УДК 621.316

Авторы:
к.т.н. Козлов В.Н.,
к.т.н. Ермаков К.И.,
ООО «НПП Бреслер»,
г. Чебоксары, Россия.

Ph.D. Kozlov V.N.,
Ph.D. Ermakov K.I.,
«NPP Bresler» LLC,
Cheboksary, Russia.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ КОМПЛЕКСА ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ: ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

OPERATION OF WAVE-BASED FAULT LOCATION COMPLEX: PRACTICAL EXPERIENCE IN ELECTRIC NETWORKS WITH ISOLATED NEUTRAL

Аннотация: в статье описан опыт эксплуатации устройств волнового определения места повреждения на линиях электропередачи с изолированной нейтралью. Изложены меры, предпринятые для повышения эффективности волнового определения места повреждения. Результаты рассмотрены на реальных аварийных осциллограммах.

Ключевые слова: линия электропередачи, определение места повреждения, короткое замыкание, однофазное замыкание на землю.

Abstract: the article describes the experience of wave fault location devices operation on power lines with isolated neutral. Measures taken to improve the efficiency of wave fault location are described. The results are considered on real emergency oscillograms.

Keywords: power line, fault location, short circuit, single-phase ground fault.

Введение

Решение выполнять сети 6-35 кВ с изолированной нейтралью позволило не прибегать к экстренному отключению линий при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ), что существенно повысило их надежность [1]. Но при этом создаются риски поражения электрическим током людей, животных и растений; возникает вероятность возникновения дуги в месте повреждения и целый ряд сопутствующих отрицательных факторов.

Нивелировать возникающие проблемы можно быстрым выполнением аварийно-восстановительных работ [2]. Важную роль в этом играет определение места повреждения (ОМП).

Распространённые в настоящее время устройства ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР) активно используются на линиях всех классов напряжений. Однако на линиях электропередачи (ЛЭП) с изолированной нейтралью 6-35 кВ их возможности ограничены:

- **они не могут применяться на «тупиковых» подстанциях (ПС).** При этом топология линий 6-35 кВ в большинстве случаев предполагает одностороннее питание, что существенно ограничивает выбор объектов, на которых могут быть установлены данные устройства.
- **они не эффективны при ОЗЗ.** Отметим, что это наиболее распространённый вид повреждения – 80-90% [3].

Оба этих фактора связаны с тем, что токи при ОЗЗ остаются соизмеримы с нагрузочными.

В итоге методы по ПАР могут применяться только со стороны источника питания ЛЭП и только при междуфазных коротких замыканиях (КЗ) – двух- и трёхфазных. Поэтому для ОМП при всех видах повреждений потребовалось внедрение новых волновых алгоритмов.

Проблема волнового ОМП в сети с изолированной нейтралью

Наиболее перспективным методом определения места ОЗЗ является волновой. Он основан на вычислении разницы между моментами времени t_1 и t_2 прохождения аварийной волной от точки повреждения до разных концов ЛЭП [4] (рис. 1).

Данный способ более 20 лет успешно используется на линиях с заземлённой нейтралью. Аварийная электромагнитная волна регистрируется во вторичных цепях трансформаторов тока (ТТ) или напряжения (ТН) [5]. За счёт возникновения тока КЗ

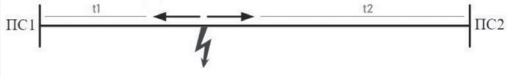

Рис. 1. Пассивное двухстороннее волновое ОМ

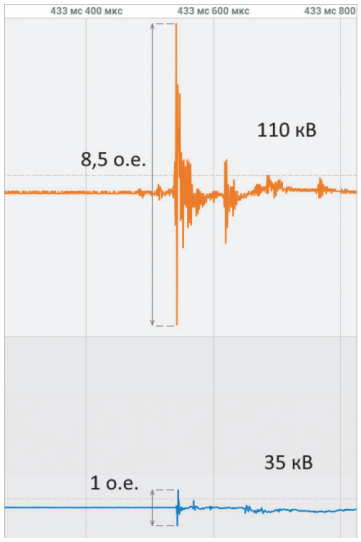

Рис. 2. Аварийная волна в токе при однофазном КЗ ЛЭП 110 кВ и ОЗЗ ЛЭП 35 кВ

волна имеет большую амплитуду и обладает хорошей распознаваемостью.

На линиях с изолированной нейтралью мощность волны при ОЗЗ значительно ниже из-за отсутствия тока КЗ и меньшего рабочего напряжения линии [6]. Фронт такой волны может быть размытым или вовсе не распознаваться.

Чтобы показать, какой может быть разница амплитуды волн на линиях с разным режимом нейтрали, на рис. 2 изображены высокочастотные осциллограммы тока при однофазном замыкании ЛЭП 110 и 35 кВ.

Отметим, что в общем случае характеристики волны зависят не только от режима заземления нейтрали [7, 8]. Но в вопросах применения волновых алгоритмов на линиях 6-35 кВ данный фактор является решающим.

Повышение эффективности распознавания фронта волны

Задача распознавания волны малой мощности (в условиях ОЗЗ) легла в основу научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР), выполненной предприятиями ООО «НПП Бреслер» и ПАО «Россети Ленэнерго». Основные этапы НИОКР изображены на рис. 3.

В рамках данной работы рассматривались разные способы регистрации волны с помощью дополнительного оборудования [9, 10]:

• **датчики частичных разрядов,** установленные во вторичной цепи ТТ и в обо-

Рис. 3. Основные этапы НИОКР

рудовании высокочастотной связи (на линии связи);

• **датчики конденсаторного типа,** установленные в первичной цепи.

Перечисленные способы позволяют регистрировать сигналы в диапазоне частот от сотен кГц до десятков МГц.

Эффективность применения высокочастотных датчиков показана на рис. 4. Волна во вторичной цепи ТТ при ОЗЗ практически не видна, тогда как фронт волны в сигналах, зарегистрированных с помощью датчиков, очевиден.

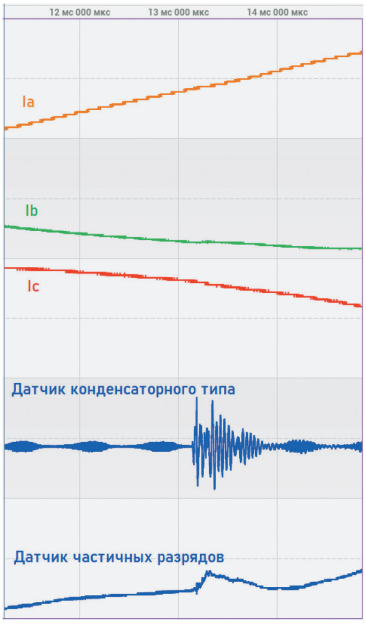

Рис. 4. Сравнение сигналов аварийной волны, зарегистрированной разными способами, при ОЗЗ

Козлов Владимир Николаевич
В 1975 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова, кафедра «Электрические аппараты».
В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию в Ленинградском политехническом институте на тему «Комплексная защита судовых генераторов».
Главный конструктор ООО «НПП Бреслер», доцент.

Ермаков Константин Игоревич
В 2009 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий».
В 2022 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Совершенствование методов и средств определения места повреждения на линиях электропередачи для организации аварийно-восстановительных работ».
Заведующий сектором ОМП и РАС ООО «НПП Бреслер».

Разработанный комплекс волнового ОМП был внедрен в опытно-промышленную эксплуатацию (2019 - 2020 гг.) на 6 ЛЭП 35 кВ ПАО «Россети Ленэнерго». В этот период выполнялись корректировки алгоритмов преимущественно в области совершенствования пусковых органов функции ОМП и автоматического определения момента времени первого фронта волны. Завершением данного этапа НИОКР были натурные испытания с искусственным О33 на одной из ЛЭП. Опыт повторялся на разных фазах, точность волнового ОМП составила 200 – 400 м.

Следующим этапом проходила пилотная эксплуатация (2020 - 2024 гг.), направленная на мониторинг повреждений контролируемых линий, сбор информации и анализ работы опытных образцов. Поведение устройств регистрировалось в журналах учёта, на основании записей можно сделать вывод, что комплексы ОМП исправно фиксировали однофазные и междуфазные замыкания и выводили результаты на экраны устройств, работали без программных и аппаратных сбоев. Точность ОМП за время пилотной эксплуатации составила 300 – 600 м.

Среди зафиксированных аварийных событий выделяется О33, которое произошло в результате обрыва провода ЛЭП. Однозначно установленные причина и место повреждения позволяют объективно оценить точность комплекса ОМП, которая составила 565 м.

Важно подчеркнуть, что данный результат получен по сигналам датчиков тока, в которых волна имеет более выраженный фронт, чем во вторичных цепях ТТ. Это видно на рис. 5, на котором изображены осциллограммы аварийной волны с двух сторон линии, а также волновой расчёт в программе WinBres. С помощью этого инструмента рекомендуется верифицировать результаты ОМП, выполненные терминалами. Возможно два варианта расчёта – автоматический (аналог терминальному) и ручной с указанием моментов времени начала волны. Если в осциллограмме идентифицируется в том числе отражённая от места повреждения волна [11], то, указав моменты времени прямой и отражённой волны, запускается односторонний волновой расчёт.

Важной особенностью волнового ОМП в разработанном комплексе является возможность установить фактическую длину линии, которая может отличаться от паспортной [12]. Также при необходимости можно изменять скорость волны и задавать разное значение скорости на неоднородных участках для воздушно-ка-

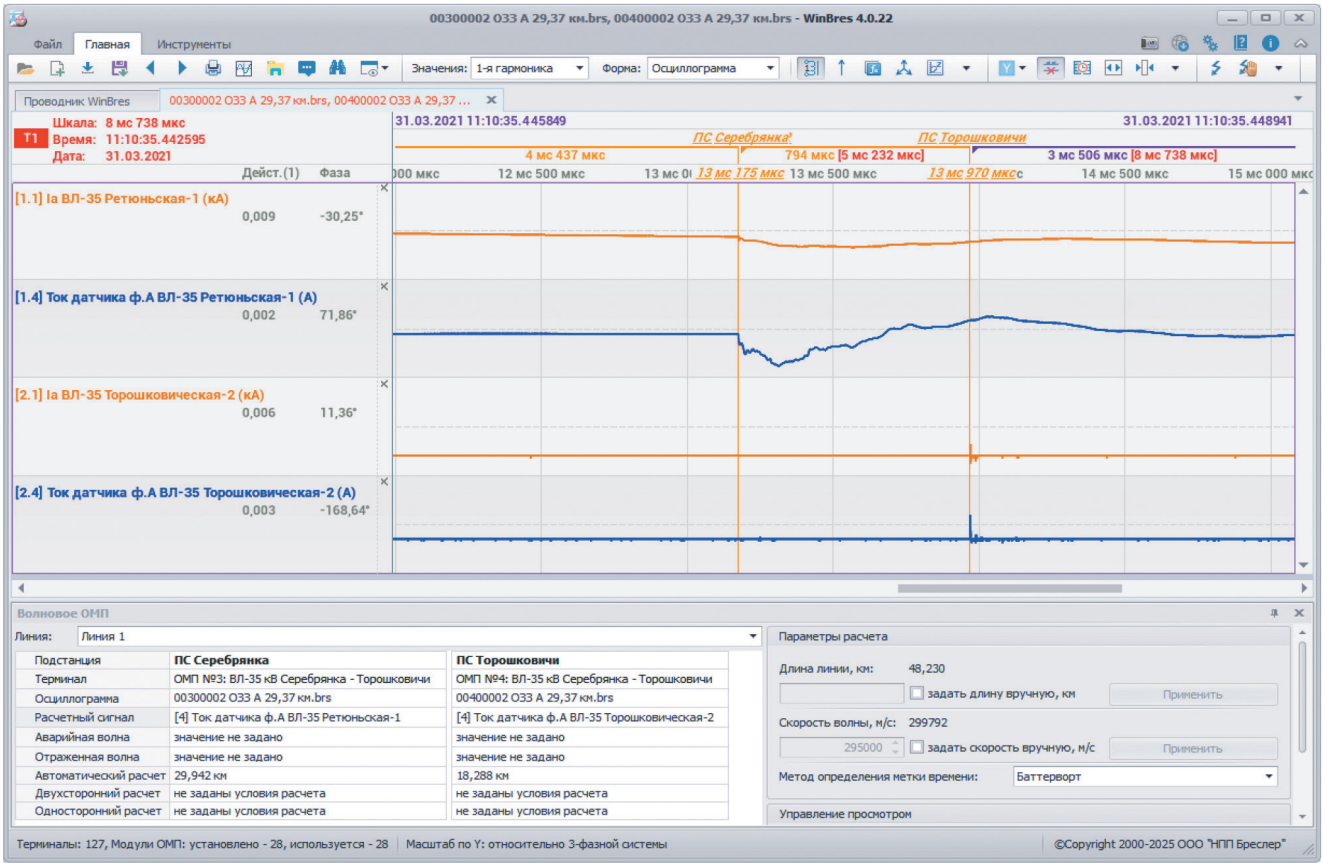

Рис. 5. Волновое ОМП при О33 по сигналам волны в токе повреждённой фазы: оранжевый цвет - вторичная цепь ТТ, синий цвет - датчики частичных разрядов

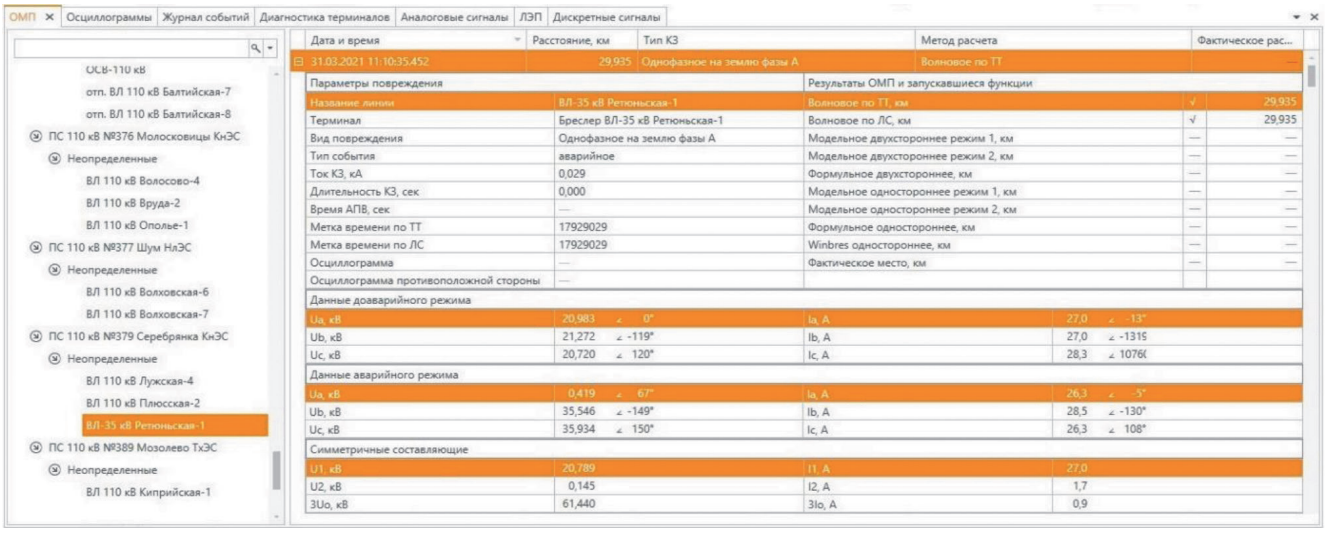

Рис. 6. Система сбора и передачи информации – ССПИ ОМП

бельных ЛЭП [13]. Данный функционал реализован как в программном виде, так и в терминалах.

В конце 2018 г. в ПАО «Россети Ленэнерго» был реализован проект по созданию системы сбора и передачи данных с установленных устройств ОМП разных производителей. Опытные устройства волнового ОМП были интегрированы в данную систему. Это позволило в режиме реального времени получать необходимую информацию и оперативно осуществлять почтовую и СМС-рассылку сообщений о возникающих технологических нарушениях со следующей информацией: дата и время повреждения, название подстанции, координата повреждения, вид замыкания, повреждённые фазы, длительность повреждения и аварийные величины. На рис. 6 изображено окно программы мониторинга для повреждения, описанного выше.

Следует обратить внимание на то, что функция волнового ОМП, описанная в данной статье, является не единственной реализованной в новом комплексе. При междуфазных КЗ кроме волнового запускается также расчёт по ПАР. Данный подход предоставляет возможность для анализа данных, что положительно сказывается на достоверности определения координаты повреждения.

Выводы

Проблема определения места ОЗЗ на линиях с изолированной нейтралью заключается в отсутствии токов КЗ. Методы по ПАР в этом случае не эффективны, поэтому в новом комплексе ОМП был применён волновой метод. Эффективность разработанной системы достигается за счёт использования высокочастотных датчиков, позволяющих распознавать волну малой мощности в условиях ОЗЗ. Наряду с волновым методом реализованы методы по ПАР, которые работают при междуфазных КЗ. В настоящее время устройства ОМП готовы к серийному производству.

Литература:

1. Афанасенко А.С., Кудряшев Г.С. Режим заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ и селективность релейной защиты от однофазных замыканий на землю // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития. – 2014. – № 5. – С. 50-56.
2. Ермаков К.И. Совершенствование методов и средств определения места повреждения на линиях электропередачи для организации аварийно-восстановительных работ: дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Ермаков Константин Игоревич. – Чебоксары, 2022. – 209 с.
3. Аржанников Е.А., Чухин А.М. Методы и приборы определения места короткого замыкания на линиях – Учебное пособие. Иваново: ИГЭУ, 1998. – 74 с.
4. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
5. Лачугин В.Ф., Куликов А.Л., Платонов П.С., Вуколов В.Ю. Методика и результаты расчета токов и напряжений в цепях измерительного органа устройства защиты линии электропередачи, основанного на контроле переходных процессов. // Известия Академии наук – 2017. – № 2. – С. 117-127.
6. Козлов В.Н., Ермаков К.И., Макаревич В.А., Кирюшин М.И. Анализ результатов натурных испытаний волновых устройств ОМП на ВЛ 35 кВ АО «ДРСК» // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 3 (52). – С. 40-46.
7. Козлов В.Н., Ермаков К.И., Кирюшин М.И. Возникновение пассивных волн при повреждениях на линиях электропередачи // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 1 (50). – С. 46-49.
8. Ермаков К.И., Кирюшин М.И. Программно-аппаратный комплекс ОМП // Учебное пособие ИПК РЗА, 2024. – 60 с.
9. Булычев А.В., Ермаков К.И., Козлов В.Н., Михеев К.А., Бойко О.А. Волновой метод определения мест повреждения на ВЛ 35 кВ. Сравнительный анализ датчиков волны // Новости электротехники. – 2020. – № 6 (126). – С. 22-23.
10. Бойко О.А., Ермаков К.И., Кирюшин М.И. Разработка микропроцессорного комплекса определения места повреждения при всех видах замыканий на линиях 35 кВ, интегрированного в цифровые активно-адаптивные сети // Сборник работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отраслей 2021 года. – 2021. – С. 194-196.
11. Козлов В.Н., Ермаков К.И., Бычков Ю.В. Расширение возможностей пассивного волнового определения места повреждений за счёт отражённых волн // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 4 (37). – С. 34-37.
12. Козлов В.Н., Ермаков К.И., Кирюшин М.И., Шашкий А.В. Повышение точности волновых методов ОМП высоковольтных ЛЭП // Энергия единой сети. – 2022. – № 5-6 (66-67) – С. 26-34.
13. Козлов В.Н., Ермаков К.И., Кирюшин М.И. Учёт неоднородностей линии с целью повышения точности двухстороннего волнового ОМП // Релейная защита и автоматизация. – 2020. – № 4 (41). – С. 46-49.