

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОВРЕЖДЕНИЯХ ЛЭП СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

А.Н. ПОДШИВАЛИН, Г.Н. ИСМУКОВ, М.В. МИХАЙЛОВ, А.Ю. ЧЕРНОВ

Россия, г. Чебоксары,

ООО «Релематика»,

e-mail: ismukov_gn@relematika.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Электромагнитная волна, волновое определение места повреждения, линия электропередачи, пробой электрической изоляции

ВВЕДЕНИЕ

В сети 330 кВ удалось пронаблюдать два интересных почти идентичных случая повреждения изоляции трансформатора тока (ТТ): множественные самовосстанавливающиеся пробои, приведшие к устойчивому короткому замыканию (КЗ). Процесс повреждения записан на высокочастотные (ВЧ) осциллограммы устройствами волнового определения места повреждения (ВОМП) [1], поврежденный ТТ находился на одной из подстанций (ПС) на границе зоны полуккомплектов ВОМП. На осциллограммах с длительностью предаварийного режима 200 мс и частотой дискретизации 1 МГц в первом случае перед КЗ зафиксировано 25 пробоев, во втором – 27 пробоев. Каждый пробой создавал коммутацию, электромагнитная волна сначала наблюдалась со стороны поврежденного ТТ на ПС А, а после пробега по контролируемой линии электропередачи (ЛЭП) – на удаленном конце на ПС Б. Множество пробоев позволили накопить и проанализировать статистику времен пробега волны и сопоставить с паспортной длиной ЛЭП $L=53,8$ км.

АНАЛИЗ ВОЛН В ЛЭП

На рис. 1 совмещены фрагменты ВЧ осциллограмм устройств ВОМП на ПС А и Б с погрешностью не более 1 мкс благодаря синхронизации полуккомплектов с глобальным астрономическим временем. В режиме, предшествующем короткому замыканию, наблюдается множество высокочастотных переходных процессов, которые полностью ускользнули от низкочастотного осциллографа традиционной защиты по основной гармонике. Анализировались пробои в течение 150 мс перед КЗ, каждый пробой создавал интенсивное возмущение длительностью около 20 мкс с полным затуханием через 120-150 мкс. Время между пробоями составляло несколько миллисекунд, что на порядок больше времени пробега волны по линии, поэтому волна от каждого пробоя отчетливо прослеживается на двух ПС. Каждому фронту волны на ПС А поставлен в соответствие фронт волны на ПС Б. Определено время t_b пробега волны по первому модальному каналу ЛЭП разными методами. В таблице 1 представлены средние величины t_b . Разброс величин, оценивался по среднеквадратическому отклонению (СКО), которое составило до 1,2 мкс. Значительный разброс объясняется малой амплитудой соответствующих сигналов и трудностью определения истинного фронта, особенно на стороне ПС Б. Времена t_b для КЗ №1 и №2 оказались очень близки, отличие средних не превышает 0,3 мкс.

На ВЧ осциллограмме КЗ №1 удалось зафиксировать также вторичные волны: на ПС Б после первой волны во всех случаях приходила вторая волна через время, близкое к $2t_b$. Нет достоверных сведений, является ли эта волна переотраженной именно в контролируемой линии, однако это наиболее вероятно, учитывая соответствие ее длине.

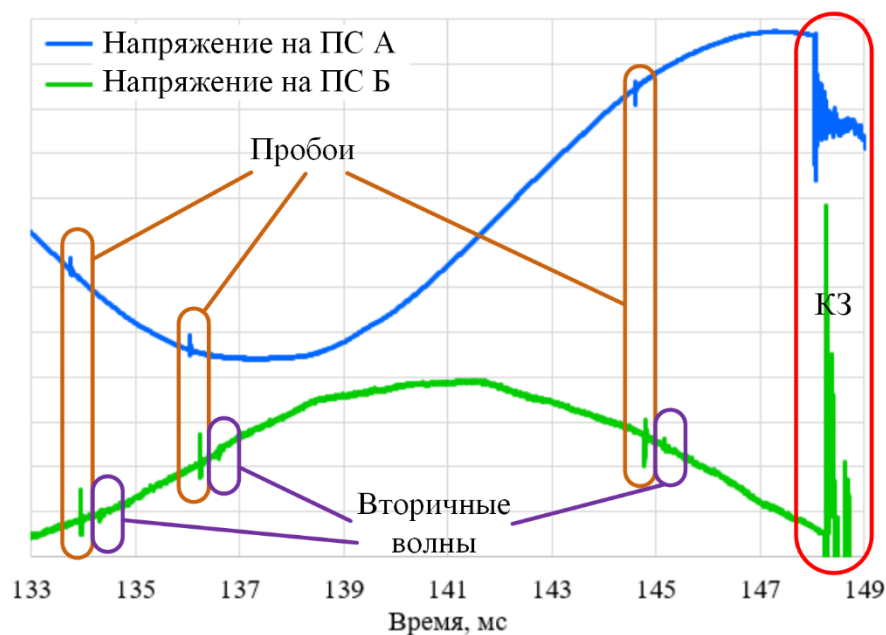


Рис. 1. Совмещенная высокочастотная осциллограмма

Скорость распространения волны v_1 по первому модальному каналу линии может быть упрощенно оценена по формуле:

$$v_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}},$$

где L_1 – удельная индуктивность первого модального канала, Гн/км;

C_1 – удельная емкость первого модального канала, См/км

Для контролируемой линии $L_1 = 1,019 \cdot 10^{-3}$ Гн/км, $C_1 = 1,114 \cdot 10^{-8}$ Ф/км, в таком случае $v_1 = 296804$ км/с. Расчетная длина линии \hat{L} :

$$\hat{L} = \bar{t}_v v_1.$$

Оценки \hat{L} для двух КЗ представлены в таблице 1. «Электрическая» длина \hat{L} ожидаемо больше паспортной L из-за провеса проводов и неучтенной длины от последней порталной опоры на открытом распределительном устройстве до точки подключения измерительного преобразователя (ИП), по первым волнам удлинение составило 0,46-0,56 км. Длины измерительных цепей на ПС А и ПС Б одинаковы, поэтому не влияют на оценку. В устройствах двустороннего ВОМП следует компенсировать это удлинение и предоставлять пользователю топографическую длину. Для переотраженной волны добавилась погрешность выявления сильно ослабленного второго фронта, поэтому результат больше отличается от паспортной длины, СКО также больше.

Интересно оценить затухание волны α в линии, однако сложно сделать это непосредственно из-за разных типов ИП: электромагнитные трансформаторы напряжения (ТН) на ПС А и высокочастотные датчики, включенные в цепь заземления емкостных ТН на ПС Б. Также следует учитывать, что на шинах каждой подстанции наблюдается уже преломленная с коэффициентом K_{Π} волна [2], а K_{Π} зависит от схемы прилегающей сети. Если не учитывать сосредоточенную нагрузку, то K_{Π} в течение небольшого интервала времени можно рассматривать как постоянную величину, не зависящую от времени (в нашем случае длительность пробоя много меньше времени пробега волны по контролируемой и смежным линиям). Известно, что к ПС Б подключены всего 4 линии 330 кВ, включая контролируемую. Принимая равными волновые сопротивления всех линий, получаем $K_{\Pi} = 1/2$, то есть ослабление волны напряжения составляет до двух раз при включении всех четырех ЛЭП, при отключении линии K_{Π} возрастает вплоть до

единицы. На ПС А всего две линии 330 кВ включая контролируемую, поэтому ослабление не происходит.

Учитывая сложность оценки величины затухания, можно оценить ослабление волны на входах устройства ВОМП α' :

$$\alpha' = U_{\text{ПСБ}} / U_{\text{ПСА}},$$

где $U_{\text{ПСА}}, U_{\text{ПСБ}}$ – амплитуды измеренных во вторичных цепях волн в поврежденной фазе на ПС А и Б соответственно, В.

Результаты расчета усредненного значения $\bar{\alpha}'$ и СКО α' приведены в таблице 1. СКО α' относительно невелики, что говорит об изменении ослабления волн в небольшом диапазоне в пределах интервала наблюдения пробоев 150 мс. При втором КЗ среднее ослабление увеличилось на 21%. Схема измерений не менялась, значит, увеличилось физическое ослабление сигнала в ЛЭП из-за смены погодных условий или изменения $K_{\text{п}}$. Это явление необходимо учитывать при проектировании волновых защит ЛЭП. Любопытно, что в технике ВЧ связи волна «запирается» в линии благодаря ВЧ заградителям и влияние схемы прилегающей сети отсутствует.

Таблица 1. Показатели пробега волны по линии

Параметр	Первая волна при КЗ №1	Первая волна при КЗ №2	Переотраженная волна при КЗ №1
\bar{t}_B , мкс	183,14	182,83	186,47
СКО t_B , мкс	1,20	0,94	3,77
\hat{L} , км	54,36	54,26	55,34
СКО \hat{L} , мкс	0,35	0,28	1,12
$\bar{\alpha}'$, о.е.	$5,24 \cdot 10^{-3}$	$6,36 \cdot 10^{-3}$	-
СКО α' , о.е.	$1,64 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пробой изоляции электрической сети высокого напряжения имеют случайный характер и обуславливают возникновение электромагнитных волн. Волны распространяются в электрической сети и несут достаточно информации для определения местоположения их источника. Статистика пробоев показывает стабильность времен пробега волны по ЛЭП. При анализе таких процессов следует учитывать небольшое отличие «электрической» длины линии от паспортной. В волновой РЗА также можно использовать тот факт, что затухание волны по линии может быть стабильным в течение малого промежутка времени, но в процессе эксплуатации при изменении оперативной схемы ПС и изменении погодных условий может меняться.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Dommel H.W., Michels J.M. High speed relaying using travelling wave transient analysis // IEEE Power Eng. Soc. Winter Meet. New York. 1978. P. 1-7.
2. Исмуков Г.Н., Подшивалин А.Н. Волновая имитационная модель электрической сети с использованием операторного метода // Электрические станции. 2018. №1. С. 36–39.