

## ЗАДАЧА ПОИСКА ОЗЗ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ И КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

**А.С. КАРТАШЕВ (МНПП АНТРАКС), А.А. РУКАВИЦЫН (ФГУП СКБ ИРЭ РАН),  
А.А. КУЧЕРЯВЕНКОВ (ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова)**

**АНТРАКС**  
ЭНЕРГИЯ ПОД КОНТРОЛЕМ



В статье рассматриваются проблемы трендового направления Smart Grid: выбор устройств для мониторинга линий электропередачи и их применение в российской энергосистеме. Авторами проводится обзор направлений развития указателей повреждённого участка, монтирующихся на воздушную линию электропередачи, с целью корректного обнаружения ОЗЗ в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью. Вкратце даётся обзор результатов испытаний устройств определения повреждённого участка, проведённых ПАО «Ленэнерго» весной 2016 года.

**Ключевые слова:** указатель повреждённого участка, мониторинг сети, направленное УПУ, испытание УПУ.

Один из ведущих трендов современной мировой электроэнергетики – построение систем Smart Grid, повышающих эффективность и бесперебойность энергоснабжения, улучшающих основные индексы надёжности энергосистемы – SAIDI, SAIFI и CAIDI. Премьер-министр Дмитрий Медведев 28 сентября на совещании в подмосковных Горках заявил о необходимости повсеместного внедрения “умных” электросетей в России. Сети должны уметь быстро реагировать на изменения и возникающие проблемы и прогнозировать их. Российские энергетические компании, начавшие реализовывать “смарт”-сети, столкнулись со сложностью подбора оборудования для мониторинга распределительных электросетей, способного качественно выполнять свои функции в российских реалиях.

Максимальную протяжённость в передающих и распределительных энергетических компаниях имеют воздушные сети среднего класса напряжения. Они зачастую являются “слабым звеном” энергосистемы, поскольку легко повреждаются из-за климатических воздействий, старения оборудования и множества других факторов. Воздушные линии электропередачи имеют разветвлённую структуру и зачастую пролегают в труднодоступной местности, что сильно осложняет поиск и ликвидацию повреждений. Особенностью российской энергосистемы является то, что сети среднего класса напряжения выполнены с изолированной и компенсированной нейтралью, что обуславливает чрезвычайно низ-

кие аварийные токи в случае однофазных замыканий на землю. Оборудование немецких, китайских и других зарубежных производителей, испытываемое российскими региональными энергосистемами, в вопросе определения мест однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью испытывают существенные сложности. Это связано с тем, что изначально эти устройства разрабатывались для зарубежных сетей с глухо-заземлённой или резистивно-заземлённой нейтралью.

Для поиска повреждений в распределительных сетях разработано множество методов, базирующихся на разнообразных физических принципах. Но для сетей среднего класса напряжения в мировой практике наиболее применимым на протяжении десятилетий остаётся топографический метод, основывающийся на том, что в разных участках сети устанавливаются указатели повреждённого участка. Популярность данного метода обусловлена тем, что он применим при топологии сети любой сложности, и не требует установки дорогостоящего подстанционного оборудования. В отличие от методов, подразумевающих поиск места повреждения персоналом, оснащённым специальными детекторами, топографический метод позволяет автоматизировать поиск аварийного участка.

Традиционно указатели повреждённого участка предназначены для определения места короткого замыкания в воздушной линии электропередачи и основаны на фиксации фак-

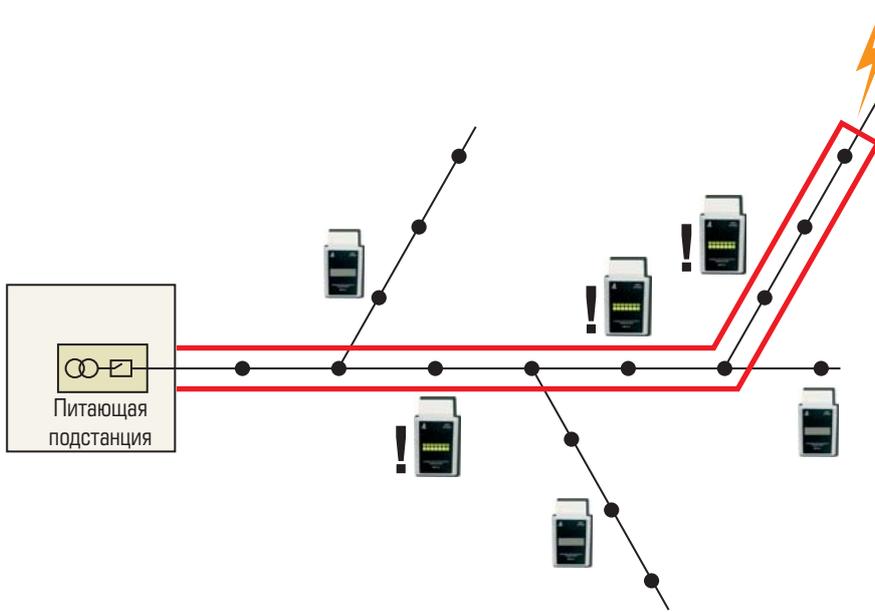


Рис. 1.  
Принцип определения места повреждения с применением указателей повреждённого участка

та протекания высокого аварийного тока. Как известно, при коротком замыкании аварийный ток протекает от питающей подстанции к месту повреждения. Все указатели, расположенные на пути протекания аварийного тока, срабатывают и индицируют аварийную ситуацию. Указатели, расположенные в остальных участках сети, остаются не сработавшими. Ориентируясь на сработавшие и не сработавшие устройства, осуществляется локализация участка сети, где произошла авария (рис. 1).

Указатели могут отображать информацию об аварийной ситуации визуально, либо передавать диспетчеру. Указатели повреждённого участка отлично решают поставленную задачу в сетях с глухо-заземлённой или резистивно-заземлённой нейтралью, поскольку аварийный ток составляет сотни Ампер даже в случае однофазного замыкания на землю. Для успешного функционирования в таких сетях приборам достаточно чувствительности порядка 50 А, поэтому конструктивно данные устройства достаточно просты. В сетях с изолированной и компенсированной нейтралью подобные приборы могут фиксировать только межфазные замыкания.

В сети с изолированной нейтралью при однофазном замыкании на землю практически не протекает фазный аварийный ток, так как нейтраль сети никак не связана с землёй. Вместо фазного тока в сети появляется ток нулевой последовательности, носящий ёмкостной характер. Появление этого тока обусловлено тем, что линия обладает распределённой ёмкостью и в случае замыкания одной из фаз на землю, эта ёмкость начинает разряжаться через точку повреждения. Упрощённо данный про-

цесс можно представить как стекание ёмкостных токов со всех сетей в место замыкания. Таким образом, ток нулевой последовательности присутствует не только на пути от питающего центра к месту повреждения, но и во всей сети, в том числе за местом повреждения и в неповреждённых отпайках. Величина аварийного тока в этом случае напрямую зависит от суммарной ёмкости линии. Как правило, в воздушных линиях среднего класса напряжения он находится в диапазоне от одного до 10 А. Классические указатели повреждённого участка не способны зафиксировать повреждение со столь малым током.

Сети с компенсированной нейтралью представляют ещё большую сложность для определения места повреждения топографическим методом. Благодаря дугогасящей катушке, ёмкостной ток ещё на порядок ниже, а большинство ОЗЗ являются самозатухающими. Это позволяет снизить нагрузку на сеть, однако сильно усложняет поиск ОЗЗ, так как длительность аварийного режима не превышает десятка миллисекунд. Большинство указателей повреждённого участка не обладают достаточной чувствительностью и быстродействием для фиксации подобных аварийных процессов.

Один из способов добиться срабатывания указателей в случае однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью — это оснащение сети оборудованием, позволяющим кратковременно увеличить аварийный ток до величины, необходимой для фиксации аварии. Примером такого оборудования является шкаф заземления нейтрали. При появлении на питающей подстанции сигнала  $3U_0$ , шкаф заземления

нейтрали переводит сеть в режим резистивно-го заземления нейтрали. Через повреждённую фазу и резистор начинает течь ток, достаточный для срабатывания указателей. Для установки ШЗН необходимы свободные высоковольтные ячейки на подстанции. Как правило, при строительстве ПС закладываются резервные ячейки, но на практике чаще всего они уже заняты другим оборудованием. Также цена устройства шунтирования достаточно велика.

При применении шкафа заземления нейтрали необходимо максимально аккуратно подбирать величину заземляющего резистора таким образом, чтобы указатели могли гарантированно отделять аварийный ток от обычного тока нагрузки и его изменения, при этом аварийный ток должен оставаться ниже порога срабатывания защиты. Следует учитывать, что не все указатели будут работать в таком режиме: ряд производителей обеспечивают в приборах контроль не только тока, но и напряжения. В случае, если вслед за превышением порога по току не произошло отключение воздушной линии защитой, такие указатели могут не срабатывать либо будут срабатывать ненадёжно в зависимости от величины переходного сопротивления ОЗЗ и заложенной уставки по напряжению. В случае, если ток шунтирования выше порога максимальной токовой защиты, и линия отключается, нарушается сам принцип построения сети, и её следует рассматривать как сеть с резистивной нейтралью. Ряд нормативных документов налагает ограничения на установку устройств типа шкафа заземления нейтрали на линии электропередачи в России, например, “Типовая инструкция по компенсации ёмкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ РД34.20.179 (ТИ34-70-070-87) УДК 621.3.014” и СО 153-34.20.501-2003 “Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации”.

Многие производители указателей повреждённого участка для работы в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью выпускают модели с повышенной чувствительностью. Лучшие приборы способны срабатывать при токе нулевой последовательности вплоть до двух Ампер. Такой чувствительности достаточно для срабатывания в случае ОЗЗ в подавляющем большинстве сетей с изолированной нейтралью. Однако в этом случае начинает влиять физическая природа тока ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью. Поскольку ток повреждения является током разряда

распределённой ёмкости линии, и стекается со всех участков сети, то срабатывать будут не только указатели на участке между питающей подстанцией и местом повреждения, но и по всей остальной линии, что обесценивает результаты работы указателей.

Для отстройки от ложных срабатываний необходимо выбирать места установки приборов таким образом, чтобы суммарная ёмкость участка сети за установленным указателем не была значительной по отношению к остальной сети. В этом случае можно подобрать уставку срабатывания по току ОЗЗ так, чтобы срабатывание происходило только в случае повреждения на наблюдаемом участке. Подбор уставок – очень трудоёмкая задача, потому что требует расчёта токов нулевой последовательности, которые являются непостоянной во времени величиной и их расчёт не выполняется в полном объёме. В сетях с компенсированной нейтралью ситуация ещё сложнее: поскольку ток там компенсируется дугогасящей катушкой, даже чувствительности в два Ампера может быть недостаточно.

Альтернативным методом отстройки от ложного срабатывания является введение селективности по току нулевой последовательности. В применении к топографическим указателям повреждённого участка наиболее подходящий метод обеспечения селективности – определение направления потока мощности. В случае применения направленных указателей повреждённого участка локализация повреждения сводится к сравнению направления потока мощности, зарегистрированного указателями в разных участках сети (рис. 2). Очевидным преимуществом этого подхода является то, что установка подобных указателей не требует никаких модернизаций энергетического оборудования и при этом риск ложных срабатываний минимален. Данный сегмент сейчас достаточно молод, а направленные УПУ являются технологически очень сложными и наличием таких моделей может похвастаться далеко не каждый разработчик указателей.

С целью практического исследования указателей повреждённого участка в апреле 2016 года в ПАО “Ленэнерго” “Кингисеппские электрические сети” были проведены испытания устройств различных производителей. Исследования проводились на участке линии 10 кВ и включали в себя несколько опытов двухфазного замыкания и несколько опытов однофазного замыкания на землю. В испытаниях

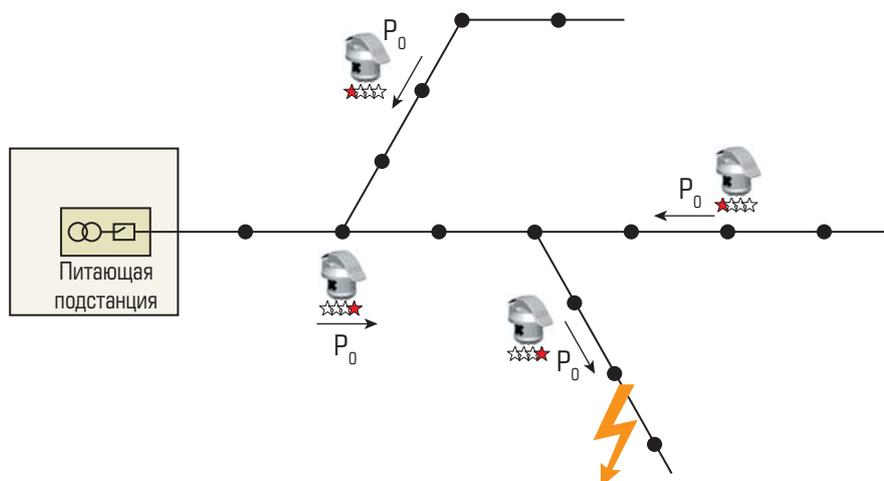


Рис. 2.  
Определение места повреждения указателями, фиксирующими направление потока мощности

приняли участие приборы FI-3A1F производства CREAT (Китай), FLA3.1VS производства EMG (Германия), LT-111 и LT-110Ем производства NorTroll (Норвегия) и ИКЗ-34МР производства АНТРАКС (Россия). Приборы FLA3.1VS, LT-111 и LT-110Ем относятся к категории приборов с повышенной чувствительностью, приборы ИКЗ-34МР – к категории приборов с определением направления аварийных токов, приборы FI-3A1F – это простой указатель повреждённого участка, работающий только на короткое замыкание.

В опытах двухфазного замыкания все приборы отработывали согласно спецификации, но у приборов с повышенной чувствительностью FLA3.1VS и LT-110Ем наблюдались проблемы при фиксации двухфазного замыкания на землю: в экспериментах срабатывали все три индикатора комплекта, что не позволяло определить повреждённую фазу.

В части однофазного замыкания на землю было приведено несколько экспериментов, в том числе, ОЗЗ после места установки индикаторов и ОЗЗ на соседнем фидере. Поставщик приборов FI-3A1F для решения задачи поиска ОЗЗ предлагает оснащение сети устройством шунтирования замыкания, кратковременной перевода ОЗЗ в двухфазное замыкание на землю, однако по понятным причинам оно не было установлено на линии. Надо отметить, что FI-3A1F контролирует наличие напряжения на линии, но ни производитель, ни поставщик не раскрывают тонкости работы совместно с УШЗ, поэтому надёжность срабатывания этих приборов по ОЗЗ осталась под вопросом. Последний

эксперимент с повреждением соседнего фидера наглядно показал проблемы, возникающие при использовании индикаторов с повышенной чувствительностью. В этом эксперименте наблюдалось срабатывание индикаторов FLA3.1VS производства EMG, что может ввести в заблуждение ОЗБ в случае поиска повреждения. Индикаторы LT-111 и LT-110Ем производства NorTroll не зафиксировали повреждение, однако утверждать, что они работают корректно в данной ситуации нельзя, поскольку в опытах определения ОЗЗ после места установки они вели себя неустойчиво (в одном опыте ОЗЗ сработал LT-110Ем но не сработал LT-111, в другом аналогичном опыте – наоборот). Направленный указатель ИКЗ-34МР при замыкании на соседнем фидере наглядно показал, что место повреждения вне наблюдаемого участка.

Испытания, проведённые ЛенЭнерго, продемонстрировали все сложности применения зарубежного оборудования в реалиях российской энергетической системы. Проблематичность обнаружения однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью заставляет очень серьёзно отнестись к подбору оборудования – это именно то место, где сеть должна быть действительно “умной”. Указатель с функцией определения направления потока мощности является наиболее перспективной и технологически сложной ветвью развития указателей повреждённого участка. На данный момент из реально присутствующих на российском рынке такими приборами являются только ИКЗ-34 производства российской компании АНТРАКС.

*Карташев Андрей Сергеевич – ведущий инженер-разработчик, МНПП АНТРАКС,  
Рукавицын Андрей Андреевич – ведущий инженер, ФГУП СКБ ИРЭ РАН,  
Кучерявенков Андрей Анатольевич – научный сотрудник ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова.*