

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

ҚАРШИ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

КУРБОНОВ НАЖМИДДИН АБДУХАМИДОВИЧ

**ИККИ ЎҚИ БЎЙИЧА ҚЎЗГАТИЛАДИГАН СИНХРОН
КОМПЕНСАТОРНИНГ ИШЛАШ ИШОНЧЛИЛИГИНИ ОШИРИШ**

05.05.01 – Энергетика тизимлари ва мажмуалари

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

Қарши – 2025

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

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

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

Курбонов Нажмиддин Абдухамидович

Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ишлаш
ишончлилигини ошириш..... 5

Курбонов Нажмиддин Абдухамидович

Повышение надёжности работы синхронного компенсатора с двухосным
возбуждением 29

Kurbonov Najmiddin Abdukhamidovich

Increasing the reliability of a synchronous compensator with biaxial excitation
..... 51

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works..... 55

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

ҚАРШИ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

КУРБОНОВ НАЖМИДДИН АБДУХАМИДОВИЧ

**ИККИ ЎҚИ БЎЙИЧА ҚЎЗГАТИЛАДИГАН СИНХРОН
КОМПЕНСАТОРНИНГ ИШЛАШ ИШОНЧЛИЛИГИНИ ОШИРИШ**

05.05.01 – Энергетика тизимлари ва мажмуалари

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

Қарши – 2025

КИРИШ (докторлик (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда электр энергетикани ривожлантиришнинг замонавий талаби истеъмолчиларни электр энергия билан узлуксиз таъминлаш ишончлилигини ошириш, тизимда электр энергия мувозанатини сақлашга эришиш учун синхрон компенсаторларга ҳам алоҳида аҳамият берилмоқда. Ҳозирги кунда ривожланган мамлакатларда «...электр тармоғи кучланишини тартибга солувчи икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон компенсаторлар устида кенг қамровли тадқиқотлар олиб борилмоқда. Анъанавий синхрон компенсаторлар реактив қувват истеъмолининг чекланган диапазони 40% гача, шунингдек, икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг реактив қувват истеъмоли 100% ни ташкил этади»¹. Бу борада жумладан, авария ҳолатида тизимда барқарорликни сақлаб қолиш учун икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон компенсаторларнинг ишончли ишлашини тадқиқ қилишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Электр тармоғининг истеъмолчилар уланган жойида кучланиш қийматини бир хилда ушлаб туриш ҳамда истеъмолчиларнинг қувват коэффициентини оширишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда электр энергияни ишлаб чиқариш, узатиш ва тақсимлаш тизимларида юз берадиган носозлик жараёнларни ўрганишга қаратилган тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда, жумладан, икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон компенсаторларнинг ишончли ишлашини таҳлил қилиш бўйича тадқиқотлар устувор ҳисобланади. Дунё иқтисодиётининг муҳим тармоқларидан бири бўлган энергетика соҳасидаги бўйлама ва кўндаланг ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон компенсаторларнинг ишончли ишлашини таъминлаш вазифаларини ўрганиш муҳим аҳамият касб этади. Ушбу вазифани ҳал қилишнинг самарали усули, икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон компенсатор (ИЎБҚСК) ва асинхронлаштирилган синхрон компенсатор (АСК) лардан фойдаланишдир. Шу билан бирга, электр узатиш тармоқларидаги ўткинчи жараёнлар вақтида шикастланишларсиз, истеъмолчиларни сифатли электр энергия билан таъминлаш самарадорлигини ошириш долзарб вазифалардан ҳисобланади.

Республикамизда истеъмолчиларни электр энергияси билан сифатли ва барқарор таъминлашда янги технологияларни ишлаб чиқиш ҳамда уларни иқтисодиёт тармоқларига тадбиқ этиш чора-тадбирлари амалга оширилмоқда. 2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг 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 бўйича вазифалар белгиланган. Мазкур вазифаларни амалга оширишда, жумладан икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон компенсаторларнинг чуқур реактив энергия истеъмол қилиш имконини яратувчи имитацион моделини ишлаб чиқиш, синхрон компенсаторнинг кўндаланг кўзғатиш тизимини

¹<http://www.energetik.energy-journals.ru/index.php/EN/article/view/367>.

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

синусоидал ўлчов датчиги орқали ростлаб таъминлайдиган қурилманинг принципиал схемасини ишлаб чиқиш, синхрон компенсаторлар тоқларининг келтириш коэффициентини аниқлаш усулини ишлаб чиқиш ва икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторларнинг ишлаш ишончилигини ошириш муҳим масалалардан бири ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон «2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида»ги Фармони ва 2023 йил 28 сентябрдаги ПФ-166-сон «Энергетика соҳасини ислоҳ 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. Электр тармоғининг исталган жойида кучланишнинг қийматини бир хилда ушлаб туриш ва истеъмолчиларнинг қувват коэффициентини ошириш ҳамда синхрон компенсаторларнинг ўткинчи режимларида юз берадиган авария ҳолатларини бартараф этиш борасида бажарилаётган илмий ишлардан бири, икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ишончли ишлашини ўрганишга йўналтирилган илмий-тадқиқотлар дунёнинг етакчи илмий марказларида ва олий таълим муассасаларида, жумладан University of Michigan (АҚШ), California Institute of Technology (АҚШ), University of Waterloo (Канада), Polytechnic University of Milan (Италия), Tokyo technology institute (Япония), Бутун Россия электроэнергетика илмий-тадқиқот институти (ВНИИЭ, Россия), Миллий тадқиқот университети (МЭИ, Россия) ва ТДТУ (Ўзбекистон) кенг қамровли илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон машиналар ва асинхронлаштирилган синхрон машиналар ривожига ҳам уларнинг назариясини яратишда М.М. Ботвинник, Ю.Г. Шакарян, Н.И. Блоцкий, Н.Н. Щедрин, Л.Г. Мамиконянц, И.М. Постников, И.Д. Урусов, Н.И. Соколов, Е.А. Каспаров, А.И. Лабунец, А.П. Лохматов, М.С. Morsy, Н.Н. Amer, В.В. Hogg, S. Raman, J.C. Clare, A. Kahn, L.M. Ricardo, R.M. Sebastian, шунингдек, республикаимиз олимлари Қ.Р. Аллаев, М.Г. Ахматов, Ғ. Одилов, Ж.С. Салимов, Л.В. Ковешникова М.В. Маркман, Н.Б. Пирматов ва бошқалар катта ҳисса

қўшишган.

Сезиларли муваффақиятларига қарамай, икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ишончли ишлаши етарли даражада ўрганилмаган. Юқоридаги ишларда икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторни асинхрон усулда ишга тушириш режимини ўрганиш учун физик математик ва MatLab дастуридаги моделлари ишлаб чиқилмаган ҳамда бу ўткинчи режим атрофлича таҳлил қилинмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация иши бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Қарши давлат техника университети “Электр таъминоти ва интеллектуал энергетик тизимлар” кафедрасига белгилаб берилган “Электр тармоқларида энергия ва ресурс тежамкорлиги, синхрон компенсаторлар ишончилигини оширишни, энергия тежамкор технологияларни тадбиқ этиш” мавзусидаги илмий тадқиқот иши режаси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторларнинг кўндаланг қўзғатиш чулғамидаги токини ростлаш орқали чуқур реактив энергия истеъмол қилиш режимида ишлаш ишончилигини оширишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ўта чала қўзғатиш режимида чуқур реактив энергия истеъмол қилиш имконини яратувчи имитацион моделини ишлаб чиқиш;

икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг кўндаланг қўзғатиш тизимини синусоидал ўлчов датчиги орқали ростлаб таъминлаш имконини берувчи қурилманинг принципиал схемасини ишлаб чиқиш;

икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторлар тоқларининг келтириш коэффициентини U – симон тавсифи ёрдамида аниқлаш усулини ишлаб чиқиш;

икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторларнинг ишлаш ишончилиги ошириш имкониятини берувчи қўзғатиш тизимининг электр схемасини ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида анъанавий ва икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсатор олинган.

Тадқиқотнинг предметини икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторларнинг ўткинчи жараёнлари ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида ИЎБҚСКнинг ўткинчи режимлари назарияси, Парк - Горев дифференциал тенгламалари, ўткинчи режимларини MatLab дастурида моделлаштириш, олинган маълумотларни таққослаш ва қайта ишлашда математик статистика усуллари қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ўта чала қўзғатиш режимида, кўндаланг қўзғатиш чулғамидаги токини ростлаш орқали чуқур реактив қувват истеъмол қилиш имконини берувчи имитацион модели ишлаб чиқилган;

икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг кўндаланг

қўзғатиш тизимини, якорь пўлат ўзаги юзасида жойлашган ва йиғинди магнит майдон таркибидан 3-гармоникани ажратиб олувчи синусоидал ўлчов датчиги асосида олинган ўзгарувчан электр юритувчи кучини тиристор ёрдамида бошқариб, ишончли ишлашини таъминловчи қурилманинг принципиал электр схемаси ишлаб чиқилган;

икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторлар тоқларининг келтириш коэффициентини U - симон тавсиф ёрдамида якор ва қўзғатиш тоқларининг нисбатлари асосида аниқлаш усули ишлаб чиқилган;

икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг бўйлама ва кўндаланг қўзғатиш чулғамларига бериладиган ўзгармас ток қиймати ва фазасини ростлаш имкониятини яратувчи қўзғатиш тизимлари схемаси реверсив тиристорли тўғрилагич асосида ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси қуйидагилардан иборат:

тармоқ параметрлари ва магнит тўйинишни эътиборга олувчи, икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсатор ишга тушириш жараёнининг математик модели ва уни ҳисоблашнинг алгоритми ишлаб чиқилган;

икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг кўндаланг ўқида жойлашган чулғамнинг тоқини ростлаш орқали чуқур реактив энергия истеъмол қилиш режимида ишончли ишлаш қибилляти оширилган;

икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ўткинчи жараёнларини тадқиқ қилиш учун физик ва Matlab Simulink моделлари яратилган.

Олинган тадқиқот натижаларининг ишончилиги ўткинчи режимларнинг физик ва MatLab дастуридаги моделлари ёрдамида олинган натижалар ҳамда уларнинг ўзаро мувофиқлиги, ишлаб чиқаришда қўллашга қабул қилинганлиги орқали асосланганлиги, кўп сонли назарий ва тажрибавий тасдиқлаш натижаларнинг мос келиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсатор тоқларининг келтириш коэффициенти аниқланганлиги, синхрон компенсаторни асинхрон усулда ишга тушириш жараёнини ҳисоблаш методикаси такомиллаштирилган ҳамда чуқур реактив энергия истеъмол қилиш иммитацион модели ишлаб чиқилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти тадқиқот натижалари электр тармоқлари истеъмолчилари уланган жойида ишлатиладиган катта қувватли синхрон компенсаторларнинг чуқур реактив энергия истеъмол қилишини кўндаланг қўзғатиш чулғамидаги токни ростлаш асосида бошқарадиган реверсив тиристор тўғрилагичли қўзғатиш тизими электр схемасининг жорий этилиши натижасида электромагнит ва электромеханик ўткинчи жараёнларда ишончли ишлаш қобилиятининг ортишига эришилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ишлаш ишончилигини ошириш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг қўзғатиш тизимларига бериладиган қўзғатиш тоқи фазаси ва қийматини ростлаш

имконини яратувчи реверсив тиристорли тўғрилагич асосида ишлаб чиқилган кўзгатиш тизимининг электр схемаси Аму-Қашқадарё ирригация тизимлари ҳавза бошқармаси ҳузуридаги насос станцияларига жорий этилган (Ўзбекистон Республикаси Сув хўжалиги вазирлигининг 2024 йил 4 апрелидаги 03/17-1198-сон маълумотномаси). Натижада насос станцияларидаги синхрон мотор (синхрон компенсатор)нинг ишга тушиш вақти 40,4% га камайишига эришилган;

синхрон компенсаторнинг бўйлама ва кўндаланг кўзгатиш чулғамларини, якорь пўлат ўзаги юзасида жойлашган ва йиғинди магнит майдон таркибидан 3-гармоникани ажратиб олувчи синусоидал ўлчов датчиги асосида олинган ўзгарувчан электр юритувчи кучини тиристор ёрдамида бошқариб, ўзгармас ток билан таъминловчи қурилманинг принципитал схемаси Аму-Қашқадарё ирригация тизимлари ҳавза бошқармаси ҳузуридаги насос станцияларига жорий этилган (Ўзбекистон Республикаси Сув хўжалиги вазирлигининг 2024 йил 4 апрелидаги 03/17-1198-сон маълумотномаси). Натижада насос станцияларидаги синхрон мотор (синхрон компенсатор)нинг ишга тушишдаги статор токи 19,6% га камайишига эришилган;

икки ўқи бўйича кўзгатиладиган синхрон компенсаторларнинг электр таъминоти схемаси Аму-Қашқадарё ирригация тизимлари ҳавза бошқармаси ҳузуридаги насос станцияларига жорий этилган (Ўзбекистон Республикаси Сув хўжалиги вазирлигининг 2024 йил 4 апрелидаги 03/17-1198-сон маълумотномаси). Натижада 112955500 сўмлик иқтисодий самарадорликка эришилган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари 10 та илмий-амалий анжуманлар ва семинарларда, шу жумладан, 8 та халқаро (шу жумладан, Scopus маълумотлар базасига киритилган анжуманларда 2 та) ва 2 та республика анжуманларида апробациядан ўтган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 20 та илмий иш, шу жумладан, Ўзбекистон Республикаси олий аттестация комиссиясининг диссертациялар асосий илмий натижаларини нашр этиш учун тавсия этилган илмий нашрларида 9 та мақола 1 та хорижий ва 8 та маҳаллий журналларида чоп этилган, 1 та ЭҲМ дастурлари учун гувоҳнома олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация иши таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, 123 номда фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат, асосий матн ҳажми 120 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқот мақсади ва вазифалари, объекти ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён этилган, олинган натижаларнинг илмий-амалий аҳамияти ва ишончлилиги ёритилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий этилганлиги, ишнинг апробация натижалари, эълон қилинган ишлар ва диссертациянинг тузилиши ва ҳажми бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг “Синхрон компенсаторлар ишончли ишлашининг ҳозирги ҳолати” деб номланган биринчи бобида анъанавий ва икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторларнинг ишончли ишлашининг ҳозирги ҳолати кўриб чиқилган. Кўриб чиқилган барча адабиётларда асосий эътибор бериладиган ҳолат бу бўйлама ва кўндаланг қўзғатишли синхрон компенсаторнинг иш режимларининг таҳлили чизиқли назария асосида таҳлил қилинган. Бунда кўндаланг чулғамнинг магнит майдонига таъсири ҳақидаги назарий ҳулосаларнинг тўғрилиги ва икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг тавсифлари тажрибада машинанинг ўзида олинмаган.

Роторида иккита қўзғатиш чулғами мавжуд бўлгани сабабли синхрон машиналарнинг тармоқ билан ишлаш ишончилиги ошади. Чунки чулғамлардан бири яроқсиз ҳолатга келса ёки битта ўқ бўйича қўзғатиш йўқолса, синхрон машина битта қўзғатиш чулғами билан анъанавий синхрон машина каби ишлашни давом эттиради. Синхрон машиналарнинг ишончилигини ошириш учун алоҳида ростланадиган ўзгармас ток манбаидан таъминланадиган қўшимча чулғамни ўрнатиш таклифи Н.Н.Шедрин (1932) томонидан киритилган. Кўндаланг қўзғатиш чулғамининг асосий вазифаси динамик режимларда содир бўладиган тебранишларни сўндиришдан иборат. Бу чулғамнинг тезкорлигини ошириш учун чулғам катта актив қаршилиқка эга бўлиши керак.

Амалиётда қўшимча кўндаланг қўзғатиш чулғамини қўллаб турли муаммоларни ечиш мумкин. Н.И.Соколов ва унинг шогирдлари томонидан олиб борилган ноён кутбли бўйлама ва кўндаланг ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон машиналардаги изланишларини янада чуқурроқ деб таъкидлаш керак. Бу ишларда бўйлама - кўндаланг қўзғатиш чулғамли синхрон компенсатор реактив қувватни истеъмол қилишни ошириш учун қўлланилган. Кўндаланг қўзғатиш чулғамининг мавжудлиги фақат синхрон компенсатордаги тебранишларнигина эмас балки электр тизимидаги синхрон генераторлардаги тебранишни ҳам тинчлантириш имконини беради.

Тўлиқ изланишлар сифатида М.Г.Ахматовнинг бўйлама ва кўндаланг қўзғатишли синхрон машиналарга бағишланган ишларини олиш мумкин. ТДТУнинг «Электр машиналари» кафедрасида унинг бошчилигида ноёб база яратилди ва у икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон машиналарни ўрганишга имкон яратди. М.Г.Ахматовнинг ўқув қўлланмасида роторида иккита қўзғатиш чулғами мавжуд синхрон машиналарда тўйиниш ҳисобга олинган ҳолда асосий ишчи тавсифларни ҳисоблаш усуллари ва назарияси келтирилган. Қўзғатишни автоматик ростлаш қонунларини юкламали ва қўзғатишнинг ўзгармаслигига таъсирини, чала қўзғатиш режимларида синхрон машиналарнинг ишлашини яхшилаш, магнит майдон ва у билан боғлиқ бошқа катталиқларни тажрибада аниқлаш усуллари кўриб чиқилган. Синхрон машиналарда олиб борилган назарий ва тажрибавий изланишларнинг натижалари, ҳаво оралиғидаги магнит занжирининг тўйиниши ҳисобга олиниб магнит майдонни ҳисоблашга асосланган ҳолда келтирилган.

Илмий ишларда асинхронлаштирилган компенсаторларда олиб борилган синов тажрибалари ва асинхронлаштирилган компенсаторни ишга тушириш кўриб чиқилган.

Роторда иккита чулғамнинг мавжудлиги синхрон машиналарнинг ишлаш мустаҳкамлиги ва ишончилигини оширади.

Шу билан бирга, ИЎБҚСК лари статик курилмалардан фарқли ўлароқ, қисқа муддатли икки карра ўта юкланишга бардош бера олади, статик компенсаторларда эса бундай натижага фақатгина ўрнатилган қувватни икки баравар ошириш орқали амалга оширилиши мумкин.

Тармоқдаги мумкин бўлган импульсли кучланишга бардошлилик қобилияти ҳам муҳим (масалан, чақмоқ туфайли). Векторли бошқариш тизимига эга бўлган иккита қўзғатиш чулғамининг мавжудлиги анъанавий синхрон компенсаторларга нисбатан янги хусусиятлар ва афзалликларни беради:

- реактив қувватни бошқариш диапазоли кенг, +100 дан –100 Мвар гача (анъанавий синхрон компенсаторлар учун +100 дан –50 Мвар гача);

- қўзғатиш чулғамларидаги токни тескари йўналтириш туфайли реактив қувватни (кучланишни) юқори тезликда ростлаш имкониятини беради;

- тармоқдаги бузилишлар вақтида иш параметрларининг тебранишларини яхши демпферлай олади;

- қўзғатиш тизимида носозликлар юз берганда захира режимларида ишлаш имконияти туфайли ишончли ишлашининг имкониятининг мавжудлиги.

Қўзғатиш тизимидаги турли хил носозликлар бўлса, компенсатор захира режимларида ишлаши мумкин:

- фақат асосий қўзғатиш чулғами орқали ($-40 \text{ Мвар} < Q < +100 \text{ Мвар}$),

- қўзғатишсиз асинхрон режимда ($Q \approx -40 \text{ Мвар}$).

Компенсаторнинг реактив қувватини реверслаш асосий қўзғатиш чулғамидаги ток I_{fd} ни реверслаш орқали амалга оширилади. Реактив қувватни реверслаш пайтида ИЎБҚСК роторининг бурчак ҳолати деярли ўзгармайди. Реактив қувватни реверслаш жараёни динамик жиҳатдан барқарор.

Юқоридагилардан келиб чиқиб СК ларнинг ишончли ишлаш масалалари долзарб бўлиб, уни тадқиқ қилиш муҳим аҳамият касб этади. Бунда СК ларни ишга тушириш жараёнларини чуқур реактив қувват истеъмол қилиш режимлари ҳамда қўзғатиш тизимининг носозликлари пайтида ишончли ишлаш масалаларини тадқиқ қилиш долзарб вазифалардандир.

Диссертациянинг **“Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторни ишга тушириш”** деб номланган иккинчи бобида анъанавий синхрон компенсатор (АСК) ва икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсатор (ИЎБҚСК)нинг ишга тушириш жараёнлари Matlab Simulink моделлари тузилиб, олинган натижалар таҳлил қилинган.

Диссертациянинг ушбу бобида ИЎБҚСКнинг дифференциал тенгламаларини ёзишда компенсатор тенгламалари тармоқнинг матрицали тенгламалари билан мос туташини кўзда тутилган. Бунинг учун синхрон компенсаторнинг дифференциал тенгламаларини ЭЮК кўринишига ўтказиш усули кўриб чиқилган.

Маълумки, анъанавий СКнинг дифференциал тенгламалари ночизикли ва шу сабабли уларни ечишда маълум қийинчиликлар юзага келади.

Машинанинг бўйлама ва кўндаланг ўқларда бошқа катталикларини ҳам ифодалаш мумкин. d ва q ўқларни қўллаб машина барча катталикларини иккита

ташкил этувчилар билан ифодалаш орқали тўла алгебраик дифференциал тенгламалари ифодаланади.

Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг MatLab Simulink дастурида ишга тушириш жараёни модели қуйидаги (1) Парк-Горев дифференциал тенгламаси асосида тузилади. Бунда тенгламага асосан қўзғатиш чулғами d ва q ўқлари бўйича жойлаштирилган бўлиб, иккита қўзғатиш чулғамига эга бўлади. d ўқи бўйича жойлашган бўйлама қўзғатиш чулғами токини бошқариш орқали тармоқ кучланишини ростланади, q ўқи бўйича жойлаштирилган кўндаланг қўзғатиш чулғами токини бошқариш орқали эса, ротор ҳолати ростланади.

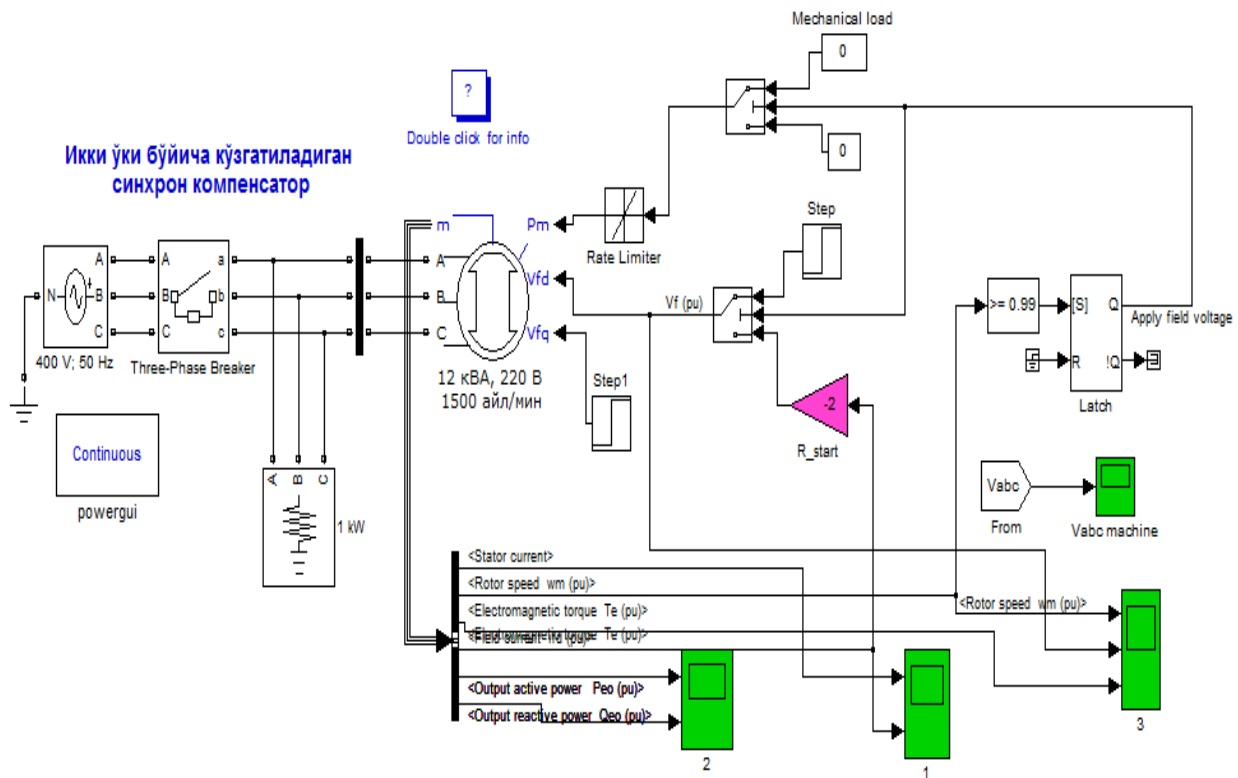
(1) тенгламалар тизимидан фойдаланиб, икки ўқи бўйича қўзғатиладиган СКни асинхрон усулда ишга тушириш жараёнини тадқиқ қилиш MatLab Simulink дастуридаги модели тузилган (1-расм).

Қуйида қуввати 15 кВА, айланиш тезлиги 1500 айл/мин бўлган икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг MatLab Simulink дастурида ишга тушириш натижалари келтирилган.

2-расмда икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг MatLab Simulink дастурида олинган ишга тушириш жараёнидаги актив ва реактив энергиялари ўзгариши графиклари келтирилган бўлиб, бунда синхрон компенсатор 0,25 секундда ишга тушади.

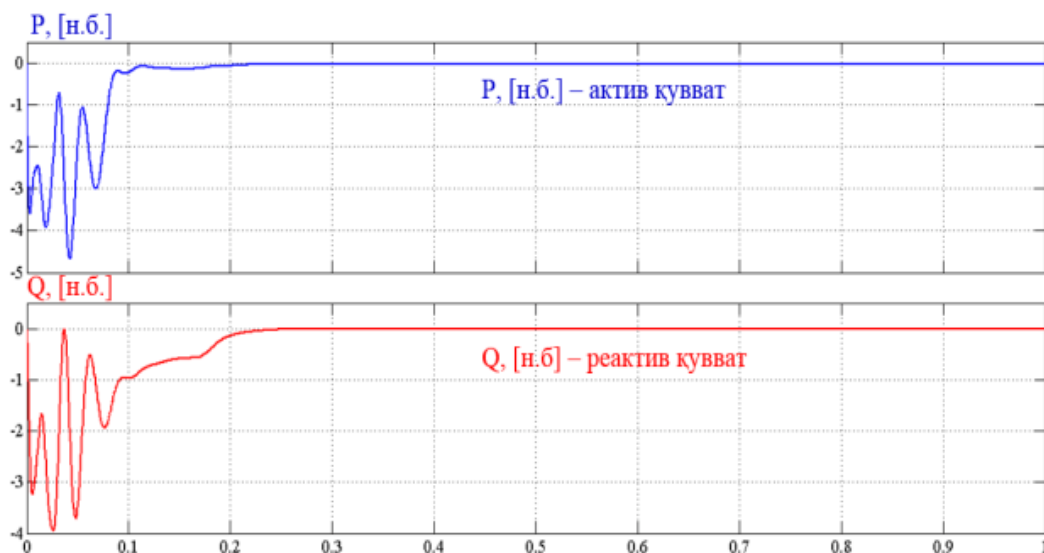
3-расмда икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг MatLab Simulink дастурида олинган ишга тушириш жараёнидаги роторнинг тезлиги ва электромагнит моменти ўзгариш графиги келтирилган бўлиб, бунда синхрон компенсаторга 0,25 секунддан бошлаб, синхрон компенсатор синхронизимга кириб ишлашни давом эттиради.

$$\begin{aligned}
 u_d &= -\frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \frac{d\gamma}{dt} - i_d r & \frac{d\psi_d}{dt} + i_d \cdot r_d &= 0 \\
 u_q &= \psi_d \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\psi_q}{dt} - i_q r & \frac{d\psi_q}{dt} + i_q \cdot r_q &= 0 \\
 u_{fd} &= \frac{d\psi_{fd}}{dt} + i_{fd} \cdot r_{fd} & \psi_d &= X_d \cdot i_d + X_{ad} \cdot i_{fd} + X_{1d} \cdot i_{1d} \\
 u_{fq} &= \frac{d\psi_{fq}}{dt} + i_{fq} \cdot r_{fq} & \psi_q &= X_q \cdot i_q + X_{aq} \cdot i_{fq} + X_{1q} \cdot i_{1q} \\
 u_0 &= X_0 \frac{di_0}{dt} + i_0 \cdot r_0 & \psi_{fd} &= X_{fd} \cdot i_{fd} + X_{ad} \cdot i_d + X_{1d} \cdot i_{1d} \\
 & & \psi_{fq} &= X_q \cdot i_{fq} + X_{aq} \cdot i_q + X_{1q} \cdot i_{1q} \\
 & & \psi_{1d} &= X_{ad} \cdot i_d + X_{fd} \cdot i_{fd} + X_{1d} \cdot i_{1d} \\
 & & \psi_{1q} &= X_{aq} \cdot i_q + X_{fq} \cdot i_{fq} + X_{1q} \cdot i_{1q} \\
 & & M_\Gamma &= \psi_q \cdot i_d - \psi_d \cdot i_q \\
 & & \frac{d^2\delta}{dt^2} &= \frac{1}{T_j} (M_T - M_\Gamma) = \frac{1}{T_j} [M_1 - (\psi_q \cdot i_d - \psi_d \cdot i_q)]
 \end{aligned} \tag{1}$$

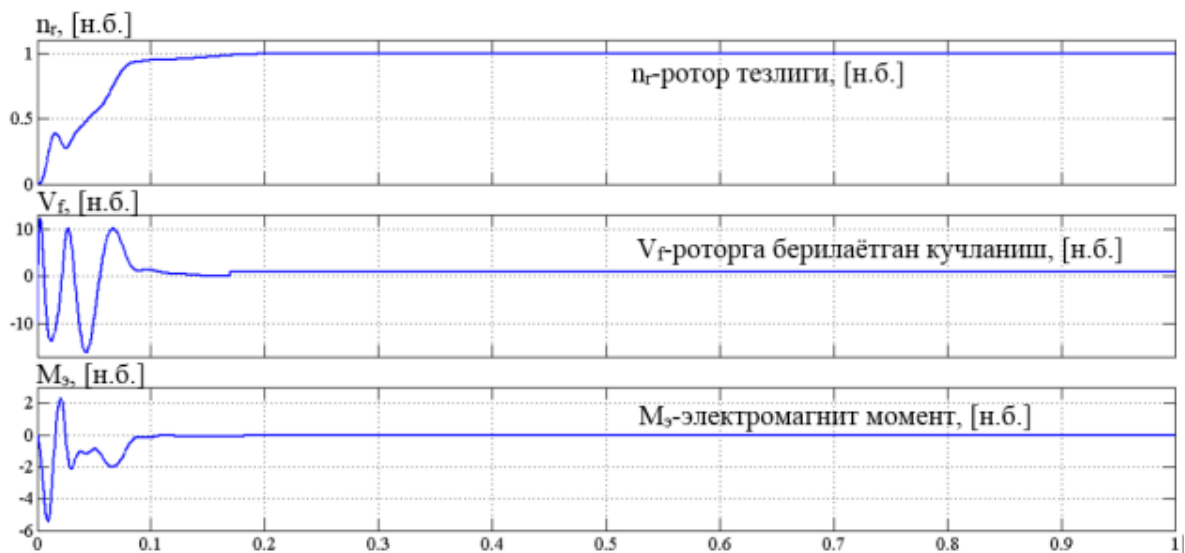


1-расм. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторни ишга тушириш жараёнини MatLab Simulink дастуридаги модели

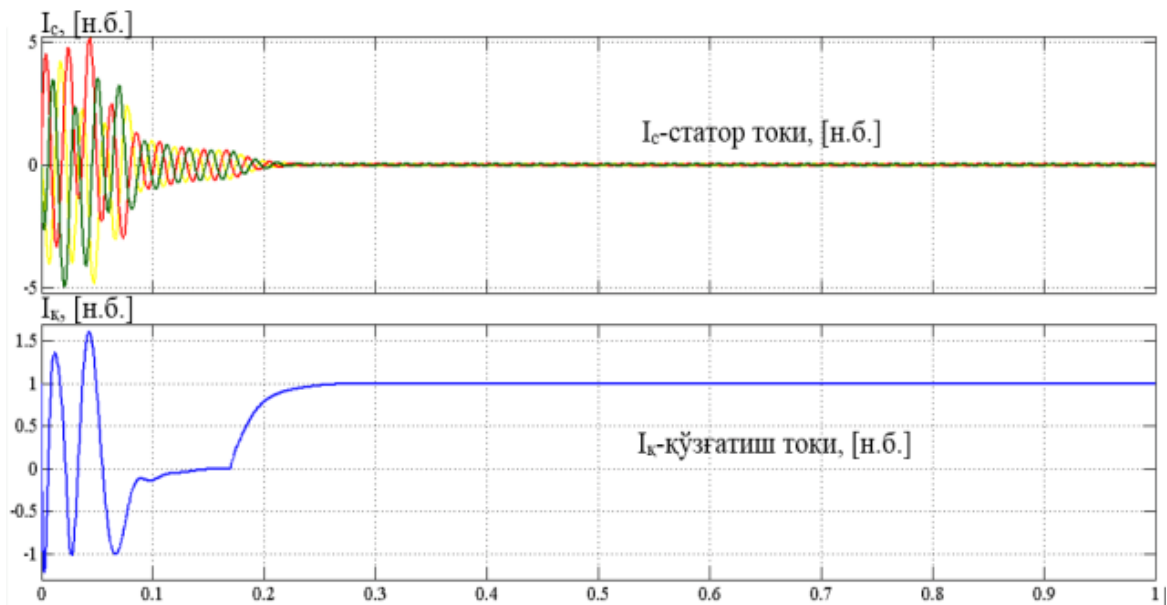
Қуйидаги 4-расмда икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг MatLab Simulink дастурида ишга тушириш жараёнидаги статор учта фазасидаги тоқлари ва қўзғатиш тоқининг ўзгариш графикалари келтирилган бўлиб, бунда ишга тушиши тоқининг 5.1 н.б. эканлигини кўришимиз мумкин.



2-расм. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг MatLab Simulink дастурида ишга тушириш жараёнидаги актив ва реактив энергияси ўзгариш графиги



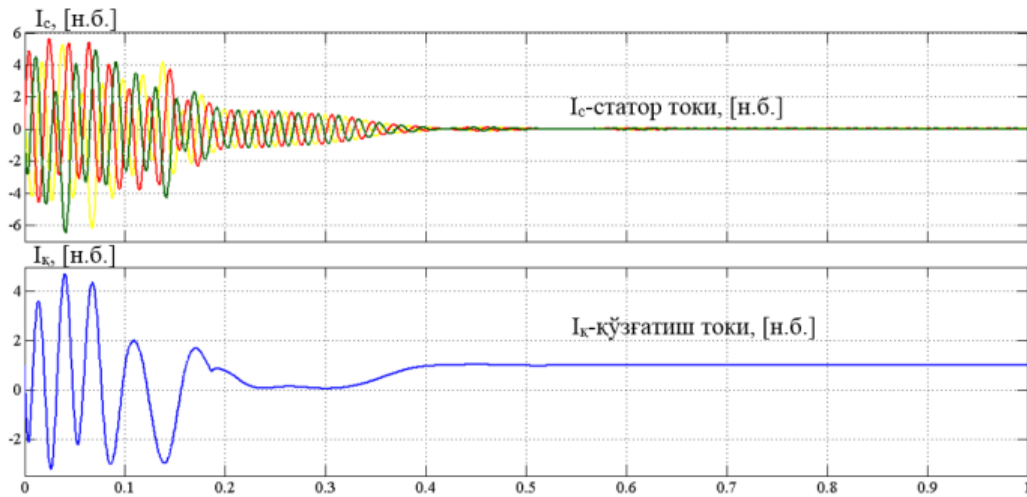
3-расм. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг MatLab Simulink дастурида ишга тушириш жараёнидаги роторнинг тезлиги ва электромагнит momenti ўзгариш графиги



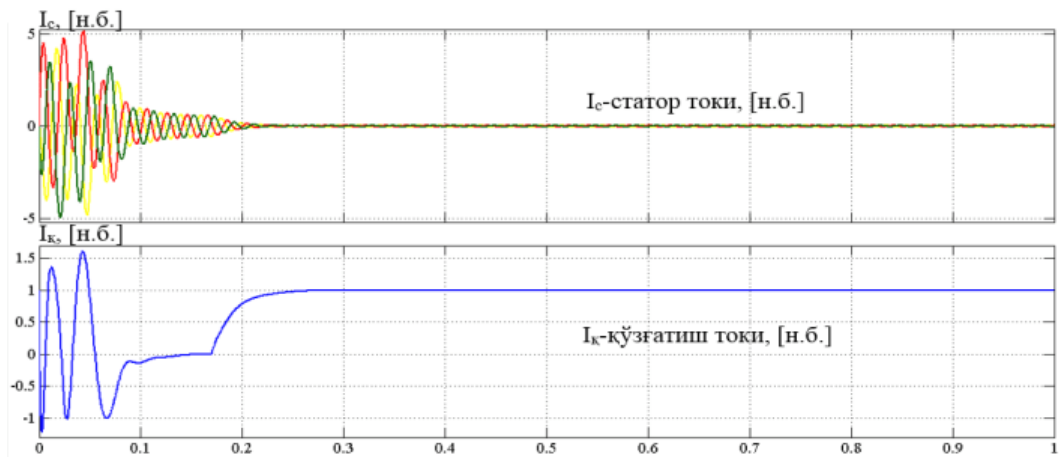
4-расм. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг MatLab Simulink дастурида ишга тушириш жараёнидаги статор учта фазасидаги токлари ва қўзғатиш токининг ўзгариш графиглари

Юқорида олинган анъанавий ва икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторларнинг ишга тушириш жараёнлари катталикларини таққослаш натижалари қуйида келтирилган:

а)



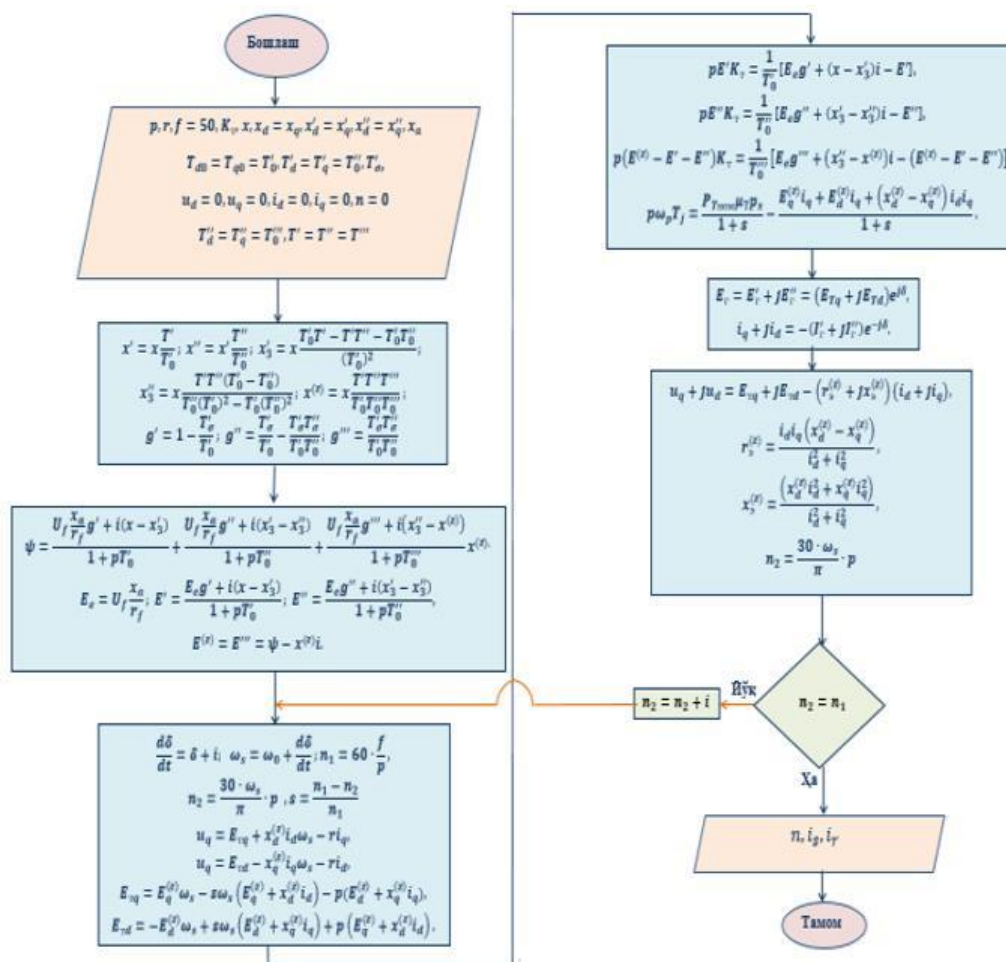
б)



5-расм. Аънавий а) ва икки ўқи бўйича қўзғатиладиган б) синхрон компенсаторларнинг ишга тушириш жараёнлари катталикларини таққослаш натижалари

5 а,б-расмдаги аънавий ва икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторларнинг ишга тушириш тоқларини таққослаш натижасига кўра, икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ишга тушиши тоқи аънавий синхрон компенсаторнинг ишга тушиши тоқидан 1.21 баробар камлиги яъни 19.6 % камлигини кўриш мумкин. 5 а) ва б) расмдаги аънавий ва икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторларнинг ишга тушиш вақтларини таққослаш натижасига кўра, икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ишга тушиш вақти аънавий синхрон компенсаторнинг ишга тушиш вақтидан 1.68 баробар камлиги яъни 40,4 % камлигини кўриш мумкин. Бу эса икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторларнинг аънавий синхрон компенсаторларга нисбатан ишга тушиш жараёни самарадорлиги ўртача 29,8% га яхшилигини англатади.

Математик дифференциал тенламалар тизими (1) да тармоқ параметрларини ва магнит тўйинишни ҳисобга олган ҳолда икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ўткинчи жараёнини ҳисоблаш алгоритми б-расмда келтирилган.



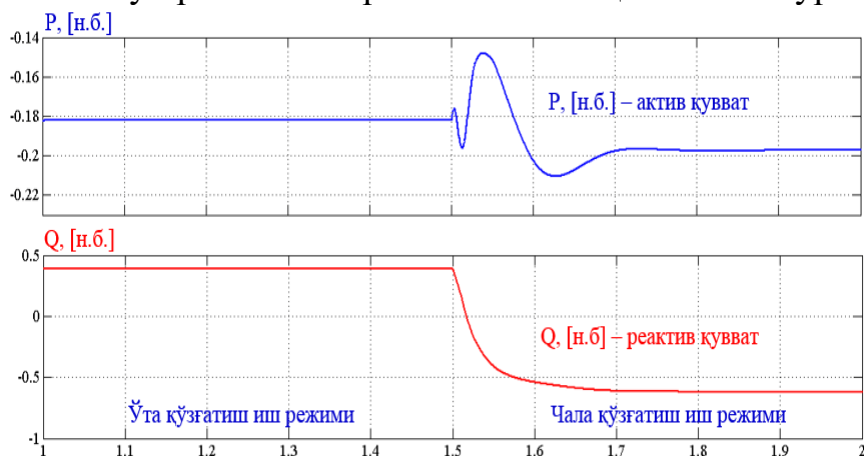
6-расм. Тармоқ параметрларини ва магнит тўйинишни ҳисобга олган ҳолда икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ишга тушиш жараёнини ҳисоблаш алгоритми

Диссертациянинг “Синхрон компенсаторларнинг реактив қувватни истеъмол қилиш режими” деб номланган учинчи бобида анъанавий СК ва ИЎБҚСКнинг реактив қувватни кўпроқ истеъмол қилиш режимидаги вектор диаграммасини куриш ва динамик тавсифини Matlab Simulink дастури ёрдамида моделлаштириш орқали таҳлилига бағишланган.

Икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ўта қўзғатиш режимидан чала қўзғатиш режимга ўтгандаги актив ва реактив қувват ўзгариши графиклари 7-расмда келтирилган. Бунда қўзғатиш токи ўта қўзғатиш режимидан чала қўзғатиш режимга ўтганда, икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсатор анъанавий синхрон компенсаторга нисбатан чуқур реактив энергия истеъмол қилади. Қўзғатиш токининг манфий қийматларида икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсатор синхронизмдан чиқиб кетмайди. Бу эса икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг анъанавий синхрон компенсаторга нисбатан чуқур реактив қувватни истеъмол қилиш режимида ишлаганида ишончли ишлаши юқорилиги англатади.

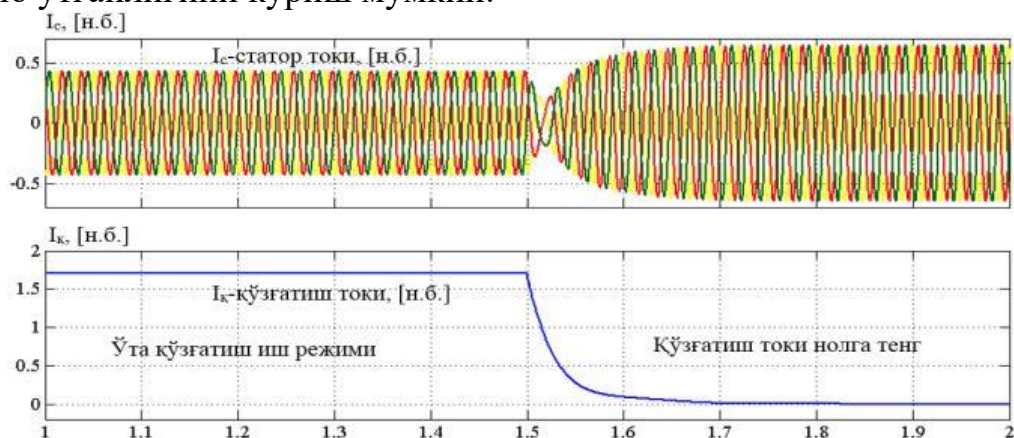
Юқоридаги 7-расмга кўра икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ўта қўзғатиш режимида қўзғатиш чулғамига 1,7 н.б. да қўзғатиш токи берилганда тармоққа 0,42 н.б. да реактив энергия узатади. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг чала қўзғатиш режимида

қўзғатиш чулғамига 0 н.б. да қўзғатиш токи берилганда тармоқдан 0,64 н.б. да реактив энергия истеъмол қилганлигини кўриш мумкин. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг чала қўзғатиш режимидан қўзғатиш чулғамига 0 н.б. да қўзғатиш токи берилганда, анъанавий синхрон компенсаторга нисбатан 0.06 н.б. кўп реактив энергия истеъмол қилишини кўриш мумкин.



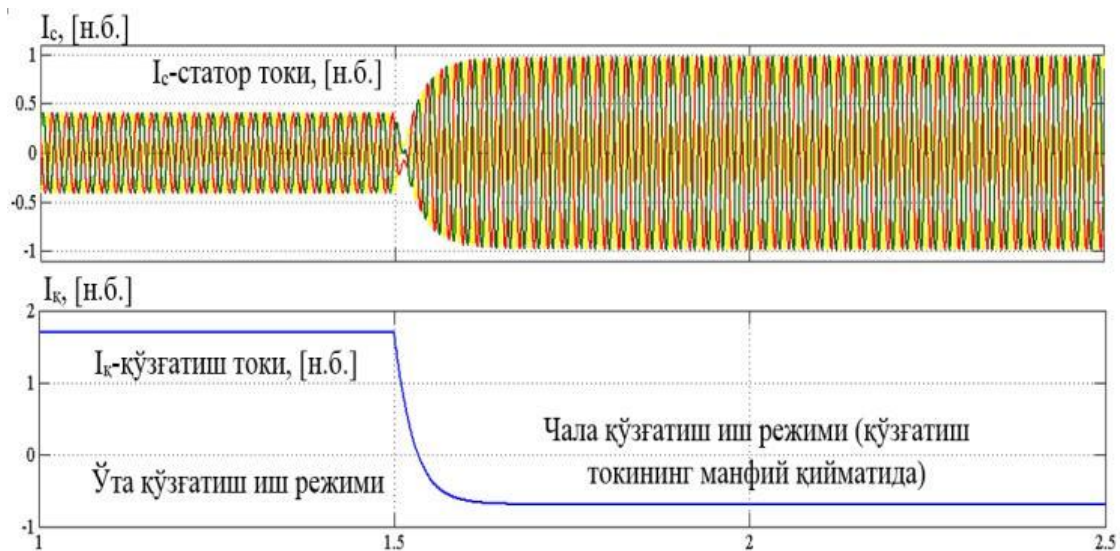
7-расм. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ўта қўзғатиш режимидан чала қўзғатиш режимга ўтгандаги актив ва реактив қувват ўзгариши графиклари

Қуйидаги 8-расмда келтирилган Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ўта қўзғатиш режимидан чала қўзғатиш режимга ўтгандаги статор ва қўзғатиш чулғамидаги тоқларнинг ўзгариши графиклари келтирилган бўлиб, ўта қўзғатиш режимидан қўзғатиш чулғамига 1,7 н.б. да қўзғатиш токи берилганда, статор чулғамидан 0,48 н.б. да ток оқиб ўтади. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг чала қўзғатиш режимидан қўзғатиш чулғамига 0 н.б. да қўзғатиш токи берилганда эса, статор чулғамидан 0,68 н.б. ток оқиб ўтганлигини кўриш мумкин.



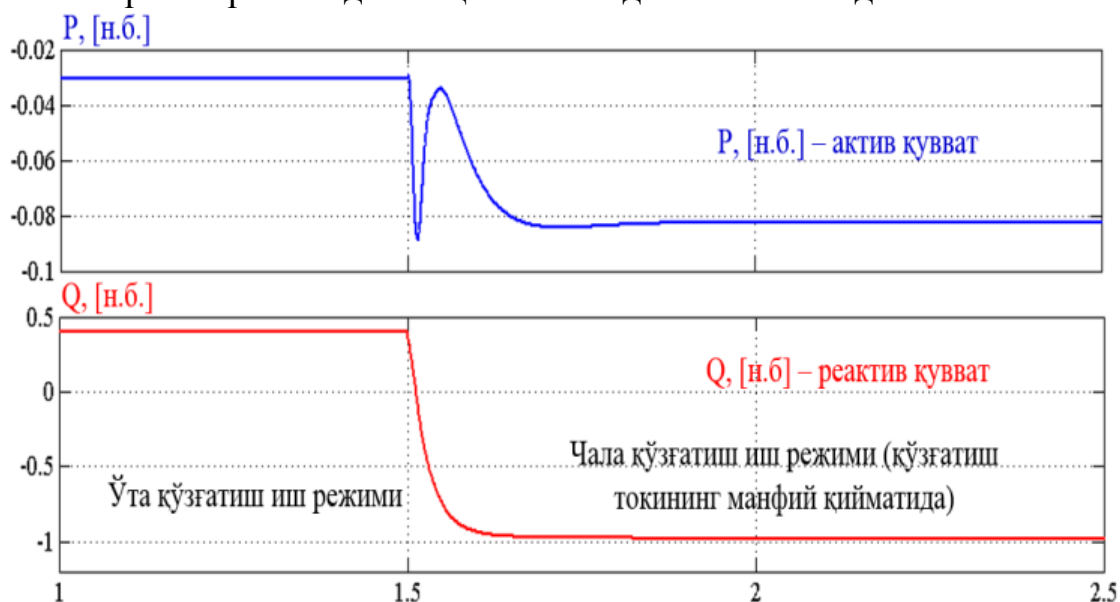
8-расм. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ўта қўзғатиш режимидан чала қўзғатиш режимга ўтгандаги статор ва қўзғатиш чулғамидаги тоқларнинг ўзгариши графиклари

Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг чала қўзғатиш режимидан қўзғатиш тоқининг манфий қийматида) статор ва қўзғатиш тоқлари ўзгариши графиклари 9-расмда келтирилган.



9-расм. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ўта қўзғатиш режимидан чала қўзғатиш режимга ўтгандаги (қўзғатиш токининг манфий қийматида) статор ва қўзғатиш токлари ўзгариши графиклари

Юқоридаги 9-расмга кўра икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсатор ўта қўзғатиш режимидан чуқур чала қўзғатиш режимига ўтганда (қўзғатиш токининг манфий қийматида) анъанавий синхрон компенсаторга нисбатан статор ва қўзғатиш токи чайқалмайди. Бундай режимда икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсатор, анъанавий синхрон компенсаторга нисбатан турғун ишлай олади, яъни икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсатор синхронизмдан чиқиб кетмасдан ишлай олади.



10-расм. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ўта қўзғатиш режимидан чала қўзғатиш режимга ўтгандаги (қўзғатиш токининг манфий қийматида) актив ва реактив қувватлари ўзгариши графиклари

Юқоридаги 10-расмга кўра икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсатор ўта қўзғатиш режимидан чуқур чала қўзғатиш режимига ўтганда (қўзғатиш токининг манфий қийматида) актив ва реактив қувватлари ўзгариши графиклари келтирилган.

Қуйидаги 11-расмга кўра икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг чала қўзғатиш режимида қўзғатиш чулғамига манфий кучланиш берилганда ротор ҳаракатида чайқалиш кузатилмайди. Бу эса икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсатор аънавий синхрон компенсаторга нисбатан чуқур реактив қувват истеъмол қилиш режимида турғун ишлай олиш қобилиятининг юқорилигини кўрсатди.



11-расм. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ўта қўзғатиш режимидан чала қўзғатиш режимга ўтгандаги (қўзғатиш токининг манфий қийматида) ротор тезлиги ва электромагнит моментнинг ўзгариши графиклари

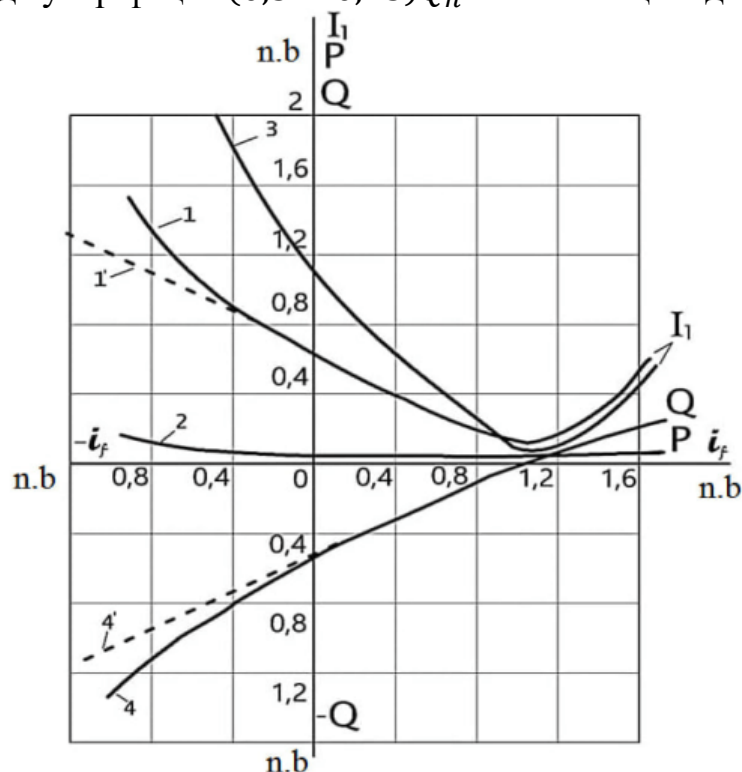
СК ларнинг U – симон тавсифларини ҳисоблашда қуйидаги катталиклар берилган бўлади: статорга келтирилган кучланиш, берилган кучланишда салт ишлаш тавсифининг тажрибадан ёки ҳисоблашдан аниқланадиган магнитловчи ток $I_{\mu d}$, кўндаланг ўқ бўйича синхрон индуктив қаршилик x_q (ёки x_{aq}), статор чулғамининг сочилма индуктив қаршилиги x_s , қўзғатиш токини статор токига келтириш коэффиценти $k = I_f/I_1$.

Қуввати 15 kVA ли СК нинг ҳисобланган ва тажрибадан олинган U – симон тавсифлари амалий жиҳатдан мос тушади ва шуни кўрсатадики, қўзғатиш токининг манфий қийматлари ошиши билан тавсиф тўғри чизикли боғлиқликдан юқорига қараб қайрилади (12 - расм, 1 – эгри чизик). Бу оғиш шу билан тушунтириладики, бунда қўзғатиш токининг манфий қийматлари берилиши роторни ташқарига итаришга мажбурлайди, бу эса θ бурчак ва I_1 токнинг ортишига олиб келади.

Бундан ташқари $P_2=0$ да U – симон тавсифни қуришда қиймати унча сезиларли бўлмаган, лекин кенг кўламда ўзгарадиган исрофларни ҳисобга олиш зарур. Қуввати 30 ÷ 150 MW ли синхрон компенсаторлар учун реактив қувват $Q = 0$ дан ($I_f = I_{f0}$ да) $Q = Q_n$ гача ўзгарганда улардаги исроф тахминан 3 мартагача ўзгаради.

12-расмда 15 kVA ли СК даги исроф ўзгаришининг 2 – эгри чизиғи келтирилган, шу расмнинг ўзида поршенли компрессор ажратилган синхрон

двигател (компенсатор)нинг ($P = 4000 \text{ kW}$, $U = 6 \text{ kV}$, $n = 150 \text{ ayl/min}$) салт ишда олинган $U - \text{симон тавсифи}$ (3 - эгри чизик) келтирилган. Бу двигателнинг тавсифи ҳам манфий қўзғатишда тўғри чизикдан юқорига оғади. Замонавий синхрон компенсаторларда $x_d = 2 \div 2,2$ ва $x_q = 1,2 \div 1,3$ демак кам қўзғатишнинг чегаравий ҳолатида улар фақат $(0,5 \div 0,45)Q_n$ истеъмол қилади.



12-расм. Синхрон компенсаторнинг $U - \text{симон тавсифи}$

Автоматик ростлашсиз қўзғатиш чулғамига қўзғатиш токининг манфий қийматларини бериб истеъмол қилинадиган реактив қувватни $Q = (0,6 \div 0,75)Q_n$ гача ошириш мумкин. Қўзғатишни автоматик ростлашни қўллаб, бу қувватни $Q \approx 0,8$ гача олиб бориш мумкин. Кўндаланг якорь реакциясини компенсацияловчи қўшимча кўндаланг чулғамни роторда қўллаш билан истеъмол қувватини номиналгача етказиш мумкин, яъни ишончли ишлаш чегараси ошади, бунда $U - \text{симон тавсиф}$ тўғри чизикли характерни қабул қилади (1' - эгри чизик). Токни чегараловчи омил бўлиб, бунда фақат машинани актив қисмининг ва унинг ён томон тузилиш қисмларининг қизиши ҳисобланади. Бўйлама - кўндаланг қўзғатишли синхрон моторнинг реактив қуввати одатда ушбу ифода бўйича аниқланади:

$$Q = U_d I_q - U_q I_d = \frac{U E_{fd}}{x_d} \cos \theta - \frac{U^2}{2} \cdot \left[\left(\frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d} \right) - \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \cos 2\theta \right) \right] \pm \frac{U E_{fq}}{x_q} \sin \theta \quad (2)$$

бунда E_{fd} , E_{fq} - бўйлама ва кўндаланг чулғамларнинг магнит оқимларини статор чулғамига индукциялаган ЭЮК.

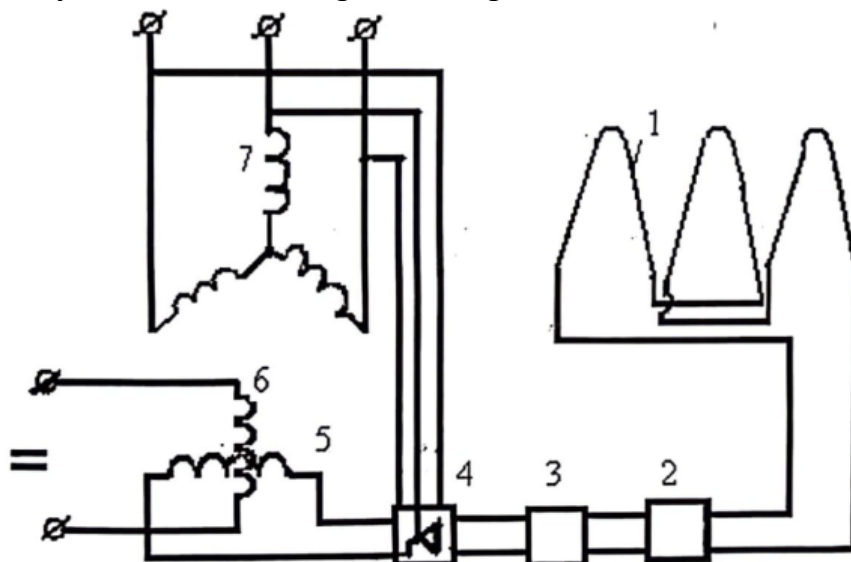
Қўзғатиш чулғами токининг мусбат қийматлар соҳасида кўндаланг

чулғамни реактив қувват қийматига таъсир роли сезиларли эмас, шунинг учун (2) ни охириги ҳадини ҳисобга олмаса ҳам бўлади. Кўндаланг чулғамнинг бу роли қўзғатиш токининг манфий қийматлар соҳасида сезиларли ортади. (2) бўйича реактив қувват ҳисобланганда машинанинг магнит занжири тўйинмаганда, E_{fd} , E_{fq} миқдорлар i_{fd} ва i_{fq} тоқларга пропорционал деб, x_d ва x_q параметрлар эса ўзгармас деб фараз қилинади. Реал тўйинган машинада бу фаразларга ўрин йўқ, шу сабабли (2) бўйича ҳисоблаш катта хатоликлар беради.

U – симон тавсифни ва унинг асосида СК $d - q$ ни реактив қувватини ҳисоблашни таклиф қилинаётган ҳисоблаш услуби амалий жиҳатдан тажриба маълумотлари билан мос тушувчи натижаларни беради.

Таклиф этилаётган қурилма ўзининг тузилиши бўйича юқорида кўриб ўтилган қурилмаларга нисбатан содда ҳисобланади.

Бўйлама ва кўндаланг чулғамли синхрон компенсаторнинг қўзғатишини ростловчи қурилманинг принципиал схемаси 13-расмда кўрсатилган. Бу расмда 1 синхрон компенсатор статори ички сиртида жойлаштирилган магнит майдони учинчи гармоникасининг датчикидир. Бу датчикни статор ички сиртига жойлаштириш бўйича тадқиқотлар олиб борилган.



13-расм. Бўйлама ва кўндаланг қўзғатиш чулғамига эга бўлган синхрон компенсаторни қўзғатишини ростловчи қурилманинг принципиал схемаси

Маълумки, синхрон машиналарнинг ҳаво бўшлиғидаги магнит майдони бир режимдан бошқа режимга ўтганда ўзгаради. Шу сабабли машинанинг турли эксплуатация шароитларида ҳаво оралиғидаги магнит майдоннинг тарқалиш шаклини билиш муҳим бўлади. Аммо турли факторларнинг таъсири сабабли магнит майдонини ҳисоблаш мураккаб ҳисобланади.

Берилган ротор ва статор тоқлари учун ҳаво оралиғидаги магнит майдонининг тарқалиш характери ротор қўзғалмас бўлган ҳолат учун Холл ЭЮК датчиги ёрдамида аниқлаш мумкин.

Холл ЭЮК датчиги ёрдамида ҳаво оралиғидаги, магнит майдонининг тарқалиш характери аниқлашда асосан учта камчилик мавжуд:

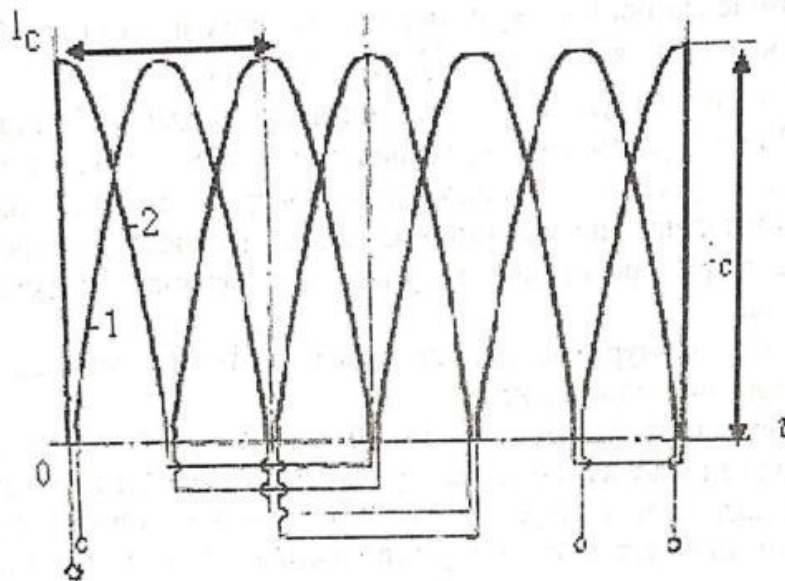
1. Ўлчаш натижалари ҳаво оралиғидаги маълум бир узунликдаги магнит индукциясининг қийматини беради;

2. Холл ЭЮК датчиги машинанинг ҳаво бўшлиғига жойлашиши лозим (ҳаво оралиғи 1,5 мм дан кам бўлмаслиги керак);

3. Айрим масалаларни ҳал қилишда ҳаво оралиғидаги магнит майдонининг асосий ва учинчи гармоникаларини билиш талаб этилади. Бундай ҳолларда бу усул ёрдамида тахминий натижа олиш мумкин. Бунда ҳаво оралиғида жойлаштирилган махсус шаклдаги рамкалардан фойдаланиш керакли натижа беради [53]. Ҳаво оралиғидаги магнит майдонининг бўйлама ва кўндаланг ўқлари бўйича учинчи гармоникасини аниқлаш, яъни ажратиб олиш учун қўлланиладиган рамкалар 14-расмда кўрсатилган.

Бу рамкалар нафақат ротори кўзғалмас, балки ротори айланаётган вақтда ҳам ишлатилади. Ушбу рамкаларни тайёрлаш учун миллиметрли қоғозга синусоидалар ва косинусоидалар чизилади, сўнгра калькага ўтказилади. Калькадаги эгри чизиқлар устига диаметри 0,15-0,2 мм бўлган изоляцияли мис сим махсус елим ёрдамида ёпиштирилади ва қуригандан кейин статор сиртига ёпиштирилади.

Магнит майдонининг учинчи гармоникасини ўлчовчи датчик (14-расмдаги қурилма) 1 дан иборат бўлиб, унинг электр юритувчи кучи (ЭЮК) $E_{\delta 3}$ тўғрилагич 2 орқали 3 кучайтиргичга узатилади, сўнгра кучайтиргичдан тиристор 4 га берилади. Тиристор 4 синхрон компенсаторнинг кўндаланг кўзғатиш (демфирловчи) чулғами 5 га, компенсаторнинг бўйлама (асосий) чулғами эса ташқи ўзгармас ток манбаига уланган бўлади.



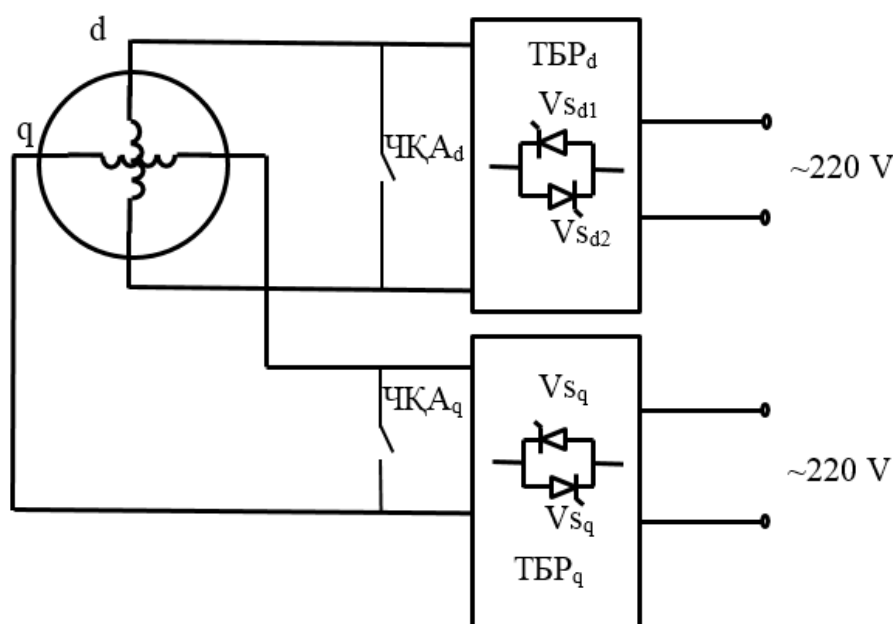
14-расм. Ҳаво оралиғидаги магнит майдонининг бўйлама ва кўндаланг ўқлари бўйича учинчи гармоникасини ажратиб олиш схемаси

Бу қурилма қуйидагича ишлайди. Ишлаётган синхрон компенсаторнинг 1 датчиги магнит майдони учинчи гармоникасининг ЭЮК $E_{\delta 3}$ ҳосил бўлади ва у 2 тўғрилагич орқали 3 кўчайтиргичга узатилади. Кучайтиргичдан эса бу сигнал синхрон компенсаторнинг 5 кўндаланг чулғамига уланган 4 тиристорга берилади. Тиристордан ток оқиб ўтгандан кейин 5 кўндаланг кўзғатиш чулғами орқали синхрон компенсаторга ЭЮК $E_{\delta 3}$ дан таъсир этувчи автоматик равишда ўз-ўзини кўзғатиш тизими ишга тушади.

Шундай қилиб, бу қўзғатиш тизими жуда қулай ҳисобланади ва тузилиши ҳам содда бўлади.

Диссертациянинг “Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторни тажрибада текшириш” деб номланган тўртинчи бобида Синхрон компенсаторнинг тажрибадан олинган U – симон тавсифи, синхрон компенсатор тоқларининг келтириш коэффицентини U – симон тавсифи ёрдамида аниқлаш усули, икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ҳаво оралиғидаги магнит майдони, икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг қўзғатиш чулғами ишдан чиққанда ишончли ишлашни ошириш тажрибаларига бағишланган.

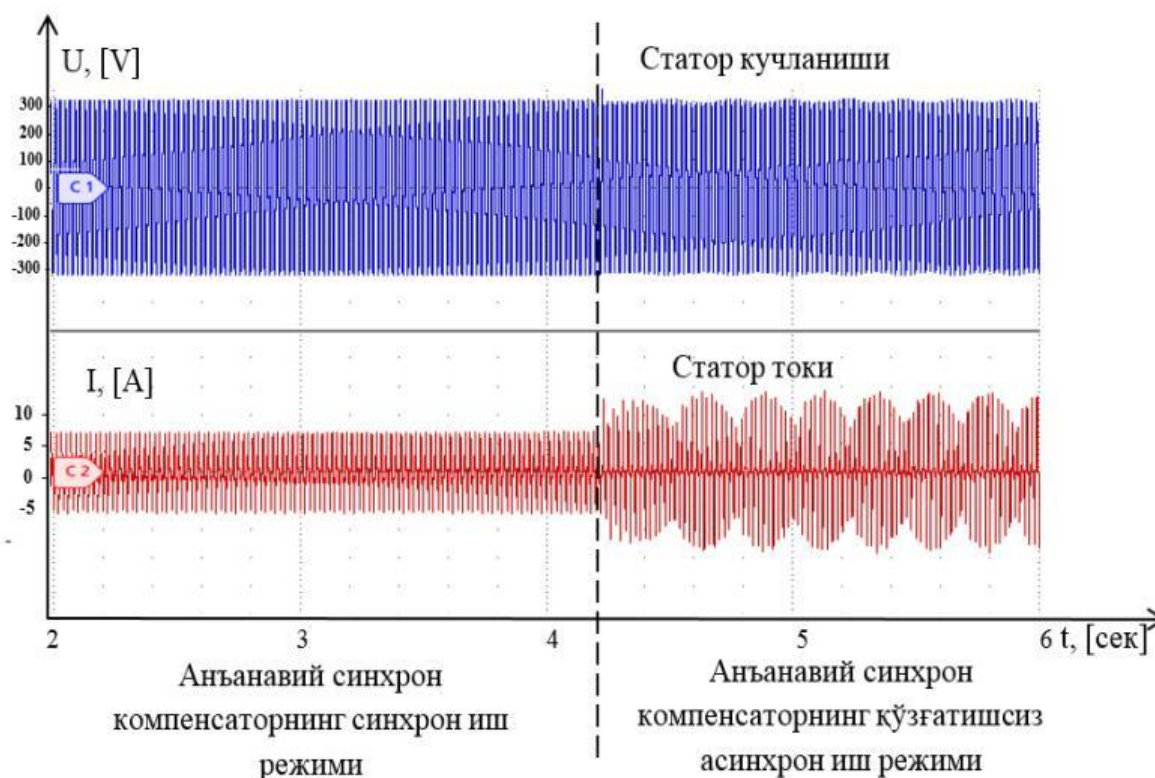
Ушбу тажрибани ўтказиш учун 15-расмдаги уланиш схемасидаги икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг q ўқида жойлашган чулғамни қисқа туташтирувчи ЧҚА_q автоматини очик қолдириб, d ўқда жойлаштирилган қўзғатиш чулғамига ўзгармас кучланиш бериб, аъъанавий синхрон компенсатор каби ишлатамиз. Турғун ишлаб турган аъъанавий синхрон компенсатор қўзғатиш чулғамидаги ток узиб қўйилади, шундан сўнг уни 15-расмда кўрсатилган чулғамни қисқа туташтирувчи ЧҚА_d автомат ёрдамида қисқа туташтириб қўзғатишсиз асинхрон иш режимига ўтказилади. Шундан сўнг Tektronix MS064 осциллографи ёрдамида аъъанавий синхрон компенсатор статор кучланиши ва токи ўзгариши графиклари олинади.



15-расм. Икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсатор қўзғатиш чулғамларини қисқа туташтирувчи автоматнинг уланиш схемаси

Олинган осциллограммалар шуни кўрсатадики, синхрон компенсатор ротори d ва q ўқлари бўйича, ҳам магнит, ҳам электр носимметрик бўлганлиги учун бирқутблилик эффекти вужудга келиб, статор тоқи қиймати ортади ҳамда маълум бир сирпаниш частотаси ўртача қиймати атрофида тебраниб туради. Статор кучланиши, юкламага боғлиқ ҳолда камаяди ва маълум бир сирпаниш частотаси ўртача қиймати атрофида тебраниб туради. Бундай иш режимда

ишлаш синхрон компенсаторларга йўл қўйилмайди. Бунда синхрон компенсатор тармоқдан узилади.

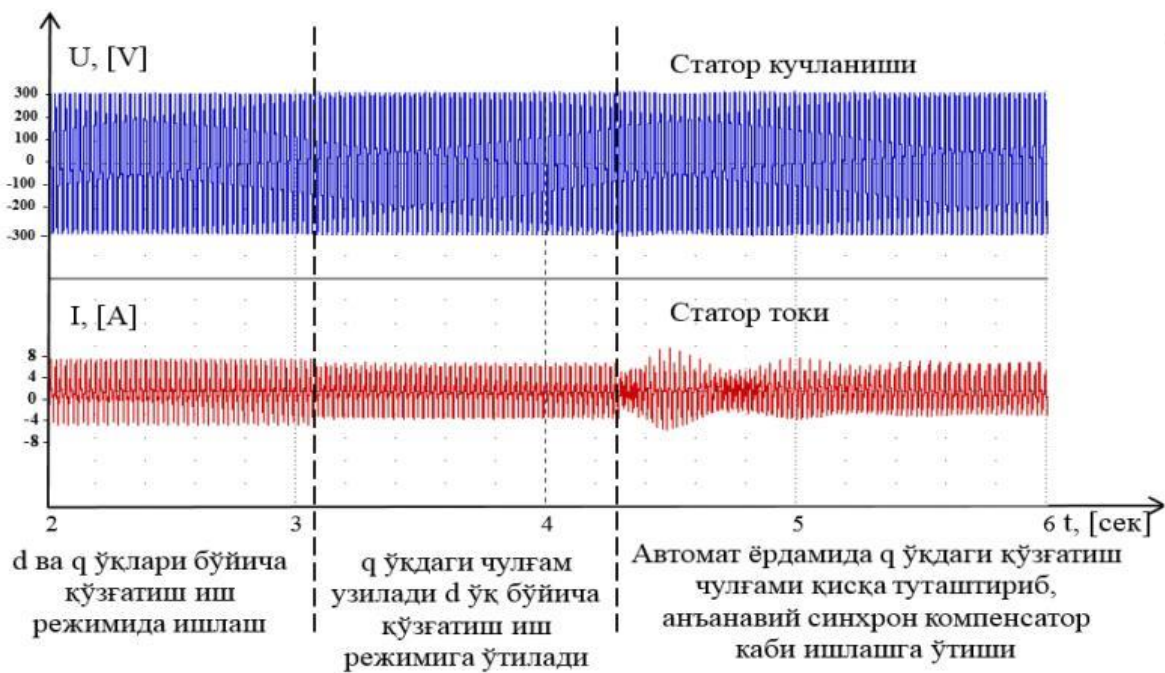


16-расм. Анъанавий синхрон компенсаторнинг асинхрон иш режимига ўтгандаги статор кучланиши ва токи осциллограммалари

Қуйида икки ўқ бўйича кўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг кўзғатиш тизимининг бири ишдан чиққан ҳолатдаги иш жараёнини кўриб чиқамиз.

Бунинг учун 16-расмдаги d ўқ бўйича жойлашган кўзғатиш чулғамига берилаётган ўзгармас токни узиб, ушбу чулғамни ЧҚА_d автомати ёрдамида қисқа туташтирамиз ҳамда рақамли осциллограф ёрдамида қуйидаги статор токи ва кучланиш ўзгаришларини оламиз.

Қуйидаги 17-расмда келтирилган осциллограммалар шуни кўрсатадики, икки ўқ бўйича кўзғатиладиган синхрон компенсатор кўзғатиш тизимининг биттаси ишдан чиқса, иккинчи кўзғатиш тизими ёрдамида анъанавий синхрон компенсатор каби ишини давом эттира олади. ЧҚА_d автомати қисқа туташтирилиб, анъанавий синхрон компенсатор каби ишлашга ўтганда статор токининг кам тебранишига сабаб, кўзғатиш чулғами қисқа туташтирилганда ундан маълум миқдорда демпферлаш токи оқиб ўтади. Шунинг учун ушбу ток билан айланувчи магнит майдон таъсирлашиши натижасида демпферловчи момент ҳосил бўлиб, ушбу момент ротор ҳаракатига таъсир қилади. Натижада статор токи бироз тебранади.



17-расм. Икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг, қўзғатиш тизими биттаси ишдан чиққан ҳолдаги кучланиш ва ток осциллограммалари

Икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсатор юқори кучланишли электр узатиш линияларида қўллаганимизда, қўзғатиш тизимининг бири ишдан чиқса, унга хизмат кўрсатувчи персоналлар ишдан чиққан қўзғатиш тизими сабабларини аниқлаб, уни бартараф этиш учун етарлича вақт ва имкониятлари мавжуд бўлади. Юқоридаги жараён унинг ишончли ишлашининг ошишига сабаб бўлади.

Аму-Қашқадарё ИТХБ хузуридаги насос станциялари ва энергетика бошқармасига қарашли Дўстлик 1,2,3 насос станциясидаги 3 та насос агрегати ва битта СК синовдан ўтказилди. Синовлар давомида биринчи насосда 12 та, иккинчи насосда 14 та, учинчи насосда 13 та, тўртинчи насосда 16 та носозликлар қайд этилган. Биринчи насос учун носозликлар орасидаги умумий вақт 3250 соатни, иккинчиси учун - 3600 соатни, учинчиси учун - 2800 соатни, тўртинчиси учун 3150 соатни ташкил этди. Носозликнинг ўртача вақтини ва СК нинг ўртача ресурсини аниқлаймиз.

Бузилишгача бўлган ўртача вақт $\hat{T}_{\text{ўр}} = \frac{t_{\text{сум}}}{n(t_{\text{сум}})} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N m_i}$ формула бўйича аниқланади:

$$\hat{T}_{\text{ўр}} = \frac{t_{\text{сум}}}{n(t_{\text{сум}})} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N m_i} = \frac{3250 + 3600 + 2800 + 3150}{12 + 14 + 13 + 16} = 232,72 \text{ соат.}$$

Ўртача ресурс $T_p = \frac{\sum_{i=1}^N T_{pi}}{N}$ формула бўйича аниқланади.

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^N T_{pi}}{N} = \frac{3250 + 3600 + 2800 + 3150}{4} = 3200 \text{ соат.}$$

Бузилишгача бўлган ўртача ишлаш вақти $\hat{T}_{\text{ўр}} = 232,72$ соат, бу кўрсаткич бузилишларсиз ишлаш кўрсаткичидир. Ўртача ресурс вақти $T_p = 3200$ соат.

Ушбу кўрсаткич чидамлик кўрсаткичидир. ИЎБҚСК қўлаганимизда қуйидаги натижаларга эришдик:

Аму-Қашқадарё ИТХБ хузуридаги насос станциялари ва энергетика бошқармасига қарашли Дўстлик 1,2,3 насос станциясидаги мавжуд 3 та насос агрегати ва битта СК синовдан ўтказилди. Синовлар давомида биринчи насосда 12 та, иккинчи насосда 14 та, учинчи насосда 13 та, тўртинчи насосда 5 та носозликлар қайд этилган. Биринчи насос учун носозликлар орасидаги умумий вақт 3250 соатни, иккинчиси учун - 3600 соатни, учинчиси учун - 2800 соатни, тўртинчиси учун 4500 соатни ташкил этди. Носозликнинг ўртача вақтини ва СК нинг ўртача ресурси аниқлаймиз.

Бузилишгача бўлган ўртача вақт $\hat{T}_{\text{ўр}} = \frac{t_{\text{сум}}}{n(t_{\text{сум}})} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N m_i}$ формула бўйича:

$$\hat{T}_{\text{ўр}} = \frac{t_{\text{сум}}}{n(t_{\text{сум}})} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N m_i} = \frac{3250 + 3600 + 2800 + 4500}{12 + 14 + 13 + 5} = 321,6 \text{ соат.}$$

Ўртача ресурс $T_p = \frac{\sum_{i=1}^N T_{pi}}{N}$ формула бўйича:

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^N T_{pi}}{N} = \frac{3250 + 3600 + 2800 + 4500}{4} = 3537 \text{ соат.}$$

Бузилишгача бўлган ўртача ишлаш вақти $\hat{T}_{\text{ўр}} = 321,6$ соат, бу кўрсаткич бузилишларсиз ишлаш кўрсаткичидир. Ўртача ресурс вақти $T_p = 3537$ соат, ушбу кўрсаткич чидамлик кўрсаткичидир.

Юқоридагилардан келиб чиқиб, синхрон компенсатор икки ўқи бўйича қўзғатиш тизимига ўзгартирилганда ўртача ресурс 337 соатга юқорилиги аниқланди. Бу эса ИЎБҚСК нинг анъанавий СК ларга нисбатан чидамлилигини кўрсатади.

Тадқиқотларга кўра анъанавий СК нинг контакт - шётка тизимининг ишга тайёрлик коэффициенти қуйидагича аниқланди. Бунда контакт - шётка тизимининг ўртача қайта тикланиш вақти 2 соат ва бузилишларгача бўлган ўртача ишлаш вақти 233 соат бўлган кантак шётка тизимининг ишга тайёргарлик вақти аниқланди. Ўртача ишга тайёргарлик коэффициентининг қиймати

$k_r = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{(\sum_{i=1}^N m_i + \sum_{i=1}^N \tau_i)}$ формула бўйича:

$$k_r = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{(\sum_{i=1}^N t_i + \sum_{i=1}^N \tau_i)} = \frac{233}{233 + 2} = \frac{233}{235} = 0,991.$$

Ушбу кўрсаткич бузилишларсиз ишлаш, таъмирлашга яроқлилик ва ишга тайёрлик кўрсаткичи ҳисобланади.

ИЎБҚСК нинг ишга тайёрлик коэффициенти ўртача қиймати қуйидагича аниқланади:

$$k_r = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{(\sum_{i=1}^N t_i + \sum_{i=1}^N \tau_i)} = \frac{322}{322 + 0} = \frac{322}{322} = 1.$$

Бундан кўришиб турибдики, ИЎБҚСК да қўшимча қўзғатиш чулғами мавжудлиги сабабли ўртача қайта тикланиш учун вақт талаб қилмайди, чунки ИЎБҚСК нинг бўйлама ўқи бўйича ишлаётган қўзғатиш тизими ишдан чиққанда, унда мавжуд бўлган кўндаланг қўзғатиш тизим орқали қўзғатишни тиклаш

мумкин. Бу вақт оралиғида бўйлама ўқи бўйича қўзғатиш тизимидаги носозликлар бартараф этилади.

ХУЛОСА

“Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторлар ишлаш ишончилигини ошириш” мавзусидаги техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертация иши бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижалари асосида қуйидаги хулосалар тақдим этилган:

1. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторлар қўзғатиш чулғамларига берилаётган ўзгармас токнинг манфий қийматларини ошириш орқали ўта чала қўзғатиш режимида чуқур реактив қувват истеъмол қилиш имконини берувчи имитацион модели ишлаб чиқилди. Натижада икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг ишга тушириш вақти анъанавий синхрон компенсаторнинг ишга тушиш вақтидан 0,17 сонияга камлиги ҳамда ишга тушиш жараёни энергия самарадорлиги ўртача 29,8% га ортиши аниқланди.

2. Икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторнинг кўндаланг қўзғатиш тизимини статор пўлат ўзаги юзасида жойлашган ва йиғинди магнит майдон таркибидан 3-гармоникасини ажратиб олувчи синусоидал ўлчов датчиги асосида олинган ўзгарувчан магнит майдон ҳосил қилган ЭЮКсини тиристор орқали ростлаб таъминлаш имконини берувчи қурилманинг принципиал схемаси ишлаб чиқилди. Натижада насос станцияларидаги синхрон моторлар (синхрон компенсаторлар)нинг ишга тушишдаги статор токи 19,6% га камайишига эришилди.

3. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторларнинг қўзғатиш чулғамларига бериладиган ўзгармас ток миқдори ва йўналишини бошқариш имконини берувчи электр таъминоти схемаси реверсив тиристорли ўзгарткич асосида ишлаб чиқилди. Натижада насос станциясини электр энергияси билан таъминлашда электр узатиш линияларининг ўтказиш қобилияти 15% ошишига эришилди. Шу билан бирга икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторларнинг анъанавий синхрон компенсаторларга нисбатан бузилишларсиз ишлаш эҳтимоли 0,25 миқдорга кўплиги, ишлаш ишончилиги юқорилиги аниқланди.

4. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторлар тоқларининг келтириш коэффициентини U – симон тавсифи ёрдамида аниқлаш усули якор ва қўзғатиш тоқларининг нисбати асосида ишлаб чиқилди. Натижада бу усулда тоқлар келтириш коэффициентининг аниқлик даражаси юқори бўлиши аниқланди.

5. Олиб борилган назарий ва тажриба тадқиқот натижалари ўзаро солштирилган. Натижада улар орасидаги фарқ (адекватлик) 4,4 % га тенг

эканлиги аниқланган.

6. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторларнинг электр таъминоти схемаси Аму-Қашқадарё ирригация тизимлари ҳавза бошқармаси ҳузуридаги насос станцияларига жорий этилди. Натижада икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон компенсаторларнинг ишлаш ишончилигини ошириш ҳисобига 112955500 сўмлик иқтисодий самарадорликка эришилди.

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

**КАРШИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

КУРБОНОВ НАЖМИДДИН АБДУХАМИДОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ РАБОТЫ СИНХРОННОГО
КОМПЕНСАТОРА С ДВУХОСНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

05.05.01 – Энергетические системы и комплексы

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

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан под номером B2022.1.PhD /T2673.

Диссертация выполнена в Каршинский государственный технический университет.

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

Научный руководитель:	Пирматов Нурали Бердиёрович доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Арипов Назиржон Мукарамович доктор технических наук, профессор
	Хошимов Урал Хошимович доктор философии по техническим наукам
Ведущая организация:	Навонийский государственный горно-технологический университет

Защита диссертации состоится на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2021.T.143.01 при Институте проблем энергетике АН РУз в 2025 г. « 09 » 4 ЮНЯ в 10⁰⁰ часов. (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 40. Тел.: (+99855) 520-01-52, e-mail: energetika_in@umail.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в информационно-ресурсном центре Института проблем энергетике АН РУз (зарегистрирован под номером 5). (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 40. Тел.: (+99855) 520-01-52).

Автореферат диссертации разослан « 25 » 4 ЮНЯ 2025 года.
(реестр протокола рассылки № 5 от « 24 » 4 ЮНЯ 2025 г).



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, доктора философии (PhD) по техническим наукам, старший научный сотрудник

О.Х. Ишнazarov
Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученой степени, доктор технических наук, профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире целях соответствия современным требованиям развития мировой электроэнергетики особое внимание уделяется синхронным компенсаторам с целью повышения надежности бесперебойного снабжения электроэнергией потребителей и поддержания баланса электроэнергии в системе. В настоящее время в развитых странах «...проводятся обширные исследования синхронных компенсаторов с двухосным возбуждением для регулирования напряжения электросети. Традиционные синхронные компенсаторы имеют ограниченный диапазон потребления реактивной мощности до 40%»¹, а потребление реактивной мощности синхронного компенсатора с двухосным возбуждением составляет 100%. В связи с этим особое внимание уделяется исследованиям надежной работы синхронных компенсаторов с двухосным возбуждением для сохранения устойчивости в системе в случае возникновения аварийной ситуации. Особое внимание уделяется поддержанию одинакового значения напряжения в точке присоединения потребителей к электрической сети и повышению коэффициента мощности потребителей.

В мире проводятся исследования с целью изучения процессов отказов, возникающих в системах генерации, передачи и распределения электроэнергии. В этом направлении, среди прочего, приоритетными являются исследования по надежному анализу работы синхронных компенсаторов с двухосным возбуждением. Актуальным является изучение задач обеспечения надежной работы синхронных компенсаторов с продольно-поперечным возбуждением в энергетике, являющейся одной из важных отраслей мировой экономики. Эффективным способом решения этой задачи является использование синхронного компенсатора с двухосным возбуждением (СКДВ) и асинхронизированного синхронного компенсатора (АСК). При этом одной из актуальных задач является повышение эффективности обеспечения потребителей качественной электроэнергией без ущерба при переходных процессах в сетях электропередачи.

В нашей республике реализуются меры по разработке новых технологий и внедрению их в отрасли экономики с целью обеспечения потребителей качественной и стабильной электроэнергией. В стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы определены ряд задач, в том числе «Бесперебойное обеспечение экономики электроэнергией и активное внедрение технологий «Зеленой экономики» во все сферы, увеличение энергоэффективности экономики на 20-процентов»². Одним из важных вопросов при реализации этих задач, является разработка имитационной модели, позволяющей глубоко потреблять реактивную энергию синхронных компенсаторов, срабатывающих по двум осям, разработка принципиальной

¹<http://www.energetik.energy-journals.ru/index.php/EN/article/view/367>.

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

схемы устройства, регулирующего систему поперечного возбуждения синхронного компенсатора через синусоидальный измерительный датчик, разработка метода определения коэффициента изменения токов синхронных компенсаторов и повышения надежности работы синхронных компенсаторов, срабатывающих по двум осям.

Данное диссертационное исследование в определенной степени послужит реализации задач, обозначенных в Указе Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы» и Постановлениях от 28 сентября 2023 года № УП-166 «О мерах по реализации очередного этапа реформирования энергетической отрасли», Постановлении от 22 августа 2019 года № ПП-4422 «О неотложных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии» и Постановлении от 6 июля 2022 года № 307 «Об организационных мерах по реализации Стратегии инновационного развития Республики Узбекистан на 2022 - 2026 годы», а также других нормативно-правовых актах, связанных с данной деятельностью.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационные исследования соответствуют приоритетам развития республиканской науки и техники 2. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Одна из научных работ, выполненных с целью сохранения значения напряжения на одном и том же месте в любой точке электрической сети, повышения коэффициента мощности потребителей и устранения аварий, возникающих в переходных режимах синхронных компенсаторов, научные исследования, направленные на изучение переходных режимов синхронного компенсатора с двухосным возбуждением, проводятся в ведущих мировых научных центрах и высших учебных заведениях, в том числе Калифорнийском технологическом институте (США), Мичиганском университете (США), Университете Ватерлоо (Канада), Токийском технологическом институте (Япония), Миланский политехнический университет (Италия), Всероссийский научно-исследовательский институт электроэнергетики (ВНИИЭ, Россия), В Национальном исследовательском университете (МЭИ, Россия) и ТГТУ (Узбекистан).

На развитие как синхронных машин с двухосным возбуждением, так и асинхронизированных синхронных машин также оказали влияние .М. Ботвинник, Ю.Г. Шакарян, Н.И. Блоски, Н.Н. Тшедрин, Л.Г. Мамиконянц, И.М. Постников, И.Д. Урусов, Н.И. Соколов, Е.А. Каспаров, А.И. Лабунес, А.П. Лохматов, M.S. Morsy, Н.Н. Amer, В.W. Hogg, S. Raman, J.C. Clare, A. Kahn, L.M. Ricardo, R.M. Sebastian, а также ученые нашей республики К.Р. Аллаев, Х.М. Асимов, Х.А. Мушиганц, Н.Х. Бозоров, М.Г. Ахматов, Н.Б. Пирматов, Ғ. Одилов, Ж.С. Салимов, Л.В. Ковешникова и другие внесли значительный вклад.

Несмотря на значительные успехи, переходные режимы синхронного компенсатора с двухосным возбуждением изучены недостаточно. В указанной

работе не были разработаны физико-математические и MatLab модели для исследования режима асинхронного пуска синхронного компенсатора с двухосным возбуждением, и этот переходный режим не был тщательно проанализирован.

Связь темы диссертации с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках плана научно-исследовательской работы по теме «Энерго- и ресурсоэффективность в системе электроснабжения, повышение надежности электрических машин и внедрение энергосберегающих технологий», выполняемой на кафедре «Электроснабжение и интеллектуальные энергетические системы» Каршинский государственный технический университет.

Целью исследования повышение надежности работы в режиме глубокого потребления реактивной мощности путем регулирования тока в поперечной обмотке возбуждения синхронных компенсаторов с двухосным возбуждением.

Задачи исследования:

- разработка имитационной модели синхронного компенсатора с двухосным возбуждением, позволяющего обеспечить глубокое потребление реактивной энергии в режиме сверх недовозбуждения;
- разработка принципиальной схемы устройства, позволяющую осуществлять регулирование и обеспечение питания поперечного системы возбуждения синхронного компенсатора с двухосным возбуждением с использованием синусоидального измерительного датчика;
- разработка метода определения коэффициента приведения токов синхронных компенсаторов с двухосным возбуждением, с использованием U-образной характеристики;
- разработка электрической схемы системы возбуждения, позволяющей повысить надежность работы синхронных компенсаторов с с двухосным возбуждением.

Объектом исследования является как традиционный, так и синхронный компенсатор с двухосным возбуждением.

Предметом исследования являются переходные процессы синхронных компенсаторов с двухосным возбуждением.

Методы исследования. В ходе исследований использовались теория переходных режимов СКДВ, дифференциальные уравнения Парка-Горева, моделирование переходных режимов в программе MatLab, методы математической статистики для сравнения и обработки полученных данных.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- разработана имитационная модель синхронного компенсатора с двухосным возбуждением, позволяющая осуществлять глубокое потребление реактивной мощности путем регулирования тока в цепи поперечного возбуждения, в режиме сверх недовозбуждения;
- разработана принципиальная электрическая схема устройства, которая управляет системой поперечного возбуждения синхронного компенсатора с двухосным возбуждением, синусоидальным измерительным датчиком,

расположенным на поверхности стального сердечника якоря, и выделяет 3-ю гармонику из состава полного магнитного поля, с помощью тиристора, и обеспечивает надежную работу;

- разработана методика определения коэффициента приведения токов синхронных компенсаторов с двухосным возбуждением, с использованием U-образной характеристики на основе соотношений токов якоря и возбуждения;

- разработана схема системы возбуждения, обеспечивающая возможность регулирования величины и фазы постоянного тока, подаваемого на продольные и поперечные обмотки возбуждения синхронного компенсатора, с двухосным возбуждением на основе реверсивного тиристорного выпрямителя.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

- разработана математическая модель процесса пуска синхронного компенсатора с двухосным возбуждением, с учетом параметров сети и магнитного насыщения, а также алгоритм ее расчета;

- повышена надежность работы в режиме глубокого потребления реактивной энергии за счет регулирования тока обмотки, расположенной на поперечной оси синхронного компенсатора с двухосным возбуждением;

- созданы физические и Matlab Simulink-модели для изучения переходных процессов синхронного компенсатора с двухосным возбуждением.

Достоверность результатов исследования. Полученные результаты с использованием физических и MatLab-моделей переходных режимов и их взаимное согласование, обоснованное принятием их к использованию в производстве, объясняются согласованием многочисленных теоретических и экспериментальных подтверждений результатов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследований объясняется тем, что определен коэффициент приведения токов синхронного компенсатора с двухосным возбуждением, усовершенствована методика расчета процесса пуска синхронного компенсатора в асинхронном режиме, разработана имитационная модель глубокого потребления реактивной энергии.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что реализация электрической схемы системы возбуждения реверсивного тиристорного выпрямителя, обеспечивающего глубокое регулирование потребления реактивной энергии мощных синхронных компенсаторов, используемых в точках присоединения потребителей электрических сетей, на основе регулирования тока в поперечной обмотке возбуждения, позволила повысить надежность работы в электромагнитных и электромеханических переходных процессах.

Внедрение результатов исследования. На основании полученных научных результатов по повышению эксплуатационной надежности синхронного компенсатора с двухосным возбуждением:

На насосных станциях Аму-Кашкадарьинского бассейнового управления ирригационных систем внедрена электрическая схема системы возбуждения, разработанная на базе реверсивного тиристорного выпрямителя, позволяющая регулировать фазу и величину тока возбуждения, подаваемого на системы

возбуждения синхронного компенсатора с двухосным возбуждением (Справка Министерства водного хозяйства Республики Узбекистан от 4 апреля 2024 года № 03/17-1198). В результате время пуска синхронного двигателя (синхронного компенсатора) на насосных станциях сократилось на 40,4%;

Принципиальная схема устройства, управляющего продольными и поперечными обмотками возбуждения синхронного компенсатора, переменного электродвижущего сила, полученного на основе синусоидального измерительного датчика, расположенного на поверхности стального сердечника якоря и выделяющего с помощью тиристора 3-ю гармонику из общей структуры магнитного поля, и питающего ее постоянным током, внедрена в насосные станции Аму-Кашкадарьинского бассейнового управления ирригационных систем (справка Министерства водного хозяйства Республики Узбекистан от 04.04.2024 г. № 03/17-1198). В результате ток статора синхронного двигателя (синхронного компенсатора) при пуске насосных станций снижен на 19,6%;

На насосных станциях Аму-Кашкадарьинского бассейнового управления ирригационных систем (справка Министерства водного хозяйства Республики Узбекистан от 4 апреля 2024 года № 03/17-1198) внедрена схема питания синхронных компенсаторов с двухосным возбуждением. В результате достигнута экономическая эффективность в размере 112955500 сум.

Апробация результатов исследований. Результаты исследований были апробированы на 10 научно-практических конференциях и семинарах, в том числе на 8 международных и 2 республиканских конференциях.

Опубликованность результатов исследований. Всего по теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 1 статьи в зарубежных журналах (2 статьи на конференциях, входящих в базу данных Scopus), 8 в республиканских журналах, рекомендованных ВАК статей для публикации основного научного результата докторских диссертаций (PhD), свидетельства на 1 программное обеспечение, 8 статей в сборниках научных-конференций.

Структура и объем диссертации. Состав диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы в 123 наименованиях, основной текст составляет 120 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и необходимость научных исследований, цели и задачи, охарактеризованы объект и предмет исследования, показано соответствие развития науки и технологий к приоритетным направлениям, описаны научная новизна и практические результаты проведенных научно-практических исследований, раскрыто научное и практическое значение работы, приведены сведения по внедрению результатов исследований в практику по опубликованным трудам и информация о структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Современное состояние надежности работы синхронных компенсаторов**» рассмотрено современное состояние надежности работы традиционных и двухосных синхронных компенсаторов. Во всей рассмотренной литературе основное внимание уделяется анализу режимов

работы синхронного компенсатора с продольным и поперечным возбуждением на основе линейной теории. При этом в эксперименте на самой машине не была получена правильность теоретических выводов о влиянии поперечной катушки на магнитное поле и описания синхронного компенсатора с двухосным возбуждением.

За счет того, что ротор имеет две катушки возбуждения, надежность синхронных машин с сетью повышается. Потому что при выходе из строя одного из обмоток возбуждения или потере возбуждения на одной оси синхронная машина продолжит работать как обычная синхронная машина с одним возбуждением. С целью повышения надежности синхронных машин предложение об установке дополнительной катушки, питаемой от отдельно регулируемого источника постоянного тока, было предложено Н.Н.Щедриним (1932). Основная задача поперечной катушки возбуждения – гашение колебаний, возникающих в динамических режимах. Для увеличения скорости работы этой катушки, обмотка должна иметь большое активное сопротивление.

На практике различные проблемы можно решить, используя дополнительную поперечную катушку возбуждения. Следует отметить, что исследования синхронных машин с неявнополюсом, возбуждаемых в продольном и поперечном осям, проведенные Н.И. Соколовым и его учениками, являются более глубоким. В этих работах для увеличения потребления реактивной мощности использовался синхронный компенсатор с продольно-поперечной обмоткой возбуждения. Наличие схемы поперечного возбуждения позволяет успокоить не только колебания в синхронном компенсаторе, но и колебания в синхронных генераторах в электрической системе.

В качестве законченного исследования можно принять работы М.Г.Ахматова о синхронных машинах с продольным и поперечным возбуждением. Под его руководством на кафедре электрических машин ТГТУ была создана уникальная база, позволившая изучать синхронные машины с двухосным возбуждением. В учебном пособии М.Г. Ахматова изложены методы и теория расчета основных рабочих характеристик синхронных машин с двумя катушками возбуждения на роторе с учетом насыщения. Влияние законов автоматической регулировки возбуждения на устойчивость нагрузки и возбуждения, улучшение работы синхронных машин в режимах недовозбуждения, методы экспериментального определения магнитного поля и других связанных с ним величин обдуманной. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных на синхронных машинах на основе расчета магнитного поля с учетом насыщения магнитопровода в воздушном зазоре.

В научных работах рассмотрены тестовые эксперименты по асинхронизированным компенсаторам и ввод в эксплуатацию асинхронных компенсаторов.

Наличие двух обмоток в роторе повышает устойчивость и надежность синхронных машин.

Во второй главе диссертации, названной «**Пуск синхронного**

компенсатора с двухосным возбуждением», проанализированы и были созданы Matlab Simulink модели процессы пуска традиционного синхронного компенсатора (ТСК) и синхронного компенсатора с двухосным возбуждением (СКДВ) и полученные результаты.

В этой главе диссертации при написании дифференциальных уравнений СКДВ предполагается, что уравнения компенсатора совместимы с матричными уравнениями сети. Для этого был рассмотрен метод преобразования дифференциальных уравнений синхронного компенсатора к форме ЭДС.

Известно, что дифференциальные уравнения традиционных СК нелинейны, в связи с чем при их решении возникают определенные трудности.

Остальные размеры машины могут быть выражены в продольной и поперечной осях. и выражая все величины машины с двумя компонентами с помощью осей, выражаются полные алгебраические дифференциальные уравнения dq .

$$\begin{aligned}
 u_d &= -\frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \frac{d\gamma}{dt} - i_d r & \frac{d\dot{\psi}_d}{dt} + i_d \cdot r_d &= 0 \\
 u_q &= \psi_d \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\psi_q}{dt} - i_q r & \frac{d\dot{\psi}_q}{dt} + i_q \cdot r_q &= 0 \\
 u_{fd} &= \frac{d\dot{\psi}_{fd}}{dt} + i_{fd} \cdot r_{fd} & \psi_d &= X_d \cdot i_d + X_{ad} \cdot i_{fd} + X_{ld} \cdot i_{ld} \\
 u_{fq} &= \frac{d\dot{\psi}_{fq}}{dt} + i_{fq} \cdot r_{fq} & \psi_q &= X_q \cdot i_q + X_{aq} \cdot i_{fq} + X_{lq} \cdot i_{lq} \\
 u_0 &= X_0 \frac{di_0}{dt} + i_0 \cdot r_0 & \psi_{fd} &= X_{fd} \cdot i_{fd} + X_{ad} \cdot i_d + X_{ld} \cdot i_{ld} \\
 & & \psi_{fq} &= X_q \cdot i_{fq} + X_{aq} \cdot i_q + X_{lq} \cdot i_{lq} \\
 & & \psi_{ld} &= X_{ad} \cdot i_d + X_{fd} \cdot i_{fd} + X_{ld} \cdot i_{ld} \\
 & & \psi_{lq} &= X_{aq} \cdot i_q + X_{fq} \cdot i_{fq} + X_{lq} \cdot i_{lq} \\
 & & M_\Gamma &= \psi_q \cdot i_d - \psi_d \cdot i_q \\
 & & \frac{d^2\delta}{dt^2} &= \frac{1}{T_j} (M_T - M_\Gamma) = \frac{1}{T_j} [M_1 - (\psi_q \cdot i_d - \psi_d \cdot i_q)]
 \end{aligned} \tag{1}$$

Модель процесса пуска синхронного компенсатора с двухосным возбуждением в программе MatLab Simulink создается на основе следующего (1) дифференциального уравнения Парка-Горева. В этом случае, согласно уравнению, катушка возбуждения расположена вдоль осей d и q и имеет две катушки возбуждения. Управляя током продольной катушки возбуждения, расположенной по оси d, регулируют напряжение сети, а регулируя ток поперечной катушки возбуждения, расположенной по оси q, регулируют положение ротора.

С использованием системы уравнений (1) была построена модель в программе MatLab Simulink для исследования процесса асинхронный пуск СК с двухосным возбуждением (рис. 1).

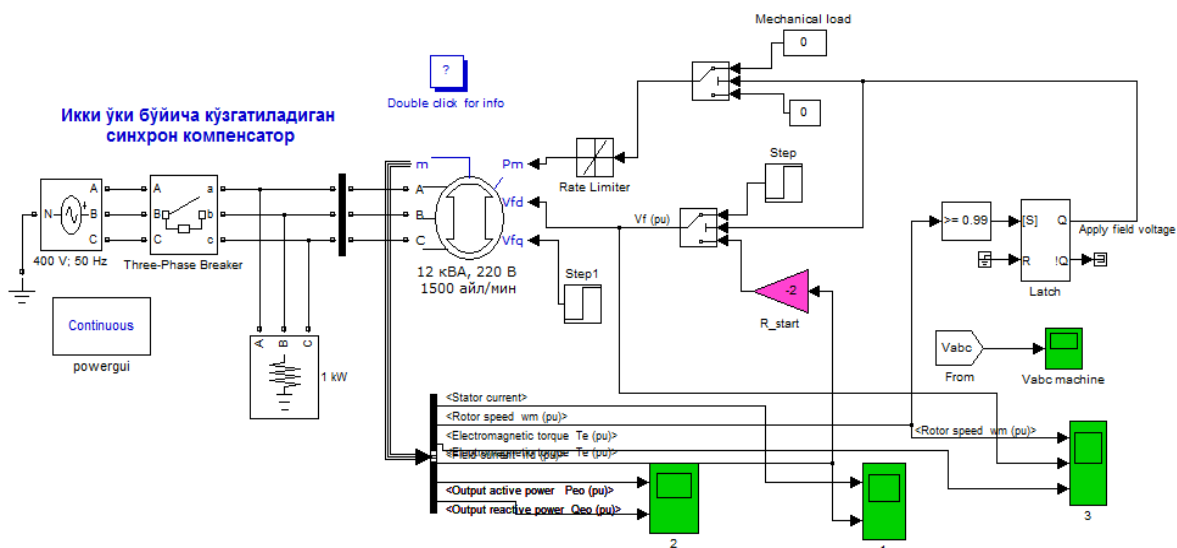


Рис. 1. MatLab Simulink модель процесса пуска синхронного компенсатора с двухосным возбуждением

Ниже приведены результаты пуска синхронного компенсатора с двухосным возбуждением м мощностью 15 кВА и скоростью вращения 1500 об/мин в программе MatLab Simulink.

На рис. 2 представлены графики изменения активной и реактивной энергий в процессе пуска синхронного компенсатора с двухосным возбуждением, полученные в программе MatLab Simulink, где синхронный компенсатор запускается за 0,25 секунды.

На рис. 3 представлен график изменения частоты вращения ротора и электромагнитного момента в процессе пуска синхронного компенсатора с двухосным возбуждением, полученный в программе MatLab Simulink, где синхронный компенсатор входит в синхронизм через 0,25 секунды и продолжает работать.

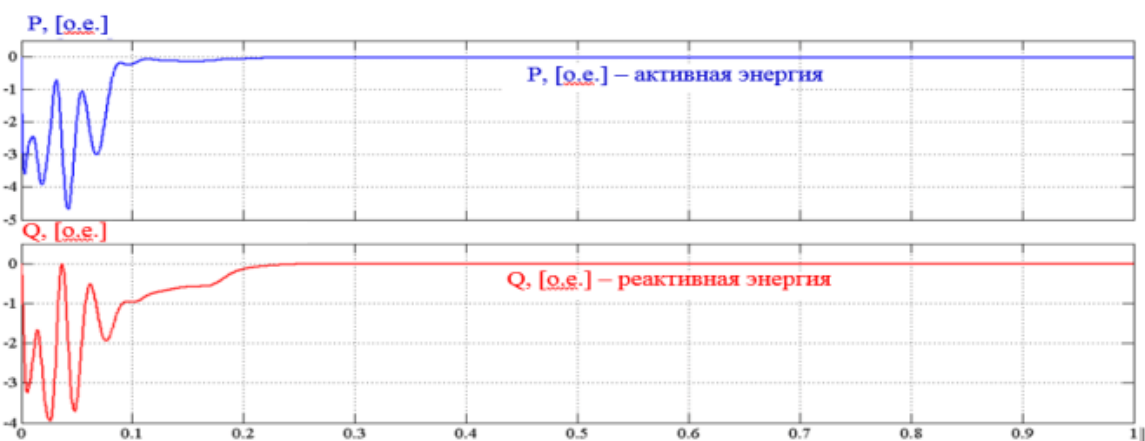


Рис.2. График изменения активной и реактивной энергии в процессе пуска синхронного компенсатора с двухосным возбуждением в программе MatLab Simulink

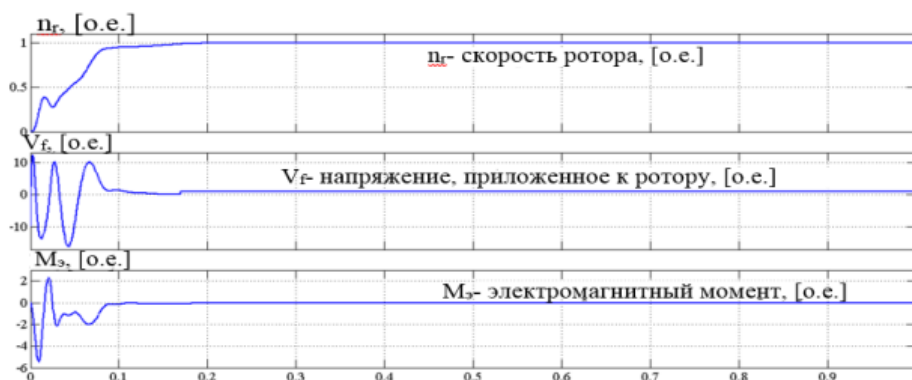


Рис.3. График изменения частоты вращения ротора и электромагнитного момента в процессе пуска синхронного компенсатора с двухосным возбуждением в программе MatLab Simulink

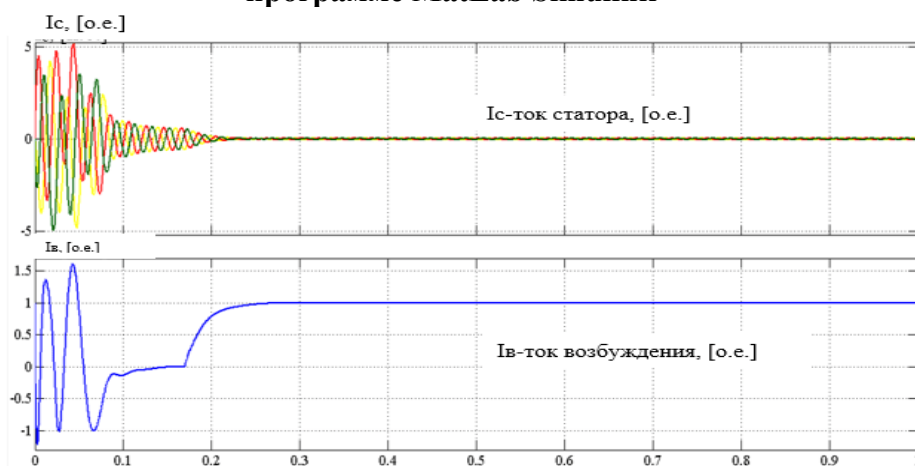


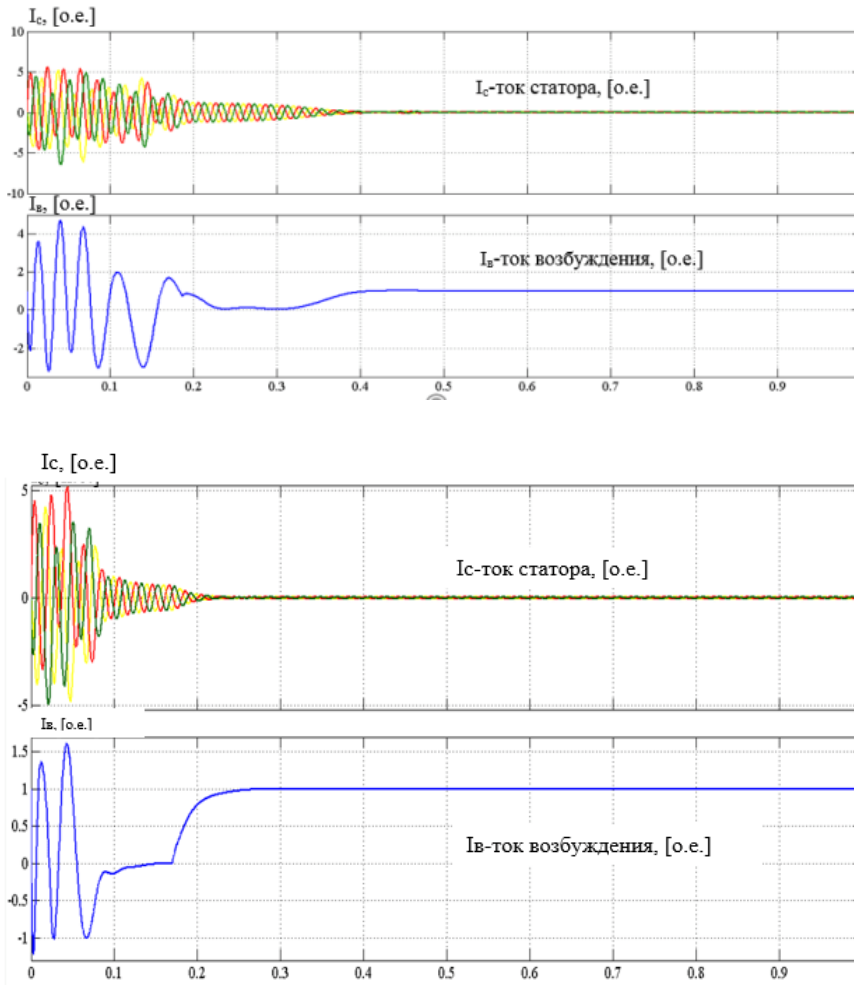
Рис.4. Графики токов в трех фазах статора в процессе пуска синхронного компенсатора с двухосным возбуждением в программе MatLab Simulink и графики изменения тока возбуждения

На рисунке 4 выше показаны графики изменения трёхфазных токов статора и тока возбуждения в процессе запуска синхронного компенсатора с двухосным возбуждением в программе MatLab Simulink, где пусковой ток равен 5,1 о.е. мы видим, что это так.

По сравнению пусковых токов традиционного синхронного компенсатора и синхронных компенсаторов с двухосным возбуждением на рис. 5 а,б видно, что пусковой ток синхронного компенсатора с двухосным возбуждением в 1,21 раза меньше пускового тока традиционного синхронного компенсатора, т.е. на 19,6% меньше. На рис 5 а) и б) по результату сравнения времени пуска традиционного и синхронных компенсаторов с двухосным возбуждением видно, что время пуска синхронного компенсатора с двухосным возбуждением в 1,68 раза меньше, чем у традиционного синхронного компенсатора время пуска синхронного компенсатора с двухосным возбуждением, т.е. на 40,4% меньше. Это означает, что эффективность пускового процесса синхронных компенсаторов синхронного компенсатора с двухосным возбуждением на 29,8% выше, чем у традиционных синхронных компенсаторов.

Результаты сравнения величин пусковых процессов традиционных и синхронных компенсаторов компенсатора с двухосным возбуждением, полученные выше, приведены ниже:

а)



б)

Рис.5. Результаты сравнения пусковых процессов традиционных а) и б) синхронных компенсаторов с двухосным возбуждением

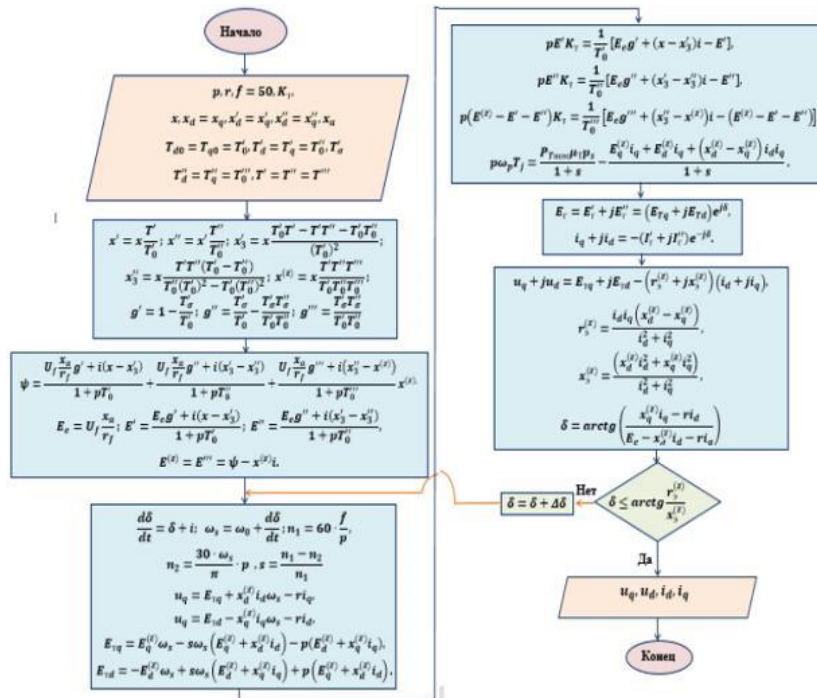


Рис.6. Алгоритм расчёта пускового процесса синхронного компенсатора с двухосным возбуждением с учетом параметров сети и магнитного насыщения

На рис. 6 представлен алгоритм расчёта переходного процесса синхронного компенсатора с двухосным возбуждением в системе математических дифференциальных уравнений (1) с учетом параметров сети и магнитного насыщения.

Третья глава диссертации «**Режим потребления реактивной мощности синхронных компенсаторов**» посвящена анализу традиционных СК и IO'BQSK в режиме потребления реактивной мощности путем построения векторной диаграммы и моделирования ее динамического описания с помощью программы Matlab Simulink.

На рис. 7 представлены графики изменения активной и реактивной мощности при переходе синхронного компенсатора с двухосным возбуждением из режима перевозбуждения в режим недовозбуждения. В этом случае при изменении тока возбуждения из режима перевозбуждения в режим недовозбуждения синхронный компенсатор с двухосным возбуждением, потребляет много реактивной энергии по сравнению с традиционным синхронным компенсатором. При отрицательных значениях тока возбуждения синхронный компенсатор с двухосным возбуждением, не выходит из синхронизма. Это означает, что синхронный компенсатор с двухосным возбуждением более надежен при работе в режиме глубокого потребления реактивной мощности, чем традиционный синхронный компенсатор.

1,7 о.е. на катушку возбуждения в режиме перевозбуждения синхронного компенсатора с двухосным возбуждением, согласно рис. 7 выше. 0,42 о.е. передаёт реактивную энергию на 0 о.е. на катушку возбуждения в режиме холостого возбуждения синхронного компенсатора с двухосным возбуждением.

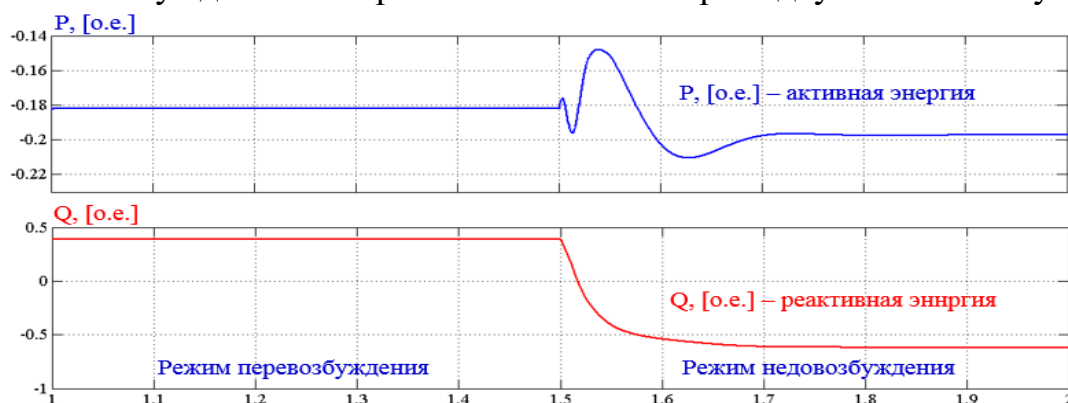


Рис.7. Графики изменения активной и реактивной мощности при переходе из режима перевозбуждения в режим недовозбуждения синхронного компенсатора с двухосным возбуждением

0,64 о.е. от сети при токе возбуждения, видно, что реактивная энергия потреблялась при 0 о.е. на катушку возбуждения в режиме холостого возбуждения синхронного компенсатора с двухосным возбуждением при токе возбуждения 0,06 о.е. по сравнению с традиционным синхронным компенсатором видно, что он потребляет много реактивной мощности.

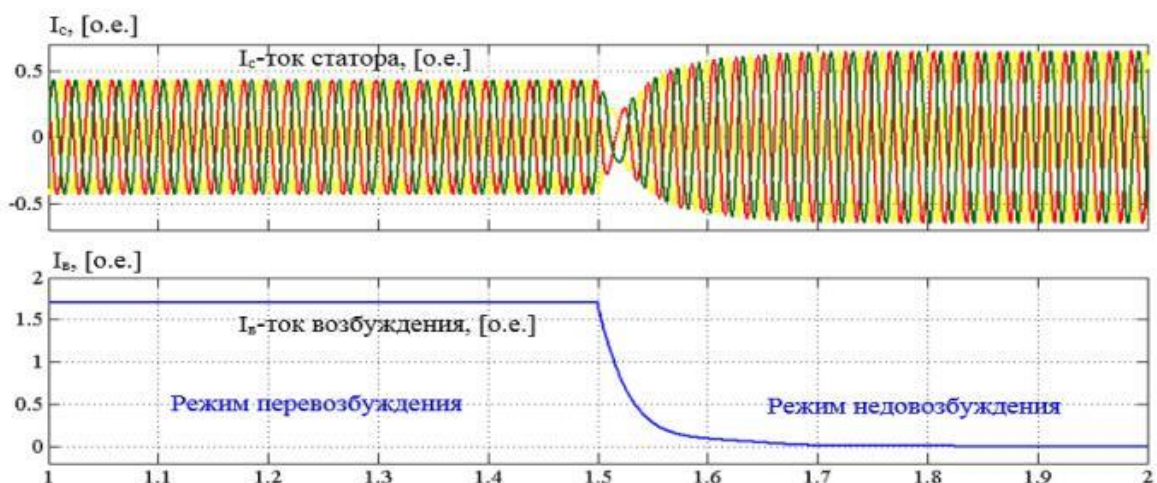


Рис.8. Графики изменения токов в статоре и катушке возбуждения при переходе синхронного компенсатора с двухосным возбуждением из режима перевозбуждения в режим недовозбуждения

На рисунке 8 ниже представлены графики изменения токов в статоре и катушке возбуждения при переходе синхронного компенсатора с двухосным возбуждением из режима перевозбуждения в режим недовозбуждения а при подаче тока возбуждения - 0,48 о.е. также будет читать текущий. В режиме холостого хода синхронного компенсатора с двухосным возбуждением катушка возбуждения равна 0 о.е. а при подаче тока возбуждения - 0,68 о.е. видно, что ток прочитан.

Графики изменения токов статора и возбуждения синхронного компенсатора с двухосным возбуждением в режиме недовозбуждения (при отрицательном значении тока возбуждения) представлены на рис. 9.

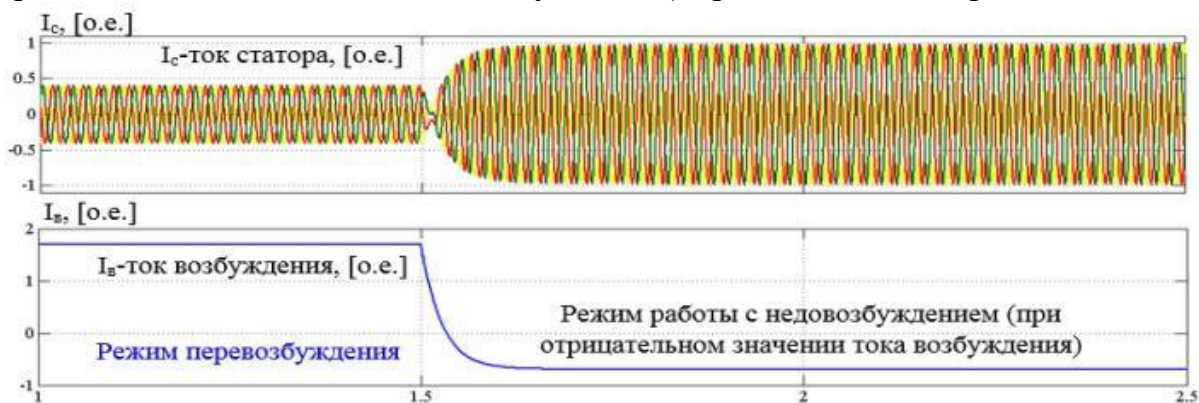


Рис.9. Графики изменения токов статора и возбуждения синхронного компенсатора с двухосным возбуждением при его переходе из режима перевозбуждения в режим недовозбуждения и при отрицательном значении тока возбуждения

Согласно рисунку 9 выше, когда синхронный компенсатор с двухосным возбуждением, переходит из режима перевозбуждения в режим глубокого недовозбуждения (при отрицательном значении тока возбуждения), статор и ток возбуждения не качается по сравнению с режимом глубокого недовозбуждения традиционного синхронного компенсатора. В этом режиме синхронный компенсатор с двухосным возбуждением может работать стабильно по

сравнению с традиционным синхронным компенсатором, то есть синхронный компенсатор с двухосным возбуждением может работать, не выходя из синхронизма.

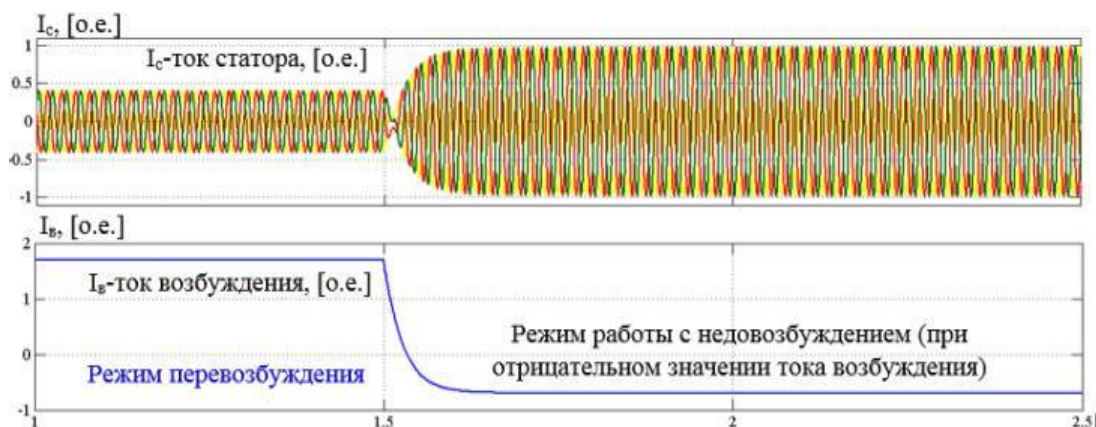


Рис.10. Графики изменения активной и реактивной мощностей синхронного компенсатора с двухосным возбуждением при переходе его из режима перевозбуждения в режим недовозбуждения и при отрицательном значении тока возбуждения

Согласно рисунку 10 выше, представлены графики изменения активной и реактивной мощностей при переключении синхронного компенсатора с двухосным возбуждением из режима перевозбуждения в режим глубокого недовозбуждения (при отрицательном значении тока возбуждения).

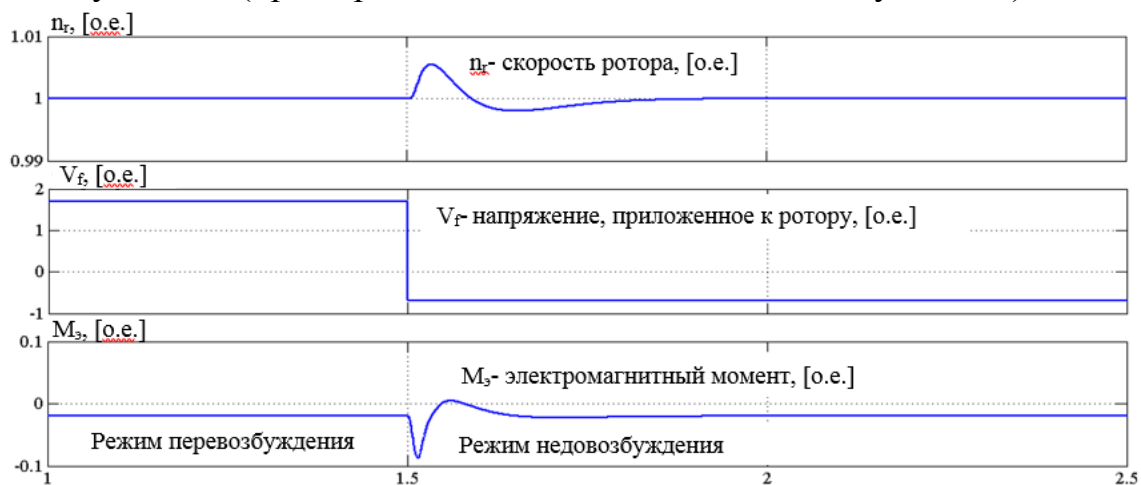


Рис.11. Графики изменения частоты вращения ротора и электромагнитного момента при переходе синхронного компенсатора с двухосным возбуждением из режима перевозбуждения в режим недовозбуждения и при отрицательном значении тока возбуждения

Согласно рисунку 11 выше, в режиме недовозбуждения синхронного компенсатора с двухосным возбуждением при подаче отрицательного напряжения на обмотку возбуждения вибрация в движении ротора отсутствует. Это показало, что синхронный компенсатор с двухосным возбуждением обладает более высокой способностью стабильно работать в режиме глубокого потребления реактивной мощности, чем традиционный синхронный компенсатор.

При расчете характеристических U-образного характеристик СК задаются следующие величины: напряжение, приложенное к статору, ток намагничивания $I_{\mu d}$, определенный из эксперимента или расчета характеристики работы при заданном напряжении, синхронное индуктивное сопротивление на поперечной оси x_q (или x_{aq}), индуктивное сопротивление обмотки статора x_s , коэффициент приведения тока возбуждения к току статора $k = I_f/I_1$.

Расчетные и экспериментальные характеристики СК мощностью 15 kVA практически согласуются и показывают, что с увеличением отрицательных значений тока возбуждения характеристика отклоняется от линейной зависимости (рис. 12, кривая 1). Это отклонение объясняется тем, что подача отрицательных значений тока возбуждения заставляет ротор выталкиваться наружу, что приводит к увеличению угла θ и тока I_1 . Кроме того, при построении подобного описания необходимо учитывать потери, величина которых незначительна, но варьируется в широких пределах. Для синхронных компенсаторов мощности $30 \div 150 MW$ при изменении реактивной мощности от $(I_f = I_{fo}) Q = Q_n$

На рис. 12 представлена 2-я кривая изменения потерь в СК мощности 15 kVA, на этом же рисунке представлено то же описание синхронного двигателя (компенсатора) с разделенным поршневым компрессором ($P = 4000 kW$, $U = 6 kV$, $n = 150 ayl/min$) (кривая 3). Характеристика этого двигателя также отклоняется вверх от прямой линии при отрицательном возбуждении. В современных синхронных компенсаторах, $x_d = 2 \div 2,2$ а значит $x_q = 1,2 \div 1,3$, в предельном состоянии малого возбуждения они только потребляют $(0,5 \div 0,45)Q_n$.

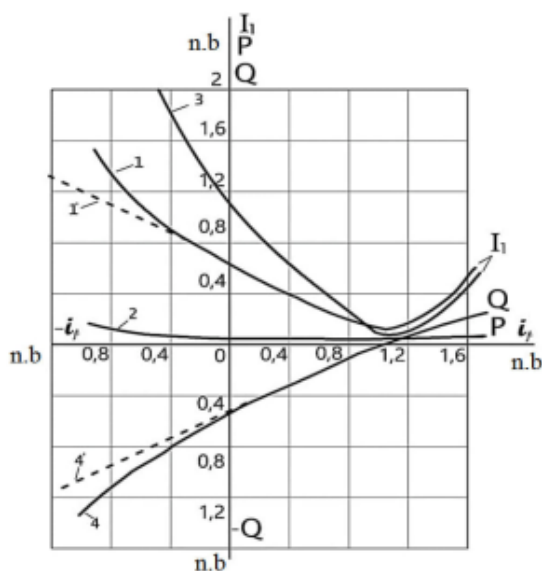


Рис.12. U-образная характеристика синхронного компенсатора

Увеличить потребляемую реактивную мощность до $Q = (0,6 \div 0,75)Q_n$ можно путем подачи на катушку возбуждения отрицательных значений тока возбуждения без автоподстройки. Используя автоматическую регулировку возбуждения, эту мощность можно поднять до $Q \approx 0,8$. Применяя в роторе дополнительную поперечную катушку, компенсирующую поперечную реакцию

якоря, можно довести потребляемую мощность до номинальной, то есть увеличивается предел надежной работы, при котором U-образная характеристика приобретает линейный характер (1' – кривая). Ограничивающим фактором тока является нагрев активной части машины и частей ее боковой конструкции. Реактивная мощность синхронного двигателя с продольно-поперечным возбуждением обычно определяется таким выражением:

$$Q = U_d I_q - U_q I_d = \frac{U E_{fd}}{x_d} \cos \theta - \frac{U^2}{2} \cdot \left[\left(\frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d} \right) - \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \cos 2\theta \right) \right] \pm \frac{U E_{fq}}{x_q} \sin \theta \quad (2)$$

где E_{fd}, E_{fq} – при котором магнитные потоки продольной и поперечной обмоток индуцируются в обмотке статора.

В области положительных значений тока возбуждения роль влияния на величину реактивной мощности поперечной цепи незначительна, поэтому последним членом (2) можно пренебречь. Эта роль поперечного тока существенно возрастает в области отрицательных значений тока возбуждения. При расчете реактивной мощности по (2), когда магнитная цепь машины не насыщена E_{fd}, E_{fq} , предполагается, что она пропорциональна величинам и токам i_{fd} и i_{fq} , а параметры x_d и x_q постоянны. В реальной насыщенной машине этим допущениям нет места, поэтому расчет по (2) дает большие погрешности.

U-образная характеристика предложенный расчетный метод расчета обезьяньего описания и реактивной мощности $СКd - q$ на его основе практически дает результаты, совместимые с экспериментальными данными.

Предлагаемое устройство проще по своей конструкции по сравнению с устройствами, рассмотренными выше.

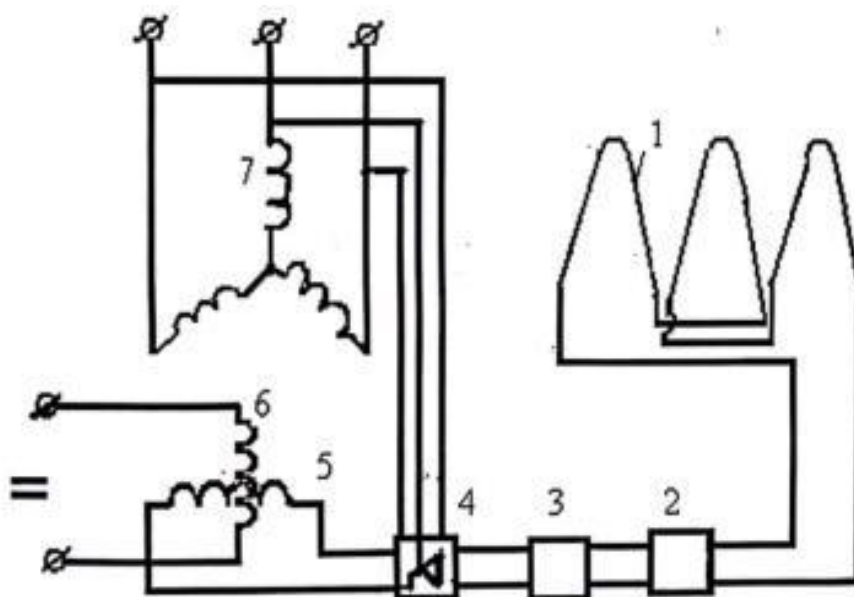


Рис. 13. Принципиальная схема регулирующего устройства, синхронного компенсатора с продольным и поперечным возбуждением

Принципиальная схема устройства, регулирующего возбуждение продольного и поперечного синхронного компенсатора, представлена на рис. 13. На этом рисунке 1 - датчик третьей гармоники магнитного поля, размещенный на внутренней поверхности статора синхронного компенсатора. Были проведены исследования по размещению этого датчика на внутренней поверхности статора.

Известно, что магнитное поле в воздушном пространстве синхронных машин изменяется при переключении с одного режима на другой. Поэтому важно знать распределение магнитного поля в воздушном зазоре при различных режимах работы машины. Однако расчет магнитного поля затруднен из-за влияния различных факторов.

При заданных токах ротора и статора характер распределения магнитного поля в воздушном зазоре можно определить с помощью датчика ЭДС Холла для условия неподвижности ротора.

При определении характера распространения магнитного поля в воздушном зазоре с помощью датчика ЭДС Холла в основном имеются три недостатка:

1. Результаты измерений дают значение магнитной индукции определенной длины в воздушном зазоре;

2. Датчик ЭДС Холла должен располагаться в воздушном зазоре автомобиля (воздушный зазор не должен быть менее 1,5 мм);

3. При решении некоторых задач необходимо знать основную и третью гармоники магнитного поля в воздушном зазоре. В таких случаях приблизительный результат можно получить с помощью этого метода. В этом случае желаемый результат дает использование рамок специальной формы, помещенных в воздушный зазор. Кадры, используемые для определения, то есть выделения, третьей гармоники магнитного поля в воздушном зазоре по продольной и поперечной осям, показаны на рис. 14.

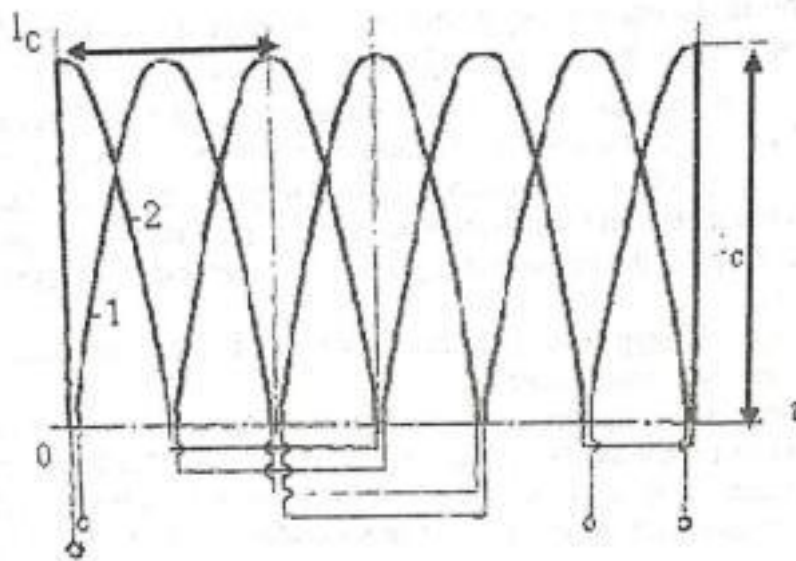


Рис.14. Схема вывода третьей гармоники магнитного поля в воздушном зазоре по продольной и поперечной осям

Эти рамы используются не только при неподвижном роторе, но и при его вращении. Для изготовления этих рамок на миллиметровой бумаге рисуют синусоиды и косинусы, а затем переносят их на линейку. К изогнутым линиям на крючке с помощью специального клея приклеивается изолированный медный провод диаметром 0,15-0,2 мм и после высыхания приклеивается к поверхности статора.

Датчик, измеряющий третью гармонику магнитного поля (прибор на рис. 14), состоит из 1, и его электрическая движущая сила (ЭДС) $E_{\delta 3}$ передается через выпрямитель 2 на усилитель 3, а затем от усилителя на тиристор 4. Тиристор 4 подключен к поперечной цепи возбуждения (демпфирования) 5 синхронного компенсатора, а продольная (основная) цепь 6 компенсатора - к внешнему источнику постоянного тока.

Это устройство работает следующим образом. Формируется ЭДС $E_{\delta 3}$ третьей гармоники магнитного поля датчика 1 рабочего синхронного компенсатора и через выпрямитель 2 передается на усилитель 3. А с усилителя этот сигнал поступает на 4 тиристора, подключенных к 5 поперечным выводам синхронного компенсатора. После прохождения тока через тиристор срабатывает система автоматического самовозбуждения, воздействующая на синхронный компенсатор через 5 поперечных катушек возбуждения.

Таким образом, эта система возбуждения очень удобна и имеет простую структуру.

В четвертой главе диссертации под названием «**Экспериментальное исследование синхронного компенсатора с приводом от двух осей**» дано U-образное характеристика синхронного компенсатора, полученное в результате эксперимента, методика определения коэффициента индукции токов синхронного компенсатора, компенсатор с использованием описания формы, магнитное поле в воздушном зазоре синхронного компенсатора с приводом от двух осей, магнитное поле в воздушном зазоре синхронного компенсатора компенсатора с двухосным возбуждением, посвященные экспериментам по повышению надежности работы синхронного компенсатора при выходе из строя катушки возбуждения.

Для проведения данного эксперимента оставим открытым короткозамыкающий автомат АЗО_к синхронного компенсатора с двухосным возбуждением в схеме подключения рис. 15, и используем его как обычный синхронный компенсатор, дающий постоянное напряжение к катушке возбуждения, расположенной на оси d. Ток в катушке возбуждения традиционного синхронного компенсатора отключается, после чего его переводят в асинхронный режим работы без возбуждения путем короткого замыкания катушки, показанной на рис. 16. Затем с помощью осциллографа Tektronix MSO64 получают график изменения напряжения и тока статора традиционного синхронного компенсатора.

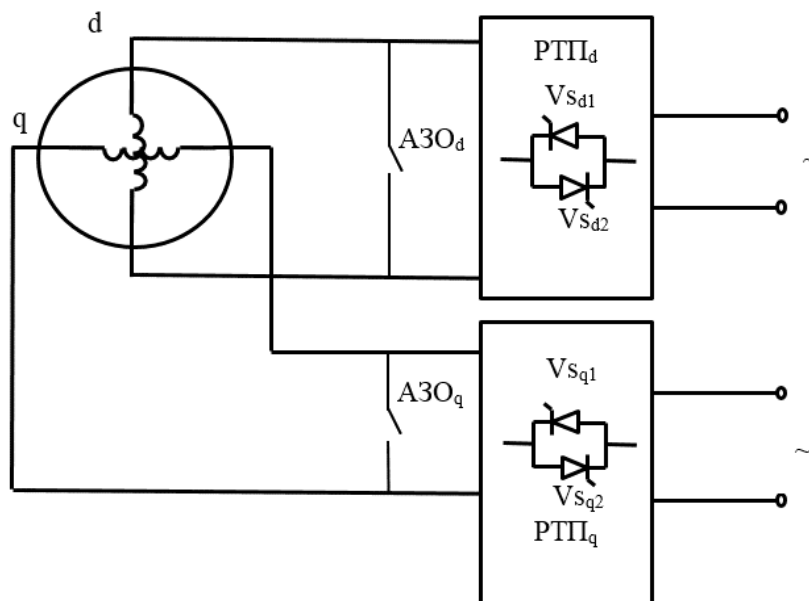


Рис.15. Схема подключения автомата, замыкающего накоротко обмотки привода двухосного синхронного компенсатора

Полученные осциллограммы показывают, что ротор синхронного компенсатора симметричен относительно осей d и q как магнитно, так и электрически. Напряжение статора уменьшается в зависимости от нагрузки и колеблется около среднего значения определенной частоты скольжения. Синхронные компенсаторы не допускаются к работе в этом режиме работы. В этом случае синхронный компенсатор отключается от сети.

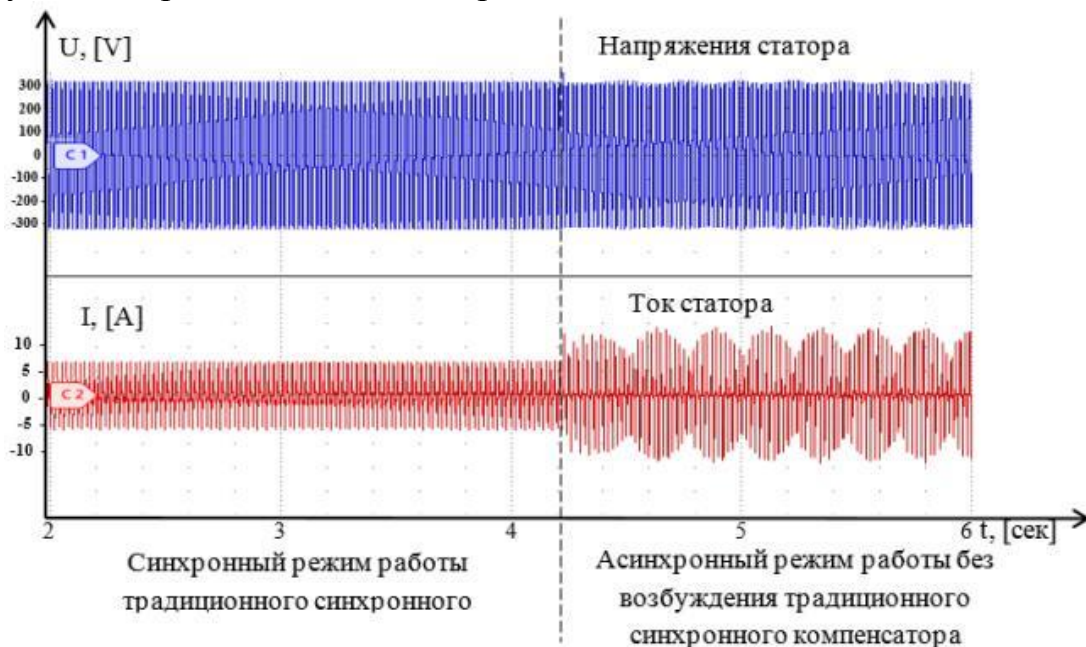


Рис.16. Осциллограммы напряжения и тока статора традиционного синхронного компенсатора при переходе на асинхронный режим работы

Ниже рассмотрен процесс работы системы синхронного компенсатора с двухосным возбуждением при выходе из строя одного из них.

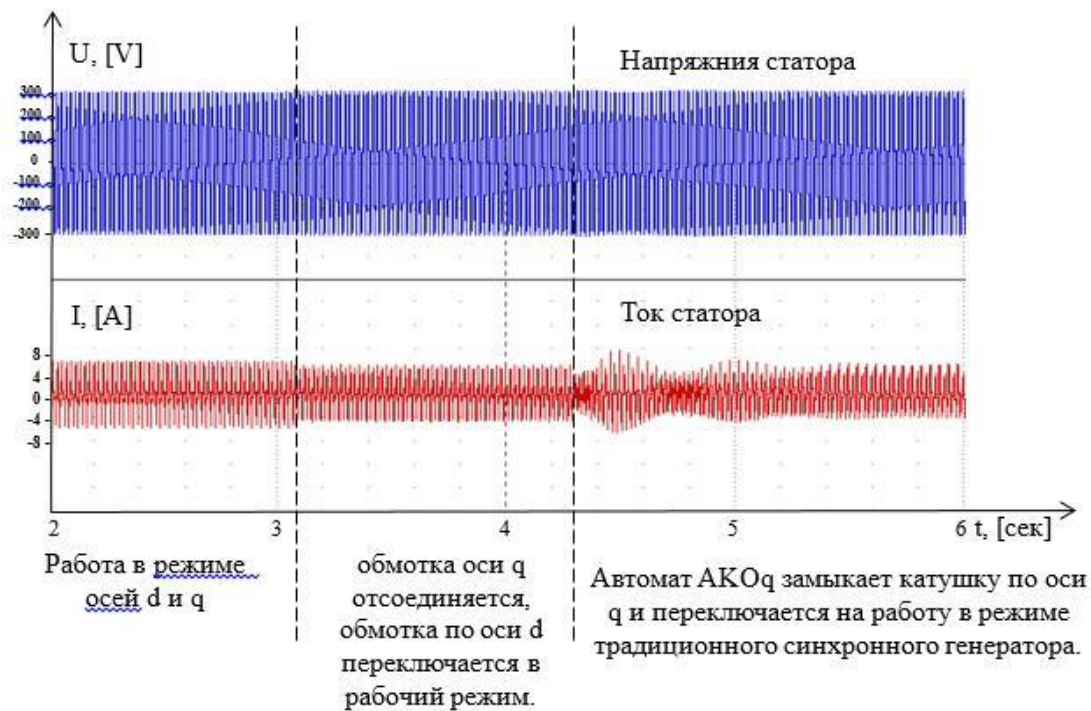


Рис. 17. Осциллограммы напряжения и тока двухосного синхронного компенсатора при выходе из строя одной из систем возбуждения

Для этого отключите постоянный ток, подаваемый на катушку возбуждения, расположенную по оси d на рис. 16, и снимите эту катушку. Делаем короткое замыкание с помощью автомата АЗОq и получаем с помощью цифрового осциллографа следующие изменения тока и напряжения статора.

Осциллограммы, представленные на рисунке 17 выше, показывают, что синхронный компенсатор с двухосным возбуждением может продолжать работать как обычный синхронный компенсатор при выходе из строя одной из систем возбуждения, используя вторую систему возбуждения. Когда машина ЗАОq закорочена и работает как традиционный синхронный компенсатор, через нее протекает определенная величина тока затухания при коротком замыкании вывода возбуждения из-за небольшого колебания тока статора. Поэтому в результате воздействия вращающегося магнитного поля с этим током создается демпфирующий момент, который влияет на движение ротора. В результате ток статора слегка колеблется.

При использовании синхронного компенсатора с двухосным возбуждением в высоковольтных линиях электропередачи в случае выхода из строя одной из систем возбуждения у обслуживающего персонала будет достаточно времени и возможностей для выявления причин выхода из строя системы возбуждения и их устранения. Вышеописанный процесс повысит его надежность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования, проведенного по теме «Повышение надежной работы синхронных компенсаторов с двухосным возбуждением» для диссертации доктора философии (PhD), представлены следующие выводы:

1. Разработана имитационная модель, позволяющая осуществлять глубокое

потребление реактивной мощности в режиме сверх недовозбуждения за счет увеличения отрицательных значений постоянного тока, подаваемого на обмотки возбуждения синхронных компенсаторов, с двухосным возбуждением. В результате установлено, что время пуска синхронного компенсатора с двухосным возбуждением, на 0,17 секунды меньше времени пуска традиционного синхронного компенсатора, а энергоэффективность процесса пуска увеличивается в среднем на 29,8%.

2. Разработана принципиальная схема устройства, позволяющего регулировать поперечную систему возбуждения синхронного компенсатора, с двухосным возбуждением, с помощью тиристора, формирующего переменное магнитное поле, формируемое синусоидальным измерительным датчиком, расположенным на поверхности стального сердечника статора и выделяющим третью гармонику из результирующего магнитного поля. В результате ток статора при пуске синхронных двигателей (синхронных компенсаторов) на насосных станциях снижен на 19,6%.

3. Разработана схема источника питания на основе реверсивного тиристорного преобразователя, позволяющая управлять величиной и направлением постоянного тока, подаваемого на обмотки возбуждения синхронных компенсаторов с двухосным возбуждением. В результате пропускная способность линий электропередачи для снабжения насосной станции электроэнергией увеличилась на 15%. При этом установлено, что синхронные компенсаторы с двухосным возбуждением, имеют на 0,25 больше вероятность безотказной работы, чем традиционные синхронные компенсаторы, а их эксплуатационная надежность выше.

4. Разработана методика определения коэффициента приведения токов синхронных компенсаторов с двухосным возбуждением, с использованием U-образной характеристики на основе соотношения токов якоря и возбуждения. В результате было установлено, что данный метод имеет высокую точность определения коэффициента приведения тока.

5. Проведено сравнение результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований. В результате разница (адекватность) между ними оказалась равной 4,4%.

6. На насосных станциях Аму-Кашкадарьинского бассейнового управления ирригационных систем внедрена схема питания синхронных компенсаторов с двухосным возбуждением. В результате за счет повышения надежности работы синхронных компенсаторов с двухосным возбуждением достигнут экономический эффект в размере 112 955 500 сум.

**ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN
INSTITUTE OF ENERGY PROBLEMS GRANT OF SCIENTIFIC DEGREES
IN THE PRESENCE DSc.02/30.12.2021.T.143.01
DIGITAL SCIENTIFIC COUNCIL**

KARSHI STATE TECHNICAL UNIVERSITY

KURBONOV NAJMIDDIN ABDUKHAMIDOVICH

**INCREASING THE RELIABILITY OF A SYNCHRONOUS
COMPENSATOR WITH BIAXIAL EXCITATION**

05.05.01 – Energy systems and complexes

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

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/T2673.

Dissertation has been prepared at Karshi State Technical University.

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.ziyo.net).

Scientific supervisor: **Pirmatov Nurali Berdiyrovich**
doctor of technical sciences, professor

Official opponents: **Aripov Nazirjon Mukaramovich**
doctor of technical sciences, professor

Hoshimov Ural Hoshimovich
Philosophy of doctor in technical sciences

Leading organization: **Navoi state university of mining and technology.**

The defense will take "09" July 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 5). (Address: 40, Durmon yuli str., Tashkent, 100125, Uzbekistan. Phone number: (+99855) 520-01-52).

Abstract of the dissertation was distributed on "25" June 2025 year.
(mailing report No "5" on 24 June 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 Scientistsdegrees, Doctor of technical sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

Purpose of the study. Increasing the reliability of operation in the mode of deep consumption of reactive power by regulating the current in the transverse excitation winding of synchronous compensators with biaxial excitation.

Research objectives:

- development of a simulation model of a synchronous compensator with biaxial excitation, allowing for deep consumption of reactive energy in the super-underexcitation mode;

- development of a basic diagram of a device allowing for regulation and provision of power supply to the transverse excitation system of a synchronous compensator with biaxial excitation using a sinusoidal measuring sensor;

- development of a method for determining the current reduction factor of synchronous compensators with biaxial excitation, using a U-shaped characteristic;

- development of an electrical circuit of an excitation system allowing for increased reliability of synchronous compensators with biaxial excitation.

The object of the study is both a traditional and a synchronous compensator with biaxial excitation.

Subject of research are transient processes of synchronous compensators with biaxial excitation.

Research methods. During the research, the theory of transient modes of the SKDV, Park-Gorev differential equations, modeling of transient modes in the MatLab program, and methods of mathematical statistics for comparing and processing the obtained data were used.

Scientific novelty of the research consists in the following:

- a simulation model of a synchronous compensator with biaxial excitation has been developed, allowing for deep consumption of reactive power by regulating the current in the transverse excitation circuit, in the super underexcitation mode;

- a basic electrical circuit diagram of a device has been developed that controls the transverse excitation system of a synchronous compensator with biaxial excitation, a sinusoidal measuring sensor located on the surface of the steel core of the anchor, and selects the 3rd harmonic from the total magnetic field, using a thyristor, and ensures reliable operation;

- a technique has been developed for determining the current reduction factor of synchronous compensators with biaxial excitation, using a U-shaped characteristic based on the ratio of the anchor and excitation currents;

- an excitation system diagram has been developed that provides the ability to regulate the magnitude and phase of direct current supplied to the longitudinal and transverse excitation windings of a synchronous compensator with biaxial excitation based on a reversible thyristor rectifier.

The practical results of the research are as follows:

- a mathematical model of the process of starting a synchronous compensator with biaxial excitation has been developed, taking into account the network parameters and magnetic saturation, as well as an algorithm for its calculation;

- the reliability of operation in the mode of deep consumption of reactive energy

has been increased by regulating the current of the winding located on the transverse axis of the synchronous compensator with biaxial excitation;

- physical and Matlab Simulink models have been created to study the transient processes of a synchronous compensator with biaxial excitation.

Implementation of research results. Based on the obtained scientific results on increasing the operational reliability of the biaxial synchronous compensator:

At the pumping stations of the Amu-Kashkadarya basin administration of irrigation systems, an electrical circuit of the excitation system was introduced, developed on the basis of a reversible thyristor rectifier, which allows regulating the phase and magnitude of the excitation current supplied to the excitation systems of a synchronous compensator with biaxial excitation (Certificate of the Ministry of Water Resources of the Republic of Uzbekistan dated April 4, 2024 No. 03 / 17-1198). As a result, the start-up time of the synchronous motor (synchronous compensator) at pumping stations was reduced by 40.4%;

The basic diagram of the device controlling the longitudinal and transverse excitation windings of the synchronous compensator, the alternating electromotive force obtained on the basis of a sinusoidal measuring sensor located on the surface of the steel core of the anchor and selecting the 3rd harmonic from the general structure of the magnetic field using a thyristor, and feeding it with direct current, is implemented in the pumping stations of the Amu-Kashkadarya basin administration of irrigation systems (certificate of the Ministry of Water Resources of the Republic of Uzbekistan dated 04.04.2024 No. 03 / 17-1198). As a result, the stator current of the synchronous motor (synchronous compensator) when starting the pumping stations is reduced by 19.6%;

At the pumping stations of the Amu-Kashkadarya basin administration of irrigation systems (certificate of the Ministry of Water Resources of the Republic of Uzbekistan dated April 4, 2024 No. 03/17-1198), a power supply scheme for synchronous compensators with biaxial excitation was introduced. As a result, economic efficiency in the amount of 112955500 sum was achieved.

Approval of the results of the study. The research results were tested at 10 scientific and practical conferences and seminars, including 8 international and 2 national conferences.

Publication of the research results. In total, 20 scientific papers have been published on the topic of the dissertation, including 1 article in foreign journals (2 articles at conferences included in the Scopus database), 8 in national journals, articles recommended by the Higher Attestation Commission for the publication of the main scientific result of doctoral dissertations (PhD), a certificate for 1 software, 8 articles in collections of scientific conferences.

Structure and scope of the thesis. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references in 123 titles, the main text is 120 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Pirmatov N.B., Kurbonov N.A. Sinxron kompensator toklarining keltirish ko'effitsiyentini U-simon xarakteristikasi yordamida aniqlash usuli. // Innovatsion texnologiyalar jurnali, 2012 yil, 4-son, 6-9 - bet. (05.00.00; №38).

2. Pirmatov N.B., Zayniyeva O.E., Kurbonov N.A. Ikki o'qi bo'yicha qo'zg'atiladigan sinxron kompensatorni qo'zg'atishni rostlovchi qurilma. "Innovatsion texnologiyalar jurnali", 2013 yil, 1-son, 24-27 - bet. (05.00.00; №38).

3. Pirmatov N.B., Bekishev A.E., Kurbonov N.A. Ikki o'q bo'yicha qo'zg'atiladigan sinxron kompensator yordamida tarmoq kuchlanishi va reaktiv quvvatni rostdash // Innovatsion texnologiyalar jurnali, 2021 yil, 2-son, 33-36 - bet. (05.00.00; №38).

4. Пирматов Н.Б., Бекишев А.Е., Курбанов Н.А. Синхрон машиналарнинг ўз-ўзидан тебранишини ҳисоблайдиган дифференциал тенгламаларни Matlab дастурида ечиш // Инновацион технологиялар журналы, 2021 йил, 4-сон, 69-72 - бет. (05.00.00; №38).

5. Пирматов Н.Б., Бекишев А.Е., Таниев М.Х., Курбанов Н.А. Расчёт U-образных характеристик синхронного компенсатора с двухосным возбуждения // Ўзбекгидроэнергетика "Ўзбекгидроэнерго" акциядорлик жамияти илмий-техник журналы, 2022 йил, 1-сон, 36-39 - бет. (30.09.2020 даги № 286/8 ОАК раёсати қарори).

6. Пирматов Н.Б., Зайниева О.Э., Курбанов Н.А., Норкулов У.Э. Металлургия комбинатларидаги куввати 5,2 МВтли синхрон моторларидан фойдаланиш жараёнида энергияни тежаш. Инновацион технологиялар журналы, 2022 йил, махсус сон, 39-41 - бет. (05.00.00; №38).

7. Пирматов Н.Б., Зайниева О.А., Бекишев А.Е., Курбанов Н.А., Тошев Т.Ю., Турдибоев А.А. Математическое моделирование синхронных генераторов с двухосным возбуждением // Ирригация ва мелиорация, 2022 год, спец выпуск, С.254-257 (05.00.00; №22).

8. Pirmatov N.B., Bekishev A.E., Kurbonov N.A. Increasing the viability of synchronous generators with biaxial excitation in the process of self-rocking // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. India. 2023. - Vol. 10, Issue 3, March 2023. ISSN: 2350-0328. PP. 20473-20478 (05.00.00; №8).

9. Пирматов Н.Б., Бекишев А.Е., Курбанов Н.А., Бабаев О.Э. Сравнительный анализ живучести синхронных машин в асинхронном режиме без возбуждения // Innovatsion texnologiyalar jurnali, 2023 yil, maxsus son, 69-74 - bet. (05.00.00; №38).

II бўлим (Часть II; PartII)

10. Пирматов Н.Б., Бекишев А.Е., Курбанов Н.А. Моделирование самораскачивания синхронного генератора в среде Simulink Matlab // Сб. трудов

международной научно-практической интернет-конференции. «Тенденции и перспективы развития науки и образования в условиях глобализации». - Переяслав-Хмельницкий, 2018. -С.585-588.

11. Суллиев А.Х., Зайниева О.Э., Курбанов Н.А., Зубайдуллаева Ш.А Турбогенераторов режиме синхронного компенсатора // “Физика возобновляемых источников энергии и устойчивой окружающей среды” сборник материалов республиканской научно-технической конференции, 24-25 апрель Карши-2019. С.185-186.

12. Pirmatov N.B., Kurbonov N.A. Ikki o‘qi bo‘yicha qo‘zg‘atiladigan sinxron kompensatorning havo oralig‘idagi magnit maydoni // “Metallorganik yuqori molekulari birikmalar sohasidagi dolzarb muammolarninig innovatsion yechimlari” Xalqaro ilmiy-amaliy onlayn-konferensiya, Toshkent sh. 28 may 2021 yil. 314-316 - bet.

13. Пирматов Н.Б., Бекишев А.Е., Файзиев М.М., Курбанов Н.А., Пардаев Н.Н., Норкулов У.Э. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон машиналарнинг ўз-ўзидан тебранишини ҳисоблайдиган дифференциал тенгламаларини МАТЛАВ дастури ёрдамида ечиш // « Энергия ва ресурсларни тежаш: янги тадқиқотлар, технологиялар ва инновацион ёндашувлар» мавзусидаги халқаро илмий ва илмий-техник анжумани илмий ишлар тўплами. –Қарши шаҳри 24-25 сентябр 2021 йил 133-136 - бет.

14. Пирматов Н.Б., Бекишев А.Е., Курбанов Н.А. Расчёт U-образных характеристик синхронного компенсатора с двухосным возбуждения // «Тенденции и перспективы развития науки и образования в условиях глобализации» Сб.науч.трудов. Переяслав, 2022. Вып.80. С.157-162,

15. Kurbonov N.A., Pirmatov N.B., Bekishev A.E. Ikki o‘q bo‘yicha qo‘zg‘atiladigan sinxron kompensatorning U-simon karakteristikasini hisoblashning dasturiy ta‘minoti EHM uchun dastur // O‘zbekiston Respublikasi Intellektual mulk agentligi. Guvohnoma DGU №40878 28.06.2024.

16. Pirmatov N.B., Bekishev A.E., Shernazarov S.E., Kurbanov N.A., Norkulov U.E. Regulation of mains voltage and reactive power with the help of a synchronous compensator by two-axis excitation // E3S Web of Conferences 264, 04028 (2021). International Scientific Conference Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering (CONMECHYDRO 2021). doi.org/10.1051/e3sconf/202126404028.

17. Toirov O.Z., Pirmatov N.B., Zayniyeva O.A., Bekishev A.E., Kurbanov N.A., Norkulov U.E. Calculation of U-shaped characteristics and reactive power of synchronous compensator with longitudinal-transverse excitation // AIP Conference Proceedings 2552, 040020 (2023). Rudenko International Conference “Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems” (RSES 2021). doi.org/10.1063/5.0115727.

18. Пирматов Н.Б., Бекишев А.Е., Файзиев М.М., Зайниева О.Э., Курбанов Н.А., Мавлонов Б.Б. Математическое моделирование процесса самораскачивания синхронных генераторов с двухосным возбуждением в среде МАТКАД // “Сборник научных трудов Республиканской научно-практической конференции на тему «Актуальные проблемы развития энерго- и

ресурсосберегающих инновационных технологий». г. Карши, 23-24 сентябрь 2022 г. С. 172-179.

19. Н.Б.Пирматов., А.Е.Бекишев., Н.А.Курбанов., М.М.Файзиев., А.Э.Норбоев. Анънавий ва икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг қўзғотишсиз асинхрон иш режимлари тажрибалари. // “Энергетика комплексининг долзарб муаммолари: мавзусидаги халқаро илмий-техник анжумани материаллари тўплами”. 25-26 апрель, 2024 йил, Қарши шаҳри.77-80-бет.

20. А.Е.Бекишев., Н.А.Курбанов., О.Э.Зайниева., У.Э.Норқулов. Сравнительный анализ живучести синхронных машин в асинхронном режиме без возбуждения // Микро- и нанотехнологии: современные вопросы современного состояние и перспективы развития микро-и нанотехнологий, модификация новых материалов. 30-31-октябрь 2023 год, Карши. С.432-435.

Босишга рухсат этилди: 24.06.2025 йил
Бичими 60x84 1/16, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 3,75. Адади:60. Буюртма: № 96.
Тошкент тўқимачилик ва енгил саноат босмаҳонасида чоп этилган.
Манзил: 100100, Тошкент ш., Шохжаҳон кўчаси, 5- уй.

