На правах рукописи

АХМЕТОВ Игорь Маратович

РАЗРАБОТКА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ФАЗОПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА С ТИРИСТОРНЫМ КОММУТАТОРОМ ДЛЯ ЛЭП 220 КВ

Специальность: 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2015

Работа выполнена в открытом акционерном обществе «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского».

Научный руководитель: кандидат технических наук, старший научный сотрудник **Лачугин Владимир Фёдорович**

Официальные оппоненты:
Долгополов Андрей Геннадьевич, доктор технических наук, открытое акционерное общество «Электрические Управляемые Реакторы», технический директор

Лебедев Владимир Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», заведующий кафедрой «Автоматическое управление электроэнергетическими системами»

Ведущая организация:
Открытое акционерное общество «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт по проектированию энергетических систем и электрических сетей «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ», г. Москва

Защита состоится 17 апреля 2015 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета. Диссертация размещена http://ispu.ru/files/Ahmetov_22-12-2014.pdf. Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.064.01,
доктор технических наук, доцент Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Вопросы практической реализации управляемых линий переменного тока в последние годы находят все большее распространение. Статические компенсаторы, объединенные регуляторы перетоков мощности и фазоповоротные устройства (ФПУ) успешно работают в электросетевых компаниях различных стран мира.

В настоящее время на американском и европейском континентах успешно работают десятки мощных ФПУ на линиях электропередачи (ЛЭП) переменного тока классов напряжения 60 – 500 кВ. Наблюдается тенденция к увеличению объёмов внедрения ФПУ. Работа ФПУ, состоящего из сериесного трансформатора – подключаемого вторичной обмоткой последовательно с ЛЭП, и шунтового – подключаемого между первичной обмоткой сериесного трансформатора и ЛЭП, основана на компенсации сдвига фазового угла в ЛЭП путем изменения коэффициента трансформации шунтового трансформатора и осуществляется с помощью устройства регулирования под нагрузкой (РПН).

В ОАО «ЭНИН» разрабатывается первое в мире ФПУ, состоящее из сериесного и шунтового трансформаторов с тиристорным коммутатором, что вносит свою специфику в разработку устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) по сравнению с РЗА ФПУ, выполненных на основе использования устройств РПН. Отсутствие в мировой практике ФПУ с тиристорным коммутатором свидетельствует об актуальности, как для отечественной, так и для зарубежной электроэнергетики исследований по разработке комплекса релейной защиты (РЗ) ФПУ, а также – методики выбора ее параметров срабатывания.

Следовательно, поскольку устройство защиты такого исполнения ФПУ разрабатывается впервые, также актуальной является задача определения на ранней стадии степени ухудшения изоляционных свойств ФПУ и выявления предаварийных режимов его работы с целью снижения нагрузки на устройства релейной защиты и обеспечения повышения надёжности распознавания повреждений.

Степень разработанности проблемы. Структура фазоповоротного устройства с тиристорным коммутатором (ФПУ с ТК) по соединению электромагнитного оборудования соответствует широко применяемым во всем мире фазоповоротным устройствам с механическим коммутатором. Однако, в отличие от последних, в ФПУ с тиристорным коммутатором для переключения высоковольтных выводов трансформаторов применяют бесконтактные переключатели, построенные с применением полупроводниковых однооперационных тиристоров.

Существуют работы, посвященные теме диссертации, построенные на исследовании фазоповоротных устройств с механическими коммутаторами. Однако предложенные решения не учитывают специфику работы ФПУ с ТК.

Отсутствие практической реализации силовой схемы ФПУ с ТК диктует необходимость создания комплекса релейной защиты, учитывающего все особенности работы ФПУ с ТК, а также методики выбора параметров срабатывания основных и резервных защит.

Целью диссертационной работы является создание релейной защиты ФПУ с ТК, методики выбора её параметров срабатывания и структуры системы контроля состояния ФПУ.

Основные задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать особенности повреждений ФПУ с тиристорным коммутатором в различных режимах его работы;
- разработать требования к релейной защите ФПУ с тиристорным управлением на основе анализа особенностей повреждений в ФПУ и в примыкающей к нему электрической сети;
- исследовать и разработать структуру системы контроля состояния ФПУ;
- разработать устройство контроля состояния тиристоров;
- разработать методику выбора параметров срабатывания устройств релейной защиты для ФПУ с ТК.

Научная новизна работы:

1. Установлены особенности повреждений ФПУ, на которые не реагируют существующие защиты фазоповоротных устройств с механическим коммутатором.
2. Разработан комплекс релейных защит для фазоповоротного устройства с тиристорным управлением.
3. Исследовано функционирование системы контроля состояния высоковольтного тиристорного коммутатора (ВТК), включающей устройство контроля тиристоров, что позволяет детектировать предаварийный режим работы тиристорного коммутатора.
4. Показано, что использование микропроцессорных терминалов (МПТ) позволяет совместить комплекс РЗ и функционирования системы контроля состояния ФПУ с тиристорным коммутатором.

Основные методы научных исследований. Решение поставленных задач базировалось на использовании методов теории электрических цепей и теории электромагнитных переходных процессов в электрических сетях.

Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием разработанной автором методики выбора параметров срабатывания РЗ требованиям Правил устройства электроустановок (ПУЭ) и руководящих указаний

по защите понижающих трансформаторов и автотрансформаторов, а также совпадением результатов, полученных в диссертации с данными, полученными с применением других методов расчёта.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности: ***в части формулы специальности*** – «Научная специальность, объединяющая исследования по связям и закономерностям при планировании развития, проектировании и эксплуатации … электрических сетей … . В рамках специальности проводятся исследования по развитию и совершенствованию теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения … надежного производства электроэнергии, ее транспортировки … .»; ***в части области исследования*** –пункту 9: «Разработка методов анализа и синтеза … релейной защиты в электроэнергетике»; пункту 5: «Разработка методов диагностики электрооборудования электроустановок»; пункту 3: «Разработка методов расчета … уровней токов короткого замыкания в электрических сетях энергосистем».

Практическая ценность работы. Выполнены исследования и разработана методика выбора параметров срабатывания релейной защиты фазоповоротных устройств с тиристорным управлением, которые позволили разработать проект РЗА ФПУ для ВЛ 220 кВ Восход – Татарская с выбором количественных значений параметров срабатывания.

Разработанное устройство контроля состояния тиристоров позволяет осуществить неразрушающий контроль состояния тиристоров ФПУ, не выводя тиристорный мост, в котором он установлен, из работы.

Предложенная структура системы контроля состояния ФПУ позволяет достоверно определять состояние не только каждого из тиристоров ВТК, но и отдельных элементов ФПУ.

Разработка ФПУ, для которого разрабатывалась релейная защита, изложенная в данной работе, внесена в программу инновационного развития ОАО «ФСК ЕЭС» до 2016 г. с перспективой до 2020 г.

Использование результатов работы. Результаты выполненных автором исследований и разработок использованы для создания комплекса РЗА для фазоповоротного устройства с тиристорным управлением в проекте установки ФПУ в ВЛ 220 кВ Восход - Татарская – Барабинская для подстанции (ПС) 220 кВ «Восход».

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования и разработки комплекса РЗ ФПУ с тиристорным коммутатором.

2. Методика выбора параметров срабатывания релейной защиты ФПУ с тиристорным коммутатором.

3. Структура системы контроля состояния ФПУ с тиристорным коммутатором.

Личный вклад соискателя заключается в постановке задач, разработке теоретических и методических положений, математических методов, проведении исследований, анализе и обобщении результатов, разработке и патентовании «Устройства контроля состояния тиристоров» и «Многофункционального устройства регистрации процессов на линии электропередачи».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на VI международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2011 г.); VII международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2012 г.); Седьмой региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «ЭНЕРГИЯ 2012» (г. Иваново, 2012 г.); XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» СТТ- 2012 (г. Томск, 2012 г.); Научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» (г. Санкт-Петербург, 2012 г.); I-III Конференциях молодых специалистов ОАО «ЭНИН» (г. Москва, 2009 г., 2010 г. и 2012 г.); XXXV Сессии Всероссийского научного семинара Академии наук РФ «Кибернетика электрических систем» по тематике «Электроснабжение промышленных предприятий» (г. Новочеркасск, 19 - 22 ноября 2013 г.); IX международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2014 г.); XXII конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем РЗА 2014» (г. Москва, 2014 г.); XXXVI Сессии Всероссийского научного семинара Академии наук РФ «Кибернетика электрических систем» по тематике «Электроснабжение промышленных предприятий» (г. Новочеркасск, 24 - 26 сентября 2014 г.)

Опубликованные работы.

Результаты исследований и разработок, проведенных автором, отражены в 11 опубликованных печатных работах, в том числе из них четыре – в журналах, рекомендованных ВАК РФ, «Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность», «Известия вузов. Электромеханика» и «Известия РАН. Энергетика».

Получены патенты на одно изобретение и одну полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 89 наименований и 8 приложений. Общий объём диссертации составляет 222 страницы, из них основной текст – 155 страниц, список литературы – 11 страниц, приложение – 56 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель работы, поставлены задачи, подлежащие решению, отраже-

на практическая ценность полученных результатов работы, а также дана краткая характеристика работы.

В первой главе проанализирована роль фазоповоротного устройства в электроэнергетической системе, рассмотрены возможные варианты выполнения фазоповоротных устройств, а также изучены предлагаемые варианты выполнения релейной защиты этих ФПУ.

Работа ФПУ основана на компенсации сдвига фазового угла в ЛЭП. Устройство состоит из двух трансформаторов: сериесного – подключаемого вторичной обмоткой последовательно с ЛЭП, и шунтового – подключаемого между первичной обмоткой сериесного трансформатора и ЛЭП. Изменение коэффициента трансформации шунтового трансформатора позволяет изменять уровень вводимого в линию напряжения.

Рассмотрена схема и конструктивные особенности ФПУ, а также функциональные характеристики работы ФПУ с тиристорным коммутатором, реализующего продольно - поперечное регулирование. Питание первичной обмотки шунтового трансформатора осуществляется от средней точки сетевой обмотки сериесного трансформатора. Это позволяет изменять угол регулирования выходного напряжения ФПУ в широком диапазоне, не увеличивая при этом напряжение в линии.

Высоковольтный тиристорный коммутатор в составе ФПУ выполняет роль бесконтактного коммутатора (как устройства РПН в фазоповоротных трансформаторах) и состоит из последовательно соединённых тиристорных мостов. Функциональная схема ФПУ с тиристорным коммутатором показана на рисунке 1.

Каждая из трех фаз ВТК представляет собой четыре тиристорных моста, каждый из которых связан с соответствующей вторичной обмоткой той же фазы шунтового трансформатора. Мосты в каждой фазе ВТК соединены последовательно и подключены к соответствующей фазе вентильной обмотки сериесного трансформатора (рисунок 2). При этом

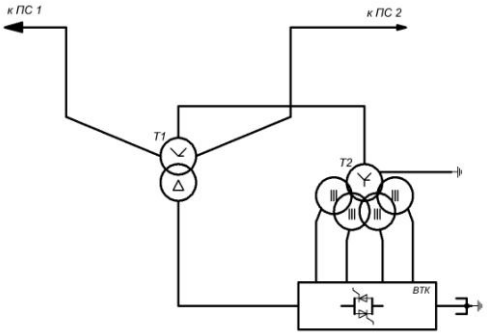

Рисунок 1. Функциональная схема ФПУ с тиристорным коммутатором: Т1 – сериесный трансформатор, Т2 – шунтовой трансформатор

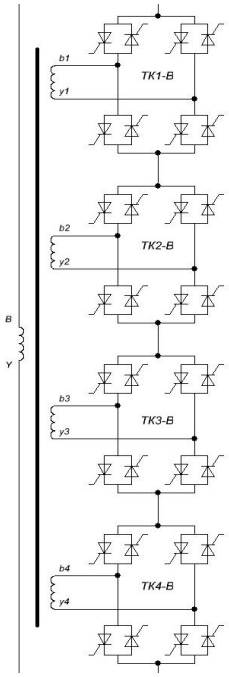

Рисунок 2. ВТК

нулевой ступени регулирования ФПУ соответствует отсутствие проводящей связи между вентильной обмоткой сериесного трансформатора и любой из вторичных обмоток шунтового трансформатора, а максимальной ступени регулирования – наличие этой связи между вентильной обмоткой сериесного трансформатора и всеми четырьмя вторичными обмотками шунтового трансформатора.

В зависимости от требуемой ступени регулирования мосты тиристорного коммутатора могут находиться в одном из трёх состояний. Переключения ВТК происходят поочерёдно в каждой фазе, а время переключения не превышает 100 мс.

Были рассмотрены различные виды повреждений фазоповоротного устройства. Поскольку ФПУ состоит из двух трансформаторов, ему присущи те же аварийные режимы, которые присущи трансформаторам. Для ФПУ с ВТК аварийные режимы, обусловленные механическими переключениями устройства РПН, отсутствуют, а аварийные режимы ВТК обусловлены прежде всего электрическими повреждениями, к которым, помимо прочего, относится неисправности тиристоров.

Сформулированные требования, предъявляемые к релейной защите ФПУ с тиристорным коммутатором, обязывают (с учётом использования микропроцессорной техники) предусмотреть следующие устройства РЗА:

- два комплекта основной дифференциальной токовой защиты;
- газовую защиту;
- два комплекта резервных защит;
- защиту от перегрузки;
- технологическую защиту (защита от понижения уровня масла, защита от потери охлаждения и т. п.).

Поскольку основными элементами ВТК являются тиристоры, основной защитой ВТК должна быть технологическая защита, реагирующая на:

- неисправность системы питания собственных нужд ВТК;
- неисправность системы оперативного постоянного тока;
- неисправность тиристоров;
- неисправность узлов системы управления;
- неисправность системы охлаждения тиристоров.

Резервную защиту ВТК следует выполнять на основе двух комплектов токовой защиты.

Для защиты токоограничивающих реакторов должен быть предусмотрен либо отдельный комплект защиты, либо допускается применение комплекта защиты шунтового и сериесного трансформаторов, если зона их охвата включает реакторы. Для защиты ошиновки, ограниченной выключателями ПС, на которой установлен ФПУ, и вводами сетевых обмоток сериесного и шунтового трансформаторов ФПУ, должен быть предусмотрен отдельный комплект дифференциальной токовой защиты ошиновки.

В релейной защите ФПУ необходимо учитывать параметры тиристоров, а также, для предотвращения образования контуров короткого замыкания, комплексу РЗ следует информировать систему управления, регулирования, защиты и автоматики (СУРЗА) ВТК. Устройства релейной защиты должны иметь связь с технологическими защитами шунтового и сериесного трансформаторов, а также с технологической защитой ВТК.

Далее были рассмотрены различные примеры применения комплектов защит фазоповоротных устройств с механическим переключателем. Показано, что для достоверного определения возможности применения рассматриваемых комплексов защит к ФПУ с ТК, необходимо рассчитать токи короткого замыкания, протекающие по всем ветвям ФПУ. Выделены основные точки ФПУ, необходимые для расчётов установившихся значений токов короткого замыкания (КЗ) при выборе параметров срабатывания защит. При этом выделено пять основных точек КЗ, показанных на рисунке 3.

Значения токов, полученных в результате расчётов КЗ в указанных точках, позволят провести оценку эффективности функционирования комплекса релейной защиты ФПУ с тиристорным коммутатором на основе разработки методики выбора ее параметров срабатывания.

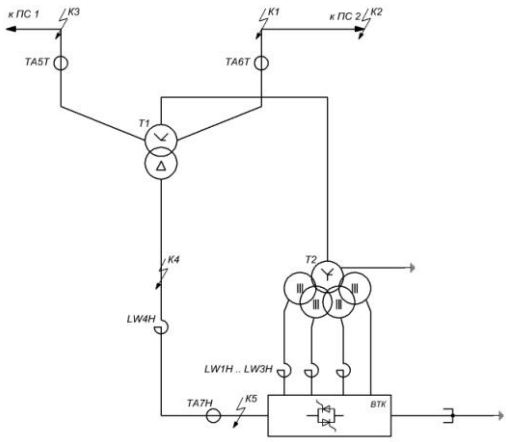

Рисунок 3. Основные точки расчёта токов КЗ

Во второй главе представлена схема присоединения ФПУ к произвольной ЛЭП, показанная на рисунке 4.

Для присоединения ФПУ к линии предложено установить два выключателя – на входе и выходе ФПУ. С целью обеспечения удобства обслуживания ФПУ предлагается между шун-

товым трансформатором и ЛЭП установить дополнительный выключатель. Для удовлетворения требованиям ПУЭ предлагается установить выключатель, шунтирующий сетевую обмотку сериесного трансформатора, и подключённый параллельно ему разъединитель.

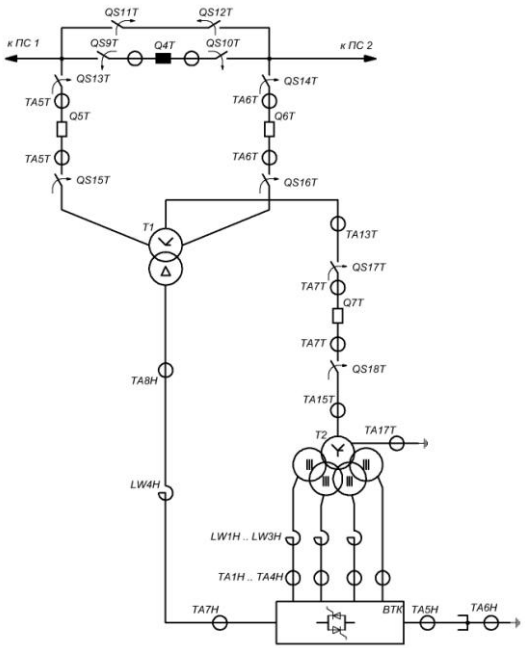

Рисунок 4. Схема присоединения ФПУ к произвольной ЛЭП

Нормальные положения выключателей и нормальные положения разъединителей в эксплуатационном режиме работы ФПУ соответствуют друг другу, за исключением выключателя Q4T, у которого его рабочее положение соответствует разомкнутому положению при нормально замкнутых положениях разъединителей QS9T и QS10T.

Был проведён анализ различных алгоритмов коммутации выключателей ФПУ, и предложен алгоритм коммутации выключателей для подключения ФПУ. Предполагается, что изначально выключатели Q5T – Q7T были разомкнуты, а выключатель Q4T – замкнут, тем самым обеспечивая передачу электроэнергии по ЛЭП. Включение ФПУ проходит в несколько этапов:

1. Включение выключателя Q7T, а затем выключателя Q6T.
2. Перевод ВТК в нулевую ступень регулирования. Проверка тиристоров на предмет неисправности.
3. Включение выключателя Q5T.
4. Отключение выключателя Q4T.

Результаты расчётов токов, протекающих в ФПУ при его включении, показали, что предложенный способ включения ФПУ позволяет провести предварительное диагностирование состояния тиристоров ВТК. Режим работы сети не нарушается, а передача электроэнергии по ЛЭП с установленным ФПУ не прерывается. Оценка влияния такого способа коммутации на работу

устройств РЗА была проведена после расчётов токов короткого замыкания в главе 3.

Для разработки алгоритма отключения ФПУ от ЛЭП был проведён анализ возможных повреждений ФПУ и прерывания питания по ЛЭП. При этом если ФПУ будет работать на ненулевую ступень регулирования, и будет включен шунтирующий выключатель Q4T (при включенных выключателях Q5T-Q7T), сетевая обмотка сериесного трансформатора окажется в режиме короткого замыкания. Ток КЗ будет ограничиваться сопротивлением шунтового трансформатора, сопротивлением токоограничивающих реакторов и сопротивлением сериесного трансформатора.

Поэтому, при рассмотрении алгоритмов отключения ФПУ, необходимо исключить возможность включения шунтирующего выключателя Q4T до перевода ФПУ в нулевую ступень регулирования.

После получения от оперативного персонала ПС команды на выключение ФПУ устанавливается нулевая ступень регулирования и сообщается о готовности к отключению от ЛЭП. Затем включается выключатель Q4T и отключается выключатель Q7T. После включения выключателя Q4T снимаются импульсы управления с тиристоров ВТК. Последними отключаются выключатели Q5T и Q6T. При этом, в отличии от алгоритма включения ФПУ, при отключении ФПУ от ЛЭП выключатели Q5T и Q6T допускается отключать одновременно.

В заключительной части главы описывается методика расчёта токов, протекающих в ФПУ при внутренних и внешних КЗ. Для проведения расчётов токов КЗ была составлена двухмашинная схема замещения энергосистемы и произведены расчёты её параметров.

Расчёт аналитическим методом предполагает решение системы из 27 уравнений с 27 неизвестными. Несмотря на то, что применение современных вычислительных комплексов позволяют решать такие системы уравнений, решения получаются не очень наглядными. Поэтому расчёты токов короткого замыкания проводились и другими методами, в том числе с применением имитационного моделирования и метода симметричных составляющих.

Расчёт методом имитационного моделирования проводился в программе Matlab/Simulink. Используемая модель ФПУ разработана с учётом особенностей переключения тиристорных мостов и содержит не только силовую часть ФПУ, но и систему управления ключами.

Проведённое моделирование режимов работы ФПУ показало, что ток короткого замыкания при внешних КЗ достигает максимальных значений при КЗ за ФПУ и нулевой ступени регулирования. Для всех рассматриваемых точек КЗ справедливо, что ток КЗ минимален при работе ФПУ на максимальной (±15) ступени регулирования.

Для подтверждения результатов моделирования была составлена расчётная схема замещения ФПУ, установленного в ЛЭП, с целью вычисления методом симметричных составляющих установившихся значений токов при внешних коротких замыканиях.

Схема замещения сети с установленным ФПУ для прямой последовательности представлена на рисунке 5.

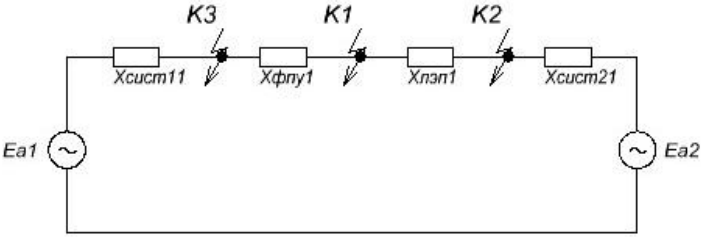

Рисунок 5. Схема замещения сети с установленным ФПУ прямой последовательности

Сопротивление ФПУ рассчитывается по выражению

$$X_{ФПУ} = X_c + \left(X_ш + X_{LW4}\right) \cdot \frac{n_c^2}{\sqrt{3}},$$

где X_c - эквивалентное сопротивление сериесного трансформатора, приведённое к сетевому напряжению;

n_c - коэффициент трансформации сериесного трансформатора;

X_{LW4} - эквивалентное сопротивление токоограничивающего реактора, установленного между фазами ВТК и вентильными обмотками сериесного трансформатора;

$X_ш$ - эквивалентное сопротивление, включающее сопротивление шунтового трансформатора, с учетом ступени регулирования, и сопротивления токоограничивающих реакторов, установленных последовательно с его вторичными обмотками.

В результате расчётов был проведён сравнительный анализ результатов, полученных методом симметричных составляющих и расчётом при помощи метода имитационного моделирования. Как видно из рисунка 6, погрешности расчётов двумя различными методами не превышают 2% относительно друг друга. Достоинством метода имитационного моделирования является возможность моделирования различных режимов работы как для ФПУ с сетью, так и для различных устройств релейной защиты. Полученный результат мо-

жет быть представлен в виде осциллограмм токов и напряжений во всех интересующих точках.

Недостатками этого метода является необходимость построения расчётной схемы, включающей в себя как силовые элементы с точным указанием их параметров, так и системы управления коммутатором.

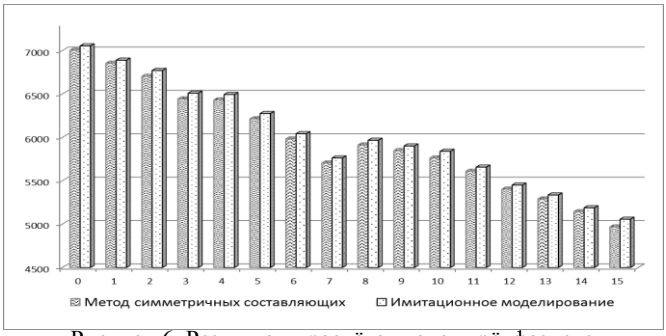

Рисунок 6. Результаты расчётов токов трёхфазного короткого замыкания в точке К1 методами симметричных составляющих и имитационного моделирования

Проведённый анализ различных методов моделирования показал целесообразность применения метода симметричных составляющих для расчёта установившихся значений токов и напряжений при коротких замыканиях, а метод имитационного моделирования – для расчётов токов короткого замыкания в переходном режиме. Синтез двух методов расчёта позволяет быстро и оперативно рассчитывать требуемые значения токов и напряжений в различных режимах работы ЛЭП.

Для расчётов внутренних установившихся значений токов КЗ составлена эквивалентная схема замещения, представленная на рисунке 7.

Ток, протекающий через тиристоры ВТК, рассчитывается по выражению:

$$I_{КЗ} = \frac{E_{сист1} \cdot (X_{сист2} + X_{с2}) + E_{сист2} \cdot (X_{сист1} + X_{с1})}{1 + (X_{LW1 \div LW3} + X_{LW4} + X_{ш}) \cdot (X_{сист2} + X_{с2} + X_{сист1} + X_{с1})}.$$

Для анализа внутренних трёхфазных КЗ схему ФПУ можно условно разделить на две части: КЗ сериесного трансформатора (что является нормальным режимом его работы при нулевой ступени регулирования) и КЗ шунтового трансформатора.

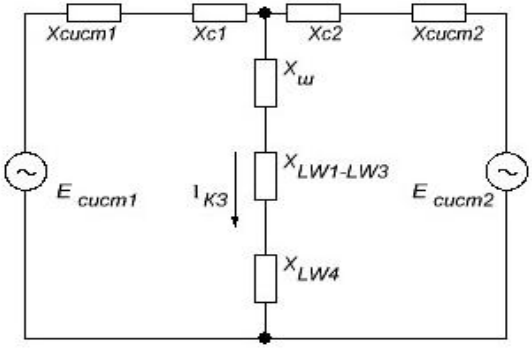

Рисунок 7. Схема замещения ФПУ при трёхфазном КЗ в точке К4

Полученные в результате расчетов значения токов короткого замыкания использовались при составлении методики выбора параметров срабатывания комплекса релейной защиты фазоповоротного устройства.

В третьей главе представлен комплекс защит ФПУ с тиристорным коммутатором, отвечающий требованиям ПУЭ и состоящий из:

- дифференциальной защиты (ДЗТ);
- дифференциальной отсечки (ДО);
- максимальной токовой защиты (МТЗ);
- токовой отсечки (ТО);
- токовой защиты нулевой последовательности (ТЗНП);
- защиты от перегрузки (ЗП);
- защиты от потери охлаждения (ЗПО);
- защиты от обрыва фаз (ЗОФ);
- технологической защиты (ТЗ).

Дифференциальная защита ФПУ с ТК (рисунок 8), в отличие от защит ФПУ с РПН, разделена на четыре части, в зоны действия которых входят отдельно сериесный и шунтовой трансформаторы, ВТК и сетевая обмотка сериесного трансформатора. Это обусловлено тем, что защита сериесного трансформатора выполняется в виде защиты трёхобмоточного трансформатора, а, значит, средняя точка его сетевой обмотки не входит в зону действия защиты. Токоограничивающие реакторы входят в зоны действия дифференциальных защит трансформаторов и ВТК, что не противоречит требованиям ПУЭ. Таким образом, принципы построения разработанного комплекта защит ФПУ с тиристорным коммутатором удовлетворяют нормативным требованиям.

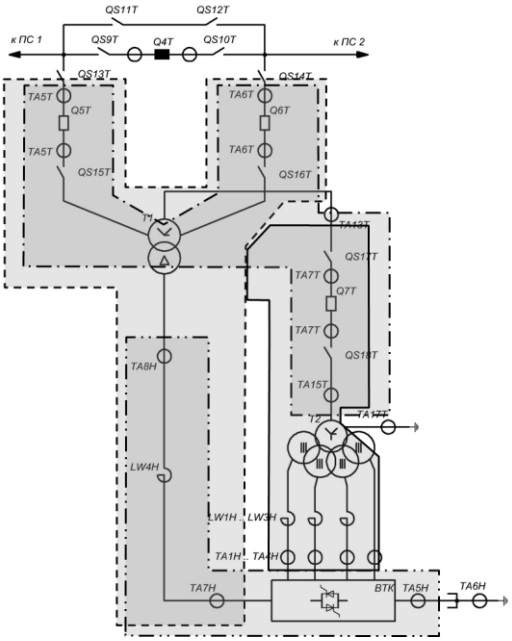

Рисунок 8. Зоны действия ДЗТ ФПУ

Применение микропроцессорной техники при решении задачи построения комплексов РЗА ФПУ с тиристорным коммутатором позволяет повысить эффективность отстройки ДЗТ от максимально-

го тока небаланса, а также от броска тока намагничивания (БТН). Отстройка от токов небаланса производится, как правило, за счет выбора параметров срабатывания тормозной характеристики (ТХ). Отстройка от параметров режимов БТН обеспечивается с помощью торможения от блокировки по второй гармонике и блокировки по форме тока.

Автором разработана методика выбора параметров срабатывания ДЗТ. Для всех четырёх ДЗТ выполнен расчёт этих параметров. Неполнофазный режим работы ФПУ, вызванный его коммутацией (например, при смене ступени регулирования), не влияет на выбор параметров срабатывания рассматриваемых защит.

Приведена методика выбора параметров срабатывания резервных защит. Максимальная токовая защита выполнена в виде трёхступенчатой защиты, первая ступень которой выполняется с блокировкой по второй гармонике, которая реагирует на отношение уровня тока второй гармоники к уровню тока основной гармоники. Блокировка по второй гармонике также используется для отстройки от БТН при включении трансформатора в режиме холостого хода или при переключении ФПУ из нулевой ступени регулирования (когда шунтовой трансформатор работает в режиме холостого хода) в ненулевую ступень. Ток срабатывания МТЗ рассчитывается по условию отстройки от тока в месте установки защиты.

В условиях эксплуатации рекомендуется также производить согласование по чувствительности параметров срабатывания рассматриваемой защиты с параметрами срабатывания наиболее чувствительных ступеней защит от многофазных КЗ предыдущих элементов или с параметрами срабатывания максимальных токовых защит с пуском напряжения, установленных на сторонах более низкого напряжения защищаемого трансформатора. Приведён пример расчёта параметров срабатывания МТЗ, подключённой к одному из трансформаторов тока (ТТ). Выбор параметров срабатывания МТЗ, подключённых к другим ТТ ФПУ, выполняется аналогичным образом.

В заключительной части главы анализируются технологические защиты ФПУ с тиристорным коммутатором. При этом главной задачей технологической защиты ВТК является защита тиристоров от различных повреждений. При пробое нескольких мостов ВТК его технологическая защита аварийно отключает ФПУ. При этом происходит снятие импульсов управления с тиристоров, вследствие чего шунтовой и, что важнее, сериесный трансформатор оказываются в режиме холостого хода, и в ЛЭП добавляется сопротивление намагничивания сериесного трансформатора. При срабатывании любой защиты ФПУ перед отключением ФПУ от ЛЭП автоматика управления ФПУ должна передать либо команду на перевод ФПУ в нулевую ступень регулирования, либо информацию о срабатывании защиты. Оба эти случая должны приводить к немедленному переходу ВТК в нулевую ступень.

В четвёртой главе показана роль системы контроля состояния ФПУ в релейной защите ФПУ. Систему контроля состояния ФПУ рекомендуется выполнять в виде одного централизованного устройства и трёх комплектов локализованного устройства.

Для контроля состояния трансформаторов предусмотрены различные способы диагностирования. Ответственность за разработку и выполнение такой системы лежит на изготовителе трансформаторов.

В отличие от работы устройства РПН, где контроль состояния производится в основном при отключенном трансформаторе, контролировать состояние полупроводниковых коммутаторов допускается при включенном ВТК. Локальное устройство контроля состояния ВТК имеет структуру, схожую со структурой контроля состояния ФПУ, что показано на рисунке 9.

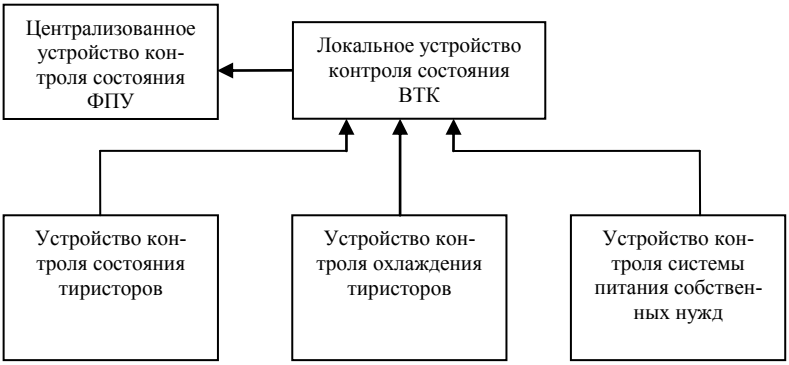

Рисунок 9. Функциональная схема системы контроля состояния ВТК

Результаты анализа существующих способов контроля состояния тиристоров ВТК указывают на необходимость разработки устройства контроля состояния тиристоров (УКСТ). Разработанное устройство определяет отклонение контролируемых параметров (напряжение на управляющем электроде, ток управления тиристора, ток, протекающий через тиристор в обратном направлении) от допустимых значений, отражая тем самым состояние тиристора. Наличие тока, протекающего через тиристор в обратном направлении, является, по существу, стопроцентным показателем неисправности тиристора. Исследование конструктивных особенностей тиристорного плеча моста ВТК показало необходимость разработки шины специальной формы, соединяющей анод и катод тиристоров в тиристорной ячейке. Необходимые расчёты также отражены в диссертации.

Предложенный способ передачи выходной информации от УКСТ заключается в кодировании сигнала с последующей его передачей по волоконно-оптической линии связи в СУРЗА ВТК. При имеющихся трёх параметрах контроля, выходным является только один.

В заключительной части главы даются рекомендации по настройке резервных защит элементов сети, включающей ФПУ. Анализ показал, что при установке ФПУ в сеть, устройство вносит в линию дополнительное сопротивление, величина которого сопоставима с величиной сопротивления энергосистемы. Более того, величина сопротивления ФПУ зависит от ступени регулирования. Это приводит к необходимости мониторинга состояния ФПУ и, при необходимости, изменения параметров срабатывания релейных защит, как его самого, так и окружающих его элементов сети.

Применение разработанного с участием автора устройства регистрации аварийных процессов даст возможность дополнительной корректировки параметров срабатывания комплекса РЗ ФПУ. Возможность записи осциллограмм токов и напряжений аварийного режима работы и режима, предшествующего ему, позволяет проводить анализ процессов, проходящих не только в самом ФПУ, но и оценивать влияние различных режимов работы сети на работу как ФПУ, так и его релейных защит.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Показано, что применение комплексов релейной защиты фазоповоротных устройств с РПН невозможно для защиты ФПУ с тиристорным коммутатором ввиду несоответствия нормативным требованиям, в частности Правилам устройства электроустановок. Сформулированные в работе требования к релейной защите ФПУ с тиристорным коммутатором удовлетворяют этим требованиям.

2. Предложена схема присоединения рассматриваемого фазоповоротного устройства к ВЛ 220 кВ с помощью двух выключателей для сериесного трансформатора, одного выключателя для шунтового трансформатора, а также секционирующего выключателя, шунтирующего сетевую обмотку сериесного трансформатора при его выводе из работы. Разработаны правила коммутации выключателей ФПУ для различных режимов его работы, позволяющие надёжно коммутировать ФПУ не вызывая сбоев в работе ЛЭП.

3. Проанализированы возможности оперативного отключения ФПУ при помощи снятия импульсов управления. Это приводит к переводу сериесного трансформатора из нагрузочного режима работы в режим холостого хода. При этом, свойство ФПУ вводить в линию дополнительное сопротивление в случаях внешнего КЗ должно учитываться при выборе параметров срабатывания защит электрической сети, примыкающей к ФПУ с тиристорным коммутатором.

4. Рассмотрены различные режимы работы ФПУ с тиристорным коммутатором. Проведённый анализ режимов работы ФПУ выявил возможные виды повреждений. Проведённая оценка токов, протекающих в ФПУ при

различных видах внутренних и внешних КЗ, показала, что токовая защита ВТК должна отстраиваться от допустимых токов при перегрузке тиристоров.

5. На основе сформулированных требований к РЗ разработан комплекс релейной защиты ФПУ с тиристорным коммутатором. Предложена методика выбора ее параметров срабатывания. Предложено выполнение многозонной дифференциальной защиты ФПУ с тиристорным коммутатором с реализацией функции торможения.

6. Исследование нормальных и аварийных режимов работы ФПУ показало, что комплекс РЗА не может в полной мере охватить все повреждения ФПУ. Так, для выявления повреждения ВТК вследствие неправильной коммутации тиристоров, предложено в качестве основной защиты использовать технологическую защиту ВТК.

7. Разработана структура системы контроля состояния ФПУ и его отдельных элементов, позволяющей на ранней стадии прогнозировать выход из строя отдельных блоков ФПУ. При этом, проведённый анализ показал, что:

- применение ступенчатой технологической защиты трансформаторов позволяет использовать в системе контроля состояния ФПУ информацию отдельных ступеней РЗ, работающих на сигнал;
- применение устройств контроля состояния ВТК повышает надёжность работы как ФПУ, так и комплекса релейной защиты, а использование кодированного выходного сигнала УКСТ позволяет сократить число информационных выходов устройства, а, следовательно - и число входов СУРЗА ВТК.
- предложенное место установки датчиков тока ВТК накладывает определённые ограничения на форму и материал изготовления шины, соединяющей анод и катод тиристоров одной тиристорной ячейки, однако увеличивает достоверность срабатывания УКСТ.
- применение устройства регистрации аварийных процессов для решения задач контроля состояния и защиты позволяет не только корректировать параметры срабатывания релейных защит ФПУ, но снижает стоимость их наладки.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Лачугин В.Ф., **Ахметов И.М.** Релейная защита фазоповоротных устройств различного исполнения // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. № 5. 2012. С.28-32.

2. **Ахметов И.М**., Лачугин В.Ф., Поляков В.Д. Анализ процессов коммутации тиристорно - управляемого фазоповоротного устройства, работающего совместно с линией электропередачи // Известия вузов. Электромеханика. № 3. 2014. С. 83-86.

3. Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., **Ахметов И.М.**, Асташев М.Г., Шевелев А.В. Релейная защита фазоповоротного устройства с тиристорным коммутатором для линий электропередачи высокого напряжения // Известия академии наук. Энергетика. № 5. 2014. С. 122-134.

4. **Ахметов И.М**., Лачугин В.Ф. Диагностика состояния фазоповоротного устройства с тиристорным коммутатором // Известия вузов. Электромеханика. № 1. 2015 (в печати).

В изданиях, индексируемых в Scopus:

5. V. F. Lachugin, D. I. Panfilov, **I. M. Akhmetov**, M. G. Astashev, and A. V. Shevelev. Relay Protection of Phase-Shifting Device with Thyristor Switch for High Voltage Power Transmission Lines // THERMAL ENGINEERING. Vol. 61. No. 14. 2014. PP. 1040-1047.

Публикации в других изданиях

6. **Ахметов И. М**. Устройство контроля состояния тиристоров. // РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: Материалы докладов VI международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / Под общ. ред. д-ра физ. – мат. наук, проф. Ю.Я.Петрушенко. В 4 т.; Т.1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2011. С. 109.

7. **Ахметов И. М.** Фазоповоротные устройства и способы их защиты. // РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: Материалы докладов VII международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» // Под общ. ред. Канд. техн. наук Э.Ю.Абдуллазанова. В 4 т.; Т.3. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012. С. 12-13.

8. **Ахметов И.М.** Принципы выполнения релейной защиты фазоповоротного устройства // Современные техника и технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 1 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. С.15-16.

9. **Ахметов И.М.,** Лачугин В.Ф. Выбор параметров срабатывания релейной защиты фазоповоротного устройства с тиристорным управлением // Автоматизация технологических процессов: Материалы VII международной научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» // в 2 т., Т.2 - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2012. С.413-425.

Патенты

10. Патент РФ на изобретение №2420752 Российская Федерация МПК G01R31/26, H02H7/12 Устройство контроля состояния тиристоров / **Ахметов И.М.**, Топельберг В.В., Стельмаков В.Н., Жмуров В.П.; Заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Энергетический институт

им. Г.М. Кржижановского» - № 2010103148/28, заявл. 02.02.10; опубл. 10.06.11.

11. Патент РФ на полезную модель № 128341 Российская Федерация МПК G01R31/00 Многофункциональное устройство регистрации процессов на линии электропередачи / Панфилов Д.И., Лачугин В.Ф., Смирнов А.Н., Образцов С.А., **Ахметов И.М.,** Рывкин А.А., Шимина А.О., Артемьев И.Ф., Арутюнов С.А. Горюшин Ю.А.; Заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество "Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы", Открытое акционерное общество "Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского" - № 2013105234/28, заявл. 08.02.2013; опубл. 20.05.13.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве:

[1, 3 - 4, 8] – участие в разработке основных теоретических положений и иллюстрации их на примерах; [2] – участие в разработке основных теоретических положений и составление схем для расчётов; [10,11] – участие в создании изобретения.

АХМЕТОВ Игорь Маратович

РАЗРАБОТКА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ФАЗОПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА С ТИРИСТОРНЫМ КОММУТАТОРОМ ДЛЯ ЛЭП 220 КВ

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 13.02.2015. Формат 60x84 $^{1}/_{16}$

Печать плоская. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 001 .

ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского»,

119991, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19

Отпечатано в ОАО «ЭНИН»