

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

На правах рукописи

ЖУРАХОВСКИЙ Анатолий Валентинович

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАТИЧЕСКИХ
КОМПЕНСАТОРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ (РЕГУЛИ-
РОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ, КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ
МОЩНОСТИ, ПЛАВКА ГОЛОЛЕДА)

Специальность 05.14.02 - Электрические станции (электрическая
часть), сети, электроэнергетические
системы и управление ими.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

Киев - 1993

Робота виконана во Львовському політехнічному інституті

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
професор І. В. ЖЕЖЕЛЕНКО
доктор технічних наук,
професор В. В. ЗОРИН
доктор технічних наук,
професор В. А. СТРОЕВ

Ведущая организация - Всероссийский научно-исследовательский
институт электроэнергетики (ВНИИЭ)
(г. Москва)

Защита диссертации состоится "13" 04 1993 г. в
14 часов на заседании специализированного ученого совета
Д 016.30.04 при Институте электродинамики АН Украины, по адресу
252680, Киев-57, пр. Победы, 56, тел. совета: 446-91-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
электродинамики АН Украины.

Автореферат разослан "18" 02 1993 г.

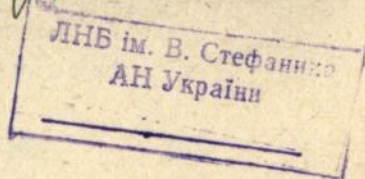
Ученый секретарь
специализированного ученого совета
д. т. н.

Г. М. Федоренко

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00825801 (0)



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Снижение потерь электроэнергии при транспорте и обеспечение ее качества, повышение надежности электроснабжения потребителей путем плавки гололеда, улучшение функционирования электрических сетей в целом всегда относились к основным проблемам современной энергетики. Об этом свидетельствуют и нормативные документы, принятые в последнее время: ГОСТ 13109-87 на качество электроэнергии, новый Прейскурант на пользование тепловой и электрической энергией (введен с 1.01.1991 г.). Энергосистемам предложено пользоваться нормативными характеристиками потерь вместо планирования их, выпущены руководящие указания по плавке гололеда переменным и постоянным токами и т.д.

Одними из эффективных устройств, позволяющих успешно решать вышеуказанные задачи являются компенсирующие устройства, в частности статические тиристорные компенсаторы (СТК).

В настоящее время за рубежом внедрены в энергосистемах, в основном в сетях высокого и ультравысокого напряжений, статические тиристорные компенсаторы, установленной мощностью более 20 млн. кВт·А, предназначенные для повышения статической и динамической устойчивости режимов, увеличения пропускной способности линий электропередач, облегчения условий дугогашения и т.п.

К сожалению, в энергетике нашей страны в эксплуатации находятся лишь отдельные опытно-промышленные образцы СТК, причем большая доля их приходится на промышленные сети, в которых в основном используется один элемент СТК - фильтры высших гармоник. И это при том, что впервые в мире схемы СТК были предложены в бывшем СССР, однако из-за слабой технологии изготовления конденсаторов и тиристоров, неверной политики цен, лишь в последнее время начались определенные работы по исследованию, разработке и внедрению их в энергосистемы страны.

И хотя в бывшем СССР ряд организаций и институтов, в первую очередь МЭИ, ВЭИ, НИИЭ, ЗПО "Преобразователь", решали и решают ряд задач, связанных с исследованиями и внедрением СТК, остается много нерешенных и малоисследованных проблем, препятствующих широкому внедрению статических компенсаторов в энергосистемы, в особенности в сетях 6-110 кВ.

Направление работы определялось планами Всесоюзной межвузовской целевой комплексной программы "Экономия энергии", Государственным планом экономического и социального развития УССР на 1988

год, Республиканской программой "Внедрить устройства статических компенсаторов в распределительных электрических сетях, обеспечивающие повышение качества электроэнергии и снижение расходов на ее транспорт" (РН.01.13.Ц.11), программой "Энергокомплекс" на 1986-90 г.г. (задание РН.01.13.Ц), координационным планом научного Совета АН УССР на 1986-90 г.г. по комплексной проблеме "Научные основы электроэнергетики" (шифр I.9.2.2.2.23).

Целью работы является разработка новых высокоэффективных схем многоцелевых статических компенсаторов, методов расчета электрических сетей с СТК и исследование установившихся режимов и переходных процессов в различных режимах работы - регулирование напряжения и плавка гололеда постоянным током.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- разработать новые эффективные схемы многоцелевых статических компенсаторов на базе двояных реакторов;
- разработать эффективный метод формирования математических моделей электрических сетей с СТК;
- разработать новый метод эквивалентирования, позволяющий осуществлять расчеты электрических сетей с необходимой точностью;
- провести исследования установившихся режимов и переходных процессов в электрических сетях при регулировании напряжения и плавке гололеда постоянным током;
- разработать способы и устройства регулирования ТРГ и защит батарей статических конденсаторов, работающих в составе СТК;
- внедрить в опытно-промышленную эксплуатацию компенсаторы, провести экспериментальные исследования их для проверки теоретических положений и усовершенствования схем регуляторов и защит.

Автор защищает:

1. Комплексный подход к использованию многоцелевых статических компенсаторов для повышения качества электроэнергии и надежности электроснабжения потребителей.

2. Метод режимного эквивалентирования, в котором преобразуемая часть подсхемы представляется в виде многолучевой звезды, параметры которой отображают потери в ней.

3. Развитие метода обобщенных независимых переменных применительно к расчету электрических сетей со статическими компенсаторами.

4. Схемы многоцелевых статических компенсаторов (МЦСК), их системы регулирования и защиты, выполненные на уровне изобретений.

5. Результаты исследований установившихся режимов и переход-

ных процессов многоцелевых статических компенсаторов при регулировании напряжения, плавке гололеда и геофизических исследованиях земли постоянным током.

Методы исследований. В основу исследований положены методы математического моделирования с использованием элементов теории вероятностей и математической статистики. Техничко-экономическая эффективность предложенных схем определялась на основе метода приведенных затрат, с учетом возможного народно-хозяйственного ущерба.

Результаты, полученные на цифровых моделях, проверялись экспериментальными исследованиями на действующих опытно-промышленных установках.

Научная новизна работы заключается в разработке следующих основных положений:

- метода режимного эквивалентирования и методики его применения для определения оптимальной степени компенсации и потерь активной мощности в электрических сетях;
- метода обобщенных независимых переменных применительно к расчету электрических сетей со статическими компенсаторами;
- новых схем многоцелевых статических компенсаторов с лучшими технико-экономическими показателями, их исследовании и внедрении;
- получении результатов исследований установившихся режимов и переходных процессов электрических сетей со статическими компенсаторами;
- способов и устройств диагностики, регулирования и защит БСК, работающих в составе СТУ.

Практическая ценность. Предложенные и исследованные схемы статических компенсаторов позволяют при комплексном использовании оборудования их решать задачи снижения потерь электроэнергии в сети, а также повышать надежность электроснабжения потребителей путем плавки гололеда постоянным током на проводах воздушных линий электропередач.

Предложенный метод режимного эквивалентирования позволяет адекватно отображать преобразуемые части подсхем сети в широком диапазоне изменения топологии и режимов непреобразуемых частей схемы.

Полученные результаты математических и экспериментальных исследований с многоцелевыми компенсаторами являются основой для проектирования, внедрения и эксплуатации подобных установок в электрических сетях.

Реализация работы. Программы расчета и оптимизации электри-

ческих сетей с СТК переданы для использования в НИИПТ (г. Санкт-Петербург) и Государственный Украинский проектно-исследовательский и научно-исследовательский институт энергетических систем и электрических сетей "Укрэнергопроект" (г. Харьков). Они используются при выполнении хозяйственных работ на кафедре "Электрические сети и системы" Львовского политехнического института.

Результаты работы используются в "Укрэнергопроект" (г. Киев), Львовском филиале института "Укрэнергопроект" при проектировании подстанций с СТК; ВЦ электроэнергетики (г. Москва) при расчетах и оптимизации электрических сетей с СТК; ЗПО "Преобразователь" (г. Запорожье) при разработке схем регулирования и защит СТК.

При участии и под руководством автора внедрены в опытно-промышленную эксплуатацию три установки СТК-10 кВ ("Львовэнерго" и "Киевэнерго"), одна установка СТК-35 кВ ("Львовэнерго"), выполнен проект СТК-10 кВ для "Винницаэнерго", внедрены устройства диагностики и защиты БСК, работающих в составе СТК в энергосистемах Украины. Проводятся работы на базе хозяйственных договоров по совершенствованию схем и устройств СТК и их защит.

Материалы диссертации используются в учебном процессе электроэнергетического факультета Львовского политехнического института в лекционных курсах, практических и лабораторных занятиях, при дипломном проектировании.

Документально подтвержденный экономический эффект от внедрения результатов работы автора в народное хозяйство составил 353 тыс. руб. (в ценах 1990 г.).

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях, совещаниях и семинарах: Повышение качества электрической энергии в промышленных электрических сетях (МДНТП, Москва, 1982); III и IV Всесоюзных научно-технических конференциях "Проблемы преобразовательной техники" (Киев, 1983, 1987); IV Республиканской научно-технической конференции "Современные проблемы энергетики" (Киев, 1985); Республиканской научно-технической конференции "Основные направления развития сельских электрических сетей в УССР в XII пятилетке" (Киев, 1987); Всесоюзном семинаре "Кибернетика электроэнергетических систем" (Челябинск, 1990); I-ой Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы комплексной автоматизации электроэнергетических систем на основе микропроцессорной техники" (Киев, 1990); Всесоюзной научно-технической конференции "Разработка методов и средств эконо-

номии электроэнергии в электрических системах и системах электроснабжения промышленности и транспорта" (Днепропетровск, 1990); Республиканских семинарах АН УССР: "Методы анализа режимов сложных энергетических систем" (Киев, 1990) и "Анализ режимов электрических сетей со статическими компенсаторами" (Львов, 1986-1990 г.г.); Всесоюзном научном семинаре по проблемам энергетики "Кибернетика электрических систем" (Москва, МЭИ, 1991); XL-XLVII научно-технических конференциях Львовского политехнического института (Львов, 1980-1991 г.г.); Научно-техническом Совете МЭ и Э СССР "Рассмотрение направлений создания новых компенсирующих устройств для электрических сетей" (Москва, 1990); Международной конференции по большим электрическим системам высокого напряжения (СИГРЭ, Москва-Кокчетав, 1989 г.) и II Международном симпозиуме "Электроэнергетические системы - эксплуатация и развитие" (Вроцлав, 1989).

Диссертация в целом обсуждалась на Всесоюзном научном семинаре по проблемам электроэнергетики "Кибернетика электрических систем" при кафедре электроэнергетических систем МЭИ в марте 1991 г.

Публикации. Результаты диссертации отражены в 49 публикациях и 6 отчетах по научно-исследовательским работам, зарегистрированных во ВНИЦентре.

Структура и объем работы. Диссертация содержит 261 страницу основного текста, иллюстрируется 136 рисунками на 90 листах и 18 таблицами, состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы из 171 наименования и 2 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко изложено состояние проблемы регулирования напряжения, компенсации реактивной мощности и повышения надежности электроснабжения потребителей путем плавки гололеда постоянным током при помощи статических компенсаторов. Сформулированы цели и задачи диссертации.

В первой главе рассмотрены вопросы комплексного подхода к повышению эффективности электроснабжения потребителей.

Компенсация перетоков реактивной мощности в электрических сетях является одним из наиболее эффективных средств уменьшения технологического расхода (потерь) электроэнергии в существующих энергосистемах. Поэтому в сетях Минэнерго СССР планировалось внедрение компенсирующих устройств с целью достижения оптимального

уровня компенсации в 0,6 квар/кВт к 2000 году.

Сейчас из-за разрыва производственных связей, многократного увеличения стсисмости КУ, проблема компенсации вряд ли будет решена к указанному сроку. Тем не менее эти вопросы требуют своего решения и анализ работы компенсирующих устройств в сетях, например, Минэнерго Украины показал следующее.

За последние три года количество синхронных компенсаторов уменьшилось на 3, а количество БСК увеличилось всего на 7 штук и средняя степень компенсации возросла незначительно (на 0,01 квар) составив в 1991 г. 0,1 квар/кВт. Время использования СК существенно падает, растет разрыв между установленной и располагаемой мощностями КУ, на 1992 год энергосистемы почти не планируют ввод новых мощностей. Несколько опытно-промышленных установок статических компенсаторов в сетях Минэнерго, естественно, не могут влиять сколь-нибудь существенным образом на степень компенсации реактивной мощности.

Компенсоирующие устройства являются, как правило, и эффективными устройствами регулирования напряжения, позволяющими в конечном итоге поддерживать в местах их установки необходимые уровни напряжений и дополнительно снижать на 1-2% потери активной мощности, повышать качество электроэнергии и экономичность энергосистемы в целом.

Кроме того, регулирование напряжения в сетях осуществляется другими устройствами, а именно: трансформаторами с ПЭВ и РПН, последовательными регулировочными (вольтодобавочными) трансформаторами (ВДТ), линейными регулировочными трансформаторами и т.п. Но эффективным оно может быть лишь при наличии достаточных резервов реактивной мощности в сети. При дефицитах же реактивной мощности, что наблюдается в сетях 6+110 кВ, такими регуляторами можно лишь усугубить ситуацию в целом, добившись эффекта только на отдельных подстанциях (у отдельных потребителей).

Повышение надежности электроснабжения потребителей в гололедных районах можно достичь путем плавки гололеда постоянным током с использованием выпрямительных установок типа ВУКН (на неуправляемых вентилях). Значительная работа по этому направлению проведена сотрудниками Львовского политехнического института (кафедра "Электроснабжение промпредприятий, городов и с/х"), внедрившими более 30 таких установок в энергосистемы страны, часть из которых находится в эксплуатации уже более 20 лет.

Важным аспектом повышения качества электроэнергии является

симметрирование режимов нагрузки в электрических сетях, для чего ранее было предложено целый ряд схем и устройств.

Анализ вышеприведенных задач показывает, что все они могут быть успешно решены при использовании статических тиристорных компенсаторов. СТК представляет собой устройство, состоящее из БСК, параллельно которой подключена, так называемая, тиристорно-реакторная группа (ТРГ). ТРГ, в свою очередь, состоит из реактора, ток которого управляется путем отпирания (запирания) последовательно включенных с ним биполярных управляемых вентилей (тиристоров).

Учитывая сегодняшнее состояние производства в стране тиристорных преобразователей типа ПБТ и ТКРМ (питание переменным напряжением 6,3 и 10 кВ; мощностью от 6,3 до 40 МВ·А; постоянные токи от 250 до 1500 А, напряжением $U_d = 8$ и 14 кВ, нами предлагается комплексное использование их в составе СТК в сетях 6+110 кВ для следующих целей:

- а) компенсация реактивной мощности в сети;
- б) регулирование (стабилизация) напряжения на шинах подключения статических компенсаторов;
- в) минимизация потерь активной мощности в сети;
- г) профилактический обогрев и плавка гололеда на проводах и тросах воздушных линий электропередач постоянным током;
- д) симметрирование режимов нагрузки;
- е) геофизические исследования земли постоянным током;
- ж) фильтрация гармоник токов сети и нагрузки.

Комплексное использование оборудования осуществляется как изменением законов регулирования СТК (переход от режима компенсации к режиму симметрирования), так и переводом схемы биполярно соединенных тиристоров при помощи внешних разъединителей в схему Ларионова. Это необходимо для получения постоянного напряжения и подачи его на шины плавки гололеда, при этом можно также проводить геофизические исследования земли постоянным током.

Во второй главе проведен анализ существующих схем отечественных и зарубежных статических компенсаторов и рассмотрены предложенные нами схемы многоцелевых статических компенсаторов косвенного действия.

Анализ схем зарубежных статических компенсаторов показал, что они установлены на подстанциях с высшим напряжением от 132 кВ до 735 кВ, а тиристорно-реакторные группы и фильтры подключаются через трансформаторы к шинам от 5,1 кВ до 39 кВ. Используются такие компенсаторы в основном для повышения статической и динамической

устойчивости режимов систем, снижения нерегулярных колебаний мощности, уменьшения качаний ее, увеличения пропускной способности ЛЭП и т.п.

В сетях Минэнерго Украины статические компенсаторы внедрены на подстанциях с низшими напряжениями 10 и 35 кВ, плагируется установка СТК на шины 110 кВ. Функции, выполняемые ими перечислены выше (за исключением симметрирования режимов нагрузки). Принципиальные схемы подстанций с такими СТК приведены на рис. 1а, б, г.

На рис. 1а изображена принципиальная схема подключения тиристорно-реакторных групп и БСК к секциям шин. Схема отличается возможностью автономной работы каждого СТК (выключатель Q отключен), что имеет свои положительные и отрицательные стороны. Подобные схемы внедрены на подстанциях "Тереова" и "Обруч".

На рис. 1б показана принципиальная схема СТК для регулирования напряжения и плавки гололеда. В режиме регулирования включены разъединители $QS2$ и $QS3$ ($QS6$ может быть в любом состоянии), остальные - отключены. Тиристорный блок (ТБ), собранный по биполярной схеме, регулирует ток шунтирующего ($LR2$) и токоограничивающего ($LR1$) реакторов, изменяя тем самым выдаваемую в сеть (нагрузку) мощность БСК.

Для плавки гололеда разъединители $QS2$ и $QS3$ отключаются (ТБ переводится в выпрямительный режим) и при помощи включенных разъединителей $QS4$ и $QS5$ постоянное напряжение подается на шины плавки гололеда, а оттуда на линии, где есть необходимость плавки или профилактического обогрева их. При этом должен быть замкнут шунтирующий реактор $LR2$ (разъединитель $QS1$ включен), в работе остается лишь реактор $LR1$ для ограничения возможных токов коротких замыканий. Подобная схема реализована на подстанции "Рахов".

Как указывалось выше, серийно в стране выпускаются тиристорные блоки лишь на напряжения 5 и 10 кВ, поэтому для реализации СТК напряжением 35 кВ необходимо для подключения ТРГ использовать стандартный трансформатор, как показано на рис. 1г. Тиристорно-реакторная группа компенсаторов типа ТКРМ соединена в треугольник и ТБ ее практически нельзя использовать для получения постоянного напряжения (нужны серьезные конструктивные переделки). Схема, подобная рис. 1г, реализована на подстанции "Нововольнская".

Для реализации СТК на базе БСК напряжением 110 кВ целесообразно использовать схему, где для подключения ТРГ можно использовать трансформатор с расщепленными обмотками, напряжением

110/10(6) кВ, одна из которых соединена в звезду, другая - в треугольник. Этим достигается большая мобильность (при выходе из строя или выводе в ремонт одной ТРГ, другая остается в работе) и происходит компенсация высших гармоник (чем повышается качество электроэнергии).

Как показал наш анализ, минимальная реактивная нагрузка на подстанциях 6+110 кВ составляет примерно половину максимальной. Следовательно, если БСК выбрана по максимальному режиму, то тиристорно-реакторная группа по мощности должна быть равна также примерно половине БСК, если СТК не планируется использовать для симметрирования режима нагрузки. Анализируя параметры оборудования СТК (БСК, реакторы, тиристорные блоки) приходим к выводу, что данное соотношение мощностей легко реализуется из серийно выпускаемых элементов.

Опыт проектирования, строительства и промышленной эксплуатации показал, что стоимость СТК примерно удваивается по сравнению с БСК (в ценах 1990 года). Поэтому экономическая эффективность применения его только для целей регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности, т.е. уменьшения потерь активной мощности в сети, может быть доказана в редких случаях. Однако, при многоцелевом использовании элементов СТК экономическая эффективность их становится достаточно реальной. Вместе с тем, необходим поиск новых, более дешевых схемных решений.

В связи с этим нами предложено и исследовано ряд схем статических компенсаторов, использующих двоянные реакторы, две из которых показаны на рис. 1в, д.

Схема рис. 1в отличается значительно лучшими технико-экономическими показателями, чем типовые (традиционные) схемы двухтрансформаторных подстанций с отдельными секциями трансформаторов по нижней стороне. Здесь же, за счет параллельной работы блоков Л1-Т1 и Л2-Т2 по нижней стороне, выравнивается их загрузка, уменьшаются потери активной мощности, более рационально распределяется реактивная мощность между потребителями Н1 и Н2 обеих секций, происходит фильтрация токов нагрузки и сети. Поскольку в схеме используется по одной БСК и ТРГ вместо двух такой же суммарной мощности, уменьшаются капитальные затраты на подстанцию. Правда, схема при этом несколько теряет в мобильности. Поэтому при необходимости, на каждой из секций может быть установлена своя БСК (на рис. 1в показаны пунктиром), а к средней точке двоянного реактора подключена одна ТРГ.

На рис. 1д приведена принципиальная схема коммутации элементов СТК для плавки гололеда и геофизических исследований земли постоянным током. Питание нагрузки обеих секций осуществляется от трансформатора Т1 (секционный выключатель Q3 включен), а от трансформатора Т2 питается тиристорный блок СТК, собранный по схеме Ларионова (разъединители Q56 и Q57 отключены). При этом замкнут шунтирующий реактор LR2 (разъединитель Q55 включен), нейтраль, настроенных на фильтрацию высших гармоник, батарей СВ1 и СВ2 могут быть объединены или разъединены (Q510 и Q511 - отключены). И поскольку здесь разделены цепи переменного и постоянного токов, то исключаются тяжелые аварийные условия работы тиристорного блока. Все элементы в схемах серийного изготовления.

Третья глава посвящена вопросам математического моделирования режимов электрических сетей со статическими компенсаторами.

Наличие статических компенсаторов в электрических сетях, обладающих рядом функциональных особенностей по сравнению с традиционными компенсирующими устройствами, вызывает необходимость разработки математических моделей, позволяющих решать задачи труднорешаемые традиционными подходами. Среди них следующие: определение значений мощности выдаваемой (потребляемой) СТК; расчет установившегося режима для определенного угла управления ТБ; обеспечение необходимых значений напряжений в точках подключения СТК или в любой заданной точке сети; повышение пропускной способности линий электрической сети путем разгрузки их по реактивной мощности.

Для успешного решения указанных задач предложено использовать метод обобщенных независимых переменных (ОИП), развитый автором применительно к расчету электрических сетей с СТК. Суть метода состоит в следующем. Структура математической модели (ММ) определяется выбором независимых переменных при формировании уравнений состояния электрических сетей. Максимальное число степеней свободы будет иметь место, если принять за независимые переменные все физические величины, характеризующие электрическую сеть. Их n -мерную совокупность \vec{x} в дальнейшем и будем называть обобщенными независимыми переменными, к которым в общем случае относятся n_p координат режима \vec{P} , n_n - параметров схемы \vec{L} и n_a управляющих воздействий \vec{A} .

Таким образом, ММ можно представить в виде n -мерного векторного уравнения состояния электрической сети

$$\vec{f}(\vec{x}) = \vec{f}(\vec{P}, \vec{L}, \vec{A}) = 0 \quad (I)$$

при $n = n_p + n_n + n_\lambda$.

В общем случае математическая модель состоит из двух подсистем уравнений - внутренней и внешней.

Внутренняя подмодель описывает соотношения между физическими величинами и базируется на основных законах электротехники. Структура этой подмодели неизменна, а порядок ее для данного вектора \vec{x} определяется максимально возможным числом C линейно независимых уравнений состояния электрической сети.

Внешняя подмодель содержит естественно $\nu = n - C$ линейно независимых уравнений, структура которых переменна и определяется граничными условиями и ограничениями в виде равенств, которые накладываются на произвольные ν из n компонентов вектора \vec{x} . Эти ν компонентов вектора \vec{x} будем называть опорным режимным базисом (ОРБ).

Таким образом, уравнение (1) записываем в виде

$$\vec{f}(\vec{x}) = (\vec{f}_C(\vec{x}), \vec{f}_\nu(\vec{x})) = 0. \quad (2)$$

Для реальных электрических сетей математическая модель (1) или (2) представляет собой систему нелинейных конечных уравнений, эффективное решение которых целесообразно выполнять методом Ньютона. С учетом структуры ММ (2) в координатах ОНП матрица Якоби будет иметь вид

$$\dot{W}(\vec{x}) = \frac{\partial \vec{f}(\vec{x})}{\partial \vec{x}} = \left\| \frac{\partial \vec{f}_C(\vec{x}) / \partial \vec{x}}{\partial \vec{f}_\nu(\vec{x}) / \partial \vec{x}} \right\| = \left\| \begin{matrix} \dot{W}_C(\vec{x}) \\ \dot{W}_\nu(\vec{x}) \end{matrix} \right\|. \quad (3)$$

Здесь $\dot{W}_C(\vec{x})$, $\dot{W}_\nu(\vec{x})$ - $C \times n$ и $\nu \times n$ - мерные субматрицы Якоби, соответствующие внутренней и внешней подмоделям ММ, соответственно. Как и система уравнений $\vec{f}_C(\vec{x})$, так и матрица $\dot{W}_C(\vec{x})$ имеют неизменную структуру, а $\dot{W}_\nu(\vec{x})$ - переменную.

В зависимости от поставленной цели, при помощи одной и той же ММ можно решать различные задачи исследования электрических сетей. Достаточно лишь принять нужный ОРБ, который определяет структуру внешней подмодели.

Так для расчета установившихся режимов электрической сети, содержащей p - ветвей и q - узлов, в S из которых установлены СТК, составляющими вектора ОНП (1) будут следующие координаты режима и управляющие воздействия (параметры схемы известны и неизменны)

$$\vec{x} = (\vec{\rho}, \vec{\Lambda}), \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \vec{P} &= (\vec{\theta}, \vec{Q}_H, \vec{Q}_K, \vec{Q}_{\text{СТК}}, \vec{Q}, \vec{U}); \\ \vec{\Lambda} &= (\vec{\alpha}, \vec{\alpha}(\vec{U}_y), \vec{\alpha}(\vec{I}_y)). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\vec{\theta}$, \vec{U} , \vec{Q} - q - l -мерные (по числу независимых узлов) вектор-столбцы аргументов и модулей напряжений, а также значений реактивных мощностей узлов схемы; \vec{Q}_H , \vec{Q}_K - ρ -мерные вектор-столбцы значений перетоков реактивных мощностей по концам ветвей при их условном разделении: H - начало, K - конец; $\vec{Q}_{\text{СТК}}$, $\vec{\alpha}$ - s -мерные вектор-столбцы значений реактивных мощностей СТК и углов управления их ТБ, в том числе для СТК, работающих на стабилизацию напряжения $\vec{\alpha}(\vec{U}_y)$ и СТК, регулирующих напряжение с коррекцией по току $\vec{\alpha}(\vec{I}_y)$.

При решении конкретной задачи (одной из вышеуказанных), часть компонент вектора ОНП принимается в качестве независимых (заданных) величин, т.е. они образуют ОПБ и позволяют тем самым сформировать конкретную матрицу Якоби. Субматрица $\vec{W}_v(\vec{X})$ матрицы Якоби $\vec{W}(\vec{X})$ является при этом бинарной, т.е. ее элементы могут принимать значения только ноль или 1.

Математическая модель расчета установившихся режимов формировалась на основе метода баланса мощностей

$$\vec{P}(\vec{S}_t \vee \vec{S}_f) + \vec{S}_K = 0, \quad (6)$$

где \vec{P} - $\rho \times (q-s)$ -мерная матрица соединений графа схемы (ρ - число ребер; q - число вершин; s - количество компонентов связности); \vec{S}_t , \vec{S}_f - ρ -мерные вектор-столбцы мощностей в начале и конце ветвей, соответственно; \vec{S}_K - $(q-s)$ -мерный вектор-столбец поперечных мощностей в узлах схемы; \vee - символ дизъюнкции.

Модели трансформаторов и ЛЭП приняты традиционными, нагрузки узлов заданы статическими характеристиками в виде аппроксимирующих полиномов с учетом действия РПН, а моделирование СТК осуществлялось по выражениям:

$$P_{\text{СТК}} = P_{\text{ТРГ}}; Q_{\text{СТК}} = Q_{\text{БСК}} - Q_{\text{ТРГ}}, \quad (7)$$

где $Q_{\text{БСК}}$ - мощность БСК, определяемая поперечной проводимостью \hat{O}_c и напряжением в точке подключения ее U .

$$Q_{\text{ЕСК}} = \delta_c \cdot U^2, \quad (8)$$

$P_{\text{ТТР}}$, $Q_{\text{ТТР}}$ - активная и реактивная мощности ТТР по основной гармонике, зависящие от угла регулирования α преобразователя. Реактор с проводимостью $g_p + j\delta_p$ замещается параллельной ветвью соединений

$$P_{\text{ТТР}} = g_p U^2 f(\alpha); \quad Q_{\text{ТТР}} = \delta_p U^2 f(\alpha). \quad (9)$$

Здесь $f(\alpha)$ - функция, управляющая тиристорным блоком. При отсчете угла α от момента прохождения кривой напряжения через нуль она определяется по выражению

$$f(\alpha) = 2 - 2\alpha/\pi + \sin 2\alpha/\pi. \quad (10)$$

Поскольку, как указывалось выше, СТК применяется в конечном итоге для уменьшения потерь активной мощности в сети, что достигается оптимизацией установившегося режима по напряжению и реактивной мощности, то целевая функция будет иметь вид

$$F(\vec{x}) \Rightarrow \min \quad (11)$$

при наличии ограничений, обеспечивающих допустимый режим работы, в виде равенств и неравенств

$$\vec{\omega}(\vec{x}) (\leq, =, \geq) 0, \quad (12)$$

где \vec{x} - вектор-столбец независимых переменных;

$\vec{\omega}(\vec{x}) = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$ m -мерная вектор-функция.

Независимыми переменными в данной постановке задачи будут напряжения опорных узлов и коэффициенты трансформации трансформаторов (автотрансформаторов), а с учетом режимных ограничений целевая функция (II) примет вид

$$F(\vec{x}) = \vec{F}(\vec{U}_n, \vec{K}_r) = \sigma + \sum_s \frac{n}{s} \omega_{Q_s} + \sum_j^{q-1} \omega_{U_j} + \sum_e^p \omega_{I_e}, \quad (13)$$

где \vec{U}_n - n -мерный (по числу опорных узлов) вектор-столбец модулей напряжений; \vec{K}_r - r -мерный вектор-столбец коэффициентов трансформации (по числу коэффициентов трансформации, которые изменяются от положения анцапф РИИ). В общем случае \vec{K}_r больше числа трансформаторов, поскольку они могут быть трех- и более обмоточными. $\sigma = \sum_{i=1}^q P_i$ - суммарные потери активной мощности в сети; P_i - рас-

четное значение активной мощности в i -м узле; q - общее количество узлов, включая балансирующий; ψ_{Q_s}, ψ_{U_j} - штрафные функции, вводимые в случае выхода реактивной мощности S -го и напряжения j -го узлов за допустимые пределы, соответственно; ψ_{I_e} - то же для токов e -ой линии.

Для расчета сложных электрических сетей и в настоящее время необходимо использовать эквивалентирование их, несмотря на наличие мощных вычислительных средств и эффективных алгоритмов и программ расчета.

Хотя сейчас разработано значительное количество методов эквивалентирования и осуществлена их программная реализация, проблема эквивалентирования решена далеко не полностью. Это утверждают как и сами авторы методов, так и эксплуатирующие такие программы организации.

Поэтому нами предлагается новый метод - метод режимного эквивалентирования подсистем электрических сетей, основанный на замене каждой преобразуемой подсистемы относительно выделенных узлов примыкания эквивалентной многолучевой звездой (многолучевой эквивалент - МЛЭ) с сосредоточенной обобщенной нагрузкой в ее центре. Существенное его отличие от известных методов состоит в том, что параметры ветвей МЛЭ отображают только потери мощности в преобразуемой подсистеме и определяются на основе решения нелинейных уравнений перетоков по этим ветвям МЛЭ с учетом уравнения баланса мощностей для его центра. Критериями адекватности такого преобразования являются тождественность координат режима узлов примыкания и потерь мощности в элементах сети для базового режима исходной и преобразованной схем. Для подтверждения адекватности эквивалента и определения погрешности расчетов проведена серия математических экспериментов.

Была рассмотрена тестовая схема, где исходная сеть, которая преобразовывалась в эквивалент, содержала 5 узлов, 8 линий электропередач и 3 узла примыкания к непреобразуемой части сети. Для исходной и преобразованной электрической сети исследовались следующие режимы: а) нормальный (базовый) режим при различных напряжениях сетей - 110, 220 и 330 кВ; б) режим сети при увеличенных в 2 раза мощностях нагрузок узлов преобразуемой подсистемы; в) режим сети при нагрузках базового режима (п. а) и увеличенном напряжении балансирующего узла; г) схемные отключения отдельных линий.

Анализ результатов расчетов показал, что для сети с $U_{ном} = 110$ кВ погрешность значений аргументов и модулей напряжений в

узлах, а также потерь мощности, определенных в исходной и преобразованной сети составляет доли процента для большинства случаев. И лишь при существенном изменении схемы непреобразуемой части сети в непосредственной близости от преобразуемой - отключение двух и более линий одновременно, погрешность возрастает до нескольких процентов. Несколько возрастает погрешность и при переходе к более высоким напряжениям. Затем были проведены расчеты оптимальной мощности компенсирующих устройств для сети (110 узлов и 100 ветвей), определены потери активной мощности по исходной и эквивалентной схеме (погрешность не превышала 4% при учете ЛЭП до 330 кВ включительно). В настоящее время метод совершенствуется и используется для создания эквивалентов вплоть до учета ЛЭП-750 кВ.

Установлено, что предложенный метод эквивалентирования позволяет представлять произвольные подсхемы электрических сетей относительно выделенных узлов замыкания соответствующими многолучевыми эквивалентами, при этом обеспечивается раздельный учет мощностей нагрузок и потерь мощности в элементах преобразуемой подсхемы. Использование МЛЭ обеспечивает хорошую адекватность результатов расчета в широком диапазоне изменения параметров схемы и режима. И лишь при существенном изменении топологии непреобразуемой подсхемы сети необходимо определить новые значения параметров МЛЭ для повышения точности расчетов. Метод позволяет определять МЛЭ на основе данных телеизмерений в узлах замыкания и приближенном учете потерь мощности в преобразуемой подсхеме.

Для проведения расчетов была создана математическая модель анализа и оптимизации установившихся режимов с эквивалентированием электрических сетей со статическими компенсаторами на базе предложенного нами метода эквивалентирования. Модель проходит сейчас апробацию на предмет включения в промышленные программы, в частности, в ЦЭО "Львовенерго" и ОДУ Украины.

В четвертой главе излагается методика выбора мест установки и определения мощности статических компенсаторов.

Одной из основных задач компенсации реактивной мощности в сетях является выбор мест размещения и установки компенсирующих устройств. Проблема состоит в том, что необходимо совместить технические условия и экономическую целесообразность определенного типа КВ. При этом необходимо учитывать следующее:

- расстановка КВ предусматривается на стадии проектирования (развития) электрической сети или в существующих (работающих) сетях;

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

- КУ является серийно выпускаемым или опытным образцом;
- определить главную задачу КУ из двух взаимосвязанных - регулирование напряжения или уменьшение потерь активной мощности в сети.

При выборе (прогнозировании) мест установки КУ и определении их мощности необходимо решить такие подзадачи:

- определить очередность установки КУ в узлах сети;
- определить целесообразность того или иного типа КУ;
- оптимизировать установившийся режим электрической сети по реактивной мощности и напряжению.

Кроме того, следует учитывать, что СТК (в отличие от нерегулируемых или дискретно регулируемых КУ) позволяет плавно регулировать реактивную мощность во времени, поддерживая оптимальный режим сети электроэнергетической системы в целом.

Таким образом, алгоритм выбора места установки и определения мощности статических конденсаторов можно представить следующими этапами:

1. Проводится расчет установившегося режима наибольших нагрузок электрической сети (питающая и распределительная сети не разделяются) на основе метода баланса мощностей, результаты которого являются исходными данными для выбора мест установки СТК.

2. Рассматривается множество узлов U , в которых технически возможно установить СТК и устанавливается приоритетная очередность установки их в зависимости от величины производных $(\partial J / \partial U_U)$.

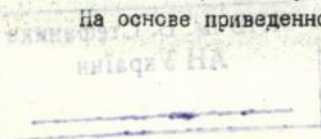
3. Из вектора производных выбирается максимальное значение и соответствующий ему номер узла ζ , проводится оптимизация установившихся режимов при условии, что параметры режима ζ -го узла (U_{ζ} , Q_{ζ}) являются независимыми переменными. На основе анализа результатов расчета определяются максимальное и минимальное значения желаемых реактивных мощностей нагрузки в ζ -м узле сети.

4. Исходя из технических условий намечаются возможные параметры составляющих СТК (БСК, ТРГ) и определяется целесообразность их применения, исходя из минимума приведенных затрат.

5. После выбора КУ, считая, что последнее условно установлено в ζ -м узле и способствует более рациональному режиму работы электрической сети, переходим к пункту 2. При этом узел ζ выводится из множества U .

6. Расчет заканчивается в случае, когда дальнейшая установка КУ является нецелесообразной или нет КУ необходимой мощности.

На основе приведенного алгоритма составлена математическая



модель выбора места установки и определения мощности СТК. При расчетах расстановка СТК проводится начиная с узла с наибольшим значением производной. ММ определения мощности СТК базируется на подмоделях расчета и оптимизации установившихся режимов электрической сети. По максимальному режиму определяется значение мощности БСК, по минимальному - мощность тиристорно-реакторной группы, т.е.:

$$Q_{БСК} = Q_{max}^{opt} ; Q_{ТРГ} = Q_{БСК} - Q_{min}^{opt}, \quad (14)$$

где Q_{max}^{opt} , Q_{min}^{opt} - значения расчетных оптимальных реактивных мощностей нагрузки соответствующих режимов. Выбор мощности СТК для следующего узла (второй шаг), расчет и оптимизация режима проводятся с учетом работы СТК в уже установленном узле и т.д.

Экономическая эффективность статического компенсатора (СТК) определяется из условия:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}' - \mathcal{E}'' \geq \mathcal{E}, \quad (15)$$

где \mathcal{E} - эффективность, определяемая как уменьшение народнохозяйственных затрат за счет применения СТК; \mathcal{E}' , \mathcal{E}'' - народнохозяйственные затраты соответственно, до и после установки СТК; \mathcal{E} - приведенные затраты на установку СТК.

В народнохозяйственном ущербе нами учитывались три составляющие затрат: а) на возмещение потерь энергии в электрической сети; б) обусловленные качеством напряжения и недоотпуском электроэнергии. Некоторые результаты расчетов приведены дальше.

Пятая глава посвящена исследованию электрических сетей со статическими компенсаторами в режиме регулирования напряжения.

Анализ режимов работы сетей 110 кВ Минэнерго Украины показал, что на целом ряде подстанций напряжение на стороне 110 кВ изменялось от 85 до 125 кВ, а при наличии на трансформаторах ручного ПИН практически в таком же соотношении изменялись напряжения и на шинах 35 и 10 кВ. Установка СТК на шинах 10 кВ, в частности на ПО "Рахов", "Гересва" и "Обруч", позволила стабилизировать напряжение на уровне 10,6 кВ при вышеуказанных изменениях напряжения на шинах подстанций 110 кВ. Стабилизировалось напряжение и на шинах 35 кВ на уровне 37-37,5 кВ. С целью фильтрации высших гармоник сети (нагрузки) в фазы БСК были установлены реакторы типа ВЗ (ВЗЧС) для создания фильтров пятой и седьмой гармоник. Максимальный коэффициент несинусоидальности напряжения шин, где установлены СТК, при разомк-

нутых нейтралях БСК и ТРТ без фильтровых реакторов составил 3,2% с замкнутыми - 2,2% при наличии же фильтровых реакторов - 0,3%. Кроме того, фильтровые реакторы облегчили условия коммутаций БСК.

Вышеуказанные статические компенсаторы установлены на типовых двухтрансформаторных подстанциях с раздельной работой шин по низшему напряжению (НН) 6 или 10 кВ (рис. 1а). Указанные схемы не являются оптимальными с точки зрения минимизации потерь мощности в сети, в первую очередь из-за неравномерной загрузки секций шин и неоптимальной компенсации реактивных нагрузок их.

Оптимизацию режима подстанции можно осуществить путем запа-раллеливания секций шин НН при помощи двоянного реактора, в среднюю точку которого подключается БСК (рис. 1в). Расчеты показали, что в таких схемах (далее - "связанные" схемы), в зависимости от соотношений сопротивлений ветвей Л1-Т1 и Л2-Т2 или Т1 и Т2, а также соотношения нагрузок Н1 и Н2 (рис. 1в), потери активной мощности на 25-50% меньше, чем в схемах с раздельной работой шин НН подстанций. Установлено, что БСК (СТК) целесообразно подключать в средней точке двоянного реактора при загрузке секций, отличающихся на 20% и больше. Анализ гармонического состава "связанных" схем показал, что коэффициент несинусоидальности их примерно в 1,3 раза меньше, чем в традиционных.

Особое внимание в работе уделено исследованию переходных процессов в схемах с компенсаторами. Наиболее слабым элементом СТК является тиристорный блок, а наиболее опасными для него являются внутренние перенапряжения, имеющие внешнее по отношению к СТК происхождение. Расчеты для конкретных подстанций показали, что параметры оборудования СТК незначительно влияют на характер переходных процессов. Наиболее неблагоприятно для ТБ процессы протекают при подключении его к шинам подстанции при помощи кабеля; перенапряжения достигают уровня испытательного напряжения плеча и могут вызвать пробой тиристоров. Эффективным средством снижения перенапряжений на ТБ в таких случаях является применение демпфирующих R-C - цепей, в том числе внешней установки.

Анализ режимов работы потребителей, питающихся от шин 35 кВ, в частности, в ПЭО "Львовэнерго" и "Крымэнерго" показал, что из-за значительных изменений мощностей нагрузок в течении суток, напряжения на шинах их колеблются от 0,93 до 1,17 $U_{НОМ}$ и более. Эти колебания напряжений не могут быть устранены при помощи РПН трансформаторов, а установка БСК на шинах подстанций ($S_{НОМ} = 35 \text{ МВ}\cdot\text{А}$), уменьшая диапазон колебаний, не решает проблему полностью.

Радикальным решением проблемы является установка параллельно БСК тиристорно-реакторной группы мощностью примерно 20 МВ·А, что позволяет регулировать (стабилизировать) напряжение, как на шинах 35 кВ так и на шинах 6(10) кВ, где установлена ТРГ. Кроме того, установка такой ТРГ на шинах подстанции "Севастопольская" привела бы к уменьшению потерь активной мощности на 3,3 МВт в режиме максимальных, и на 1,25 МВт в режиме минимальных нагрузок, обеспечивая при этом статически устойчивый режим работы.

Анализ процессов коммутаций БСК-35 кВ и фильтра ПС "Нововольнская" показал, что возможны значительные броски токов и небольшие перенапряжения при включениях (отключениях) их. Расчеты показывают, что включение БСК-35 кВ при включенном фильтре (ТРГ питается от шин 35 кВ) вызывает в последнем 10-11 кратные броски токов, которые затухают достаточно медленно. Включение же БСК фильтра при включенной БСК-35 кВ вызывает броски токов не превышающие 5-кратных номинальных значений и они несущественно зависят от высшего напряжения (110 или 35 кВ). Таким образом, при коммутациях оборудования, значаще необходимо подключить к шинам БСК-35 кВ, а затем фильтр. Отключение их может проводиться в произвольном порядке. Наличие ТРГ на шинах 6 кВ незначительно влияет на вышеуказанные процессы.

Реализация СТК напряжением 110 кВ может быть проведена на базе БСК-110 кВ, мощностью 50+55 МВА, если параллельно ей подключить тиристорно-реакторную группу мощностью примерно 20 МВ·А. Причем ТРГ следует подключать через трансформатор 110/6-10 кВ с расцепленными обмотками, что позволяет самокомпенсировать высшие гармоники, получить более высокую надежность схемы, существенно уменьшить количество коммутаций БСК. Анализ гармонического состава тока этой схемы показал, что наибольшими являются 5 и 7 гармоники, хотя и они в результирующем токе трансформатора незначительны. Максимальное значение коэффициента несинусоидальности по напряжению на шинах 110 кВ может достигать 2,1%, что незначительно превышает допустимое (2%). Процессы включения БСК-110 кВ сопровождаются значительными (8-10 кратными) бросками токов, медленно затухающими в течении длительного времени (20-25 периодов промышленной частоты), правда перенапряжения возникают при этом небольшие (примерно полудторакратные). Таким образом, включение ТРГ параллельно БСК позволяет успешно решать все вопросы эффективной работы их в этих случаях.

В шестой главе приведены результаты исследований электрических

сетей при плавке гололеда многоцелевыми статическими компенсаторами.

Как указывалось ранее, повышение надежности работы электрических сетей может быть достигнуто за счет плавки гололеда переменным или постоянным токами.

В "Методических указаниях по плавке гололеда..." приведены все рекомендации по этому вопросу, в том числе схемы и способы плавки.

Анализируя способы и схемы плавки гололеда переменным током необходимо отметить, что все они связаны со значительными перетоками и, соответственно, потерями реактивной мощности. Поэтому при дефиците ее в сетях такая плавка невозможна даже при наличии всех остальных благоприятных факторов. В этой связи безусловное преимущество имеют схемы и способы плавки гололеда постоянным током. Однако и последние обладают рядом недостатков, главный из которых - невозможность непосредственного регулирования величины постоянного тока.

Поэтому кардинальным решением проблемы плавки гололеда для целого ряда ЛЭП, является использование тиристорного блока СТК для получения регулируемого постоянного тока и разработка новых схемных решений, не имеющих вышеуказанных недостатков, что предложено и исследовано нами.

Принципиальная схема плавки гололеда показана на рис. 1б. К шинам плавки гололеда могут подключаться поочередно (вместе) все линии, на которых необходима плавка или профилактический обогрев их.

Рассмотрение длин, марок проводов и схем подстанций "Тересва" и "Рахов", параметров СТК, установленных на них, показали, что на всех ЛЭП 110 и 35 кВ, примыкающих к данным подстанциям может быть осуществлена плавка гололеда постоянным током управляемыми преобразователями типа ПВТ-250/14. Причем плавить гололед можно способами "провод-провод" или "провод-два провода" и невозможна плавка гололеда на сегодняшний день способом "провод-земля".

Рассмотрим некоторые режимы и процессы, возникающие при плавке гололеда, полученные на математических моделях и экспериментально на действующих установках. Наиболее тяжелым аварийным режимом, связанным с появлением больших токов в плечах преобразователя, является пробой (закорачивание) плеча в режиме плавки гололеда. Поскольку быстродействующий канал защиты может отключить преобразователь после первой амплитуды сверхтока, то защиту преобразователя можно осуществить только путем ограничения этого тока схемными ре-

шениями.

Экстремальные значения переходных токов в схеме наблюдаются при закорачивании плеча полностью открытого преобразователя и максимуме линейного напряжения. Как показывают исследования, в обычных условиях первые амплитуды переходных токов могут достигать $8+10$ кратных значений по отношению к номинальным. Длительное существование такого режима может приводить к сильному подмагничиванию сердечников трансформаторов медленно меняющимися однонаправленными токами. Такой аварийный процесс может быть ликвидирован через $0,02$ сек электронным каналом защиты преобразователя. Однако это возможно, если сохраняются запирающие свойства тиристоров после протекания первой волны тока КЗ. Резервирующий (релейный канал защиты, срабатывающий в преобразователях типа ПВТ через $0,1$ с воздействует на выключатель ввода. Наличие постоянных составляющих в фазных токах значительно ухудшает процесс гашения дуги в выключателях. И при определенных соотношениях параметров схемы может приводить к разрушению выключателя и усугублению аварийной ситуации.

В случаях, когда плавка гололеда осуществляется без "земли" в контуре плавки, защита от такого аварийного режима осуществляется путем установки дополнительной индуктивности со стороны переменного тока преобразователя. Для типовых подстанций 110 кВ с трансформаторами установленной мощностью $10+25$ МВ·А реактирование успешно выполняется на основе двояных бетонных токоограничивающих реакторов, которые выполняют также функции обеспечения параллельной работы преобразователей в режиме плавки гололеда. Последнее осуществляется с целью получения необходимой величины тока плавки. Эти принципы защиты реализованы, в частности, для схемы СТК подстанции "Тересва". Заманчивая, на первый взгляд, идея использования схемы плавки гололеда "провод-земля" с целью расширения длин проплавляемых линий, неосуществима из-за возможности возникновения аварийных процессов в сети с наложением постоянного тока.

В переходных режимах наблюдается значительное увеличение токов гармоник в цепях фильтров. И если тепловое воздействие этих токов практически не сказывается на работе конденсаторных батарей, так как оно слишком кратковременно, то нужно считаться с появлением перенапряжений $3+8$ кратных, воздействующих при этом на продольную изоляцию фильтровых реакторов.

Для оборудования СТК характерны перенапряжения, обусловленные:

а) аварийными режимами на обогреваемой ВЛ в режиме плавки (обрыв

провода, КЗ между полюсами); б) коммутациями на стороне переменного тока (наиболее неблагоприятные — коммутации фильтров или конденсаторных батарей); в) авариями на стороне переменного тока в цепях фильтров, КЗ на шинах и в сети, перекрытиями изоляции оборудования подстанций.

Как показали исследования, при плавке гололеда в "изолированных" схемах, аварийные ситуации на стороне постоянного тока не приводят к опасным перенапряжениям на оборудовании подстанции. Анализ коммутационных процессов, возникающих при отключении конденсаторных батарей, показал, что импульсы перенапряжений, воздействующих на оборудование не превышают $2,4 U_{фmax}$ и не являются опасными для оборудования подстанции. Наиболее опасными являются перенапряжения, сопровождающие однофазные короткие замыкания в сети 10 кВ, особенно тогда, когда они существуют в виде перемежающихся дуг. Такие повторные "зажигания" и "обрывы" в месте КЗ приводят к появлению переходных перенапряжений, превышающих 3-кратные по отношению к номинальному значению.

Исследования показали, что при перемежающемся КЗ и наличии "земли" в контуре плавки максимальное переходное напряжение достигает 21,1 кВ ($2,6 U_{фmax}$). Кроме того, на стороне постоянного напряжения возникает колебательная составляющая относительно низкой частоты, которая накладываясь на постоянную составляющую, приводит к перенапряжениям на уровне 33,1 кВ (примерно $2,4 U_d$), что сопоставимо с допустимым напряжением для плеча тиристора (33,6 кВ). Такие величины перенапряжений опасны для преобразователя, а существующие защиты, выполненные на базе маломощных варисторных ограничителей оказываются не в состоянии рассеять выделяемую в них мощность, что приводит к выходу последних из строя. Такой аварийный режим сопровождается также появлением сверхтоков в плечах преобразователя. Перечисленное показывает, что характер переходных аварийных режимов в схеме плавки с использованием "земли" весьма неблагоприятен для преобразователя СТК и оборудования подстанции. В установившемся режиме при заземлении полюса и нейтральных точек оборудования (трансформаторов, реакторов и т.п.) прикладывается постоянное напряжение. Это приводит к тому, что через заземленные нейтралы оборудования, например, трансформаторов напряжения (ТН), будут протекать постоянные токи, которые могут вызвать повреждение их или отключение от сети. Следует отметить также, что коммутации на стороне переменного тока при таком способе плавки будут сопровождаться более высокими перенапряжениями.

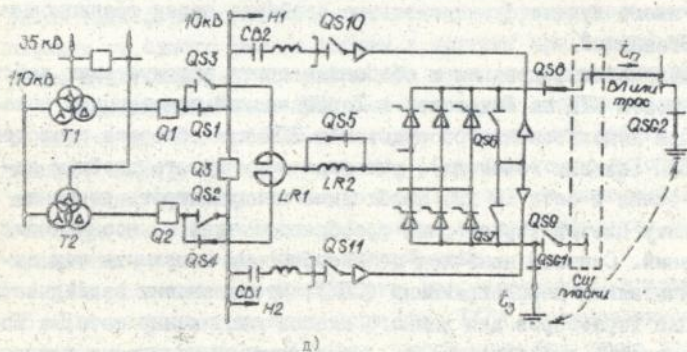
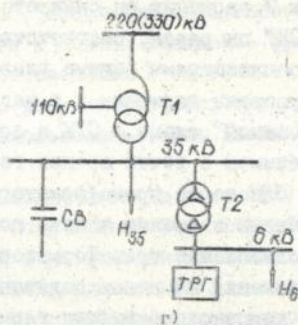
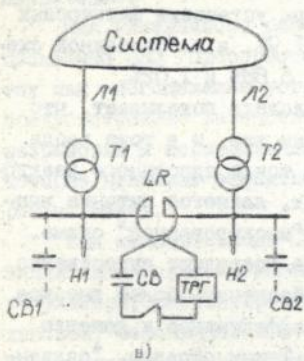
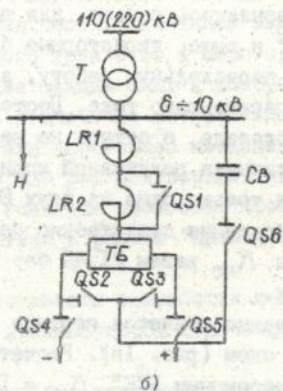
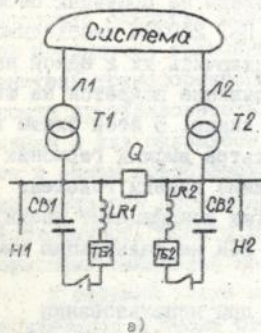


Рис. 1. Принципиальные схемы подстанций со статическими компенсаторами

Как указывалось раньше, для плавки гололеда на проводах сечением 120 мм² и выше, тиристорные блоки типа ПЕТ 250/14 необходимо включить на параллельную работу, а затем подключить их к одной из секций шин переменного тока. Постоянное напряжение подается на шины плавки гололеда, а оттуда на необходимую линию. В этой схеме в качестве источника реактивной мощности и фильтра высших гармоник используется только одна из двух БСК и в режиме плавки гололеда качество напряжения существенно снижается. Так коэффициент несинусоидальности $K_{НС}$ равен 21,4% без настройки БСК на фильтрацию высших гармоник.

Существенно меняется картина процессов при использовании "связанных" схем (рис. 1в). Расчеты показали, что в "связанной" схеме с разнесенными БСК $K_{НС} = 15,3\%$; при установке фильтровых реакторов 5 и 7 гармоник он снижается до 1,9%, а в "связанной" схеме с одной БСК он равен, соответственно, 6,88% и 1,02%.

Анализ осциллограмм режима плавки гололеда показывает, что минимальный уровень гармоник и в напряжении шин, и в токе ввода будет в "связанной" схеме с СТК в средней точке двоярного реактора. Худшим режимом с точки зрения гармоник, является питание выпрямителей от одного из трансформаторов в "изолированной" схеме. "Связанные" схемы в режиме плавки гололеда позволяют существенно улучшить использование трансформаторов, обеспечить более высокое качество напряжения на шинах подстанции, эффективнее и дешевле осуществлять компенсацию высших гармоник. Таким образом, "связанные" схемы имеют лучшие функциональные свойства перед традиционными "изолированными".

Проведенные исследования и обобщение опыта эксплуатации действующих установок СТК на Раховской и Тересвянской подстанциях показали, что при использовании оборудования СТК для обогрева проводов воздушных ЛЭП (плавки гололеда), учитывая возможность двойных замыканий на землю в сети 10 кВ, необходимо предусмотреть дополнительную защиту плечей тиристорных преобразователей от возникающих перенапряжений. Считаем наиболее целесообразным выполнить эту защиту ограничителями перенапряжений (ОПН), что позволит закладывать меньший запас тиристоров для данного класса напряжения сети, к которой подключается преобразователь. Эксперименты по плавке гололеда постоянным током на ЛЭП Тересва-Рахов, проведенные в 1989-90 г.г. подтвердили вышеприведенные положения.

Была опробована также возможность кратковременной подачи импульсов постоянного тока в землю для геофизических исследований ее

(аналог плавки гололеда способом "провод-земля"). Однако, как и следовало ожидать, возникли неприятности, указанные выше. Так, при достижении величины постоянного тока в 50 А перегорел предохранитель трансформатора напряжения секции шин, к которой был подключен преобразователь, началось отключение потребителей данной секции и как оказалось впоследствии перегорело несколько тириستоров в самом преобразователе. Это еще раз подтвердило опасность и невозможность проведения плавки гололеда способом "провод-земля" и необходимость защиты преобразователя в режиме "провод-провод" от возможных замыканий на землю.

В седьмой главе изложены результаты разработок и исследований регуляторов и защит статических компенсаторов подстанций общего назначения.

Как указывалось ранее статические компенсаторы, серийно выпускаемые ЗПО "Преобразователь", используются в электрических сетях как многоцелевые устройства и должны выполнять функции, не предусмотренные заводским изготовлением. В связи с этим необходима разработка и исследование схем регуляторов, автоматики и защиты, которые позволят эффективно использовать такие компенсаторы для разных целей.

При использовании СТК (выполненного на базе ПБТ) для стабилизации напряжения на шинах его подключения была разработана схема регулятора, регулятор выполнен и установлен на компенсаторах Раховской, Тересвянской и Овручской подстанций. Для повышения эффекта регулирования в регуляторы было введено звено коррекции по току ввода трансформатора. Натурные испытания регулятора показали, что переход от одного режима работы к другому при полном сбросе нагрузки подстанций не превышал двух периодов промышленной частоты.

Промышленный блок ПБТ оснащен своими системами регулирования и защиты, которые обеспечивают его эффективную работу в выпрямительном либо инверторном режимах и он без каких-либо изменений может успешно использоваться и используется на подстанции для плавки гололеда постоянным током. В режиме же регулирования необходимо применять регулятор, предложенный нами.

Не удовлетворяя требованиям регулирования напряжения на шинах 35 кВ и регулятор компенсатора типа ТКРМ, установленного на Нововольнской подстанции. В связи с этим нами был также разработан, изготовлен и внедрен в опытно-промышленную эксплуатацию регулятор, позволяющий стабилизировать напряжение на шинах 35 кВ (6 кВ) с коррекцией его по току ввода 35 кВ автотрансформатора. В предложен-

ном регуляторе использовано статическое пропорциональное регулирование по отклонению регулируемых параметров от заданных значений уставок. Для обеспечения устойчивости и исключения перерегулирования регулятор имеет внутреннюю гибкую отрицательную связь.

Поскольку номинальный ток в компенсаторе типа ТКРМ протекает при наперед заданном угле регулирования 30° , то в регуляторе предусмотрен ограничитель, не позволяющий длительно работать (>10 сек) с углом отпирания меньше 30° . Процесс регулирования в регуляторе должен устанавливаться за $0,2+0,6$ с, что вполне приемлемо для шахтных нагрузок. Опытно-промышленная проверка работы регулятора на подстанции подтвердила принятые теоретические положения.

Для эффективного использования компенсаторов на подстанциях, управление ими согласовывалось с блоком автоматического регулятора РПН трансформаторов. Это позволило работать с минимальными токами в реакторе и существенно уменьшить количество переключений анцапф трансформаторов. Для получения оптимального эффекта от использования компенсатора по всей сети в целом, предполагается управление его работой осуществлять с высших иерархических уровней.

Важным аспектом успешной работы статического компенсатора является эффективная работа его защит от различных повреждений. Особое внимание в работе уделено разработке, исследованию и внедрению защиты конденсаторов батарей от внутренних повреждений, так как конденсаторы заполнены экологически опасным импрегнатором и в случае развития аварии БСК могут возникнуть тяжелые экономические и экологические последствия. Существующие защиты не обладают достаточной чувствительностью и надежностью срабатывания. Поэтому нами предлагается установить в нейтраль БСК трансформатор напряжения, напряжение вторичной обмотки которого сравнивается с напряжением нейтрали физической модели батареи, подключенной ко вторичной обмотке трансформаторов напряжения шин подстанции. Это позволяет зафиксировать выход из строя одной-двух банок БСК напряжением 35 кВ и подать сигнал дежурному персоналу.

Вторая ступень защиты организуется на базе трансформаторов типа ОМ (ОМП), подключаемых к каждой фазе батареи. Установка этих трансформаторов предусмотрена последними типовыми проектами. Защита работает на отключение батареи от сети. В качестве защиты, реагирующей на возникновение каскадных повреждений в режиме работы СТК с соединенными нейтралью ТРГ и БСК, нами предлагается схема защиты, принцип работы которой основан на получении напряжения,

пропорционального размеру повреждения, содержащего составляющие третьей и девятой гармоник.

В настоящее время на ряде подстанций проходят опытно-промышленную проверку отдельные элементы предложенных защит от внутренних повреждений конденсаторов БСК. Экспериментальные исследования и небольшой пока опыт эксплуатации показали хорошую работоспособность их. Сейчас проводится усовершенствование как схемных решений защит, так и внедренных опытных образцов и накопление опыта эксплуатации их.

На действующих подстанциях с СТК установлены стандартные устройства автоматики и защиты, предусмотренные проектами. Защиты действуют на отключение выключателя ввода, питающего СТК. Кроме того, преобразователи типа ПВТ и ТКРМ имеют собственные быстродействующие высокочувствительные защиты заводского изготовления.

Анализ работы защит подстанций с батареями статических конденсаторов показал, что из типовых защит успешно работает лишь защита от повышения напряжения на шинах, где установлены БСК или СТК. Дифференциальная токовая отсечка и максимальная токовая защита срабатывают лишь при значительных внутренних повреждениях БСК, что может приводить к тяжелым аварийным последствиям, в том числе и экологическим.

Предложенные же нами защиты, обладают более высокой чувствительностью, они внедрены и внедряются на подстанциях предприятий электрических сетей "Львовэнерго" и "Крымэнерго", ведутся подготовительные работы по внедрению их на других подстанциях энергосистем Украины.

В восьмой главе подводятся некоторые итоги разработок и внедрения, анализируется опыт эксплуатации и намечаются возможные перспективы применения статических компенсаторов в энергетике.

В последние годы в бывшем СССР активизировались работы по разработке и внедрению различных схем СТК в энергосистемы страны. Так ВНИИЭ совместно с ЗПО "Преобразователь" разработаны статические компенсаторы с масляным (а не воздушным) охлаждением, что позволяет примерно в 2 раза увеличить мощность тиристорного блока. С 1992 года планируется выпуск СТК с масляным охлаждением напряжением 20 кВ, мощностью 80 МВ·А. Такие СТК предполагается поставить, в частности, на электропередачу 1150 кВ Экибастуз-Кустанай.

Завершаются разработки СТК аналогичной конструкции мощностью 50 МВ·А на напряжение 10 кВ и 55 МВ·А на напряжение 110 кВ. Предполагается установка таких СТК на подстанциях 220 (110) кВ по

5+10 штук в год, для чего институтом "Энергосетьпроект" разрабатываются соответствующие проекты.

Анализ режимов работы электрических сетей Минэнерго Украины показал, что на подстанциях сетей с высшим напряжением 110 кВ целесообразно и достаточно устанавливать БСК, а соответственно и СТК, мощностью до 20 МВ·А (напряжением 10 и 35 кВ). На подстанциях с высшим напряжением 330 (220) кВ установлено 8 БСК мощностью 50+55 МВ·А напряжением 110 кВ на части которых целесообразна установка параллельно им тиристорно-реакторных групп мощностью 20+25 МВ·А, что позволит снизить количество коммутаций их, существенно повысив эффективность использования.

Так внедренная в 1989-90 г.г. на подстанции "Нововольнская" тиристорно-реакторная группа мощностью 20 МВ·А, напряжением 6 кВ позволяет стабилизировать на желаемых уровнях напряжение на шинах 6 кВ и 35 кВ. Установленные СТК на подстанциях "Тересва", "Рахов", "Овруч" позволяют регулировать в необходимом диапазоне (стабилизировать) напряжение на шинах 10 и 35 кВ подстанций с трехобмоточными трансформаторами.

Регуляторы тока и напряжения блоков типа ПБТ, используемые в выпрямительном режиме, непригодны для работы этого же блока в режиме регулирования напряжения и их необходимо заменить на предложенные нами. Существующие защитные R-C-цепи этих блоков недостаточны по мощности и потребовалось установить дополнительные внешние ($R_g \approx 400 \text{ Ом}$, $C_g \approx 0,2 \text{ мкФ}$).

Для устранения помех радио-телефонной связи при работе ПБТ в режиме регулирования были установлены R-C-цепочки на быстронасыщающихся дросселях на входе вентильных плеч преобразователя.

Для защиты вентилях от перенапряжений, возникающих при внешних КЗ нужна установка разрядников типа ОПН или РВРД.

С учетом опыта эксплуатации, СТК ПС "Тересва" и "Овруч" выполнены более мобильными чем ПС "Рахов".

Эксперименты по плавке гололеда, проведенные в 1989-90 г.г. преобразователями СТК "Тересва" показали следующее: а) воздушные ЛЭП 110 и 35 кВ, примыкающие к ПС "Тересва" и "Рахов" находятся в особом гололедном районе и плавка гололеда на них предусмотрена приказом по ЛЭО "Львовэнерго"; б) плавку гололеда постоянным током можно проводить способами "провод-провод" или "провод-два провода"; в) в существующей схеме подстанции "Тересва" плавка гололеда способом "провод-земля" невозможна, а падение провода на землю во время плавки является аварийным режимом; г) режим плавки способом

"провод-земля" может быть осуществлен при реконструкции схемы, согласно рис. 1д (все необходимое оборудование на подстанции имеется); д) тогда же станут возможными и эффективные геофизические исследования земли постоянным током. В настоящее время проведение мероприятий по пунктам г) и д) практически невозможно.

В бывшем СССР на Дальневосточном (ДВМЗ) и Молдавском (ММЗ) металлургических (передельных) заводах установлены СТК-160/138-35 (разработка ВЭИ), что дало ряд положительных результатов. Кроме того, в промышленные сети страны внедрен целый ряд компенсаторов Запорожского завода "Преобразователь" напряжением 6 и 10 кВ. Количество их составило 31 штуку (по состоянию на 1989 г.), а том числе и в зарубежные страны. К сожалению, на отечественных предприятиях из комплекта СТК используются в основном только фильтрокомпенсирующие цепи. Это связано прежде всего с тем, что потребители мало обращают внимания на отклонения (колебания) напряжения и низкие значения коэффициента мощности на шинах подстанций.

Анализируя режимы работы СТК в электрических сетях, их параметры и стоимостные показатели можно сказать, что экономически оправданными на подстанциях 6-10 кВ компенсаторы могут быть лишь при многоцелевом использовании их оборудования - регулирование напряжения, симметрирование нагрузки, плавка гололеда и геофизические исследования земли постоянным током и т.п.

Совершенствование технологии изготовления тиристоров и конденсаторов, удешевление их, создание элементов большей единичной мощности, анализ зарубежного опыта свидетельствует о том, что и у нас статические компенсаторы могут и будут находить все более широкое применение. Вместе с тем и в настоящее время, с существующим оборудованием можно и необходимо создавать схемы СТК с более высокими технико-экономическими показателями, что и предложено нами.

Вопрос определения экономической эффективности СТК в настоящее время весьма проблематичен, ибо неизвестна как цена комплектующих элементов, так и стоимость сэкономленной электроэнергии при их помощи. Тем более, если речь идет о многоцелевых компенсаторах. Например, если основные функции СТК - регулирование напряжения и компенсация реактивной мощности, то аналогом им является синхронный компенсатор, при помощи которого нельзя осуществлять ни симметрирование нагрузки, ни плавку гололеда, ни геофизические исследования земли. Трудно определить эффективность СТК для плавки гололеда по сравнению с неуправляемыми выпрямителями, поскольку пос-

ледние используются лишь несколько часов в году, а ТБ компенсатора постоянно работает в режиме регулирования напряжения и позволяют легко получать регулируемый постоянный ток и т.д., и т.п.

Таким образом, технико-экономическую эффективность статических компенсаторов следует определять в каждом конкретном случае их применения.

В приложениях приведен пример расчета оптимального напряжения на шинах подстанции "Нововольнская" и документы, подтверждающие внедрение работы и ее экономический эффект.

ВЫВОДЫ

В диссертации разработаны новые теоретические положения математического моделирования электрических сетей со статическими компенсаторами, изложены научно обоснованные технические и экономические решения по комплексному использованию в электрических сетях многоцелевых статических компенсаторов, внедрение которых вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса. При этом получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ схем и функций статических компенсаторов в стране и за рубежом и впервые предложено использовать их как многоцелевые (многофункциональные) устройства, позволяющие осуществлять не только компенсацию реактивной мощности, регулирование напряжения и симметрирование нагрузки, а и плавку гололеда и геофизические исследования земли постоянным током.
2. Предложены новые схемы статических компенсаторов на базе сдвоенных реакторов (на уровне изобретения), имеющих высокие технико-экономические показатели.
3. Рассмотрены проблемы моделирования электрических сетей со статическими компенсаторами и установлено, что специфика работы последних требует разработки и использования новых методов и подходов для эффективного решения задач установившихся режимов и переходных процессов в них.
4. Используются, развиты и предложены новые методы: метод обобщенных независимых переменных и метод режимного эквивалентирования, проведена программная реализация и на их основе выполнены расчеты установившихся режимов и переходных процессов электрических сетей с подстанциями, на которых установлены статические компенсаторы.
5. Показано, что на подстанциях с конденсаторными батареями 6+110 кВ коэффициент использования по времени значительного числа послед-

них меньше половины, а это вызывает необходимость частых включений и отключений их. Такие коммутации быстро выводят со строя как сами батареи, так и коммутационное оборудование. Радикальным решением этой проблемы является использование конденсаторной батареи как элемента статического компенсатора, для чего предложены оптимальные схемные решения для разных напряжений.

6. Установлена необходимость усиления защитных R-C-цепочек и установки дополнительных разрядников на плечи тиристорных СТК. Также показано, что режим плавки гололеда постоянным током по методу "провод-земля" является наиболее тяжелым (опасным) как для элементов статического компенсатора (в первую очередь тиристорного блока) так и для остального подстанционного оборудования. Недопустимо в таких схемах проводить и исследования земли постоянным током.
7. Показано, что кардинальным решением проблемы плавки гололеда постоянным током при помощи тиристорного блока компенсатора любым способом является применение схемы, использующей сдвоенный реактор, включенный между выключателями трансформаторов, что позволяет электрически изолировать контур плавки гололеда от остального оборудования подстанции, тем самым исключить возможность "подпора" постоянным током подстанционных элементов (за исключением схемной обмотки питающего трансформатора) и избежать возможных опасных перенапряжений.
8. Разработаны, исследованы и внедрены регуляторы статических компенсаторов, выполненных на базе разных типов преобразователей, позволяющие эффективно регулировать напряжение на шинах подстанций с коррекцией его по току ввода трансформатора (нагрузки). Работа регуляторов согласована с работой устройства автоматического регулирования трансформаторов под нагрузкой.
9. Разработан и внедрен новый комплекс диагностики и защиты батарей статических конденсаторов от внутренних повреждений, обладающий высокой чувствительностью. Предложенные решения защищены авторскими свидетельствами СССР.
10. Выработаны рекомендации по внедрению статических компенсаторов в энергетику Украины, в том числе выполненных на базе сдвоенных реакторов.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Денисенко Г.И., Генрих Г.А., Жураховский А.В. Регулирование

мощности с помощью трехобмоточного вольтодобавочного трансформатора при колебаниях напряжения в сети // Энергетика и электрификация. - 1968. - № 3 (39). - С. 18-20.

2. Денисенко Г.И., Генрих Г.А., Жураховский А.В. Регулирование напряжения вольтодобавочными трансформаторами при питании возбуждающей обмотки через биполярно включенные управляемые вентили // Изв. ВУЗов СССР "Энергетика". - 1970. - № 9. - С. 1-5.

3. Опыт эксплуатации источника реактивной мощности с плавным регулированием напряжения / Жураховский А.В., Лабинский И.И., Макеев А.А. и др. // Расчет, учет и анализ потерь электрической энергии в электрических сетях и мероприятия по их снижению. Тез. докл. на совещании МЭ и Э СССР. М. 1982.

4. Варецкий Ю.Е., Кенс Ю.А., Жураховский А.В. Регулирование статических компенсаторов в системах электроснабжения мощных электродуговых печей // Повышение качества электрической энергии в промышленных электрических сетях. Материалы конференции. - М., МДНТП, 1982. - С. 84-88.

5. Опыт-промышленная установка статического компенсатора с комплексным использованием оборудования. / Жураховский А.В., Варецкий Ю.Е., Шелепетень Т.М. и др. // Энергетика и электрификация. - 1983. - № 1. - С. 34-36.

6. Жураховский А.В., Шелепетень Т.М., Шпак Я.Ф. Опыт эксплуатации статического тиристорного компенсатора 10 кВ // Пробл. преобраз. техн.: Тез. докл. III Всес. научн.-техн. конф. - Киев, 1983. - С. 66-68.

7. Жураховский А.В., Максимович И.Н., Шелепетень Т.М. Экспериментальные исследования электромагнитных процессов статического тиристорного компенсатора 10 кВ // Пробл. преобраз. техн.: Тез. докл. III Всес. научн.-техн. конф. - Киев, 1983. - С. 69-72.

8. Жураховский А.В. Повышение экономичности и оптимизация работы электрических сетей с помощью статических тиристорных компенсаторов // Тез. докл. IV Респ. научн.-техн. конф. "Современные проблемы энергетики". - Киев, 1985. - С. 103-104.

9. Павлюк В.Ф., Рудык Л.Я., Жураховский А.В., Шелепетень Т.М. Некоторые вопросы компенсации реактивной мощности и регулирование напряжения в ПЭО "Львовэнерго" // Тезисы докл. IV Респ. научн.-техн. конф. "Современные проблемы энергетики". - Киев, 1985. - С. 110-111.

10. Разработка и исследование схемы статического тиристорного компенсатора для Нововольнской подстанции / Ю.Е. Варецкий, А.В. Жу-

раховский, В.С. Перхач и др. // Энергетика и электрификация. - 1986. - № 1. - С. 35-37.

11. Варецкий Ю.Е., Жураховский А.В., Шелепетень Т.М. Статический тиристорный компенсатор для подстанций 110/35/10 кВ распределительных сетей // Электроэнергетические и электромеханические системы: Вестник Львов. политехн. ин-та № 213, 1987. Изд-во "Вища школа" при Львов. гос. ун-те. С. 7-12.

12. Повышение экономичности электроснабжения угольных шахт при помощи статических тиристорных компенсаторов. /Жураховский А.В., Перхач В.С., Стряпан В.Н. и др. // Промышленная энергетика. - 1987. - № 8. - С. 34-36.

13. Стряпан В.Н., Жураховский А.В., Данилюк А.В. Применение статических тиристорных компенсаторов для повышения степени технологического управления электроснабжением сельскохозяйственных потребителей // Основные направления развития сельских электрических сетей в УССР в XII пятилетке: Тез. докл. научн.-техн. конф. - Киев. - 1987. - С. 23-24.

14. Бахор З.М., Данилюк А.В., Жураховский А.В. Определение параметров фильтровых реакторов статических тиристорных компенсаторов // Тезисы докл. IV Всес. научн.-техн. конференции. - Киев, 1987. - С. 22-23.

15. Применение источников реактивной мощности в Крымэнерго. /Жураховский А.В., Данилюк А.В., Комаров В.И., Павлова Э.И. // Электрические станции. - 1988. - № 4. - С. 40-43.

16. Лысяк Г.Н., Жураховский А.В., Данилюк А.В. Метод формирования математических моделей электроэнергетических систем // Техн. электродинамика. - 1988. - № 2. - С. 92-94.

17. Жураховский А.В., Кинаш В.М., Данилюк А.В. Выбор уставки по напряжению статического тиристорного компенсатора, работающего в режиме стабилизации напряжения // Техн. электродинамика. - 1988. - № 3. - С. 57-61.

18. Установка статических тиристорных компенсаторов на подстанциях ПЭО "Киевэнерго". /А.В. Жураховский, З.М. Бахор, А.В. Данилюк и др. // Энергетика и электрификация. - 1990. - № 1. - С. 38-40.

19. Исследование бросков тока намагничивания в системе электроснабжения сверхмощных дуговых сталеплавильных печей /Ю.Е. Варецкий, В.Г. Гапанович, А.В. Жураховский и др. // Техн. электродинамика. - 1990. - № 2. - С. 38-42.

20. Метод режимного эквивалентирования электрических сетей

/А.В. Данилюк, А.В. Жураховский, В.И. Комаров, Г.Н. Лысяк // Техн. электродинамика. - 1990. - № 6. - С. 100-105.

21. Жураховский А.В. Применение метода обобщенных независимых переменных для расчета электрических сетей со статическими компенсаторами // Тез. докл. Всес. научн.-техн. конф. "Разработка методов и средств экономии электроэнергии в электрических системах и системах электроснабжения промышленности и транспорта". - Днепропетровск, 1990. - С. 95-97.

22. Жураховский А.В. Использование многофункциональных статических компенсаторов для уменьшения потерь в электрических сетях. // Тез. докл. Всес. научн.-техн. конф. "Разработка методов и средств экономии электроэнергии в электрических системах и системах электроснабжения промышленности и транспорта". - Днепропетровск, 1990. - С. 148-149.

23. Лысяк Г.Н., Данилюк А.В., Комаров В.И., Жураховский А.В. Применение режимных эквивалентов для управления электросбережением в электрических системах // Тез. докл. Всес. научн.-техн. конф. "Проблемы энергосбережения". - К. - 1991. - С. 36.

24. А.с. 1453517 (СССР). Устройство для защиты от внутренних повреждений конденсаторной батареи, соединенной в звезду, статического тиристорного компенсатора /Садовский В.Г., Варецкий Ю.Е., Жураховский А.В., Амброс В.М. Булл. изобр. - 1989. - № 3.

25. Положительное решение ВНИИГПЭ по заявке 4850501/07. Устройство для защиты конденсаторной батареи статического тиристорного компенсатора /В.Г. Садовский, А.В. Жураховский, Г.Г. Гловацкий и др.

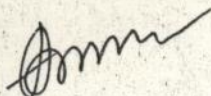
26. Положительное решение ВНИИГПЭ по заявке 4885006/07/112635. Подстанция переменного тока. /Ю.Е. Варецкий, А.В. Жураховский, З.М. Бахор.

Личный вклад. В работах, опубликованных в соавторстве соискателю принадлежит: [1, 2] - проведение расчетов, обработка и анализ результатов; [4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 19, 23] - участие в постановке задачи и разработке методики расчетов и экспериментов, анализ результатов; [16] - участие в разработке метода и анализе результатов; [19] - участие в формировании методики исследований и анализе результатов; [3, 13, 14, 15, 17, 18, 20] - постановка задачи, разработка метода и методики исследований, научное руководство, анализ результатов.

В авторских свидетельствах и положительных решениях на изобретения соискателю принадлежит: [24, 25] - постановка задачи и

участие в разработке схемы; [26] - постановка задачи, идея изобретения, участие в разработке схемы.

Соискатель



Подписано к печати 16.02.1993г. Формат 60x84/16
Бумага офсетная Усл.-печ.лист.2,0 Уч.-изд.лист 2,0,
Тираж 120, Заказ 173. Бесплатно

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

470781

Ab 26.822

AB 26.822