

3. Pham D. A., Pham T. M., Borsi H., Gockenbach E. A New Method for Purposes of Failure Diagnostics and FRA Interpretation applicable to Power Transformers // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2013. – № 20 (6). – p. 2026–2034.
4. Lavrinovich V.A., Lavrinovich A.V., Mytnikov A.V. Development of Advanced Control State Technology of Transformer and Electric Motor Windings Based on Pulsed Method // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering. – 2012. - № 13. – pp. 149–153.
5. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V. Development of pulsed method for diagnostics of transformer windings based on short probe impulse // IEEE Trans. Dielectric Electrical Insulation. – 2015. - № 22 (4). – p. 2041–2045.
6. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V., Hongda Li. Advanced technology of transformer winding condition control based on nanosecond probing impulse // Resource-Efficient Technologies. – 2016. – № 2. –p. 111–117.

Advisor: A.V. Mytnikov, Ph.D. in technical sciences, electrical engineering area, Associate Professor, Electrical Energy Systems Department, Power Engineering Institute, Tomsk Polytechnic University.

ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ, ОСНОВАННОЙ НА РАСПОЗНАВАНИИ ВОЛНОВЫХ ПОРТРЕТОВ

А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, П.С. Пелевин
Нижегородский технический университет

Современные распределительные сети и системы электроснабжения характеризуются внедрением возобновляемых источников энергии (ВЭИ), виртуальных электростанций. Вероятностный режим работ ВЭИ, обусловленный нестабильностью энергоносителей, создает проблемы для устойчивой работы сети, для систем управления и автоматики и для релейной защиты (РЗ). Режим работы систем электроснабжения с ВЭИ постоянно меняется: изменяется конфигурация сети, изменяются потоки мощности по отдельно взятым ЛЭП, меняются токи КЗ и т.д. Все это приводит к усложнению схем защиты и автоматики, необходимости разработки и внедрения новых алгоритмов работы устройств защиты.

Можно выделить два подхода к решению данной проблемы.

Первым подходом является разработка гибких, адаптивных защит, подстраивающихся под изменяющийся режим работы сети. В данном направлении проводятся различные исследования, как за рубежом, так и в нашей стране и уже предложены различные методы. Например, предлагается использовать набор уставок для разных режимов работы и на основе работы алгоритма распознавания режимов выбирать тот или иной набор уставок. Еще можно использовать алгоритмы, в которых уставки будут непрерывно меняться в соответствии с определенными вероятностными закономерностями в зависимости от характера изменения параметров режима. [1]

Другим направлением развития является использование защит, принцип действия которых не зависит или слабо зависит от режима сети. К таким защитами можно отнести особый вид защит – волновые РЗ. Это защиты, принцип действия которых основан на оценке протекания волновых процессов при повреждениях.

Как известно КЗ сопровождается протеканием электромагнитного процесса, который можно разделить на две стадии резко разной продолжительности. Первая (короткая) стадия, которая нас и интересует, характеризуется распространением электромагнитных волн по электрической сети и носит название – волновой процесс. [2]

В момент КЗ происходит перераспределение волн, в результате чего от места КЗ начинает распространяться «новая» отраженная волна. Поэтому для удобства место КЗ можно рассматривать как источник волн. При распространении волны по эл. сети в точке, до которой волна доходит в данный момент времени, ток и напряжение резко (почти скачком) меняются, в результате чего в данный момент времени в сигнале появляются высокочастотные составляющие, которые, при отсечении низких и средних частот, при наложении имеют форму импульсов. Поэтому, применяя фильтр высоких частот или полосовой фильтр с достаточно широкой полосой пропускания, можно выделять т.н. переходные волновые составляющие, время появления которых соответствуют времени прибытия волны к месту наблюдения, а амплитуда – величине фронта волны. По соотношению волновых составляющих тока и напряжения можно судить о направлении распространения волны. [3]

Обычно действие релейной защиты и автоматики основывается на оценке параметров электромагнитного процесса, однако существенно увеличить быстродействие и достичь в конечном счете теоретического предела (время распространения волны по линии) можно лишь используя волновую РЗ. Также такая защита будет существенно меньше зависеть от параметров предшествующего режима и конфигурации сети.

Один из самых простых (с точки зрения сложности алгоритма действия) методов реализации волновой РЗ – это определение направления движения волны по двум концам линии, сравнивая полярности первых переходных волновых составляющих (первой волны) напряжения и тока, и обмен результатом сравнения между устройствами по концам линии с помощью канала связи. Этот принцип очень похож с классическими направленными высокочастотными защитами, выигрыш по времени здесь заключается в более быстром срабатывании релейной части защиты (ПО, ОНМ). Подобного рода подходы (основанные на двусторонних замерах) к выполнению защиты имеют как минимум один существенный недостаток – дороговизна реализации, поскольку необходимо не менее двух устройств (полукомплектов), а также надежный канал связи. [4]

В связи с этим очень перспективными являются методы, основанные на одностороннем замере, поскольку, используя в качестве объектов оценки защитой параметры волнового процесса принципиально возможно построение односторонней защиты с абсолютной селективностью или почти абсолютной селективностью (зона защиты 99,9% линии, например, для отстройки от КЗ на шинах

смежной ПС). В зависимости от того, на какой линии или на каком участке линии (например, воздушный участок кабельно-воздушной линии) произошло КЗ, волны по-разному распространяются по электрической сети, отражаясь и проходя через места резкой неоднородности (шины ПС, кабельно-воздушный переход, отпайка, КЗ и т.д.). Таким образом, волновые переходные составляющие, замеренные в определенной точке сети, за определенный промежуток времени формируют уникальный волновой портрет для данного места (участка) повреждения и точки измерения. В качестве примера на рисунке 1 приведены лестничная диаграмма распространения волн по ЛЭП, а также волновые портреты для переходных составляющих напряжения, замеренные на двух ПС (А и В) при КЗ на кабельном участке кабельно-воздушной ЛЭП.

Один из предлагаемых подходов к оценке волновых портретов основан на использовании корреляционных функций. Корреляционные функции используют для характеристики случайных процессов в качестве меры взаимной связи двух случайных функций, при этом различают автокорреляционную и взаимную корреляционную (кросскорреляционную) функции. [2]

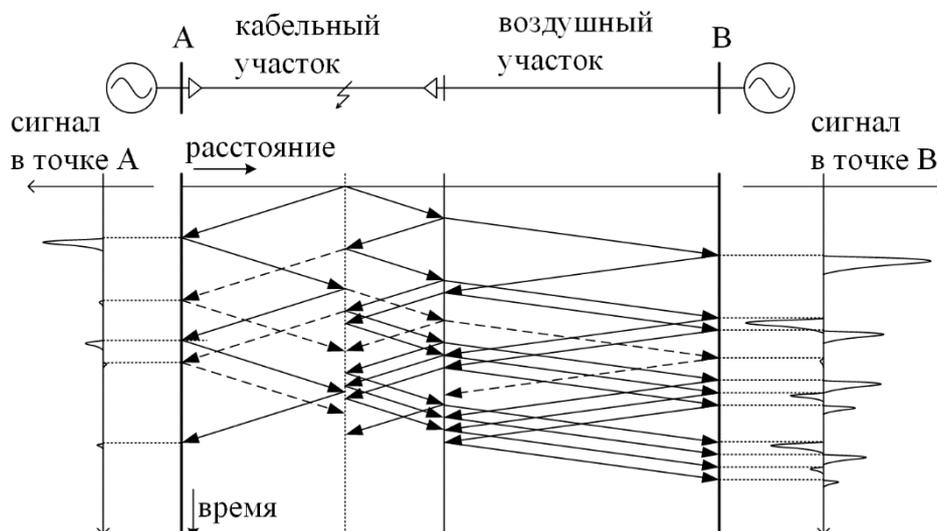


Рис. 1. Лестничная диаграмма и волновые портреты, замеренные на ПС А и В при КЗ на кабельном участке кабельно-воздушной ЛЭП

Для дискретных функций (сигналов) кросскорреляционную (R_{xy}) функцию определяют в соответствии с уравнением (1). Автокорреляционная функция (R_{xx}) получается, если в уравнение (1) вместо сигнала (y) использовать тот же сигнал (x). [5]

$$R_{xy}(n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} [x(k) \cdot y(n+k)] \quad (1)$$

Используя кросскорреляционную функцию двух сигналов можно установить степень их соответствия или «похожести». В качестве примера на рисунке 2 (а) изображены три дискретных сигнала x , $y1$, $y2$, определим с помощью кросскорреляционной функции, какой из сигналов наиболее похож на сигнал x . Для этого вычислим корреляционные функции R_{xx} , R_{xy1} , R_{xy2} (рис. 2(б)).

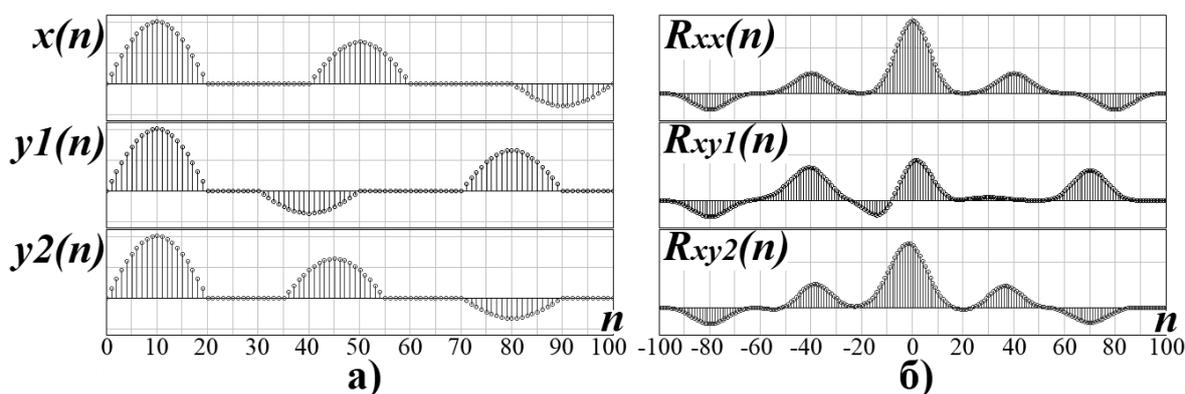


Рис. 2. Сравнимые сигналы (а) и корреляционные функции (б)

Как видно из рисунка 2(б), наибольшее значение максимума имеет корреляционная функция R_{xx} , чуть меньшее значение – R_{xy2} , а наименьшее значение – R_{xy1} . Результаты данных вычислений говорят следующее: наиболее похожим на сигнал (x) является сам сигнал (x) (что и следовало ожидать), из сигналов ($y1$) и ($y2$) наиболее похожим на сигнал (x) является ($y2$), что подтверждается зрительной оценкой.

Таким образом, на основе использования корреляционных функций можно построить алгоритм оценки волновых портретов, причем в качестве сравниваемого сигнала будет выступать «замеренный» волновой портрет, который будет сравниваться определенным образом с «эталонными» волновыми портретами, полученными ранее путем моделирования на ЭВМ.

Оцениваемый волновой портрет возможно получить путем цифровой фильтрации как сигнала напряжения, так и сигнала тока, снятого с вторичных цепей трансформаторов тока (в случае использования сигнала тока), трансформаторов напряжения (в случае использования сигнала напряжения) или ВЧ присоединения ЛЭП (фильтр присоединения, конденсатор отбора напряжения). Причем возможно использование комбинированного сигнала для выделения падающих или отраженных волн. Также вместо фазных величин возможно использовать модальные составляющие, выделив определенным образом, например, первую модальную составляющую возможно сократить количество измерительных систем до одной. Модальные составляющие являются аналогом симметричных составляющих, используемых в теории электромагнитных процессов. [6]

Предлагаемые подходы по распознаванию волновых портретов, используя математический аппарат корреляционных функций, имеет хорошие перспективы в связи с развитием средств вычислительной техники и комплексов имитационного моделирования для энергетики и могут найти широкое применение не только для задач волновой релейной защиты, но и для задач волнового определения мест повреждения, автоматического повторного включения кабельно-воздушных линий электропередачи и др. [7]

ЛИТЕРАТУРА:

1. Sakis Meliopoulos A.P. and oth. Smart Grid Technologies for Autonomous Operation and Control. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 2, No. 1, 2011.-p. 1-10.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. – 10-е изд. - М.: Гардарики, 2002. - 638 с.
3. Johns A.T., Salman. S.K. Digital protection for power systems. // Peter Pergrinus Ltd., on behalf of the Institution of Electrical Engineers, London, UK, 1995.- 203 p.
4. Лачугин В.Ф. Релейная защита объектов электроэнергетических систем, основанная на использовании волновых методов: Диссертация, д.т.н., Москва, 2015. - 437 с.
5. Оппенгейм А., Шафер. Р. Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ./ под ред. Ненашева А.С.- М.: Техно-сфера, 2006. - 856 с.
6. Микуцкий Г.В., Скитальцев В.С. Высокочастотная связь по линиям электропередачи: Учебник для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. - 448 с.
7. Моделирование волновых процессов на линиях электропередачи для повышения точности определения места повреждения / А.Л. Куликов, В.Ф. Лачугин, В.В. Ананьев, В.Ю. Вуколов, П.С. Платонов // Электрические станции. - 2015. - №7. - С.45-53.

Научный руководитель: А.Л. Куликов, д.т.н., профессор кафедры ЭССЭ ИНЭЛ НГТУ.

ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДЕТЕРМИНАЦИИ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ ОСЦИЛЛОГРАММ ОТКЛИКА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ МЕТОДОМ НАНОСЕКУНДНЫХ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Б.Л. Ковригин¹, А.В. Лавринович²
Томский политехнический университет¹
ЭНИН, ЭЭС
ТОМСКНИПИНЕФТЬ²

Введение

Для того чтобы своевременно принять необходимые меры по предотвращению межвитковых замыканий и неконтролируемому выводу трансформатора из строя, крайне важно фиксировать изменения положения витков на раннем этапе. До настоящего времени не решена задача обнаружения таких изменений в обмотках трансформатора на стадии их зарождения. Известен метод наносекундных низковольтных импульсов (ННВИ), который считается наиболее чувствительным и перспективным методом обнаружения механического смещения витков [1–3]. Схема диагностики по методу ННВИ приведена на рисунке 1. Ос-