of the research consists in the following:

mathematical models based on the Newton-Raphson method have been developed to determine the impact of power regulation devices (STATCOM and SVC) on the key operating parameters of the electrical network during reactive power compensation;

simulation models of STATCOM and SVC devices have been developed based on predefined disturbances from generation and load in electrical networks to assess the functional capabilities of FACTS power regulation devices;

a method has been developed to enhance the energy efficiency of power systems based on Newton's equations, taking into account changes in the steady-state parameters of networks with FACTS power regulation devices;

a method for determining the optimal placement of FACTS devices has been developed by calculating the network operating conditions to evaluate power losses and system deviation parameters based on power balance analysis.

The practical results of the research are as follows:

the potential for enhancing the energy efficiency of the power system based on FACTS technology has been identified;

the relationship between the main parameters of FACTS devices and the parameters of the electrical network has been determined;

the FACTS technology has been studied as a voltage and reactive power control object, ensuring normal operation and energy-resource conservation of the technological process under specified requirements.

Implementation of the research results. Based on the obtained scientific results for reducing power losses and regulating voltage levels in the network using power

regulation devices in electrical networks:

the algorithm and software product for calculating the parameters of the steady-state operation of electrical networks, along with recommendations for reducing power losses and regulating voltages during disturbances in the electrical network, have been implemented in the north-western hub of the power system of Uzbekistan (reference from JSC "National electric networks of Uzbekistan" no. 01-01-25/182, dated October 28, 2024). as a result, this allowed for an increase in the voltage at the busbars of the Beruni substation from 217,8 kV to 220 kV and reduced power losses in the north-western hub by an average of 144 MW (1.25%);

the power and voltage regulation technology (Flexible AC Transmission Systems) has been implemented at the Beruni substation in the Takhiyatash zone of JSC "National electric networks of Uzbekistan" (reference from JSC " National electric networks of Uzbekistan" no. 01-01-25/182, dated October 28, 2024). as a result, the economic efficiency achieved through the reduction of average power losses and the improvement of energy efficiency based on power regulation devices in the north-western hub of the power system of Uzbekistan amounted to 93,600,000 sums per month.

Testing of the research results. The research results have been tested in 12 scientific and technical conferences, including 3 international and 9 national scientific and practical conferences.

Publication of the research results. A total of 23 scientific works have been published on the dissertation topic, including 8 scientific articles, 3 of which were published in international journals and 5 in national journals recommended for publication of the main scientific results of doctoral dissertations by the Higher Attestation Commission (HAC) of the Republic of Uzbekistan. Additionally, 1 monograph was published in a scientific edition, and 2 certificates were obtained for the software product for computer systems.

Volume and structure of the dissertation. The structure of the dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references, and appendices. The total volume of the dissertation is 105 pages.

ЭЪЛОН КИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Танирбергенов Р.М., Хамидов Ш.В. «Современные управляемые источники реактивной мощности энергосистем». Монография. Ташкент, Изд. «Fan ziyosi». 2022. –90 с. ISBN 978-9943-7467-1-8.

2. Хамидов Ш.В., Танирбергенов Р.М. Комплексное применение устройств FACTS и асинхронизированных машин в гидроэлектростанциях // Научно-технический журнал АО «Узбекгидроэнерго», Узбекгидроэнергетика, №4, 2022, –С.23-25. (05.00.00-№21).

3. Хамидов Ш.В., Танирбергенов Р.М. Моделирование статического компенсатора реактивной мощности (SVC) в среде MATLAB/Simulink // Москва: Universum: Технические науки: электронный научный журнал, 2024. 4(121). –С.

4. Танирбергенов Р.М. Моделирование устройства STATCOM при компенсации реактивной мощности в среде Matlab/Simulink // Scientific-technical journal (STJ FerPI, ФарПИ ИТЖ, 2024, №5. –С.61-66. (05.00.00 –№20).

5. Khamidov Sh., Tanirbergenov R.M. Normative aspects of the introduction of renewable energy sources in the energy system // Technical Science and Innovation, TSTU. 2020, No2, –102-107pp. (05.00.00-№16).

6. Tanirbergenov Rasul, Suyarov Anvar, Jalilov Urinboy. Application of Solar and Wind Units as Primary Energy Sources in Autonomous Networks // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. Vol. 7, Issue 9, September 2020. –15003-15006pp. www.ijarset.com 15003. (SJIF Impact Factor - 6, 684, №23)

7. Танирбергенов Р.М., Базарбаева Ф.М. Особенности прерывистых ВИЭ (IRES) // Вестник КГУ им. Бердаха. № 2 (47) 2020. –С.36-39. (05.00.00-№27).

8. Shukhrat Khamidov, Rasulbek Tanirbergenov. Analysis of the STATCOM device during mains voltage fluctuations in the MATLAB/SIMULINK environment // EPRA International Journal of Research and Development (IJRD). Volume: 9, Issue: 4, April 2024. –313-318 pp. Journal DOI: <https://doi.org/10.36713/epra2016>, <https://eprajournals.com>. (SJIF Impact Factor 8, 675 №23).

9. Nasirov T.X., Khamidov SH.V., Tanirbergenov R.M. «Improving energy efficiency in the Republic of Uzbekistan on the basis of modern energy-saving technologies» // Science and Education in Karakalpakstan ISSN 2181-9203. №2/1 (40) 2024. –151-157pp. (05.00.00-№27).

II бўлим (II часть; II part)

10. Nasirov T.Kh., Trofimov G.G., Khamidov Sh.V., Tanirbergenov R.M. Problems of ensuring reliability and sustainable development of the United energy system of Central Asia under the conditions of energy consumption growth // International Conference E3S Web of Conferences 461, 01038 (2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346101038> RSES 2023. –1-5 pp. (база SCOPUS)

11. Хамидов Ш.В., Танирбергенов Р.М. Расчёт режима электрической сети с записью узловых уравнений в декартовых координатах // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU № 42370, 17.09.2024.

12. Хамидов Ш.В., Танирбергенов Р.М., Нормуратов Б.Р. Расчёт режима электрической сети с записью узловых уравнений в полярных координатах // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU № 42640 03.10.2024.

13. Хамидов Ш.В., Танирбергенов Р.М. Надёжность энергосистем с устройствами FACTS // Сб. материалов Международной научно- практической конференции «Актуальные проблемы энергетики в условиях цифровизации экономики» 24-26 ноября 2022 года, Бухара. –С.161-164

14. Хамидов Ш.В., Танирбергенов Р.М. Современные источники реактивной мощности и их применение при управлении потоками мощности в энергосистемах // Сб. материалов Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – залог прогресса и процветания», посвящённой 5-летию Навоийского отделения АНРУз. - Навои, 2022. –С.168-171.

15. Хамидов Ш.В., Танирбергенов Р.М. Применение последовательных устройств технологии FACTS на базе конденсаторов с тиристорным управлением TCSC для повышения надёжности энергосистемы // Республиканская научно-практическая конференция «Применение современных методов в развитии науки». Ташкент, 2022. №22. –С.227-239. WWW.ACADEMICS.UZ

16. Хамидов Ш.В., Танирбергенов Р.М. Применение интеллектуальных систем управления на базе технологии FACTS в энергетике Узбекистана // Международная научно-техническая конференция: «Актуальные вопросы энергоэффективности автоматизированных электромеханических и электротехнологических систем», II-ТОМ, 3-4 марта 2022 года. –С.304-306.

17. Хамидов Ш.В., Танирбергенов Р.М., Нормуратов Б.Р. Оптимизация электрической сети с управляемыми системами электропередач переменного тока // Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы цифровизации и повышения энергоэффективности автоматизированных электромеханических и электротехнологических систем». Ташкент, 2023. том 2. –С. 44-47.

18. Хамидов Ш.В., Танирбергенов Р.М., Нормуратов Б.Р. Энергетика тизимида ишловчи кўп функцияли FACTS курилмалари // International Scientific-practical Conference «Prospects for the development of digital Energy Systems, problems and solutions for obtaining renewable Energy-2023». Karshi. -pp. 406-409.

19. Хамидов Ш.В., Танирбергенов Р.М. Гибкость энергосистемы как основной критерий при развитии сектора ВИЭ. Институт управления и социально-экономического развития // Международное научно-практическое периодическое сетевое издание. Вып. 5(45). 2020. <http://forum-nauka.ru> –С.23-27.

20. Танирбергенов Р.М. Анализ солнечных установок в качестве первичных источников энергии // «Электротехника, электромеханика,

электротехнологиялар ва электротехника материаллари» республика илмий-техник анжумани. 2021 йил 22-декабр, Андижон ш., –С.34-36.

21. Хамидов Ш.В., Танирбергенов Р.М., Нормуратов Б.Р. «Препятствия при интеграции ВИЭ в энергосистему» // КарГУ имени Бердаха, материалы республиканской конференции (с участием стран СНГ), «Современные проблемы физики полупроводников» СПФП-2019. Нукус-2019. –С. 86-88.

22. Хамидов Ш.В., Танирбергенов Р.М., Нормуратов Б.Р. «Управляемые гибкие электропередачи переменного тока (FACTS)» // КарГУ имени Бердаха, материалы республиканской конференции (с участием стран СНГ), «Современные проблемы физики полупроводников» СПФП-2019. Нукус-2019. – С. 78-82.

23. Танирбергенов Р.М., Базарбаева Ф.М. «Ключевые факторы для интеграции в энергосистему возобновляемых источников энергии в крупных Объемых» // Электронное научно-практическое периодическое издание «Экономика и социум», ISSN 2225-1545, Выпуск №6(73) (июнь, 2020). Часть 2. Сайт: <http://www.iupr.ru>. –С. 370-372.

Босишга рухсат этилди: 12.02.2025 йил.
Бичими 60x84 1/16, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи: 2,75. Адади 50. Буюртма № 25.
Тошкент тўқимачилик ва енгил саноат институти босмахонаси.
Босмахона манзили: 100100, Тошкент ш., Шохжаҳон-5.

