

Определение места повреждения в неоднородной линии электропередачи постоянного тока

- **Иванова Е. А.¹**, ОАО “Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения” (НИИПТ), Санкт-Петербург

Приведён анализ существующих методов и устройств определения места повреждения (ОМП) в линиях постоянного тока. Предложен алгоритм ОМП неоднородной линии постоянного тока на базе спектрального метода. Данный алгоритм может успешно применяться и для определения места замыкания в однородной линии как в частном случае неоднородной линии постоянного тока. Приведены результаты расчёта расстояния до места повреждения в зависимости от затухания колебательного процесса.

Ключевые слова: линия постоянного тока, спектральный метод, определение места повреждения, неоднородная линия, разрядные колебания.

Устройства определения места повреждения (ОМП) на линиях электропередачи постоянного тока (ПТ) играют особенно важную роль в сокращении суммарного времени отыскания и устранения повреждений.

На сегодняшний день известны зарубежные методы [1 – 4] ОМП в однородных линиях постоянного тока. В [5] предложено решение задачи ОМП в неоднородной кабельно-воздушной линии ПТ, участки которой имеют неодинаковые погонные параметры и располагаются несимметрично относительно выпрямительной и инверторной подстанций.

В статье предложен способ ОМП в неоднородной линии ПТ, основанный на спектральном методе, разработанном в ОАО “НИИПТ” более 20 лет назад [6]. Макет устройства, основанного на этом методе, проходил испытания на передаче постоянного тока (ППТ) Волгоград – Донбасс (длина линии ПТ 473 км) [7].

Для определения места повреждения используется информация об аварийных составляющих процесса, полученных с установленных по концам линии ПТ измерительных трансформаторов, без применения дополнительного оборудования.

Применяемые в ППТ дистанционные методы ОМП делятся на пассивные, основанные на регистрации напряжений и токов на подстанциях, и активные – локационные. К пассивным методам относятся и волновые методы, использующие фиксацию времени пробега по линии электромагнитных волн, возникающих в месте повреждения. Волновые методы ОМП для ППТ требуют высокой частоты дискретизации сигнала для фиксации фронтов волн с наносекундной точностью. Также среди недостатков методов ОМП по принципу бегущих волн отмечают проблемы распознавания

отражённых от точки замыкания волн и волн, отражённых от удалённого конца ВЛ.

Тем не менее в настоящее время на ППТ в основном используется волновой метод [1, 2], поскольку удалось решить проблему выделения фронтов импульсов, возникающих при КЗ (короткое замыкание) [8], и их синхронизации с помощью GPS-приёмников.

Сущность этого метода для однородной линии ППТ поясняется на рис. 1 диаграммой прохода по линии падающих, отражённых и преломлённых в месте КЗ волн.

Как видно из диаграммы рис. 1, возникающие при КЗ волны напряжения, распространяющиеся в обе стороны по проводам (со скоростью $V = \frac{1}{\sqrt{LC}}$,

где L и C – индуктивность и ёмкость на единицу длины линии), достигают ближайших конечных подстанций, отражаются и, достигая места КЗ,

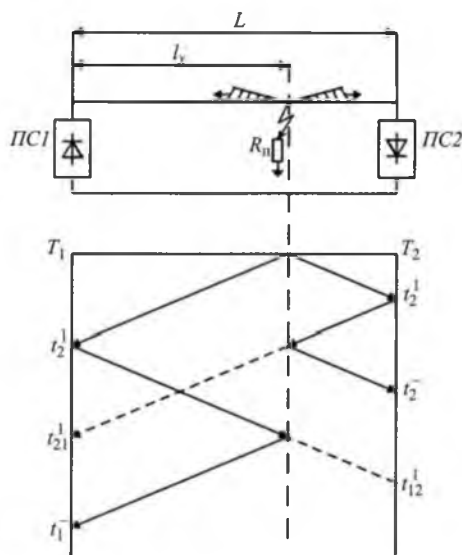


Рис. 1. Временная диаграмма волновых процессов в линии ППТ

¹ Иванова Елена Алексеевна: ivanova_e@niipt.ru

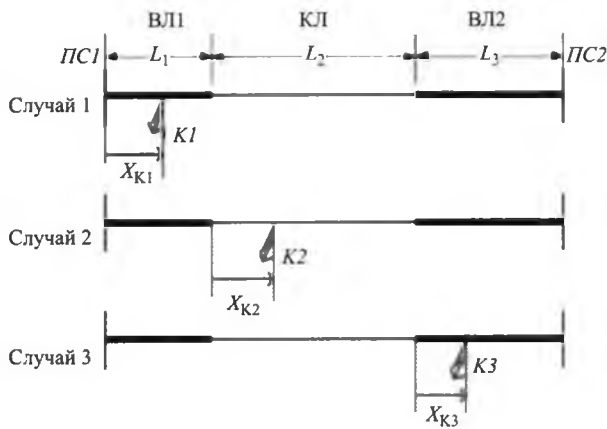


Рис. 2. Возможные варианты КЗ на линии постоянного тока в схеме ППТ, состоящей из двух воздушных и одного кабельного участков

вновь отражаются и возвращаются. Преломлённые части волн приходят на противоположные подстанции. При достаточно чёткой фиксации фронтов волн на подстанциях ПС1 и ПС2 искомое расстояние до места КЗ

$$l_x = \frac{l_2 - (t_2^1 - t_1^1)U}{2}, \quad (1)$$

где l_2 – полная длина ВЛ ППТ.

В [5] впервые предложен метод ОМП, основанный на теории бегущих волн, для неоднородной линии ППТ, состоящей из кабельных и воздушных участков. Возможные варианты КЗ на такой линии из двух воздушных и одного кабельного участков поясняются на рис. 2.

В качестве входных сигналов, на основе которых определяется точное время прихода на ПС1 и ПС2 волн, отражённых от места КЗ, могут рассматриваться как полюсное напряжение на входе линии ПТ, так и ток через конденсатор высокочастотной связи, присоединённый к концу линии ПТ.

Практическое применение такого метода ОМП требует установки на каждом конце линии постоянного тока дополнительного оборудования (дифференцирующих трансформаторов, позволяющих зафиксировать точное время прихода волны от места КЗ).

Разработка алгоритма ОМП для неоднородной линии ПТ на базе спектрального метода. При возникновении КЗ на линии постоянного тока напряжение повреждённого полюса резко снижается и линия начинает разряжаться через место КЗ. В однородной линии постоянного тока такие разрядные колебания могут быть смоделированы колебаниями в контуре, состоящем из параллельно включённых ёмкости C_x и индуктивности L_x короткозамкнутого участка линии с учётом активного сопротивления этого участка и переходного сопротивления в месте КЗ.

Частота затухающих колебаний при переходном процессе, возникающем при КЗ на линии, зависит

от L_x и C_x короткозамкнутого контура, которые в свою очередь зависят от длины этого участка:

$$L_x = \frac{2}{\pi} L_{0x} l_x; \quad (2)$$

$$C_x = \frac{2}{\pi} C_{0x} l_x,$$

где L_{0x} , C_{0x} – индуктивность и ёмкость на единицу длины однородного участка линии постоянного тока в контуре “провод – земля”; l_x – искомая длина короткозамкнутого участка.

В формулах (2) суммарные ёмкость и индуктивность эквивалентного контура рис. 3 уменьшены в $2/\pi$ раза с целью обеспечения равенства частоты колебаний при замене реальной линии с распределёнными параметрами схемой замещения с сосредоточенными параметрами [6].

Для определения расстояния до места повреждения в неоднородной кабельно-воздушной линии ПТ необходимо учитывать неповреждённый однородный участок линии, промежуточный между подстанцией и участком линии с другими погонными параметрами, на котором произошло КЗ.

В этом случае неповреждённый однородный участок линии постоянного тока может быть замещён эквивалентным сопротивлением $Z_{эКВ}$

$$Z_{эКВ}(P) = Z_c(P) \operatorname{cth}(\gamma l), \quad (3)$$

где $Z_c(P)$ – операторное выражение волнового сопротивления неповреждённого однородного участка линии; l – длина неповреждённого однородного участка линии; γ – коэффициент распространения волны в однородном неповреждённом участке линии.

Для нахождения расстояния до места замыкания в неоднородной линии ПТ на основе операторного метода определяется проводимость короткозамкнутого контура рис. 3 относительно точек подключения вольтметра V , фиксирующего напряжение повреждённого полюса. При этом в контуре рис. 3 учитывается эквивалентное сопротивление, выраженное уравнением (3), неповреждённого однородного участка линии ПТ.

В полученное выражение для проводимости входят в том числе частота переходного процесса в короткозамкнутом контуре, погонные параметры однородного участка линии и искомое расстояние до места повреждения. При выполнении условия резонанса в контуре из параллельно включённых ёмкости и индуктивности эквивалентное сопротивление контура оказывается бесконечно большим. Это соответствует нулевому значению проводимости. Приравняв нулю числитель найденного выражения для проводимости, получаем квадратное уравнение относительно длины короткозамкнутого участка l_x , которая определяется как

вещественная часть корня полученного квадратного уравнения (в километрах)

$$l_{\text{вы}} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (4)$$

где a, b, c – комплексные коэффициенты;

$$a = \frac{2}{\pi} C_0 P \left(R_0 + \frac{2}{\pi} L_0 P \right) [Z_{\text{экв}}(P) Y'(P) + Y''(P)];$$

$$b = \frac{2}{\pi} [Y'(P) \left(R_0 + PL_0 + Z_{\text{экв}} R_{\text{П}} C_0 + R_{\text{П}} \frac{\pi}{2} \right) + Y''(P) R_{\text{П}} PC_0];$$

$$c = Y''(P) + Y'(P)(Z_{\text{экв}} + R_{\text{П}});$$

$P = -\alpha_0 + j \cdot 2\pi f_0$ – оператор; f_0 – частота с наибольшей амплитудой переходного процесса, выделенная из спектральной характеристики информативной части аварийной составляющей напряжения повреждённого полюса ППТ, соответствующая колебательному процессу разряда линии через место повреждения;

$$Y'(P) = Y_{\phi}(P) + Y_{\text{п}}(P);$$

$$Y''(P) = PL'_p [Y_{\phi}(P) + Y_{\text{п}}(P)] + I;$$

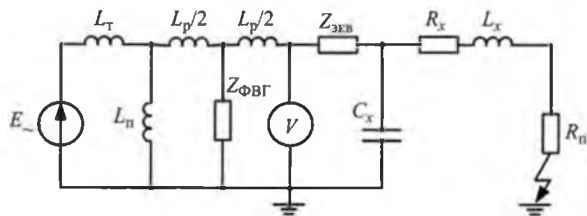


Рис. 3. Схема моделирования повреждённого полюса неоднородной электропередачи ПТ:

E_{\sim} – ЭДС на шинах переменного тока; L_T – индуктивность преобразовательного трансформатора; $L_{\text{п}}$ – индуктивность преобразователя; L_p – индуктивность реактора; $Z_{\text{ФВГ}}$ – эквивалентное сопротивление фильтра высших гармоник; C_x, R_x, L_x – ёмкость, сопротивление, индуктивность повреждённого участка линии; $R_{\text{п}}$ – переходное сопротивление в месте КЗ

$Y_{\phi}(P)$ – операторное выражение проводимости фильтра высших гармоник (ФВГ) на стороне постоянного тока; $Y_{\text{п}}(P)$ – операторное выражение проводимости преобразователя постоянного тока, учитывающее индуктивность части реактора, включённой между преобразователем и ФВГ постоянного тока, и эквивалентную индуктивность преобразовательных трансформаторов; $L'_p = \frac{L_p}{2}$ – индуктивность части реактора, включённой между ФВГ на стороне постоянного тока и линией ПТ; L_p – полная индуктивность сглаживающего реак-

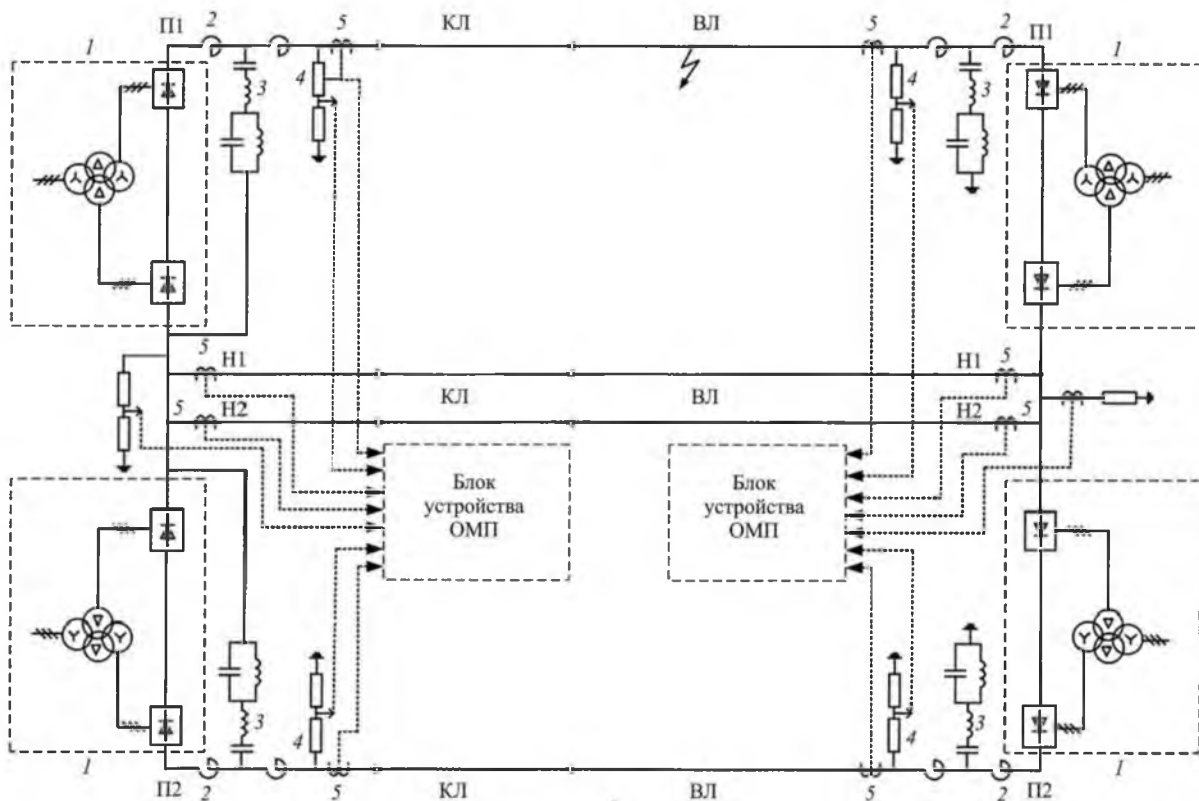


Рис. 4. Схема подключения устройства ОМП к измерительным устройствам ППТ:

1 – преобразователь с трансформаторами; 2 – разделённый на две части линейный реактор; 3 – фильтр высших гармоник; 4 – датчик напряжения; 5 – датчики тока; КЛ, ВЛ – кабельный и воздушный участки линии ПП

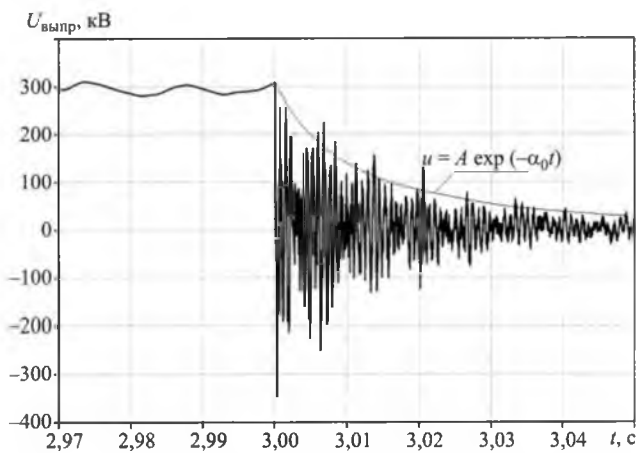


Рис. 5. Осциллограмма напряжения на поврежденном полюсе линии со стороны выпрямителя при КЗ на кабельном участке

тора; $v_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$ – скорость электромагнитной

волны в контуре “провод – земля” на частоте f_0 ; L_0, C_0, R_0 – индуктивность, ёмкость, сопротивление на единицу длины однородного участка линии в контуре “провод – земля” на частоте f_0 ; L_{Π} – индуктивность цепи преобразователя; α_0 – затухание колебательного процесса разряда линии.

Для определения затухания предлагается прологарифмировать функцию, соответствующую кривой аварийного напряжения. Поскольку затухание сигнала носит экспоненциальный характер, после логарифмирования получаем линейно убывающую функцию от времени вида:

$$u = A \exp(-\alpha t). \quad (5)$$

Угловым коэффициентом найденной функции, вычисленный, например, методом наименьших квадратов [9], представляет собой искомый коэффициент затухания.

Таблица 1

Результаты определения места повреждения

Параметр	Повреждение на			
	ВЛ	ВЛ	КЛ	КЛ
Расстояние до места повреждения для однородной линии, км:				
реальное	24,4	9,1	5,8	17,57
найденное	24,21	8,85	5,93	17,41
Погрешность $\delta, \%$	0,28	0,37	0,32	0,39
Расстояние до места повреждения для неоднородной линии, км:				
реальное	42,6	57,9	35,3	23,43
найденное	42,1	58,2	35,7	23,191
Погрешность $\delta, \%$	0,75	0,45	0,98	0,58

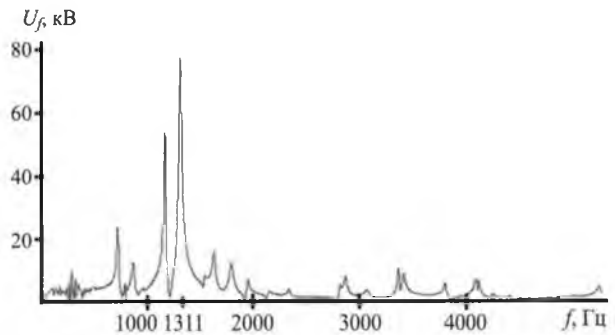


Рис. 6. Спектральная характеристика информативной части кривой напряжения (на интервале 0,04 с от момента возникновения КЗ) на поврежденном полюсе линии со стороны выпрямителя при КЗ на кабельном участке

При определении расстояния до точки КЗ в частном случае однородной линии ПТ $Z_{\text{экв}}$ в коэффициентах a, b, c по выражению (4) принимается равной нулю.

На рис. 4 представлена схема подключения устройства ОМП на базе разработанного алгоритма к измерительным устройствам ППТ, состоящей из кабельного и воздушного участков линии ПТ и содержащей фильтры высших гармонических составляющих.

Предлагаемый способ ОМП прошёл проверку на цифровой модели кабельно-воздушной линии электропередачи постоянного тока длиной 108 км (41 км – кабельный участок, 67 км – воздушный участок) напряжением ± 300 кВ и мощностью 1000 МВт.

Модель линии ПТ представлена в программном комплексе для расчёта электромагнитных переходных процессов АТР-ЕМТР 36-ю ячейками (14 ячеек – кабельный участок, 22 – воздушный) и снабжена двухчастотным фильтром, настроенным на 12 и 24-ю гармоники, включённым в среднюю точку реактора. Эквивалентная индуктивность преобразователя на стороне выпрямителя $L_{\text{Пвыпр}} = 0,353$ Гн, на стороне инвертора $L_{\text{Пинв}} = 0,203$ Гн.

При КЗ на кабельном участке на расстоянии 17,57 км от выпрямительной подстанции получена кривая напряжения на поврежденном полюсе линии со стороны выпрямителя, изображённая на рис. 5. Для информативной части аварийного напряжения, рассматриваемой на интервале 0,04 с от момента возникновения КЗ, определяется спектральная характеристика (рис. 6). Она имеет максимум на частоте $f_0 = 1311$ Гц. Для кривой аварийного напряжения рис. 5 затухание $\alpha_0 = -287,7$ 1/с.

Подставив в выражение (4) $P = -287,7 + j1311$, получим $l_x = 17,4 - j0,98$. Вещественная часть уравнения (4) определяет искомую длину короткозамкнутого участка линии, которая в рассмотренном случае равняется 17,57 км, погрешность этого способа ОМП составила 0,4% длины кабельного участка линии.

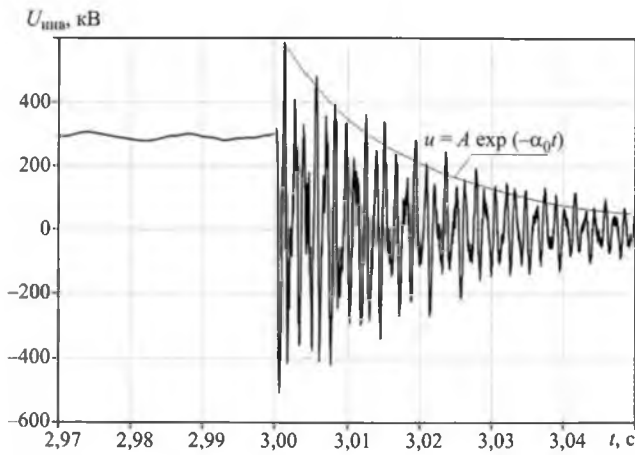


Рис. 7. Осциллограмма напряжения на повреждённом полюсе линии со стороны инвертора при КЗ на кабельном участке

Для этого же случая КЗ по кривой напряжения на повреждённом полюсе линии со стороны инвертора (рис. 7) для информативной части аварийного напряжения на интервале 0,04 с от момента возникновения КЗ определяется спектральная характеристика (рис. 8), имеющая максимум на частоте $f_0 = 720$ Гц. Затухание α_0 для кривой аварийного напряжения на рис. 7 составило -202 1/с.

Подставив в выражение (4) $P = -202 + j720$, получим $l_x = 90,191 - j1,06$. Искомая длина короткозамкнутого кабельного участка линии определяется из вещественной части уравнения (4) как $90,191 - 67 = 23,191$ км. В рассмотренном на модели случае длина короткозамкнутого участка кабельной части линии ПТ равна $41 - 17,57 = 23,43$ км от места стыка кабельного и воздушного участков. Погрешность этого способа составляет 0,58% длины кабельного участка линии.

Таблица 2

Результаты определения места повреждения при двух значениях затухания

Параметр	Повреждение на			
	ВЛ	ВЛ	КЛ	КЛ
Исходное α_0 , 1/с	-323	-297	-211	-238
Расстояние до места повреждения при $\alpha = \alpha_0$, км:				
реальное	24,4	9,1	5,8	17,57
найденное	24,211	8,846	5,928	17,41
Погрешность δ , %	0,28	0,37	0,32	0,39
Затухание $\alpha = 2\alpha_0$, 1/с	-646	-594	-422	-576
Расстояние до места повреждения при $\alpha = 2\alpha_0$, км:				
реальное	24,4	9,1	5,8	17,57
найденное	24,097	8,836	5,926	17,34
Погрешность δ , %	0,4	0,39	0,3	0,56

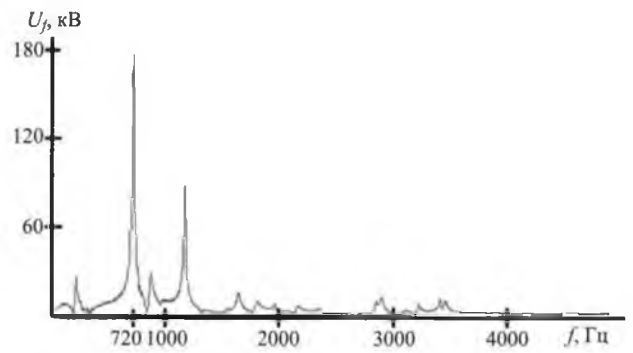


Рис. 8. Спектральная характеристика информативной части кривой напряжения (на интервале 0,04 с от момента возникновения КЗ) на повреждённом полюсе линии со стороны инвертора при КЗ на кабельном участке

Результаты определения расстояния до места замыкания в модели кабельно-воздушной линии ПТ приведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 видно, что результат ОМП для однородной линии имеет более высокую точность, чем для неоднородной. В том случае, когда линия ПТ состоит из двух неоднородных участков, для определения расстояния до места замыкания рекомендуется использовать алгоритм ОМП для однородной линии ПТ. В данном алгоритме анализируется информация, полученная с устройства ОМП, расположенного на конце повреждённого однородного участка линии ПТ (рис. 4).

Для оценки влияния затухания (α , следовательно, и сопротивления R_n) в табл. 2 приведены результаты расчёта расстояния до места повреждения в линии ПТ при исходном и увеличенном вдвое значениях α_0 .

Как видно из данных табл. 2, в приведённых примерах увеличение значения α_0 в 2 раза приводит к незначительному (до 200 м) снижению расчётного расстояния до места КЗ и изменению

погрешности предлагаемого метода ОМП на 0,2 – 0,17%.

Выводы

1. Наиболее точными среди способов ОМП в линии ПТ являются волновые методы ОМП, обеспечивающие погрешность на уровне 0,2 – 0,6% длины линии. Однако при их использовании требуется установка дополнительного сложного в исполнении оборудования, обеспечивающего выявление моментов прихода волн на подстанцию после аварии на линии с точностью до сотен наносекунд, а также весьма быстродействующих аналого-цифровых преобразователей с дискретностью менее 1 мкс.

2. Предложенный алгоритм ОМП на неоднородных линиях ПТ на базе спектрального способа рекомендуется применять для определения расстояния до места КЗ в линиях, состоящих из трёх и более неоднородных участков. Точность такого метода составляет до 0,9% длины однородного короткозамкнутого участка линии с учётом реальных погрешностей измерительных систем.

3. В линиях ПТ, состоящих из двух неоднородных участков, рекомендуется применять алгоритм ОМП на однородных линиях ПТ на базе спектрального способа. При этом в данном алгоритме используется информация, полученная с устройства ОМП, расположенного на конце повреждённого однородного участка линии ПТ. Точность такого алгоритма составляет до 0,4 – 0,5% длины однородного короткозамкнутого участка линии с учётом реальных погрешностей измерительных систем.

4. Точность предложенного алгоритма ОМП на неоднородной линии ПТ слабо зависит от величин

затухания колебательного процесса, а следовательно, и от переходного сопротивления $R_{п}$ в месте КЗ.

Список литературы

1. Ando M., Schweitzer E. O., Baker R. A. Development and field-data evaluation of single-end fault locator for two-terminal HVDC transmission lines. – IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, vol. PAS-104, № 12.
2. Thailand-Malaysia HVDC Line Fault Locator System Upgrade / Mekkhachai S., Ramon N. A. A., Erickson W., Wachai R. – Presented at HVDC USERS CONFERENCE, China, Shanghai, 2011, 23 – 25 October.
3. High speed fault identification and protection for HVDC line using wavelet technique / Shang L., Herold G., Jaeger J., Krebs R., Kumar A. – In: Proceedings of the IEEE Porto Power Technical Conference, 2001, vol. 3.
4. Zhang Y., Tai N., Xu B. Fault analysis and traveling-wave protection scheme for bipolar HVDC lines. – IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, vol. 27, No. 3.
5. Nanayakkara O. M. K. K., Rajapakse A. D., Wachal R. Location of DC Line faults in conventional HVDC systems with segments of cables and overhead lines using terminal measurements. – IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, vol. 27, No. 1.
6. Спектральный метод определения места повреждения на линии постоянного тока / Герцик К. А., Мазуров М. И., Минкин С. И., Шлайфштейн А. Х. – В кн.: Автоматизированные системы управления технологическими процессами крупных подстанций, электропередач и вставок постоянного тока. Л.: Энергоатомиздат, 1991.
7. Испытания прибора для обнаружения места короткого замыкания на линии электропередачи постоянного тока Волгоград – Донбасс / Герцик К. А., Замятин А. Г., Мазуров М. И., Минин В. Т., Минкин С. И. – Электрические станции, 1992, № 12.
8. Патент 4766549 (США). Single-ended transmission line fault locator / Schweitzer E. O., Ando M.
9. Липник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М.: Гос. изд-во физ.-матлит., 1962.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Редакция готова предоставлять отдельные статьи или полные выпуски журналов «Электрические станции» и «Энергохозяйство за рубежом» прошедших и текущих номеров в электронном виде:

- сканкопии статей из журнала «Электрические станции» за 1930 – 2000 гг. и из журнала «Энергохозяйство за рубежом» за 1956 – 1993 гг. (стоимость 1 стр. – 47 руб.)
- pdf-файлы статей, начиная с 2001 г. (стоимость одной статьи – 295 руб.)
- pdf-файлы статей текущего года (стоимость одной статьи – 826 руб.)
- CD-диски годовых сборников журнала «Электрические станции» за 2001 – 2011 гг., где на экране компьютера вы увидите электронную версию журнала, в точности соответствующую печатному оригиналу (стоимость одного CD с доставкой по России – 472 руб.).

Подробности см. на www.elst.energy-journals.ru/podpiska