

На правах рукописи

КРАСИЛЬНИКОВА ТАТЬЯНА GERMANOVNA

**РАЗРАБОТКА ЧЕТЫРЁХФАЗНОЙ
ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
НА ДАЛЬНИЕ РАССТОЯНИЯ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Манусов Вадим Зиновьевич

Официальные оппоненты:

Ефремов Игорь Алексеевич,
доктор технических наук, с. н. с.,
Новосибирский государственный технический университет,
профессор кафедры «Техника и электрофизика
высоких напряжений»

Новиков Николай Леонтьевич,
доктор технических наук, с. н. с.,
заместитель научного руководителя ОАО «НТЦ
ФСК ЕЭС», начальник отдела новых
электросетевых технологий

Пантелеев Василий Иванович, доктор
технических наук, профессор,
Сибирский федеральный университет,
заведующий кафедрой «Электротехнические
комплексы и системы»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита диссертации состоится « 19 » декабря 2013 г. в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан « » ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Тимофеев Иван Петрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Формирование Единых национальных энергосистем в мире, в том числе и в России, осуществлялось и дальнейшее их развитие будет происходить на базе мощных электропередач (ЭП) сверхвысокого напряжения, образующих в совокупности основную электрическую сеть, на которую возлагается задача обеспечения экономичного и надёжного функционирования всего энергообъединения.

Растущие потребности в электроэнергии диктуют требования к величине транспортных и обменных потоков мощности и дальности их передачи. Это, в свою очередь, стимулирует усовершенствование существующих и разработку новых технологий в области передачи электроэнергии. Среди этих технологий на каждом витке развития может быть выбран вариант, обладающий наибольшей экономической и технической эффективностью.

Радикальным решением для повышения пропускной способности дальних электропередач считается освоение напряжений в ультравысоком диапазоне свыше 1000 кВ.

В последние десятилетия заметный научно-технический прогресс наблюдался в области разработки нетрадиционных ВЛ переменного тока, к которым относят линии повышенной натуральной мощности, шестифазные линии, управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ (УСВЛ) и линии с резервной фазой. Существенный вклад на этом направлении внесён работами академика Н.Н. Тиходеева, член-корреспондента Г.Н. Александрова и профессора В.М. Постолатия.

Высокая надёжность и управляемость биполярных передач постоянного тока (ППТ) по сравнению с традиционными 3-фазными электропередачами, несмотря на высокую стоимость ППТ, поставила их в ряд рекомендуемых вариантов, когда речь идёт о передаче значительных потоков мощности на дальние расстояния.

Необходимо отметить большой прогресс в продвижении управляемых электропередач переменного тока, известных за рубежом как FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System). Структурным элементом таких электропередач, изменяющим их свойства и показатели, являются регулируемые устройства реактивной мощности различного типа.

Критический обзор различных типов дальних ЭП (3-фазных ЭП с линиями повышенной натуральной мощности, 6-фазных ЭП, ЭП с УСВЛ, 3-фазных ЭП 1150 кВ, ППТ) показывает, что во всех рассмотренных решениях по улучшению характеристик дальних электропередач два важнейших показателя - экономическая эффективность и надёжность - находятся в противоречивом соотношении: увеличение экономической эффективности вариантов на переменном токе сопровождается понижением уровня их надёжности и повышение надёжности вариантов на постоянном токе приводит к заметному снижению их экономической эффективности.

В конце прошлого века в Сибирском НИИ Энергетики профессор Самородов Г.И. выдвинул идею нового типа электропередач, для которых

категории экономической эффективности и надёжности приводятся в согласие, т.е. повышение экономической эффективности варианта сопровождается повышением его надёжности. В основе нового типа электропередач, названного как четырехфазные ЭП (ЧЭП), лежит 4-фазная уравновешенная симметричная система переменного тока с фазовым сдвигом 90° .

Основные отличительные особенности 4-фазной ЭП состоят в том, что:

- она снабжена фазопреобразующими трансформаторами (ФПТ) для преобразования 3-фазной системы в 4-фазную и обратно;
- фазы четырехфазной ВЛ (ЧВЛ) располагаются на опорах так, что образуют две независимые симметричные 2-фазные системы, в каждой из которых токи и напряжения находятся в противофазе, что позволяет повысить натуральную мощность линии и снизить экологическое влияние;
- при возникновении наиболее вероятных однофазных повреждений на линии и проведении пофазных плановых ремонтов предусматривается перевод ЧЭП на 3-фазный режим работы с передачей не менее 75% номинальной мощности.

Проработки в области ЧЭП до исследований, проведённых диссертантом, касались лишь принципиальных положений таких электропередач и не затрагивали многих вопросов, без решения которых внедрение ЧЭП невозможно. В диссертации осуществлён переход от основополагающей идеи к обоснованию теоретических и практических решений применительно к 4-фазной технологии передачи электроэнергии на дальние расстояния и оценке её эффективности.

Объект исследований: 4-фазные электропередачи сверхвысокого напряжения, предназначенные для передачи электроэнергии на дальние расстояния.

Предмет исследований: конструкции, параметры и режимы 4-фазных воздушных линий; схемы, параметры и режимы фазопреобразующих трансформаторов; схемно-режимные характеристики, надёжность, технико-экономические показатели и экономическая эффективность ЧЭП.

Цель работы заключается в обосновании оптимальных схем, главных параметров, схемно-режимных характеристик, надёжности, технико-экономических показателей и экономической эффективности ЧЭП.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- создание математических моделей и схем замещения 4-фазной линии и фазопреобразующих устройств и оценка эффективности функционирования ЧЭП в нормальных и аварийных режимах;
- разработка технических требований на создание фазопреобразующих устройств и рекомендаций по оптимальным конструкциям 4-фазных линий как обычного, так и компактного исполнения напряжением $500/\sqrt{3}$ и $750/\sqrt{3}$ кВ;
- обоснование устройств и способов для ликвидации повреждений на 4-фазной линии и разработка методики для оценки уровня режимной и балансовой надёжности 4-фазных электропередач;

- проведение функционально-стоимостного анализа и определение технико-экономических показателей и экономической эффективности ЧЭП с учётом фактора надёжности.

Методика проведения исследований. Работа основана на теории волновых процессов в многопроводных линиях высокого и сверхвысокого напряжения, теории преобразования переменного тока с помощью трансформаторных устройств, матричном методе моделирования режимов дальних электропередач, методах математического программирования в задачах оценки уровня надёжности ЧЭП и обоснования оптимальных конструктивных параметров ЧВЛ.

Научная новизна заключается в разработке методических основ для исследования и проектирования ЧЭП с учётом фактора надёжности. К числу отдельных результатов, обладающих новизной, относятся:

- Создание математических моделей и схем замещения 4-фазной линии и фазопреобразующего устройства и их программная реализация с использованием как фазных, так и модальных координат для исследования нормальных и аварийных режимов ЧЭП.

- Разработка физически интерпретируемых упрощённых моделей 4-фазных линий для исследования резонансных перенапряжений и токов дуги подпитки в неполнофазных схемах.

- Разработка вероятностного подхода для оценки режимной и балансовой надёжности дальних электропередач различного исполнения, позволяющего проводить отбор вариантов при их сравнительном анализе с учётом режима загрузки электропередачи, статистики опасных повреждений и величины возникающего дефицита мощности при этих авариях.

- Обоснование методики определения технико-экономических показателей и экономической эффективности ЧЭП, включающей модифицированный критерий оценки экономической эффективности, функционально-стоимостный анализ основных элементов ЧЭП и оптимизационный подход к выбору конструктивных параметров ЧВЛ.

Практическая ценность и внедрение результатов. К основным результатам практического плана относятся следующие предложения и рекомендации применительно к 4-фазной технологии передачи электроэнергии на большие расстояния, которые могут применяться в научно-исследовательских и проектных организациях при решении задач перспективного развития энергосистем и проектирования электропередач сверхвысокого напряжения на дальние и сверхдальние расстояния:

- защищённые патентами схема фазопреобразующего устройства для преобразования 3-фазной системы переменного тока в 4-фазную с возможностью перехода ЧЭП на 3-фазный режим работы и устройство комбинированной поперечной компенсации, позволяющее исключить резонансные явления в неполнофазных режимах;

- рекомендации по оптимальным конструкциям 4-фазных линий напряжением $500/\sqrt{3}$ и $750/\sqrt{3}$ кВ как обычного, так и компактного исполнения и их технико-экономические показатели;

- принципиальные схемы подстанций для 4-фазной электропередачи и технические требования на создание фазопреобразующих трансформаторов напряжением $500/\sqrt{3}$ и $750/\sqrt{3}$ кВ.

Практическая значимость подтверждается также актами внедрения результатов исследований при выполнении в Сибирском НИИ Энергетики и Институте Энергетической Стратегии научно-исследовательских работ, касающихся использования четырёхфазной технологии передачи электроэнергии для усиления электрической связи между ОЭС Сибири, ОЭС Урала и Европейской частью страны.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием математического аппарата теории волновых процессов в многопроводных линиях и теории преобразования переменного тока с помощью трансформаторных устройств, справедливость которых подтверждена многолетней практикой.

Программной реализацией в среде Mathcad разработанной математической модели ЧЭП с использованием двух различных методов (метода фазных координат и метода симметричных составляющих), дающих полностью совпадающие результаты.

Личный вклад соискателя включает:

- обоснование и разработку положений, определяющих научную новизну и практическую значимость работы;
- создание математических моделей и схем замещения четырёхфазной линии и фазопреобразующего трансформатора;
- проведение анализа схемно-режимных характеристик и надёжности ЧЭП;
- обоснование оптимальных конструкций ЧВЛ, рациональных схем ФПТ и четырёхфазных подстанций в целом;
- разработку устройств и способов для ликвидации повреждений на ЧВЛ;
- создание методики определения технико-экономических показателей и экономической эффективности ЧЭП с учётом фактора надёжности;
- технически и экономически обоснованные предложения по использованию четырёхфазной технологии передачи электроэнергии на дальние расстояния

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. В соответствии с формулой специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» представленная диссертационная работа является исследованием по развитию и совершенствованию теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения экономичного и надежного транспорта электроэнергии. Диссертация соответствует также п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике», п. 7 «Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических

систем», п. 10. «Теоретический анализ и расчетные исследования по транспорту электроэнергии переменным и постоянным током, включая проблему повышения пропускной способности транспортных каналов», п. 11. «Разработка методов анализа структурной и функциональной надёжности электроэнергетических систем и систем электроснабжения» паспорта специальности 05.14.02.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международной научно-технической конференции “Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния” (г. Новосибирск, 2003г.); на международной конференции по передаче и распределению электроэнергии (St.Peterburg PowerTech 2005), состоявшейся в Санкт-Петербурге 27-30 июля 2005г; на 8-ой международной научно-технической конференции по методам анализа надежности электрических систем (Conference on PMAPS-Probability Methods Applied to Power Systems), состоявшейся в Швеции (г. Стокгольм, 2006г.); на международной конференции «Инвестиционный потенциал республики Саха (Якутия) – восточный вектор развития России» совместно с 5-ой международной конференцией «Энергетическая кооперация в Азии: механизмы, риски, барьеры» (г. Якутск, 2006г.); на третьей международной научно-технической конференции «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт» (г. Омск, 2007г.), на международной конференции IEEE «Передовые технологии для развития энергосистем» (Advanced Technologies for Emerging Power Systems), (г. Виннипег, Канада, 3 – 5 Октября 2011 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы автором опубликовано 38 печатных работ, в том числе 17 статей в рецензируемых научных журналах, вошедших в перечень ВАК РФ, 14 научных публикаций в сборниках всероссийских и международных конференций, 4 патента.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка используемой литературы из 177 наименований и приложения. Работа изложена на 365 страницах основного текста, содержит 185 рисунков и 36 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи; показана научная новизна исследований и оценена их практическая значимость; отражены уровень апробации и личный вклад соискателя в решение научных задач; даны структура и объём диссертационной работы, а также публикаций.

В разделе 1 проводится обзор ЭП сверхвысокого напряжения и, в первую очередь, даётся характеристика дальней ЭП, с одной стороны, как элемента электроэнергетики, а с другой стороны, как сложного объекта, включающего в свой состав такие структурные элементы как подстанции (ПС), воздушная линия и устройства реактивной мощности (УРМ). Совершенствование дальних ЭП связано с повышением таких показателей как пропускная способность, экономическая эффективность, надёжность, управляемость, ремонтпригодность и со снижением экологического влияния.

Повышение пропускной способности на цепь является эффективным путём повышения экономической эффективности и снижения экологического влияния, если при этом обеспечивается необходимый уровень надёжности.

Повысить показатели дальней ЭП (ДЭП) можно за счёт нововведений как в отдельных структурных элементах, так и в целом в ЭП. Используемые в настоящее время в мире и рекомендуемые к применению ДЭП подразделяются (рис. 1) на 3-фазные ЭП (ТЭП) и нетрадиционные ЭП переменного тока, а также передачи постоянного тока (ППТ).

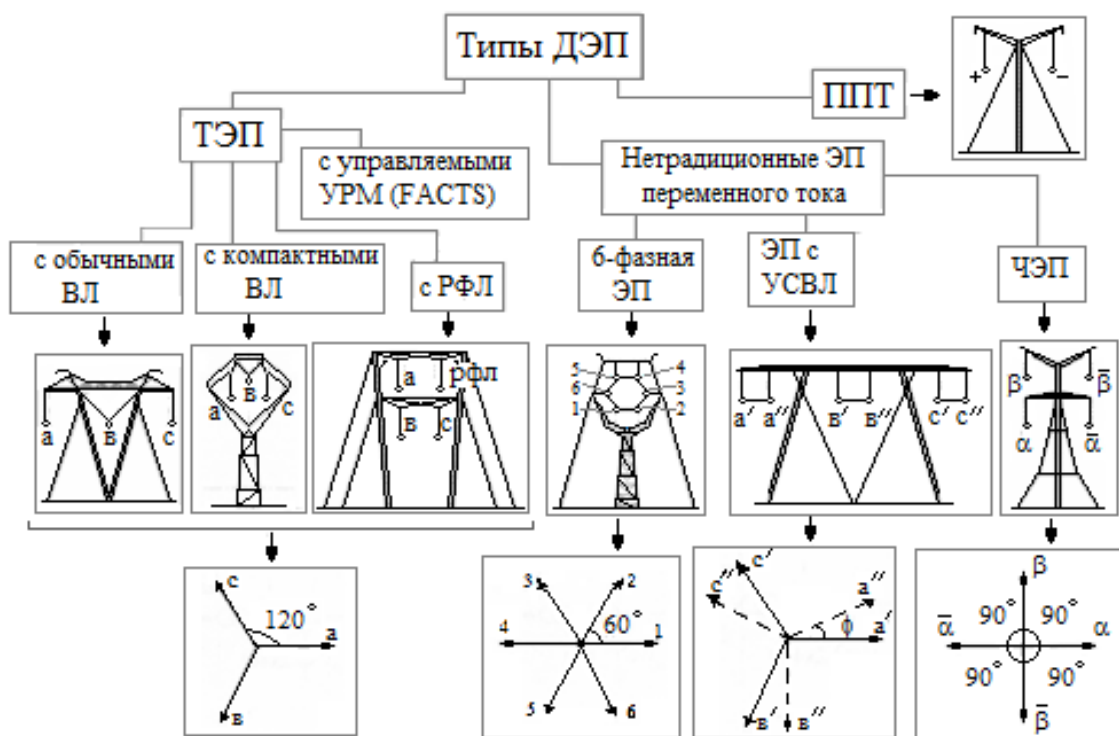


Рис. 1. Классификация дальних электропередач

Инновации в области ТЭП. В последние десятилетия заметный научно-технический прогресс наблюдался в области разработки компактных ВЛ. Более

рациональная конструкция позволяет увеличить натуральную мощность компактной ВЛ на (40 – 50)% по сравнению с обычной ВЛ. В целом удельная стоимость передачи электроэнергии по линии повышенной натуральной мощности будет меньше, чем по традиционной ВЛ, т.е. такие линии следовало бы отнести к перспективному направлению в области дальней передачи электроэнергии.

Однако есть одно «но», которое вызывает критическое отношение к компактным линиям. Речь идёт о недостаточном уровне надёжности 3-фазных линий, которые должны отключаться полностью при наиболее вероятных устойчивых однофазных отказах. Понятно, что значительное увеличение передаваемой мощности на одну цепь при использовании компактных ВЛ может быть оправдано лишь при положительном решении проблемы надёжности.

Одним из путей повышения надёжности компактных ВЛ является применение резервной фазы линии, которая в нормальном режиме отключена и используется только вместо аварийно отключённой. Недостатком такого решения является недоиспользование суммарного сечения ВЛ в нормальном режиме. В итоге эффективность применения компактных ВЛ становится не столь очевидной, когда принимаются меры по повышению её надёжности.

Необходимо отметить большой прогресс в продвижении управляемых ЭП переменного тока, известных за рубежом как FACTS. Структурным элементом таких ЭП, изменяющим их свойства и показатели, являются регулируемые УРМ различного типа. Создание ТЭП с использованием регулируемых УРМ является прогрессивным направлением в области дальней передачи электроэнергии.

Радикальным решением для повышения пропускной способности ТЭП является использование ультравысоких (свыше 1000 кВ) напряжений. Такие электропередачи позволяют в 2 и более раза повысить пропускную способность дальних ЭП по сравнению с традиционными электропередачами наивысшего освоенного в мире напряжения 750 (765) кВ. Электропередачи ультравысокого класса напряжения позволяют иметь передаваемую мощность на одну цепь порядка 4000–5000 МВт, что актуально для стран, имеющих значительную территорию. Задача освоения следующего класса напряжения 1150 кВ была решена в последней четверти прошлого века в бывшем СССР. В результате была построена ВЛ такого класса напряжения Сибирь – Казахстан – Урал общей длиной свыше 2000 км. На основе проведённых НИР и ОКР был также создан комплекс основного и вспомогательного оборудования на напряжение 1150 кВ, которое было установлено на трёх подстанциях в Казахстане.

Несомненным преимуществом дальней ЭП напряжением 1150 кВ является её высокая пропускная способность, что определяет и другое её достоинство, заключающееся в меньших удельных затратах на передачу электроэнергии по сравнению с ЭП напряжением 500 и 750 кВ. Однако на этом положительные эффекты при использовании ЭП 1150 кВ заканчиваются. Дело в том, что ЭП 1150 кВ традиционной конструкции характеризуется

низким уровнем надёжности, поскольку при наиболее вероятных однофазных повреждениях линии ЭП должна отключаться полностью, создавая дефициты, соизмеримые с мощностью приёмной системы. Удовлетворить критерию надёжности (N-1) не представляется возможным, когда ЭП 1150 кВ шунтируется сравнительно слабой сетью 500 кВ. Таким образом, ЭП 1150 кВ Сибирь – Казахстан – Урал создавалась с нарушением принятого во всём мире фундаментального принципа надёжности N-1. Радикальным путём решения проблемы надёжности для 3-фазной линии 1150 кВ могло бы стать оснащение её резервной фазой, что, конечно, привело бы к существенному снижению её экономической эффективности. Другой недостаток ВЛ 1150 кВ связан с её ремонтпригодностью, поскольку выполнение ремонтных работ на ней под напряжением без отключения линии связано с проблемой обеспечения электробезопасности ремонтного персонала. Негативное влияние на технико-экономические характеристики ВЛ 1150 кВ оказывают экологические ограничения и необходимость принятия мер для снижения коронного разряда на линии.

Начавшаяся в 1985 году эксплуатация участка Экибастуз – Кокчетав – Кустанай на напряжении 1150 кВ была прекращена в связи с распадом бывшего СССР. Из-за наступившего резкого экономического спада потребность передачи первоначально намеченных мощностей отпала, и ЭП была переведена на работу при напряжении 500 кВ, на котором она и работает до сих пор. В настоящее время установленное ранее оборудование класса 1150 кВ пришло в негодность, а производственная база по созданию такого оборудования утеряна. Таким образом, для реанимации ЭП 1150 кВ на современном этапе необходимо провести большой объём работ, естественно принимая во внимание опыт прошлых разработок.

Передовые позиции в освоении ТЭП в ультравысоком диапазоне в настоящее время занимает Китай. В 2009 году была пущена в эксплуатацию ТЭП Северный – Центральный Китай напряжением 1000 кВ и дальностью 636 км с двумя промежуточными отборами.

Передачи постоянного тока, начиная с 70-х годов, когда тиристорные преобразователи сменили ртутные, находят всё более широкое использование в энергосистемах для передачи больших потоков мощности на дальние расстояния. Наибольшие параметры в настоящее время имеет двухцепная бразильская ППТ, построенная в 80-е годы для выдачи мощности от ГЭС Итайпу. Её напряжение составляет ± 600 кВ, а передаваемая мощность на одну цепь равна 3000 МВт. Более мощная одноцепная ППТ Экибастуз – Центр напряжением ± 750 кВ и передаваемой мощностью 6000 МВт была спроектирована в СССР, но начатое в конце 80-х годов её строительство так и не было завершено в связи с распадом Советского Союза.

К основным достоинствам ППТ помимо упрощения конструкции линии относятся: хорошая управляемость; отсутствие потребности в УРМ на линии; отсутствие технических ограничений на величину передаваемой мощности по условию устойчивости; повышение надёжности ППТ за счёт возможности работы в униполярном режиме при отключении одного из полюсов.

Основным недостатком ППТ является сложность и значительная капиталоемкость преобразовательных подстанций, превышающая примерно в 3 раза стоимость подстанций на переменном токе. Кроме того, к недостаткам ППТ относятся: протекание тока через землю при отключении одного из полюсов во всех аварийных и ремонтных режимах, что создает опасность электрокоррозии подземных сооружений в большой зоне вблизи рабочих заземлений; сложность осуществления отбора мощности от ППТ, и потому все созданные и проектируемые на перспективу ППТ рассчитаны на передачу мощности только между двумя подстанциями.

Поскольку ППТ позволяет длительную работу при отказе одного полюса, то применительно к ППТ с точки зрения надёжности в качестве независимого элемента рассматривается отдельный полюс. Для традиционных ЭП переменного тока независимым элементом считается отдельная 3-фазная линия при любом виде повреждений. Поэтому при технико-экономических сопоставлениях одноцепные биполярные ППТ, как правило, сравниваются с двухцепными ЭП переменного тока. В результате находится так называемая критическая длина линии, при превышении которой затраты в ППТ оказываются меньше, чем в вариант на переменном токе.

Нетрадиционные ЭП переменного тока. К нетрадиционным ЭП, предложенным в последние десятилетия, относятся 6-фазные ЭП (ШЭП), ЭП с управляемыми самокомпенсирующимися ВЛ (УСВЛ) и 4-фазные ЭП (ЧЭП).

Шестифазные ЭП. Рассмотрение двухцепных ВЛ навело американских специалистов на идею о создании ШЭП. Суть идеи состоит в том, что вместо двух 3-фазных систем с фазовым сдвигом 120° создаётся 6-фазная система с фазовым сдвигом 60° . Для получения 6-фазной системы требуются фазопреобразующие трансформаторы для преобразования 3-фазной системы переменного тока в 6-фазную и обратно. Компактная конструкция 6-фазной линии повышает её натуральную мощность на одну цепь на (40-50)% по сравнению с обычной 3-фазной ВЛ. Слабой стороной ШЭП является более низкая её надёжность по сравнению с двухцепной ЭП с 3-фазными ВЛ на разных опорах. Применение ШЭП на сверхвысоком напряжении является проблематичным из-за сложной конструкции ВЛ и пониженной надёжности.

ЭП с управляемыми самокомпенсирующимися ВЛ. УСВЛ, подобно рассмотренной выше 6-фазной ВЛ, является ещё одной модификацией двухцепной 3-фазной линии. Физическая сущность таких линий состоит в том, что у них сближены между собой фазы разных цепей на расстояния, минимально допустимые по электрической прочности воздушных промежутков фаза-фаза. Фазы в пролетах фиксируются друг относительно друга с помощью изоляционных стержней. Между напряжениями разных цепей создаётся фазовый сдвиг, что требует разработки фазорегулирующих трансформаторов с большим диапазоном регулирования. Натуральная мощность УСВЛ на одну цепь при угле сдвига 180° увеличивается на (50–70)% по сравнению с обычной линией. Слабой стороной ЭП с УСВЛ является её пониженная надёжность по сравнению с двухцепной ЭП с 3-фазными ВЛ на разных опорах.

Четырёхфазные электропередачи. Проведённый выше обзор различных типов ЭП (3-фазных ЭП с компактными ВЛ, 6-фазных ЭП, ЭП с УСВЛ, ЭП напряжением 1000 кВ и выше, ППТ) показал, что для ЭП переменного тока повышение пропускной способности и экономической эффективности сопровождается снижением надёжности, а для ППТ повышение пропускной способности и надёжности достигается путём значительного увеличения стоимости преобразовательных подстанций по сравнению с подстанциями переменного тока, что соответственно снижает экономическую эффективность ППТ. Таким образом, можно сделать общий вывод о том, что во всех рассмотренных решениях по улучшению характеристик дальних ЭП два важнейших показателя экономическая эффективность и надёжность находятся в противоречивом соотношении.

Иное положение имеет место для ЧЭП, для которых повышение экономической эффективности варианта сопровождается повышением его надёжности. Более того, и другие показатели ЧЭП, такие как пропускная способность, ремонтпригодность и экологическое влияние изменяются в благоприятную сторону.

ЧЭП, разработке которых посвящена данная диссертация, базируются на 4-фазной системе переменного тока со сдвигом фаз на 90° (рис. 2). Новые технические решения применительно к ним касаются как ВЛ, так и ПС. Четырёхфазная ЭП должна работать в составе 3-фазной системы переменного тока, и поэтому она включает ФПТ, с помощью которых ЧВЛ стыкуется с 3-фазной системой переменного тока. Наиболее эффективная область использования ЧЭП связана с замещением 3-фазных ЭП высокого и сверхвысокого напряжения, подключаемых к сети с помощью автотрансформаторов (рис. 3).

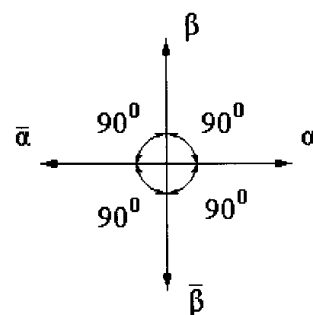


Рис.2. Четырёхфазная система

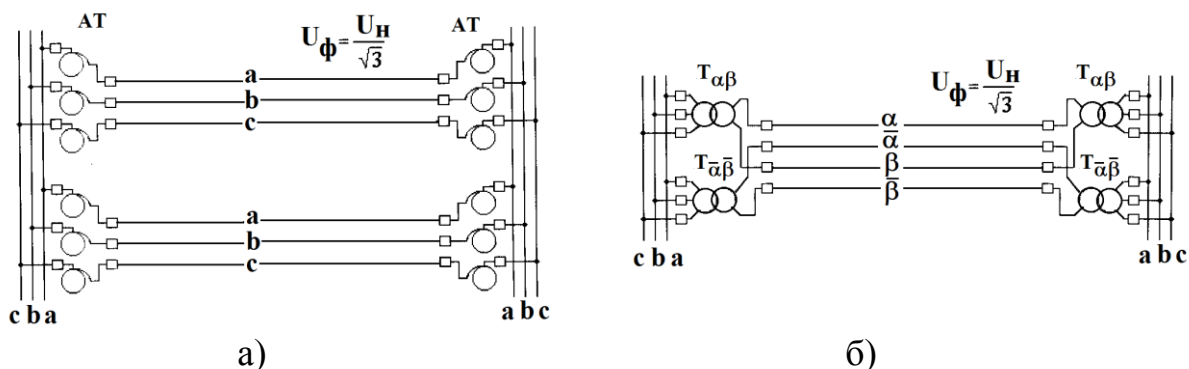


Рис. 3. Принципиальные схемы 3-фазной и 4-фазной ЭП:
а – двухцепная 3-фазная ЭП; б – одноцепная ЧЭП

ФПТ, которые одновременно осуществляют повышение напряжения на линии до экономически необходимого уровня, являются новым оборудованием для ЧЭП. Всё остальное оборудование в силу однофазного исполнения

идентично для 3-фазных ЭП, и ЧЭП отличается лишь количеством фазных элементов.

ЧВЛ по сравнению с 3-фазной ВЛ обладает повышенной (на одну треть) натуральной мощностью линии при одинаковых их волновых сопротивлениях. Дополнительное повышение натуральной мощности связано с эффектом противофазы в каждой из 2-фазных систем ЧВЛ. Обычная ЧВЛ позволяет увеличить натуральную мощность на (40–50)%, а компактная ЧВЛ – вдвое и более по сравнению с 3-фазной ВЛ традиционного типа.

Имевшиеся проработки в области ЧЭП до исследований, проведённых диссертантом, касались лишь принципиальных положений таких ЭП и не затрагивали многих вопросов, без решения которых внедрение ЧЭП невозможно. Диссертанту предстояло перейти от идеи к обоснованию практических решений применительно к ЧЭП. Необходимо было создать математические модели основных элементов ЧЭП для исследования нормальных и аномальных режимов и для оценки эффективности функционирования таких ЭП. Требовалось найти приемлемые решения для обеспечения высокой надёжности ЧЭП и разработать способы её оценки. Наконец, для определения экономической эффективности ЧЭП необходимо было провести функционально-стоимостной анализ основных элементов электропередачи, найти оптимальные конструктивные решения для ПС и ВЛ и провести сравнительные технико-экономические расчёты. Другими словами, последующие главы посвящены разработке 4-фазной технологии передачи электроэнергии на дальние расстояния и оценке её эффективности.

В разделе 2 дается обоснование конструкции ЧВЛ, представлены телеграфные уравнения ЧВЛ без и с учётом тросов и дано их решение для установившегося режима, предложены схемы транспозиции.

Обоснование конструкции ЧВЛ. Использование конструкций опор с горизонтальным расположением фаз для ЧВЛ характеризуется увеличением волнового сопротивления, большей несимметрией параметров и большей напряжённостью электрического поля под проводами ВЛ по сравнению с традиционными 3-фазными ВЛ с таким же расположением фаз. При горизонтальном расположении фаз также увеличивается полоса отчуждения для ЧВЛ. От этих недостатков можно избавиться, если использовать для ЧВЛ опоры с двухъярусным расположением фаз. Конструкции с горизонтальным и двухъярусным расположением фаз сравнивались по величине натуральной мощности линии, влиянию ЧВЛ на окружающую среду и удельной стоимости линии. По всем этим показателям предпочтительнее использование ЧВЛ с двухъярусным расположением фаз. Схематическое изображение возможных вариантов наиболее массовых промежуточных опор показано на рис. 4.

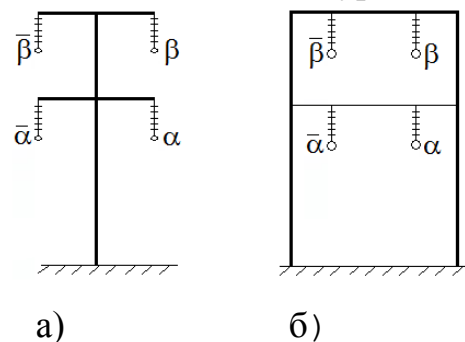


Рис. 4. Промежуточные опоры ЧВЛ

Для краткости по аналогии с 3-фазными линиями под обычной ЧВЛ понимается линия с противофазами, имеющими умеренный радиус расщепления и разделёнными стойкой опоры (рис. 4а). Соответственно ЧВЛ со сближенными противофазами, имеющими увеличенный радиус расщепления, называется компактной (рис. 4б).

Телеграфные уравнения ЧВЛ без учёта тросов и их решение для установившегося режима. В случае анализа гармонических установившихся режимов, в том числе и на промышленной частоте, телеграфные уравнения преобразуются к обыкновенным дифференциальным уравнениям относительно комплексных величин токов и напряжений в зависимости от координаты x . В этом случае для ЧВЛ без учета тросов телеграфные уравнения запишутся

$$-\frac{d\mathbf{U}_\Phi}{dx} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I}_\Phi, \quad -\frac{d\mathbf{I}_\Phi}{dx} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{U}_\Phi \quad (1)$$

где $\mathbf{U}_\Phi = \begin{vmatrix} U_\alpha & U_{\bar{\alpha}} & U_\beta & U_{\bar{\beta}} \end{vmatrix}_T$, $\mathbf{I}_\Phi = \begin{vmatrix} I_\alpha & I_{\bar{\alpha}} & I_\beta & I_{\bar{\beta}} \end{vmatrix}_T$ – вектор-столбцы соответственно комплексных величин напряжений и токов в точке x линии; \mathbf{Z} , \mathbf{Y} – квадратная матрица четвёртого порядка удельных продольных сопротивлений и поперечных проводимостей.

Для линий с несимметричными параметрами при приложении симметричной системы ЭДС в граничных точках линии требуется пофазный анализ режима вдоль линии, поскольку в токах и напряжениях присутствует несимметрия. Решение системы уравнений (1) в фазных координатах оказывается громоздким. Задача существенно облегчается переходом к модальным координатам, что позволяет перейти от взаимосвязанной системы уравнений к уравнениям относительно несвязанных между собой модальных переменных, так называемых мод.

Система уравнений (1) приводится к системе уравнений второго порядка относительно токов или напряжений

$$\frac{d^2\mathbf{U}_\Phi}{dx^2} - \mathbf{ZYU}_\Phi = 0 \quad \text{или} \quad \frac{d^2\mathbf{I}_\Phi}{dx^2} - \mathbf{YZI}_\Phi = 0. \quad (2)$$

Произведение матриц \mathbf{YZ} в силу того, что матрицы \mathbf{Y} и \mathbf{Z} – симметрические, является транспонированной матрицей от \mathbf{ZY} . Из теории матриц следует возможность приведения данных матриц к диагональному виду с помощью преобразующей матрицы

$$\mathbf{S} = \text{eigenvecs}(\mathbf{ZY}), \quad (3)$$

которая определяется в результате нахождения собственных векторов матрицы \mathbf{ZY} . Таким образом, имеем

$$\gamma_{\mathbf{M}}^2 = \mathbf{S}^{-1}\mathbf{ZY}\mathbf{S},$$

где $\gamma_{\mathbf{M}}^2 = \begin{vmatrix} \gamma_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_3^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_4^2 \end{vmatrix}$ – диагональная матрица квадратов модальных

коэффициентов распространения для независимых мод 1,2,3 и 4.

Модальные напряжения и токи соответственно связаны с фазными величинами

$$\mathbf{U}_{\mathbf{M}} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{U}_{\Phi}, \quad \mathbf{I}_{\mathbf{M}} = \mathbf{S}_T \mathbf{I}_{\Phi}, \quad (4)$$

где $\mathbf{U}_{\mathbf{M}} = |U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4|_T$, $\mathbf{I}_{\mathbf{M}} = |I_1 \ I_2 \ I_3 \ I_4|_T$ – вектор-столбцы модальных режимных параметров, \mathbf{S}_T – транспонированная матрица от \mathbf{S} .

В результате для каждой модальной переменной имеет место решение, аналогичное для однопроводной линии. В частности, связь между режимными параметрами в начале и конце линии для каждой моды будет иметь традиционный вид

$$\begin{aligned} U_{\text{HV}} &= U_{\text{KV}} \operatorname{ch} \gamma_{\nu} \ell \\ I_{\text{HV}} &= U_{\text{KV}} \frac{\operatorname{sh} \gamma_{\nu} \ell}{Z_{\nu}} \end{aligned} \quad (5)$$

где $\nu = 1, 2, 3, 4$ – соответствующая независимая мода линии; U_{HV} , U_{KV} , I_{HV} , I_{KV} – режимные величины в начале и конце линии для ν -ой моды; γ_{ν} , Z_{ν} – постоянная распространения и волновое сопротивление для ν -ой моды.

В итоге система уравнений линии, определяющая режим в её конечных точках, относительно модальных величин в матричном виде имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{\text{HM}} &= \mathbf{A}_{\mathbf{M}} \mathbf{U}_{\text{KM}} + \mathbf{B}_{\mathbf{M}} \mathbf{I}_{\text{KM}}, \\ \mathbf{I}_{\text{HM}} &= \mathbf{C}_{\mathbf{M}} \mathbf{U}_{\text{KM}} + \mathbf{D}_{\mathbf{M}} \mathbf{I}_{\text{KM}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Переход от модальных координат к фазным величинам происходит с помощью соотношений (4), в результате чего получим

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{\text{H}\Phi} &= \mathbf{A}_{\Phi} \mathbf{U}_{\text{K}\Phi} + \mathbf{B}_{\Phi} \mathbf{I}_{\text{K}\Phi}, \\ \mathbf{I}_{\text{H}\Phi} &= \mathbf{C}_{\Phi} \mathbf{U}_{\text{K}\Phi} + \mathbf{D}_{\Phi} \mathbf{I}_{\text{K}\Phi}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\mathbf{A}_{\Phi} = \mathbf{S} \mathbf{A}_{\mathbf{M}} \mathbf{S}^{-1}$; $\mathbf{B}_{\Phi} = \mathbf{S} \mathbf{B}_{\mathbf{M}} \mathbf{S}_T$; $\mathbf{C}_{\Phi} = \mathbf{S}_T^{-1} \mathbf{C}_{\mathbf{M}} \mathbf{S}^{-1}$; $\mathbf{D}_{\Phi} = \mathbf{S}_T^{-1} \mathbf{D}_{\mathbf{M}} \mathbf{S}_T$.

Для идеально транспонированной ЧВЛ имеет место

$$\mathbf{Z} = \begin{vmatrix} Z_{\phi} & Z_{\phi\phi} & Z_{\text{яя}} & Z_{\text{яя}} \\ Z_{\phi\phi} & Z_{\phi} & Z_{\text{яя}} & Z_{\text{яя}} \\ Z_{\text{яя}} & Z_{\text{яя}} & Z_{\phi} & Z_{\phi\phi} \\ Z_{\text{яя}} & Z_{\text{яя}} & Z_{\phi\phi} & Z_{\phi} \end{vmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{vmatrix} Y_{\phi} & -Y_{\phi\phi} & -Y_{\text{яя}} & -Y_{\text{яя}} \\ -Y_{\phi\phi} & Y_{\phi} & -Y_{\text{яя}} & -Y_{\text{яя}} \\ -Y_{\text{яя}} & -Y_{\text{яя}} & Y_{\phi} & -Y_{\phi\phi} \\ -Y_{\text{яя}} & -Y_{\text{яя}} & -Y_{\phi\phi} & Y_{\phi} \end{vmatrix},$$

где Z_{ϕ} , $Z_{\phi\phi}$ – соответственно собственное и взаимное продольное сопротивление 2-фазных линий каждого яруса; $Z_{\text{яя}}$ – взаимное сопротивление между фазами ярусов; Y_{ϕ} , $Y_{\phi\phi}$ – соответственно собственная и взаимная поперечная проводимость 2-фазных линий каждого яруса; $Y_{\text{яя}}$ – взаимная проводимость между фазами ярусов.

Для этого случая следует, что $\mathbf{ZY} = \mathbf{YZ}$. Соответственно дифференциальные уравнения (2) для напряжений и токов приобретают идентичный вид. К ЧВЛ, обладающим симметрией параметров, может быть применён метод, аналогичный методу симметричных составляющих для 3-фазных идеально транспонированных линий, позволяющий представить ЧВЛ четырьмя независимыми каналами. Хотя в основе этого метода лежит другое преобразование, нежели для 3-фазных линий, применительно к ЧВЛ он также назван в работе методом симметричных составляющих.

Для ЧВЛ связь между фазными и симметричными составляющими осуществляется с помощью матрицы Фортескую четвёртого порядка

$$\begin{vmatrix} \alpha \\ \bar{\alpha} \\ \beta \\ \bar{\beta} \end{vmatrix} = \mathbf{S}_4 \begin{vmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 0 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 0 \end{vmatrix} = \mathbf{S}_4^{-1} \begin{vmatrix} \alpha \\ \bar{\alpha} \\ \beta \\ \bar{\beta} \end{vmatrix}, \quad (8)$$

где 1, 2, 3, 0 – соответственно первая, вторая, третья и нулевая составляющие, используемые в методе симметричных составляющих применительно к ЧВЛ;

$$\mathbf{S}_4 = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 \\ i & i & -1 & 1 \\ -i & -i & -1 & 1 \end{vmatrix}, \quad \mathbf{S}_4^{-1} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & -1 & -i & i \\ -1 & 1 & -i & i \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad - \text{ матрица преобразования}$$

Фортескую и её обратная матрица.

Для первых двух каналов волновое сопротивление \dot{Z} и постоянная распространения γ являются идентичными и названы по аналогии с 3-фазными линиями параметрами прямой последовательности. Третий канал является межъярусным каналом и его волновое сопротивление \dot{Z} и постоянная распространения $\gamma_{\text{я}}$ названа параметрами межъярусной прямой последовательности. Соответственно четвёртая симметричная составляющая характеризуется параметрами нулевой последовательности \dot{Z} и γ_0 .

Переход от симметричных составляющих к фазным величинам происходит с помощью соотношений (8). В результате при использовании соотношения (7) следует иметь в виду, что

$$\mathbf{A}_\phi = \mathbf{S}_4 \mathbf{A}_M \mathbf{S}_4^{-1}; \quad \mathbf{B}_\phi = \mathbf{S}_4 \mathbf{B}_M \mathbf{S}_4^{-1}; \quad \mathbf{C}_\phi = \mathbf{S}_4 \mathbf{C}_M \mathbf{S}_4^{-1}; \quad \mathbf{D}_\phi = \mathbf{S}_4 \mathbf{D}_M \mathbf{S}_4^{-1}. \quad (9)$$

В развернутом виде системы (7, 9) соответственно запишутся

$$\begin{pmatrix} U_{H\alpha} \\ U_{H\bar{\alpha}} \\ U_{H\beta} \\ U_{H\bar{\beta}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_\phi & A_{\phi\phi} & A_{\text{яя}} & A_{\text{яя}} \\ A_{\phi\phi} & A_\phi & A_{\text{яя}} & A_{\text{яя}} \\ A_{\text{яя}} & A_{\text{яя}} & A_\phi & A_{\phi\phi} \\ A_{\text{яя}} & A_{\text{яя}} & A_{\phi\phi} & A_\phi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{K\alpha} \\ U_{K\bar{\alpha}} \\ U_{K\beta} \\ U_{K\bar{\beta}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_\phi & B_{\phi\phi} & B_{\text{яя}} & B_{\text{яя}} \\ B_{\phi\phi} & B_\phi & B_{\text{яя}} & B_{\text{яя}} \\ B_{\text{яя}} & B_{\text{яя}} & B_\phi & B_{\phi\phi} \\ B_{\text{яя}} & B_{\text{яя}} & B_{\phi\phi} & B_\phi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{K\alpha} \\ I_{K\bar{\alpha}} \\ I_{K\beta} \\ I_{K\bar{\beta}} \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} I_{H\alpha} \\ I_{H\bar{\alpha}} \\ I_{H\beta} \\ I_{H\bar{\beta}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_\phi & C_{\phi\phi} & C_{\text{яя}} & C_{\text{яя}} \\ C_{\phi\phi} & C_\phi & C_{\text{яя}} & C_{\text{яя}} \\ C_{\text{яя}} & C_{\text{яя}} & C_\phi & C_{\phi\phi} \\ C_{\text{яя}} & C_{\text{яя}} & C_{\phi\phi} & C_\phi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{K\alpha} \\ U_{K\bar{\alpha}} \\ U_{K\beta} \\ U_{K\bar{\beta}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D_\phi & D_{\phi\phi} & D_{\text{яя}} & D_{\text{яя}} \\ D_{\phi\phi} & D_\phi & D_{\text{яя}} & D_{\text{яя}} \\ D_{\text{яя}} & D_{\text{яя}} & D_\phi & D_{\phi\phi} \\ D_{\text{яя}} & D_{\text{яя}} & D_{\phi\phi} & D_\phi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{K\alpha} \\ I_{K\bar{\alpha}} \\ I_{K\beta} \\ I_{K\bar{\beta}} \end{pmatrix},$$

где

$$A_\phi = \frac{\text{ch}\gamma_0 l}{4} \begin{matrix} l & l & l & l \\ \text{---}\psi\psi & & & \text{---}\text{яя} \end{matrix};$$

$$B_\phi = \frac{Z_{w0} \text{sh}\gamma_0 l}{4} \begin{matrix} l & l & l & l \\ \text{---}\psi\psi & & & \end{matrix};$$

$$B_{\text{яя}} = \frac{Z_{w0} \text{sh}\gamma_0 l}{4} \begin{matrix} l & l & l & l \\ & & & \end{matrix};$$

$$C_\phi = \frac{\text{sh}\gamma_0 l}{Z_{w0}} \begin{matrix} l & l & l & l \\ \text{---} Z_w & \text{---} Z_{\text{вя}} & \text{---} Z_w & \end{matrix}, \quad C_{\phi\phi} = \frac{Z_{w0}}{4} \begin{matrix} l & l & l & l \\ \text{---} Z_w & \text{---} Z_w & \text{---} Z_w & \end{matrix}, \quad C_{\text{яя}} = \frac{Z_{w0}}{4} \begin{matrix} l & l & l & l \\ & & & \end{matrix};$$

$$D_\phi = A_\phi, \quad D_{\phi\phi} = A_{\phi\phi}, \quad D_{\text{яя}} = A_{\text{яя}}.$$

Решение телеграфных уравнений ЧВЛ с учётом тросов. При самом общем подходе, когда исследуется режим не только в рабочих фазах, но и в тросах (рис. 5), задача решается путём перехода к модальным координатам, как это было сделано выше для ЧВЛ без тросов. Отличие будет состоять лишь в том, что в данном случае придётся оперировать с векторами и матрицами 6-го порядка, а получение самого решения будет включать те же последовательные этапы.

На практике, как правило, имеют место случаи, когда тросы заземлены или односторонне разземлены. В случае заземлённых тросов, когда имеет место $U_{T1} = U_{T2} \approx 0$, проведённый анализ показал, что для идеально транспонированной линии параметры

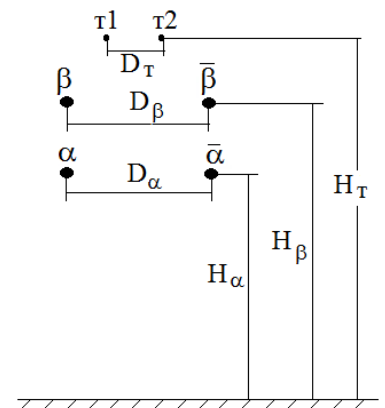


Рис.5. Расположение фаз и тросов ЧВЛ

каналов по прямой последовательности остаются такими же, как для ВЛ без учёта тросов. Что же касается канала по нулевой последовательности, то при заземлённых тросах продольное сопротивление и поперечная проводимости по нулевой последовательности находятся с учётом поправок, выражения для которых приводятся в диссертации.

В случае односторонне разземлённых тросов, когда имеет место $I_{T1} = I_{T2} \approx 0$, тросы не оказывают влияние на параметры транспонированной ЧВЛ как по прямой, так и нулевой последовательности. В нормальных режимах тросы, как правило, односторонне разземлены, и поэтому для расчёта режимов в таких схемах использование модели ЧВЛ без учёта тросов правомочно. В частности, для исследования несимметрии, имеющей место в нетранспонированных или транспонированных ЧВЛ, в работе используется именно такая модель без учёта тросов. Для анализа несимметричных режимов, в которых за счёт срабатывания искровых промежутков тросы заземляются, следует учитывать поправку на параметры линии по нулевой последовательности.

Выбор схемы транспозиции для ЧВЛ. Несимметрия, обусловленная физическим различием пофазных параметров линии, носит постоянный характер и при определенных условиях может оказаться недопустимой или нежелательной по условиям нормальной работы системы. Для ограничения несимметрии такого рода обычно применяется транспозиция как простой, надежный и одновременно эффективный способ. Транспозиция фазных проводов симметрирует результирующее продольное и поперечное сопротивление линии в целом.

Для случая нетранспонированной ЧВЛ зависимость коэффициента несимметрии для напряжения на подстанции по обратной последовательности от длины линии показана на рис.6. Линии компактного типа характеризуются меньшей несимметрией.

Как следует из рис. 6, при длинах свыше 100 км удовлетворить требованиям по коэффициентам несимметрии в нетранспонированных линиях любого типа не представляется возможным. Что касается несимметрии напряжения по нулевой последовательности, то в ЧВЛ её нет, поскольку токи и напряжения нулевой последовательности, инициируемые системами α, β и $\bar{\alpha}, \bar{\beta}$, взаимно компенсируются.

При выборе схемы транспозиции 4-фазной линии следует иметь в виду, что определяющее влияние на снижение

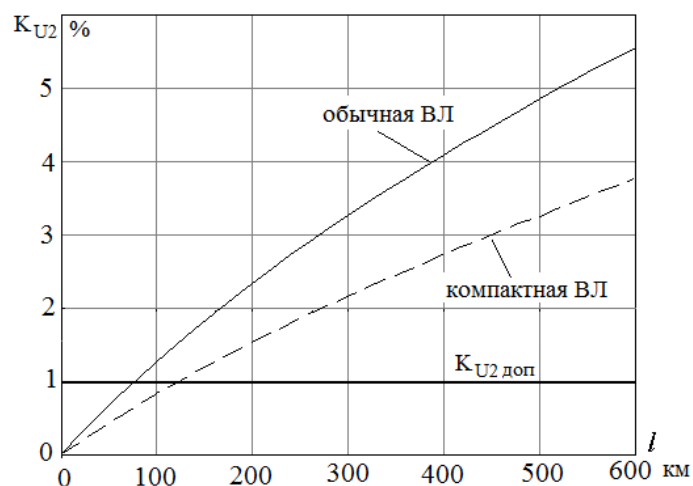


Рис.6. Коэффициенты несимметрии

уровня несимметрии оказывает изменение расположения фаз в нижнем или верхнем ярусе. Исходя из практических соображений, предпочтительнее транспонирование фаз осуществлять в нижнем ярусе. На рис. 7 приведены схемы транспозиции ЧВЛ с одним и двумя циклами транспозиции.

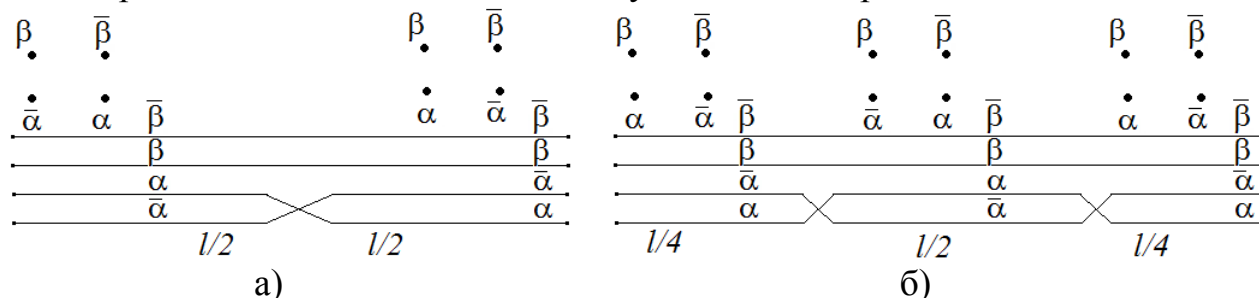


Рис.7. Схемы транспозиции ЧВЛ: а–однократный цикл; б–двухкратный цикл

Проблема снижения несимметрии коренным образом решается при использовании 2-кратного цикла транспозиции. В этом случае коэффициенты несимметрии для линий длиной в пределах 600 км не превышают 0,5%, и рекомендуемые нормы по несимметрии для ЧВЛ как обычного типа, так и компактного типа удовлетворятся с большим запасом.

В разделе 3 рассмотрены варианты выполнения ФПТ, обоснована его схема для работы в 3-фазном режиме, представлены уравнения ФПТ при работе в 4-фазном и 3-фазном режимах, а также разработаны технические требования на создание ФПТ сверхвысокого напряжения.

Преобразование 3-фазного переменного тока в 4-фазный и обратно является принципиально решённой задачей, если иметь в виду известные схемы преобразования 3-фазного переменного тока (a, b, c) в 2-фазный (α, β) со сдвигом фаз под 90° (рис. 8). Такие 2-фазные системы находят применение для питания железных дорог и двухфазных электротехнологических установок.

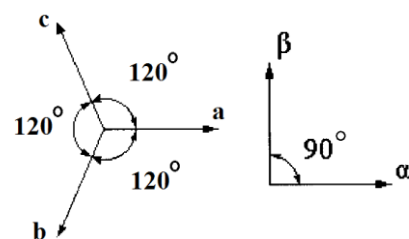


Рис.8. Трёх- и двухфазные системы

Система 4-фазного переменного тока получается из 3-фазной с помощью двух трансформаторов. Первый трансформатор, который обозначен как $T_{\alpha\beta}$, преобразует 3-фазную систему (a, b, c) в 2-фазную систему (α, β) с фазовым сдвигом 90° , а второй трансформатор, краткое обозначение которого принято $T_{\bar{\alpha}\bar{\beta}}$, превращает 3-фазную систему в 2-фазную $(\bar{\alpha}, \bar{\beta})$ с противоположным направлением составляющих относительно первой 2-фазной системы, так что в совокупности образуется 4-фазная симметричная уравновешенная система переменного тока $(\alpha, \beta, \bar{\alpha}, \bar{\beta})$ (рис. 2).

При выборе схемы ФПТ были рассмотрены трансформаторы по схемам Скотта, Леблана и СибНИИЭ. Поскольку фазопреобразующий трансформатор по схеме Скотта имеет более простую конструкцию по сравнению с трансформаторами по схемам Леблана и СибНИИЭ (два магнитопровода

вместо трёх и четыре обмотки вместо восьми), то выбор был сделан в пользу фазопреобразующих трансформаторов по схеме Скотта.

Уравнения ФПТ при работе в 4-фазном режиме. На рис. 9 показана принципиальная схема ФПТ на базе трансформаторов Скотта для преобразования 3-фазного переменного тока в 4-фазный. Для этой цели используются два трансформатора Скотта, работающие в противофазе.

Один трансформатор Скотта $T_{\alpha\beta}$ состоит из трансформаторов T_α и T_β , которые обеспечивают преобразование трёхфазного переменного тока в 2-фазный α, β . Соответственно второй трансформатор Скотта $T_{\bar{\alpha}\bar{\beta}}$ включает в свой состав трансформаторы $T_{\bar{\alpha}}$ и $T_{\bar{\beta}}$, которые обеспечивают преобразование 3-фазного переменного тока в 2-фазный $\bar{\alpha}, \bar{\beta}$. В результате оба трансформатора преобразуют 3-фазный переменный ток a, b, c в 4-фазный $\alpha, \bar{\alpha}, \beta, \bar{\beta}$.

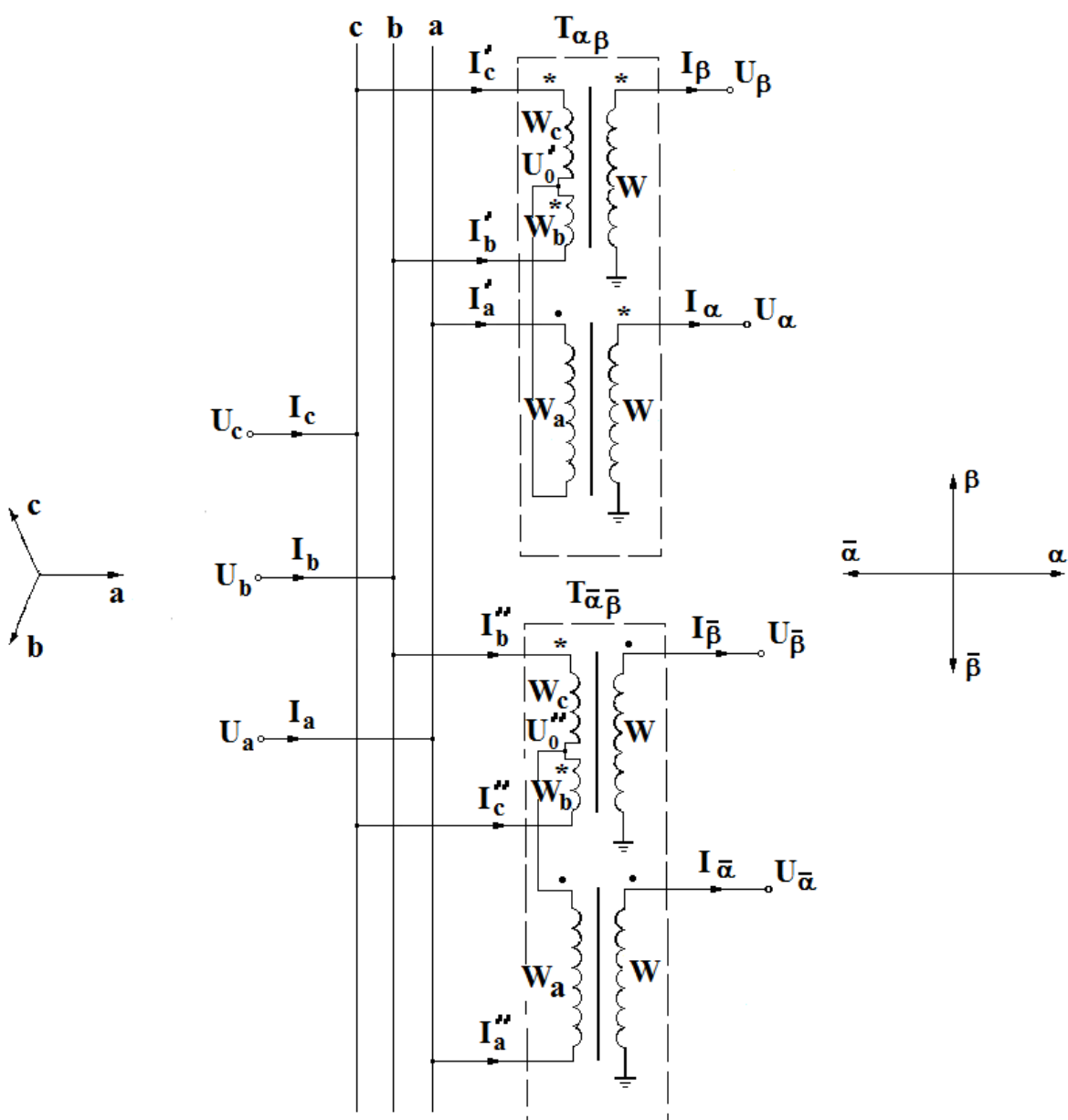


Рис.9. Принципиальная схема ФПТ на базе трансформаторов Скотта.

Уравнения ФПТ вытекают из условий равновесия электродвижущих и магнитодвижущих сил, а также условий симметрии токов и напряжений. При описании процессов в реальных трансформаторах во многих случаях токами намагничивания можно пренебречь и получить достаточно точные упрощённые уравнения трансформаторов на отправном и приёмном концах

$$\begin{aligned} U_3 &= \frac{1}{k_T} S_{u34} U_4 + \frac{Z_T}{k_T} S_{u34} I_4, & I_3 &= k_T S_{i34} I_4; \\ U_4 &= k_T S_{u43} U_3 + \frac{Z_T}{k_T} S_{i43} I_3, & I_4 &= \frac{1}{k_T} S_{i43} I_3, \end{aligned} \quad (10)$$

где $U_3 = |U_a \ U_b \ U_c|_T$, $I_3 = |I_a \ I_b \ I_c|_T$ – вектор-столбцы 3-фазных напряжений и токов; $U_4 = |U_\alpha \ U_{\bar{\alpha}} \ U_\beta \ U_{\bar{\beta}}|_T$, $I_4 = |I_\alpha \ I_{\bar{\alpha}} \ I_\beta \ I_{\bar{\beta}}|_T$ – вектор-столбцы 4-фазных напряжений и токов, $k_T = U_\alpha / U_a$ – коэффициент трансформации; Z_T – сопротивление трансформатора Скотта, приведённое к 4-фазной стороне.

Преобразующие матрицы системы 4-фазных напряжений и токов в 3-фазную систему и обратно соответственно имеют вид

$$S_{u34} = \frac{1}{4} S_{34}, \quad S_{i34} = \frac{1}{3} S_{34}, \quad S_{34} = \begin{vmatrix} 2 & -2 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & -\sqrt{3} & \sqrt{3} \\ -1 & 1 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{vmatrix}; \quad (11)$$

$$S_{u43} = S_{43}, \quad S_{i43} = \frac{3}{4} S_{43}, \quad S_{43} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Схемы замещения ФПТ на отправном и приёмном конце ЧЭП показаны на рис. 10.

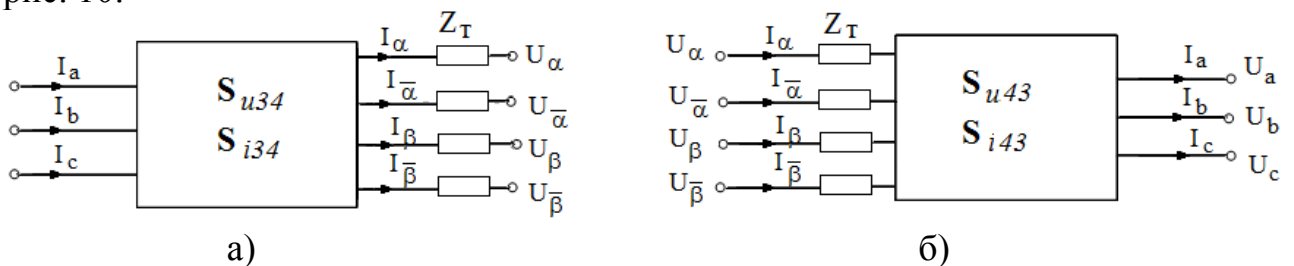


Рис.10. Схемы замещения ФПТ: а – на отправном конце; б – на приёмном конце

Обоснование схемы ФПТ для работы в 3-фазном режиме. В случае возникновения наиболее вероятных однофазных повреждений ЧВЛ

осуществляется переход на работу в 3-фазном режиме. Для этого необходимо обеспечить возможность работы ФПТ как в 4-фазном, так и в 3-фазном режимах. Передаваемую мощность в послеаварийном режиме можно довести до (75 – 100) % пропускной способности ЧЭП.

На рис. 11 показана схема ФПТ для работы в 3-фазном режиме. Предлагаемое устройство содержит два основных ФПТ 1 по схеме Скотта для получения 4-фазной системы, дополнительный трансформатор Скотта 2 подсоединяемый выключателями 3, 4, 5, 6 к нейтралю основных трансформаторов 1, линейные выключатели 7 для подключения к ЧВЛ и заземляющие выключатели 8, 9, 10, 11 и 12, 13. На трансформаторах 1 и трансформаторе 2 предусматриваются устройства регулирования напряжения под нагрузкой 14, 15, 16, 17.

Нормальным режимом работы считается режим преобразования 3-фазной системы в 4-фазную. В этом режиме все выключатели 3, 4, 5, 6 и 8, 9, 10, 11 отключены, а выключатели 12 и 13 включены, обеспечивая заземление нейтралей ФПТ 1.

В случае возникновения повреждения на одной из фаз ЧВЛ, например, на фазе $\bar{\alpha}$, происходит её отключение соответствующим линейным выключателем 7, и на здоровых фазах линии имеет место 3-фазная несимметричная система напряжений $\alpha, \beta, \bar{\beta}$ (рис. 12а). После отключения аварийной фазы напряжение обратной составляет 27%, а напряжение нулевой последовательности 37% по отношению к напряжению прямой последовательности, что допустимо лишь кратковременно в течение нескольких секунд.

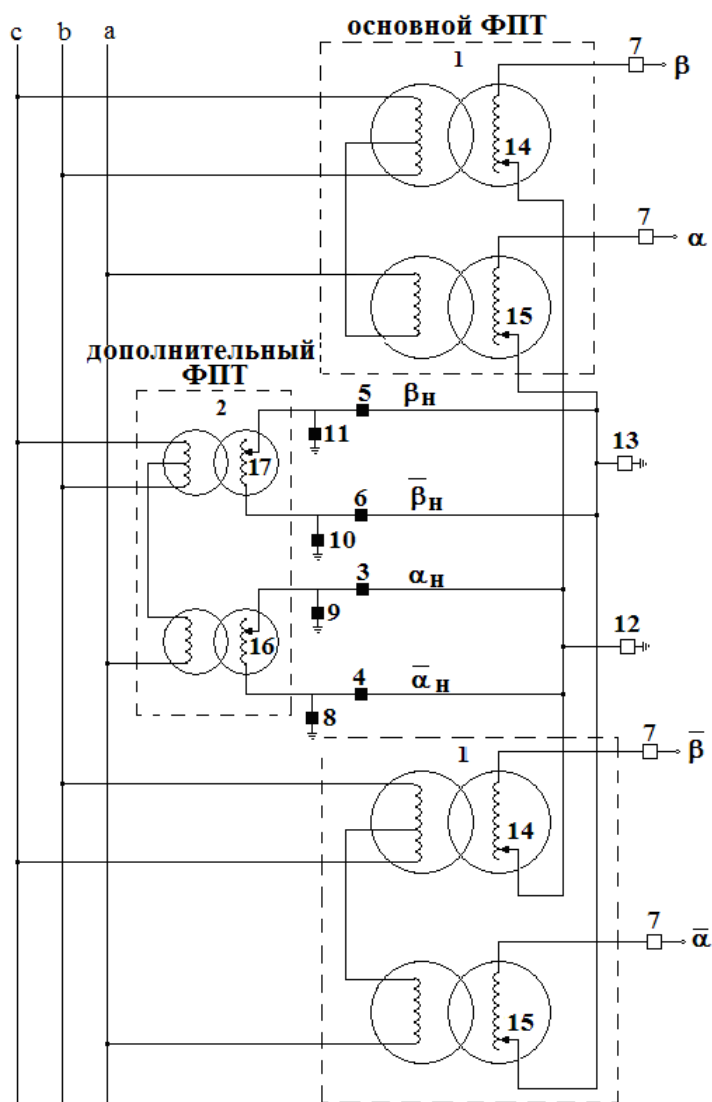


Рис. 11. Принципиальная схема ФПТ для работы в 3-фазном режиме

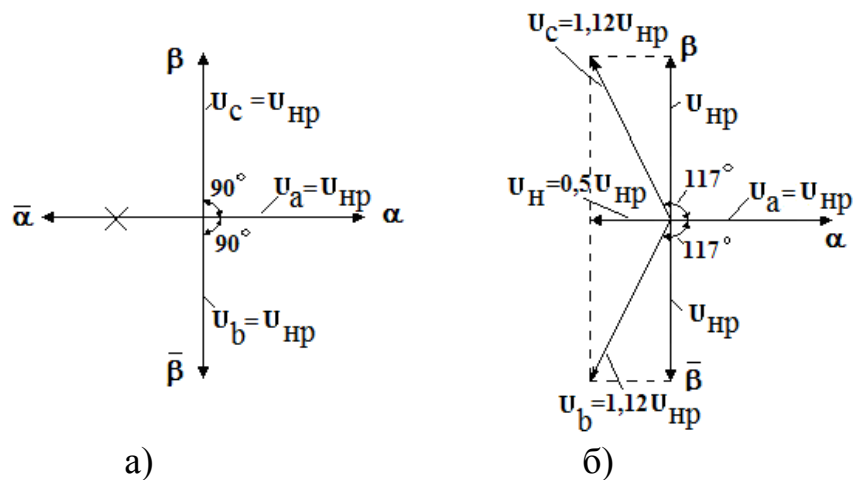


Рис.12. Векторная диаграмма напряжений на здоровых фазах линии:
 а – отключена аварийная фаза $\bar{\alpha}$; б – введён в работу дополнительный трансформатор

Далее вводится в работу дополнительный трансформатор 2, преобразованное фазное напряжение которого составляет (50–55)% от напряжения основных трансформаторов 1. В зависимости от аварийной фазы коммутируются соответствующие выключатели. Так, в случае аварийной фазы $\bar{\alpha}$ в первую очередь отключается заземляющий выключатель 12, а затем включаются выключатели 4 и 9. В результате в нейтраль вводится соответствующая дополнительная ЭДС, и векторная диаграмма напряжений на здоровых фазах линии приобретает вид, показанный на рис.12б. При этом резко снижается уровень несимметрии, составляя для обратной последовательности около 7% и отсутствуя практически для нулевой последовательности (0,3%).

Такой уровень несимметрии допустим в течение нескольких минут, что позволяет за это время устранить его полностью за счет устройств регулирования напряжения под нагрузкой 14, 16. При этом на линии можно установить любое напряжение в диапазоне $U_{н.р} \div 1,1 U_{н.р}$, где $1,1 U_{н.р}$ – максимальное допустимое напряжение в 20-минутном послеаварийном режиме.

Технические требования на создание ФПТ сверхвысокого напряжения. При определении требований к основному параметру ФПТ, каковым является его номинальная мощность, было принято условие, согласно которому ЧЭП по передаваемой мощности должна замещать традиционную двухцепную 3-фазную ЭП. В качестве максимальной пропускной способности этих электропередач была принята натуральная мощность двухцепной 3-фазной линии, которая для линий напряжением $500/\sqrt{3}$ кВ составляет около 2000 МВт, а для линий напряжением $750/\sqrt{3}$ кВ – 5000 МВт.

В таблице приведены рекомендуемые номинальные мощности трансформаторов Скотта и соответствующих однофазных трансформаторов, входящих в его состав.

Технические параметры ФПТ сверхвысокого напряжения

Номинальное напряжение, кВ		Номинальная мощность, МВА	
Обмотка ВН (4-фазная сторона)	Обмотка СН (3-фазная сторона)	одной фазы	трансформатора Скотта
$500/\sqrt{3}$	$220/\sqrt{3}$	250, 400	500, 800
$750/\sqrt{3}$	$220/\sqrt{3}$	400, 625	800, 1250
$750/\sqrt{3}$	$500/\sqrt{3}$	400, 625	800, 1250

В работе предложены схемы подстанций для ЧЭП и разработаны технические требования на ФПТ напряжением $500/\sqrt{3}$ и $750/\sqrt{3}$ кВ.

В разделе 4 даётся схемно-режимная характеристика ЧЭП, предлагаются их расчётные схемы при анализе нормальных режимов и методы расчёта аварийных режимов, проведён анализ повышений напряжения при односторонних коммутациях ЧВЛ. В этом разделе также рассмотрены неполнофазные режимы работы и режимы плановых ремонтов ЧВЛ.

ЧЭП при анализе нормальных режимов может быть замещена однолинейной схемой, состоящей из каскадно соединённых элементов. Сопротивления продольных сосредоточенных элементов представляют уменьшенные в $3/4$ раза, а проводимости поперечных сосредоточенных элементов увеличенные в $4/3$ раза соответствующие величины на 4-фазной стороне. Четырёхфазная линия характеризуется постоянной распространения и уменьшенным в $3/4$ раза волновым сопротивлением по прямой последовательности,

Методика расчёта несимметричных режимов в фазных координатах.

Для анализа несимметричных режимов в ЧЭП примыкающие 3-фазные системы, представленные входными сопротивлениями и эквивалентными 3-фазными ЭДС, преобразуются в 4-фазные с помощью матриц (11,12), что позволяет перейти к расчётной схеме, показанной на рис 13.

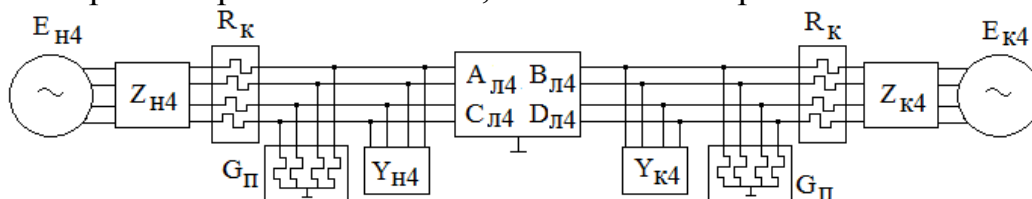


Рис.13. Расчётная схема ЧЭП для анализа несимметричных режимов

Для расчёта различных несимметричных режимов вводятся понятия матриц коммутации и повреждений

$$\mathbf{R}_K = \begin{vmatrix} R_\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{\bar{\alpha}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{\bar{\beta}} \end{vmatrix}, \quad \mathbf{G}_\Pi = \begin{vmatrix} G_\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_{\bar{\alpha}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{\bar{\beta}} \end{vmatrix}.$$

Матрица коммутаций используется для моделирования различных положений выключателей в фазах. Если $R_v = 0$, то это соответствует включенному состоянию фазы «v». А при $R_v \rightarrow \infty$ будет моделироваться отключенное состояние. При этом достаточно принять $R_v = 10^6 \text{ Ом}$. Матрица повреждений используется для моделирования различных КЗ. Если $G_v = 0$, то это соответствует нормальному состоянию фазы «v». При $G_v \rightarrow \infty$ будет моделироваться глухое КЗ фазы «v». В реальных условиях достаточно принять $G_v \approx 1 \div 10 \text{ См}$.

При анализе несимметричных режимов в ЧЭП сначала определяется эквивалентная матрица всей схемы, которая связывает напряжения и токи по концам ЧЭП. Далее при заданных ЭДС определяется ток в конце электропередачи. После чего находятся режимные параметры в любой произвольной точке ЧЭП. Для ЧЭП, элементы которой обладают симметрией параметров, предложен метод симметричных составляющих для расчёта несимметричных режимов.

Анализ повышений напряжения при односторонних коммутациях ЧВЛ. В линиях сверхвысокого напряжения из-за их большой зарядной мощности могут возникать повышения напряжения промышленной частоты при одностороннем подключении линии к источнику. Такое включение линии может возникать при плановом включении линии для синхронизации, ошибочном или аварийном отключении и АПВ. При этом представляет интерес провести сопоставление с 3-фазными линиями. Проведённый анализ повышений напряжения при односторонних коммутациях ЧВЛ показал, что при одинаковых расчётных условиях повышения напряжения в режиме холостого хода для 4-фазной и 3-фазной линий идентичны. В несимметричных режимах в более благоприятных условиях находится ЧВЛ, для которой коэффициенты несимметрии на (5 ÷ 15) % меньше, чем для 3-фазной линии.

Неполнофазные режимы при традиционной поперечной компенсации ЧВЛ. При неполнофазных включениях и отключениях с подключенными к ЧВЛ традиционными шунтирующими реакторами возможно в случае отказов или больших разбросов в коммутации фаз выключателей появление резонансных перенапряжений на неподключенных фазах (подобно тому, как это имеет место в 3-фазных линиях). В работе исследованы резонансные перенапряжения при неполнофазных включениях и отключениях ЧВЛ. Выявлено, что при числе шунтирующих реакторов, требуемых по условию частичной или полной компенсации зарядной мощности линии, возможно, как правило, появление резонансных перенапряжений. Данное обстоятельство вносит нежелательное ограничение на число подключаемых шунтирующих реакторов к ЧВЛ, особенно при аварийных коммутациях, когда с точки зрения ограничения перенапряжений или осуществления ОАПВ требуется определенное число подключенных к линии шунтирующих реакторов, которое неприемлемо по условию возникновения резонансных перенапряжений в неполнофазных режимах.

Неполнофазные режимы при комбинированной поперечной компенсации ЧВЛ. Выявленный недостаток традиционной схемы поперечной компенсации возможно исключить за счёт комбинированной поперечной компенсации, суть которой состоит в использовании незаземлённых шунтирующих реакторов, подключаемых по концам линии по схеме звезды с незаземлённой нейтралью (рис. 14).

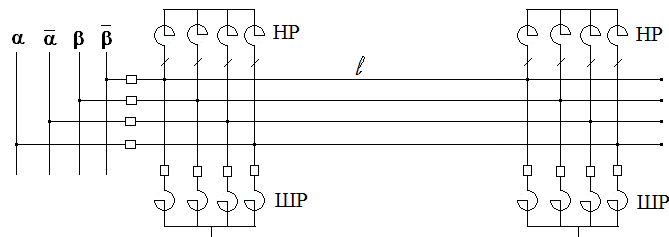


Рис.14. Комбинированная поперечная компенсация ЧВЛ

Проводимость незаземлённого реактора и соответственно его мощность в общем случае составляют порядка (20–30)% от соответствующих параметров шунтирующего реактора. Оснащение ЧВЛ незаземлёнными реакторами позволяет создать безрезонансные зоны при любом числе подключенных к линии традиционных шунтирующих реакторов.

Режимы плановых ремонтов ЧВЛ проводятся пофазно путем перехода на 3-фазный режим работы. Это обеспечивает высокую безопасность работ, так как ремонты выполняются при отсутствии напряжения на ремонтируемой фазе. Как это было показано в разделе 3, ФПТ позволяют путем соответствующих переключений переходить на 3-фазный режим работы.

В разделе 2 была обоснована схема транспозиции ЧВЛ, при которой несимметрия не превышает допустимый уровень. При работе ЧВЛ в 3-фазных режимах возникающая несимметрия также должна находиться в допустимых пределах. В противном случае потребуется изменение схемы транспозиции, обоснованной при работе ЧВЛ в 4-фазных режимах. Расчёты показали, что в случае перевода ЧВЛ на 3-фазный режим при проведении её пофазных ремонтов транспозиция линии, выбранная по условию работы в нормальных 4-фазных режимах, обеспечивает приемлемый уровень несимметрии.

В разделе 5 рассматриваются вопросы надёжности ЧЭП, пути её повышения и способы оценки.

Дальние ЭП сверхвысокого напряжения формируют основную электрическую сеть. Обеспечивая передачу больших потоков мощности на значительные расстояния, дальние ЭП из-за их аварийных отказов могут оказывать заметное влияние на надёжность работы энергообъединения. Поэтому при рассмотрении таких ЭП помимо обеспечения их экономической эффективности должна быть решена и проблема надёжности. Для ЧЭП на основе показателей аварийности и средней продолжительности аварийных простоев при отдельных видах отказов определён коэффициент надёжности одноцепной ЧЭП, который составляет $K_H = 0,996$ и значительно превосходит коэффициент надёжности одноцепной 3-фазной ЭП традиционного типа.

Оценка уровня режимной надёжности. Под режимной надёжностью понимается способность противостоять внезапным изменениям режима. В мировой и отечественной практике для оценки режимной надёжности основной электрической сети широко используется детерминистский критерий (N-1), который применительно к решаемой задаче имеет два недостатка. Первый

недостаток состоит в том, что этот критерий не дает вероятностной оценки режимной надёжности при аварийной потере элементов сети. А это особенно важно при рассмотрении мощных ЭП переменного и постоянного тока, когда полностью удовлетворить критерию (N-1) при аварийном выходе из строя таких ЭП не удастся по экономическим соображениям. Вторым недостатком критерия (N-1) состоит в том, что он исключает из рассмотрения цепочечные аварии. В работе предлагается вероятностный метод оценки режимной надёжности, лишённый этих недостатков.

Предварительно вводятся понятия безопасной, опасной и экстремальной аварийной ситуаций. К безопасным аварийным случаям относятся такие, которые могут быть устранены средствами релейной защиты и линейной автоматики без каких-либо последствий для работы энергообъединения, т.е. в этих ситуациях выполняется критерий (N-1). Это означает, что при безопасных авариях дефицит мощности в энергосистеме не возникает. Опасными аварийными ситуациями считаются такие, при которых в энергосистеме возникает дефицит мощности, величина которого зависит от конкретной аварии. В результате анализа выявляются все опасные аварийные ситуации, и соответственно авария, при которой возникает максимальный дефицит, считается экстремальной для рассматриваемой ЭП. Таким образом, существует спектр опасных аварий, приводящих к дефициту мощности в энергосистеме, находящемуся в диапазоне $W_{\text{деф}} = 0 \div W_{\text{д.макс}}$, где $W_{\text{д.макс}}$ – максимальный дефицит мощности в энергосистеме, возникающий при экстремальной аварийной ситуации.

В работе введено понятие условного индекса режимной надёжности (УИРН). Вероятностный критерий для оценки режимной надёжности ЭП, учитывающий статистику опасных повреждений и вероятностную природу нарушений электроснабжения в зависимости от величины возникающего дефицита мощности, имеет вид

$$\text{УИРН} = \lambda_{\text{ЭА}} + \sum_{i=1} \lambda_{\text{ОА},i} \cdot K_{\text{ОА}}(W_{\text{д},i}^*) \rightarrow \min, \quad (13)$$

где $\lambda_{\text{ЭА}}$ – число экстремальных аварий; $\lambda_{\text{ОА},i}$ – число опасных аварийных ситуаций i -го типа; $W_{\text{д},i}^* = W_{\text{д},i} / W_{\text{д.макс}}$ – дефицит мощности, выраженный в относительных единицах по отношению к максимальному дефициту при экстремальной аварии; $K_{\text{ОА}}(W_{\text{д},i}^*)$ – весовой вероятностный коэффициент, зависящий от величины возникающего дефицита на интервале $W_{\text{д},j}^* = 0 \div 1$ по усечённому нормальному закону.

Условный индекс режимной надёжности представляет среднее число возникновения нарушений электроснабжения в энергообъединении на расчётном интервале при условии, что каждая экстремальная авария инициирует крупное нарушение. Риск появления такого нарушения при других авариях снижается согласно вероятностному весовому

коэффициенту $K_{OA}(W_{д,i}^*)$ в зависимости от относительного дефицита мощности в энергосистеме, возникающему при этих авариях. Сопоставление условных индексов режимной надёжности позволяет провести сравнительный анализ режимной надёжности различных вариантов согласно критерию (13).

Оценка уровня балансовой надёжности. Балансовая надёжность трактуется, как способность осуществлять бесперебойное снабжение потребителей, что может быть обеспечено при соответствующем резервировании генерирующих мощностей. Для схемы (рис. 15), состоящей из генерирующей станции, передающей системы и централизованной энергосистемы, получено аналитическое выражение для определения недоотпущенной электроэнергии с учётом аварийности ЭП, которое позволяет сравнительно просто оценить приведенные затраты на обеспечение заданной надёжности энергосистемы с учётом и без учёта аварийности ЭП.

А это даёт возможность провести сравнительную стоимостную оценку различных типов ЭП, сопоставляя дополнительные затраты, которые будет нести энергосистема из-за вынужденных отказов электропередач, обладающих разными показателями аварийности.



Рис.15. Расчётная схема для оценки балансовой надёжности

Способы ликвидации повреждений на ЧВЛ. В дальних ЭП поток отказов практически полностью определяется авариями на линии в связи с большой её длиной. При этом в линиях напряжением 500–1150 кВ подавляющая доля отключений вызывается однофазными короткими замыканиями. С точки зрения возмущающих воздействий на примыкающие системы существенное значение имеет способ ликвидации коротких замыканий в линии. Возникающие на линии неустойчивые однофазные короткие замыкания сопровождаются минимальными возмущениями на примыкающие системы, если они могут ликвидироваться в цикле однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ). Осуществление ОАПВ в ЭП переменного тока затрудняется наличием подпитки места короткого замыкания со стороны неотключенных фаз. Главными характеристиками, определяющими условия гашения вторичной дуги, являются ток подпитки, протекающий в дуге до её гашения и восстанавливающееся напряжение (ВН) в месте КЗ после погасания вторичной дуги.

При проведении анализа целесообразно выделить две составляющие для ВН и токов дуги подпитки, а именно электростатическую и электромагнитную. Электростатическая составляющая определяется подпиткой со стороны здоровых фаз через междуфазные ёмкости, а электромагнитная составляющая зависит от ЭДС взаимоиндукции, наведенной в аварийной фазе токами здоровых фаз. По имеющимся данным среднее время горения дуги подпитки в основном зависит от величины установившегося тока дуги подпитки. Длительность паузы

ОАПВ обеспечивается порядка (0,5–1,5) с, если токи дуги подпитки не превышают (20–50)А (действующее значение). Как показали расчёты, токи дуги подпитки в ЧВЛ напряжением $750/\sqrt{3}$ кВ при длинах свыше 200 км превышают 100 А, и поэтому необходимо использование специальных мер, для того чтобы обеспечить гашение дуги подпитки.

ОАПВ при традиционной поперечной компенсации. Обычный шунтирующий реактор (ШР) с глухо заземленной нейтралью (рис. 16а) обеспечивает лишь компенсацию ёмкости на землю, снижая, таким образом, электромагнитную составляющую тока дуги подпитки. Компенсация междуфазных ёмкостей в ЧВЛ может быть осуществлена (рис. 16б) путём включения в нейтраль компенсационного реактора (КР) подобно тому, как это осуществляется в 3-фазных линиях. Анализ показал, что для обеспечения максимального снижения тока дуги подпитки сопротивление компенсационного реактора ЧВЛ обычной конструкции может быть принято порядка 400 Ом. Однако следует заметить, что для 3-фазных ЭП напряжением 500 и 750 кВ (оборудование которых предполагается использовать и для ЧЭП) выпускается унифицированный КР, который имеет индуктивное сопротивление в диапазоне 120–180 Ом, регулируемое ступенями. Если ориентироваться на установку таких КР с сопротивлением 180 Ом, то эффективность компенсации токов дуги подпитки снижается, но остаётся достаточной, чтобы обеспечить длительность паузы ОАПВ не более 1 сек.

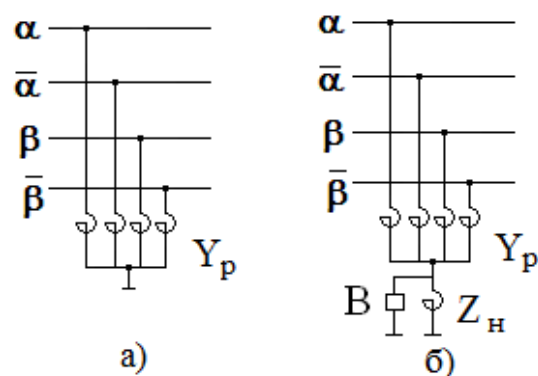


Рис.16. Схемы ШР: а – ШР; б – ШР с КР

Требуемые параметры КР для гашения дуги подпитки в ЧВЛ компактной конструкции меняются существенным образом. Учитывая использование КР для разных длин линий, его сопротивление должно составлять порядка 1800 Ом. Применение выпускаемых компенсационных реакторов с сопротивлением 180 Ом исключает возможность гашения дуги в паузу ОАПВ в ЧВЛ компактной конструкции. Таким образом, для осуществления успешного ОАПВ в ЧВЛ компактного типа длительностью не более 1,5 с требуется разработка КР, имеющих сопротивление порядка 1800 Ом.

Традиционной поперечной компенсации присущ и другой недостаток, связанный с необходимостью коммутации реакторных выключателей для введения в работу всех шунтирующих реакторов в паузу ОАПВ. Это делается для обеспечения условий гашения дуги подпитки, поскольку в нормальных режимах при передаче значительных мощностей шунтирующие реакторы, как правило, отключены от ЧВЛ реакторными выключателями по условиям режима напряжений. Поэтому использование комбинированной поперечной

компенсации оказывается целесообразным и с точки зрения повышения эффективности применения ОАПВ.

ОАПВ при комбинированной поперечной компенсации. При комбинированной поперечной компенсации, суть которой состоит в использовании незаземлённых шунтирующих реакторов, подключаемых по концам линии, необходимость в использовании компенсационных реакторов отпадает. Для снижения потребности в незаземлённых реакторах в ЧВЛ компактного исполнения предложена двухсекционная схема присоединения незаземлённых реакторов к ЧВЛ (рис. 17).

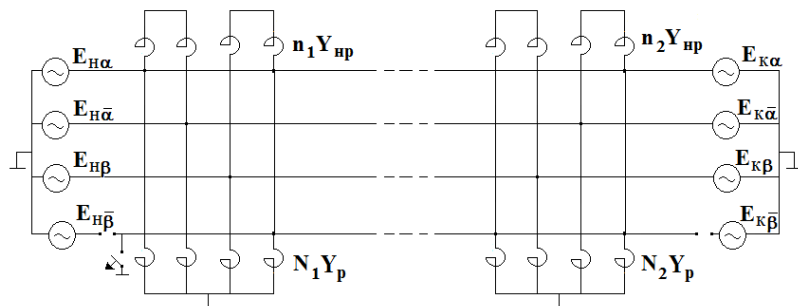


Рис.17. Двухсекционная схема присоединения незаземлённых реакторов

Двухфазное АПВ. Эффективным путём ликвидации однофазных дуговых замыканий в ЧВЛ является двухфазное АПВ (ДАПВ), при котором отключаются две противофазы $\beta, \bar{\beta}$ или $\alpha, \bar{\alpha}$ (рис. 18).

Понятно, что в случае идеально транспонированной ЧВЛ электростатическое и электромагнитное воздействие здоровых противофаз на отключенные фазы полностью отсутствует. Однако при реальной транспозиции ток дуги подпитки будет иметь место, но его величина находится в пределах, допускающих успешное гашение дуги подпитки за минимально возможное время.

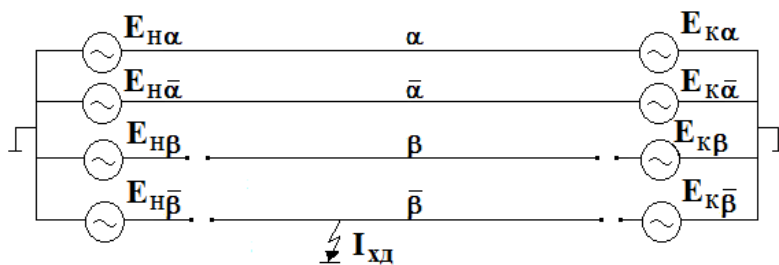


Рис.18. Схема ЧВЛ при ДАПВ

ДАПВ является также эффективной мерой при ликвидации КЗ между противофазами $\beta, \bar{\beta}$ или $\alpha, \bar{\alpha}$. Особенно это важно для ЧВЛ компактной конструкции, имеющих сближенное расстояние между противофазами, что увеличивает вероятность перекрытия воздушных промежутков между противофазами при пляске фаз.

Следует подчеркнуть, что ДАПВ является простейшим способом ликвидации однофазных КЗ, поскольку в этом случае отсутствует необходимость в применении специального оборудования (компенсационных реакторов в нейтралях шунтирующих реакторов либо незаземлённых реакторов) для ограничения токов дуги подпитки. В процессе осуществления ДАПВ нет ограничений на число подключённых к линии ШР.

Переход на 3-фазный режим работы. Рассмотрены условия гашения дуги подпитки при переходе на 3-фазный режим работы в случае затянувшихся

однофазных повреждений ЧВЛ. Если для ЧВЛ обычной конструкции этот переход не представляет трудностей, то для компактных ЧВЛ в силу значительного расхождения междуфазных и межъярусных параметров необходимо шунтирование аварийно отключённой фазы по её концам.

В разделе 6 даётся оценка технико-экономических показателей и экономической эффективности ЧЭП сверхвысокого напряжения.

Модифицированный критерий для оценки экономической эффективности энергетических объектов. На базе общего показателя экономической эффективности, каковым в современных условиях рыночной экономики является чистый дисконтированный доход, в работе предложен модифицированный критерий, при использовании которого достаточно знать суммарные инвестиции для сооружения объекта, постоянные и переменные эксплуатационные издержки при выходе объекта на нормальный режим работы при проектных показателях. Кроме того, в работе введены коэффициенты эффективности капитальных вложений и приведения постоянных издержек, которые зависят от параметров, характеризующих динамику сооружения и ввода в эксплуатацию объекта, таких как длительности инвестиционного и пускового периодов и периода нормальной эксплуатации, а также нормы дисконта. В работе получены соответствующие выражения для определения этих коэффициентов.

Предложенный критерий экономической эффективности конкретизирован с учётом фактора надёжности применительно к задаче транспорта электроэнергии. Сравнение вариантов проводится по удельным приведённым затратам на единицу полезно передаваемой электроэнергии согласно выражению

$$z_{ЭП} = \frac{E_K K_{ЭП} + e_{ВЛ} K_{ВЛ} + e_{ПС} K_{ПС} + e_{УРМ} K_{УРМ} + c_{Э} \Delta \mathcal{E}_{ЭП} + Z_{над}}{\mathcal{E}_{ЭП} - \Delta \mathcal{E}_{ЭП}}, \quad (14)$$

где E_K – коэффициент эффективности использования капвложений; $e_{ВЛ}$, $e_{ПС}$, $e_{УРМ}$ – норма отчислений на издержки соответственно для линии, подстанций и устройств реактивной мощности; $K_{ЭП} = K_{ВЛ} + K_{ПС} + K_{УРМ}$ – суммарные капвложения на сооружение ЭП; $K_{ВЛ}$, $K_{ПС}$, $K_{УРМ}$ – капвложения на сооружение ВЛ, ПС и УРМ; $c_{Э}$ – стоимость потерянной электроэнергии; $Z_{над}$ – дополнительные затраты, которые должна нести энергосистема для обеспечения заданного уровня надёжности; $\mathcal{E}_{ЭП}$ – годовая электроэнергия на отправном конце ЭП; $\Delta \mathcal{E}_{ЭП}$ – годовые потери электроэнергии.

Функционально-стоимостный анализ 4-фазных линий и подстанций. По аналогии с 3-фазными линиями оценка удельной стоимости ЧВЛ проводится на основе следующего выражения

$$k_4 = k_{04} + v_{F4} \cdot F_4 + v_{L4} \cdot L_4, \quad (15)$$

где k_{04} , v_{F4} , v_{L4} – аппроксимирующие коэффициенты; F_4 , L_4 – соответственно сечение и периметр фазы ЧВЛ.

Капитальные затраты на сооружение ПС могут быть представлены в виде двух составляющих

$$K_{\text{ПС}} = \alpha_{\text{тер}} \alpha_{\text{непр}} (K_{\text{пз}} + \alpha_{\text{пр}} K_{\text{об}}), \quad (16)$$

где $K_{\text{пз}}$ – постоянные затраты при сооружении ПС; $K_{\text{об}}$ – стоимость основного оборудования, включая строительные-монтажные работы; $\alpha_{\text{тер}}$ – территориальный коэффициент, учитывающий район сооружения ПС; $\alpha_{\text{непр}} \approx 1,1$ – коэффициент, учитывающий непредвиденные затраты; $\alpha_{\text{пр}} \approx 1,2$ – коэффициент, учитывающий прочие затраты.

При этом стоимость основного оборудования 4-фазной ПС с учетом резервной фазы трансформатора Скотта и дополнительного трансформатора, подключаемого в нейтраль для организации 3-фазных режимов, составит

$$K_{\text{об4}} = (1,25n_{\alpha\beta} + 1)K_{\alpha\beta} + n_{\text{В4}}K_{\text{В4}}, \quad (17)$$

где $K_{\alpha\beta}$, $n_{\alpha\beta}$ – стоимость отдельного трансформатора Скотта и их число; $K_{\text{В4}}$, $n_{\text{В4}}$ – стоимость отдельной ячейки 4-фазного выключателя и их число.

В диссертации приводятся расчётные стоимости трансформаторов Скотта, ячеек выключателей и постоянные затраты для ЧЭП напряжением $500/\sqrt{3}$ и $750/\sqrt{3}$ в ценах 2000 года.

Потери мощности и энергии. Основные потери в ЧЭП приходятся на долю линии. Годовые потери электроэнергии в линии складываются из потерь на нагрев и корону

$$\Delta\mathcal{E}_{\text{ВЛ}} = \Delta\mathcal{E}_{\text{Н}} + \Delta\mathcal{E}_{\text{К}}, \quad \Delta\mathcal{E}_{\text{Н}} = \Delta\bar{P}_{\text{Н}}\tau_{\text{Н}}, \quad \Delta\mathcal{E}_{\text{К}} = \Delta\bar{P}_{\text{К}}\tau_{\text{К}}, \quad (18)$$

где $\Delta\mathcal{E}_{\text{Н}}$, $\Delta\mathcal{E}_{\text{К}}$ – потери энергии в линии соответственно на нагрев и коронирование проводов; $\Delta\bar{P}_{\text{Н}}$, $\Delta\bar{P}_{\text{К}}$ – расчётные потери мощности на нагрев и корону; $\tau_{\text{Н}}$, $\tau_{\text{К}}$ – времена максимальных потерь на нагрев и корону.

Расчётные потери мощности на нагрев определяются в предположении передачи по линии максимального потока мощности при максимальном рабочем напряжении.

Потери мощности на корону зависят от вида погоды и распределения напряжения вдоль линии. Усреднённые потери по всем видам погоды для ЧВЛ, которые рассматриваются как расчётные, оцениваются на основе следующего соотношения

$$\Delta\bar{P}_{\text{К}} = \frac{4g_{\text{К}}U_{\text{ф.макс}}^2}{\xi^5} \ell, \quad (19)$$

где $g_{\text{К}} \approx 35 \cdot 10^{-9}$ 1/Ом·км – усреднённая по всем видам погоды проводимость на корону; $U_{\text{ф.макс}}$ – максимальное рабочее фазное (действующее) напряжение; $\xi = E_{\text{К}}/E_{\text{ф.макс}}$ – коэффициент запаса по короне; $E_{\text{К}}$ – начальная напряженность коронирования на проводах; $E_{\text{ф.макс}}$ – усреднённая

напряжённость электрического поля на поверхности проводов фазы при максимальном рабочем напряжении на линии.

В работе получены соотношения для времён максимальных потерь на нагрев и корону как функций от числа часов использования максимальной мощности.

Оптимизация конструкции фазы ЧВЛ относится к важнейшим технико-экономическим задачам при проектировании, поскольку устройство фазы в значительной степени определяет механические, электрические и технико-экономические характеристики линии в целом.

Задача оптимизации конструкции фазы формулируется в работе как задача нелинейного дискретного программирования в силу того, что как целевая функция, так и система ограничений являются нелинейными функциями искомых параметров (радиуса расщепления, числа и радиуса проводов расщеплённой фазы), а сами параметры фазы должны определяться из стандартного ряда марок проводов, число которых в фазе является целочисленным. В общем случае при формальном подходе решение этой задачи является довольно громоздким. В работе предложен упрощённый подход для поиска оптимального решения. Суть его состоит в следующем.

Один из искомых параметров, а именно радиус расщепления, при заданном волновом сопротивлении может быть определён с достаточной степенью точности с помощью предложенного в работе соотношения независимо от радиуса (r) и числа проводов (n) расщеплённой фазы. В результате оптимизация конструкции фазы сводится только к определению оптимальных значений радиуса и числа проводов расщеплённой фазы.

Решение этой задачи предложено осуществлять в следующей последовательности. На плоскости искомых параметров « n , r » выделяется область, допустимая по техническим ограничениям. Эта область включает набор технически реализуемых вариантов, и наилучший из них соответствует минимуму целевой функции. Нахождение оптимального варианта в допустимой области может осуществляться простым перебором, если число возможных вариантов невелико. Однако поиск упрощается, если осуществить безусловную минимизацию приведённых затрат без учёта ограничений, которые принимаются во внимание в последующем.

Кроме того, при осуществлении безусловной минимизации не принимаются во внимание требования дискретности к искомым параметрам – радиусу и числу проводов расщеплённой фазы. В результате безусловной оптимизации находится точка глобального оптимума. Если эта точка попадает в допустимую область, то искомое оптимальное решение находится в её окрестности с учетом дискретного характера решения, а именно целого числа проводов и вполне определённой их марки. Если же глобальный оптимум оказывается за пределами допустимой области, то в этом случае он служит ориентиром для выбора наилучшего решения с учётом ограничений. Предложенный подход для ЧВЛ напряжением $750/\sqrt{3}$ кВ иллюстрируется на рис. 19.

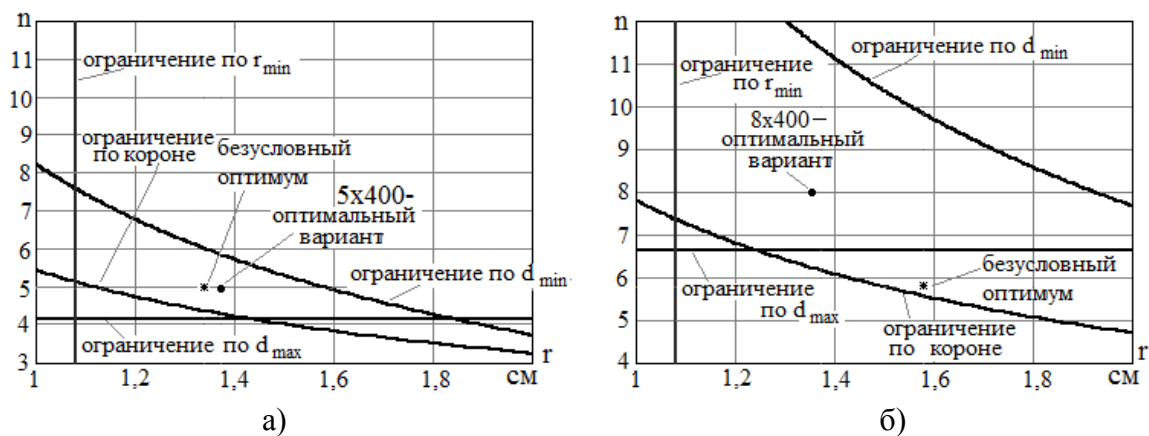


Рис. 19. Выбор оптимальной конструкции фазы ЧВЛ $750/\sqrt{3}$ кВ: а – обычная конструкция, $P_{\max} = 3000$ МВт; б – компактная конструкция, $P_{\max} = 5000$ МВт.

Оценка экономической эффективности ЧЭП.

Сравнение технико-экономических показателей ЧЭП $750/\sqrt{3}$ кВ, двухцепной 3-фазной ЭП 750 кВ и ППТ ± 500 кВ, предназначенных для передачи 3000 МВт на расстояние 1000 км.

Из проведённого технико-экономического анализа следует, что ЧЭП является более предпочтительным вариантом для решения проблемы передачи значительных мощностей на дальние расстояния, поскольку затраты в вариант двухцепной 3-фазной ЭП оказались на 35% больше, а для варианта 2-полюсной ППТ – на 50%. Для вариантов также были рассчитаны условные индексы режимной надёжности. Варианты на переменном токе и на постоянном токе имеют близкие УИРН, если на постоянном токе используется схема с двумя параллельными преобразовательными блоками на полюс.

Четырёхфазная технология передачи электроэнергии по сравнению с рассмотренными альтернативными вариантами имеет дополнительные преимущества, которые по отношению к двухцепной 3-фазной ЭП состоят в меньшей полосе отчуждения для линии сверхвысокого напряжения. По отношению же к ППТ 4-фазная ЭП характеризуется более высокой балансовой надёжностью, поскольку при потере одного полюса возможна длительная передача 50% номинальной мощности, в то время как ЧЭП при потере одной фазы позволяет передать не менее 80% её пропускной способности.

ЧЭП $750/\sqrt{3}$ кВ как альтернатива 3-фазной ЭП 1150 кВ.

Практическую важность имеет ответ на вопрос: могут ли ЧЭП на освоённом напряжении $750/\sqrt{3}$ кВ стать достойной альтернативой 3-фазным ЭП напряжением 1150 кВ?

Проведённый сравнительный анализ экономической эффективности передачи мощности 5000 МВт на расстояние 1000 км с помощью 3-фазных электропередач следующего класса напряжения 1150 кВ и 4-фазных электропередач освоённого класса напряжения $750/\sqrt{3}$ кВ показал, что при передаче таких мощностей на дальние расстояния переход к 3-фазным ЭП напряжением 1150 кВ не даёт желаемого экономического эффекта, если в

качестве альтернативного варианта рассматривать ЧЭП напряжением $750/\sqrt{3}$ кВ.

Таким образом, сложнейшая проблема освоения следующего класса напряжения 1150 кВ, требующая проведения большого объёма работ по созданию электрооборудования класса 1150 кВ, может быть заменена более лёгкой задачей создания только фазообразующих трансформаторов напряжением $750/\sqrt{3}$ кВ, поскольку всё остальное оборудование, имеющее многолетний опыт эксплуатации, в силу однофазного исполнения идентично для 3-фазных и 4-фазных электропередач и выпускается отечественной и зарубежной промышленностью.

Сопоставительный анализ схем выдачи мощности Эвенкийской ГЭС в Тюменскую энергосистему.

Сравнительный анализ схем выдачи 8000 МВт Эвенкийской ГЭС в Тюменскую энергосистему на постоянном и переменном токе показал, что радикальное улучшение экономических и экологических характеристик схемы выдачи мощности Эвенкийской ГЭС при высоком уровне надёжности даёт использования двух цепей ЧЭП напряжением $750/\sqrt{3}$ кВ вместо трёх цепей ППТ ± 500 кВ, что приводит к снижению капитальных затрат вдвое. Экономический эффект в ценах 2010 года оценивается величиной, превышающей 100 млрд. руб.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполненного цикла исследований решены методические и практические вопросы ЧЭП и обоснован высокий уровень экономической эффективности и надёжности 4-фазной технологии передачи электроэнергии.

Основные теоретические результаты работы состоят в следующем:

1. Созданы математические модели и схемы замещения основных элементов 4-фазной ЭП и осуществлена их программная реализация для исследования нормальных и аварийных режимов.

Обоснованы однолинейные схемы отдельных элементов 4-фазной электропередачи для расчёта нормальных режимов энергосистемы, в состав которой входит ЧЭП. Предложена методика для анализа аварийных режимов, базирующаяся на представлении процессов как в фазных, так и в модальных координатах. Для ЧЭП, элементы которой обладают симметрией параметров, разработан метод симметричных составляющих (аналогичный методу симметричных составляющих для 3-фазных систем), в основе которого лежит преобразование Фортескью.

2. Разработаны физически интерпретируемые упрощённые модели 4-фазных линий для исследования резонансных перенапряжений и токов дуги подпитки в неполнофазных схемах.

3. Дана количественная оценка режимных параметров в различных аварийных ситуациях, выявившая слабые места ЧЭП и позволившая определить пути их устранения за счёт применения устройства комбинированной поперечной компенсации и нового способа ликвидации наиболее вероятных однофазных дуговых замыканий на линии.

4. Предложен вероятностный подход для оценки режимной и балансовой надёжности дальних электропередач различного исполнения, позволяющий проводить отбор вариантов при их сравнительном анализе с учётом режима загрузки электропередачи, статистики опасных повреждений и в зависимости от величины возникающего дефицита мощности при этих авариях.

5. Обоснована методика определения технико-экономических показателей и экономической эффективности ЧЭП, включающая модифицированный критерий оценки экономической эффективности, функционально-стоимостный анализ основных элементов ЧЭП и оптимизационный подход к выбору конструктивных параметров ЧВЛ.

К основным практическим результатам работы относятся:

1. Защищённая патентом схема фазопреобразующего устройства для преобразования 3-фазной системы переменного тока в 4-фазную, которая также предусматривает переход ЧЭП на 3-фазный режим работы при возникновении наиболее вероятных однофазных повреждений на 4-фазной линии и при её пофазных ремонтах.

2. Рекомендации по оптимальным конструкциям 4-фазных линий напряжением $500/\sqrt{3}$ и $750/\sqrt{3}$ кВ как обычного, так и компактного исполнения и их технико-экономические показатели.

3. Принципиальные схемы подстанций для 4-фазной электропередачи и технические требования на создание фазопреобразующих трансформаторов напряжением $500/\sqrt{3}$ и $750/\sqrt{3}$ кВ.

4. Защищённое патентом устройство комбинированной поперечной компенсации, суть которого состоит в использовании незаземлённых шунтирующих реакторов, подключаемых по концам линии по схеме звезды с незаземлённой нейтралью, что позволяет исключить резонансные явления в неполнофазных схемах.

5. Новый эффективный способ ликвидации однофазных дуговых замыканий в 4-фазных линиях – двухфазное АПВ (ДАПВ), при применении которого отсутствует необходимость в специальном оборудовании (компенсационные реакторы в нейтральных шунтирующих реакторов либо незаземлённые реакторы) для ограничения токов дуги подпитки.

6. Доказательство экономической эффективности использования ЧЭП напряжением $750/\sqrt{3}$ кВ для передачи значительных мощностей (3000 МВт) на дальние расстояния (1000 км) по сравнению с двухцепной 3-фазной ЭП напряжением 750 кВ и ППТ ± 500 кВ.

7. Вывод об ориентации на ЧЭП напряжением $750/\sqrt{3}$ кВ вместо 3-фазных электропередач следующего класса напряжения 1150 кВ для передачи мощностей порядка (4000 – 5000) МВт на дальние расстояния.

8. Рекомендация по использованию двух цепей ЧЭП напряжением $750/\sqrt{3}$ кВ для радикального улучшения экологических и экономических характеристик схемы выдачи 8000 МВт Эвенкийской ГЭС при высоком уровне надёжности, что приводит к снижению капиталовложений вдвое по сравнению

с вариантом на постоянном токе. Экономический эффект в ценах 2010 года оценивается величиной, превышающей 100 млрд. руб.

Статьи в рецензируемых научных журналах, вошедших в перечень ВАК РФ:

1. Красильникова, Т. Г. Нетрадиционные электропередачи переменного тока повышенной надежности для передачи электроэнергии на дальние и сверхдальние расстояния [Текст] / Г. И. Самородов, Т. Г. Красильникова, С. М. Зильberman, Р. А. Яценко // Энергетическая политика. – 2003 – Вып. 1. – С. 39–47.

2. Красильникова, Т. Г. Транспозиция линий электропередачи и её неожиданный эффект [Текст] / Т. Г. Красильникова, С. М. Зильberman, Г. И. Самородов // Электричество. – 2006. – № 5. – С. 11–16.

3. Красильникова, Т. Г. Аналитический метод для оптимизации балансовой надежности при объединении двух энергосистем [Текст] / С. М. Зильberman, Т. Г. Красильникова, Г. И. Самородов // Электричество. – 2008. – № 2. – С. 2 – 9.

4. Красильникова, Т. Г. Обоснование конструкции фазы для линий напряжением 1150 кВ [Текст] / С. М. Зильberman, Т. Г. Красильникова, В. З. Манусов // Изв. Вузов. Проблемы энергетики. – Казань, 2008. – № 1 – 2. – С. 24–37.

5. Красильникова, Т. Г. Сравнение различных типов электропередач с учетом их аварийности [Текст] / С. М. Зильberman, Т. Г. Красильникова // Изв. Вузов. Проблемы энергетики. – Казань, 2008. – № 5–6. – С. 35–46.

6. Красильникова, Т. Г. Анализ несимметричных режимов в дальних электропередачах в фазных координатах [Текст] / Т. Г. Красильникова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 2. – С. 223–226.

7. Красильникова, Т. Г. Анализ токов дуги подпитки в паузу ОАПВ в процессе динамического перехода [Текст] / Т. Г. Красильникова, В. З. Манусов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 1. – С. 313–316.

8. Красильникова, Т. Г. Модифицированные критерии для оценки экономической эффективности энергетических объектов [Текст] / Т. Г. Красильникова // Известия РАН. Энергетика. – 2010. – № 6. – С. 84–91.

9. Красильникова, Т. Г. Фазопреобразующий трансформатор для четырёхфазных электропередач [Текст] / Т. Г. Красильникова, В. З. Манусов // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 3. – С. 143–152.

10. Красильникова, Т. Г. Вероятностный критерий для оценки режимной надежности основной электрической сети [Текст] / С. М. Зильberman, Т. Г. Красильникова, Г. И. Самородов // Электричество. – 2010. – № 5. – С. 2–7.

11. Красильникова, Т. Г. Устройство для повышения эффективности ОАПВ в высоковольтных линиях [Текст] / Т. Г. Красильникова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – № 1. – С. 232–234.

12. Красильникова, Т. Г. Симметрирование нормального режима в трёхфазных ВЛ сверхвысокого напряжения [Текст] / С. М. Зильberman, Т. Г.

Красильникова, Г. И. Самородов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – №1. – С. 235–237.

13. Красильникова, Т. Г. Уточнённый подход к расчёту годовых потерь электроэнергии на нагрев в линиях сверхвысокого напряжения [Текст] / Т. Г. Красильникова // Изв. Вузов. Проблемы энергетики. – Казань, 2010. – № 11–12. – С. 84–90.

14. Красильникова, Т. Г. Универсальный подход к минимизации потерь активной мощности в линиях сверхвысокого напряжения [Текст] / Т. Г. Красильникова // Электричество. – 2011. – № 3. – С. 13–19.

15. Красильникова, Т. Г. Сравнительная оценка надёжности и технико-экономических показателей компенсированных четырёхфазных электропередач [Текст] / Т. Г. Красильникова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – №2. – С. 404–407.

16. Красильникова, Т. Г. Исключение резонансных перенапряжений при неполнофазных режимах в четырёхфазных линиях с помощью комбинированной компенсации [Текст] / Т. Г. Красильникова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – №1. – С. 256–259.

17. Красильникова, Т. Г. Четырёхфазная электропередача как альтернатива трёхфазной электропередаче 1150 кВ [Текст] / Т. Г. Красильникова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – №2. – С. 94–97.

Другие работы автора:

18. Krasilnikova, T. Economic and Reliable Electric Tie for Energy Export from South-Yakutia Hydro Power Complex to Korea [=Электрическая связь от Южно-Якутского гидроэнергетического комплекса в Корею] [Текст] /R. Iatsenko, G. Samorodov, T. Krasilnikova, V. Kobylin, A. Drujinin // Proceedings of the 6th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology. KORUS – 2002.– June 24 – 30, 2002. – Novosibirsk, Russia.

19. Krasilnikova, T. Consideration on Technical-economic and Reliability Performance of The Transmission System from South-Yakutia Hydro Power Complex to Korea [=Анализ технико-экономических характеристик и надёжности электропередачи от Южно-Якутского гидроэнергетического комплекса в Корею] [Текст] /G. Samorodov, T. Krasilnikova, S. Zilberman, R. Iatsenko, V. Kobylin, A. Drujinin // Proceedings of the 3rd International Conference «Energy Cooperation in North-East Asia: Prerequisites, Conditions, Ways».– September 9–13, 2002. – Irkutsk, Russia.– P. 198-203.

20. Krasilnikova, T. Non-Conventional Reliable AC Transmission System for Power Delivery at Long and Very Long Distances [=Новые типы дальних и сверхдальних электропередач] [Текст] / G. Samorodov, T. Krasilnikova, V. Dikoy, S. Zilberman, R. Iatsenko// Conference proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference. – Yokohama, Japan. – 2002. – October 6 – 10. –Vol.2. – P. 982–987.

21. Красильникова, Т. Г. Оценка уровней несимметрии в нормальных режимах настроенной ЭП Сибирь – Урал [Текст] / Т. Г. Красильникова // Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния:

материалы международной науч.-техн. конф. – Новосибирск, 2003. – Т. 1. – С. 113–117.

22. Красильникова, Т. Г. Выбор и обоснование конструкции ВЛ СВН с резервной фазой / Т. Г. Красильникова [Текст] // Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния: материалы международной науч.-техн. конф. –Новосибирск, 2003. –Том 1. – С. 118–127.

23. Красильникова, Т. Г. Выбор схемы транспозиции в полуволновых ВЛ СВН с резервной фазой [Текст] / Т. Г. Красильникова // Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния: материалы международной науч.-техн. конф. – Новосибирск, 2003. –Том 1. – С. 128–135.

24. Красильникова, Т. Г. Оценка технико-экономических показателей передачи электроэнергии из Тюменского региона в Украину [Текст] / Т. Г. Красильникова, Г. И. Самородов, Р. А. Яценко // Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт: труды 2-й Международной научно-технической конференции. – г.Тобольск, 2004.– С. 18–24.

25. Krasilnikova, T. Comparison between Different Types of EHV and UHV Transmission System Taking Account of Their Forced Outages [= Сравнение различных типов электропередач СВН и УВН с учетом их аварийных отказов] [Текст] / G. Samorodov, T. Krasilnikova, K. Yatsenko, S. Zilberman // Conference proceedings of PowerTech. – Russia. – St.Petersburg, 2005. – June 27–30.

26. Красильникова, Т. Г. Обоснование схемы транспозиции четырехфазной линии электропередачи [Текст] / Т. Г. Красильникова, В. З. Манусов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2005. – №2. – С. 79–84.

27. Krasilnikova, T. An Analytical Method for Reliability Evaluation of two Interconnected Power Systems [= Аналитический метод для оценки надежности двух взаимосвязанных энергетических систем [Текст] / G. Samorodov, T. Krasilnikova, R. Iatsenko, S. Zilberman// in Proc. 2006 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Sweden, Stockholm, 2006.

28. Krasilnikova, T. Assessment of Impact of Export Transmission System Forced Outages on Power System Reliability [Текст] / G. Samorodov, T. Krasilnikova, S. Zilberman, V. Kobylin, A. Drujinin// Asian Energy Cooperation: Mechanisms, Risks, Barries // Proceedins of the International Conference (June 27 – 29, 2006, Yakutsk, Russia). Edited by N. Voropai and D. Efimov. Irkutsk: Energy System Institute, 2007. – P.188–195.

29. Красильникова, Т. Г. Схема замещения трансформатора для преобразования трехфазной системы переменного тока в четырехфазную [Текст] / Т. Г. Красильникова // Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт: ч.2/ под ред. В.П. Горелова, С.В. Журавлева, В.А. Глушец. – Омск. – Иртышский филиал ФГОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта». – Труды 3-ей МНТК. – 2007. С. 14–19.

30. Красильникова, Т. Г. Выбор схемы и параметров сверхдальней электропередачи Сибирь – Центр [Текст] / С. М. Зильберман, Т. Г. Красильникова, Г. И. Самородов // Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт: ч.2/ под ред. В.П. Горелова, С.В. Журавлева, В.А. Глушец. – Омск. –

Иртышский филиал ФГОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта». –Труды 3-ей МНТК. – 2007. – С. 134–140.

31. Красильникова, Т. Г. Эффективность создания экспортной электрической связи «Южно-Якутский гидроэнергетический комплекс – Северный Китай» [Текст] / С. М.Зильберман, О. И. Слепцов, В. П. Кобылин, Т. Г. Красильникова, Г. И. Самородов, А. В. Кобылин // Сб. Трудов IV Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. – Т. 2. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН. – 2009. – С. 201–209.

32. Красильникова, Т. Г. Упрощенный экономический критерий для сравнительной оценки вновь сооружаемых объектов [Текст] / Т. Г. Красильникова// V Евразийский симпозиум по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Секция 4.– Якутск. – 2010. С. 23–31.

33. Krasilnikova, T. The combined shunt compensation of EHV lines[= Комбинированная поперечная компенсация в линиях СВН] [Текст] /G. Samorodov, S. Zilberman, T. Krasilnikova, E. Krasilnikov// IEEE EPEC 2011, Electrical Power and Energy Conference *Advanced Technologies for Emerging Power Systems*, October 3–5, 2011, Winnipeg, MB, Canada.

34. Красильникова, Т. Г. Определение параметров симметрирующего устройства для устранения несимметрии напряжений в протяженной сети, питающей несимметричную нагрузку [Текст] / Т. Г. Красильникова, Б. А. Анохин // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 4. – С. 145–152.

Авторские свидетельства, дипломы, патенты, лицензии:

35. Пат. 2351050 Российская Федерация, МПК H02J. Устройство поперечной компенсации для линии электропередачи [Текст] / Зильберман С. М., Красильникова Т. Г., Самородов Г. И.; заявитель и патентообладатель Новосибирский государственный технический университет (RU).– № 2008100810; заявл. 09.01.2008; опубл. 27.03.2009, Бюл.№ 9. – 3 с.

36. Пат. 2362261 Российская Федерация, МПК H02M. Фазопреобразующее устройство [Текст] / Красильникова Т. Г.; заявитель и патентообладатель Новосибирский государственный технический университет (RU).– № 2008109699; заявл. 11.03.2008; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20.– 6 с.

37. Пат. 2400003 Российская Федерация, МПК H02H H02J. Устройство для осуществления однофазного автоматического повторного включения линий сверхвысокого напряжения [Текст] / Зильберман С.М., Красильникова Т.Г., Самородов Г.И.; заявитель и патентообладатель Новосибирский государственный технический университет (RU). № 2009113837; заявл. 13.04.2009; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26.– 4 с.

38. Пат. № 2414033 Российская Федерация, МПК H02J. Высоковольтная трёхфазная воздушная линия [Текст] /Красильникова Т.Г.; заявитель и патентообладатель Новосибирский государственный технический университет (RU). № 20091269194; заявл.13.07.2009; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7.– 5 с.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр.К. Маркса, 20,
тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60×84/16. Объем 2.75 п. л. Тираж 100 экз.
Заказ № 1213 Подписано в печать 01.10.2013