**Волков, Максим Сергеевич. Разработка рекомендаций по обеспечению отключающей способности выключателей в электрических сетях 110-220 КВ с токоограничивающими реакторами : диссертация ... кандидата технических наук : 05.14.02 / Волков Максим Сергеевич; [Место защиты: Нац. исслед. ун-т МЭИ].- Москва, 2013.- 147 с.: ил. РГБ ОД, 61 14-5/34**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

«МЭИ»

04201364800

*На правах рукописи*

Волков Максим Сергеевич

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ОТКЛЮЧАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 110 - 220 КВ С ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИМИ РЕАКТОРАМИ

Специальность 05.14.02 — Электрические станции и электроэнергетические

системы

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Гусев Ю. П.

Москва, 2013 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 4

1. Обобщение и систематизация мирового опыта использования ТОР в электрических сетях 110 кВ и выше 19
   1. Анализ зарубежного опыта использования ТОР в сетях высокого

напряжения и опыта моделирования электромагнитных переходных процессов в электрических сетях с ТОР 19

* 1. Обзор и анализ нормативных документов 30

Выводы по главе 39

1. Расчётная модель электрической сети для определения параметров переходных восстанавливающихся напряжений 40
   1. Расчет переходного восстанавливающегося напряжения по методу

встречного тока 40

* 1. Выбор программного комплекса для расчета электромагнитных

переходных процессов 45

* 1. Формирование уравнений, описывающих переходные процессы 45
  2. Основные принципы построения математической модели и

принимаемые допущения 47

* 1. Разработка математической модели для расчета ПВН на контактах

выключателя 48

* 1. Уточнение расчетной модели 55
  2. Верификация расчетной модели 61
  3. Параметризация расчетной модели на примере ПС 110/10/6 кВ 68

Выводы по главе 72

1. Расчет и анализ переходных процессов в цепях с токоограничивающими реакторами 73
   1. Расчетная схема и расчетные условия 73
   2. Переходные процессы при отключении КЗ в сети с ТОР 75
   3. Оценка влияния отключаемого тока короткого замыкания на переходные восстанавливающиеся напряжения 78

з

* 1. Оценка влияния параметров токоограничивающих реакторов на переходные восстанавливающиеся напряжения 86
  2. Оценка влияния параметров подстанции на переходные

восстанавливающиеся напряжения 92

Выводы по главе 95

1. Разработка мероприятий по снижению параметров ПВН на контактах выключателя 97
   1. Выбор средств ограничения скорости нарастания и пикового значения ПВН и определение их параметров 97
   2. Рекомендации по обеспечению отключающей способности

выключателей 106

Выводы по главе 128

Заключение 129

Список литературы 132

Приложение 1 Решение о выдаче патента Российской Федерации на полезную

модель 141

Приложение 2 Акт внедрения результатов кандидатской диссертационной работы 146

ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы**

Рост уровня токов короткого замыкания (ТКЗ) является серьезной проблемой энергосистем России. Рост токов короткого замыкания в энергосистемах происходит по многим причинам. Самой главной из них является рост энергопотребления в мегаполисах. Рост энергопотребления приводит к необходимости увеличения количества и мощности генераторов на электростанциях, мощности автотрансформаторов (АТ) и трансформаторов (Т) на подстанциях (ПС), необходимых для покрытия возрастающей нагрузки потребителей. Еще одной причиной, способствующей росту ТКЗ, является массовый перевод воздушных линий электропередачи (BJI) в кабельные (ЮТ). При переводе в кабель воздушных линий электропередачи происходит резкое снижение сопротивления линий между ПС по причине того, что сопротивление воздушной линии приблизительно в три раза больше сопротивления кабельной линии. За счет уменьшения сопротивления линий между ПС, а также между станциями и ПС происходит значительное увеличение ТКЗ на шинах ПС.

К таким энергосистемам, где уровни токов КЗ приближаются к предельным или превосходят их, относятся Московская, Ленинградская, Тюменская, Свердловская энергосистемы. В некоторых узлах электрических сетей ТКЗ уже превысили 63 кА.

Превышение ТКЗ сверх допустимых значений находящегося в эксплуатации оборудования потребует:

* замены выключателей на выключатели с большей отключающей способностью. Если выключатели входят в состав элегазовых комплектных распределительных устройств (КРУЭ), то потребуется замена всего КРУЭ на ПС;
* замены разъединителей, трансформаторов тока и напряжения, которые не соответствуют возросшим ТКЗ по величине допустимых динамических воздействий;
* замены всех воздушных линий электропередачи напряжением 110-220 кВ, не соответствующих по допустимой величине динамических воздействий возросшим ТКЗ;
* замены всех воздушных шин и ошиновок напряжением 110-220 кВ ПС, не соответствующих по допустимой величине динамических воздействий возросшим ТКЗ;
* замены высокочастотных заградителей релейной защиты и связи на всех присоединениях 110-220 кВ, не соответствующих по допустимой величине динамических воздействий возросшим ТКЗ.

Из перечисленного выше следует, что если допустить рост ТКЗ сверх допустимых значений, то потребуется замена почти всего первичного оборудования напряжением 110-220 кВ в зоне роста ТКЗ выше допустимых значений. Такая замена потребует огромных капиталовложений, значительного времени на проектирование и реконструкцию энергообъектов энергосистем.

Для этих районов и объектов, где проблема роста ТКЗ стоит наиболее остро, необходимы меры по координации токов КЗ, под которыми понимается обеспечение соответствия параметров электрооборудования уровням тока КЗ в месте установки оборудования. Меры предусматривают как замену выключателей с переходом на более высокие параметры по номинальному току отключения, так и ограничение токов КЗ. Однако, регламентированные подходы к координации токов КЗ, охватывающие вопросы замены выключателей и ограничения токов КЗ с применением схемных решений и установкой токоограничивающих аппаратов в настоящее время не установлены.

Используемые в России способы и средства не могут в полной мере обеспечить эффективное ограничение токов КЗ при сохранении устойчивости и надежности работы сети. Мировой опыт предлагает такой способ ограничения ТКЗ в сетях 110 кВ и выше, как применение линейных токоограничивающих реакторов (ТОР).. В Московской, Ленинградской и некоторых других энергосистемах России уже установлено некоторое количество ТОР на подстанциях напряжением 110 кВ, в ближайшие годы планируется ввод новых

ТОР на существующих и строящихся подстанциях 110 - 220 кВ. Однако в России до сих пор не было научных исследований, в которых оценивался не только положительный эффект от применения ТОР, но и проанализированы возможные побочные последствия от их использования. В частности, не рассмотрено влияние установки ТОР на переходные процессы при коротких замыканиях. Установка токоограничивающих реакторов в сеть 110 кВ и выше сопряжена с проблемой превышения допустимых значений переходных восстанавливающихся напряжений (ПВН) на контактах выключателя при коммутациях, что подтверждается зарубежным опытом использования ТОР. При превышении нормированных значений вышеуказанных параметров выключатель не сможет отключить ток короткого замыкания. Более того, может произойти взрыв выключателя вследствие его перегрева, что может нанести механические повреждения и вывести из строя рядом стоящее оборудование.

Принимать обоснованные решения по ограничению токов короткого замыкания с помощью ТОР, а также предотвратить аварии помогут специальные мероприятия, разрабатываемые на основе расчета и анализа переходных процессов, возникающих при отключениях КЗ в цепях с ТОР.

**Объектом исследования** настоящей работы являются электрические сети напряжением 110 - 220 кВ с токоограничивающими реакторами.

**Предметом исследования** являются электромагнитные переходные процессы, возникающие при отключении коротких замыканий.

**Целью настоящей работы** является разработка рекомендаций по предупреждению отказов высоковольтных выключателей, обусловленных повышением сверх допустимых значений параметров переходных восстанавливающихся напряжений на их контактах, при отключении коротких замыканий в сетях напряжением 110 кВ - 220 кВ с токоограничивающими реакторами.

В соответствии с поставленной целью основными задачами работы являются:

* Систематизация и обобщение мирового опыта использования ТОР в электрических сетях 110 кВ и выше и опыта моделирования электромагнитных переходных процессов в электрических сетях с ТОР; аналитический обзор отечественной и международной нормативно - технической документации в области нормирования параметров ПВН для выключателей.
* Разработка математических моделей электрической сети 110 и 220 кВ с ТОР, позволяющих определить характеристики ПВН на контактах выключателя при отключении токов короткого замыкания.
* Расчетно-экспериментальное исследование электромагнитных переходных процессов, вызываемых отключением высоковольтными выключателями токов короткого замыкания на участках электрической сети с ТОР.
* Анализ влияния параметров сети и электрооборудования подстанций, параметров ТОР на параметры ПВН на контактах выключателя.
* Разработка рекомендаций, обеспечивающих отключающую способность высоковольтных выключателей, заключающихся в снижении параметров ПВН на контактах выключателя.

Методы исследования. Решение поставленных задач проводилось с помощью метода математического моделирования на основе системы линейных алгебраических уравнений, составленных по законам Кирхгофа, математического моделирования на основе теории обыкновенных дифференциальных уравнений, исследования коммутационных процессов с использованием специализированного программного комплекса для расчета электромагнитных переходных процессов *ЕМТР- RV,* теории электромагнитных переходных процессов.

**Научная новизна** настоящей работы заключается **в** следующем:

* Разработана математическая модель участка электрической сети напряжением 110- 220 кВ энергосистемы с ТОР, позволяющая определить характеристики переходных восстанавливающихся напряжений на контактах выключателя с учетом собственной резонансной частоты ТОР.
* Выявлены и проанализированы основные факторы, влияющие на переходные восстанавливающиеся напряжения при отключении высоковольтными выключателями токов короткого замыкания в сетях с ТОР;
* Разработаны рекомендации по снижению скорости и пикового значения ПВН на контактах выключателей, отключающих КЗ сетях с ТОР, заключающиеся в использовании демпфирующих цепей, состоящих из последовательно соединенных конденсатора и резистора, подключенных либо между выводами реактора со стороны выключателя и землей, либо параллельно ТОР.
* Разработано устройство для ограничения скорости ПВН на контактах выключателя, установленного в цепи с ТОР, позволяющее шире использовать малозатратный метод снижения токов КЗ с помощью ТОР в сетях высокого напряжения.

**Достоверность** научных положений диссертационной работы обусловлена корректным использованием теории электромагнитных переходных процессов, обоснованностью принятых допущений и удовлетворительным совпадением результатов расчетов, полученных при использовании разработанной математической модели в программном комплексе *EMTP-RV,* с результатами расчетов, выполненных по известным аналитическим выражениям. Результаты исследований не противоречат результатам подобных работ других исследователей.

**Основные положения и результаты работы, выносимые на защиту:**

1. Расчётная модель участка электрической сети с ТОР для исследования электромагнитных переходных процессов, сопровождающих отключения высоковольтными выключателями коротких замыканий.
2. Результаты анализа влияния параметров электрической сети различной конфигурации и электрооборудования подстанций, параметров ТОР на скорости нарастания и пиковые значения ПВН на контактах выключателей, отключающих короткие замыкания на участках электрической сети с ТОР 110 и 220 кВ.
3. Рекомендации по снижению скорости и пиковых значений ПВН на контактах выключателей путем использования предлагаемых демпфирующих цепей, позволяющие использовать ТОР как малозатратный метод снижения токов КЗ в сетях высокого напряжения.

**Практическая значимость результатов работы.**

* Обосновано влияние токоограничивающих реакторов на коммутационные процессы, возникающие при отключении коротких замыканий, выражающееся в увеличении частоты переходного процесса и увеличении скорости нарастания ПВН на контактах выключателя, что может приводить к выходу его из строя.
* Разработанные математические модели для исследования

коммутационных процессов в электрических сетях с токоограничивающими реакторами могут быть использованы при определении рекомендаций, обеспечивающих надежную эксплуатацию высоковольтных выключателей при установке ТОР в электрических сетях различной конфигурации.

* Разработанные рекомендации по снижению скорости и пиковых значений ПВН на контактах выключателей, отключающих токи КЗ в сетях с ТОР, могут быть использованы при проектировании и реконструкции развивающихся электрических сетей высокого напряжения.
* Результаты работы были использованы в научно-исследовательской работе «Исследование уровней коммутационных перенапряжений в реактированных сетях увеличенного реактивного сопротивления с определением подходов построения реактированной сети с учетом особенностей Московской энергосистемы», выполненной по заказу ОАО «МОЭСК», в виде методических указаний по построению реактированной сети ОАО «МОЭСК» с учетом допустимых уровней перенапряжений.

• На разработанное устройство для ограничения скорости ПВН на контактах выключателя, отключающего КЗ в сетях с ТОР, получено решение о выдаче патента Российской Федерации на полезную модель «Устройство для ограничения переходных восстанавливающихся напряжений в цепях с токоограничивающими реакторами».

**Реализация и внедрение результатов работы.**

1. Результаты работы используются в виде методических указаний по построению реактированной сети ОАО «МОЭСК» с учетом допустимых уровней перенапряжений.
2. Устройство для ограничения переходных восстанавливающихся напряжений в цепях с токоограничивающими реакторами, защищенное решением по заявке № 2013133083 от 13.09.2013 г. о выдаче патента Российской Федерации на полезную модель «Устройство для ограничения переходных восстанавливающихся напряжений в цепях с токоограничивающими реакторами».
3. Результаты работы в виде разработанных рекомендаций по обеспечению отключающей способности выключателей были учтены электротехническим отделом ЗАО ХК «Стройэнергосервис» при разработке проектной и рабочей документации, что подтверждается актом внедрения от 18.10.2013 г.

**Апробация работы и публикации.** Отдельные результаты работы и работа в целом обсуждалась на кафедре «Электрические станции» НИУ «МЭИ», на одиннадцатой Международной научной конференции «Актуальные вопросы современной техники и технологии» (г. Липецк, 26 апреля 2013 г.), на девятой

Международной научно - практической конференции «Техника и технология: новые перспективы развития» (г. Москва, **24** мая **2013** г.).

Всего опубликованных работ - **4,** в том числе по теме диссертации - **4,** из них: 2 - научные статьи, 2 - тезисы доклада на научной конференции, в том числе две статьи в журналах «Вестник МЭИ» и «Наука и образование. МГТУ им.

Н.Э. Баумана», входящих в перечень ведущих журналов ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы, содержащего **84** наименования, двух приложений. Основной текст изложен на **131** странице, включает **68** рисунков, **34** таблицы. Общий объём диссертации **147** страниц.

**В первой главе** работы «Обобщение и систематизация мирового опыта использования ТОР **в** электрических сетях **110** кВ и выше» произведено обобщение и систематизация исследований в области использования токоограничивающих реакторов, произведен аналитический обзор отечественной и международной нормативно - технической документации в области нормирования параметров ПВН для выключателей, проанализированы методы определения собственного переходного восстанавливающегося напряжения в месте установки выключателя.

В результате анализа отечественной и международной нормативно­технической документации оценены допустимые скорости нарастания и пиковые значения ПВН на контактах выключателей при отключениях коротких замыканий, определены основные различия в отечественных и зарубежных стандартах в области нормирования параметров ПВН.

В ходе анализа мирового опыта использования ТОР определены основные характеристики и конструктивные особенности токоограничивающих реакторов, использующихся для ограничения ТКЗ в электрических сетях высокого напряжения. В мировой практике установка ТОР предусматривается при превышении расчетного тока КЗ номинальной отключающей способности выключателей, установленных на подстанции, а также при несоответствии электросетевого оборудования допустимым термическим и динамическим воздействиям ТКЗ. Для ограничения токов КЗ в сетях высокого напряжения обычно используются токоограничивающие реакторы с индуктивным сопротивлением от 1 до 20 Ом с собственной резонансной частотой от 50 до 200 кГц. Последний параметр зависит от конструктивных особенностей ТОР.

В результате анализа исследований в области использования токоограничивающих реакторов выявлена проблема, заключающаяся в повреждениях высоковольтных выключателей вследствие недопустимо высокой скорости ПВН на их контактах при отключении коротких замыканий в электрических сетях с ТОР. Так на одной из подстанций в США, где в линейное присоединение был установлен токоограничивающий реактор, был зафиксирован случай повреждения выключателя с номинальным напряжением 138 кВ. Причиной этого явилась недопустимо высокая скорость нарастания переходного восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя. Эти случаи повреждения являются показателем актуальности настоящей работы, поскольку установка ТОР в энергосистеме России стала рассматриваться как один из основных способов снижения ТКЗ.

В настоящей работе проанализированы основные методы определения ПВН на контактах выключателей, установленных в цепях с ТОР, используемые в мировой практике, выявлены принимаемые допущения, а также факторы, учитываемые в расчетах. Так, некоторые из предлагаемых математических моделей не учитывают: поперечную активную проводимость шин, емкость фаза- земля и емкость между фазными выводами токоограничивающего реактора, влияние установленного на подстанции электрооборудования. Поэтому одной из задач, поставленных в настоящей работе, является разработка математической модели для расчета переходных процессов в электрических сетях с ТОР, учитывающей комплекс влияющих на переходные процессы факторов.

Вторая глава работы «Расчётная модель электрической сети для определения параметров переходных восстанавливающихся напряжений» посвящена разработке расчетной модели участка электрической сети энергосистемы для исследования электромагнитных переходных процессов, сопровождающих коммутации высоковольтными выключателями токов короткого замыкания в цепях с токоограничивающими реакторами.

В главе описаны основные принципы построения математической модели и принимаемые допущения, произведено обоснование учитываемых при расчете ПВН факторов, влияющих на переходные процессы.

В главе приведен теоретический анализ и математическое моделирование электромагнитных переходных процессов при отключениях высоковольтным выключателем коротких замыканий в цепях с токоограничивающим реактором. Рассмотрены исходные данные и основные параметры элементов расчетной схемы, таких как питающая энергосистема, силовые и измерительные трансформаторы, соединительные токопроводы и т.д., характеризующие электромагнитные переходные процессы.

Расчетная модель учитывает параметры оборудования, установленного в электрической сети. При расчете возникающих перенапряжений учитываются:

* параметры питающей системы - активное и индуктивное сопротивления;
* ёмкости на землю установленного на ПС оборудования (шины распределительных устройств, трансформаторы и автотрансформаторы, трансформаторы тока и напряжения, линии электропередачи, выключатели, разъединители, реакторы);
* высокочастотные потери элементов примыкающего участка сети и трансформаторов подстанции;
* поперечные активные проводимости шин;
* параметры ТОР - индуктивность, емкость и активное сопротивление, высокочастотные потери в реакторе.

Установлено, что для корректного расчета переходных процессов следует использовать полную модель линии с учетом частотной зависимости параметров, учитывающую геометрию и конструктивные особенности линии. Использование упрощенной модели линии, которая задается волновым сопротивлением, приводит к неточности расчета, поскольку волновое сопротивление зависит от конструктивных особенностей линии, наличия параллельных линий, удельного сопротивления грунта и длины короткозамкнутого участка, на высоких частотах переходного процесса происходит значительное изменение параметров линии.

Произведено сопоставление результатов расчетов, полученных при использовании математической модели, с результатами, полученными аналитическим путем. Расхождения в полученных результатах находятся в пределах допустимой погрешности.

**Третья глава** работы «Расчет и анализ переходных процессов в цепях с токоограничивающими реакторами» посвящена расчету и анализу переходных процессов, возникающих при отключении токов короткого замыкания в электрических сетях различной конфигурации с токоограничивающими реакторами. Компьютерные исследования проведены с помощью разработанных математических моделей участков электрической сети 110 - 220 кВ с ТОР различной конфигурации.

Компьютерные исследования проведены с помощью разработанных математических моделей участков электрической сети энергосистемы с токоограничивающими реакторами. Определены расчетные условия для определения максимальной скорости и пикового значения ПВН на контактах выключателя, отключающего короткое замыкание в сети с ТОР.

В ходе анализа результатов расчетов переходных процессов выявлено, что скорость нарастания ПВН на контактах выключателя при отключении токов КЗ в электрических сетях с ТОР может достигать недопустимо высоких значений. Так в электрических сетях 110 кВ с ТОР индуктивным сопротивлением 1-8 Ом, максимальный ток КЗ в которых не превосходит 63 кА, скорость ПВН на контактах выключателя достигает 12-35 кВ/мкс при максимальном допустимом для современных выключателей значении 7 кВ/мкс.

Отключение выключателем короткого замыкания на фазных выводах реактора со стороны отходящей линии сопровождается переходным процессом и восстановлением напряжения на контактах выключателя. Переходный процесс восстановления напряжения определяется индуктивностями системы, трансформатора и ТОР на частоте процесса, а также емкостью трансформатора, ошиновки и ТОР. При этом ПВН на выключателе будет представлять собой сумму колебательного процесса со стороны ТОР и колебательного процесса со стороны подстанции. Наличие подключенных к шинам кабельных и воздушных линий, трансформаторов напряжения и другого оборудования обусловливает колебательный процесс восстановления напряжения на контакте выключателя со стороны подстанции с частотой порядка нескольких кГц. Восстановление напряжения на контакте выключателя со стороны ТОР формируется в процессе колебательного разряда емкостей в резонансном контуре ТОР, частота переходного процесса определяется собственной резонансной частотой реактора и может достигать 50 - 100 кГц. Таким образом, обосновано, что именно наличие реактора обусловливает высокую скорость ПВН.

В результате анализа переходных процессов, возникающих при отключении выключателем коротких замыканий в реактированных участках сети, были выявлены основные факторы, влияющие на параметры ПВН:

1. Значение коммутируемого выключателем тока. Скорость нарастания ПВН возрастает при увеличении отключаемого тока короткого замыкания.
2. Значение индуктивности и собственной резонансной частоты ТОР:

* Увеличение индуктивного сопротивления ТОР, при неизменной собственной резонансной частоте, приводит к росту скорости ПВН.
* С уменьшением собственной резонансной частоты, характерной для ТОР с большим индуктивным сопротивлением, скорость нарастания ПВН снижается.

1. Значение суммарной емкости между фазой оборудования, установленного на подстанции, а так же отходящих от нее линий, и землей. С увеличением суммарной емкости фаза - земля на шинах ПС, скорость нарастания

ПВН снижается. Однако увеличение емкости на шинах ПС не приводит к снижению скорости ПВН до допустимых значений.

Из полученных результатов сделан вывод о том, что установка ТОР недопустима без специальных мер по ограничению скорости нарастания ПВН и/или пикового значения ПВН.

**Четвертая глава** работы «Разработка рекомендаций по обеспечению отключающей способности высоковольтных выключателей в электрических сетях с ТОР» посвящена разработке рекомендаций по снижению параметров ПВН на контактах выключателя.

В результате исследований было обосновано, что эффективным средством снижения скорости нарастания ПВН является установка конденсаторов между фазными выводами реактора со стороны выключателя и землей или параллельно ТОР.

Значение емкости конденсаторов варьируется от 5 до 200 нФ на фазу в зависимости от значения индуктивности и собственной частоты ТОР, параметров электрической сети и подстанции. Однако установка конденсаторов приводит к увеличению пикового значения ПВН. Снижение этого параметра до допустимых значений, как было установлено в ходе исследований, достигается установкой демпфирующего резистора, установленного последовательно с конденсатором. Установка демпфирующих сопротивлений, в свою очередь, приводит к увеличению скорости нарастания ПВН.

Из этого следует, что необходимо выбрать такие значения емкости конденсатора и сопротивления резистора, что бы одновременно скорость нарастания и пиковое значение ПВН не превышали нормированные значения. Таким образом, снижение скорости и пикового значения ПВН достигается путем установки демпфирующих устройств, которые могут быть подключены между фазными выводами реактора со стороны выключателя и землей или параллельно ТОР.

В ходе работы были произведены расчеты переходных процессов для случаев установки ТОР с сопротивлениями от 1 до 10 Ом на ПС 110 - 220 кВ с выключателями различной отключающей способности (от 31,5 до 63 кА), соответствующих ГОСТ Р 52565-2006, ГОСТ 687-78, IEC 62271-100. На основании этих расчетов были рассчитаны рекомендуемые параметры демпфирующих устройств, необходимых для снижения параметров ПВН до нормируемых для соответствующих выключателей значений.

Было установлено, что снижение скорости ПВН также можно достичь путем прокладки кабельной линии на участке между выключателем и фазным выводом ТОР, при условии, что ее емкость достаточна для снижения частоты переходного процесса, а, следовательно, и скорости ПВН до требуемого уровня. Данное мероприятие рекомендовано при проектировании подстанций, поскольку оно требует значительно меньших капиталовложений и меньшую площадь отчуждения по сравнению с установкой демпфирующих устройств, состоящих из последовательно соединенных конденсатора и резистора.

При невозможности установки демпфирующих устройств, состоящих из последовательно соединенных конденсатора и резистора, по причине ограниченного места на ПС и его высокой стоимости, а также при невозможности соединения выключателя и ТОР посредством кабельной линии, рекомендовано применить разработанное техническое решение, защищенное решением по заявке № 2013133083 от 13.09.2013 г. о выдаче патента Российской Федерации на полезную модель «Устройство для ограничения переходных восстанавливающихся напряжений в цепях с токоограничивающими реакторами». Задачей настоящей полезной модели является усовершенствование устройства для ограничения переходных восстанавливающихся напряжений в цепях с токоограничивающими реакторами, которое позволяет уменьшить его габариты, сложность и дороговизну. Решение указанной задачи достигается тем, что в известном устройстве для ограничения переходных восстанавливающихся напряжений в цепях с токоограничивающими реакторами, содержащем последовательно соединенные конденсатор и резистор, при этом свободный вывод резистора соединен с «землей», конденсатор выполнен в виде экранированного силового кабеля, изолированного снаружи и снабженного на одном конце заглушкой из электроизоляционного материала, другой конец экранированного силового кабеля с помощью кабельной муфты подключен к токоведущей шине, соединяющей выключатель электроустановки и токоограничивающий реактор, а экран экранированного силового кабеля на одном из его концов соединен с резистором.

Таким образом, в главе представлены рекомендации, позволяющие реализовать малозатратный способ снижения токов КЗ в сетях высокого напряжения с помощью ТОР с учетом допустимых параметров ПВН. В рекомендациях содержатся указания по оценке влияния реакторов на коммутационные перенапряжения и выбору устройств для демпфирования параметров ПВН, превышающих нормированные значения. Рекомендации могут быть использованы при проектировании, планировании развития и реконструкции электрических сетей напряжением 110 - 220 кВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа публикаций по теме работы установлено, что при отключении коротких замыканий в электрических сетях с ТОР параметры ПВН на контактах выключателя могут превышать значения, нормированные для выключателя, что привело к необходимости проведения исследований и разработке рекомендаций по обеспечению отключающей способности выключателей в электрических сетях 110 - 220 кВ с токоограничивающими реакторами.
2. Разработана математическая модель участка электрической сети напряжением 110- 220 кВ энергосистемы с ТОР, позволяющая определить скорость и пиковое значение переходного восстанавливающегося напряжения с учетом собственной резонансной частоты ТОР.
3. Выполнены расчетно-экспериментальные исследования

электромагнитных переходных процессов, вызываемых отключением высоковольтными выключателями токов короткого замыкания в электрической сети с токоограничивающими реакторами. В результате исследований было установлено, что:

* скорости нарастания ПВН при отключении коротких замыканий в сетях с ТОР значительно превосходят значения, установленные стандартами на выключатели. Так в электрических сетях 110 кВ с ТОР индуктивным сопротивлением 1-8 Ом, максимальный ток КЗ в которых не превосходит 63 кА, скорость ПВН на контактах выключателя достигает 12-35 кВ/мкс при максимальном допустимом для современных выключателей значении 7 кВ/мкс;
* наиболее опасным режимом с точки зрения возникающих перенапряжений является отключение выключателем короткого замыкания, возникающего на выводах токоограничивающего реактора со стороны отходящей линии;
* установка ТОР недопустима без специальных мер по ограничению скорости нарастания ПВН и/или пикового значения ПВН.

1. В результате анализа переходных процессов, возникающих при отключении выключателем коротких замыканий в реактированных участках сети, были выявлены основные факторы, влияющие на параметры ПВН.

* Значение коммутируемого выключателем тока. Скорость нарастания ПВН пропорциональна отключаемому току короткого замыкания.
* Значение индуктивности и собственной резонансной частоты ТОР. Увеличение индуктивного сопротивления ТОР, при неизменной собственной резонансной частоте, приводит к росту скорости ПВН. С уменьшением собственной резонансной частоты, характерной для ТОР с большим индуктивным сопротивлением, скорость нарастания ПВН снижается.
* Значение суммарной емкости между фазой оборудования, установленного на подстанции, а так же отходящих от нее линий, и землей. Скорость нарастания ПВН обратно пропорциональна суммарной емкости фаза - земля на шинах ПС. Однако увеличение емкости на шинах ПС не приводит к снижению скорости ПВН до приемлемых значений.

1. Разработаны рекомендации по снижению скорости и пиковых значений ПВН на контактах выключателей, позволяющие использовать малозатратный метод снижения токов КЗ в сетях высокого напряжения с помощью ТОР.

Рекомендуется ограничивать скорости нарастания и пикового значения ПВН путем использования демпфирующих цепей, состоящих из последовательно соединенных конденсатора и резистора, подключенных либо между выводами реактора со стороны выключателя и землей, либо параллельно ТОР.

В качестве демпфирующей цепи рекомендуется использовать кабельную линию, проложенную между выключателем и ТОР, емкость которой достаточна для снижения частоты переходного процесса, а, следовательно, и скорости ПВН до требуемого уровня, либо устройство, защищенное решением о выдаче патента Российской Федерации на полезную модель «Устройство для ограничения переходных восстанавливающихся напряжений в цепях с токоограничивающими реакторами».

1. Результаты работы были использованы в методических указаниях по построению реактированной сети ОАО «МОЭСК» с учетом допустимых уровней перенапряжений, разработка которых выполнена в рамках инновационной деятельности ОАО «МОЭСК». Результаты работы были учтены электротехническим отделом ЗАО ХК «Стройэнергосервис» при разработке проектной и рабочей документации, что подтверждается актом внедрения от 18.10.2013 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bellei Т.A., Camm Е.Н., Ransom G. Current-Limiting Inductors used in Capacitor Banks Applications and Their Impact on Fault Current Interruption // Proceedings of the 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference, Atlanta, Georgia, Oct. 28 - Nov. 2, 2001. Vol. 1. P. 603-607. DOI: 10.1109/TDC.2001.971302.
2. J. F. Amon, P. C. Fernandez, E. H. Rose, A. D’Ajuz and A. Castanheira. Brazilian Successful Experience in the Usage of Current Limiting Reactors for Short-Circuit Limitation. International Conference on Power Systems Transients (IPST ’05), Montreal, 19-23 June 2005, pp. 215- 220.
3. Методические указания по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защите от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше. -М: СПО ОРГРЭС, 1998.
4. Shoup D., Paserba J., Colclaser Jr R.G., Rosenberger Т., Ganatra L., Isaac C. Transient recovery voltage requirements associated with the application of current-limiting series reactors // Electric Power Systems Research. 2007. Vol. 77, iss. 11. P. 1466-1474. DOI: <http://dx.doi.Org/10.1016/j.epsr.2006.08.030>.
5. Santos D., Cabriel G. Transient recovery voltages when clearing a fault in presence of series limitation reactors // IPST’99 - International Conference on Power Systems Transients. 20-24 June, 1999. Budapest, Hungary. 1999. Available at: <http://www.ipst.org/techpapers/1999/IPST99_Paper_089.pdf>, accessed 01.06.2013.
6. IEEE, Standard for Requirements, Terminology and Test Code for Dry- Type Air Core Series Connected Reactors, IEEE Std. C57.16-2011, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, NJ, 2011.
7. ГОСТ 687-78: Выключатели переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия-М: Госстандарт СССР, 1980.-108 с.
8. ГОСТ Р 52565-2006. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия. Издание официальное. - Москва: Стандартинформ, 2007.
9. ANSI, AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis-Preferred Ratings and Related Required Capabilities, ANSI C37.06-2000, American National Standards Institute, 2000.
10. International Electrotechnical Commission (IEC), High-voltage switchgear and controlgear - Part 100: High-Voltage Alternating-Current Circuit Breakers, 62271-100, 2001, p. 199.
11. Васильев А.А., Крючков И.П., Наяшкова Е.Ф. Электрическая часть станций и подстанций. Учебник для вузов. Под ред. А.А. Васильева. - 2-е изд., переработ. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
12. Хармалунд П. Восстанавливающееся напряжение на контактах выключателя. М.: Государственное энергетическое издательство. 1963.
13. Скляревский Ю.И. Определение параметров восстанавливающихся напряжений при отключении коротких замыканий. Москва, 1977 г.
14. Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. Электрическая часть электростанций и подстанций. Москва, Энергоатомиздат, 1989.
15. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений / Под научной редакцией Н.Н. Тиходеева. - 2-е изд. - СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. -355 с.
16. Челазнов А.А. Статистические основы эксплуатационной надежности выключателей в режиме отключения токов короткого замыкания. Автореф. дис... докт. техн. наук. /НГТУ - Новосибирск, 2000. - 44 с.
17. Славин Г.А. Восстанавливающиеся напряжения на контактах выключателей при отключении коротких замыканий.-М.: Энергия, 1968, 190с.
18. Акодис М.М., Корзун П.А. Определение восстанавливающихся напряжений на контактах выключателя. М.: Энергия, 1968. 192 с.