

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.317.333

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-4-3-29

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Гатауллин А.М., Гавриленко А.Н., Писковацкий Ю.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
gataullin1969@gmail.com

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в развитии интеллектуальных систем электроснабжения (ИСЭ), что подразумевает совершенствование существующих, внедрение и совершенствование современных защит, систем диагностики, мониторинга элементов высоковольтного электрооборудования (ВЭ). ЦЕЛЬ. Рассмотреть современные, а также пути развития и возможности интеграции систем защиты и диагностики кабельно-воздушных линий (КВЛ) ИСЭ. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи был проведен сравнительный анализ причин, которые приводят к срабатыванию защит КВЛ ИСЭ, недостатки защит и возможные пути их совершенствования. Были проанализированы современное состояние защит, диагностики, мониторинга КВЛ ИСЭ и пути их развития. В том числе рассмотрены перспективные методы диагностики изоляции, муфтовых соединений кабельных линий (КЛ) по характеристикам частичных разрядов (ЧР), скруток воздушных линий (ВЛ) по данным тепловизионного обследования. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье был проведен обзор существующих защит и систем диагностики элементов КВЛ ИСЭ высокого и среднего классов напряжения. Рассмотрены актуальные вопросы развития защит ИСЭ в том числе распределенной генерации в состав которых входят генераторы возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) для того, чтобы обеспечить бесперебойную поставку электроэнергии потребителям в системах распределенной генерации. Рассмотрены актуальные вопросы развития современных методов диагностики КВЛ до уровня систем мониторинга в том числе с применением методов тепловизионного обследования, диэлектрической импедансной спектроскопии (ИС), метода ЧР. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Развитие ИСЭ будет актуальной задачей еще длительное время. Наиболее перспективными защитами ИСЭ будут адаптивные защиты с применением искусственных нейронных сетей (ИНС), в которые будут интегрированы наиболее современные математические алгоритмы и методы диагностики, в первую очередь технологии «умных сетей» (Smart Grids), технология микросетей (Microgrids), метод независимых компонент (МНК), ЧР, тепловизионного обследования, электрической импедансной спектроскопии (ИС), диэлектрической спектроскопии (ДС).

Ключевые слова: системы релейной защиты и автоматики; интеллектуальные системы электроснабжения; умные сети; интеллектуальное электронное устройство; метод частичных разрядов; метод тепловизионного обследования; метод импедансной спектроскопии; метод акустической эмиссии; метод диэлектрической спектроскопии; искусственные нейронные сети; машинное обучение.

Для цитирования: Гатауллин А.М., Гавриленко А.Н., Писковацкий Ю.В. Обзор современных методов защиты и диагностики состояния интеллектуальных систем электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 3-29. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-3-29.

REVIEW OF MODERN PROTECTION AND DIAGNOSTICS METHODS OF INTELLIGENT POWER SUPPLY SYSTEMS

Gataullin A.M., Gavrilenko A.N., Piscovatskiy Y.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
gataullin1969@gmail.com

Abstract: *RELEVANCE* of the study lies in the development of intelligent power supply systems (IPS), which implies the improvement of existing, implementation and improvement of modern protection, diagnostic systems, monitoring of high-voltage electrical equipment (HVE) elements. *THE PURPOSE.* To consider modern state, as well as the ways of development and possibilities of integration of protection and diagnostic systems of cable-overhead lines (COL) of IPS. *METHODS.* For solving the problem, a comparative analysis of the reasons that lead to the operation the protection systems of the COL of IPS, their shortcomings and possible ways of their improvement were carried out. The current state of protection, diagnostics, monitoring of COL of IPS and the ways of their development were analyzed. In particular, promising methods for diagnosing insulation, coupling joints of cable lines (CL) according to the characteristics of partial discharges (PD), overhead lines (OL) elements according to the data of thermal imaging inspection were considered. *RESULTS.* The article provides an overview of existing protection and diagnostic systems for COL of IPS of high and medium voltage classes. The article is devoted to current issues protection development of ISE of distributed generation, which include renewable energy source (RES) generators, in order to prevent overvoltage and ensure uninterrupted power supply to consumers in distributed generation systems. The article considers current issues of development of modern methods of COL diagnostics up to the level of monitoring systems, including using thermal imaging survey methods, dielectric impedance spectroscopy (DIS), and the PD method. *CONCLUSION.* Development of ISE will be one of the main task for a long time. The most advanced ISE protections will be adaptive protections using artificial neural networks (ANN) in which be integrate the most modern mathematical algorithms and diagnostic methods, primarily smart grids technologies, microgrids technology, independent component method (ICM), PD methods, thermal imaging survey, electrical impedance spectroscopy (DIS), and dielectric spectroscopy (DS).

Keywords: relay protection and automation systems; prevention of power supply failures; intelligent electronic device; partial discharges method; thermal imaging survey method; electrical impedance spectroscopy; acoustic emission testing; dielectric response spectroscopy; neural networks; machine learning.

For citation: Gataullin A.M., Gavrilenko A.N., Piscovatskiy Y.V. Review of modern protection and diagnostics methods of intelligent power supply systems. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (4): 3-29. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-3-29.

Введение (Introduction)

Обеспечение бесперебойных поставок электроэнергии потребителям является одной из главных задач электроэнергетики [1-3]. В частности для «зеленой энергетики» создаются генерирующие мощности, электронные устройства и методы управления потоками электроэнергии нового поколения, которые увеличивают сложность электроэнергетических систем (ЭЭС) [4-6]. Поэтому одной из главных задач становится разработка эффективных методов защиты и диагностики для обеспечения непрерывного режима поставок электроэнергии при аварийных и плановых отключениях [7-9]. Статистические исследования показывают, что грозовая активность, ветер, мокрый снег и связанные с ними воздействия являются причиной неисправностей и ненормальных режимов работы распределительных сетей, что подчеркивает важность внедрения эффективных методов определения мест повреждений для их своевременного устранения. С точки зрения анализа причин около 50% отключений связаны с воздушными линиями (ВЛ) электропередачи, а остальная часть распределяется между КЛ электропередачи, трансформаторами и другими устройствами. В последнее время в связи с развитием ИСЭ значительно увеличилась частота отключений КЛ [10, 11]. Примерно 65% отключений на линиях высокого напряжения (ВН) и среднего напряжения (СН) вызваны

кратковременными неисправностями и заканчиваются успешным автоматическим повторным включением (АПВ). Оставшиеся 35% вызваны отказами, за которыми следуют неуспешные АПВ. Сегодня локализация поврежденных участков систем электроснабжения имеют успех в более 90% случаях. Это подчеркивает рост важности проблемы эффективного управления ИСЭ. В распределительных сетях со сложной взаимосвязанной топологией, точность определения мест повреждений имеет тенденцию к снижению. Поэтому всестороннее изучение основных методов диагностики и прогнозирования неисправностей на КВЛ и их внедрение становится весьма актуальным в связи с переходом от централизованной к так называемой распределенной генерации. Важно пояснить, что питающие сети относятся к высоковольтным элементам системы электроснабжения, соединяющие станции и подстанции (ПС) питающей сети, в то время как распределительные сети охватывают системы СН и низкого напряжения (НН), соединяя распределительные ПС с конечными пользователями. Далее рассмотрим перенапряжения и сверхтоки как наиболее частые явления, влияющие на нормальный режим поставки и распределения электроэнергии.

Анализ причин перенапряжений и сверхтоков

В случае перенапряжений [12] напряжение превышает номинальное расчетное значение. По характеру причин перенапряжения можно разделить на внутренние и внешние. Внешние перенапряжения в основном вызваны прямыми ударами молний, которые определяют так называемые перенапряжения атмосферного происхождения и характеризуются быстрым порядка наносекунд нарастанием фронта импульса и очень быстрыми переходными процессами. Часто их называют грозовыми импульсными перенапряжениями. Они могут повредить изоляцию ВЭ. По причине ухудшения свойств изоляции могут возникнуть короткие замыкания (КЗ), при которых в окружающую среду рассеивается большое количество энергии, что может привести к значительным повреждениям. Обычно, чтобы предотвратить разрушение изоляции ВЭ, их проектируют со значительным запасом прочности к перенапряжениям, в несколько раз превышающие номинальные значения. Микропроцессорные системы релейной защиты и автоматики (РЗА) и противоаварийной автоматики (ПА) ранних поколений имели такие недостатки, как низкая частота дискретизации, ограничения пропускной способности каналов связи (КС), что затрудняло точную и быструю обработку сигнала переходного процесса, сопровождающего перенапряжения. Сегодня, благодаря более высоким частотам дискретизации аналого-цифровых преобразователей (АЦП), развитию беспроводных КС [13] этот недостаток частично преодолен. Внутренние перенапряжения вызываются операциями замыкания и размыкания коммутационных аппаратов (КА), поэтому их называют коммутационными перенапряжениями. Они могут быть распознаны по быстрым изменениям потребляемой мощности, или по резонансным явлениям в сети, связанные с широким частотным спектром сигнала переходного процесса и поглощением его компонент элементами ВЭ. Наконец, скачки напряжения могут быть вызваны повреждениями, связанными с перекрытиями изоляции ВЛ. Эти перенапряжения могут превышать номинальные значения в несколько раз и, как правило, вызывают переходные процессы длительностью порядка миллисекунд, в течение которого необходимо распознать ситуацию и при необходимости осуществить оперативные переключения [14]. В случае сверхтоков сила тока превышает номинальное расчетное значение. В зависимости от причин их возникновения, сверхтоки можно разделить на постоянные, переходные и аварийные. Различают сверхтоки, вызванные кратковременными и постоянными перегрузками. Сверхтоки, вызванные кратковременными перегрузками, возникают в основном по причине пусковых токов синхронных двигателей, которые до десяти раз выше номинальных и длятся несколько секунд. Сверхтоки могут возникать при включении трансформаторов без нагрузки, что может вызывать токи до трех раз выше номинальных в течение короткого времени. Обе эти причины сверхтоков связаны с переходными явлениями, поэтому нецелесообразно отключать КВЛ по которой циркулирует сверхток для предотвращения аварийного отключения. Сверхтоки, вызванные постоянными перегрузками, возникают при дефиците мощности. Они подразумевают медленный нагрев проводников. В случае, когда тепловая перегрузка продолжается в течение длительного времени, необходимо отключить нагрузку. Смягчение последствий перегрузок особенно важно для ИСЭ и систем распределенной генерации [15]. В ИСЭ с наличием большого количества источников ВИЭ становится актуальной разработка новых систем защит [16, 17]. Сверхтоки, вызванные повреждениями, обычно возникают по причине случайного электрического контакта между двумя точками, находящимися под разными потенциалами, при этом образуются

так называемые контуры неисправностей, по которым циркулирует ток КЗ, который значительно превышает номинальное значение. Обычно КЗ может произойти по причине повреждением изоляции, вызванного случайными перекрытиями, дождем и перегревом вследствие длительных перегрузок, но чаще всего из-за перенапряжений, которые вызывают появление дуги между точками, находящимися под разным потенциалом. В зависимости от топологии и состава ИСЭ предлагаются различные алгоритмы защиты от КЗ и ненормальных режимов [18-20]. Эволюция систем электроснабжения подразумевает внедрение новых устройств РЗА и ПА. Например, в [21] обсуждается использование активного сверхпроводящего ограничителя тока КЗ с насыщающимся ферромагнитным сердечником для преобразования больших токов КЗ в ИСЭ. В настоящее время используется множество различных систем контроля и управления состоянием КВЛ, которые по их назначению можно разделить на системы защиты и диагностические. Первые фокусируются на аварийных событиях и приводят к отключению поврежденного участка. Это системы РЗА и ПА и системы нахождения мест повреждений [22]. С другой стороны, диагностические системы экспресс-диагностики и мониторинга направлены на предотвращение аварийных ситуаций [23].

Отличительные особенности систем защиты и диагностики КВЛ ИСЭ

Повреждения изоляции КВЛ могут привести к отключению потребителей. К защитным системам относятся системы РЗА, которые отключают поврежденный участок. После срабатывания защиты определяют место повреждения. Отключение поврежденного участка должно выполняться селективно с последующим АПВ, или АВР [24]. Эффективность системы защиты оценивается на принципах улучшения селективности, надежности, чувствительности и быстродействия [25]. С другой стороны, диагностические системы должны выявлять начальные признаки потерь функциональности ВЭ, чтобы предотвратить аварийные отключения системами РЗА и ПА. Обычно для этого требуется применение систем мониторинга и машинного обучения на основе ИНС. Например, для КЛ СН переход в аварийный режим сопровождается развитием дефектов в муфтах. При этом дефекты развиваются в три этапа: от нормального состояния, через частичную потерю свойств изоляции к полному разрушению изоляции, когда срабатывает система РЗА (рис. 1).

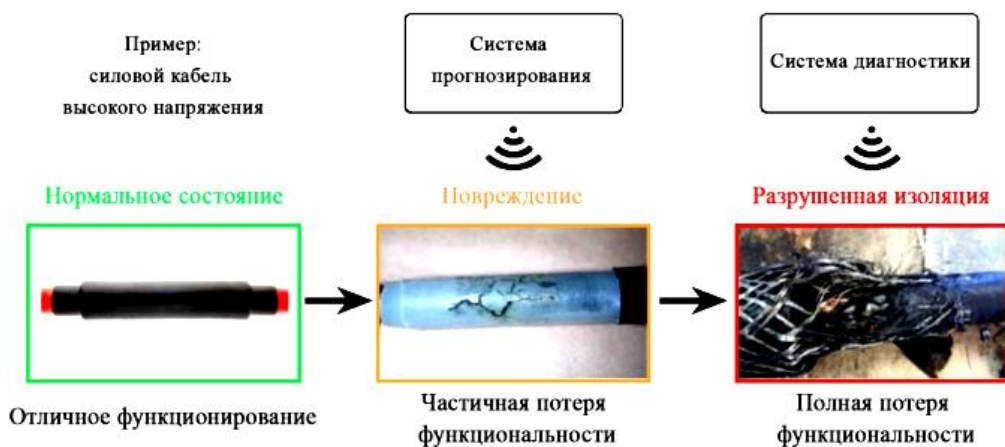


Рис. 1. Этапы развития дефекта промежуточной муфты кабеля среднего напряжения

Fig. 1. Stages of a defect development in the medium voltage cable intermediate coupling

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Массовое внедрение ВИЭ потребует дальнейших разработок в области систем защиты и диагностики из-за возрастающей сложности современных ИСЭ. Фактически, наличие низковольтных установок, работающих в основном на фотоэлектрических (ФЭ) и ветровых генераторах, создает двунаправленные потоки энергии в распределительных сетях, которыми необходимо управлять для поддержания баланса мощностей в автоматическом режиме [26, 27]. При этом может произойти инверсия потока мощности на ПС питающих и распределительных сетей. Следовательно, становится необходимым внедрение новых методов дистанционного управления генераторами и диспетчерскими нагрузками, как и адаптация систем РЗА таким образом, чтобы они не производили нежелательных переключений, особенно если применяются блокчейн технологии с максимальным уровнем автоматизации [28, 29]. В этом контексте алгоритмы прогнозирования, анализа баланса производства и потребления электроэнергии на основе

ИНС позволяют предотвращать избыточные и ложные отключения [30]. Управляющие воздействия также необходимы для предотвращения каскадных (всерных) отключений по причине КЗ, а также для управления резервным питанием на основе ВИЭ [31, 32]. Современные автоматизированные системы телеметрии и управления технологическим процессом (АСУТП) производства и распределения электроэнергии используют алгоритмы прогнозирования для улучшения функциональных возможностей ИСЭ. Алгоритмы прогнозирования играют ключевую роль в оптимизации распределения электроэнергии, повышают эффективность АСУТП и помогают принятию оптимальных решений с точки зрения развития систем электроснабжения. Алгоритмы прогнозирования предполагают наличие модели спроса на электроэнергию, позволяя эффективно регулировать нагрузки и распределять ресурсы, в том числе связанные с персоналом. В ИСЭ алгоритмы прогнозирования являются неотъемлемой частью систем распределенной генерации на основе ВИЭ, таких как солнечная и ветровая, позволяя эффективно балансировать спрос и предложение. Кроме того, алгоритмы прогнозирования используются для составления графиков нагрузок, производства и потребления электроэнергии. Это позволяет оптимизировать использование электроэнергии в период и вне режима пиковой нагрузки, что приводит к экономии ресурсов и снижению негативного воздействия на окружающую среду. Интеграция алгоритмов машинного обучения в современные АСУТП еще больше повышает точность прогнозирования графиков нагрузки. Эти алгоритмы основаны на анализе собранных в течение длительного периода данных о погодных и других условиях для повышения эффективности прогнозирования. Это особенно полезно в сценариях работы микросетей (так называемых Microgrids), в которых источники генерации и потребители мощности меняются динамически. Подводя итог, можно сказать, что включение алгоритмов прогнозирования в различные системы управления энергоресурсами позволяет им принимать обоснованные решения, учитывать изменения спроса и предложения на электроэнергию и повышать общую эффективность и устойчивость работы системы электроснабжения. Кроме того, ВИЭ характеризуется высокой нестабильностью генерации, что создает проблемы в диспетчеризации [33, 34]. Фактически, мгновенный баланс между производством и потреблением мощности играет основополагающую роль в стабильности функционирования электроэнергетической системы, гарантируя отсутствие колебаний напряжения и частоты. В системах электроснабжения при дефиците мощности частота тока снижается и увеличивается при ее избытке. Защита от перегрузок, перенапряжений и колебаний частоты являются обязательными при подключении генераторов ВИЭ к ИСЭ [35]. При подключении генераторов ВИЭ может возникнуть скачок напряжения на шинах ПС питающей сети. Более того, поскольку производительность генераторов ВИЭ весьма изменчива, часто появляются скачки напряжения, которые необходимо сглаживать на ПС распределительной сети. Когда это явление возникает периодически в течение коротких промежутков времени, оно называется мерцающим эффектом. Это явление распознается системами диагностики по наличию гармонических искажений, источниками которых обычно являются нелинейные нагрузки и статические преобразователи, используемые для подключения генераторов ВИЭ к сети [36]. В [37] представлен подробный обзор методов мониторинга состояния систем электроснабжения. Большинство этих методов основаны на электрической рефлектометрии, представлен подробный обзор основных теоретических аспектов метода рефлектометрии во временной области, последовательной рефлектометрии во временной области, рефлектометрии во временной области с расширенным спектром, ортогональной многотональной рефлектометрии, рефлектометрии в области шума, рефлектометрии во временной области хаоса, бинарной рефлектометрии во временной области, рефлектометрии в частотной области, рефлектометрии с несколькими несущими и рефлектометрии в частотно-временной области. Однако лишь вкратце упоминается их возможное использование для прогнозирования момента развития дефектной структуры кабеля в аварийный режим. С этой точки зрения мониторинг методом ЧР вместе с методами определения мест повреждений с высоким импедансом и предотвращением дуговых разрядов (ДР) могут стать наиболее интересными разработками в ближайшем будущем [38]. Метод ЧР относится к прогностическим методам диагностики. В последнее время для обработки ЧР применяются искусственные нейронные сети (ИНС).

Системы защиты ИСЭ СН

В трехфазных системах переменного тока применяются векторные диаграммы токов и напряжений для выявления прямой, обратной и нулевой последовательностей, возникающих при повреждениях. При определенных конфигурациях векторных диаграмм

срабатывают функции РЗА. Устройства РЗА распределены по всей сети, поэтому их сложно скоординировать. Для распределительных сетей разработали специальный программный продукт SCADA (Supervisory control and data acquisition), объединяющий информацию от измерительных трансформаторов, электрических машинах, устройств РЗА в единый программно-аппаратный комплекс (ПАК) для управления и контроля распределенными системами электроснабжения [39]. Она представляет собой иерархическую структуру, которая объединяет региональные системы SCADA в SCADA стран и регионов. Первая работает на уровне распределения мощности, позволяя управлять двунаправленными потоками энергии и немедленно передавать в диспетчерскую информацию о любых изменениях положения КА и состоянии изоляции. Таким образом, имеется возможность координировать все системы РЗА и управлять с помощью реклоузеров распределением электроэнергии. Технология SCADA обладает значительным потенциалом для расширения возможностей умных городов по оптимизации своих распределительных сетей и инфраструктуры посредством Smart Grids. При организации Smart Grids необходимо следовать ряду национальных и международных технических стандартов. Это связано в том числе с большим количеством участников распределенной генерации и наличием у каждого из них систем РЗА, которые необходимо координировать. Управление распределением электроэнергии осуществляют региональные операторы распределительной системы. Подключение пассивных и активных пользователей к системе распределенной генерации требует установки систем РЗА [40, 41].

Системы защиты ИСЭ ВН

Высоковольтные КВЛ используются для передачи мощности от электростанций до ПС питающей сети. Топология такой системы может напоминать соты, или радиальной. Это сделано для оптимизации перетоков мощности и обеспечения непрерывного режима электроснабжения. При этом при определенных режимах часть этих участков может быть изолирована вследствие так называемого «островного эффекта». Большая часть оборудования, используемого в высоковольтных сетях, защищена с помощью систем РЗА и спроектирована с учетом критерия избыточности по пропускной способности и запасам мощности для обеспечения условий новых присоединений. Учитывая необходимость передачи мощности на большие расстояния, ИСЭ ВН, как правило, являются воздушными, в то время как КЛ (гораздо более дорогие) используются только в особых случаях. Основные элементы ВЛ электроснабжения защищены дифференциальными токовыми системами защиты. Ряд работ посвящено оптимизации защит в рамках разработки так называемых адаптивных систем РЗА. В [42] предложен смарт-сенсор контроля состояния степени насыщения магнитопровода измерительных трансформаторов с адаптацией параметров РЗА. Кроме того, рассматривается методология, основанная на синхронизированных векторных измерениях для защиты двупольных линий с компенсированной нейтралью. В [43] предлагается решение проблемы насыщения измерительных трансформаторов и связанной с ней проблемы избыточного срабатывания дифференциальной защиты силового трансформатора на основе локальной вычислительной сети (ЛВС) из измерителей тока специальной конструкции без эффекта насыщения.

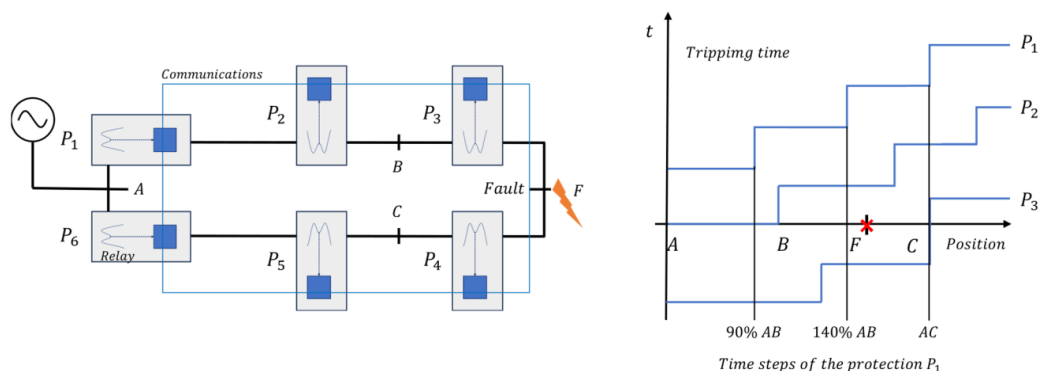


Рис. 2. Принцип работы дистанционной защиты на шести ПС питающей сети

Fig. 2. The operation principle of distance protection on six substations of the feeding network

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Внедрение синхронизации по GPS вносит сложность и повышает затраты на реализацию Smart Grids, тогда как использование синхронизации типа «точка-точка»

требует строгого задержек приема и передачи информации в канале связи. Для решения этих проблем предлагается защита линий на основе концепции так называемой дифференциальной защиты мощности [44]. Однако дифференциальные защиты не всегда селективны при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ). Для устранения этих недостатков предложен новый подход к дифференциальной защите, на основе теоремы Теллегена [45]. Этот подход сохраняет достоинства обычной дифференциальной токовой защиты, оставаясь при этом невосприимчивым к изменениям условий нагрузки и влиянию распределенной емкости в сетях сверхвысокого напряжения. Обычно для ВЛ электропередачи с двусторонним питанием резервной защитой является дистанционная защита (ДЗ). В отличие от ДФЗ ДЗ является защитой с относительной селективностью (рис. 2). ДЗ основана на зависимости импеданса линии от расстояния между источником мощности и места КЗ. ДЗ в отличие от ДФЗ как правило отключает линию с выдержками по времени, чтобы обеспечить селективность срабатывания защиты [25].

В [46] рассмотрен сверхбыстрый алгоритм защиты ДЗ, основанный на анализе первого фронта бегущих волн, возникающих при повреждениях. Алгоритм использует метод главных компонент для извлечения информации о внутренних и внешних повреждениях. Одними из ключевых вопросов, обсуждаемых и связанных с распределенной генерацией, являются кратковременные перенапряжения по причине неисправностей и потеря чувствительности защиты от сверхтоков для длинных фидеров. Несмотря на то, что ДЗ обычно используется на линиях электропередачи с двусторонним питанием, в [47] представлено возможное применение этих защит в распределительных сетях для решения некоторых проблем, связанных с интеграцией генераторов ВИЭ в систему распределенной генерации.

Системы защиты распределительных сетей ИСЭ

Распределительные сети могут быть разделены на линии СН и линии НН. Первые используются для соединения питающих и распределительных ПС. Распределительные сети связаны с потребителями электроэнергии. Разветвленная и сложная топология распределительных сетей СН требует быстрого определения места повреждения и включения резерва. Генераторы ВИЭ, которые питают распределительную сеть, вносят дополнительные сложности в вопросы управления ИСЭ [48]. В основном, в сетях СН основные функции защит выполняются с помощью реле максимального тока (РТ) в сочетании с автоматикой повторного включения (АПВ), предохранителями, секционными выключателями, в том числе вакуумными, давление в которых актуально контролировать в режиме мониторинга [49]. Это позволяет защитить линию от длительных сверхтоков и многофазных КЗ за счет селективного отключения поврежденного участка. Кроме того, применяя направленные токовые защиты, можно обнаружить ОЗЗ. Вышеупомянутые защиты от перегрузки по току играют основополагающую роль в повышении селективности систем РЗА. Селективность обеспечивается характерными для устройств максимальной токовой защиты (МТЗ) времятоковыми характеристиками, отличающиеся друг от друга углом наклона касательной. В результате мы можем скоординировать различные комплекты защит в зависимости от тока и времени. Для того чтобы избежать нежелательных последствий переходных процессов при коммутациях, функции автоматического включения резерва (АВР) и АПВ параметрируются таким образом, чтобы постепенно, ступенчато отключать и включать нагрузки. Таким образом, добиваются селективности срабатывания защит. В [50] эту задачу решают с помощью реклоузеров, встраивая их в традиционные сети. Применение реклоузеров позволяет лучше прогнозировать и оптимизировать поставки электроэнергии потребителям [51]. Этот тип управления реализован в современной SCADA для оптимизации работы сети и всех подключенных устройств, включая генераторы ВИЭ [52].

Системы диагностики ВЛ ВН ИСЭ

Чтобы избежать внезапных отключений, обычно проводят плановые визуальные и тепловизионные осмотры элементов ВЛ ВН. Для выполнения этих операций в том числе используются беспилотные аппараты, оснащенные тепловизионными камерами, проводятся осмотры с вертолетов. Основными объектами этих осмотров являются места соединений частей фазного провода. Такой тип осмотра может проводиться каждые два года, и проверка становится более частой для участков сети, расположенных в районах с неблагоприятными условиями окружающей среды [53]. Оценка состояния ВЛ ИСЭ в первую очередь основана на моделях механизмов износа, осмотрах и профилактических заменах ВЭ. Например, важным видом работ является осмотр высоковольтных опор и оценка ухудшения их свойств по причине коррозии [54]. В [55] представлена методология определения поврежденных жил в форме надразов и глубоких царапин. Что касается

алюминиевых жил, армированных сталью, лучше использовать базы данных для диагностики их состояния в связи с растянутым во времени процессом развития повреждений [56], что позволит более точно определять их остаточный ресурс [57]. ИСЭ не предполагают полного отказа от их обслуживания, что делает актуальным развитие эффективных методов прогнозирования дуговых замыканий при замене элементов ВЛ ВН без отключения приложенного напряжения [58]. Методы диагностики КЛ ВН аналогичны прогностическим методам КЛ СН.

Системы диагностики КВЛ СН ИСЭ

Большая часть инфраструктуры линий СН состоит из КЛ, поэтому системы мониторинга в основном связаны с обнаружением неисправностей изоляции. Многие диагностические работы в настоящее время применяются при отключенном приложенном напряжении. На рисунке 3 показан механизм повреждения изоляции силового кабеля в процессе эксплуатации. Некоторая часть дефектов образуется уже на этапе производства кабелей. Дефектная структура развивается в процессе эксплуатации КЛ. В материале изоляции кабеля могут присутствовать примеси, концентрация которых может увеличиваться под воздействием изменения условий окружающей среды, механических повреждений, загрязнения, распада молекул изоляции кабеля. Когда дефектная структура нарушает защитную оболочку кабеля, это ускоряет процессы коррозии. Образуются так называемые водные триинги (water trees) и электрические триинги (electrical trees), направленные навстречу друг другу. Водные триинги связаны с движением молекул воды, которые будучи дипольными, увеличивают локальную напряженность электрического поля и вызывают электрические триинги. Электрические триинги обусловлены движением зарядов в воздушных вкраплениях (кавернах) диэлектрика. Электрические триинги приводят к локальному нагреву диэлектрика и образованию новых каверн вследствие разрыва молекулярных структур материала изоляции.

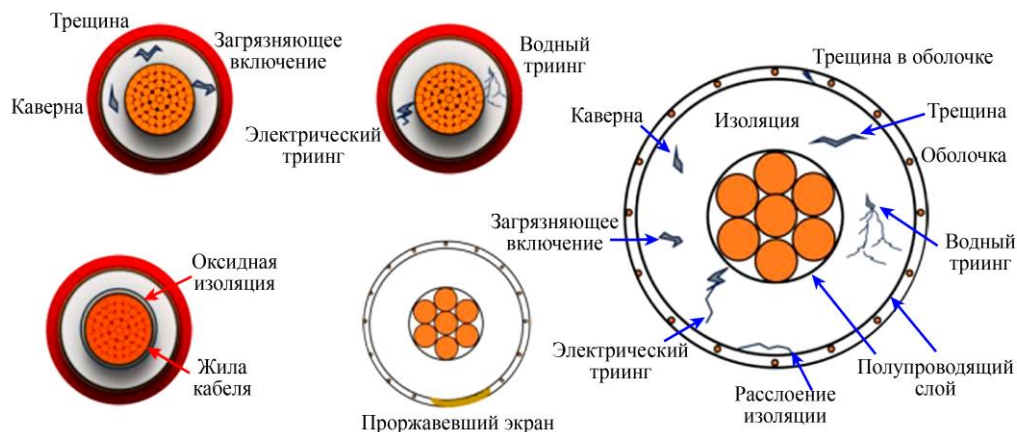


Рис. 3. Иллюстрация механизма разрушения изоляции силового кабеля в процессе эксплуатации

Fig. 3. Illustration of the destruction mechanism of the power cable insulation during operation

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Метод ЧР является одним из основных методов неразрушающего контроля и мониторинга состояния КЛ [59, 60]. Развивают комплексные системы мониторинга кабельных линий [61]. Для экспресс-диагностики состояния различных элементов кабельных линий часто применяется метод тепловизионного обследования [62-64]. Электроимпедансная спектроскопия (ИС) является методом неразрушающего контроля, связанная с измерением импеданса изоляции кабеля в зависимости от частоты [65]. Метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на анализе акустических волн в процессе эксплуатации КЛ, может дать информацию о потерях эластичности изоляции кабеля [66, 67]. Метод диэлектрической спектроскопии (ДС) может дать информацию о состоянии изоляции КЛ среднего напряжения [68, 69]. ЧР – это разновидность искрового разряда, который происходит в ограниченной области изоляционного материала в местах повышенных значений напряженности локального электрического поля. Иногда ЧР называют микродугой. Характеристики ЧР могут дать информацию о дефектах, поэтому метод ЧР широко используется в диагностике состояния изоляции. ЧР могут возникать в любом оборудовании с дефектами изоляции различного типа, включая газовую, масляную или твердую. Необходимо принимать профилактические меры для уменьшения

негативного воздействия ЧР. Трансформаторы и распределительные устройства с газовой изоляцией (КРУЭ) являются одними из наиболее изученных с точки зрения диагностики методом ЧР [70]. Изоляция КВЛ СН и ВН также подвержены негативному воздействию ЧР [71]. Экспресс-тестирование методом ЧР может быть эффективно выполнено с использованием датчиков ультравысокой частоты (УВЧ) электромагнитного излучения (ЭМИ). Системы онлайн-мониторинга по характеристикам ЧР находятся на стадии разработки ввиду ряда нерешенных проблем [72]. В настоящее время активно развивают методы мониторинга КЛ постоянного тока, в том числе с жилами из высокотемпературных сверхпроводников, основанные на анализе характеристик ЧР [73]. Для эффективной диагностики КЛ, необходимо различать коронные ЧР от поверхностных ЧР (ПЧР), которые часто связаны с загрязнением поверхности изоляторов [74] и внутренних ЧР [75]. ПЧР часто возникают на границах раздела различных элементов муфт кабеля [76, 77]. Внутренние ЧР наиболее хорошо изучены и их связывают с разрушением изоляции [78]. Для количественного описания характеристик ЧР применяют модель многослойной изоляции [79]. Также известны статистические модели анализа характеристик ЧР [80]. При этом рассматриваются недостатки модели многослойной изоляции, связанной с непостоянством емкости дефекта [81]. Для решения этой проблемы в [82] предложена модель индуцированного ЧР заряда. Для уменьшения интенсивности и негативного влияния ЧР на изоляцию промежуточных и концевых муфт КЛ, возможным решением является специальное дополнение конструкции муфт в форме конуса, изготовленного из диэлектрического материала, способного снижать напряженность электрического поля. Для описания распространения ЧР, кабель рассматривают в разных моделях как систему с сосредоточенными, или с распределенными параметрами в зависимости от длины кабеля. Модели сосредоточенных параметров [83], Бержерона [84] и частотно-зависимая модель [85] являются тремя наиболее известными для описания распространения ЧР в силовом кабеле. Эти модели применяются для составления схем замещений, расчетов при определении места повреждения в одножильном силовом кабеле. Для многожильных кабелей модель описания распространения ЧР более сложная [86]. Метод ЧР по сути дополняет метод электрической рефлектометрии для определения места повреждения в КЛ [87, 88]. Методы тепловизионного обследования основаны на регистрации и анализе вторичного ЭМИ, обусловленного ЧР, в инфракрасном (ИК) диапазоне частотного спектра. При этом строятся тепловизионные изображения, или их последовательности в пространстве и времени для изучения волновых процессов и идентификации дефектов [89]. Метод ИС основан на измерении зависимости комплексного сопротивления, емкости кабеля в зависимости от частоты [90, 91]. Метод АЭ заключается в анализе состояния изоляции кабеля по характеристикам звуковых колебаний, обусловленных ЧР, записанные ультразвуковым микрофоном. При этом наиболее эффективно проводить диагностику изоляции силового трансформатора, сочетая метод АЭ с анализом характеристик ЧР в высокочастотной (ВЧ) и УВЧ области ЭМИ. Метод ДС по сути является частью метода ИС. Метод ИС, как правило, применяется для определения остаточного ресурса кабелей по зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты. При этом частота приложенного напряжения меняется в пределах от 0.1 МГц до 100 Гц. В [92] было показано, что диэлектрические потери на концевых муфтах кабеля выше по сравнению с промежуточными и был сделан вывод о том, что концевые муфты быстрее разрушаются по причине влаги и ЧР. Многие перспективные методы диагностики связаны с применением нескольких моделей и типов ИНС, например, для определения мест повреждений [93] и ДЗ [94]. При этом часто применяют МНК, который является важным инструментом оптимизации, особенно при работе со сложными многомерными наборами данных, множеством признаков повреждений для их классификации, преобразуя их в новый набор независимых друг от друга параметров, называемых главными компонентами. МНК уменьшает сложность набора данных, сохраняя при этом наиболее значимую информацию, что ускоряет вычислительный процесс, но снижает возможности переобучения моделей ИНС при появлении новых признаков повреждений. МНК помогает создать более обобщенную и надежную модель, сосредоточившись на основных закономерностях данных. Кроме того, МНК полезен в тех случаях, когда исходные характеристики повреждений имеют общие причины, но проявляют себя по-разному. МНК решает эту проблему, преобразует исходные характеристики в линейно некоррелированные компоненты [95-97].

Основные перспективные разработки защит ИСЭ

ДЗ использовалась в течение многих десятилетий, но в настоящее время может потребоваться ее адаптация к новой конфигурации электрической системы. Например, в

[98] исследована надежность ДЗ линий постоянного тока морских ветровых установок, а в [99] предлагается новое дистанционное реле на основе оценки реактивного сопротивления линии. Координация ДЗ играет фундаментальную роль в селективном отключении поврежденного участка линии. Поскольку обычные ДЗ не работают селективно в случае параллельных линий из-за взаимного влияния цепей и нулевой последовательности, несколько статей предлагают адаптивные схемы для решения этой проблемы [100, 101]. Предлагаемая схема динамически корректирует уставки на основе определенных входных сигналов для учета эффекта взаимного влияния цепей. Используя эти дополнительные входные величины для настройки защиты, предлагаемый подход значительно улучшает чувствительность ДЗ параллельных линий. Те же принципы можно применить для дифференциальной защиты линий, шин, силовых трансформаторов и другого высоковольтного оборудования [102, 103]. Для увеличения эффективности дифференциальной защиты применяют ИНС [104]. В некоторых ситуациях в качестве резервной по отношению к ДЗ применяется МТЗ без выдержки по времени (токовая отсечка) [21]. Некоторые из наиболее важных разработок в области широкомасштабного мониторинга, защиты и управления в настоящее время связаны с внедрением алгоритмов искусственного интеллекта в системы РЗА. Например, для анализа данных, полученных при синхронизированных векторных измерениях (СВИ) используют ИНС [105]. При этом для решения задач оптимизации расположения модулей СВИ применяют специальные математические алгоритмы [106]. Как правило, целевые функции этих задач оптимизации определяют минимальное количество и оптимальное положение точек измерения [107-110]. Кроме того, в этих задачах предполагается, что сеть связи обладает достаточной пропускной способностью, но это условие может не выполняться на практике. Недавно в алгоритм оптимизации была включена задача размещения линии связи, что обеспечило наблюдаемость всей системы [111]. Основные новые разработки в области защит ИСЭ СН касаются городских сетей. Основной целью с точки зрения автоматизации является мониторинг состояния элементов сети и управление системами защит различного поколения, в том числе электромеханическими. Такая координация позволяет локализовать неисправный участок в сложной системе электроснабжения. Высокая степень автоматизации ИСЭ по сравнению с традиционными сетями достигается за счет достаточного для отделения поврежденного участка распределительной сети количества реклоузеров, что позволяет не отключать ПС питающей сети при любых повреждениях. При этом поврежденный участок ИСЭ определяется централизованно, чего не было доступно в сетях более ранних поколений. Дальнейший шаг к развитию распределительных сетей заключается во внедрении интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ), способных взаимодействовать друг с другом с помощью цифровых протоколов, таких как МЭК 61850 [112, 113]. В сетях, управляемых с помощью ИЭУ, координация между защитами осуществляется специальными командами блокировок, предотвращающих избыточное срабатывание защит смежных участков. Это делается для того, чтобы на какое-то время изолировать поврежденный участок ИСЭ. Тот же принцип распространяется на ИСЭ СН и НН. Для реализации этого принципа в каждом случае динамически формируется виртуальная сеть из ИСЭ в соответствии с топологией системы электроснабжения [114]. Когда в ИСЭ возникает повреждение, каждое ИЭУ в зоне защиты этого участка будет обмениваться друг с другом файлом, содержащим информацию о векторных конфигурациях токов и напряжений. В этом сценарии алгоритмы защиты распознают ситуацию и адаптируются путем сравнения данных до и после определенных событий. Результаты моделирования подтверждают, что предлагаемый метод способен быстро и точно определять неисправность. Он очень чувствителен к различным типам междуфазных замыканий и может надежно работать даже в ИСЭ различной топологии. В случае распределенной генерации с большим количеством генераторов ВИЭ некоторые исследователи считают наиболее перспективным решением топологию microgrids [116]. В частности, предлагаются адаптивные защиты, основанные на различных вычислительных методах и ИНС, метаэвристические алгоритмы, алгоритмы нечеткой логики, параллельной работы ИНС нескольких типов и другие для решения задач оптимизации ИСЭ. Например, в [117], для поиска наилучшего положения устройств модулей СВИ и достижения полной наблюдаемости распределительной сети применяется метаэвристический алгоритм. Алгоритмы управления распределительными сетями не должны приводить к полной их изоляции от всей сети за счет применения адаптивных алгоритмов защиты [118]. Использование ИЭУ улучшает функции защиты элементов распределительной сети, но в тоже время приводит к появлению проблем, связанные с необходимостью построения

сложных в обслуживании КС [119], кибербезопасностью [120] и управлением режимами станций [121].

Основные перспективные разработки систем диагностики ИСЭ

Прогнозирование остаточного ресурса является одной из основных областей исследований, в которой активно применяются ИНС. Например, в [122] для оценки остаточного ресурса и предотвращения выхода из строя фотоэлектрических преобразователей постоянного тока используется интеллектуальный классификатор. В [123] предлагаются решения на базе ИНС для мониторинга линий электропередачи. В [124] обсуждается использование ИНС для прогнозирования времени бесперебойной работы ИСЭ. Немаловажную роль в работе КЛ ВН играют муфтовые соединения, о состоянии которых можно судить по температуре, которую сложно контролировать в режиме мониторинга ввиду того, что кабели ВН располагаются под землей. Дополнительные сложности связаны с влиянием нагрузки и солнечной радиации, влияющие на изменения температуры. В [125, 126] представлены перспективные методы оптимизации тепловизионных методов диагностики, связанные с изменениями условий окружающей среды, в частности скорости ветра. В [127] предложена модель для исследования взаимосвязи сопротивления и температуры соединительных гильз и скруток фазного провода ВЛ, муфтовых соединений КЛ. В [128] предложено комплексное исследование оценки состояния скруток, болтовых соединений ВЛ на основе тепловизионной диагностики и оценки состояния муфт КЛ на основе данных импульсной рефлектометрии. Можно сделать вывод, что измерения импеданса в местах неоднородностей ВЛ и КЛ могут свидетельствовать о признаках разрушения материала, которые становятся причиной отражения ЧР, диагностических импульсов и искажения их формы. Анализ характеристик этих сигналов может дать информацию относительно состояния материала скруток и муфт. В [129] предложен метод определения состояния муфт КЛ в режиме мониторинга, основанный на сравнении характеристик поврежденных с аналогичными параметрами неповрежденных муфт. Для сравнения этих параметров в [130] предложена эквивалентная схема болтовых соединений на основе сосредоточенных параметров: омического сопротивления, индуктивности и электрической емкости. Исследователи пришли к выводу, что процессы окисления материала болтовых соединений и скруток связаны с изменениями омического сопротивления, а частичный разрыв скруток связан с изменениями значений индуктивности и электрической емкости. Для оценки изменений частотных компонент диагностического и отраженных импульсов применяют алгоритмы машинного обучения на основе ИНС [131]. Технология обучения моделей ИНС для оценки остаточного ресурса муфт и болтовых соединений может быть очень сложной, поэтому требует оптимизации, например, на основе методики предварительной локализации поврежденного участка [132, 133]. Как правило, проблемы КЛ СН связаны с разрушением изоляции, процесс которого ускоряется при проникновении влаги в муфтовые соединения кабеля [134] и высокими температурами окружающей среды в период с июля по август, когда по статистике происходит до 60 % повреждений, обусловленных ухудшением состояния муфтовых соединений [135]. Для оценки повреждений КЛ СН на ранней стадии их развития, применяют модель КЛ с распределенными параметрами [136]. При этом повреждения в схеме замещения распознаются ИНС по изменениям величин удельной проводимости и емкости [137, 138] (рис. 4).

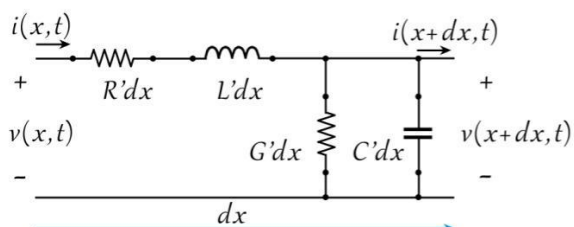


Рис. 4. Схема замещения кабеля СН

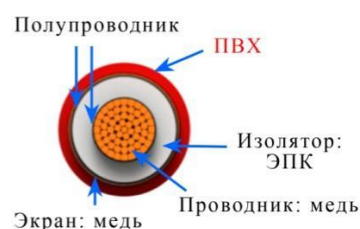


Fig. 4. Medium voltage cable replacement scheme

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Подобный метод рассмотрен в [139], где изменения импеданса КЛ СН оцениваются по искажению формы инжектируемого диагностического импульса, формируемого PLC модемами систем РЗА. В [140] теоретическая модель диагностики КЛ на основе схемы замещения с распределенными параметрами опробована на практике с применением метода импульсной рефлектометрии и метода ЧР [141, 142].

Сравнение преимуществ и недостатков различных систем мониторинга ИСЭ

Для регистрации и анализа характеристик ЧР на КЛ можно использовать множество различных методов, но вопрос их применения в режиме онлайн по-прежнему остается открытым по причине шумов, помех и изменений условий регистрации ЧР. Ввиду огромной протяженности и разветвленности КЛ до настоящего времени не решена проблема локализации мест повреждений методом ЧР в режиме онлайн без инжектирования в кабель диагностических импульсов. Метод ЧР признан одним из самых инновационных методов диагностики для обеспечения надежности управления ИСЭ. Для повышения эффективности остаточного ресурса кабеля в [143] обсуждаются алгоритмы оценки в режиме мониторинга величин кажущегося заряда ЧР, частоты следования ЧР, изменения концентрации зарядов и обнаружения мест повреждений на КЛ 10 кВ при наличии кабелей с бумажно-масляной изоляцией, XLPE кабелей с соответствующими им муфтовыми соединениями различного типа. Что касается математического аппарата, для решения задач оптимизации систем защиты и диагностики, поиска мест повреждений в распределительных сетях, применяются генетические алгоритмы [144], алгоритмы нелинейного программирования [145], волновой метод [146], алгоритмы адаптивной дифференциальной эволюции [147]. В [148, 149] с помощью генетических алгоритмов предлагают координировать комплекты МТЗ. Работы [150, 152] посвящены применению ИНС для определения мест повреждений в распределительных сетях. Та же задача в [153] решается с помощью алгоритмов нечеткой логики, а в [154-156] с помощью генетических алгоритмов. В [157, 158] рассматривается применение ИНС для нахождения мест повреждений на ВЛ. В [160] предлагается для решения этой же задачи совместно применять генетический алгоритм и ИНС. Что касается метода ЧР, он эффективен для мониторинга состояния ИСЭ, но сложен в реализации. Кроме того, до настоящего времени не решены фундаментальные причины изменения характеристик ЧР и их взаимосвязи с состоянием ВЭ. Метод тепловизионного обследования также как и метод ЧР является неразрушающим и полезен для экспресс-диагностики повреждений кабеля и его муфтовых соединений. Его недостатки заключаются в невозможности выявления внутренних дефектов и дефектов, которые не связаны с избыточным выделением тепла. Метод тепловизионного обследования в существенной степени зависит от факторов окружающей среды таких как температура и влажность. При этом проведение полевых испытаний требует специализированного оборудования и квалифицированного персонала. Метод АЭ также является неразрушающим методом диагностики и позволяет анализировать дефекты внутри кабеля, но существенно зависит от шумов, а для работы в режиме мониторинга требуется специализированное оборудование. Кроме того, он может быть недостаточно чувствительным при слабых сигналах АЭ. Наконец, метод ДС также является неразрушающим методом оценки состояния изоляции кабелей, однако, подобно ИС, на ее результаты могут влиять изменения температуры и влажности. Кроме того, для эффективной реализации ДС требуется применение высоковольтного источника низкочастотного переменного напряжения.

Заключение (Conclusions)

Можно сказать, что мониторинг ИСЭ играет основополагающую роль в обеспечении бесперебойного электроснабжения и эта задача будет актуальной еще долгое время. Можно сказать, что наиболее перспективным из математических методов обработки данных с целью своевременного выявления повреждений ИСЭ являются ИНС. ИНС также могут быть полезны в системах мониторинга состояния ИСЭ в режиме онлайн. Для масштабирования систем мониторинга необходимо применять типовое оборудование, в том числе типовые КС РЗА. Решение задачи оптимизации КС обмена диагностической информацией по линиям электропередачи с результатами измерений частотных характеристик электромагнитных и тепловых импульсов будет иметь важное значение в ближайшем будущем для разработки систем мониторинга, способных эффективно функционировать в режиме онлайн. Таким образом, разработка технологий мониторинга в режиме онлайн на основе интеграции алгоритмов искусственного интеллекта в существующие системы и комплексы, в том числе в системы РЗА является ключевой задачей для повышения надежности современных ИСЭ и интеллектуальных городов. Как упоминалось в этой статье, направление развития методов мониторинга ИСЭ с применением ИНС направлено на увеличение их эффективности и адаптивности. Новые технологии стимулируют переход к динамически формируемым в реальном режиме времени моделям, которые помогают операторам сетей управлять и оптимизировать процесс распределения энергии. Ключевой тенденцией является интеграция технологии обработки больших данных с применением алгоритмов

искусственного интеллекта. Эти технологии позволяют осуществлять диагностику и обслуживание элементов ИСЭ на ранней стадии обнаружения неисправностей и динамическую балансировку нагрузки. Алгоритмы машинного обучения всесторонне анализируют различные наборы данных, формируя критерии оценки состояния ИСЭ для повышения надежности и эффективности поставок электроэнергии. Современные системы мониторинга предназначены для быстрого обнаружения и реагирования на сбои, киберугрозы и стихийные бедствия. Современные требования предполагают интеграцию систем диагностики, систем РЗА для создания так называемых самовосстанавливающихся ИСЭ в том числе с применением генераторов ВИЭ. Методы мониторинга и управления развиваются таким образом, чтобы адаптироваться к изменчивости солнечной и ветровой энергии и обеспечить бесперебойную поставку электроэнергии высокого качества в должном объеме. Интеллектуальные датчики и системы управления играют важную роль в ИСЭ распределенной генерации. По сути, будущее систем и методов мониторинга ИСЭ заключается в увеличении вычислительных ресурсов на основе искусственного интеллекта и интеллектуальных технологий для создания гибких, устойчивых и надежных энергетических сетей. Можно сделать вывод, что в ближайшем будущем наиболее важным в области разработок новых систем РЗА станет решение задачи оптимизации обмена информацией для лучшей координации систем РЗА питающих и распределительных сетей, сложность которых с каждым годом растет, для предотвращения ложных, избыточных срабатываний и аварийных режимов вследствие небаланса мощностей. Этот аспект будет иметь решающее значение для оптимального управления при массовой интеграции генераторов ВИЭ и предотвращения их полного отключения от ИСЭ (так называемый «островной эффект»), обеспечивая доступность качественной электроэнергии потребителям. Для достижения этой цели распространение технологии SCADA будет играть фундаментальную роль. В то же время необходимо обеспечивать целостность SCADA, качество, полноту и своевременность передачи данных, собираемых и передаваемых SCADA. Кибербезопасность и конфиденциальность также должны быть приоритетными задачами, защищая системы связи и сети от несанкционированного доступа, вмешательства или саботажа. Кроме того, следует обеспечивать совместимость и координацию систем SCADA с различными протоколами и платформами. Наконец, должны быть рассмотрены вопросы масштабируемости и гибкости адаптации систем и архитектур SCADA к меняющимся и растущим потребностям и запросам ИСЭ и интеллектуальных городов. Важной задачей является чтобы большинство функций защиты реализовывались непосредственно ИЭУ на основе серверных вычислений.

Литература

1. Dewangan F., Abdelaziz A.Y., Biswal M. Load Forecasting Models in Smart Grid Using Smart Meter Information: A Review // *Energies*. 2023. Vol.16. pp. 1404.
2. Al-Saadi M., Al-Greer M., Short M. Reinforcement Learning-Based Intelligent Control Strategies for Optimal Power Management in Advanced Power Distribution Systems: A Survey // *Energies*. 2023. Vol. 16. pp. 1608.
3. Hussain S., El-Bayeh C.Z., Lai C., Eicker U. Multi-Level Energy Management Systems Toward a Smarter Grid: A Review // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. pp. 71994–72016.
4. Rind Y.M., Raza M.H., Zubair M., et al. Smart Energy Meters for Smart Grids an Internet of Things Perspective // *Energies*. 2023. Vol. 16. pp. 1974.
5. Simion C.-P., Verdeş C.-A., Mironescu A.-A., et al. Digitalization in Energy Production Distribution and Consumption: A Systematic Literature Review // *Energies*. 2023. Vol. 16. pp. 1960.
6. Mahela O.P., Khosravy M., Gupta N., et al. Comprehensive overview of multi-agent systems for controlling smart grids // *CSEE J. Power Energy Syst*. 2022. Vol. 8. pp. 115–131.
7. Fabrício M.A., Behrens F.H., Bianchini D. Monitoring of Industrial Electrical Equipment Using IoT // *IEEE Lat. Am. Trans*. 2020. Vol. 18. pp. 1425–1432.
8. Wang S., Zhou L., Wang T., et al. Fast protection strategy for DC transmission lines of MMC-based MT-HVDC grid // *Chin. J. Electr. Eng*. 2021. Vol. 7. pp. 83–92.
9. Jiang J.-A., Chiu H.-C., Yang Y.-C., et al. On Real-Time Detection of Line Sags in Overhead Power Grids Using an IoT-Based Monitoring System: Theoretical Basis, System Implementation, and Long-Term Field Verification // *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. Vol. 9, N15. pp. 389–395.
10. Klyushkin N.G., Lachugin V.F. A Statistical Overview of Fault Location Methods and Problems in Calculating and Locating Faults in 110 kV (and Higher) Power Transmission Lines // *Power Technol. Eng*. 2020. Vol. 54. pp. 250–254.

11. Chen B. Fault Statistics and Analysis of 220-kV and above Transmission Lines in a Southern Coastal Provincial Power Grid of China // *IEEE Open Access J. Power Energy*. 2020. Vol. 7. pp. 122–129.
12. Ebtsam A. H., Bishoy E. S., Ebrahim A. B. Impact and assessment of the overvoltage mitigation methods in low-voltage distribution networks with excessive penetration of PV systems: A review // *Electrical Energy Systems*. 2021. Vol. 31, N12. pp. 1–31.
13. Probst F.L., Beltle M., Tenbohlen S. Measurement of Transient Overvoltages by Capacitive Electric Field Sensors // *Sensors*. 2024. Vol. 24, N5 pp. 1357. <https://doi.org/10.3390/s24051357>
14. Reddy S.A., Kumari M.S. A review of switching overvoltage modeling in UHV AC transmission lines // *Electric Power Systems Research*. 2024. Vol. 236 pp. 110902. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110902>
15. He Q., Ding L., Kong Z.-M., et al. Distributed Scheme for Line Overload Mitigation with Linearized AC Power Flow // *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*. 2022. Vol. 69. pp. 2877–2881.
16. Zhang X., Wang X., Li Z., et al. Optimization of Impedance-Accelerated Inverse-Time Over-Current Protection Based on Improved Quantum Genetic Algorithm // *Energies*. 2023. Vol. 16. pp. 1119.
17. Ding Z., Yu K., Wang C., et al. Transmission Line Overload Risk Assessment Considering Dynamic Line Rating Mechanism in a High-Wind-Penetrated Power System: A Data-Driven Approach // *IEEE Trans. Sustain. Energy*. 2022. Vol. 13. pp. 1112–1122.
18. Al Talaq M., Al-Muhaini M. Optimal Coordination of Time Delay Overcurrent Relays for Power Systems with Integrated Renewable Energy Sources // *Energies*. 2022. Vol. 15. pp. 6749.
19. Fofha T., Khammash M., Alsadi S. Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Hybrid Firefly–Genetic Algorithm // *Energies*. 2023. Vol. 16, N14. pp. 5328.
20. Hong L., Rizwan M., Wasif M., et al. User-Defined Dual Setting Directional Overcurrent Relays with Hybrid Time Current-Voltage Characteristics-Based Protection Coordination for Active Distribution Network // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. pp. 62752 - 62769.
21. Li B., Li C., Guo F., et al. Overcurrent Protection Coordination in a Power Distribution Network with the Active Superconductive Fault Current Limiter // *IEEE Trans. Appl. Supercond*. 2014. Vol. 24. pp. 1–4.
22. Rajesh P., Kannan R., Vishnupriyan J., et al. Optimally detecting and classifying the transmission line fault in power system using hybrid technique // *ISA Transactions*. 2022. Vol. 130. pp. 253–264.
23. Kordestani M., Saif M., Orchard M.E., et al. Failure Prognosis and Applications—A SurveyRecent Literature // *IEEE Trans. Reliab*. 2021. Vol. 70. pp. 728–748.
24. Nazir M.I.; Hussain I.; Ahmad A., et al. A. System Modeling and Reliability Assessment of Microgrids: A Review // *Sustainability*. 2022. Vol. 14, N1. pp. 126.
25. Escobar J.J.M., Matamoros O.M., Padilla R.T., et al. A Comprehensive Review on Smart Grids: Challenges and Opportunities // *Sensors*. 2021. Vol. 21, N21. pp. 6978.
26. Nabatirad M., Razzaghi R., Bahrani B. BahraniAutonomous power balance in hybrid AC/DC microgrids // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2023. Vol. 146. pp. 108752.
27. Gallegos J., Arévalo P., Montaleza C., et al. Sustainable Electrification—Advances and Challenges in Electrical-Distribution Networks: A Review // *Sustainability*. 2024. Vol. 16, N2. pp. 698.
28. Jamil F., Iqbal N., Imran, et al. Peer-to-Peer Energy Trading Mechanism Based on Blockchain and Machine Learning for Sustainable Electrical Power Supply in Smart Grid // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. pp. 39193–39217.
29. Wang Y., Zhang D., Li Y., et al. Enhancing Power Grid Resilience With Blockchain-Enabled Vehicle-to-Vehicle Energy Trading in Renewable Energy Integration // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2024. Vol. 60, N2. pp. 2037 – 2052.
30. Shams M. H., Niaz H., Hashemi B., et al. Artificial intelligence-based prediction and analysis of the oversupply of wind and solar energy in power systems // *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 250. pp. 114892.
31. Qiu M. Study on Isolated Island Detection Technology of Distributed PV Grid System. 2023 Asia-Europe Conference on Electronics, Data Processing and Informatics (ACEDPI); 17-19 April 2023; Prague, Czech Republic. IEEE; 2023. pp. 539–544.
32. Mishra A., Jena P. A Scheduled Intentional Islanding Method Based on Ranking of Possible Islanding Zone // *IEEE Trans. Smart Grid*. 2021. Vol. 12. pp. 1853–1866.
33. Succetti F., Rosato A., Araneo R., et al. Challenges and Perspectives of Smart Grid Systems in Islands: A Real Case Study *Energies* // *Energies*. 2023. Vol. 16, N2. pp. 583.
34. Li X., Wang L., Yan N., et al. Cooperative Dispatch of Distributed Energy Storage in Distribution Network with PV Generation Systems // *IEEE Trans. Appl. Supercond*. 2021. Vol. 31. pp. 1–4.
35. Ding T., Wang Z., Qu M., et al. A Sequential Black-Start Restoration Model for Resilient Active Distribution Networks // *IEEE Trans. Power Syst*. 2022. Vol. 37. pp. 3133–3136.
36. Zhao J., Zhang Q., LIU Z., et al. A Distributed Black-Start Optimization Method for Global Transmission and Distribution Network // *IEEE Trans. Power Syst*. 2021. Vol. 36. pp. 4471–4481.

37. Furse C.M., Kafal M., Razzaghi R., et al. Fault Diagnosis for Electrical Systems and Power Networks: A Review // *IEEE Sens. J.* 2021. Vol. 21. pp. 888–906.
38. Han C., Gao K., Changet W., et al. Research on the Evolution Mechanism of Partial Discharge Signals for Arcing Faults in Transformers // *IEEE Access.* 2025. Vol. 13. pp. 8023–8031.
39. Jakaria A.H.M., Rahman M.A., Gokhale A. Resiliency-Aware Deployment of SDN in Smart Grid SCADA: A Formal Synthesis Model // *IEEE Trans. Netw. Serv. Manag.* 2021. Vol. 18. pp. 1430–1444.
40. Majeed A.A., Altaie A.S., Abderrahim M. et al. A Review of Protection Schemes for Electrical Distribution Networks with Green Distributed Generation // *Energies.* 2023. Vol. 16, N22. pp. 7587.
41. Bui D.M., Le P.D., Nguyen T.P., et al. An Adaptive and Scalable Protection Coordination System of Overcurrent Relays in Distributed-Generator-Integrated Distribution Networks // *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11, N18. pp. 8454.
42. Martínez-Figueroa G.d.J., Córcoles-López F., Bogarra S. FPGA-Based Smart Sensor to Detect Current Transformer Saturation during Inrush Current Measurement // *Sensors.* 2023. Vol.23, N2. pp. 744.
43. Peng F., Gao H., Huang J., et al. Power Differential Protection for Transformer Based on Fault Component Network // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2023. Vol. 38. pp. 2464–2477.
44. Darwish H.A., Taalab M.I., Ahmed E.S. Investigation of power differential concept for line protection // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2005. Vol. 20. pp. 617–624.
45. Liu S., Wang B., Zhao Y., et al. Novel Differential Protection Approach of UHV AC Transmission Lines Based on Tellegen's Quasi-Power Theorem // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2022. Vol. 37. pp. 1264–1274.
46. Vazquez E., Castruita J., Chacon O.L., et al. A New Approach Traveling-Wave Distance Protection—Part I: Algorithm // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2007. Vol. 22. pp. 795–800.
47. Sinclair A., Finney D., Martin D., et al. Distance Protection in Distribution Systems: How It Assists with Integrating Distributed Resources // *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2014. Vol. 50. pp. 2186–2196.
48. Prenc R., Rojnić M., Franković D., et al. On the Development of Overcurrent Relay Optimization Problem for Active Distribution Networks // *Energies.* 2022. Vol. 15. pp. 6528.
49. Węgierek P., Kostyla D., Lech M. Directions of Development of Diagnostic Methods of Vacuum Medium-Voltage Switchgear // *Energies.* 2023. Vol. 16, N5. pp. 2087.
50. Torres B.S., Borges da Silva L.E., Salomon C.P., et al. Integrating Smart Grid Devices into the Traditional Protection of Distribution Networks // *Energies.* 2022. Vol. 15, N7. pp. 2518.
51. Bindi M., Piccirilli M.C., Luchetta A., et al. A Comprehensive Review of Fault Diagnosis and Prognosis Techniques in High Voltage and Medium Voltage Electrical Power Lines // *Energies.* 2023. Vol. 16, N 21. pp. 7317.
52. Guillén-López D., Serrano-Guerrero X., Barragán-Escandón A., et al. Transient and Steady-State Evaluation of Distributed Generation in Medium-Voltage Distribution Networks // *Energies.* 2024. Vol. 17, N 22. pp. 5783.
53. Li Z., Zhang Y., WuH., Suzuki S., et al. Design and Application of a UAV Autonomous Inspection System for High-Voltage Power Transmission Lines // *Remote Sens.* 2023. Vol. 15, N 3. pp. 865.
54. Bindi M., Piccirilli M.C., Luchetta A., et al. A Comprehensive Review of Fault Diagnosis and Prognosis Techniques in High Voltage and Medium Voltage Electrical Power Lines // *Energies.* 2023. Vol.16, N 21. pp. 7317.
55. Liao C., Yi Y., Chen T., et al. Detecting Broken Strands in Transmission Lines Based on Pulsed Eddy Current // *Metals.* 2022. Vol. 12, N6. pp. 1014.
56. Rondineau A., Gaillet L., Dieng L., et al. Degradation of Steel Wires in Bimetallic Aluminum–Steel Conductors Exposed to Severe Corrosion Conditions // *Corros. Mater. Degrad.* 2022. Vol. 3, N4. pp. 646–660.
57. Jurkiewicz B., Smyrak B. Studies on the Evolution of Fatigue Strength of Aluminium Wires for Overhead Line Conductors // *Materials.* 2024. Vol. 17, N11. pp.2537.
58. Gao J., Wang L., Wu S., et al. Prediction of Breakdown Voltage of Equipotential Live-Line Work Air Gaps in Transmission Lines: A Computational Discharge Model // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility.* 2022. Vol. 64, N 6., pp. 1932–1940.
59. Govindarajan S., Morales A., Ardila-Rey J.A., et al. A review on partial discharge diagnosis in cables: Theory, techniques, and trends // *Measurement.* 2023. Vol. 216. pp. 112882.
60. Zhang X., Pang B., Liu Y., et al. Review on Detection and Analysis of Partial Discharge along Power Cables // *Energies.* 2021. Vol. 14. pp. 7692.
61. Song Y., Chen W., Wan F., Zhang Z., et al. Online multi-parameter sensing and condition assessment technology for power cables: A review // *Electric Power Systems Research.* 2022. Vol. 210. pp. 108140.
62. Szczegielniak T., Kusiak D., Jabłoński P. Thermal Analysis of the Medium Voltage Cable // *Energies.* 2021. Vol. 14. pp. 4164.

63. Balakrishnan G.K., Yaw C.T., Koh S.P., et al. A Review of Infrared Thermography for Condition-Based Monitoring in Electrical Energy: Applications and Recommendations // *Energies*. 2022. Vol. 15, N16. pp. 6000.
64. Shams F., Omar M., Usman M., et al. Thermal Imaging of Utility Power Lines: A Review. In *Proceedings of the 2022 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*; 27–28 October 2022; Kuala Lumpur, Malaysia; 2022. pp. 1–4.
65. Mo S., Zhang D., Li Z., et al. The Possibility of Fault Location in Cross-Bonded Cables by Broadband Impedance Spectroscopy // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2021. Vol. 28. pp. 1416–1423.
66. Ciaburro G., Iannace G. Machine-Learning-Based Methods for Acoustic Emission Testing: A Review // *Appl. Sci.* 2022. Vol. 12, N20. pp. 10476.
67. Witos F., Olszewska A., Opilski Z., et al. Application of Acoustic Emission and Thermal Imaging to Test Oil Power Transformers // *Energies*. 2020. Vol. 13. pp. 5955.
68. Werelius P., Tharning P., Eriksson R., et al. Dielectric spectroscopy for diagnosis of water tree deterioration in XLPE cables // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2001. Vol. 8. pp. 27–42.
69. Nadolny Z. Electric Field Distribution and Dielectric Losses in XLPE Insulation and Semiconductor Screens of High-Voltage Cables // *Energies*. 2022. Vol. 15, N 13. pp. 4692.
70. Sikorski W., Walczak K., Gil W., et al. On-Line Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers Based on the Simultaneous Detection of High Frequency Ultra-High Frequency and Acoustic Emission Signals // *Energies*. 2020. Vol. 13. pp. 3271.
71. Rybarz J., Borucki S., Kunicki M., et al. Influence of the Cable Accessories Installing Method on the Partial Discharge Activity in Medium Voltage Cables // *Energies*. 2022. Vol. 15. pp. 4216.
72. Rosle N., Muhamad N. A., Rohani M. N. K. H., et al. Partial Discharges Classification Methods in XLPE Cable: A Review // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. pp. 133258–133273. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3115519.
73. Li Y., Jiang L., Xie M., et al. Advancements and Challenges in Power Cable Laying // *Energies* 2024. Vol. 17, N12. pp. 2905.
74. Maraaba L., Al-Soufi, K., Ssennoga T., et al. Contamination Level Monitoring Techniques for High-Voltage Insulators: A Review // *Energies*. 2022. Vol. 15. 7656.
75. Иванов Д.А. Особенности мониторинга сверхбольших частичных разрядов в высоковольтных. // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022. Т. 24. № 1. С.151–163. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-151-163>.
76. Hoduń P., Borecki M. Reliability Assessment of MV Power Connections // *Energies*. 2021. Vol. 14. 6965.
77. Barbieri L., Villa A., Malgesini R., et al. An Innovative Sensor for Cable Joint Monitoring and Partial Discharge Localization // *Energies*. 2021. Vol 14, N14. pp. 4095.
78. Albarracin R., Rodriguez-Serna J.M., Masud A.A. Finite-element-analysis models for numerical simulation of partial discharges in spherical cavities within solid dielectrics: A review and a novel method // *High Volt*. 2020. Vol. 5. pp. 556–568.
79. Rahman M.A., Saha A., Ghassemi M. Optimized Fabrication Process and PD Characteristics of MVDC Multilayer Insulation Cable Systems for Next Generation Wide-Body All-Electric Aircraft // *Energies*. 2024. Vol. 17, N12. pp. 3040.
80. Choudhary M., Shafiq M., Kiitam I., et al. Investigation of partial discharge characteristics in XLPE cable insulation under increasing electrical stress // *Engineering Failure Analysis*. 2024. Vol. 158. pp. 108006. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108006>.
81. Mcallister I.W. Electric field theory and the fallacy of void capacitance // *IEEE Trans. Electr. Insul.* 1991. Vol. 26. pp. 458–459.
82. Crichton G.C., Karlsson P.W., Pedersen A. Partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids // *IEEE Trans. Electr. Insul.* 1989. Vol. 24. pp. 335–342.
83. Mami M.S., Köksal M. Remark on the lumped parameter modeling of transmission lines // *Electr. Mach. Power Syst.* 2000. Vol. 28. pp. 565–575.
84. Suyaroj N., Premrudeepreechacharn S., Watson N.R. Transient state estimation with the Bergeron transmission line model // *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 2017. Vol. 25. pp. 806–819.
85. Abdullah H., Uwe S. A full frequency-dependent cable model for the calculation of fast transients // *Energies*. 2017. Vol. 10. pp. 1158.
86. Wagenaars P., Wouters P., van der Wielen P.C.J.M., et al. Measurement of transmission line parameters of three-core power cables with common earth screen // *IET Sci. Meas. Technol.* 2010. Vol. 4. pp. 146–155.
87. Du Z., Willett P.K., Mashikian M.S. Performance limits of PD location based on time-domain reflectometry // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 1997. Vol. 4. 182–188.

88. Robles G., Shafiq M., Martínez-Tarifa J.M. Multiple Partial Discharge Source Localization in Power Cables through Power Spectral Separation and Time-Domain Reflectometry // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2019. Vol. 68. pp. 4703–4711.
89. Snell J., Renowden J. Improving results of thermographic inspections of electrical transmission and distribution lines. 2000 IEEE ESMO—2000 IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction Operation and Live-Line Maintenance Proceedings. ESMO 2000 Proceedings. Global ESMO 2000; 8–12 October 2000; The Pow, Montreal, QC, Canada. 2000 IEEE: Piscataway, NJ, USA; 2000. pp. 135–144.
90. Ohki Y., Yamada T., Hirai N. Diagnosis of cable aging by broadband impedance spectroscopy. 2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena; 16–19 October 2011; Cancun, Mexico; 2011. pp. 24–27.
91. Zhou Z., Zhang D., He J., et al. Local degradation diagnosis for cable insulation based on broadband impedance spectroscopy // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2015. Vol. 22. pp. 2097–2107.
92. Avellan A., Werelius P., Eriksson R. Frequency domain response of medium voltage XLPE cable terminations and its influence on cable diagnostics. Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.00CH37075); 5 April 2000; Anaheim, CA, USA; 2000. pp. 105–108.
93. Yong H., Minyou C., Jinqian Z. High impedance fault identification method of the distribution network based on discrete wavelet transformation. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering; 16–18 September 2011; Yichang, China; 2011. pp. 2262–2265.
94. Li W., Liu Y., Li Y., et al. Series Arc Fault Diagnosis and Line Selection Method Based on Recurrent Neural Network // IEEE Access. 2020. Vol. 8. pp. 177815–177822.
95. Ding S., Zhang P., Ding E., et al. On the application of PCA technique to fault diagnosis // Tsinghua Sci. Technol. 2010. Vol. 15. pp. 138–144.
96. Chen H., Jiang B., Lu N., et al. Deep PCA Based Real-Time Incipient Fault Detection and Diagnosis Methodology for Electrical Drive in High-Speed Trains // IEEE Trans. Veh. Technol. 2018. Vol. 67. pp. 4819–4830.
97. Zhao H., Zheng J., Xu J., et al. Fault Diagnosis Method Based on Principal Component Analysis and Broad Learning System // IEEE Access. 2019. Vol. 7. pp. 99263–99272.
98. Zolfaghari M., Chabanlo R.M., Abedi M., et al. A Robust Distance Protection Approach for Bulk AC Power System Considering the Effects of HVDC Interfaced Offshore Wind Units // IEEE Syst. J. 2018. Vol. 12. pp. 3786–3795.
99. Nengling T., Chen C. A New Weak Fault Component Reactance Distance Relay Based on Voltage Amplitude Comparison // IEEE Trans. Power Deliv. 2008. Vol. 23. pp. 87–93.
100. Liang Y., Li W., Lu Z., et al. A New Distance Protection Scheme Based on Improved Virtual Measured Voltage // IEEE Trans. Power Deliv. 2020. Vol. 35. pp. 774–786.
101. Hu Y., Novosel D., Saha M.M., et al. An adaptive scheme for parallel-line distance protection // IEEE Trans. Power Deliv. 2022. Vol. 17. pp. 105–110.
102. Wang Y., Wang Y., Ma N., et al. Waveform-Similarity-Based Protection Scheme for AC Transmission Lines of MMC-HVDC System with Offshore Wind Farms // Energies. 2022. Vol. 15. pp. 9107.
103. Wang Q., Ma J., Shang L., et al. Analysis of the Effects of Grid-Connected Charging/Discharging Stations on Relay Protection // Energies. 2022. Vol. 15. pp. 9065.
104. Bakkar M., Bogarra S., Córcoles F., et al. Artificial Intelligence-Based Protection for Smart Grids // Energies. 2022. Vol. 15. pp. 4933.
105. Milosevic B., Begovic M. Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement. 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491); 13–17 July 2003; Toronto, ON, Canada; 2003. pp. 69–75.
106. Xu J., Wen M.H.F., Li V.O.K., et al. Optimal PMU placement for wide-area monitoring using chemical reaction optimization. 2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT); 24–27 February 2013; Washington, DC, USA; 2013. pp. 1–6.
107. Reddy K.S.K., Rao D.A.K., Kumarraja A., et al. Implementation of Integer Linear Programming and Exhaustive Search algorithms for optimal PMU placement under various conditions. 2015 IEEE Power Communication and Information Technology Conference (PCITC); 15–17 October 2015; Bhubaneswar, India; 2015. pp. 850–855.
108. Huang L., Sun Y., Xu J., et al. Optimal PMU Placement Considering Controlled Islanding of Power System // IEEE Trans. Power Syst. 2014. Vol. 29. pp. 742–755.
109. Chatterjee S., Saha Roy B.K., Ghosh P.K. Optimal Placement of PMU Considering Practical Costs in Wide Area Network. 2017 14th IEEE India Council International Conference (INDICON); 15–17 December 2017; Roorkee, India; 2017. pp. 1–6.

110. Manousakis N.M., Korres G.N. Optimal Allocation of Phasor Measurement Units Considering Various Contingencies and Measurement Redundancy // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2020. Vol. 69. 3403–3411.
111. Zhu X., Wen M.H.F., Li V.O.K., et al. Optimal PMU-Communication Link Placement for Smart Grid Wide-Area Measurement Systems // *IEEE Trans. Smart Grid.* 2019. Vol. 10. pp. 4446–4456.
112. Wojtowicz R., Kowalik R., Rasolomampionona D.D. Next Generation of Power System Protection Automation—Virtualization of Protection Systems. // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2018. Vol. 33. 2002–2010.
113. Kumar S., Abu-Siada A., Das N., et al. Reverse Blocking Over Current Busbar Protection Scheme Based on IEC 61850 Architecture // *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2023. Vol. 59. pp. 2225–2233.
114. Ma J., Ma W., Yan X., et al. A New Adaptive Backup Protection Scheme Based on Intelligent Electronic Devices // *Can. J. Electr. Comput. Eng.* 2015. Vol. 38. pp. 77–88.
115. Ma J., Ma W., Yan X., et al. A New Adaptive Voltage Protection Scheme for Distribution Network with Distributed Generations // *Can. J. Electr. Comput. Eng.* 2013. Vol. 36. pp. 142–151.
116. Barra P.H.A., Coury D.V., Fernandes R.A.S. A survey on adaptive protection of microgrids and distribution systems with distributed generators // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020. Vol. 118. pp. 109524.
117. Laouamer M., Kouzou A., Mohammedi R.D., et al. Optimal PMU Placement in Power Grid Using Sine Cosine Algorithm. 2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS); 24–25 November 2018; Medea, Algeria; 2018. pp. 1–5.
118. Sampaio F.C., Tofoli F.L., Melo L.S., et al. Smart Protection System for Microgrids with Grid-Connected and Islanded Capabilities Based on an Adaptive Algorithm // *Energies.* 2023. Vol. 16. pp. 2273.
119. Iamandi A., Arghira N., Constantin I.C., et al. The Influence of Digital Communications in Protection Schemes. 2019 22nd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS); 28–30 May 2019; Bucharest, Romania; 2019. pp. 363–368.
120. Sheng S., Chan W.L., Li K.K., et al. Context Information-Based Cyber Security Defense of Protection System // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2007. Vol. 22. pp. 1477–1481.
121. Queiroz A.R.S., Senger E.C., de Oliveira M.F., et al. Reducing Arc Flash Incident Energy Level in an Offshore Gas Production Unit Using Intelligent Electronic Devices—A Case Study // *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2015. Vol. 51. pp. 129–133.
122. Bindi M., Corti F., Aizenberg I., et al. Machine Learning-Based Monitoring of DC-DC Converters in Photovoltaic Applications // *Algorithm.* 2022. Vol. 15. pp. 74.
123. Wang L., Zhao Q., Liang D. Fault Diagnosis of UHVDC Transmission Line Based on Deep Neural Network. 2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia); 8–11 July 2022; Shanghai, China; 2022. pp. 445–450.
124. Hayder A.N., Saidi L. Applications of Artificial Neural Networks with Input and Output Degradation Data for Renewable Energy Systems Fault Prognosis. 2021 12th International Renewable Energy Congress (IREC); 26–28 October 2021; Hammamet, Tunisia; 2021. pp. 1–6.
125. Bortoni E.C., Santos L., Bastos G.S. A Model to Extract Wind Influence from Outdoor IR Thermal Inspections // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2013. Vol. 28. pp. 1969–1970.
126. Wanderley Neto E.T., Da Costa E.G., Maia M.J.A. Influence of Emissivity and Distance in High Voltage Equipments Thermal Imaging. 2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America; 15–18 August 2006; Caracas, Venezuela; 2006. pp. 1–4.
127. Comte C., Lacasse R. Applicability of resistance and temperature measurements for the characterization of full tension compression splices. 2003 IEEE 10th International Conference on Transmission and Distribution Construction Operation and Live-Line Maintenance 2003. 2003 IEEE ESMO; 6–10 April 2003; Orlando, FL, USA; 2003. pp. 95–102.
128. de Paulis F., Olivieri C., Orlandi A., et al. Exploring Remote Monitoring of Degraded Compression and Bolted Joints in HV Power Transmission Lines // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2016. Vol. 31. pp. 2179–2187.
129. Belardi R., Bindi M., Grasso F., et al. A complex Neural Classifier for the Fault Prognosis and Diagnosis of Overhead Electrical Lines. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020 International Conference on Advanced Electrical and Energy Systems; 18–21 August 2020; Osaka Japan. IOP Publishing Ltd.: Bristol UK; 2020. Volume 582.
130. Bindi M., Aizenberg I., Belardi R., et al. Neural Network-Based Fault Diagnosis of Joints in High Voltage Electrical Lines // *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.* 2020. Vol. 5. pp. 488–498. [Google Scholar] [CrossRef]
131. Aizenberg I. Complex-Valued Neural Networks with Multi-Valued Neurons. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany; 2011.
132. Fontana G., Luchetta A., Manetti S., et al. An unconditionally sound algorithm for testability analysis in linear time invariant electrical networks // *Int. J. Circuit Theory Appl.* 2016. Vol. 44. pp. 1308–1340.

133. Aizenberg I., Bindi M., Grasso F., et al. Testability Analysis in Neural Network Based Fault Diagnosis of DC-DC Converter. 2019 IEEE 5th International Forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI); 9–12 September 2019; Florence, Italy; 2019. pp. 265–268.
134. Sturchio A., Fioriti G., Pompili M., et al. Failure rates reduction in SmartGrid MV underground distribution cables: Influence of temperature. 2014 AEIT Annual Conference—From Research to Industry: The Need for a More Effective Technology Transfer (AEIT); 18–19 September 2014; Trieste, Italy; 2014. pp. 1–6.
135. Sturchio A., Fioriti G., Salustest V., et al. Thermal behavior of distribution MV underground cables. 2015 AEIT International Annual Conference (AEIT); 14–16 October 2015; Naples, Italy; 2015. pp. 1–5.
136. Aizenberg I., Belardi R., Bindi M., et al. Failure Prevention and Malfuction Localization in Underground Medium Voltage Cables // *Energies*. 2021. Vol. 14. pp. 85.
137. Conte G. Manuale di Impianti Elettrici. HOEPLI: Milan Italy; 2009.
138. Aras F., Alekperov V., Can N., Kirkici H. Aging of 154 kV underground power cable insulation under combined thermal and electrical stresses. // *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2007. Vol. 23, N 5. pp. 25–33.
139. Bindi M., Grasso F., Luchetta A., et al. A New Application of Power Line Communication Technologies: Prognosis of Failure in Underground Cables. 2022 International Conference on Electrical Computer Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME); 16–18 November 2022; Maldives, Maldives; 2022. pp. 1–6.
140. Cataliotti A., Daidone A., Tine G. A Medium-Voltage Cables Model for Power-Line Communication // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2009. Vol. 24. pp. 129–135.
141. Meng J., Yue M., Diallo D. Nonlinear extension of battery constrained predictive charging control with transmission of Jacobian matrix // *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2023. Vol. 146. pp. 108762.
142. Lare P., Sarabi S., Delpha C., et al. Stator winding Inter-turn short-circuit and air gap eccentricity fault detection of a Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor in Electrified vehicle. 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS); 31 October–3 November 2021; Gyeongju, Republic of Korea; 2021. pp. 932–937.
143. Mousavi Gargari S., Wouters P.A.A.F., van der Wielen P.C.J.M., et al. Partial discharge parameters to evaluate the insulation condition of on-line located defects in medium voltage cable networks // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2011. Vol. 18. pp. 868–877.
144. So C.W., Li K.K., Lai K.T., et al. Application of genetic algorithm for overcurrent relay coordination. Sixth International Conference on Developments in Power System Protection (Conf. Publ. No. 434); 25–27 March 1997; Nottingham, UK; 1997. pp. 66–69.
145. Bedekar P.P., Bhide S.R. Optimum Coordination of Directional Overcurrent Relays Using the Hybrid GA-NLP Approach // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2011. Vol. 26. pp. 109–119.
146. Amraee T. Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Seeker Algorithm // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2012. Vol. 27. pp. 1415–1422.
147. Moirangthem J., Krishnanand K.R., Dash S.S., et al. Adaptive differential evolution algorithm for solving non-linear coordination problem of directional overcurrent relays // *IET Gener. Transm. Distrib.* 2013. Vol. 7. pp. 329–336.
148. Lee C.-H., Chen C.-R. Using Genetic Algorithm for Overcurrent Relay Coordination in Industrial Power System. 2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems; 5–8 November 2007; Kaohsiung, Taiwan; 2007. pp. 1–5.
149. Purwar E., Vishwakarma D.N., Singh S.P. A Novel Constraints Reduction-Based Optimal Relay Coordination Method Considering Variable Operational Status of Distribution System with DGs // *IEEE Trans. Smart Grid.* 2019. Vol. 10. pp. 889–898.
150. Yang H.T., Chang W.Y., Huang C.L. A new neural networks approach to on-line fault section estimation using information of protective relays and circuit breakers // *IEEE Trans. Power Deliv.* 1994. Vol. 9. pp. 220–230.
151. Osman A.H., Abdelazim T., Malik O.P. Transmission line distance relaying using on-line trained neural networks // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2005. Vol. 20. pp. 1257–1264.
152. Cardoso G., Rolim J.G., Zurn H.H. Application of neural-network modules to electric power system fault section estimation // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2004. Vol. 19. pp. 1034–1041.
153. Kiaei I., Lotfifard S. Fault Section Identification in Smart Distribution Systems Using Multi-Source Data Based on Fuzzy Petri Nets // *IEEE Trans. Smart Grid.* 2020. Vol. 11. pp. 74–83.
154. Jamali S., Bahmanyar A., Borhani-Bahabadi H. A fast and accurate fault location method for distribution networks with dg using genetic algorithms. 2015 Smart Grid Conference (SGC); 22–23 December 2015; Tehran, Iran; 2015. pp. 110–114.
155. Bedekar P.P., Bhide S.R., Kale V.S. Fault section estimation in power system using neuro-genetic approach. 2009 International Conference on Power Systems; 27–29 December 2009; Kharagpur, India; 2009. pp. 1–6.

156. Ahmed A.S., Attia M.A., Hamed N.M., et al. Comparison between genetic algorithm and whale optimization algorithm in fault location estimation in power systems. 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON); 19–21 December 2017; Cairo, Egypt; 2017. pp. 631–637.
157. Sanaye-Pasand M., Malik O.P., Chen Z., et al. Discussion of “Artificial neural network approach to single-ended fault locator for transmission lines” // IEEE Trans. Power Syst. 2001. Vol. 16. 949–950.
158. Lan S., Chen M.-J., Chen D.-Y. A Novel HVDC Double-Terminal Non-Synchronous Fault Location Method Based on Convolutional Neural Network // IEEE Trans. Power Deliv. 2019. Vol. 34. pp. 848–857.
159. Osman A.H., Abdelazim T., Malik O.P. Genetic algorithm approach for adaptive data window distance relaying. 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491); 13–17 July 2003; Toronto, ON, Canada; 2003. Vol. 3. pp. 1862–1867.
160. Gupta M., Srivastava S., Gupta J.R.P. Power System Frequency Estimation Using Neural Network and Genetic Algorithm. 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference ;12–15 October 2008; New Delhi, India; 2008. pp. 1–5.
161. Abdelaziz A.Y., Aleem S.H.E.A., Yadav A. Artificial Intelligence Applications in Electrical Transmission and Distribution Systems Protection. 1st ed. CRC Press: Boca Raton, FL, USA; 2022.

Авторы публикации

Гатауллин Айрат Мухамедович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. *ORCID**: <http://orcid.org/0000-0002-6581-2400>. gataullin1969@gmail.com

Гавриленко Андрей Николаевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия.

Писковацкий Юрий Валерьевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия.

References

1. Dewangan F, Abdelaziz AY, Biswal M. Load Forecasting Models in Smart Grid Using Smart Meter Information: A Review. *Energies*. 2023;16:1404. doi: <https://doi.org/10.3390/en16031404>.
2. Al-Saadi M, Al-Greer M, Short M. Reinforcement Learning-Based Intelligent Control Strategies for Optimal Power Management in Advanced Power Distribution Systems: A Survey. *Energies*. 2023;16:1608.
3. Hussain S, El-Bayeh CZ, Lai C, Eicker U. Multi-Level Energy Management Systems Toward a Smarter Grid: A Review. *IEEE Access*. 2021;9:71994–13.
4. Rind YM, Raza MH, Zubair M, et al. Smart Energy Meters for Smart Grids an Internet of Things Perspective. *Energies*. 2023;16:1974.
5. Simion C-P, Verdeş C-A, Mironescu A-A, et al. Digitalization in Energy Production Distribution and Consumption: A Systematic Literature Review. *Energies*. 2023;16:1960.
6. Mahela OP, Khosravy M, Gupta N, et al. Comprehensive overview of multi-agent systems for controlling smart grids. *CSEE J. Power Energy Syst*. 2022;8:115–17.
7. Fabrício MA, Behrens FH, Bianchini D. Monitoring of Industrial Electrical Equipment Using IoT. *IEEE Lat. Am. Trans*. 2020;18:1425–8.
8. Wang S, Zhou L, Wang T, et al. Fast protection strategy for DC transmission lines of MMC-based MT-HVDC grid. *Chin. J. Electr. Eng*. 2021;7:83–10.
9. Jiang J-A, Chiu H-C, Yang Y-C, et al. On Real-Time Detection of Line Sags in Overhead Power Grids Using an IoT-Based Monitoring System: Theoretical Basis, System Implementation, and Long-Term Field Verification. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022;9(15):389–7. doi: 10.1109/JIOT.2021.3139933
10. Klyushkin NG, Lachugin VF. A Statistical Overview of Fault Location Methods and Problems in Calculating and Locating Faults in 110 kV (and Higher) Power Transmission Lines. *Power Technol. Eng*. 2020;54:250–5.
11. Chen B. Fault Statistics and Analysis of 220-kV and above Transmission Lines in a Southern Coastal Provincial Power Grid of China. *IEEE Open Access J. Power Energy*. 2020;7:122–8.
12. Ebtsam AH, Bishoy ES, Ebrahim AB. Impact and assessment of the overvoltage mitigation methods in low-voltage distribution networks with excessive penetration of PV systems: A review. *Electrical Energy Systems*. 2021;31(12):1–32. doi: 10.1002/2050-7038.13161

13. Probst FL, Beltle M, Tenbohlen S. Measurement of Transient Overvoltages by Capacitive Electric Field Sensors. *Sensors*. 2024;24(5):1357-20. <https://doi.org/10.3390/s24051357>
14. Reddy SA, Kumari MS. A review of switching overvoltage modeling in UHV AC transmission lines. *Electric Power Systems Research*. 2024;236:110902. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110902>
15. He Q, Ding L, Kong Z-M, et al. Distributed Scheme for Line Overload Mitigation with Linearized AC Power Flow. *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*. 2022;69:2877–5.
16. Zhang X, Wang X, Li Z, et al. Optimization of Impedance-Accelerated Inverse-Time Over-Current Protection Based on Improved Quantum Genetic Algorithm. *Energies*. 2023;16:1119.
17. Ding Z, Yu K, Wang C, et al. Transmission Line Overload Risk Assessment Considering Dynamic Line Rating Mechanism in a High-Wind-Penetrated Power System: A Data-Driven Approach. *IEEE Trans. Sustain. Energy*. 2022;13:1112–11.
18. Al Talaq M, Al-Muhaini M. Optimal Coordination of Time Delay Overcurrent Relays for Power Systems with Integrated Renewable Energy Sources. *Energies*. 2022;15:6749.
19. Foqha T, Khammash M, Alsadi S, et al. Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Hybrid Firefly–Genetic Algorithm. *Energies*. 2023; 16(14):5328. <https://doi.org/10.3390/en16145328>
20. Hong L, Rizwan M, Wasif M, et al. User-Defined Dual Setting Directional Overcurrent Relays with Hybrid Time Current-Voltage Characteristics-Based Protection Coordination for Active Distribution Network. *IEEE Access*. 2021;9:62752-18. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3074426
21. Li B, Li C, Guo F, et al. Overcurrent Protection Coordination in a Power Distribution Network with the Active Superconductive Fault Current Limiter. *IEEE Trans. Appl. Supercond*. 2014;24:1–4.
22. Rajesh P, Kannan R, Vishnupriyan J, et al. Optimally detecting and classifying the transmission line fault in power system using hybrid technique. *ISA Transactions*. 2022;130:253-12. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2022.03.017>
23. Kordestani M, Saif M, Orchard M.E, et al. Failure Prognosis and Applications—A Survey Recent Literature. *IEEE Trans. Reliab*. 2021;70:728–21.
24. Nazir MI, Hussain I, Ahmad A, et al. System Modeling and Reliability Assessment of Microgrids: A Review. *Sustainability*. 2022; 14(1):126. <https://doi.org/10.3390/su14010126>
25. Escobar JJM, Matamoros OM, Padilla RT, et al. A Comprehensive Review on Smart Grids: Challenges and Opportunities. *Sensors*. 2021; 21(21):6978. <https://doi.org/10.3390/s21216978>
26. Nabatirad M, Razzaghi R, Bahrani B. Autonomous power balance in hybrid AC/DC microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2023;146:108752. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108752>
27. Gallegos J, Arévalo P, Montaleza C, et al. Sustainable Electrification—Advances and Challenges in Electrical-Distribution Networks: A Review. *Sustainability*. 2024; 16(2):698. <https://doi.org/10.3390/su16020698>
28. Jamil F, Iqbal N, Imran, et al. Peer-to-Peer Energy Trading Mechanism Based on Blockchain and Machine Learning for Sustainable Electrical Power Supply in Smart Grid. *IEEE Access*. 2021;9:39193-25. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3060457
29. Wang Y, Zhang D, Li Y, et al. Enhancing Power Grid Resilience With Blockchain-Enabled Vehicle-to-Vehicle Energy Trading in Renewable Energy Integration. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2024;60(2):2037–16. DOI: 10.1109/TIA.2023.3312639
30. Shams MH, Niaz H, Hashemi B, et al. Artificial intelligence-based prediction and analysis of the oversupply of wind and solar energy in power systems. *Energy Conversion and Management*. 2021;250:114892. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114892>
31. Qiu M. Study on Isolated Island Detection Technology of Distributed PV Grid System. 2023 *Asia-Europe Conference on Electronics, Data Processing and Informatics (ACEDPI)*; 17-19 April 2023; Prague, Czech Republic. IEEE; 2023. pp. 539-544. DOI: 10.1109/ACEDPI58926.2023.00107
32. Mishra A, Jena P. A Scheduled Intentional Islanding Method Based on Ranking of Possible Islanding Zone. *IEEE Trans. Smart Grid*. 2021;12:1853–14. doi:10.1109/tsg.2020.3039384
33. Succetti F, Rosato A, Araneo R, et al. Challenges and Perspectives of Smart Grid Systems in Islands: A Real Case Study. *Energies*. 2023; 16(2):583. <https://doi.org/10.3390/en16020583>
34. Li X, Wang L, Yan N, et al. Cooperative Dispatch of Distributed Energy Storage in Distribution Network with PV Generation Systems. *IEEE Trans. Appl. Supercond*. 2021;31:1–4.
35. Ding T, Wang Z, Qu M, et al. A Sequential Black-Start Restoration Model for Resilient Active Distribution Networks. *IEEE Trans. Power Syst*. 2022;37:3133–4.
36. Zhao J, Zhang Q, LIU Z, et al. A Distributed Black-Start Optimization Method for Global Transmission and Distribution Network. *IEEE Trans. Power Syst*. 2021;36:4471–11.
37. Furse CM, Kafal M, Razzaghi R, et al. Fault Diagnosis for Electrical Systems and Power Networks: A Review. *IEEE Sens. J*. 2021;21:888–9.

38. Han C, Gao K, Changet W, et al. Research on the Evolution Mechanism of Partial Discharge Signals for Arcing Faults in Transformers. *IEEE Access*. 2025;13:8023-9. doi: 10.1109/ACCESS.2025.3525953
39. Jakaria AHM, Rahman MA, Gokhale A. Resiliency-Aware Deployment of SDN in Smart Grid SCADA: A Formal Synthesis Model. *IEEE Trans. Netw. Serv. Manag.* 2021;18:1430–15.
40. Majeed AA, Altaie AS, Abderrahim M, et al. A Review of Protection Schemes for Electrical Distribution Networks with Green Distributed Generation. *Energies*. 2023; 16(22):7587. <https://doi.org/10.3390/en16227587>
41. Bui DM, Le PD, Nguyen TP, et al. An Adaptive and Scalable Protection Coordination System of Overcurrent Relays in Distributed-Generator-Integrated Distribution Networks. *Applied Sciences*. 2021; 11(18):8454. <https://doi.org/10.3390/app11188454>
42. Martínez-Figueroa GdJ, Córcoles-López F, Bogarra S. FPGA-Based Smart Sensor to Detect Current Transformer Saturation during Inrush Current Measurement. *Sensors*. 2023; 23(2):744. <https://doi.org/10.3390/s23020744>
43. Peng F, Gao H, Huang J, et al. Power Differential Protection for Transformer Based on Fault Component Network. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2023;38:2464–14.
44. Darwish HA, Taalab MI, Ahmed ES. Investigation of power differential concept for line protection. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2005;20:617–8.
45. Liu S, Wang B, Zhao Y, et al. Novel Differential Protection Approach of UHV AC Transmission Lines Based on Tellegen's Quasi-Power Theorem. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2022;37:1264–11.
46. Vazquez E, Castruita J, Chacon O.L, et al. A New Approach Traveling-Wave Distance Protection—Part I: Algorithm. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2007;22:795–6.
47. Sinclair A, Finney D, Martin D, et al. Distance Protection in Distribution Systems: How It Assists with Integrating Distributed Resources. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2014;50:2186–11.
48. Prenc R, Rojnić M, Franković D, et al. On the Development of Overcurrent Relay Optimization Problem for Active Distribution Networks. *Energies*. 2022;15:6528.
49. Węgiełek P, Kostyla D, Lech M. Directions of Development of Diagnostic Methods of Vacuum Medium-Voltage Switchgear. *Energies*. 2023; 16(5):2087. <https://doi.org/10.3390/en16052087>
50. Torres BS, Borges da Silva LE, Salomon CP, et al. Integrating Smart Grid Devices into the Traditional Protection of Distribution Networks. *Energies*. 2022; 15(7):2518. <https://doi.org/10.3390/en15072518>
51. Bindi M, Piccirilli MC, Luchetta A, et al. A Comprehensive Review of Fault Diagnosis and Prognosis Techniques in High Voltage and Medium Voltage Electrical Power Lines. *Energies*. 2023; 16(21):7317. <https://doi.org/10.3390/en16217317>
52. Guillén-López D, Serrano-Guerrero X, Barragán-Escandón A, et al. Transient and Steady-State Evaluation of Distributed Generation in Medium-Voltage Distribution Networks. *Energies*. 2024; 17(22):5783. <https://doi.org/10.3390/en17225783>
53. Li Z, Zhang Y, Wu H, Suzuki S, et al. Design and Application of a UAV Autonomous Inspection System for High-Voltage Power Transmission Lines. *Remote Sensing*. 2023; 15(3):865. <https://doi.org/10.3390/rs15030865>
54. Bindi M, Piccirilli MC, Luchetta A, et al. A Comprehensive Review of Fault Diagnosis and Prognosis Techniques in High Voltage and Medium Voltage Electrical Power Lines. *Energies*. 2023; 16(21):7317. <https://doi.org/10.3390/en16217317>
55. Liao C, Yi Y, Chen T, et al. Detecting Broken Strands in Transmission Lines Based on Pulsed Eddy Current. *Metals*. 2022; 12(6):1014. <https://doi.org/10.3390/met12061014>
56. Rondineau A, Gaillet L, Dieng L, et al. Degradation of Steel Wires in Bimetallic Aluminum–Steel Conductors Exposed to Severe Corrosion Conditions. *Corrosion and Materials Degradation*. 2022; 3(4):646–660. <https://doi.org/10.3390/cmd3040035>
57. Jurkiewicz B, Smyrak B. Studies on the Evolution of Fatigue Strength of Aluminium Wires for Overhead Line Conductors. *Materials*. 2024; 17(11):2537. <https://doi.org/10.3390/ma17112537>
58. Gao J, Wang L, Wu S, et al. Prediction of Breakdown Voltage of Equipotential Live-Line Work Air Gaps in Transmission Lines: A Computational Discharge Model. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2022;64(6):1932-9. doi: 10.1109/TEMPC.2022.3193203
59. Govindarajan S, Morales A, Ardila-Rey JA, et al. A review on partial discharge diagnosis in cables: Theory, techniques, and trends. *Measurement*. 2023;216:112882. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112882>
60. Zhang X, Pang B, Liu Y, et al. Review on Detection and Analysis of Partial Discharge along Power Cables. *Energies*. 2021;14:7692.
61. Song Y, Chen W, Wan F, et al. Online multi-parameter sensing and condition assessment technology for power cables: A review. *Electric Power Systems Research*. 2022;210:108140. <https://doi.org/10.1016/j.eprsr.2022.108140>

62. Szczegielniak T, Kusiak D, Jabłoński P. Thermal Analysis of the Medium Voltage Cable. *Energies*. 2021;14:4164.
63. Balakrishnan GK, Yaw CT, Koh SP, Abedin T, Raj AA, Tiong SK, Chen CP. A Review of Infrared Thermography for Condition-Based Monitoring in Electrical Energy: Applications and Recommendations. *Energies*. 2022; 15(16):6000. <https://doi.org/10.3390/en15166000>
64. Shams F, Omar M, Usman M, et al. Thermal Imaging of Utility Power Lines: A Review. 2022 *International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*; 27–28 October 2022; Kuala Lumpur, Malaysia; 2022. pp. 1–4.
65. Mo S, Zhang D, Li Z, et al. The Possibility of Fault Location in Cross-Bonded Cables by Broadband Impedance Spectroscopy. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2021;28:1416–8.
66. Ciaburro G, Iannace G. Machine-Learning-Based Methods for Acoustic Emission Testing: A Review. *Applied Sciences*. 2022; 12(20):10476. <https://doi.org/10.3390/app122010476>
67. Witos F, Olszewska A, Opilski Z, et al. Application of Acoustic Emission and Thermal Imaging to Test Oil Power Transformers. *Energies*. 2020;13:5955.
68. Werelius P, Tharning P, Eriksson R, et al. Dielectric spectroscopy for diagnosis of water tree deterioration in XLPE cables. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2001;8:27–16.
69. Nadolny Z. Electric Field Distribution and Dielectric Losses in XLPE Insulation and Semiconductor Screens of High-Voltage Cables. *Energies*. 2022; 15(13):4692. <https://doi.org/10.3390/en15134692>
70. Sikorski W, Walczak K, Gil W, et al. On-Line Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers Based on the Simultaneous Detection of High Frequency Ultra-High Frequency and Acoustic Emission Signals. *Energies*. 2020;13:3271.
71. Rybarz J, Borucki S, Kunicki M, et al. Influence of the Cable Accessories Installing Method on the Partial Discharge Activity in Medium Voltage Cables. *Energies*. 2022;15:4216.
72. Rosle N, Muhamad NA, Rohani MNKH, et al. Partial Discharges Classification Methods in XLPE Cable: A Review. *IEEE Access*. 2021;9:133258-16. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3115519
73. Li Y, Jiang L, Xie M, Yu J, Qian L, Xu K, Chen M, Wang Y. Advancements and Challenges in Power Cable Laying. *Energies*. 2024; 17(12):2905. <https://doi.org/10.3390/en17122905>
74. Maraaba L., Al-Soufi, K., Ssennoga T., et al. Contamination Level Monitoring Techniques for High-Voltage Insulators: A Review // *Energies*. 2022. Vol. 15. 7656.
75. Ivanov DA. Features of monitoring extra large partial discharge in high voltage insulators. Power engineering: research, equipment, technology. 2022;24(1):151-163. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-151-163>.
76. Hoduń P, Borecki M. Reliability Assessment of MV Power Connections. *Energies*. 2021;14. 6965.
77. Barbieri L, Villa A, Malgesini R, et al. An Innovative Sensor for Cable Joint Monitoring and Partial Discharge Localization. *Energies*. 2021; 14(14):4095. <https://doi.org/10.3390/en14144095>
78. Albarracin R, Rodriguez-Serna JM, Masud AA. Finite-element-analysis models for numerical simulation of partial discharges in spherical cavities within solid dielectrics: A review and a novel method. *High Volt*. 2020;5:556–13.
79. Rahman MA, Saha A, Ghassemi M. Optimized Fabrication Process and PD Characteristics of MVDC Multilayer Insulation Cable Systems for Next Generation Wide-Body All-Electric Aircraft. *Energies*. 2024; 17(12):3040. <https://doi.org/10.3390/en17123040>
80. Choudhary M, Shafiq M, Kiitam I, et al. Investigation of partial discharge characteristics in XLPE cable insulation under increasing electrical stress. *Engineering Failure Analysis*. 2024;158:108006. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108006>
81. Mcallister IW. Electric field theory and the fallacy of void capacitance. *IEEE Trans. Electr. Insul.* 1991;26:458–2.
82. Crichton GC, Karlsson PW, Pedersen A. Partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids. *IEEE Trans. Electr. Insul.* 1989;24:335–8.
83. Mami MS, Köksal M. Remark on the lumped parameter modeling of transmission lines. *Electr. Mach. Power Syst*. 2000;28:565–11.
84. Suyaroj N, Premrudeepreechacharn S, Watson N.R. Transient state estimation with the Bergeron transmission line model. *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 2017;25:806–14.
85. Abdullah H, Uwe S. A full frequency-dependent cable model for the calculation of fast transients. *Energies*. 2017;10:1158.
86. Wagenaars P, Wouters P, van der Wielen P.C.J.M, et al. Measurement of transmission line parameters of three-core power cables with common earth screen. *IET Sci. Meas. Technol.* 2010;4:146–10.
87. Du Z, Willett PK, Mashikian M.S. Performance limits of PD location based on time-domain reflectometry. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 1997;4. 182–7.

88. Robles G, Shafiq M, Martínez-Tarifa JM. Multiple Partial Discharge Source Localization in Power Cables through Power Spectral Separation and Time-Domain Reflectometry. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2019;68:4703–9.
89. Snell J, Renowden J. Improving results of thermographic inspections of electrical transmission and distribution lines. *2000 IEEE ESMO—2000 IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction Operation and Live-Line Maintenance Proceedings. ESMO 2000 Proceedings. Global ESMO 2000; 8–12 October 2000; The Pow, Montreal, QC, Canada. 2000 IEEE: Piscataway, NJ, USA; 2000. pp. 135–144.*
90. Ohki Y, Yamada T, Hirai N. Diagnosis of cable aging by broadband impedance spectroscopy. *2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena; 16–19 October 2011; Cancun, Mexico; 2011. pp. 24–27.*
91. Zhou Z, Zhang D, He J, et al. Local degradation diagnosis for cable insulation based on broadband impedance spectroscopy. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2015;22:2097–11.
92. Avellan A, Werelius P, Eriksson R. Frequency domain response of medium voltage XLPE cable terminations and its influence on cable diagnostics. *Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.00CH37075); 5 April 2000; Anaheim, CA, USA; 2000. pp. 105–108.*
93. Yong H, Minyou C, Jinqian Z. High impedance fault identification method of the distribution network based on discrete wavelet transformation. *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering; 16–18 September 2011; Yichang, China; 2011. pp. 2262–2265.*
94. Li W, Liu Y, Li Y, et al. Series Arc Fault Diagnosis and Line Selection Method Based on Recurrent Neural Network. *IEEE Access.* 2020;8:177815–8.
95. Ding S, Zhang P, Ding E, et al. On the application of PCA technique to fault diagnosis. *Tsinghua Sci. Technol.* 2010;15:138–7.
96. Chen H, Jiang B, Lu N, et al. Deep PCA Based Real-Time Incipient Fault Detection and Diagnosis Methodology for Electrical Drive in High-Speed Trains. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2018;67:4819–12.
97. Zhao H, Zheng J, Xu J, et al. Fault Diagnosis Method Based on Principal Component Analysis and Broad Learning System. *IEEE Access.* 2019;7:99263–10. doi:10.1109/access.2019.2929094
98. Zolfaghari M, Chabanlo R.M, Abedi M, et al. A Robust Distance Protection Approach for Bulk AC Power System Considering the Effects of HVDC Interfaced Offshore Wind Units. *IEEE Syst. J.* 2018;12:3786–10.
99. Nengling T, Chen C. A New Weak Fault Component Reactance Distance Relay Based on Voltage Amplitude Comparison. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2008;23:87–7.
100. Liang Y, Li W, Lu Z, et al. A New Distance Protection Scheme Based on Improved Virtual Measured Voltage. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2020;35:774–13. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2926295>
101. Hu Y, Novosel D, Saha MM, et al. An adaptive scheme for parallel-line distance protection. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2022;17:105–6.
102. Wang Y, Wang Y, Ma N, et al. Waveform-Similarity-Based Protection Scheme for AC Transmission Lines of MMC-HVDC System with Offshore Wind Farms. *Energies.* 2022;15:9107.
103. Wang Q, Ma J, Shang L, et al. Analysis of the Effects of Grid-Connected Charging/Discharging Stations on Relay Protection. *Energies.* 2022;15:9065.
104. Bakkar M, Bogarra S, Córcoles F, et al. Artificial Intelligence-Based Protection for Smart Grids. *Energies.* 2022;15:4933.
105. Milosevic B, Begovic M. Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement. *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491); 13–17 July 2003; Toronto, ON, Canada; 2003. pp. 69–75.*
106. Xu J, Wen MHF, Li VOK, et al. Optimal PMU placement for wide-area monitoring using chemical reaction optimization. *2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT); 24–27 February 2013; Washington, DC, USA; 2013. pp. 1–6.*
107. Reddy KSK, Rao DAK, Kumarraja A, et al. Implementation of Integer Linear Programming and Exhaustive Search algorithms for optimal PMU placement under various conditions. *2015 IEEE Power Communication and Information Technology Conference (PCITC); 15–17 October 2015; Bhubaneswar, India; 2015. pp. 850–855.*
108. Huang L, Sun Y, Xu J, et al. Optimal PMU Placement Considering Controlled Islanding of Power System. *IEEE Trans. Power Syst.* 2014;29:742–14.
109. Chatterjee S, Saha Roy BK, Ghosh PK. Optimal Placement of PMU Considering Practical Costs in Wide Area Network. *2017 14th IEEE India Council International Conference (INDICON); 15–17 December 2017; Roorkee, India; 2017. pp. 1–6.*

110. Manousakis NM, Korres GN. Optimal Allocation of Phasor Measurement Units Considering Various Contingencies and Measurement Redundancy. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2020;69. 3403–9.
111. Zhu X, Wen MHF, Li VOK, et al. Optimal PMU-Communication Link Placement for Smart Grid Wide-Area Measurement Systems. *IEEE Trans. Smart Grid.* 2019;10:4446–11.
112. Wojtowicz R, Kowalik R, Rasolomampionona DD. Next Generation of Power System Protection Automation—Virtualization of Protection Systems. // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2018. Vol. 33. 2002–2010.
113. Kumar S, Abu-Siada A, Das N, et al. Reverse Blocking Over Current Busbar Protection Scheme Based on IEC 61850 Architecture. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2023;59:2225–9.
114. Ma J, Ma W, Yan X, et al. A New Adaptive Backup Protection Scheme Based on Intelligent Electronic Devices. *Can. J. Electr. Comput. Eng.* 2015;38:77–12.
115. Ma J, Ma W, Yan X, et al. A New Adaptive Voltage Protection Scheme for Distribution Network with Distributed Generations. *Can. J. Electr. Comput. Eng.* 2013;36:142–10.
116. Barra PH.A, Coury DV, Fernandes RAS. A survey on adaptive protection of microgrids and distribution systems with distributed generators. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020;118:109524.
117. Laouamer M, Kouzou A, Mohammedi RD, et al. Optimal PMU Placement in Power Grid Using Sine Cosine Algorithm. *2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS); 24–25 November 2018; Medea, Algeria; 2018.* pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICASS.2018.8651991>
118. Sampaio FC, Tofoli FL, Melo LS, et al. Smart Protection System for Microgrids with Grid-Connected and Islanded Capabilities Based on an Adaptive Algorithm. *Energies.* 2023;16:2273.
119. Iamandi A, Arghira N, Constantin IC, et al. The Influence of Digital Communications in Protection Schemes. *2019 22nd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS); 28–30 May 2019; Bucharest, Romania; 2019.* pp. 363–368.
120. Sheng S, Chan WL, Li KK, et al. Context Information-Based Cyber Security Defense of Protection System. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2007;22:1477–5.
121. Queiroz ARS, Senger EC, de Oliveira MF, et al. Reducing Arc Flash Incident Energy Level in an Offshore Gas Production Unit Using Intelligent Electronic Devices—A Case Study. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2015;51:129–5.
122. Bindi M, Corti F, Aizenberg I, et al. Machine Learning-Based Monitoring of DC-DC Converters in Photovoltaic Applications. *Algorithm.* 2022;15:74.
123. Wang L, Zhao Q, Liang D. Fault Diagnosis of UHVDC Transmission Line Based on Deep Neural Network. *2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia); 8–11 July 2022; Shanghai, China; 2022.* pp. 445–450.
124. Hayder AN, Saidi L. Applications of Artificial Neural Networks with Input and Output Degradation Data for Renewable Energy Systems Fault Prognosis. *2021 12th International Renewable Energy Congress (IREC); 26–28 October 2021; Hammamet, Tunisia; 2021.* pp. 1–6.
125. Bortoni EC, Santos L, Bastos GS. A Model to Extract Wind Influence from Outdoor IR Thermal Inspections. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2013;28:1969–2.
126. Wanderley Neto ET, Da Costa EG, Maia MJA. Influence of Emissivity and Distance in High Voltage Equipments Thermal Imaging. *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America; 15–18 August 2006; Caracas, Venezuela; 2006.* pp. 1–4.
127. Comte C, Lacasse R. Applicability of resistance and temperature measurements for the characterization of full tension compression splices. *2003 IEEE 10th International Conference on Transmission and Distribution Construction Operation and Live-Line Maintenance 2003. 2003 IEEE ESMO; 6–10 April 2003; Orlando, FL, USA; 2003.* pp. 95–102.
128. de Paulis F, Olivieri C, Orlandi A, et al. Exploring Remote Monitoring of Degraded Compression and Bolted Joints in HV Power Transmission Lines. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2016;31:2179–8.
129. Belardi R, Bindi M, Grasso F, et al. A complex Neural Classifier for the Fault Prognosis and Diagnosis of Overhead Electrical Lines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020 International Conference on Advanced Electrical and Energy Systems; 18–21 August 2020; Osaka Japan. IOP Publishing Ltd.: Bristol UK; 2020.* Vol. 582.
130. Bindi M, Aizenberg I, Belardi R, et al. Neural Network-Based Fault Diagnosis of Joints in High Voltage Electrical Lines. *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.* 2020;5:488–11. doi: 10.25046/aj050458
131. Aizenberg I. *Complex-Valued Neural Networks with Multi-Valued Neurons.* Springer: Berlin/Heidelberg, Germany; 2011.
132. Fontana G, Luchetta A, Manetti S, et al. An unconditionally sound algorithm for testability analysis in linear time invariant electrical networks. *Int. J. Circuit Theory Appl.* 2016;44:1308–33.
133. Aizenberg I, Bindi M, Grasso F, et al. Testability Analysis in Neural Network Based Fault Diagnosis of DC-DC Converter. *2019 IEEE 5th International Forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI); 9–12 September 2019; Florence, Italy; 2019.* pp. 265–268.

134. Sturchio A, Fioriti G, Pompili M, et al. Failure rates reduction in SmartGrid MV underground distribution cables: Influence of temperature. *2014 AEIT Annual Conference—From Research to Industry: The Need for a More Effective Technology Transfer (AEIT)*; 18–19 September 2014; Trieste, Italy; 2014. pp. 1–6.
135. Sturchio A, Fioriti G, Salustest V, et al. Thermal behavior of distribution MV underground cables. *2015 AEIT International Annual Conference (AEIT)*; 14–16 October 2015; Naples, Italy; 2015. pp. 1–5.
136. Aizenberg I, Belardi R, Bindi M, et al. Failure Prevention and Malfunction Localization in Underground Medium Voltage Cables. *Energies*. 2021;14:85.
137. Conte G. *Manuale di Impianti Elettrici*. HOEPLI: Milan Italy; 2009.
138. Aras F, Alekperov V, Can N, Kirkici H. Aging of 154 kV underground power cable insulation under combined thermal and electrical stresses. *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2007;23(5):25–9.
139. Bindi M, Grasso F, Luchetta A, et al. A New Application of Power Line Communication Technologies: Prognosis of Failure in Underground Cables. *2022 International Conference on Electrical Computer Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*; 16–18 November 2022; Maldives, Maldives; 2022. pp. 1–6.
140. Cataliotti A, Daidone A, Tine G. A Medium-Voltage Cables Model for Power-Line Communication. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2009;24:129–7.
141. Meng J, Yue M, Diallo D. Nonlinear extension of battery constrained predictive charging control with transmission of Jacobian matrix. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2023;146:108762.
142. Lare P, Sarabi S, Delpha C, et al. Stator winding Inter-turn short-circuit and air gap eccentricity fault detection of a Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor in Electrified vehicle. *2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*; 31 October–3 November 2021; Gyeongju, Republic of Korea; 2021. pp. 932–937.
143. Mousavi Gargari S, Wouters PAAF, van der Wielen P.C.J.M, et al. Partial discharge parameters to evaluate the insulation condition of on-line located defects in medium voltage cable networks. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2011;18:868–10.
144. So CW, Li KK, Lai KT, et al. Application of genetic algorithm for overcurrent relay coordination. *Sixth International Conference on Developments in Power System Protection (Conf. Publ. No. 434)*; 25–27 March 1997; Nottingham, UK; 1997. pp. 66–69.
145. Bedekar PP, Bhide SR. Optimum Coordination of Directional Overcurrent Relays Using the Hybrid GA-NLP Approach. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2011;26. 109–11. doi:10.1109/tpwr.2010.2080289
146. Amraee T. Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Seeker Algorithm. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2012;27:1415–8.
147. Moirangthem J, Krishnanand KR, Dash SS, et al. Adaptive differential evolution algorithm for solving non-linear coordination problem of directional overcurrent relays. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2013;7:329–8.
148. Lee C-H, Chen C-R. Using Genetic Algorithm for Overcurrent Relay Coordination in Industrial Power System. *2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems*; 5–8 November 2007; Kaohsiung, Taiwan; 2007. pp. 1–5.
149. Purwar E, Vishwakarma DN, Singh SP. A Novel Constraints Reduction-Based Optimal Relay Coordination Method Considering Variable Operational Status of Distribution System with DGs. *IEEE Trans. Smart Grid.* 2019;10:889–10.
150. Yang HT, Chang WY, Huang CL. A new neural networks approach to on-line fault section estimation using information of protective relays and circuit breakers. *IEEE Trans. Power Deliv.* 1994;9:220–11.
151. Osman AH, Abdelazim T, Malik OP. Transmission line distance relaying using on-line trained neural networks. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2005;20:1257–8.
152. Cardoso G, Rolim JG, Zurn HH. Application of neural-network modules to electric power system fault section estimation. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2004;19:1034–8.
153. Kiaei I, Lotfifard S. Fault Section Identification in Smart Distribution Systems Using Multi-Source Data Based on Fuzzy Petri Nets. *IEEE Trans. Smart Grid.* 2020;11:74–9.
154. Jamali S, Bahmanyar A, Borhani-Bahabadi H. A fast and accurate fault location method for distribution networks with dg using genetic algorithms. *2015 Smart Grid Conference (SGC)*; 22–23 December 2015; Tehran, Iran; 2015. pp. 110–114.
155. Bedekar PP, Bhide SR, Kale VS. Fault section estimation in power system using neuro-genetic approach. *2009 International Conference on Power Systems*; 27–29 December 2009; Kharagpur, India; 2009. pp. 1–6.
156. Ahmed AS, Attia MA, Hamed NM, et al. Comparison between genetic algorithm and whale optimization algorithm in fault location estimation in power systems. *2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*; 19–21 December 2017; Cairo, Egypt; 2017. pp. 631–637.

157. Sanaye-Pasand M, Malik OP, Chen Z, et al. Discussion of “Artificial neural network approach to single-ended fault locator for transmission lines”. *IEEE Trans. Power Syst.* 2001;16. 949–2.
158. Lan S, Chen M-J, Chen D-Y. A Novel HVDC Double-Terminal Non-Synchronous Fault Location Method Based on Convolutional Neural Network. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2019;34:848–10.
159. Osman AH, Abdelazim T, Malik OP. Genetic algorithm approach for adaptive data window distance relaying. *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491); 13–17 July 2003; Toronto, ON, Canada; 2003. Vol. 3. pp. 1862–1867.*
160. Gupta M, Srivastava S, Gupta JRP. Power System Frequency Estimation Using Neural Network and Genetic Algorithm. *2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference ;12–15 October 2008; New Delhi, India; 2008. pp. 1–5.*
161. Abdelaziz AY, Aleem SHEA, Yadav A. *Artificial Intelligence Applications in Electrical Transmission and Distribution Systems Protection*. 1st ed. CRC Press: Boca Raton, FL, USA; 2022.

Authors of the publication

Ayrat M. Gataullin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID**: <http://orcid.org/0000-0002-6581-2400>. gataullin1969@gmail.com

Andrey N. Gavrilenko – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Yuri V. Piskovatskiy – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **16.05.2025 г.**

Отредактировано **20.06.2025 г.**

Принято **03.07.2025 г.**