

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук Онисовой О.А.

на диссертационную работу *Воробьевой Екатерины Андреевны*

«Совершенствование принципов выполнения

*адаптивных токовых и адмитансных защит от замыканий на землю
в кабельных сетях 6-10 кВ»,*

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

Актуальность избранной темы

Значительная доля повреждений в кабельных электрических сетях 6-10 кВ связана с однофазными замыканиями на землю (ОЗЗ). В сетях с изолированной, заземленной через высокоомное сопротивление или компенсированной нейтралью эти повреждения, как правило, не требуют быстрого отключения релейной защитой. Тем не менее, связанные с повреждениями режимы характеризуются рядом негативных факторов (повышение напряжения на неповрежденных фазах, нагрев изоляции в месте замыкания при протекании тока ОЗЗ и других), снижающих эксплуатационную надежность электрической сети. Наиболее опасным видом ОЗЗ следует считать дуговые перемежающиеся замыкания на землю, сопровождающиеся опасными перенапряжениями (кратностью до 3,5-4 о.е.), резко повышающими вероятность возникновения пробоя изоляции неповрежденных фаз в других точках сети, что ведёт к переходу однофазного замыкания на землю в требующее достаточного быстрого отключения короткое замыкание.

Переходные процессы при замыканиях на землю имеют достаточно сложный характер, который в значительной степени определяется режимом заземления нейтрали, зависит от конфигурации и параметров элементов электрической сети. И, хотя развитию и совершенствованию защит от ОЗЗ в отечественной и зарубежной энергетике уделено достаточно большое внимание, ещё не преодолены трудности в создании универсальной и надёжной (обладающей необходимой устойчивостью функционирования) защиты от ОЗЗ.

Таким образом, тематика работы, направленная на совершенствование принципов выполнения защит от замыканий на землю, несомненно является актуальной.

Общая характеристика работы

Общий объём диссертации составляет 206 страниц. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 149 источников (включая авторские).

Во введении обосновывается актуальность и направления диссертационных исследований; описывается состояние проблемы и степень разработанности темы исследований; формулируются цель работы и связанные с её достижением задачи; обозначаются научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы и положения, выносимые на защиту; приводятся сведения об апробации и внедрении результатов исследований, о подготовленных публикациях, о личном вкладе автора в развиваемое направление; кратко раскрывается основное содержание работы.

В первой главе описываются основные особенности объекта защиты – кабельных сетей 6-10 кВ: дана их классификация, приведены схемы и основные характеристики, оказывающие влияние на параметры электрических величин переходных процессов при ОЗЗ и на условия применимости токовых и адмитансных защит от ОЗЗ. Большое внимание в главе уделено методам и моделям для анализа переходных процессов при замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ. Приведен краткий обзор известных аналитических решений уравнений переходных процессов при ОЗЗ. Отмечено, что большая часть решений ориентирована на оценку максимальных кратностей перенапряжений при дуговых замыканиях; в расчетных схемах замещения подробно учитывается

только зарядная стадия переходного процесса, в то время как для задачи анализа функционирования защит от ОЗЗ требуется также учет и его разрядной составляющей; при этом процессы, связанные с разрядом емкости поврежденной фазы и подзарядом емкостей неповрежденных фаз, следует рассматривать как взаимозависимые. В главе предложена модификация аналитического решения уравнений переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6-10 кВ, позволяющая свести расчеты разрядной и зарядной составляющих переходного тока в месте установки защиты к двум последовательным расчетам на основе двухчастотной схемы. Обоснована методика эквивалентирования кабельных сетей для имитационного моделирования переходных процессов при ОЗЗ. Разработана методика определения частотных характеристик трехжильных кабелей напряжением 6-10 кВ. Выполнен анализ влияния частотных характеристик кабелей на точность расчетов переходных процессов и показано, что неучет зависимости индуктивности кабелей от частоты обуславливает погрешности по амплитуде и частоте свободных составляющих. Выполнен анализ факторов, влияющих на соотношения токов и напряжений нулевой последовательности в переходных режимах при дуговых замыканиях на землю, на основе которого показано, что способы выполнения адаптивных токовых и адмитансных защит, основанные на допущении о линейной зависимости между среднеквадратичными значениями тока нулевой последовательности в месте повреждения и напряжения нулевой последовательности не позволяют обеспечить высокую устойчивость функционирования при замыканиях через перемежающуюся дугу.

Во второй главе приведены критерии сравнения эффективности технических решений по выполнению защит от ОЗЗ в кабельных сетях 6-10 кВ. Помимо традиционно рассматриваемого технического совершенства защиты вводятся дополнительные (уточняющие) критерии: возможность применения защиты в сетях с различными режимами заземления нейтрали, способность фиксировать все виды ОЗЗ (включая дуговые перемежающиеся), устойчивость функционирования в условиях переходных процессов, непрерывность действия при устойчивых ОЗЗ, чувствительность к ОЗЗ через большие переходные сопротивления. В главе проведен подробный аналитический обзор адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ, дана оценка их эффективности и области применения. Показано, что существующие способы не в полной мере соответствуют приведенным выше критериям. Так, известные способы выполнения адаптивных токовых защит преимущественно ориентированы на повышение чувствительности защит при замыканиях через большие переходные сопротивления в сетях с изолированной нейтралью или высокоомным заземлением нейтрали и неэффективны при дуговых ОЗЗ. Традиционные адмитансные защиты, основанные на контроле проводимости нулевой последовательности первой гармоники, также не обеспечивают высокую динамическую устойчивость функционирования в переходных режимах при дуговых ОЗЗ и могут быть неэффективны в компенсированных сетях. Показано, что наиболее эффективным из существующих решений следует считать мультичастотную адмитансную защиту, контролирующую проводимость нулевой последовательности не только основной гармоники, но и высших гармонических составляющих. Однако отмечено, что эта защита обладает недостатком, связанным с использованием дискретного спектра гармонических составляющих, что может оказывать влияние на устойчивость функционирования защиты при дуговых ОЗЗ (когда частота и амплитуда преобладающих в спектре гармонических составляющих может значительно изменяться) и, кроме того, не может быть выполнена ненаправленной.

Третья глава посвящена разработке принципов выполнения адаптивных токовых защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ. Предложен способ адаптивной токовой защиты на основе составляющих тока и напряжения основной частоты нулевой последовательности и использовании текущего значения коэффициента полноты замыкания. Указанный способ предназначен для применения в сетях с изолированной нейтралью и высокоомным заземлением нейтрали. Приведены результаты исследования способа на имитационной модели кабельной сети, которые показали, что предложенное решение позволяет как повысить чувствительность защиты, так и обеспечить ее устойчивое функционирование при замыканиях через перемежающуюся дугу. В

главе также предложено универсальное решение по построению адаптивных токовых защит, ориентированное на применение как в сети с изолированной нейтралью (или с высокоомным заземлением нейтрали), так и в компенсированной сети – мультимодальная адаптивная токовая защита на основе соотношения между мгновенными значениями тока и производной напряжения нулевой последовательности, использующая не только составляющие основной частоты, но и высшие гармонические составляющие. Приведены результаты исследования предложенного решения на имитационных моделях кабельных сетей. Рассматривались сети с различными значениями суммарного емкостного тока и режимами заземления нейтрали. Проиллюстрировано, что эффективность функционирования защиты обеспечивается при всех разновидностях дуговых и устойчивых ОЗЗ; также защита может применяться для фиксации кратковременных пробоев изоляции фазы сети на землю. На основе предложенного принципа выполнения мультимодальной адаптивной токовой защиты нулевой последовательности разработана структурно-функциональная схема ее макетного образца, приведены результаты испытаний модели макетного образца.

Четвертая глава посвящена разработке принципов выполнения адмитансных защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ. Предложен способ мультимодальной направленной защиты на основе контроля емкости нулевой последовательности, значение которой определяется только величиной емкостей фаз на землю защищаемого присоединения (при внешних ОЗЗ) или внешней сети (при внутренних) и не зависит от частоты. Обосновано, что указанное решение может быть применено как для сетей с изолированной нейтралью (или с высокоомным заземлением нейтрали), так и для компенсированных сетей. Отмечено, что за счет стабильности замера по воздействующей величине как в установившихся, так и в переходных режимах обеспечивается высокая динамическая устойчивость функционирования при внешних и внутренних дуговых замыканиях и высокая чувствительность к замыканиям через переходные сопротивления. В развитие этого решения предложен способ универсальной направленной и направленной мультимодальной адмитансной селективной защиты от всех разновидностей ОЗЗ для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей. Приведена структурно-функциональная схема универсальной мультимодальной адмитансной защиты. Приведены результаты исследования предложенного решения на имитационных моделях кабельных сетей, подтверждающие его эффективность. Также в главе приведена сравнительная оценка универсальных решений на основе мультимодальной адаптивной токовой и адмитансной защит. Сделан вывод о том, что мультимодальная адмитансная защита от ОЗЗ обеспечивает большее техническое совершенство по сравнению с мультимодальной токовой адаптивной защитой. Разработано техническое задание на экспериментальный образец комплексной защиты от ОЗЗ, включающий функции универсальной мультимодальной адаптивной токовой защиты и универсальной мультимодальной адмитансной защиты от ОЗЗ.

К достоинствам работы следует отнести:

- высокую актуальность решаемой задачи, направленной на разработку характеризующейся устойчивостью функционирования в переходных режимах универсальной защиты от ОЗЗ для разных режимов заземления нейтрали;
- объемный теоретический материал, посвященный характеристикам объекта исследования – кабельным сетям 6-10 кВ;
- подробно выполненный анализ существующих решений по защите от ОЗЗ;
- тщательное исследование переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях, в рамках которого были также предложены методы и модели расчета переходных процессов, ориентированные на исследования динамических режимов функционирования защит;

– обстоятельное обоснование выполняемых исследований и предлагаемых решений, включающее достаточно подробный анализ с использованием имитационных моделей кабельных сетей 6-10 кВ.

По результатам ознакомления с текстом диссертации, авторефератом и публикациями автора можно заключить, что последние в необходимой степени отражают полученные и представленные в диссертации результаты; автореферат также в достаточной мере раскрывает суть работы, её научные положения, выводы и рекомендации.

Содержание диссертационной работы соответствует:

– формуле специальности 05.14.02 (Электрические станции и электроэнергетические системы);

– областям исследования специальности 05.14.02: разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике (п.6); разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике (п.9); разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике (п.13).

Новизна сформулированных в диссертации научных положений, выводов и рекомендаций

Научная новизна диссертационной работы заключается, прежде всего, в следующем:

– Разработаны способы повышения точности моделирования переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6-10 кВ, ориентированные на исследования динамических режимов функционирования защит от ОЗЗ;

– Разработан способ модификации адаптивной токовой защиты от ОЗЗ для сетей с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, основанный на использовании составляющих тока и напряжения нулевой последовательности для основной гармоники, обеспечивающий высокую чувствительность к повреждениям через большие переходные сопротивления, а также значительное повышение динамической устойчивости функционирования при замыканиях через перемежающуюся дугу;

– Разработаны принципы выполнения мультисоставной адаптивной токовой защиты нулевой последовательности от ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6-10 кВ, обеспечивающие адаптацию защиты как к влиянию переходного сопротивления в месте повреждения, так и к влиянию переходных процессов при дуговых перемежающихся замыканиях;

– Разработаны принципы выполнения ненаправленной и направленной мультисоставной адмитансной защиты от ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6-10 кВ, основанной на непосредственном контроле величины емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения, обеспечивающие высокую динамическую устойчивость функционирования при замыканиях через перемежающуюся дугу.

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

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечиваются корректностью принятых допущений; использованием известных методов теории электрических цепей и теории электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах; сходимостью результатов, полученных аналитическими методами, с данными исследований на математических

моделях, с опубликованными результатами исследований других авторов, с данными лабораторных исследований опытных образцов адаптивной токовой и адмитансной защиты от ОЗЗ.

Приведённые в диссертационной работе положения, выводы и рекомендации были опубликованы, прошли апробацию на многочисленных всероссийских и международных конференциях. Основные результаты исследований получили внедрение.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. В тексте диссертационной работы (с. 63; с. 70, п. 1.5.5) указано, что применение моделей линий, для которых индуктивности прямой и нулевой последовательности определены без учета зависимости от частоты, обуславливает погрешности расчета амплитуды и частоты свободных составляющих токов в пределах ~5%; в тексте автореферата приведены другие количественные значения – 10-15%. Какие значения считать корректными?
2. В работе рассматривались трехжильные кабели с пропитанной бумажной изоляцией. В настоящее время все более широкое применение в распределительных сетях находят кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ-кабели), отличающиеся по конструкции и характеристикам. В какой степени для них необходимо будет модифицировать предложенную в диссертации методику приближенного учета зависимости индуктивностей кабелей от частоты?
3. Проверка предложенных решений выполнялась с использованием имитационных моделей кабельных сетей 6-10 кВ. В каком диапазоне значений должен быть выбран шаг моделирования для корректного учета зависимости параметров кабелей от частоты и моделирования КЗ через перемежающуюся дугу?
4. В предложенных способах адаптивных токовых и адмитансных защит предполагается использование информации от трансформаторов напряжения. Могут ли оказать влияние на устойчивость функционирования предложенных защит низкочастотные переходные процессы в цепях трансформаторов напряжения при феррорезонансе?
5. С учетом поставленной задачи обеспечения устойчивости функционирования защит при дуговых ОЗЗ предъявляются ли какие-либо специальные требования к используемым в ряде решений фильтрам для выделения основной гармоники сигнала, к фильтрам для подавления составляющих рабочей частоты?
6. В структурно-функциональной схеме адаптивной токовой защиты (с. 106, рис. 3.1) использовано фазное напряжение сети ($U_{\phi} = const$). Требуется пояснить, U_{ϕ} – это номинальное фазное напряжение сети или напряжение, соответствующее режиму до возникновения ОЗЗ?
7. В обзоре известных принципов выполнения защит от ОЗЗ можно было бы рекомендовать привести также решения компании Schweitzer Engineering Laboratories (SEL).

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

Диссертационная работа Е.А. Воробьевой в полной мере соответствует критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание учёной степени кандидата наук, установленным в п.9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции от 21 апреля 2016 г.):

– Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли 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 опубликованы в четырёх рецензируемых научных изданиях.

– На источники заимствования материалов, их авторов в диссертации корректно и в полном объёме приведены ссылки; автором указан личный вклад в выполненную научную работу.

Выводы

Диссертационная работа Воробьевой Екатерины Андреевны «Совершенствование принципов выполнения адаптивных токовых и адмитансных защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ», 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 отвечать диссертации на соискание учёной степени кандидата наук.

Считаю, что Воробьева Екатерина Андреевна заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

Официальный оппонент
заведующий сектором НИОКР
Центра моделирования электроэнергетических систем
Департамента информационно-технологических систем
Открытого акционерного общества «Всероссийский
научно-исследовательский, проектно-конструкторский и
технологический институт релестроения с опытным
производством» (ОАО «ВНИИР»)

кандидат технических наук

428024, г. Чебоксары, пр-т Ивана Яковлева, д. 4
Тел.: 8(8352)39-00-00; +7 919 671 27 70
e-mail: onisova@vniir.ru; onisova-vniir@yandex.ru

Онисова Ольга Александровна

11 февраля 2019 года

Подпись Онисовой О.А. заверяю:

Председатель совета Директоров ОАО «ВНИИР»

Нудельман Гога Семёнович

