

На правах рукописи



Карпов Алексей Сергеевич

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ НОРМАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ
ПРОЦЕССОВ РАБОТЫ УПРАВЛЯЕМЫХ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ В СОСТАВЕ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: Евдокунин Георгий Анатольевич,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Кощев Лев Ананьевич, доктор технических наук, профессор, ОАО "НТЦ ЕЭС", заместитель генерального директора - научный руководитель

Сатанин Владислав Владимирович, кандидат технических наук, ЗАО "Роспроект", руководитель группы противоаварийной автоматики и расчетов режимов

Ведущая организация: ОАО "Северо-Западный энергетический инжиниринговый центр" (ОАО "СевЗап НТЦ")

Защита состоится «13» декабря 2013 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «08» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.11
кандидат технических наук, доцент



Попов М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы (УШР) находят все более широкое применение в энергосистемах России и за рубежом (число установленных реакторов напряжением 110 кВ и выше уже превысило 80 единиц). Основное назначение таких реакторов – плавное регулирование реактивной мощности для поддержания заданного уровня напряжения без коммутаций реакторных выключателей. УШР, установленные на воздушных линиях, обеспечивают ограничение вынужденной составляющей напряжения на линии при ее одностороннем включении. УШР, установленные на электропередачах большой протяженности, позволяют повысить предел передаваемой активной мощности по условию статической устойчивости.

Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы уже зарекомендовали себя как эффективные и надежные устройства. Однако в процессе эксплуатации зафиксирован ряд случаев повреждения силовых элементов системы подмагничивания (защитных варисторов и тиристорных полупроводниковых преобразователей) при штатных включениях УШР в сеть. Первоначально указанная проблема решалась увеличением энергоемкости соответствующих защитных устройств, однако подобное техническое мероприятие не позволяло полностью исключить подобные повреждения. В этой связи важной задачей является выявление истинных причин появления недопустимых по величине и длительности воздействий на силовые элементы системы подмагничивания.

Особенности конструкции и принципа действия управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов по сравнению с другим трансформаторным оборудованием несомненно необходимо учитывать при разработке релейной защиты от внутренних повреждений. Для управляемых шунтирующих реакторов, как и для любого другого трансформаторного оборудования, одним из самых распространенных видов внутренних повреждений являются витковые замыкания в обмотках. Значения токов при витковых замыканиях сильно зависят от числа замкнувшихся витков и места повреждения. Малое число замкнувшихся витков может приводить к незначительному увеличению тока со стороны источника питания, поэтому подобные витковые замыкания достаточно сложно обнаружить. Кроме того, характер токов в различных обмотках препятствует реализации классических токовых защит, обычно применяемых для трансформаторов. При этом следует отметить, что общепринятые методы расчетов процессов при витковых замыканиях в обмотках трансформаторов зачастую неприменимы для аналогичных расчетов в управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторах. Поэтому важной технической задачей является анализ чувствительности релейной защиты от внутренних повреждений, связанных с

витковыми замыканиями в обмотках управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов.

Управляемые шунтирующие реакторы до настоящего времени устанавливались только на промежуточных подстанциях. Установка УШР на шинах электрической станции позволяет добиться снижения потерь в статорных и роторных цепях электрических машин, в их системах возбуждения за счет возможности плавного регулирования потребления реактивной мощности УШР, обеспечивая тем самым работу генератора с оптимальным (по критерию суммарных потерь электропередачи, включая потери на возбуждение генератора) коэффициентом мощности во всех режимах работы линий электропередачи в диапазоне от малых нагрузок до мощности, близкой к натуральной. В этой связи актуально проведение исследований, направленных на определение условий указанного применения УШР и настройки соответствующих систем автоматического управления.

Цели и задачи работы

Целями диссертационной работы являются совершенствование методики имитационного моделирования управляемых шунтирующих реакторов и исследование нормальных и аварийных процессов их работы в составе электроэнергетических систем.

Поставленные цели достигаются решением следующих задач:

1. Разработка уточненной математической модели трехфазного управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора на основе анализа распределения магнитного поля в элементах его магнитной системы и выполнение расчетов переходных процессов в нормальных и аварийных режимах работы энергосистемы;
2. Разработка методики математического моделирования управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора для исследования аварийных режимов работы УШР при внутренних повреждениях, связанных с витковыми замыканиями в обмотках;
3. Исследования переходных процессов при витковых замыканиях в обмотках управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов для выявления основных признаков данного вида повреждения и оценка чувствительности применяемых способов релейной защиты УШР;
4. Выявление основных причин возникновения аварийных повреждений тиристорных блоков системы управления при штатном включении управляемых шунтирующих реакторов в сеть и разработка рекомендаций по предотвращению этих повреждений;
5. Проведение оценки эффективности и целесообразности применения управляемых шунтирующих реакторов на шинах электрических станций.

Научная новизна

1. Разработана уточненная методика имитационного моделирования для анализа процессов работы управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов в составе электроэнергетических систем, основанная на совместном учете процессов в прилегающей сети и результатов расчета распределения магнитного поля в элементах магнитной системы УШР;
2. Разработана методика имитационного моделирования управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов для анализа переходных процессов при внутренних повреждениях, связанных с витковыми замыканиями в их обмотках и произведена оценка чувствительности применяемых способов релейной защиты УШР;
3. Определены основные причины возникновения повреждений тиристорных блоков системы управления УШР и разработаны практические рекомендации по их предотвращению;
4. Обоснована эффективность и целесообразность применения управляемых шунтирующих реакторов на шинах электрических станций.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработана математическая модель управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов, расчет (уточнение) параметров которой выполняется на основании анализа картины распределения магнитного поля в элементах магнитной системы в различных нормальных и аварийных режимах работы устройств в составе электроэнергетических систем;
2. Разработана методика имитационного моделирования аварийных режимов, связанных с витковыми замыканиями в обмотках управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора. На основе соответствующего математического обеспечения выполнена оценка чувствительности релейной защиты управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов при витковых замыканиях в их обмотках, а также даны рекомендации по выбору уставок соответствующих устройств релейной защиты;
3. Разработаны практические рекомендации по ограничению недопустимых по величине и длительности воздействий на тиристорные блоки системы управления;
4. Обоснована эффективность и целесообразность применения управляемых шунтирующих реакторов на шинах электрических станций. Даны практические рекомендации по координации настроек различных типов автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов и регуляторов УШР.

Методология и методы исследования

Теоретические исследования базируются на основных положениях теории электромагнитного поля, электрических и магнитных цепей и теории автоматического управления. В основу разработанных математических моделей управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов входит система алгебро-дифференциальных уравнений, решение

которой осуществляется апробированными методами численного интегрирования, обеспечивающими достоверность полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика имитационного моделирования для анализа процессов работы управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов в составе электроэнергетических систем, основанная на совместном учете процессов в прилегающей сети и результатов расчета распределения магнитного поля в элементах магнитной системы УШР;

2. Методика имитационного моделирования управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора для расчетов аварийных режимов, связанных с витковыми замыканиями в различных обмотках, результаты применения которой могут использоваться для анализа чувствительности релейной защиты от внутренних повреждений. Применение классической методики расчета процессов при внутренних повреждениях, основанной на использовании уравнений многообмоточных трансформаторов при условии линейности рассматриваемой системы неприменимо для выполнения аналогичных расчетов в случае управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов;

3. Основные причины возникновения повреждений тиристорных блоков системы управления УШР, а также практические рекомендации по ограничению указанных недопустимых по величине и длительности воздействий.

4. Обоснование эффективности применения управляемых шунтирующих реакторов на шинах электрических станций, обеспечивающих снижение величины потерь активной мощности в статорных и роторных цепях синхронных генераторов, а также - лучших по отношению к аналогичному применению неуправляемых шунтирующих реакторов той же мощности показателей качества электромеханических переходных процессов и большего предела статической аperiodической устойчивости.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Обоснованность и достоверность научных результатов базируется на основных положениях теории электрических и магнитных цепей и теории автоматического управления. Решение систем алгебро-дифференциальных уравнений произведено с помощью апробированных методов численного интегрирования. Разработанные модели управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора верифицированы по данным завода-изготовителя электротехнического оборудования.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» (Екатеринбург, 2010 г.); Международная научно-методическая конференция «Высокие технологии и инновации в национальных

исследовательских университетах» (Санкт-Петербург, 2012 г.); III Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» (Екатеринбург, 2012 г.).

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 3 работы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций, и 1 монография.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 61 наименования. Основная часть работы изложена на 171 страницах, включает 74 рисунка, 9 таблиц и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, научная новизна, практическая значимость работы, сформулированы цели и задачи исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится описание принципа действия и методики имитационного моделирования управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора класса напряжения 500 кВ. Методика моделирования основана на совместном учете процессов в прилегающей сети и результатов расчета распределения магнитного поля в элементах магнитной системы УШР. Упрощенная конструкция однофазного управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора РОДЦУ-60000/500 представлена на рисунке 1.

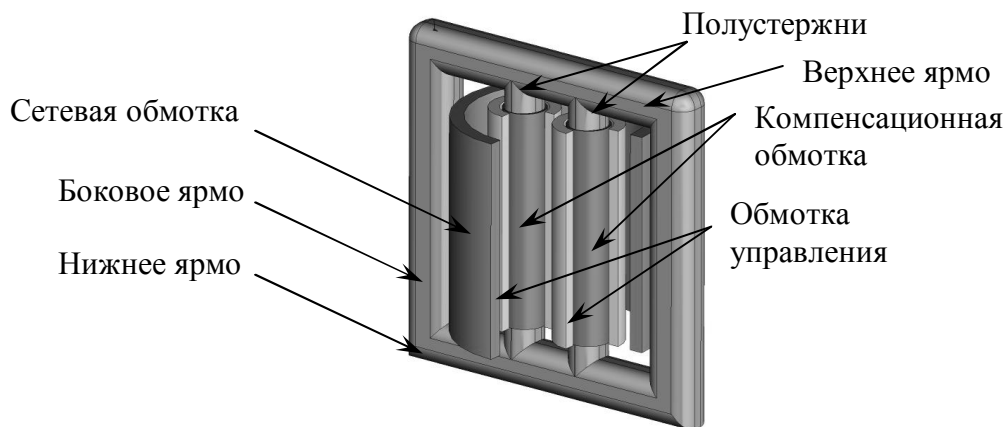


Рисунок 1 – Упрощенная конструкция однофазного управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора

В нагрузочных режимах работы управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора выпрямленный ток, протекая по встречно включенным секциям обмотки управления, вызывает в полустержнях разнонаправленные постоянные магнитные потоки, которые, суммируясь с переменной составляющей магнитного потока, обеспечивают изменение степени насыщения магнитной системы, тем самым осуществляя основной принцип работы устройства.

Приведенной на рисунке 1 магнитной системе однофазного управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора, может быть поставлена в соответствие ее схема замещения, представленная на рисунке 2. Схема замещения включает в себя как линейные, так и нелинейные магнитные сопротивления.

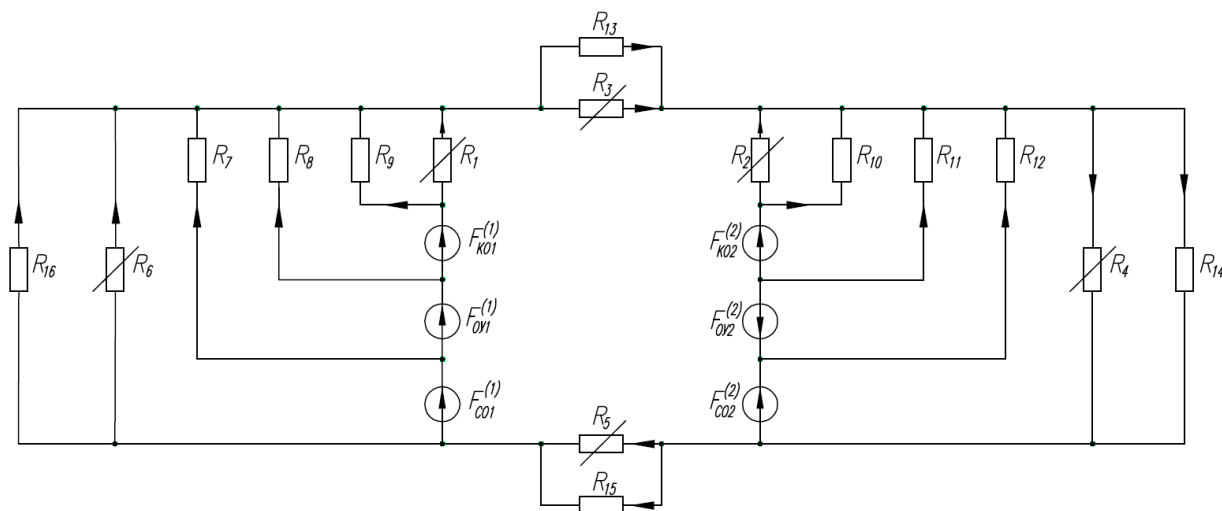


Рисунок 2 - Схема замещения магнитной системы однофазного управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора

Для схемы замещения, представленной на рисунке 2, записываются уравнения по первому и второму законам Кирхгофа для магнитной цепи. Важной задачей при этом является корректное определение параметров магнитных сопротивлений, эквивалентирующих пути замыкания магнитных потоков между обмотками. В качестве основного принципа выбора местоположения тонкого проводящего слоя выбрано равенство средней величины индукции в области окна магнитопровода, занимаемой обмотками для случая обмоток реальной толщины и тонких проводящих слоев. Показано, что выбор по разработанной методике положения тонких обмоток, и, соответственно, параметров магнитных сопротивлений соответствующих путей замыкания магнитных потоков рассеяния, сцепленных с обмотками, однозначен и не требует дополнительной верификации.

Во второй главе приводится методика имитационного моделирования аварийных режимов работы при внутренних повреждениях, связанных с витковыми замыканиями в обмотках управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора. Картина распределения магнитной индукции в магнитопроводе однофазного УШР класса напряжения 500 кВ при замыкании 21 катушки (приблизительно 1/3 всех витков) сетевой обмотки представлена на рисунке 3.

Разработанная ранее магнитная схема замещения однофазного управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора не применима для выполнения расчетов витковых

замыканий в СО, т.к. не учитывает неравномерность распределения магнитной индукции по высоте элементов магнитной системы (полустержней и боковых ярм).

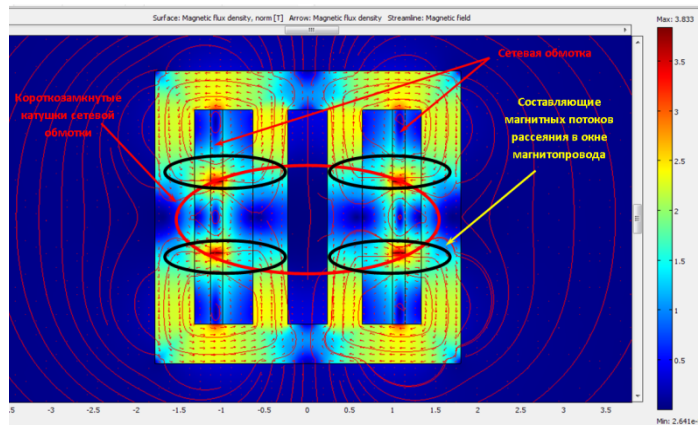


Рисунок 3 - Распределение магнитной индукции в магнитопроводе однофазного УШР при разомкнутых КО и ОУ при замыкании 21 катушки сетевой обмотки

На рисунке 4 представлена схема замещения магнитной системы фазы УШР для расчетов процессов при витковых замыканиях в обмотках.

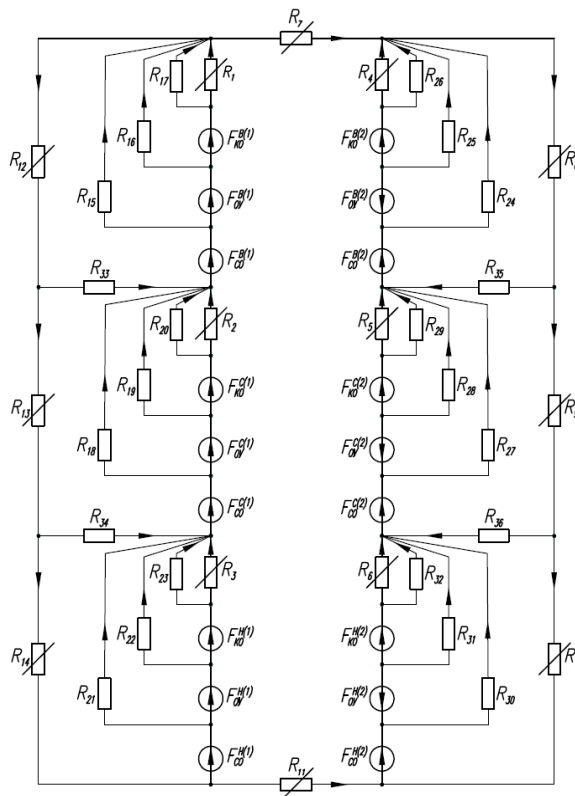


Рисунок 4 – Схема замещения фазы УШР для расчета процессов при витковых замыканиях в обмотках

Порядок формирования системы уравнений для случая расчетов процессов при витковых замыканиях аналогичен рассмотренному в первой главе. На рисунке 5 представлен результат расчета тока сетевой обмотки УШР и тока короткозамкнутой части обмотки при замыкании

одной катушки (22,74 витка) в момент времени t_1 из режима потребления номинальной реактивной мощности.

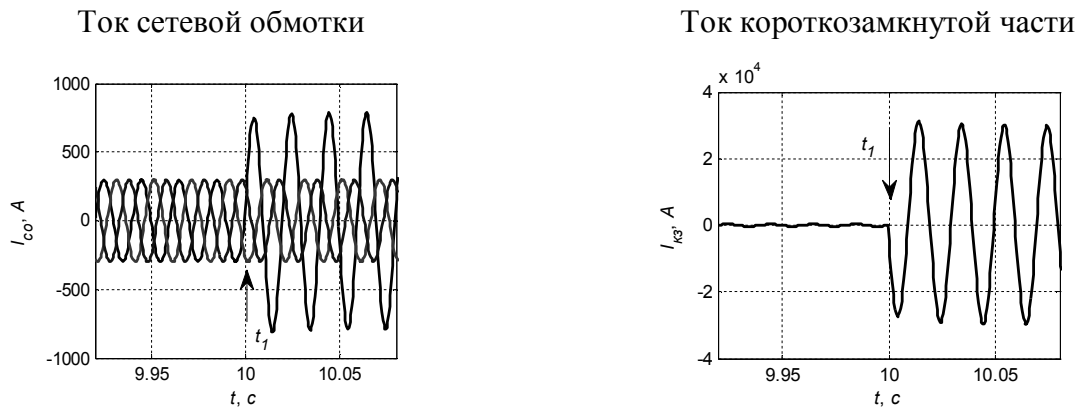


Рисунок 5 - Ток сетевой обмотки и ток короткозамкнутой части обмотки при замыкании одной катушки СО

Показано, что при витковых замыканиях в сетевой обмотке независимо от режима работы УШР в поврежденной фазе возникает ток, превосходящий токи неповрежденных фаз. Проведенные расчеты при витковых замыканиях во вторичных обмотках (обмотке управления и компенсационной обмотке) показали, что в компенсационной обмотке УШР, соединенной в треугольник, возникают токи первой гармонической составляющей. На рисунке 6 представлены зависимости действующего значения первой гармоники в токе компенсационной обмотки от числа замкнутых витков в обмотке управления и компенсационной обмотке.

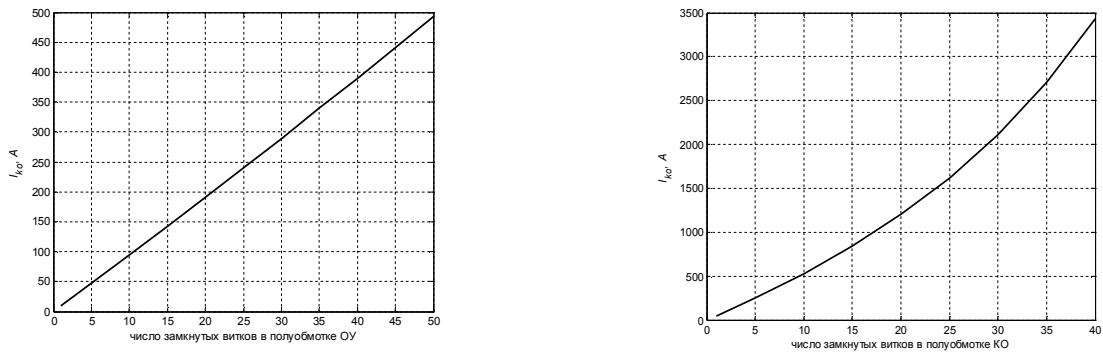


Рисунок 6 – Зависимость действующего значения тока первой гармоники в токе компенсационной обмотки от числа замкнутых витков в обмотке управления и компенсационной обмотке

На этом принципе построена максимальная токовая защита (МТЗ) компенсационной обмотки, предусмотренная в каждой фазе, с предварительной фильтрацией третьей и высших гармонических составляющих.

В третьей главе выполнен анализ причин появления перенапряжений, действующих на полупроводниковый преобразователь и изоляцию обмотки управления в различных режимах

работы УШР номинальным напряжением 500 кВ, а также расчет энергии коммутационных импульсов для определения требований к необходимой энергоемкости защитных устройств.

В процессе эксплуатации УШР при их включении в сеть зафиксирован ряд случаев повреждения силовых элементов системы подмагничивания (защитных варисторов и тиристорных полупроводниковых преобразователей). Большая часть повреждений элементов системы подмагничивания связана с недостаточной защищенностью полупроводниковых преобразователей от коммутационных перенапряжений.

Для понимания возможных причин появления повышенных значений напряжения на выводах ОУ воспользуемся уравнением (1), которое связывает ток i_{OY} и напряжение U_{OY} полуобмоток управления с соответствующими магнитными потоками из схемы замещения магнитных цепей УШР, представленной на рисунке 2.

$$U_{OY} = i_{OY} \cdot R_{OY} + W_{OY}/2 \cdot (\Phi'_1 + \Phi'_8 + \Phi'_9) - W_{OY}/2 \cdot (\Phi'_2 + \Phi'_{10} + \Phi'_{11}) \quad (1)$$

Основной предполагаемой причиной появления опасных коммутационных перенапряжений на выводах обмотки управления УШР следует считать различие начальных значений потоков в полустержнях при включении устройства в сеть.

В качестве примера на рисунке 7 представлен результат расчета переходного при включении УШР при ненулевых разнонаправленных остаточных индукциях магнитной системы в момент прохождения напряжения фазы «А» через ноль. Видно, что напряжение на выводах ОУ при такой коммутации достигает значения 20 кВ, т.е. будет неизбежен выход из строя полупроводникового преобразователя, поскольку допустимое обратное напряжение для тиристорных составляет всего 2,5 кВ.

Из рисунка 8 видно, что производные потоков полустержней в переходном процессе установления нового режима существенно отличаются друг от друга, что согласно (1) и вызывает перенапряжения на отключенном преобразовательном блоке. Максимумы перенапряжений на выводах обмотки управления (рисунок 7) соответствуют наибольшему различию между производными потоков полустержней (рисунок 8).

Показано, что наибольшее влияние на величину перенапряжений оказывают начальные ненулевые значения индукции в магнитной системе УШР (зависят от предшествующего отключению режима нагрузки УШР).

Так, при нагрузке УШР, составляющей 50% от номинальной мощности, даже в случае неудачной коммутации УШР в момент прохождения напряжения сети фаз через ноль, максимальная величина импульса перенапряжения составляет 25 кВ.

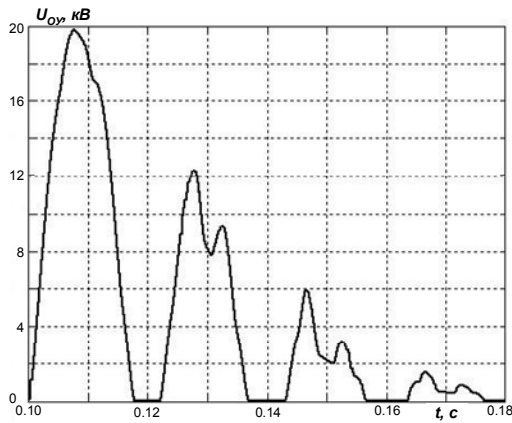


Рисунок 7 - Напряжение на выводах ОУ при включении УШР

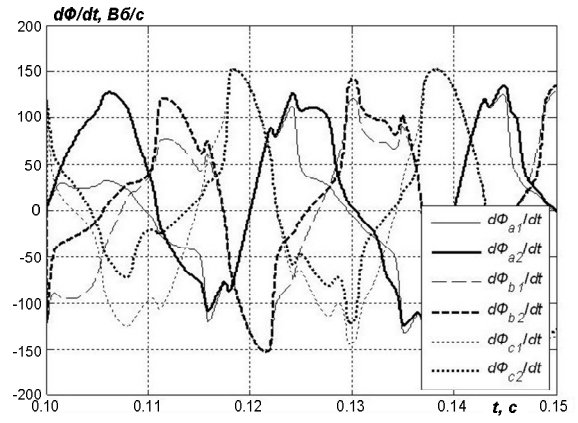


Рисунок 8 - Производные потоков полустержней различных фаз при включении УШР в сеть

Одним из мероприятий, позволяющих исключить появление опасных перенапряжений на выводах ОУ, является предварительное подмагничивание УШР. Применение предварительного подмагничивания перед включением УШР в сеть позволяет избежать появления опасных значений перенапряжений на выводах обмотки управления.

В четвертой главе выполнена оценка влияния управляемого шунтирующего реактора, установленного на шинах электрической станции, на показатели статической устойчивости режимов электропередачи.

На электрических станциях, по-прежнему, применяются только нерегулируемые и, в основном, практически некоммутируемые реакторы (ШР). Такие реакторы постоянно нагружают генераторы реактивной мощностью вне зависимости от режима работы электропередачи, начиная от режима ее малых нагрузок до расчетных и предельных. Излишняя нагрузка генераторов ведет к существенным потерям в статорных и роторных цепях электрических машин, в их системах возбуждения, в повышающих трансформаторах блоков. Показано, что установка УШР на шинах электрической станции позволяет добиться снижения потерь в статорных и роторных цепях электрических машин, в их системах возбуждения за счет возможности плавного регулирования потребления реактивной мощности УШР, обеспечивая тем самым работу генератора с оптимальным коэффициентом мощности, во всех режимах работы линий электропередач в диапазоне от малых нагрузок до мощности, близкой к натуральной. Критерием оптимальности является минимум потерь электропередачи, включая потери на возбуждение генератора, при учете ограничений по устойчивости.

В главе определены показатели аperiodической и колебательной устойчивости электропередач с ШР и УШР (при различном быстродействии), т.е. найдены корни характеристического уравнения линеаризованной модели (представлены в таблице 1). Выбор коэффициентов стабилизации на АРВ генератора выполнен на основании построения кривых

D-разбиения. Выбранные коэффициенты стабилизации отвечают максимальным затуханиям основной колебательной составляющей переходного процесса, и в этом смысле они могут быть названы оптимальными.

Таблица 1 – Корни характеристического уравнения линеаризованной модели

ШР	УШР
$-2,5501 \pm 6,6168i$	$-2.3998 \pm 6.7793i$
-0.4637	-0.1971

Качество демпфирования переходного процесса в маловозмущенном режиме зависит не только от корней характеристического уравнения, но и от величин начальных и конечных значений составляющих движения. На рисунке 9 отчетливо видно, что, несмотря на более быстрое затухание аperiodической составляющей движения в случае ШР (сплошная кривая), качество переходного процесса здесь хуже, чем в случае УШР (пунктирные кривые) при меньшем по модулю аperiodическом корне.

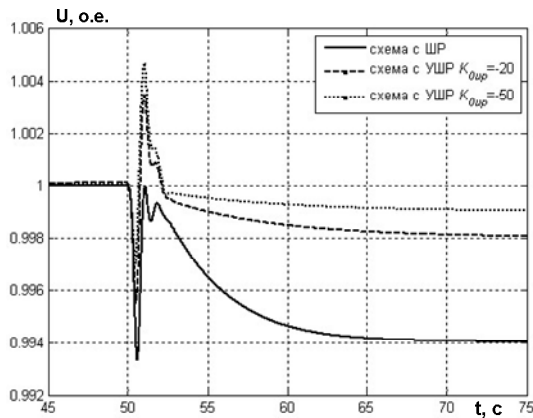


Рисунок 9 – Переходный процесс изменения напряжения на шинах электрической станции при малых (но конечных) возмущениях на электропередаче при набросе передаваемой активной мощности

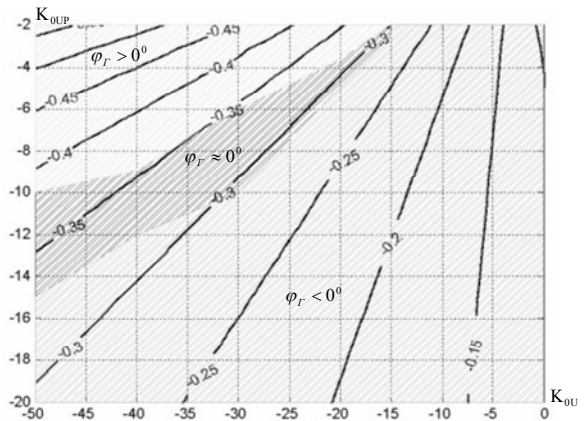


Рисунок 10 – Координация настроек регуляторов генератора K_{0u} и УШР K_{0up} для обеспечения заданного режима генератора по реактивной мощности (зоны разного цвета), определяемых с помощью кривых равного затухания основной составляющей аperiodической движения

Независимо от настроек АРВ генератора, отклонение напряжения при возмущении режима электропередачи (например, при набросе мощности) в случае УШР принципиально меньше (ближе к уставке), чем в случае ШР, что физически объясняется тем, что проводимость УШР после данного возмущения начнет уменьшаться (что способствует повышению напряжения), а проводимость ШР останется прежней.

Далее в главе показано, что в случае применения систем регулирования возбуждения синхронных генераторов со статическим отклонением, для обеспечения минимального

значения реактивной мощности на зажимах генератора в рабочих режимах необходима правильная координация настроек АРВ генератора и регулятора УШР (рисунок 10).

При применении автоматических регуляторов возбуждения с ПИ-каналом регулирования на генераторах необходимо применять астатический регулятор проводимости УШР, позволяющий изменять его мощность в зависимости от текущего режима передачи активной мощности по ЛЭП.

В заключительной части главы выполнены сравнительные расчеты предельной передаваемой мощности по условию обеспечения статической аperiodической устойчивости схем с ШР и УШР, установленными на шинах электрической станции. Предельная по аperiodической устойчивости активная мощность в случае УШР, оказывается больше, чем в случае ШР, что объясняется снижением потребления реактивной мощности УШР в предельных режимах и повышением амплитуды угловой характеристики мощности (предела передаваемой мощности по условию аperiodической устойчивости).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана уточненная методика имитационного моделирования для анализа процессов работы управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов в составе электроэнергетических систем, основанная на совместном учете процессов в прилегающей сети и результатов расчета распределения магнитного поля в элементах магнитной системы УШР. Математическая модель управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов разработана с учетом реальной конструкции магнитопровода и свойств электротехнической стали. Часть исходных данных может быть вычислена на основании данных завода-изготовителя, другая – на основании результатов расчета распределения магнитного поля в элементах магнитной системы управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов.

В работе показано, что корректно выбранное расположение тонкого проводящего слоя полностью эквивалентно обмотке реальной толщины в части распределения магнитной индукции в элементах магнитопровода. Основным принципом при выборе местоположения является равенство средней индукции в области окна магнитопровода, занимаемой обмоткой, для случая обмоток реальной толщины и их представления тонкими проводящими слоями.

2. На основе результатов расчета распределения магнитного поля в элементах магнитной системы УШР в аварийных режимах работы разработана математическая модель и соответствующее обеспечение для выполнения расчетов процессов при внутренних повреждениях, связанных с витковыми замыканиями в различных обмотках УШР.

3. С применением разработанной математической модели выполнены расчеты переходных процессов при витковых замыканиях в различных обмотках управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов. На основании проведенных расчетов оценена

чувствительность релейной защиты от внутренних повреждений. В работе показано, что витковые замыкания во вторичных обмотках (в обмотке управления и компенсационной обмотке) сопровождаются появлением первой гармонической составляющей в компенсационной обмотке - рисунок 6.

4. В работе впервые выявлена основная причина повреждений тиристорных блоков системы управления УШР при включении устройства в сеть. Причиной появления опасных перенапряжений на выводах обмотки управления является отличие производных потоков полустержней при включении устройства в сеть при разомкнутой обмотке управления. В этом случае напряжение на выводах обмотки управления может достигать 45 кВ (для случая коммутации трехфазного УШР). При этом максимальная величина энергии, выделяемой в шунтирующих резисторах, может достигать 500 кДж при отсутствии защитных устройств и предшествующем отключении УШР из режима потребления номинальной мощности. Указанные воздействия недопустимы для тиристорных блоков системы управления, изоляции обмотки управления и шунтирующих резисторов. Наиболее простым и эффективным мероприятием по исключению подобных явлений при включении устройства в сеть является применение предварительного подмагничивания магнитной системы УШР.

5. Обоснована эффективность применения управляемых шунтирующих реакторов на шинах электрической станции. Проведенные расчеты показали, что сниженное значение модуля основного вещественного корня, имеющее место при замене ШР на УШР, не приводит к ухудшению качества переходных процессов при малом возмущении режимов электропередачи. Для обеспечения работы генераторов с оптимальным коэффициентом мощности во всех режимах работы электропередачи – от режима холостого хода до режима передачи натуральной мощности - требуется координации настроек различных типов автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов и регуляторов УШР. При использовании регуляторов возбуждения с пропорционально-интегральным законом регулирования необходимо применять астатический регулятор проводимости УШР, позволяющий изменять его мощность в зависимости от текущего режима передачи активной мощности по ЛЭП. Предельная по апериодической устойчивости активная мощность в случае УШР, оказывается больше, чем в случае ШР, что объясняется снижением потребления реактивной мощности УШР в предельных режимах и повышением амплитуды угловой характеристики мощности.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Евдокунин Г. А., Карпов А. С. Компьютерное моделирование управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды всероссийской научно-технической конференции: сборник статей. В 2 т. Екатеринбург: УрФУ, 2010. Т. 1., с. 154-158.
2. Дмитриев М. В., Евдокунин Г. А., Карпов А. С., Николаев Р. Н., Шескин Е. Б. Компьютерное моделирование управляемых шунтирующих реакторов различных типов и сравнение их технических характеристик // Энергетик, №3, 2011 г. – с. 27-31.
3. Дмитриев М. В., Николаев Р. Н., Карпов А. С. Учет магнитного гистерезиса при моделировании силовых трансформаторов и реакторов // Энергетик, №1, 2012 г. – с. 16-19.
4. Карпов А. С. Методика создания компьютерных моделей управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов для расчета электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах. Материалы Международной научно методической конференции. 9-10 февраля 2012 года, Санкт-Петербург. Том 1. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2012 г., с. 56-61.
5. Карпов А. С. Компьютерное моделирование управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов для расчета электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах // Электрические станции, №7, 2012 г. – с.47-51.
6. Карпов А. С. Оценка влияния управляемого шунтирующего реактора, установленного на шинах электрической станции, на показатели статической устойчивости режимов электропередачи // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды III международной научно-технической конференции: сборник статей. В 2 т. Екатеринбург: УрФУ, 2012. Т.1. 251-255.
7. Евдокунин Г. А., Карпов А. С. Влияние управляемого шунтирующего реактора, установленного на шинах электрической станции, на показатели статической устойчивости режимов электропередачи // Энергоэксперт, №1, 2013 г. – с. 44-51.
8. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы / М. В. Дмитриев, А. С. Карпов, Е. Б. Шескин, А. Г. Долгополов, Д. В. Кондратенко / Под ред. Г. А. Евдокунина. – СПб.: Родная Ладога, 2013. – 280 с.