

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию **Кароматулло Азизовича Махмудова «Исследование однофазного автоматического повторного включения в четырёхпроводных трёхфазных линиях сверхвысокого напряжения»**, представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3 «Электроэнергетика»

### **1. Структура и объём диссертации**

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». Состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений, списка литературы из 66 наименований. Работа изложена на 133 странице машинописного текста, содержит 78 рисунков и 13 таблиц.

### **2. Актуальность темы диссертации**

Рассматриваемая в диссертации линия имеет повышенную пропускную способность, надёжность и экономичность, что является обоснованием для использования четырёхпроводных трёхфазных линий (ЧТЛ) для выдачи мощности крупных электростанций и создания межсистемных связей.

Для этого необходимо провести большой объём исследований, который, в частности, должен включать обоснование однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) для ликвидации неустойчивых наиболее вероятных однофазных отказов.

### **3. Оценка содержания диссертации**

**Во введении** обосновывается актуальность проведённых в диссертации исследований, включающих разработку математической модели четырёхпроводной трёхфазной линии и сопутствующих элементов, исследование способов ликвидации повреждений на линии в паузу ОАПВ с учётом максимального угла отклонения в динамических переходах. Сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна, практическая ценность, указаны положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** характеризуются линии СВН традиционного типа с позиций пропускной способности и надёжности. Диссертант отмечает недостатки компактных и сверхкомпактных линий, линий с резервной фазой, нетрадиционных линий, в качестве которых рассматриваются шестифазные, управляемые самокомпенсирующиеся и четырёхфазные линии. Основным недостатком вышеназванных линий заключается в том, что при наиболее вероятных однофазных устойчивых отказах линия выходит из строя. Линия с резервной фазой и четырёхфазная линия лишены этого недостатка. Однако существенный недостаток линии с резервной фазой заключается в том, что резервная фаза бывает в работе лишь в кратковременных аварийных режимах. Что касается четырёхфазной ВЛ, то для её функционирования требуется использование специальных трансформаторов Скотта СВН, производство которых отсутствует в мире.

В работе предлагается оригинальная четырёхпроводная трёхфазная линия, имеющая повышенную пропускную способность и надёжность. Эти качества приобретаются путём выполнения одной фазы в виде двух полуфаз для целей резервирования, а обычные фазы оснащаются для симметрирования режима установками продольной компенсации.

**Во второй главе** разрабатываются расчетные схемы и алгоритмы для анализа в паузу ОАПВ восстанавливающихся напряжений и вторичных токов дуги. Расчётная схема содержит в своём составе участки новой линии и дополнительное оборудование, включая шунтирующие реакторы по концам линии, установки продольной компенсации в средней части рабочих фаз, выключатели и элемент, моделирующий дуговое замыкание.

Приводится решение телеграфных уравнений линии в модальных координатах с дальнейшим преобразованием решения к фазным координатам. В результате находятся матричные коэффициенты линии, определяющие режим на произвольном участке линии.

Приводится П-образная схема замещения ЧТЛ, которая в последующем используется при разработке способов осуществления ОАПВ.

В главе рассматривается предложенный диссертантом метод для расчёта вторичных токов дуги.

**Третья глава** посвящена различным способам осуществления ОАПВ для устранения неустойчивых аварий в линии, основанным на использовании нерегулируемых и регулируемых ШР и автоматического шунтирования фазы.

Способ, основанный на применении нерегулируемых ШР, позволяет иметь паузу ОАПВ длительностью 1,2 сек при аварийной ситуации на фазах, а в случае аварий на полуфазах возникает устойчивая дуга, и поэтому необходим перевод линии на трёхфазный режим работы.

Использование управляемых реакторов с пофазно регулируемыми параметрами позволяет выполнить условия для успешного гашения дуги в паузу ОАПВ во всех случаях и обеспечить длительность паузы ОАПВ не более 0,5 сек.

В том случае, когда компенсации зарядной мощности в нормальном режиме осуществляется с помощью нерегулируемых реакторов, в работе для успешного гашения дуги рассматривается ОАПВ с автоматическим шунтированием фазы, позволяющее иметь минимальную длительность паузы ОАПВ 0,5 сек.

**В четвертой главе** показано, что длительность искомой паузы ОАПВ и угол  $\delta$  являются взаимосвязанными параметрами, что требует совместного анализа динамической устойчивости отправной станции и режима на линии в паузу ОАПВ.

Анализ динамической устойчивости расчётной схемы проводится с помощью угловых характеристик для характерных режимов работы.

В диссертации рассмотрен подход для совместного анализа динамической устойчивости отправной станции и режима на линии в паузу ОАПВ с определением зависимости вторичного тока дуги от угла  $\delta$ , найденного в процессе динамического перехода.

**Пятая глава** посвящена усовершенствованию адаптивного ОАПВ. Применяемые в линиях СВН адаптивные ОАПВ снижают вероятность

включения на неустранившееся однофазное повреждение или вновь возникающую дугу, но полностью не исключают такого случая.

В работе рассмотрен способ одностороннего включения линии с той стороны, которая даёт минимальные токи короткого замыкания в случае сохранившегося повреждения. Для этой цели путём предварительных расчётов определяются на линии две зоны, с использованием которых и диктуется, с какой стороны производить одностороннее включение линии.

В диссертации устанавливаются границы зон для линии 500 кВ длиной 500 км и определяются уставки для надёжной идентификации неустранимого повреждения.

**В заключении** приведены главные результаты по диссертации.

**Приложения** содержат акты об использовании результатов диссертационной работы и патенты на изобретения.

#### **4. Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам Паспорта научной специальности 2.4.3. – «Электроэнергетика»:

- пункту 8 – Разработка и обоснование алгоритмов и принципов действия устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики для распознавания повреждений, определения мест и параметров повреждающих (возмущающих) воздействий в электрических сетях;
- пункту 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;
- пункту 17 – Исследования по транспорту электроэнергии переменным и постоянным током, включая проблемы повышения пропускной способности транспортных каналов, разработки и применения FACTS-устройств, накопителей энергии.

#### **5. Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации**

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

## **6. Методы исследования**

В диссертационном исследовании применялись методы теоретических основ электротехники и теории электрических цепей с распределенными параметрами, методы математического моделирования несимметричных процессов в линиях на основе теории матриц, а также основы общей теории переходных электромеханических процессов в электроэнергетических системах.

## **7. Степень обоснованности и достоверности полученных научных положений**

Достоверность научных положений подтверждается корректным использованием математического аппарата теории переходных электромеханических процессов в электрических системах и теории волновых процессов в многопроводных линиях высокого напряжения, обоснованность которых доказана многолетней практикой их применения.

Степень достоверности и обоснованности высокая.

## **8. Научная новизна диссертации:**

1. Созданы математические модели четырёхпроводной трёхфазной линии и другого оборудования, связанного с линией.
2. Предложен графический метод расчета вторичных токов дуги в линиях СВН в режиме бестоковой паузы ОАПВ.
3. Рекомендованы эффективные способы ОАПВ для успешного гашения дуги подпитки, базирующиеся на использовании управляемых шунтирующих реакторов, а также с применением автоматического шунтирования фазы или полуфазы четырёхпроводной трёхфазной линии.
4. Разработан алгоритм, объединяющий исследование динамической устойчивости и режима в четырёхпроводной трёхфазной линии для определения максимального угла отклонения  $\delta$  в паузу ОАПВ.
5. Разработан новый способ реализации адаптивного ОАПВ, основанный на кратковременном одностороннем включении аварийной фазы со стороны соответствующей системы.

## **9. Ценность для практики результатов исследования**

1. Разработана программа для расчета вторичных токов дуги и восстанавливающихся напряжений в паузу ОАПВ в четырёхпроводной трёхфазной линии.
2. Даны рекомендации для осуществления успешного ОАПВ в четырёхпроводных трёхфазных линиях.
3. Предложено техническое решение по осуществлению адаптивного ОАПВ в линиях сверхвысокого напряжения.

## **10. Отличие выполненных исследований от других работ**

В силу новизны рассматриваемого объекта выполненных работ по исследуемой тематике нет.

## **11. Личный вклад автора**

Результаты, приведённые в работе, получены лично автором и при его участии. Диссертант дал обзор традиционных и перспективных линий СВН, предложил графический метод расчета вторичных токов дуги в линиях СВН в режиме бестоковой паузы ОАПВ, обосновал эффективные способы ОАПВ для успешного гашения дуги подпитки, разработал методику для совместного анализа динамической устойчивости и режима на линии в паузу ОАПВ и предложил эффективный способ осуществления адаптивного ОАПВ.

## **12. Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати**

По результатам исследований опубликованы 22 печатных работы, в том числе 4 научных статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендованных изданий ВАК РФ; 5 статей, входящих в наукометрическую базу Web of Science и Scopus; остальные 11 статей в сборниках международных и всероссийских конференций и сборнике научных трудов. Получено 2 патента на изобретение Российской Федерации. Внедрение результатов диссертационного исследования подтверждено тремя актами.

### **13. Соответствие полученных результатов поставленной цели и задачам**

Полученные результаты соответствуют поставленной цели. Сформулированные задачи решены.

### **14. Вопросы и замечания**

1. При коротких замыканиях на фазах, где установлены УПК, на УПК воздействуют повышенные напряжения. Предусмотрена ли защита УПК от этих перенапряжений?

2. При рассмотрении динамической устойчивости выявлено, что при ОАПВ на фазах динамическая устойчивость нарушается, и рекомендуется использовать электрическое торможение для её сохранения. А как быть в том случае, если меры по повышению устойчивости не предусмотрены?

3. В работе не указано, достаточно ли быстродействие управляемых ШР для нужного изменения их параметров при переходе от нормальной схемы к аварийной.

4. При осуществлении ОАПВ с использованием автоматического шунтирования фазы возможен отказ шунтирующего выключателя с одной из сторон. Достаточно ли будет включения шунтирующего выключателя только с одной стороны для успешного гашения вторичной дуги?

5. При одностороннем включении при осуществлении адаптивного ОАПВ в режиме максимальных нагрузок, когда ШР отключены, в конце линии возникают перенапряжения. Каким образом линия защищается от этих перенапряжений?

### **15. Соответствие диссертации критериям «Положения о присуждении учёных степеней»**

Диссертационная работа Махмудова К.А. отвечает требованиям соответствующих п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г.

## 16. Заключение

Приведённые вопросы и замечания не ставят под сомнение актуальность и значимость диссертации Махмудова К.А. Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой на основании выполненных автором исследований представлено решение актуальной задачи по обоснованию однофазного автоматического повторного включения в четырёхпроводных трёхфазных линиях сверхвысокого напряжения.

Диссертация написана грамотно, автореферат и публикации автора полностью раскрывают её содержание. Работа прошла достаточную апробацию на международных и всероссийских конференциях.

Считаю, что представленная работа «Исследование однофазного автоматического повторного включения в четырёхпроводных трёхфазных линиях сверхвысокого напряжения» соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 2.4.3 «Электроэнергетика», а её автор Кароматулло Азизович Махмудов заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по названной специальности.

### Официальный оппонент

доктор технических наук,  
профессор, профессор  
Электроэнергетически  
электротехники  
Федерального государс  
бюджетного образоват  
учреждения высшего о  
«Сибирский государст  
университет водного транспорта»

**Сальников Василий  
Герасимович**

15 сентября 2023 г.

630099, Новосибирская область,  
г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33  
e-mail: nsawt ese@mail.ru

Отзыв получен 18.09.2023г. Все замечания А.А. / 8  
С отзывом ознакомлен 18.09.2023г. Мухоморов / Махмудов К.А.