УДК 681.5.015

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6...35 КВ

П. И. КОЛЬЦОВА, Ю. В. ПИСКОВАЦКИЙ
Казанский государственный энергетический университет
Казань, Татарстан

Обеспечение бесперебойной работы электрических систем и безопасности зависит от способности определять точку возникновения однофазных замыканий на землю в распределительных сетях напряжением 6...35 кВ. Они составляют подавляющую долю эксплуатационных проблем, достигая 60 %...80 % всех нарушений, особенно в сетях с недостаточно эффективно заземленной нейтралью.

Своевременное и точное выявление таких инцидентов является критически важным для предотвращения масштабных сбоев и минимизации рисков для безопасности. Последние достижения в области технологий, в частности в сфере машинного обучения и искусственного интеллекта, усовершенствовали подходы к обнаружению и локализации повреждений, повысив их эффективность в полевых условиях эксплуатации [1, 2].

Сегодня все чаще прибегают к применению искусственных нейронных сетей. Их способность обрабатывать высокочастотные дискретизированные данные о токах и напряжениях позволяет определять местоположение повреждения с минимумом информации. Опираясь на данные о трехфазных напряжениях и токах, собираемые на подстанциях, они обеспечивают классификацию и локализацию повреждения в режиме реального времени.

Помимо нейронных сетей, выделим полевые обследования и свежие диагностические методики, такие как инфракрасная термография, мониторинг зон повышенного риска, включая состояние изоляторов и контактных соединений, для предотвращения аварий. Интеграция технологий глобального позиционирования и мобильной связи также улучшила координацию действий при устранении повреждений, позволяя операторам оперативно получать уведомления о месте возникновения аварии [3].

Несмотря на все нововведения, процесс обнаружения все так же труден и тяжел. Традиционно он начинается с получения информации от потребителей о произошедших отключениях, что предоставляет лишь ограниченные и чаще старые сведения. Люди могут откладывать обращение, неправильно понять проблему или вовсе не обращать внимания. Операторам приходится вручную сопоставлять данные из множества обращений с общей схемой сети, чтобы лишь приблизительно локализовать место повреждения.

Еще одной проблемой является надежность самих данных: ошибки в корреляции могут приводить к значительным погрешностям в определении расстояния до повреждения, достигающим 31 %. При этом точность классификации поврежденного участка сети сильно варьируется, а дисбаланс классов в обучающих наборах данных снижает надежность моделей. Существующие

методы, включая измерения импеданса, часто не учитывают неопределенные параметры. К примеру, шунтирующая емкость плохо адаптируется к различным типам повреждений или конфигурациям сетей. Дополнительную сложность создает увеличение числа инверторных распределенных генераторов в активных распределительных сетях, что требует постоянной адаптации методик обнаружения [4].

Для преодоления этих ограничений активно разрабатываются распределенные измерительные системы. Эти системы используют микроконтроллеры с интегрированными датчиками, которые непрерывно собирают эксплуатационные данные. Применяя алгоритмы кластеризации, такие как K-means, непосредственно на недорогих микроконтроллерах, исследователи добились надежного выявления повреждений, одновременно решая проблемы пропускной способности каналов связи и энергоэффективности. Это особенно ценно в условиях, где централизованный мониторинг затруднен.

В области конкретных методов определения места повреждения стоит отметить развитие импедансных подходов с использованием синхронизированных и несинхронизированных измерений тока, а также применение передовых датчиков и протоколов связи, нацеленных на время обнаружения менее 100 мс. Эволюция интеллектуальных сетей, поддерживающих двунаправленный поток мощности и распределенное управление, также играет ключевую роль, требуя бесшовной интеграции датчиков замыканий на землю с современной измерительной инфраструктурой.

Особое внимание уделяется методологиям повышения точности на основе машинного обучения. Среди основных методов выделяются методы опорных векторов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сошинов, А. Г.** О перспективах развития автоматизированных комплексных систем непрерывного контроля состояния силовых трансформаторов / А. Г. Сошинов, О. С. Атрашенко, Т. В. Копейкина // Вестник аграрной науки Дона. – 2022. – Т. 15, № 4 (60). – С. 95–104.

2. Using the Location Method for Simulated-and-Experimental Location of Single-Phase-to-Earth Faults in Overhead Lines of 6–35 kV Distribution Networks / R. G. Minullin, E. Y. Abdullazyanov, Y. V. Piskovatsky [et al.] // Power Technology and Engineering. – 2021. – Vol. 54, № 5. – P. 733–739.

3. **Тащилин, В. А.** Направления применения синхронизированных векторных измерений в задачах противоаварийного управления энергосистемами на основе методов машинного обучения / В. А. Тащилин, П. Ю. Губин, М. М. Шакиров // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 3 (56). – С. 12–27.

4. Определение мест повреждения волновым методом в распределительных сетях древовидной структуры / В. Д. Васильев, А. П. Кирпичников, Ш. А. Шайхутдинов, Г. В. Спиридонов // Вестник Технологического университета. – 2018. – Т. 21, № 11. – С. 131–137.