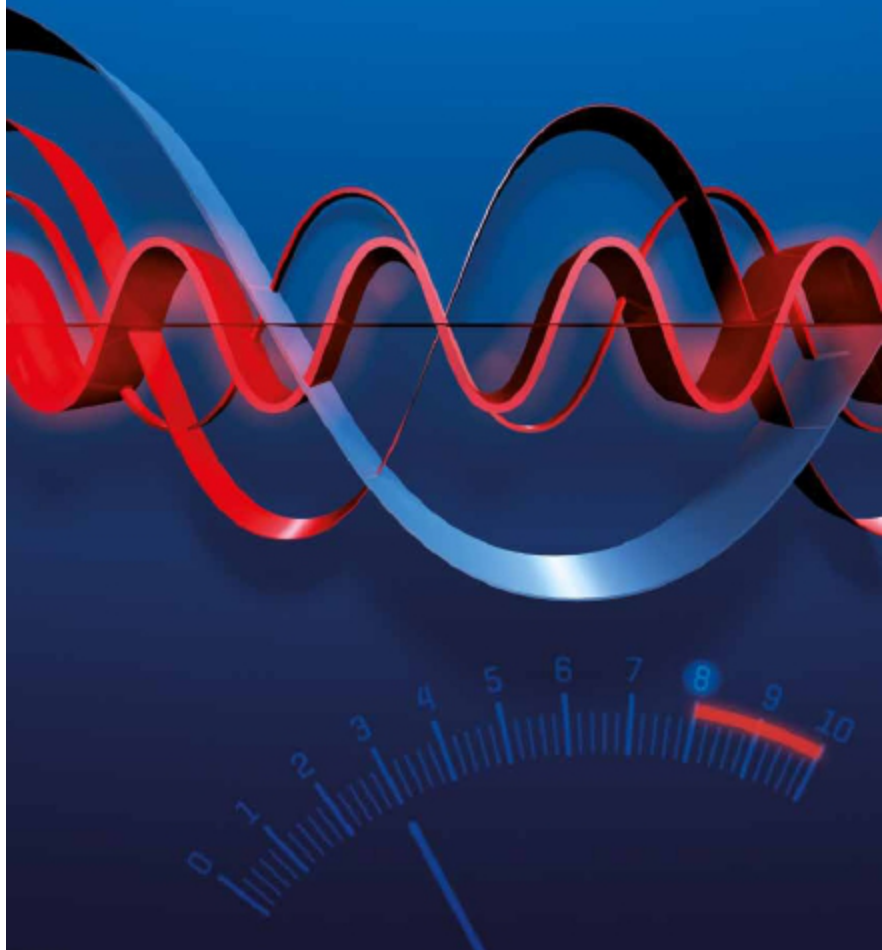


actaenergetica Power Engineering
Quarterly

03/2011 NUMBER 8/YEAR 3



Определение мест повреждения волновым методом в линиях электропередач

Кржиштоф Глик / Варшавский Политехнический Университет
Рижард Ковалик / Варшавский Политехнический Университет
Дезире Дофин Расоломампыенона / Варшавский Политехнический Университет

Примечание

Данная статья в оригинале была опубликована Варшавским политехническим университетом в журнале Acta Energetica и доступна в открытом доступе в сети Интернет по следующей [ссылке](#). Перевод подготовлен ООО «БО-ЭНЕРГО».

1. ВВЕДЕНИЕ

Определение мест повреждений (ОМП) в высоковольтных линиях является одной из наиболее важных задач для систем защиты.

Определение мест повреждений может использоваться для надлежащей работы релейной защиты или для целей осмотра и ремонта. В первом случае важно быстро обнаружить место повреждения, учитывая тот факт, что точность может быть ограничена только зоной срабатывания защиты. Определение места повреждения для целей осмотра и ремонта должно быть максимально точным. Это выполняется через функцию определения места повреждения, реализованную в устройстве защиты, регистраторе помех или отдельном устройстве.

Точное определение места повреждения для осмотра и ремонта позволяет:

- более оперативно восстановить работу линии;
- предотвратить устойчивую неисправность;
- проверить работу релейной защиты.

Оперативное восстановление работы линии является результатом более эффективной работы энергетических служб, которые, обладая точной информацией о расстоянии до места повреждения, могут быстро определить это место даже в горах и в лесных массивах.

Большинство повреждений на высоковольтных линиях являются неустойчивыми короткими замыканиями. Точное определение места этих КЗ позволяет выполнить профилактические работы (например, замена изоляторов, обрезка деревьев), чтобы предотвратить систематические повреждения.

В случае моделирования неисправностей, использование информации по установленному расстоянию для проверки работы релейной защиты основывается на подтверждении исправной работы защитной системы в соответствующей зоне и в обозначенном местоположении.

2. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОМП ИМПЕДАНСНОГО И ВОЛНОВОГО ТИПОВ

Среди наиболее употребимых для этой цели устройств наиболее важными являются два типа: устройства, работающие на основе импедансного метода, и устройства, работающие на волновом принципе. Устройства ОМП импедансного типа могут входить в состав устройства защиты, регистратора помех или представлять собой отдельное устройство аналогичное устройству волнового типа.

Работа устройств ОМП импедансного типа основывается на принципе измерения тока и напряжения во время повреждения. За счёт использования этих двух электрических величин при определении места повреждения выполняется расчёт, который характеризуется ошибками, возникающими из-за нескольких факторов:

- переходные составляющие тока;
- искажение тока, вызванное насыщением сердечника в трансформаторах тока;
- ток предварительного заряда в линии, возникающий непосредственно перед возникновением короткого замыкания;
- переходное сопротивление в месте короткого замыкания;
- ёмкость линии относительно земли;

- взаимная индукция кабелей;
- неточность данных, касающихся полного сопротивления линии, в частности, неточное определение нулевого полного сопротивления линии из-за изменения сопротивления земли вдоль линии;
- явление прохождения тока в точке соединения линии с ответвлениями в разветвлённых системах.

Благодаря многолетней эксплуатации устройств ОМП импедансного типа, разработаны методы, сокращающие или устраняющие воздействие отдельных факторов на точность измерения. Тем не менее, точность ОМП с использованием устройств составляет от 1 до 20 процентов. Нижний предел ошибок соотносится с КЗ, определяемыми на обоих концах линии, в то время как верхний предел характерен для длинных линий, как правило, продольно-компенсированных. В системе защиты Siemens 7SA522 заявляется ошибка обнаружения места повреждения на уровне 2,5 процента от длины линии. Такой точности недостаточно, принимая во внимание тот факт, что длина линий электропередач зачастую составляет сотни километров, проходящих по разному типу местности. Точное установление места повреждения оперативным персоналом в таких условиях может привести к продолжительному прекращению электроснабжения.

Устройства ОМП волнового типа измеряют время, а не ток и напряжение. Таким образом, устраняется влияние на погрешность измерения многих вышеупомянутых факторов.

Однако, такие устройства также имеют свои недостатки. Основные факторы, влияющие на погрешность ОМП в таких устройствах:

- малые углы повреждений;
- повреждения вблизи места установки устройств обнаружения;
- качество синхронизации устройств;
- неверно определенная скорость распространения волны в линии;
- погрешность определения бегущей волны.

Термин «малые углы повреждений» относится к ситуации, в которых повреждение происходит в тот момент, когда мгновенное напряжение близко к нулю. Это препятствует обнаружению повреждения из-за низкого значения амплитуды формируемой электромагнитной волны. Для возникновения в высоковольтной линии волны напряжения и тока с высокой амплитудой требуется резкое изменение напряжения, что в данном случае невозможно. Эту проблему можно устранить путем одновременного определения места повреждения устройствами волнового и импедансного типов, где последнее будет отвечать за определение места повреждений, возникающего при малом значении угла.

Погрешность, связанная с **повреждением, возникающем вблизи** места установки устройства ОМП, возникает из-за многократного отражения волны между точкой установки устройства и местом повреждения. Такая погрешность может быть устранена путём применения достаточно высокой частоты дискретизации измерительного входа устройства.

Погрешность синхронизации устройства возникает в случае использования приборов двустороннего ОМП (устройства типа D). Эта ошибка обычно составляет ± 1 мкс, что соотносится с погрешностью измерения расстояния ± 150 м для одного устройства.

Скорость распространения волны в линии - одно из значений, используемых для расчета расстояния до места повреждения. Она зависит от параметров линии и пути прохождения электромагнитной волны - проводников (повреждения без замыкания на землю) или проводников и земли (замыкание на землю).

Погрешность обнаружения бегущей волны связана с уменьшением амплитуды и увеличением длины перемещающейся по линии волны. Если повреждение возникает ближе к станции А, нежели к станции В, то из-за более высокой протяженности фронта волны до станции В обнаружение волны на этой станции произойдет позднее, что вызовет дополнительную ошибку.

Устройства волнового ОМП характеризуются точным определением расстояния в диапазоне от 150 до 500 м, независимо от длины линии. Такая точность также действительна и для продольно-компенсированных длинных линий, многоконтурных линий с кабельными участками и линий постоянного тока.

Высокая точность ОМП и повышенная надежность работы сети, а также экономия затрат привели к широкому распространению устройств волнового ОМП в таких странах как США, Китай, ЮАР, Шотландия и Канада. Польская национальная электроэнергетическая система использует устройства волнового ОМП типа LAS производства Institute of Power Systems Automation Ltd (г. Вроцлав) и устройства типа TWS производства компании Qualitrol.

Ниже описываются основные вопросы, связанные с эксплуатацией устройств ОМП волнового типа.

3. ЯВЛЕНИЕ БЕГУЩИХ ВОЛН

Из всех переходных процессов, возникающих в энергосистеме, волновые явления в высоковольтных линиях характеризуются кратковременностью, которая изменяется в диапазоне от нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд.

Волновые явления связаны с распространением электромагнитных волн, возникающих в результате: КЗ в линиях электропередачи, атмосферного разряда или коммутационных операций в электрической сети. Внезапное и значительное изменение напряжения, как минимум, в одном месте высоковольтной линии (Рис. 1) инициирует образование электромагнитной волны, которая распространяется в противоположных направлениях от данной точки.

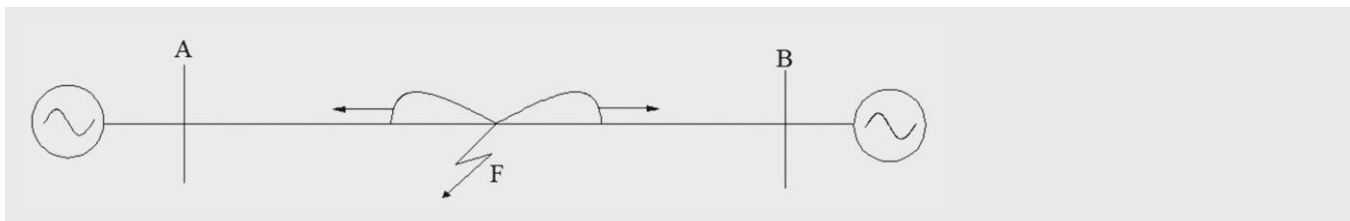


Рис. 1. Распространение электромагнитной волны вследствие повреждения

Электромагнитную волну можно разделить на волну напряжения, связываемую с явлениями, происходящими в электрическом поле, и волну тока, связанную с магнитным полем. Важной характеристикой такой волны является перемещение вдоль линии конкретных значений тока и напряжения с конечной скоростью.

Использование волновых явлений для ОМП требует рассмотрения многих теоретических вопросов, например:

- скорость распространения волны в линии;
- модель линии электропередачи с распределенными параметрами;
- затухание и искажение волны;
- прохождение и отражение волны;
- диагональная трансформация;
- волновые преобразования.

Точность волнового ОМП зависит от правильной оценки **скорости распространения волны** в отдельной линии электропередачи. Эта скорость зависит от параметров линии электропередачи, которые изменяются вместе с изменением температуры окружающей среды, уровнем загрязнения или обледенения поверхности проводника. Скорость распространения волны также зависит от пути прохождения электромагнитной волны, и, поэтому, определяется отдельно для каждой линии для повреждений без замыкания на землю или КЗ с замыканием на землю. Скорость распространения по воздушной линии составляет примерно $v = 295\ 000\ \text{км/с}$, в то время как скорость распространения по подземной линии составляет примерно $v = 188\ 000\ \text{км/с}$. При установке устройства волнового ОМП скорость распространения волны определяется инициацией бегущей волны в линии путем использования коммутируемых конденсаторов или силовых выключателей.

Цепь с распределенными параметрами, в основном, характеризуется тем, что для возникающего на входе системы сигнала требуется определенное время до момента его появления на выходе системы. Такие цепи описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. Значения напряжения и тока в такой цепи являются функцией двух переменных – времени t и координаты места x . Линии электропередач нельзя рассматривать как цепи с сосредоточенными параметрами, если их длина l [М] соразмерна длине волны $\lambda = v/f$ [М], возникающей в этой линии. Линии электропередач, работающие на частоте 50 Гц, и длина которых менее 6000 км, моделируются как цепи с сосредоточенными параметрами. Однако, при повышении частоты сигнала, например, до 100 кГц, 3-х километровая линия должна рассматриваться как цепь с распределенными параметрами.

Затухание и искажение волны вызывает уменьшение амплитуды и длины волны по мере её перемещения вдоль линии. Это связано с потерей энергии на сопротивлении проводников или проводников и земли, нагрузкой емкости изолятора или утечкой.

Прохождение и отражение волны также вызывает ослабление и искажение бегущей волны в точках изменения волнового сопротивления. Волновое сопротивление в линии определяется соотношением между амплитудой напряжения и тока волны, протекающей в данной линии. Обычно, это значение лежит в диапазоне $200 - 400\ \text{Ом}$ и зависит, в основном, от уровня напряжения линии. Когда

набегающая волна достигает точки изменения волнового сопротивления, называемого узлом, часть энергии волны отражается от этой точки, а часть перемещается дальше.

Диагональная трансформация используется для представления трехфазных линии в виде трёх отдельных однофазных линий без взаимного магнитного влияния. Теоретически, существует бесконечное число диагональных трансформаций, наиболее распространённой из которых является метод симметричных составляющих. Однако, при анализе волновых явлений такая трансформация не используется. Это обусловлено характером волновых процессов, описываемых мгновенными значениями тока и напряжения, которые невозможно преобразовать в совместимые составляющие нулевой и обратной последовательности. Используются матрицы трансформации, состоящие из элементов, которые не являются комплексными числами (как в случае трансформации симметричных составляющих).

Волновые преобразования используются для анализа нестационарных сигналов, то есть, сигналов, статистические характеристики которых (среднее значение, среднеквадратичное значение, корреляционная функция) являются функциями времени (они зависят от выбора линии отсчета). Одной из наиболее важных характеристик преобразования элементарных волн является способность определять время, при котором возникает высокочастотный сигнал с одновременным анализом составляющих низкочастотного сигнала.

4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

В зависимости от используемого метода измерения, устройства волнового ОМП подразделяются на пять типов: А, В, С, D и E. Работа устройства каждого типа основывается на анализе пришедшей электромагнитной волны, возникающей в результате повреждения. Ниже представлено более подробное описание этих методов.

Устройства типа А

Устройства волнового ОМП типа А относятся к устройствам одностороннего ОМП. Расстояние до места повреждения рассчитывается путём измерения времени между моментом, когда до устройства доходит первая из бегущих волн, распространяющихся от места повреждения, и точкой, когда до устройства доходит волна, отражённая от места повреждения. Электромагнитная волна полностью отражается от места повреждения, если сопротивление возникающего угла повреждения меньше волнового полного сопротивления линии. На рисунке 2 показан пример электрической сети и пути прохождения бегущих волн.



Рис. 2. Использование устройства типа А

Расстояние до места КЗ от станции А выводится из следующей зависимости:

$$D = \frac{t_3 - t_1}{2} \times v$$

где:

D – расстояние до места повреждения [м]

t_1 – время, за которое первая возникающая в повреждении волна достигает подстанции А [с]

t_3 – время, за которое волна, отражённая от места повреждения, достигает подстанции А [с]

v – скорость распространения волны [м/с].

Погрешность ОМП с использованием метода А зависит от таких факторов как малая продолжительность дуги КЗ, переходное сопротивление, разветвления и ответвления линии и сложность определения верной волны. Эти погрешности устраняются при использовании метода D.

Устройства типа В

Устройства ОМП типа В относятся к устройствам двустороннего ОМП. Волна, создаваемая в месте

повреждения, направляется к подстанциям А и В. После того, как первая волна достигнет подстанции А (в течение нескольких микросекунд), активируется таймер. Таймер на подстанции А отключается, когда отправляется сигнал от устройства, установленного на подстанции В, в момент обнаружения этим устройством волны, пришедшей от места повреждения. На рисунке 3 показан пример электрической сети и прохождения бегущих волн.

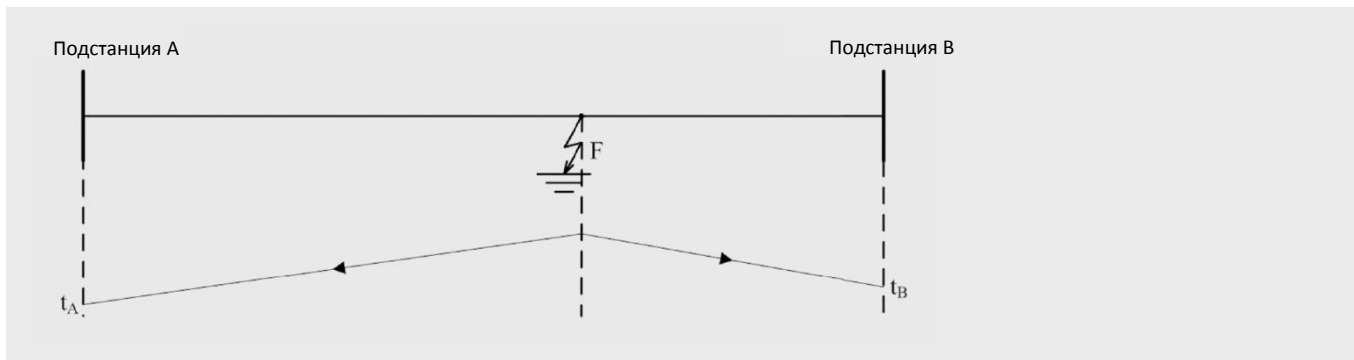


Рис. 3. Использование устройства типа В

Расчет расстояния до места повреждения аналогичен методу D, но расчёты должны принимать во внимание задержку по времени, связанную с передачей со станции В на станцию А останавливающего таймер сигнала.

Устройства типа С

Устройства ОМП типа С относятся к устройствам одностороннего ОМП. Устройство отправляет импульс в линию, в которой произошли возмущающие помехи. Расстояние до места повреждения рассчитывается с использованием разницы во времени между моментом отправки импульса и временем приема устройством волны, отраженной от дуги в месте повреждения. На рисунке 4 показан пример электрической сети и прохождения бегущих волн.

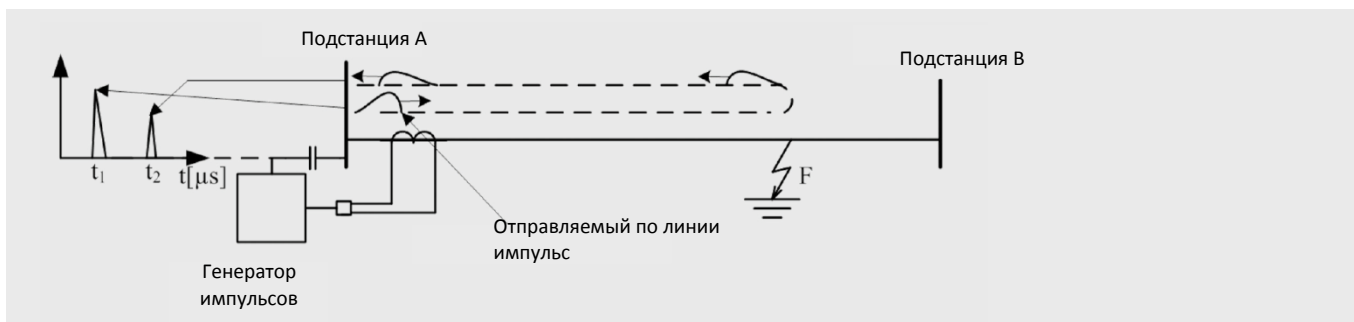


Рис. 4. Использование устройства типа С

Расстояние до места КЗ от станции А выводится из следующей зависимости:

$$D = \frac{t_2 - t_1}{2} \times v$$

где:

t_1 – время отправки импульса генератором [с]

t_2 – время, за которое волна, отражённая от места повреждения, достигает станции А [с]

Следует отметить, что текущее использование данного типа устройств сопряжено с трудностями, связанными с правильным взаимодействием импульсного генератора с линией электропередач и его высокой стоимостью.

Устройства типа D

Устройства ОМП типа D относятся к устройствам двустороннего ОМП. Волны, генерируемые в месте повреждения, расходятся к подстанциям А и В и достигают их в течение нескольких микросекунд.

Для правильного ОМП по методу D требуется использование двух синхронизированных по времени устройств (например, по GPS), установленных на обоих концах линии. Устройство определяет момент времени, когда волна доходит до подстанций A и B, затем эти моменты времени используются для расчета расстояния до места повреждения. На рисунке 5 показан пример электрической сети и прохождения бегущих волн.

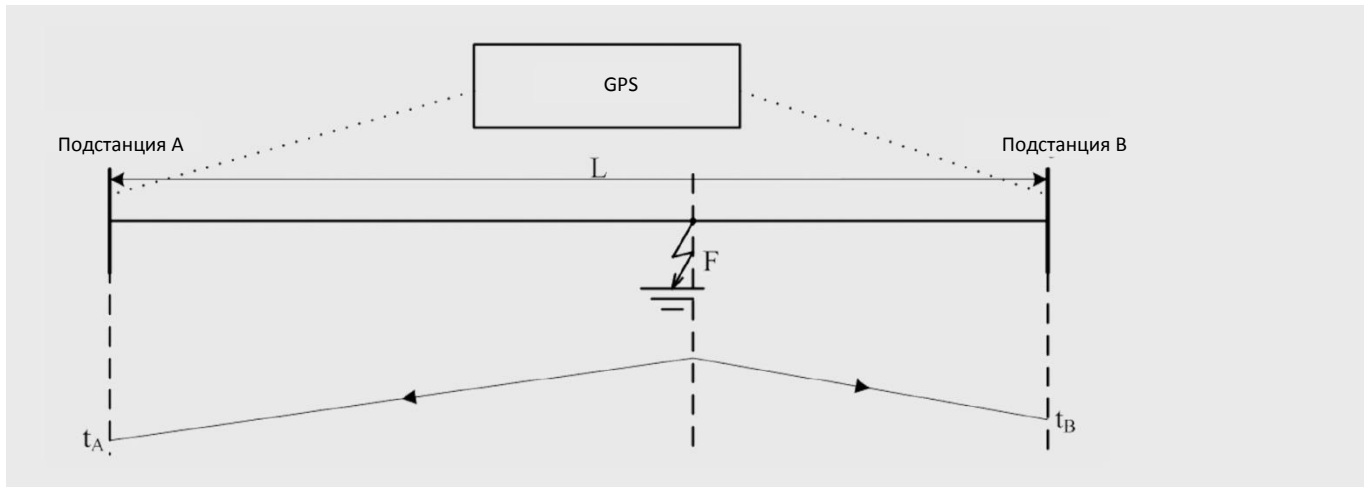


Рис. 5. Использование устройства типа D

Расстояние до места КЗ от станции А выводится из следующей зависимости:

$$D = \frac{L + (t_A - t_B) \times v}{2}$$

где:

t_A – время, за которое первая волна достигает подстанции А [с];

t_B – время, за которое первая волна достигает подстанции В [с];

L – длина линии [м].

Точность ОМП типа D не уменьшается из-за малого времени неисправности или наличия ответвлений в линии. Последующее отражение волны в точках изменения волнового полного сопротивления не влияет на определение расстояния. Основная ошибка в расчёте расстояния до места повреждения - ошибка синхронизации.

Следует иметь в виду, что устройства типа D устойчивы к воздействию упомянутых ранее в данной статье факторов, которые препятствуют правильному ОМП или создают дополнительную ошибку в устройствах типа А.

Устройства типа Е

Устройства ОМП типа Е относятся к устройствам одностороннего ОМП. Для этой цели они используют волну, генерируемую выключателем на линии. В своей работе метод Е аналогичен импульсному методу, используемому для определения мест повреждений в кабелях. Силовой выключатель на высоковольтной линии можно рассматривать как три отдельных импульсных генератора. Значения напряжения в коммутируемых фазах имеют разную амплитуду и сдвиг фаз, что обуславливается переключением каждого полюса выключателя в минимально разнящееся время. Для ОМП используется разность во времени между импульсом, возникающим при коммутации, и импульсом, отраженным от места повреждения. Работа этого типа устройств показана на рисунке 6.

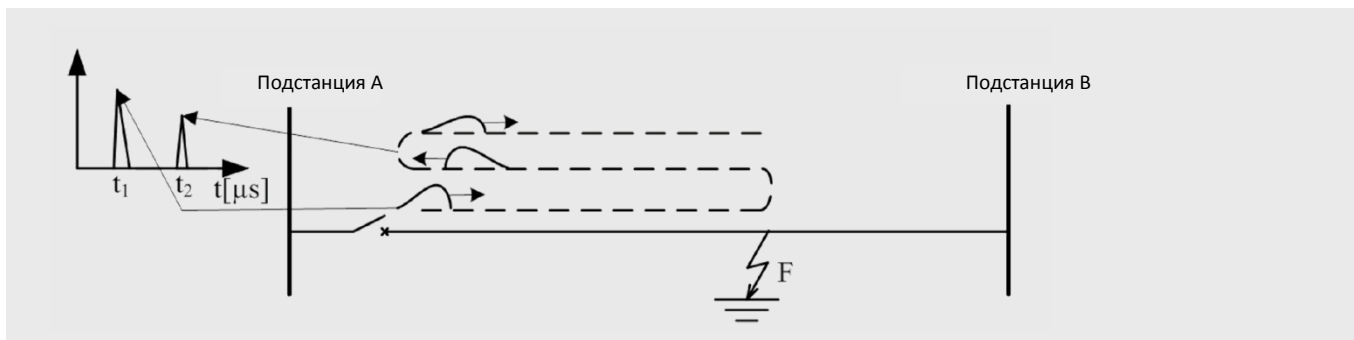


Рис. 6. Использование устройства типа Е

Расстояние до места повреждения от подстанции А рассчитывается на основании следующей зависимости:

$$D = \frac{t_2 - t_1}{2} \times v$$

где:

D – расстояние до места повреждения [м]

t_1 – время, в течение которого волна генерируется в результате коммутации [с]

t_2 – время, за которое отраженная волна достигает подстанции А [с]

v – скорость распространения волны [м/с].

Устройства типа Е можно использовать для обнаружения и определения местоположения оборванного кабеля на линии. Кроме того, этот метод можно использовать для проверки соответствия электрической длины рабочей линии длине линии, измеряемой при помощи другого метода. Такая процедура основана на выключении силового выключателя линии и последующем измерении времени, за которое отраженная волна возвращается на устройство. Известная длина линии сравнивается с измеренным временем прохождения отражённой волны.

В последних решениях по ОМП результаты одновременно регистрируются устройствами типов А, D и нового типа Е. В своей работе они используют волны тока. Метод типа D обычно является основным методом измерения, применяемым в устройствах ОМП. Методы А и Е добавляются к методу D, который в течение опытной эксплуатации зарекомендовал себя как надежный и точный.

5. ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ УСТРОЙСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ МЕСТ КЗ ПО ВОЛНОВОМУ ПРИНЦИПУ

Из-за характера волновых явлений стоит описать разнообразные ключевые элементы в измерительных устройствах волнового ОМП:

- трансформаторы тока и напряжения
- системы обработки цифровых сигналов
- навигационные спутниковые системы

Изначально для регистрации бегущих волн использовались трансформаторы напряжения; однако, из-за неудовлетворительных переходных характеристик этих трансформаторов, в основном, используются трансформаторы тока. Место повреждения определяется с использованием защитных трансформаторов тока, которые успешно передают сигналы с частотой до *100 кГц*. Наиболее распространенное решение - система, в которой в качестве основного трансформатора используется трансформатор тока, а трансформатор тока с разъемным сердечником используется в качестве переходного трансформатора.

Для устройств волнового ОМП требуются соответствующие системы, способные принимать и анализировать большой объем данных и различать поступающие на устройство соответствующие формы волн. Устройство ОМП волнового типа требует использования блока сбора данных с частотой дискретизации больше или равной *1 МГц*, что значительно выше, чем в обычных типах систем защиты. Чем выше частота дискретизации входного сигнала, тем точнее результат. С другой стороны, большое количество измерений за 1 период увеличивает нагрузку на процессор и требует большой объем памяти для хранения данных. Кроме того, существует серьезная проблема, связанная с помехами в измеренном сигнале.

Синхронизация времени устройств, устанавливаемых на обеих сторонах линии, осуществляется при помощи GPS. Погрешность синхронизации времени составляет 1 мкс , что соответствует погрешности при определении расстояния до места КЗ $\pm 150 \text{ м}$ для одного устройства. Европейская навигационная спутниковая система Галилео может уменьшить данный тип погрешности. GPS приемники имеют точность в несколько метров, в то время как систематическая погрешность Галилео составляет менее 1 метра (по данным на 2012 год).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование устройств ОМП в высоковольтных линиях позволяет с большей точностью определять места повреждений по сравнению с устройствами, работающими по импедансному методу. Опыт использования в различных странах показывает высокую точность волновых устройств ОМП при различных помехах (например, высокое переходное сопротивление) и при использовании разных типов линий (продольно-компенсированные, длинные линии, многоконтурные линии с кабельными участками).

СПИСОК СПРАВОЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gale P.F., Taylor P. V., Naidoo P. , Hitchin C., Clowes D., Travelling wave fault locator experience on Eskom's transmission network, Seventh International Conference on Developments in Power System Protection (IEE) April 2001, pp. 327–330.
2. Siemens: 7SA522 distance protection relay for transmission lines. Catalogue 2009.
3. Lee H., Mousa A.M., GPS travelling wave fault locator systems: investigation into the anomalous measurements related to lightning strikes, IEEE Transactions on Power Delivery, volume 11, issue 3, July 1996, pp. 1214–1223.
4. Christopoulos C., Wright A., Electrical Power System Protection, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1999.
5. Flisowski Z., Technika wysokich napięć, WNT, Warszawa 2005.
6. IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines, IEEE Std C37.114™-2004.
7. Samper J.M., Lagunilla J.M., Perez R.B., GPS and Galileo: Dual RF Front-end receiver and Design, Fabrication, And Test (Communication Engineering), McGraw-Hill Professional, 2008.
8. Gale B.Y. Su. P.F., Ge Y.Z., Fault location based on fault induced current tramients, International Conference on New Development in Power System Protection & Local Contral, Beijing China, May 25–28, 1994, pp. 377–381.
9. Redfern M.A., Terry S.C., Robinson F.V.P., The application of distribution system current transformers for high frequency transient based protection, Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection, volume 1, 5–8 2004, pp. 108–111.