

УДК 621.314

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В С ГЛУХОЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Э.Н. Фоминич¹, Е.В. Ревякина², И.В. Колесник¹, А.А. Тишков¹

¹ Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения
Россия, 191123, г. Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22

² Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская 244

Аннотация. Безаварийное функционирование распределительных сетей СЭС с глухозаземленной нейтралью до 1000 В во многом зависит от частоты возникновения однофазных коротких замыканий (КЗ), которые являются наиболее частым видом повреждения изоляции. Существующие устройства защиты от КЗ в сетях с глухозаземленной нейтралью срабатывают при возникновении КЗ, то есть работают по факту. В связи с этим важна оценка состояния изоляции распределительной сети СЭС под рабочим напряжением. Разработка научно-технических решений, обеспечивающих повышение уровня безопасности при эксплуатации систем электроснабжения с глухозаземленной нейтралью, направлена на достижение названных задач. Поставленная цель достигается за счет обеспечения объективного контроля за состоянием электрической изоляции по токам утечки, что позволяет существенно уменьшить вероятность возникновения КЗ за счет заблаговременного обнаружения развивающегося дефекта изоляции. В статье представлена концепция системы контроля и диагностики состояния изоляции электрических сетей с глухозаземленной нейтралью, позволяющей перейти от борьбы с последствиями нарушений изоляции к их предупреждению и, как следствие, существенному повышению электропожаробезопасности.

Ключевые слова: система электроснабжения, глухозаземленная нейтраль, однофазное короткое замыкание, контроль состояния изоляции.

Введение

Надежность работы и безопасность эксплуатации электрооборудования во многом зависят от состояния изоляции, частоты возникновения и длительности существования ее повреждений. По данным МЧС, в 2016 г. из-за нарушения правил эксплуатации электрооборудования возникло 41151 пожаров, что составляет 29,6 % от всех пожаров. Стоит отметить, что значительная часть таких нарушений связана с повреждением изоляции электроустановок и, как следствие, короткими замыканиями.

При замыканиях на корпус (землю) через некоторое переходное

Фоминич Эдуард Николаевич, профессор кафедры «Электроснабжение, электрооборудование и автоматика».

Ревякина Екатерина Викторовна, аспирант.

Колесник Иван Владимирович, адъюнкт кафедры «Электроснабжение, электрооборудование и автоматика».

Тишков Алексей Анатольевич, заместитель начальника кафедры «Электроснабжение, электрооборудование и автоматика».

сопротивление автоматическое отключение, основанное на применении максимальной токовой защиты, срабатывать не будет. Данный режим чрезвычайно опасен, так как протекание даже малых токов в доли ампера в локализованных по объему дефектах изоляции приводит к пиролизу изоляции и в конечном итоге к возгоранию. При этом с увеличением суммарной протяженности кабельной сети системы электроснабжения ухудшаются условия электро- и пожаробезопасности, а также снижается надежность электроснабжения потребителей. Проведенные научно-исследовательские работы показали, что выявление развивающихся дефектов изоляции на ранних стадиях позволяет значительно улучшить эти показатели. Такой подход должен заключаться в применении измерительных датчиков, рассчитанных на работу с автоматизированной информационно-измерительной системой, и построении централизованной системы контроля состояния изоляции, осуществляющей одновременную обработку сигналов от всех контролируемых кабельных линий с целью обеспечения мониторинга состояния изоляции и возможности прогнозирования будущих замыканий. Выполнение этих функций возможно за счет сведения всех данных непосредственно к диспетчеру.

Проблемы контроля состояния изоляции с СЭС с глухозаземленной нейтралью

В ПУЭ предусмотрена возможность применения устройств защитного отключения (УЗО), реагирующих на ток утечки. Принцип работы УЗО – пороговый, то есть УЗО реагирует на превышение фиксированного уровня тока утечки, что может быть недопустимо при питании ответственных потребителей. Даже если УЗО будет работать на сигнализацию, то невозможно организовать централизованный контроль за этой сигнализацией, так как УЗО применяются в отдельных периферийных групповых линиях или непосредственно у приемника электроэнергии.

При большом (десятки, сотни) количестве приемников электроэнергии контроль и обслуживание УЗО требуют значительных затрат времени и их применение становится экономически невыгодным. Применение УЗО не позволяет осуществить непрерывный контроль за динамикой изменений токов утечки в контролируемой сети.

Повысить пожаробезопасность электроустановок в таких режимах можно при применении мониторинга дифференциальных токов утечки, что позволяет выявить развивающиеся дефекты и предпринять необходимые меры до возникновения пожароопасных утечек тока.

Применение мониторинга токов утечки необходимо рассматривать применительно к конкретной системе электроснабжения. Наиболее распространенной системой является TN-C-S, ее отличия от системы TN-S заключаются в наличии участка PEN-проводника. В зависимости от длины этого участка условия электро- и пожаробезопасности могут различаться в широком диапазоне. Совмещенный нулевой проводник имеется только на участке от питающего трансформатора до щита, в котором установлены датчики, а после щита идет 5 проводников – три фазы, рабочий нулевой проводник и защитный нулевой проводник.

Достаточно малой эффективностью в определении состояния распределительной сети СЭС обладают и периодические испытания электрооборудования, так как выполняются на обесточенном оборудовании.

Эта информация обладает малой ценностью для прогнозирования состояния изоляции, так как в любой момент после проведения периодических испытаний, будь то через 5 минут, через сутки или через месяц, в изоляции может начать развиваться нарастающий дефект, обнаружить который возможно будет только при очередных испытаниях, если только до этого времени не произойдет ее критическое разрушение, которое повлечет за собой возникновение аварийной ситуации.

Таким образом, в настоящее время отсутствуют технические средства, позволяющие обеспечить мониторинг состояния изоляции в сетях с глухозаземленной нейтралью, которые составляют 95 % распределительных сетей. То есть отсутствует возможность достоверного диагностирования развивающихся дефектов электрической изоляции в этих сетях, и проблема предупреждения возникновения коротких замыканий становится все более актуальной.

Структура системы контроля состояния изоляции в СЭС с глухозаземленной нейтралью

Система контроля состояния изоляции в системах электроснабжения до 1000 В с глухозаземленной нейтралью может быть реализована по принципу, представленному на рис. 1.

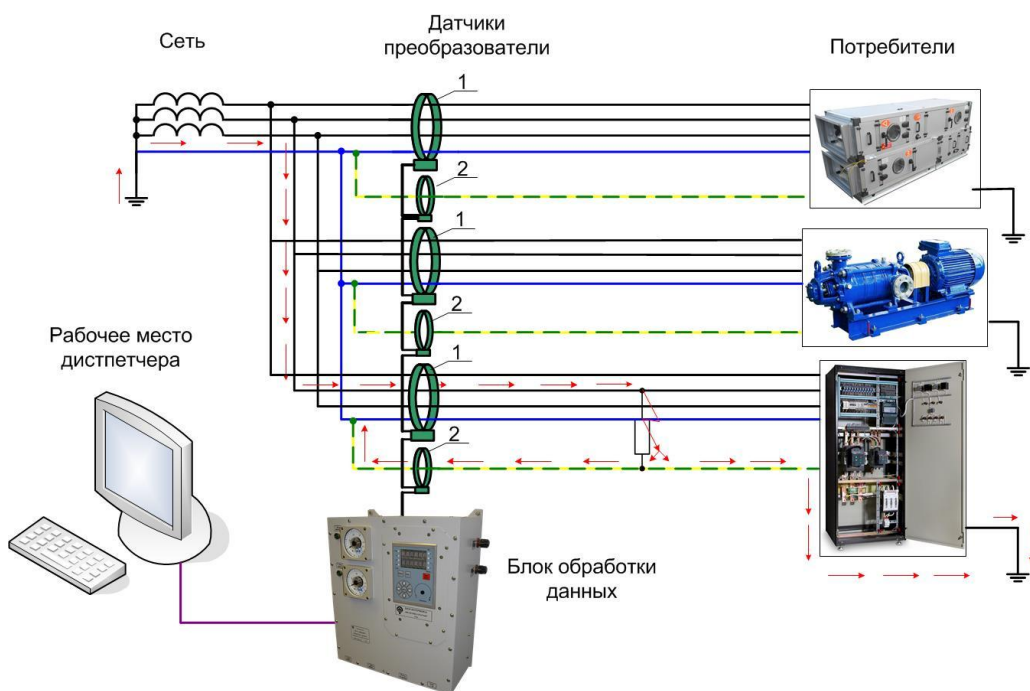


Рис. 1. Структурная схема системы СКСИ СЭС до 1000 В с глухозаземленной нейтралью:
1 – датчики-преобразователи фазных и нулевого проводников;
2 – датчик-преобразователь защитного проводника РЕ

На рисунке условно не показаны возможные соединения друг с другом РЕ-проводников различных приемников электроэнергии.

В системе мониторинга токов утечки можно выделить два основных вида датчиков-преобразователей тока:

– датчики-преобразователи дифференциального тока, устанавливаемые либо на трехжильном кабеле питания трехфазных нагрузок, либо на четырехжильном

кабеле для трех фаз и рабочего нулевого проводника, либо на двухжильном для фазы и рабочего нулевого проводника;

– датчики-преобразователи тока, устанавливаемые на защитном нулевом проводнике.

В эксплуатационных режимах возможны ложные срабатывания, обусловленные сложной картиной растекания тока утечки. Условно можно выделить следующие варианты преимущественного растекания тока утечки (см. таблицу).

Варианты преимущественного растекания тока утечки

Доминирующий путь утечки	Показания пары датчиков	Интерпретация показаний
Утечка на изолированную от земли ОПЧ при ее подключении к РЕ-проводнику	Сигналы примерно равны	Однозначная идентификация присоединения с током утечки. Исправность РЕ-проводника
Утечка на заземленную ОПЧ с подключением к ней РЕ-проводника	Сигнал от силового датчика больше сигнала от защитного датчика	Высокая степень идентификации присоединения с током утечки. Возможны дефекты РЕ-проводника
Утечка на заземленную ОПЧ без подключения к ней РЕ-проводника (утечка на землю)	Сигнал от силового датчика существенно больше сигнала от защитного датчика	Идентификация присоединения с утечкой по показаниям силового датчика-преобразователя. Высокая вероятность повреждения РЕ-проводника
Утечка на ОПЧ с РЕ-проводником, имеющим связь с другими ОПЧ, запитанными от других присоединений	Сигналы от защитных датчиков сопоставимы по уровню. Идентификация возможна по сигналу от силового датчика-преобразователя	Высокая степень неопределенности в идентификации присоединения с утечкой. Требуется применение специализированного программного обеспечения для анализа
Утечка на землю вне зоны контроля	Сигналы от защитных датчиков сопоставимы по уровню	Высокая степень неопределенности в идентификации присоединения с утечкой. Требуется применение специализированного программного обеспечения для анализа
Утечка на изолированную от земли ОПЧ при ее подключении к РЕ-проводнику вне зоны контроля	Сигналы от защитных датчиков сопоставимы по уровню	Высокая степень неопределенности в идентификации присоединения с утечкой. Требуется применение специализированного программного обеспечения для анализа

Для повышения достоверности обнаружения присоединений с пожароопасными токами утечки необходимо провести анализ сложных комбинаций сигналов от всех пар датчиков, контролирующих токи утечки на силовых кабелях (три фазы и рабочий нулевой проводник) и на защитных нулевых проводниках.

Если РЕ-проводники различных кабелей после места установки датчиков будут иметь соединения между собой, картина существенно меняется. При установке датчиков в защитные нулевые проводники на работе системы будет нега-

тивно сказываться наличие гальванической связи между защитными нулевыми проводниками приемников электроэнергии различных кабелей после точки установки датчиков. На практике эта ситуация возможна и будет сочетаться с повторным заземлением. Надо учитывать, что «соседние» РЕ-проводники тоже обладают сопротивлением. Наихудший вариант – если «соседние» РЕ-проводники будут иметь большее сечение по сравнению с РЕ-проводником в поврежденном присоединении. Это возможно при удаленных замыканиях и наличии какой-либо протяженной металлоконструкции (СПЧ), используемой в качестве РЕ-проводника при наличии других РЕ-проводников. Если присоединений (кабелей) много и все РЕ-проводники этих присоединений соединены друг с другом после места повреждения, то в каждом отдельном РЕ-проводнике присоединений ток будет мал и одинаков и выделить поврежденное присоединение будет невозможно без применения специализированного программного обеспечения. Данная ситуация может иметь место, если несколько кабельных вводов в одно строение используют общую ГЗШ или несколько кабелей введены в одно здание.

Если отходящих присоединений много (6...8 и более), то весьма существенно на результатах измерений тока утечки в РЕ-проводнике будут сказываться различия в полном сопротивлении связи между РЕ-проводниками различных приемников электроэнергии, питаемых от контролируемой совокупности фидеров. Наличие связи между защитными проводниками разных присоединений (фидеров) негативно сказывается на результатах обнаружения поврежденного фидера.

Основной проблемой системы мониторинга является большой массив информации, что требует от оператора значительной профессиональной подготовки. Для упрощения эксплуатации системы мониторинга целесообразно провести анализ данных по заданному алгоритму, что позволит минимизировать информационный поток, передавая оператору только актуальную информацию в наглядном виде.

Сравнительный анализ заключается в ранжировании сигналов от всех РЕ-датчиков и отдельно – от всех силовых датчиков с выделением наибольших. Целью является проверка совпадения номеров присоединений с наибольшими значениями сигналов от силовых датчиков с номерами присоединений с наибольшими значениями сигналов от РЕ-датчиков. При совпадении следует вывод о достоверности обнаружения присоединений с наибольшими утечками на ОПЧ, имеющими подключение к РЕ-проводникам. Завершающим этапом является сравнение с заданными абсолютными и относительными порогами с генерацией соответствующих сигналов и их передачей на средства сигнализации и на «верхний» уровень системы мониторинга.

Аналогично производится выявление «наихудших» присоединений, имеющих доминирующую утечку на землю.

Графическую информацию целесообразно выводить для ограниченного количества наихудших с точки зрения пожаробезопасности присоединений, а более подробную – только по запросу.

Во многих случаях более информативными данными являются значения скорости изменения во времени токов утечки, для чего производится дифференцирование графика изменения тока утечки во времени. Эти данные могут быть более информативными по сравнению с графиками изменений во времени токов утечки с позиции задачи прогнозирования процессов деградации состояния изоляции.

Для минимизации ложной сигнализации в условиях сложной картины растекания токов утечки необходимо устанавливать не только абсолютные пороги сигнализации (логичной является привязка к стандартным значениям порогов УЗО 30, 100 и 300 мА), но и установление относительных порогов, значения которых привязаны к типичным (характерным) токам утечки конкретной распределительной сети. Количественные значения этих относительных порогов целесообразно задавать в процентах от «нормального» (то есть устойчивого в течение длительного времени) значения измеряемого тока утечки. Такой подход позволяет существенно уменьшить вероятность ложной сигнализации, но требует настройки системы мониторинга по месту эксплуатации.

Реализация системы контроля состояния изоляции с СЭС с глухозаземленной нейтралью

Разрабатываемая система предназначена для мониторинга состояния изоляции в кабельных распределительных сетях с глухозаземленной нейтралью до 1000 В с целью прогнозирования, планирования профилактических мероприятий и ремонтных работ для предотвращения пробоев изоляции и замыканий на землю.



Рис. 2. Плата с датчиками-преобразователями системы ПКСИ:

- 1 – датчики-преобразователи фазных и нулевого проводников;
- 2 – датчики-преобразователи защитного проводника РЕ

Система СКСИ работает по принципу измерения переменного тока нулевой последовательности путем преобразования магнитного поля, создаваемого трехфазными токами в контролируемой цепи, в аналоговые сигналы, которые преобразуются в цифровые данные. Реализация такой системы позволит преодолеть серьезную проблему недостаточности существующих технических средств и методов для постоянного контроля за состоянием изоляции.

В настоящее время изготовлены и прошли государственные испытания опытные образцы системы пофидерного контроля состояния изоляции, датчики которых представлены на рис. 2.

В разработанной системе СКСИ в качестве первичных чувствительных элементов датчиков-преобразователей дифференциального тока утечки применена катушка Роговского. Конструкция катушки Роговского представляет собой токовый трансформатор с воздушным сердечником. Катушка наматывается на воздушный сердечник такого размера, чтобы через его отверстие могла быть пропущена шина с измеряемым током. Чтобы уменьшить паразитные емкости, витки должны быть намотаны с равными расстояниями друг от друга и в одну сторону. Для исключения влияния витка, создаваемого самой катушкой, ее конец возвращают к началу, прокладывая вдоль окружности тороида. В связи с тем, что выходное напряжение обычно мало, катушку, как правило, экранируют от электрических помех. Экран при этом не должен образовывать короткозамкнутого витка. Выводы катушки должны быть также экранированы, причем один из выводов должен быть соединен с экраном и заземлен.

Поскольку измеряемые токи очень малы, возникает сложность в их передаче на блок обработки из-за сильного затухания и низкой помехоустойчивости. Для решения этих проблем в непосредственной близости от катушки Роговского (в одном корпусе) установлен аналогово-цифровой преобразователь, который преобразует полученный аналоговый сигнал в цифровой вид и передает его на блок обработки. Таким образом, ток нулевой последовательности, измеренный катушкой Роговского и преобразованный в цифровой вид, передается на блок обработки, не подвергаясь воздействию помех и не затухая.

Блок цифровой обработки данных представляет собой конструкцию, состоящую из следующих основных элементов:

- узлы защиты от помех;
- узлы выпрямителей основного и резервного напряжения питания;
- АВР;
- блок интерфейсов;
- устройства индикации результатов измерений.

Разработанная система выполняет следующие функции:

- ранжирование номеров кабельных присоединений в зависимости от значения тока утечки;
- сравнение токов утечки с заданными порогами для генерации предупреждающих сообщений и сигнализации;
- определение номеров кабелей с наихудшей изоляцией;
- создание графика изменения сигналов во времени;
- корректировка значений порогов сигнализации;
- архивирование и визуализация информации;
- проведение сравнительного анализа токов утечки, индивидуальное назначение порогов сигнализации, учет исходных небалансов, возможность оперативной перенастройки;
- новые датчики дифференциального тока обеспечивают высокую чувствительность, а различные варианты конструктивного исполнения – удобный и простой монтаж;
- микропроцессорный блок реализует оригинальный алгоритм обработки сигналов от 8, 16, 32 и более датчиков, основанный на учете особенностей конкретной распределительной сети, что обеспечивает высокую достоверность об-

наружения развивающихся дефектов изоляции;

- контроль исправности первичных датчиков-преобразователей;
- выполнение необходимой математической обработки значений параметров;

- контроль достоверности параметров и исправности технических средств нижнего уровня в процессе работы системы, ведение протоколов и архивов по ошибкам, отказам и другим отклонениям от нормальных режимов работы, а также статистической информации по работе оборудования;

- формирование и управление базами данных учетных параметров, ведение архивов для решения задач оперативного контроля состояния изоляции, расчета прогнозных значений сопротивления изоляции; формирование экранных форм отображения отчетных документов за расчетные периоды, накопление статистической информации для анализа и прогноза состояния изоляции, планирования профилактических мероприятий и ремонтов с целью повышения надежности электроснабжения;

- представление и управление вводом и выводом необходимой учетной информации в виде текста, гистограмм, графиков, таблиц и т. д. на экран монитора;

- формирование печатных документов произвольной формы;

- возможность подключения дополнительных задач и обработки учетной информации.

Система является открытой для пользователя и имеет в своем составе необходимые средства для сопровождения, модернизации и развития. Инструментальное ПО имеет удобный пользовательский интерфейс и обеспечивает генерацию прикладного программного обеспечения и ввода необходимых для этого данных в форме диалога с оператором. Система позволяет обрабатывать данные с использованием стандартных программ.

Особенностью применяемых датчиков тока является малая мощность выходного сигнала, что отличает их от трансформаторов тока напряжения, конструкции которых сформировались достаточно давно – стандартные значения их выходных параметров определялись уровнем развития и состоянием средств автоматики середины XX века. Большая выходная мощность используемых трансформаторов была оправданной, так как от них питались реле автоматики и защиты, средства измерений и регистрации. Современные информационно-измерительные системы (ИИС) имеют на своих входах либо сигнальные процессоры с встроенными аналого-цифровыми преобразователями (АЦП), либо отдельные АЦП, которые не требуют таких мощных сигналов для получения приемлемого отношения сигнал/шум, что привело к возникновению и широкому внедрению концепции датчиков тока малой мощности.

Заключение

Оценка и мониторинг состояния изоляции в реальных условиях функционирования системы электроснабжения, включающих различные режимы работы, является актуальной и сложной задачей. На надежность работы СЭС, электро- и пожаробезопасность электрооборудования существенно влияют нештатные режимы работы, предаварийные и аварийные режимы и старение изоляции. В связи с этим важна оценка состояния изоляции распределительной сети в режиме реального времени. При этом рост требований по пожаробезопасности

и надежности СЭС должен сопровождаться адекватным развитием средств диагностирования потенциально опасных факторов.

Использование системы пофидерного контроля состояния изоляции в составе программно-аппаратного комплекса дает возможность непрерывного мониторинга состояния изоляции всех контролируемых присоединений, что необходимо для прогноза возможных коротких замыканий в сети с достаточным для оперативных мероприятий запасом времени.

Результаты проведенных испытаний показали, что датчики-преобразователи обладают более существенной чувствительностью по сравнению с применяемыми трансформаторами тока.

Реализация системы пофидерного контроля состояния изоляции позволит решать новые, ранее недоступные задачи:

- наблюдение за динамикой состояния изоляции;
- сокращение времени нахождения электрических сетей системы электроснабжения в аварийном или предаварийном состоянии;
- исключение аварийного отключения потребителей вследствие замыканий в электрических сетях СЭС, вызванных старением электрической изоляции;
- контроль за множеством объектов (участки распределительной сети, ответственные приемники электроэнергии);
- обеспечение оперативности поиска мест повреждения в разветвленных электрических сетях СЭС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глухов О.А., Иванов Е.А. Применение функциональных возможностей АСУ ТП для обеспечения селективного контроля состояния изоляции присоединений // Автоматизированные системы управления энергетическими ресурсами: Сб. материалов. – СПб.: ПЭИПК, 2005. – 368 с. – С. 166–173.
2. Глухов О.А., Михайлов А.К., Фоминич Э.Н., Тишков А.А. Анализ условий применения системы контроля изоляции в системах электроснабжения с изолированной нейтралью // Сборник докладов 9-й Российской НТК по электромагнитной совместимости технических средств ЭМС-2006. – СПб.: ВИТУ, 2006. – С. 196–201.
3. Михайлов А.К., Фоминич Э.Н., Глухов О.Ф., Тишков А.А. Системы контроля изоляции в системах электроснабжения с изолированной нейтралью // Технология ЭМС. – 2007. – № 3(22).
4. Михайлов А.К., Фоминич Э.Н., Глухов О.Ф., Тишков А.А. Внедрение методов общего и пофидерного контроля изоляции в системах электроснабжения с изолированной нейтралью // Сборник тезисов и докладов IX симпозиума «Электротехника 2030». Перспективные технологии электроэнергетики. – 2007.
5. Тишков А.А., Павленок А.М. Разработка системы контроля состояния изоляции в системах электроснабжения с изолированной нейтралью // Сборник научных проблем ВИ(ИТ). – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2013.
6. Глухов О.А., Глухов Д.О. Расчет параметров индукционного датчика тока на базе катушки Роговского // Проблемы энергетики. – 2015. – № 3–4. – С. 124–131.
7. Глухов О.А., Глухов Д.О. Влияние сторонних магнитных полей на результаты измерения тока катушкой Роговского // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2015. – № 7. – С. 56–60.
8. Харкевич А.А. Спектры и анализ. – М.: Либроком, 2009.
9. ГОСТ РВ 20.57.416-98. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Методы испытаний.
10. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006.

Статья поступила в редакцию 17 января 2018 г.

SYSTEM OF ELECTRICAL INSULATION STATE CONTROL IN NETWORKS WITH VOLTAGES UP TO 1000 VOLTS WITH DEAD-EARTHED NEUTRAL

E.N. Fominich¹, E.V. Revyakina², I.V. Kolesnik¹, A.A. Tishkov¹

¹Military Institute (Engineering) of the Military Academy of Material and Technical Support
22, ul. Zakhariyevskaya, St. Petersburg, 191123, Russian Federation

²Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *Trouble-free operation of the PSS distribution networks with dead-earthed neutral up to 1000 volts largely depends on the frequency of single-phase short-circuit (SC), which are the most common type of insulation failure. Existing short-circuit protection devices in networks with earthed neutral trigger in the event of short circuit, that is work in the event of the fault, but a rather long-term process of insulation defect development is not detected. In connection with this the assessment of the PSS distribution network isolation under operating voltage proves to be important. Development of scientific and technical solutions that enhance safety in the operation of power systems with earthed neutral is aimed at achieving the above-mentioned goals. The goal is achieved through the provision of objective monitoring of the state of electrical insulation leakage current. This allows to significantly reduce the risk of short-circuit due to early detection of developing insulation defect. The article offers the concept of system of electrical insulation with earthed neutral control and diagnostics, which allows to transfer from the fight with the consequences of insulation damage to its prevention and to a significant increase in its electro- and fire safety.*

Keywords: *power system, dead-earthed neutral, single-phase short circuit, control of insulation condition.*

Eduard N. Fominich, Professor.

Ivan V. Kolesnik, Adjunct.

Ekaterina V. Revyakina, Postgraduate Student.

Aleksey A. Tishkov, Deputy Head of the Department.