

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата технических наук Лоскутова А.А.

на диссертацию Кутумова Юрия Дмитриевича

«Повышение эффективности компенсации токов однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ в условиях влияния на ток повреждения высших гармонических составляющих»

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»

Актуальность избранной темы диссертации

Исторически сложилось, что сети 6-35 кВ, как наиболее протяженные, в России и странах СНГ работают в основном с изолированной или компенсированной нейтралью по причине оптимальной надежности: самоустранение некоторых «клевок» на ЛЭП, возможности некоторого времени работы с замыканием на землю. Это сохраняет электроснабжение и работоспособность электрооборудования бытовых и, что важно, производственных потребителей электроэнергии. Однако практический опыт эксплуатации кабельных сетей показывает, что данные виды заземления нейтрали являются более опасными для людей и животных в месте растекания потенциала. Из-за недостаточной подстройки дугогасящих реакторов (ДГР) все равно возникают перенапряжения и пробой изоляции в других местах линии, что провоцирует двойные замыкания и замыкания в других фазах, что накопительным эффектом со временем разрушает кабельную инфраструктуру распределительных сетей, приводит к многочисленному ремонту, постоянным земельным работам, установке соединительных муфт. Поиск однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) происходит также последовательным отключением присоединений на распределительном устройстве (РУ) и кратковременному отключению/включению потребителей.

Во многих странах мира распределительные сети уже используют резистивное заземление нейтрали, позволяющее отключать данные виды повреждений, исследование которого соискатель оставил в стороне. Резистор позволяет устранить феррорезонансные явления, снизить уровень дуговых перенапряжений, упростить/убрать громоздкие системы автоматической подстройки резонанса, повысить качество эксплуатации сетей.

Однако историческое развитие сетей 6-10 кВ в России имеет особый подход, отличный от Европейского и одним моментом перейти на резистивную нейтраль невозможно. Существенная часть (около 20%) функционирующих сетей 6-10 кВ работает с компенсированной нейтралью и требует повышения эффективности компенсации токов ОЗЗ, особенно в условиях влияния на ток повреждения высших гармоник.

Стоит отметить, что компенсированные кабельные сети могут иметь показатели эффективности режима заземления нейтрали, характеризующиеся долей ОЗЗ, перешедших в КЗ, сопоставимые или иногда даже худшие, чем сети с изолированной нейтралью. Основными причинами подобного являются большие значения остаточного тока в месте ОЗЗ, способствующие длительному горению заземляющих дуг и перегреву изоляции кабелей, а также низкое техническое совершенство существующих методов и средств локации ОЗЗ.

Учитывая существенный относительный уровень высших гармонических составляющих в токе ОЗЗ (до ~40–50% от емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$), нетрудно сделать вывод о том, что они оказывают существенное влияние на величину остаточного тока ОЗЗ и, соответственно, эффективность компенсации тока ОЗЗ. Таким образом, для повышения эффективности и, возможно, расширения области применения резонансного заземления нейтрали, необходимо решить проблему разработки и/или совершенствования методов полной компенсации тока ОЗЗ, включая высшие гармоники.

Общая характеристика работы, её содержание

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения по работе, списка литературы из 255 наименований (включает также собственные публикации автора) и приложений.

В **главе 1** была разработана классификация методов и устройств компенсации токов ОЗЗ по виду компенсируемых составляющих, выполнен обзор методов и устройств компенсации ёмкостной составляющей основной частоты тока ОЗЗ, компенсации активной составляющей тока ОЗЗ, а также методов и устройств компенсации высших гармонических составляющих в токе ОЗЗ и полного тока ОЗЗ. Описаны основные подходы к оценке относительного уровня высших гармонических составляющих в токе устойчивого ОЗЗ. Описаны основные подходы к оценке относительного уровня высших гармонических составляющих в токе устойчивого ОЗЗ. На основе обзора дана оценка состояния проблемы компенсации вышеуказанных составляющих в токе ОЗЗ и обосновано направление исследования/поставлены задачи исследования в целом.

В **главе 2** обозначены спектры и уровни высших гармонических составляющих в токе установившегося режима замыкания на землю. Исследовано влияние высших гармоник на условия гашения и повторного зажигания заземляющей дуги при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, в том числе обоснована методика исследований, создана имитационная модель кабельной сети для исследования влияния высших гармоник на переходные напряжения и токи при дуговых ОЗЗ, произведен анализ влияния высших гармоник в токе ОЗЗ на условия гашения и повторного зажигания заземляющей дуги в кабельных сетях с изолированной нейтралью, выполнен анализ влияния высших гармоник в токе ОЗЗ на условия гашения и повторного зажигания заземляющей дуги в компенсированных кабельных сетях. Гашение дуги выполнялось в соответствии с различными теориями, а именно теории W.Petersen'a и теории Н.Н. Белякова. Исследованы спектры и уровни высших гармонических составляющих в переходных режимах замыкания на землю и оценена возможность их компенсации.

В **главе 3** исследованы процессы нагрева кабельных ЛЭП 6–10 кВ при наличии в токе замыкания на землю высших гармонических составляющих. Поставлены расчетные условия, задачи и методы исследований процессов нагрева кабелей при ОЗЗ в компенсированных сетях 6–10 кВ. Определены геометрические размеры расчетной области при анализе электротепловых процессов в кабеле, проложенном в грунте, с применением цепей Маркова. Выполнен расчёт начальных условий для моделирования тепловых процессов при ОЗЗ. Исследованы процессы нагрева кабельных ЛЭП токами высших гармоник при «металлическом» замыкании на землю с применением 2D-модели в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Обозначены подходы к построению имитационной 3D-модели кабельной ЛЭП для исследования электротепловых процессов при «неметаллических» ОЗЗ. Исследованы процессы нагрева кабельных ЛЭП токами высших гармоник при устойчивом замыкании на землю через переходное сопротивление с при-

менением 3D-модели в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Исследованы электротепловые процессы нагрева кабельных ЛЭП токами высших гармоник при дуговых ОЗЗ с применением имитационных моделей в программных комплексах COMSOL Multiphysics и PSCAD. Выполнен анализ и дана общая оценка результатов исследований процессов нагрева кабельных ЛЭП 6–10 кВ токами высших гармоник при устойчивых и дуговых замыканиях на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ.

В главе 4 были исследованы методы и устройства полной компенсации токов ОЗЗ. Обоснованы задачи исследования методов и устройств полной компенсации токов ОЗЗ. Получены математические условия полной компенсации тока ОЗЗ с применением комплексной схемы замещения кабельной сети 6–10 кВ, предложен способ компенсации переходных составляющих в токе ОЗЗ и проверена эффективность его функционирования. Получены условия подавления дугового замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ и исследованы соответствующие алгоритмы.

В главе 5 выдвинуты требования к защитам от ОЗЗ в кабельных сетях, функционирующих в режиме полной компенсации. Поставлены задачи, рассматриваемые в рамках главы. Выполнен сравнительный обзор устройств локации ОЗЗ (селективной сигнализации ОЗЗ и ДОМЗЗ) в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ. Исследованы особенности переходных процессов в сетях с полной компенсацией тока ОЗЗ и показано, что для обеспечения достоверности и высокой точности расчетов параметров переходных токов и напряжений, необходимой для решения задачи дистанционного определения места возникновения ОЗЗ (ДОМЗЗ), должны использоваться частотно-зависимые модели линий.

Показано, что для целей селективной сигнализации всех разновидностей ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих в режиме полной компенсации токов устойчивого ОЗЗ, наиболее перспективным представляется применение разработанной ИГЭУ и НПП «ЭКРА» универсальной мультичастотной адмиттансной защиты, дополненной блоком фиксации однократных кратковременных ОЗЗ.

Обоснованы принципы выполнения селективной сигнализации ОЗЗ в компенсированных кабельных сетях. Предложена модификация способа дистанционного определения места возникновения ОЗЗ. Особенности модификации – использование алгоритмической модели кабельной сети 6–10 кВ с частотно-зависимыми индуктивностями и активным сопротивлением и меньшее количество вычислительных операций по сравнению со способом-прототипом.

К достоинствам работы следует отнести:

– значительную актуальность темы работы, направленной на исследование и разработку методов повышения эффективности компенсации токов ОЗЗ в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ в условиях влияния на ток замыкания высших гармонических составляющих, и решаемых в ходе работы задач;

– объёмный и структурированный аналитический обзор существующих методов и устройств компенсации различных составляющих тока ОЗЗ, позволяющий корректно поставить задачи работы в целом;

– тщательное исследование особенностей электротепловых переходных процессов в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ, имеющих место при ОЗЗ в условиях влияния высших гармонических составляющих, позволяющий, среди прочего, обосновать необходимость компенсации

высших гармоник при действующих значениях тока ОЗЗ I_{RMS} в месте повреждения порядка 15...25 А и выше.

По результатам ознакомления с текстом диссертационной работы, авторефератом и публикациями автора можно сделать вывод о том, что последние в достаточной степени отражают полученные и представленные в диссертации результаты; автореферат отражает суть работы, её научные положения, основные выводы и рекомендации по использованию результатов.

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы».

В части формулы специальности: «... В рамках специальности проводятся исследования по развитию и совершенствованию теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения экономичного и надежного производства электроэнергии ...». Результаты теоретических исследований и исследований на имитационных математических моделях позволяют увеличить эффективность компенсации тока ОЗЗ в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ и на этой основе повысить надежность электроснабжения потребителей.

В части области исследования:

– п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» соответствует разработка комплекса имитационных моделей для решения задач, связанных с исследованиями влияния ВГ на условия гашения и повторного зажигания заземляющей дуги при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ и электротепловых процессов нагрева кабельных ЛЭП с БПИ токами высших гармоник при различных видах замыканий на землю;

– п. 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» соответствуют разработки нового способа автоматической компенсации составляющих переходного процесса при ОЗЗ и усовершенствованных алгоритмов локации ОЗЗ на кабельных ЛЭП в сетях, работающих с полной компенсацией тока замыкания на землю.

Новизна сформулированных в диссертации научных положений, выводов и рекомендаций

Научную новизну работы представляют:

1. Результаты исследований на имитационных моделях ОЗЗ через перемежающуюся дугу в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, позволяющие оценить степень влияния высших гармоник в токе замыкания на кратность дуговых перенапряжений на неповрежденных фазах и действующее значение тока в месте повреждения.

2. Комплекс имитационных моделей для решения взаимосвязанных задач, возникающих при исследовании процессов нагрева кабельных ЛЭП с бумажно-пропитанной изоляцией, проложенных в грунте, токами высших гармоник при различных видах ОЗЗ (устойчивых и дуговых перемежающихся) в компенсированных сетях 6–10 кВ, включающий модель на основе цепи Маркова, модель на основе электротепловой схемы замещения и модели в программных комплексах COMSOL Multiphysics и PSCAD.

3. Результаты исследований на имитационных моделях электротепловых процессов нагрева кабельных ЛЭП с бумажно-пропитанной изоляцией при различных видах ОЗЗ, позволяющие определить опасный уровень высших гармоник в токе замыкания на землю, время нагрева кабелей до критической по условиям термической стойкости междуфазной изоляции

температуры и обосновать необходимость и область применения компенсации высших гармоник в кабельных сетях 6–10 кВ.

4. Математическое описание условий полной компенсации тока ОЗЗ, включая высшие гармонические составляющие, и подавления дуговых замыкания на землю с применением вспомогательного источника тока, подключенного к нейтрали сети, в кабельных сетях 6–10 кВ.

5. Способ компенсации переходных токов ОЗЗ, обеспечивающий уменьшение в несколько раз действующего значения тока в месте повреждения и ограничение перенапряжения при замыканиях через перемежающуюся дугу в кабельных сетях 6–10 кВ с нейтралью, заземленной через ДГР.

6. Результаты исследований существующих различных подходов к определению параметров аналитических и имитационных моделей кабельных ЛЭП среднего напряжения при расчетах переходных процессов при ОЗЗ, позволяющие определить область их применения и повысить точность расчетов параметров переходных токов и напряжений.

Степень обоснованности сформулированных в диссертации научных положений, выводов и рекомендаций, их достоверность

Достоверность и обоснованность результатов определяются и подтверждаются:

- корректностью принятых допущений, использованием методов классической теории электрических цепей и теории электромагнитных переходных процессов;
- физической непротиворечивостью результатов исследований;
- сходимостью результатов, полученных с применением различных аналитических методов и на математических моделях, с результатами исследований других авторов, опубликованными в авторитетных источниках.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. Какие соотношения между начальными фазами ЭДС отдельных высших гармонических составляющих использовались при оценке влияния высших гармонических составляющих на условия гашения и повторного зажигания заземляющей дуги?

2. В главе 3 диссертационной работы при расчёте температуры кабельной ЛЭП при ОЗЗ различных типов используется усредненное на определенном периоде значение тепловой мощности, выделяющейся в канале пробоя. Не приводит ли данный подход к существенным погрешностям определения температуры и не целесообразно ли использовать не усредненное, а текущее значение тепловой мощности?

3. Влияет ли тип материала, из которой изготовлена изоляция кабельной ЛЭП (бумажно-пропитанная изоляция или изоляция из сшитого полиэтилена) на методику выбора параметров имитационной модели кабельной ЛЭП для расчёта параметров переходного процесса?

4. Одним из недостатков работы является отсутствие в полной мере разбора и анализа реальных аварийных ситуаций, тяжести последствий от воздействия перенапряжений, токов высших гармонических составляющих (желательно с иллюстрациями).

В качестве рекомендации, можно было бы произвести анализ и оценку процессов нагрева кабельных ЛЭП токами высших гармоник с применением имитационного моделирования по всем кабелям, начиная от 35 мм² до 240 мм², различных марок, сечений, типов и способов прокладки, что позволило бы сделать общий вывод о случаях существенного влияния гармониче-

ских составляющих и их опасности. Данный анализ еще лучше отразил бы актуальность исследования.

5. Не указана ссылка на регламентирующий документ о максимально допустимом времени поиска и ликвидации повреждения ОЗЗ в сети – 6 часов. Если отстраниться от требований, то в реальных условиях устранение повреждения происходит до суток.

6. Является ли модификация способа ДОМЗЗ, предложенного в главе 5, универсальной относительно величины переходного сопротивления в месте ОЗЗ? Производилась ли оценка работоспособности указанного способа в условиях влияния ненулевого переходного сопротивления и почему?

7. В процессе реконструкции кабельной инфраструктуры часто идет или полностью замена КЛ, или замена фрагментов КЛ на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), которые изначально по технологии производства и назначению были ориентированы на западные распределительные сети с иными режимами работы нейтрали. Исследование влияния высших гармоник в токах ОЗЗ и электротепловых процессов в КЛ произведено в основном на кабелях с бумажной изоляцией (ААБл), оставляя «за скобками» кабели с изоляцией из СПЭ, находящие все большее распространение в распределительных сетях городов и мегаполисов. Также специфичными особенностями кабелей СПЭ является отсутствие свойств самовосстановления (в отличие от КЛ с бумажной изоляцией), невысокая максимально допустимая температура токопроводящих жил, условия монтажа, что требует дополнительного исследования и анализа.

8. Замечания редакционного характера.

- стр.11. В разделе «степень разработанности темы исследования» отсутствует ссылка на отечественные и зарубежные исследования методов компенсации высших гармоник и полной компенсации тока ОЗЗ.

- стр. 15. Опечатка: ...при котором требуется из компенсация... Правильно: их.

- стр. 42. В тексте присутствует противоречие. Автор указывает о перспективности активных методов компенсации активных составляющих (КАС) тока ОЗЗ, реализованных в автокомпенсаторах УАРК-2(202), однако их изготовление прекращено. В чем тогда перспективность? Предлагаемые устройства лишены этих недостатков?

- В тексте работы имеются не значительные грамматические и пунктуационные ошибки.

- Для лучшего восприятия диссертации целесообразно было бы ввести список сокращений.

Указанные замечания и рекомендации не снижают научной и практической значимости полученных автором результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней

Диссертационная работа Ю.Д. Кутумова «Повышение эффективности компенсации токов однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ в условиях влияния на ток повреждения высших гармонических составляющих» в полной мере соответствует критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание учёной степени кандидата наук, установленным в пп. 9–14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 (в актуальной редакции):

– диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей от-

расли знаний – электроэнергетики. Предложенные решения в достаточной степени аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями;

– диссертация написана автором самостоятельно; обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. В диссертационной работе приведены сведения о практическом использовании полученных автором научных результатов, даются рекомендации по использованию научных выводов;

– основные научные результаты диссертации отражены в 20 работах, из них 7 в изданиях по перечню ВАК, 4 статьях, индексируемых в международной базе Scopus, а также 8 статьях и тезисах докладов международных и всероссийских научно-технических конференций; 1 патенте РФ;

– на источники заимствования материалов, их авторов в диссертации корректно и в полном объеме приведены ссылки; автор указал личный вклад в выполненную научную работу.

Выводы

Диссертационная работа Кутумова Юрия Дмитриевича «Повышение эффективности компенсации токов однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ в условиях влияния на ток повреждения высших гармонических составляющих», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития электроэнергетики.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»; работа удовлетворяет критериям, которым должны удовлетворять диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Считаю, что Кутумов Юрий Дмитриевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

Официальный оппонент

доцент кафедры

«Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
кандидат технических наук, доцент

Лоскутов

Антон Алексеевич

«01» июня 2022 г.

603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
Тел.: +7 (831) 432-91-85
e-mail: loskutov.nnov@gmail.com

Подпись А.А. Лоскутова удостоверяется

д ф.м.н., профессор, проректор
ФГБОУ ВО «НГТУ имени Р.Е.

Куркин Андрей Александрович