

ОТЗЫВ

официального оппонента – кандидата технических наук, доцента
Булатова Юрия Николаевича на диссертацию
Иванова Дмитрия Михайловича на тему «Моделирование и анализ переходных процессов при ограничении тока короткого замыкания в электроэнергетической системе с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика

1. Актуальность диссертационной работы

Одной из ключевых задач современной электроэнергетики является обеспечение эффективного ограничения и координации уровней токов короткого замыкания (КЗ), которые вызывают повышенный нагрев проводников и контактов, способных ускорить старение и разрушение изоляции. Вышеуказанная проблема некоторым образом решается традиционными методами и техническими решениями, однако, рост генерирующих мощностей, задачи развития и модернизации электросетевого комплекса, требуют новых решений. Развитие технологий сверхпроводимости открывает новые возможности для улучшения энергетической инфраструктуры, позволяя создавать компактные высоковольтные устройства, обладающие низким уровнем сопротивления и минимальными потерями.

Несмотря на прогресс в области сверхпроводимости, многие аспекты поведения сверхпроводящих компонентов в условиях аварий остаются слабо изученными. Необходимо учитывать множественность взаимосвязанных факторов, таких как индуктивность обмоток, температура среды, характеристики диэлектриков и режим работы, что ставит перед исследователями сложную многоуровневую задачу.

Применение высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) трансформаторов с целью ограничения максимальных токов КЗ ставит задачу исследования их влияния на переходные процессы, протекающие во время КЗ, и динамическую устойчивость работы синхронных генераторов в электроэнергетической системе (ЭЭС).

Проведение всестороннего научного исследования переходных процессов, возникающих при ограничениях токов КЗ в ЭЭС с использованием сверхпроводящих трансформаторов, обеспечит основу для дальнейшего совершенствования конструкции и внедрения подобного оборудования в практику. Оно позволит разработать алгоритмы автоматического контроля и управления такими системами, предотвратить аварийные ситуации и гарантировать бесперебойное функционирование энергосистемы.

Таким образом, выбранная тема диссертационного исследования является актуальной, что подтверждается текущими потребностями электроэнергетического комплекса.

2. Анализ содержания диссертации

Представленная диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка терминов, списка литературы, состоящего из 105 источников, двух приложений. Общий объем работы составляет 167 страниц, включая 11 таблиц и 111 рисунков.

Во введении изложена общая характеристика работы, приведено обоснование актуальности выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследования, раскрываются научная новизна, практическая ценность результатов, освещается опыт их внедрения и апробации, представлены выносимые на защиту положения.

В первой главе представлен анализ проблемы повышения уровней расчетных токов короткого замыкания в электрических сетях классов напряжений 10 – 220 кВ. Рассмотрены современные технические решения ограничения токов КЗ, при этом, особое внимание уделяется ВТСП трансформаторам, как перспективным устройствам, способным решить вышеизложенную проблему. Критический обзор актуальных исследований показал, что наиболее важными задачами являются разработка методов определения оптимальных параметров и конструкции ВТСП трансформатора, а также исследования влияния ВТСП трансформаторов на режимы работы ЭЭС.

Во второй главе представлено исследование электромагнитных и тепловых переходных процессов при включении силового ВТСП трансформатора на холостой ход и под нагрузкой, а также при КЗ в однофазной сети на выводах вторичной обмотки методами математического и экспериментального моделирования.

Разработана математическая модель, обеспечивающая совместный расчет электромагнитного переходного процесса в электрической сети и теплового процесса в обмотках ВТСП трансформатора с учетом ряда характеристик и факторов: температурной и полевой зависимости критических параметров сверхпроводника, структуры и геометрии ВТСП-ленты, параметров магнитной системы, электрических и тепловых характеристик сети, а также условий криогенного охлаждения.

Математическая модель верифицирована натурными экспериментами с помощью разработанных физических прототипов силовых понижающих ВТСП трансформаторов мощностью 3 кВА и 9 кВА. Результаты исследований показали снижение максимального тока в 2,95 раза. Автором получен критерий возврата сверхпроводящего состояния обмотками ВТСП трансформатора по величине кратности тока КЗ к критическому току ВТСП ленты.

В третьей главе исследована и обоснована возможность применения ВТСП трансформаторов для ограничения ударных токов трехфазного и двухфазного КЗ в распределительных сетях класса напряжения 10-35 кВ. Методами численного моделирования в Matlab/Simulink исследована возможность их применения в режиме АПВ после отключения КЗ резервной защитой. Выявлены факторы, наибольшим образом влияющие на тепловую

стабильность ВТСП лент при ограничении тока и возврате сверхпроводящего состояния.

Представлена зависимость токоограничивающей способности от критического тока и показателя нелинейности вольт-амперной характеристики ВТСП обмоток. На основе результатов исследований предложены критерии, гарантирующие возврат обмоток в сверхпроводящее состояние после устранения аварии.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния ВТСП трансформатора на динамическую устойчивость параллельной работы генераторов в энергосистеме при коротком замыкании, с учетом сохранения тепловой стабильности обмоток ВТСП трансформатора. Результаты выявили, что рост активного сопротивления ВТСП трансформатора при КЗ компенсирует потерю мощности синхронного генератора, положительно влияя на динамическую устойчивость, однако чрезмерное увеличение токоограничивающего сопротивления (например, при перегреве обмоток или при некорректном проектировании ВТСП трансформатора) приводит к потере устойчивости.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложениях представлены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и акты о внедрении результатов диссертационной работы.

Автореферат диссертации полностью отражает основное содержание диссертационной работы.

3. Соответствие паспорту научной специальности

Содержание диссертации и автореферата соответствует следующим пунктам Паспорта научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика:

П. 12 - «Разработка методов расчета, прогнозирования, оптимизации и координации уровней токов короткого замыкания на электростанциях и в электрических сетях энергосистем»;

П. 14 – «Разработка методов расчета и моделирования установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем и сетей, включая технико-экономическое обоснование технических решений, разработка методов управления режимами их работы».

4. Новизна научных положений и выводов

В диссертационной работе:

1. Впервые разработана математическая модель режимов электроэнергетической системы генератор - ВТСП трансформатор – линия электропередачи – шины приемной энергосистемы, учитывающая в комплексе основные электрические, магнитные, механические и тепловые процессы в элементах электрической сети и ВТСП обмотках трансформатора, особенности охлаждения обмоток жидким азотом, обеспечивающая проведение расчетов для исследования возможностей использования ВТСП трансформатора с целью

эффективного ограничения токов КЗ и обеспечения динамической устойчивости параллельной работы генераторов в энергосистеме.

2. Впервые показана необходимость совместного учета электромеханических и тепловых переходных процессов в электроэнергетической системе с ВТСП трансформатором при анализе динамической устойчивости параллельной работы генераторов в энергосистеме.

3. Выявлено, что основными факторами возникновения недопустимых перегревов ВТСП обмоток токами включения трансформатора или короткого замыкания в сети являются толщина стабилизирующего слоя ВТСП ленты и режим кипения охлаждающей криогенной жидкости.

4. Выявлено, что увеличение показателя нелинейности вольт-амперной характеристики обмоток ВТСП трансформатора повышает эффективность токоограничивающей функции.

5. Обоснованы условия возврата сверхпроводящего состояния ВТСП трансформатора в зависимости от кратности тока КЗ по отношению к критическому току ВТСП ленты.

Новизна научных положений подтверждаются авторскими свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ и публикациями в ведущих научных изданиях.

5. Методы исследования

При решении задач моделирования и анализа переходных процессов использовались методы численного и экспериментального моделирования. Научные результаты диссертации базируются на основных положениях фундаментальных и прикладных наук, таких как электромагнетизм, математический анализ, теоретические основы электротехники, теория устойчивости, теория эксперимента. Программная реализация разработанных математических моделей выполнена в программно-вычислительном комплексе Matlab/Simulink.

6. Степень обоснованности научных положений и достоверность полученных результатов

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертационной работе, обоснованы соответствующими теоретическими положениями и результатами, полученными методами численного и экспериментального моделирования режимов электроэнергетической системы.

Достоверность проведенных исследований подтверждается сопоставлением результатов численного и имитационного моделирования с результатами физических экспериментов, проведенных в реальной электрической сети с прототипом силового ВТСП трансформатора. Точность расчета переходных процессов подтверждается использованием поверенного оборудования и лицензионного программного обеспечения.

7. Практическая значимость

Результаты работы, включающие практические рекомендации, математическую модель и опытно-экспериментальные образцы ВТСП трансформаторов с токоограничивающей функцией, создают научно-технический задел для разработки промышленных образцов. Внедрение данных разработок в электроэнергетические системы позволит эффективно ограничивать токи КЗ и повысить динамическую устойчивость работы генераторов.

Научные и методические материалы диссертации внедрены в учебный процесс Новосибирского государственного технического университета и Сибирского государственного университета водного транспорта. Эффективность и применимость результатов подтверждена актами внедрения в деятельность ООО «ИНПЭС» и ТОО «Павлодарэнергоэкспертиза».

8. Публикация основных результатов диссертационной работы

По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из которых 2 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 6 публикаций в индексируемых международных наукометрических базах Scopus и Web of Science, 4 статьи в прочих изданиях. Автором получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Публикации автора в полной мере отражают основные результаты диссертационного исследования, которые были апробированы на научных конференциях.

9. Замечания

1. В качестве материала для обмоток разработанного прототипа ВТСП трансформатора использовалась ВТСП лента производства российской компании «СуперОкс». Все параметры взяты из описания лент «СуперОкс». В работе не рассматривается чувствительность результатов к изменениям критического тока, теплопроводности, которые могут возникнуть при использовании лент других производителей или при их старении.

2. В главе 2 используется ряд упрощающих допущений (например, линеаризованные магнитные цепи, постоянные свойства материалов) без подробного обсуждения их влияния на точность результатов. Анализ чувствительности, показывающий, как отклонения от этих допущений влияют на ключевые результаты (пиковый ток, повышение температуры), повысил бы достоверность модели.

3. На рис. 2.36 видно, что ток после пика затухает, но не ясно, восстанавливается ли сверхпроводимость. Если да - за какое время? Это важный вопрос для практического применения.

4. На рисунках 2.44 и 2.45 дано сравнение модели и эксперимента по броску тока намагничивания трансформатора, которое показывает хорошее совпадение результатов (отклонение 0,72% и 1,99%). Однако не показано

сравнение модели и эксперимента в режиме КЗ, особенно по форме тока и времени перехода в резистивное состояние.

5. Утверждение о том, что трансформатор возвращается в сверхпроводящее состояние в течение 0,2 секунды, основано исключительно на снижении температуры. В нём не учитывается необходимое восстановление магнитного поля, возможное остаточное сопротивление или влияние повторяющихся циклов сбоев на криогенную систему. Оценка времени восстановления не имеет единых критериев.

6. Такие термины, как «ВТСП трансформатор», «трансформатор на основе ВТСП», «ВСТП», используются как взаимозаменяемые, что может запутать. Желательно ввести в СПИСОК ТЕРМИНОВ единое понятие и использовать его.

7. В имитационной модели исследования переходных процессов и динамической устойчивости ЭЭС, показанной на рис.4.5 в диссертации и на рис.18 в автореферате, не учитывалось автоматическое регулирование частоты вращения (АРЧВ) ротора синхронного генератора и модель турбины.

8. Утверждение о том, что ВТСП трансформатор повышает динамическую устойчивость параллельной работы генераторов, не содержит количественных показателей (например, коэффициентов демпфирования, сдвиг угловой характеристики мощности, запас устойчивости).

10. Соответствие диссертации критериям «Положения о присуждении ученых степеней»

Диссертационная работа Иванова Д.М. отвечает требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (в актуальной редакции).

п.9. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой автором предложены научно обоснованные технологические решения, внедрение которых позволяет снизить уровень максимальных токов КЗ в электрических сетях и повысить динамическую устойчивость работы синхронных генераторов в энергосистеме, что имеет существенное значение для развития электроэнергетики.

п.10. Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, свидетельствующие о личном вкладе автора диссертации в науку. В диссертации представлены сведения о практической полезности результатов и рекомендации по использованию научных выводов.

п.11-13. Требования по опубликованию основных результатов диссертации в рецензируемых научных изданиях выполнено: 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 6 статей в международных наукометрических базах Scopus и Web of Science и 4 статьи в прочих изданиях.

п.14. Диссертация соответствует требованию указания ссылок на заимствованные материалы или отдельные результаты.

11. Общее заключение

Диссертационная работа Иванова Дмитрия Михайловича на тему «Моделирование и анализ переходных процессов при ограничении тока короткого замыкания в электроэнергетической системе с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором» является законченной, самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой на актуальную тему, в которой представлены научно обоснованные технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие электроэнергетической отрасли России.

Диссертационная работа Иванова Дмитрия Михайловича соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (в актуальной редакции).

Основываясь на вышесказанном, считаю, что Иванов Дмитрий Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3. Электроэнергетика.

Официальный оппонент,
Заведующий кафедрой «Энергетики»,
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО
государстве:

Булатов Юрий Николаевич

«24» 11 2025 г.

Полное наименование организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Братский государственный университет»

Юридический адрес: 665709, Иркутская область, г. Братск, ул. Макаренко, д. 40

Телефон: 8 (3953) 344-011

Адрес электронной почты: rector@brstu.ru

Озвоб наукен 28.11.2025⁷ Проф. Булатов Ю.Н.
Составляю ознакомлен 28.11.2025г. Кандидат / Иванов Д.М.