

МЕТОДИКА ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Е.А. Панова, А.В. Малафеев, А.И. Павлова

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия*

Существующие методики дистанционного определения места повреждения (ОМП) при однофазных коротких замыканиях эффективны для линий большой протяженности и неприменимы в системах промышленного электроснабжения, характеризующихся сравнительно короткими линиями электропередачи напряжением 110 и 220 кВ. В связи с этим авторами разработана методика ОМП, позволяющая дистанционно определять место возникновения однофазного короткого замыкания на линиях малой длины (от 0,7 км). Для реализации предложенной методики авторами разработаны математические модели линий электропередачи различной конфигурации и алгоритм расчета режима короткого замыкания в произвольной точке линии, основанный на использовании сочетания методов последовательного эквивалентирования и симметричных составляющих. Математические модели линий учитывают не только число и марку проводов и тросов, но и их взаимное расположение и высоту подвеса. Разработанные модели и алгоритмы реализованы в программном модуле КАТРАН-ОМП. Оценка погрешности разработанной методики проведена в условиях системы электроснабжения действующего промышленного предприятия. Данная оценка показала, что погрешность находится в пределах 700 м, что является удовлетворительным результатом для дистанционного ОМП при однофазном коротком замыкании на линиях 110–220 кВ системы электроснабжения промышленного предприятия.

Ключевые слова: определение места повреждения, короткое замыкание, метод симметричных составляющих, система электроснабжения, моделирование.

Введение

Отыскание места повреждения на воздушных линиях (ВЛ) 110–220 кВ систем электроснабжения крупных предприятий при однофазных коротких замыканиях (КЗ) занимает длительное время в связи со значительной погрешностью методик расчета в случае коротких линий. Это обуславливает значительное время поиска на местности. Точное дистанционное определение возможно при установке по концам линий регистраторов аварийных событий, что сопровождается существенными затратами. Сокращение времени отыскания возможно за счет совершенствования методик ОМП.

Распространенным подходом при расчете режимов КЗ является задание линий электропередачи только справочными электрическими параметрами, однако не учитывается взаимоиנדукция между проводниками многоцепных линий, а также собственные и взаимные емкости проводов ЛЭП с учетом ее действительных геометрических характеристик. Таким образом, необходимо задавать в расчет линии уточненной схемой замещения, подробно рассмотренной в [1].

Кроме того, для промышленных сетей характерна высокая концентрация нагрузок и на 110 кВ большинство линий выполнены проводом сечения, предусмотренного для 220 кВ; справочная информация для таких линий отсутствует.

Сказанное делает актуальной разработку усовершенствованной методики ОМП при однофазных КЗ на воздушных линиях электропередачи 110–220 кВ на основе уточненного определения их удельных электрических параметров.

Обзор публикаций, посвященных методам определения мест повреждения в электрических сетях

Методы ОМП подразделяются на высокочастотные и низкочастотные; дистанционные и топографические. К высокочастотным относятся определение места однофазного замыкания в сетях 6–35 кВ при помощи искусственных нейронных сетей [2], метод стоячих волн [3], регистрация ВЧ-излучения [4]. В сетях 10 кВ часто применяется приборное ОМП [4], но на большинство таких приборов влияют поля при параллельном сближении: требуется обход контрольных точек; нельзя выявить дефекты на начальной стадии.

Из низкочастотных дистанционных методов большое распространение получили методы, основанные на измерении параметров аварийного режима (ПАР) для сетей с заземленной нейтралью (односторонние [5] и двусторонние). При КЗ на ВЛ фиксирующие приборы запоминают ПАР на ее концах, в частности, ФПТ и ФПН [4] фиксируют режим обратной последовательности.

Часть работ посвящена проблемам дистанционной диагностики. Так, в [6] предлагается применение сетей Петри для самоорганизующихся алгоритмов.

Ряд статей посвящен программно-аппаратным комплексам ОМП и их совершенствованию. В [7] предлагается использование методов, адаптивных к параметрам линии, учитывающих имитационное моделирование и устройство реального отключения ВЛ для корректировки ошибки. В [8] описывается устройство «Бреслер-0107.090» для линий с одно- и двусторонним питанием на основе модельного дистанционного ОМП. Отмечается, что модель, использующая односторонний замер, неадекватна, так как недостающие данные берутся из известных режимов.

В «Методических указаниях по определению мест повреждений ВЛ напряжением 110 кВ и выше» приводятся рекомендуемые методы ОМП для распространенных ВЛ – одноцепных, двухцепных с ответвлениями и без них, транзитных с ответвлением по схеме захода, с электромагнитной связью на части трассы и длинных линий. Здесь же методы ОМП ВЛ 110 кВ и выше подразделяются на методы, основанные на фиксации ПАР, и методы, основанные на измерении временных интервалов при распространении электромагнитных волн по ВЛ. Методы первой группы делятся на ОМП при помощи расчетных формул на основе измерений устройствами ОМП, РЗА и т. д., а также программные способы на основе алгоритмической модели ВЛ или схемы замещения сети.

Односторонние методы ОМП по ПАР получили меньшее распространение по сравнению с двусторонними. Они позволяют непосредственно измерять расстояние до места КЗ, однако обладают большей погрешностью. Источники погрешности исследованы в [9]; к ним отнесены активное сопротивление дуги, комплексное сопротивление нагрузки, сопротивление контура нулевой последовательности. Модель дуги для целей идентификации повреждений разработана в [10].

Алгоритм ОМП в разомкнутых сетях, использующий угол между векторами токов прямой и обратной последовательностей, приведен в [11], однако он ориентирован на сети 6–35 кВ. Алгоритм выявления дуговых замыканий на линии с большим количеством отпаяк рассмотрен в [12], вопросам одностороннего ОМП на таких линиях посвящена работа [13]. Алгоритм выявления повреждений в сети с распределенной генерацией и последующего восстановления нормальной работы рассмотрен в [14]. Оптимизации размещения устройств ОМП в электрической сети, действующих на основе генетического алгоритма Чу-Бэсли, посвящена статья [15]. Алгоритм идентификации вида повреждений на основе нечеткой логики с использованием дискретного вейвлет-преобразования разработан авторами [16]. В статье [17] разра-

ботан метод обнаружения высокоимпедансных повреждений на основе s -преобразования. Для целей непрерывного мониторинга в [18] разработан метод QS-SVM, предназначенный для обнаружения и классификации неисправностей в масштабных энергосистемах. Задача выявления повреждений как составляющая комплексного моделирования интеллектуальной энергосистемы рассмотрена в [19], где для ее решения предложен гибридный подход на основе сетей Петри.

В [20] предлагается повысить точность учетом мгновенных токов и напряжений, что применимо только для междуфазных КЗ. Влияние проводимости изоляции на ОМП на ВЛ с отпайкой исследовано в [21], но методика позволяет выявить только протяженный поврежденный участок и его расположение по отношению к отпайке. Подход, основанный на эквивалентировании многополюсников, излагается в [22], его достоинством является возможность совмещения несинхронизированных данных; применение метода фазных координат рассмотрено в [23].

В [24] проводится анализ погрешностей ОМП, обусловленных первичными преобразователями. Предлагается корректировать форму вторичного тока ТТ при насыщении магнитопровода с использованием фактического спектра тока.

Таким образом, методы ОМП ориентированы либо на сети с изолированной нейтралью, либо на сети высокого и сверхвысокого напряжения энергосистем. При этом недостаточно внимания уделено ОМП в сетях 110 кВ систем промышленного электроснабжения, характеризующихся преобладанием коротких линий. Для них существующие методы дают значительную погрешность (до половины линии). В связи с этим актуальной является разработка усовершенствованного метода ОМП, применимого для промышленных сетей.

Наиболее удобным и просто реализуемым является метод ОМП, основанный на определении ПАР, который и положен в основу данной работы.

Алгоритм расчета режима однофазного КЗ на линии электропередачи

Для дистанционного определения места повреждения по параметрам аварийного режима необходимо сравнить фактические значения тока однофазного КЗ с расчетным, причем моделировать КЗ для выполнения расчета необходимо не только на шинах подстанции с питающего или приемного конца линии, но и на самой линии. Как правило, при расчетах параметров режима с целью дистанционного ОМП точками КЗ являются опоры линии электропередачи.

В настоящей работе для реализации подобных расчетов предлагается алгоритм расчета режима КЗ на линии, позволяющий моделировать точку КЗ на любой опоре ЛЭП:

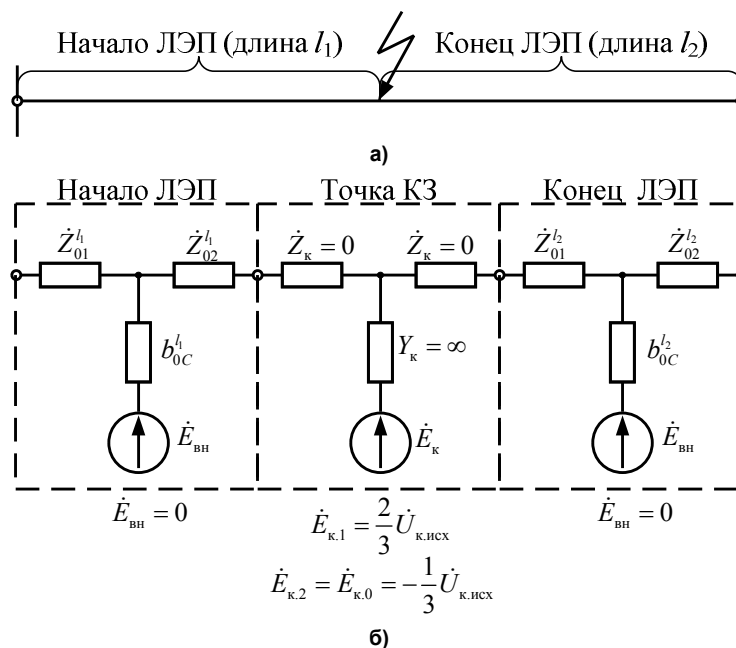


Рис. 1. Расчетная схема (а) и схема замещения (б) ЛЭП с однофазным КЗ в произвольной точке

1. Для расчета указанного режима на линии электропередачи устанавливается точка КЗ. Расчетная схема и схема замещения поврежденного участка сети будет иметь вид, показанный на рис. 1.

2. Начальным этапом является расчет параметров установившегося режима, который выполняется методом последовательного эквивалентирования. По его результатам определяется напряжение в точке короткого замыкания $\dot{U}_{к.исх}$.

3. Расчет режима однофазного КЗ выполняется методом симметричных составляющих. В соответствии с данным методом расчет параметров аварийного режима выполняется отдельно для схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. При этом в каждую схему замещения в точке КЗ вводится своя ЭДС:

$$\dot{E}_{к.1} = \frac{2}{3} \dot{U}_{к.исх}, \quad (1)$$

$$\dot{E}_{к.2} = \dot{E}_{к.0} = -\frac{1}{3} \dot{U}_{к.исх}. \quad (2)$$

В схеме замещения прямой последовательности кроме $\dot{E}_{к.1}$ действуют еще и ЭДС источников питания, а в схемах замещения обратной и нулевой последовательности действуют только ЭДС в точке КЗ.

4. Удельные продольные сопротивления и емкостные проводимости участков линии определяются в соответствии с выражениями, приведенными в [1], с учетом конфигурации опор линии, а затем вычисляются сопротивления участков ЛЭП:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{01}^h &= \dot{Z}_{02}^h = 0,5 \cdot z_0 \cdot l_1, & \dot{Z}_{01}^l &= \dot{Z}_{02}^l = 0,5 \cdot z_0 \cdot l_2, \\ \dot{Y}_{0c}^h &= j b_0 \cdot l_1, & \dot{Y}_{0c}^l &= j b_0 \cdot l_2, \end{aligned} \quad (3)$$

где z_0 – удельное продольное сопротивление; b_0 – удельная емкостная проводимость.

Результатом расчета являются напряжения во всех узлах и токи во всех ветвях схемы, а также ток в точке КЗ.

Методика определения места повреждения

Разработанные в [1] математические модели линий электропередачи и алгоритм расчета режима короткого замыкания на ЛЭП, изложенный в данной работе, реализованы в программном модуле КАТРАН-ОМП. Данный программный продукт позволяет выполнить расчеты для составления таблиц ОМП, которые впоследствии используются для дистанционного определения места возникновения однофазного КЗ на ЛЭП. При составлении таблиц ОМП предлагается использовать методику, приведенную на рис. 2.

При определении места возникновения однофазного короткого замыкания на линии необходимо:

1) определить ток в поврежденной фазе по осциллограмме, зафиксированной в момент пуска защиты на питающем конце линии с односторонним питанием или с обоих концов на линиях с двухсторонним питанием;

2) найти в таблице ОМП для соответствующей линии ближайшее значение тока в поврежденной фазе;

3) определить по таблице ОМП, какой опоре соответствует данное значение тока однофазного короткого замыкания;

4) выполнить осмотр линии электропередачи на участке ± 700 м от расчетного места повреждения.

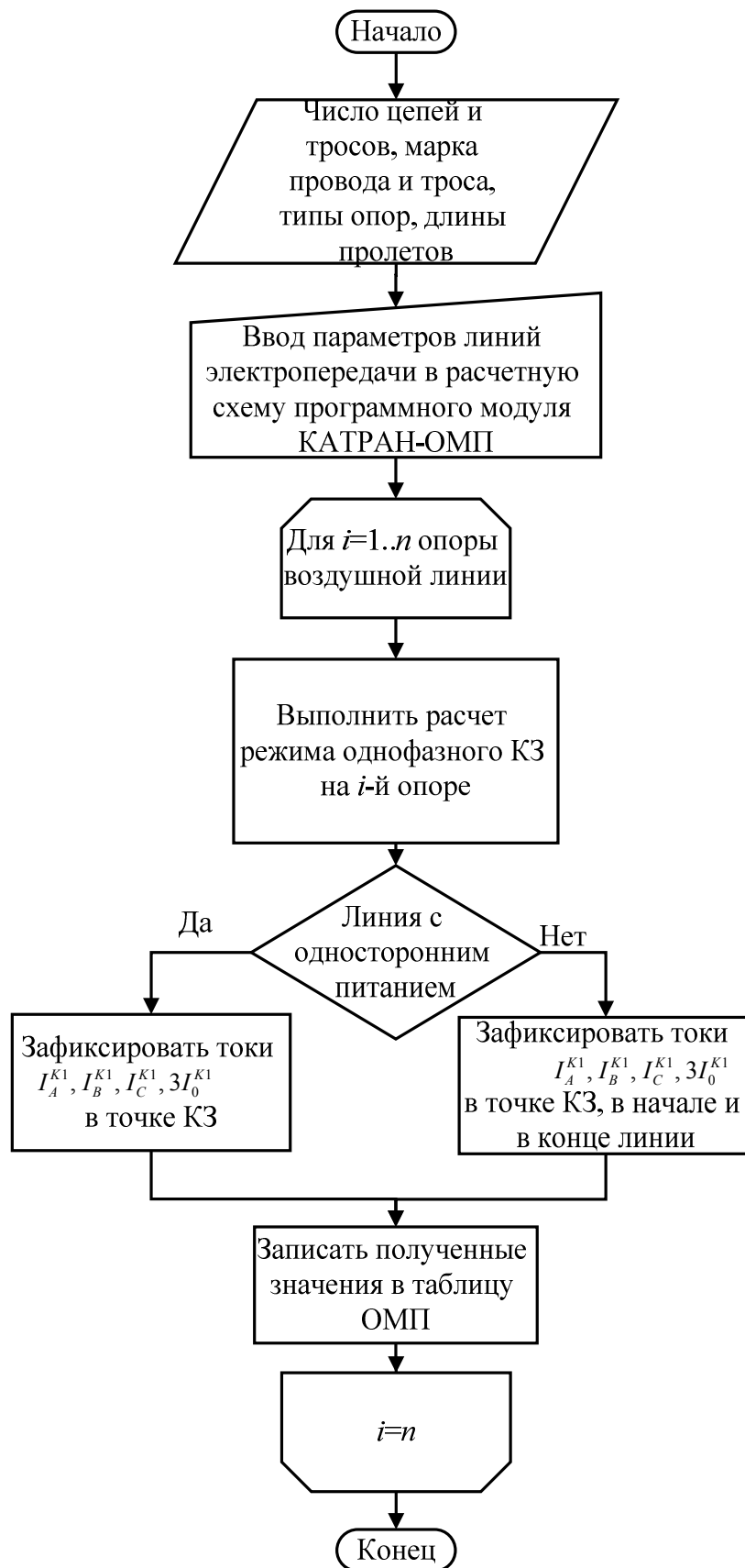


Рис. 2. Методика составления таблиц ОМП

Оценка погрешности разработанной методики

Для оценки погрешности разработанной методики выполним сопоставление для имевших место в системе электроснабжения крупного промышленного предприятия аварийных режимов токов короткого замыкания с токами КЗ, полученными по осциллограммам аварийных событий.

Применительно к сетям 220 кВ рассмотрим режим, имевший место при повреждении двухцепной воздушно-кабельной тупиковой линии «ПС Узловая-3 – ПС-56». В данном случае в весенний период произошло однофазное КЗ в фазе А на опоре № 6 цепи I; действующее значение тока КЗ, зафиксированное терминалом релейной защиты, при этом составило 14,234 кА. Опоре № 6 соответствует фазный ток в начале линии, равный 14,22 кА. Таким образом, погрешность в определении пролета ВЛ в данном случае отсутствует.

Особенностью сетей 110 кВ объекта является малый объем архивных данных по аварийным режимам, следовательно, возможен лишь частичный ретроспективный анализ параметров аварийных режимов.

Рассмотрим однофазное КЗ в фазе В на тупиковой линии «ПС Горная-1 – ПС Горная-3», произошедшее в осенний период. Согласно данным участка воздушных линий, повреждение имело место на опоре № 7. Подпитка точки КЗ при этом наблюдается со стороны электростанции и со стороны ПС Узловая-2; других источников нет в связи с отсутствием в схеме РУ-110 кВ шиносоединительных выключателей. При этом на электростанции, РУ-110 кВ, зафиксирован пуск защиты при фазном токе, равном 7,6 кА; со стороны ПС Узловая-2 имел место пуск защиты при фазном токе 1,96 кА, что дает ток в начале поврежденной линии 9,56 кА. Погрешность при определении места повреждения в этом случае составляет 784 м, что является приемлемым результатом в сравнении со значениями, получаемыми по методике расчетного ОМП, применяемой в подразделениях ряда сетевых компаний.

Литература

1. Панова, Е.А. Уточненные электрические параметры двухцепных ЛЭП 110 кВ для дистанционного определения места повреждения / Е.А. Панова, А.Я. Альбрехт // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2016. – № 4. – С. 35–40.

2. Кривишвили, Л.В. Определение места однофазного замыкания на землю 6–35 кВ при помощи искусственных нейронных сетей / Л.В. Кривишвили // *Электрические станции*. – 2013. – № 6. – С. 48–52.

3. Дистанционное определение места повреждения в распределительных сетях методом стоячих волн / В.А. Бурчевский, Л.В. Владимиров,

В.Н. Горюнов, В.А. Ощепков // *Омский научный вестник*. – 2009. – № 3. – С. 168–171.

4. Гарипов, И.Х. Определение мест повреждений на воздушных линиях 10 кВ / И.Х. Гарипов, Л.М. Рыбаков // *Электрика*. – 2010. – № 5. – С. 30–34.

5. Гриб, О.Г. Одностороннее определение места повреждения воздушных линий по параметрам аварийного режима в сетях с эффективно-заземленной нейтралью / О.Г. Гриб, Г.А. Сендерович, Д.Н. Калюжный // *Электрические станции*. – 2006. – № 2. – С. 42–45.

6. Асанова, С.М. Вычислительные сети Петри для проектирования системы дистанционной диагностики обрыва провода воздушных линий РЭС 6–35 кВ / С.М. Асанова // *Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова*. – 2013. – Вып. 29. – С. 1–12.

7. Куликов, А.Л. Развитие программного обеспечения для поддержки принятия решения при ликвидации повреждения на линиях электропередачи / А.Л. Куликов, М.Д. Обалин // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 2015. – № 2. – С. 70–75. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-2-70-75

8. Бычков, Ю.В. Алгоритмические модели на примере защиты дальнего резервирования и определения места повреждения / Ю.В. Бычков, Д.С. Васильев, А.О. Павлов // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 2010. – № 6. – С. 63–67.

9. Хузяшев, Р.Г. Источники методической погрешности одностороннего алгоритма определения места повреждения на воздушной линии электропередачи по параметрам аварийного режима / Р.Г. Хузяшев, Ю.В. Писковацкий, О.В. Якимов // *Изв. вузов. Проблемы энергетики*. – 2008. – № 11–12. – С. 96–104.

10. Terzija, V.V. A new iterative method for fault currents calculation which models arc resistance at the fault location / V.V. Terzija, R.M. Ciric, H. Nouri // *Electrical Engineering*. – 2006. – Vol. 89. – P. 157–165. DOI: 10.1007/s00202-005-0328-9

11. Калентионок, Е.В. Определение вида однофазного повреждения в воздушных распределительных электрических сетях с изолированной нейтралью / Е.В. Калентионок, Ю.А. Мазурек // *Изв. вузов. Энергетика*. – 2012. – № 6. – С. 28–34.

12. A new impedance-based fault location scheme for overhead unbalanced radial distribution networks / M.A. Gabr, D.K. Ibrahim, E.S. Ahmed, M.I. Gilany // *Electric Power Systems Research*. – 2017. – Vol. 142. – P. 153–162. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.09.015

13. Distributed processing based fault location, isolation, and service restoration method for active distribution network / J. Weng, D. Liu, N. Luo, X. Tang // *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*. – 2015. – Iss. 3(4). – P. 494–503. DOI: 10.1007/s40565-015-0166-3

14. Optimal placement of faulted circuit indicators in power distribution systems / M.C. de Almeida, F.F. Costa, S. Xavier-de-Souza, F. Santana // *Electric*

Power Systems Research. – 2011. – Iss. 81. – P. 699–706. DOI: 10.1016/j.epsr.2010.10.037

15. Jamil, M. Fault identification in electrical power distribution system using combined discrete wavelet transform and fuzzy logic / M. Jamil, R. Singh, S.K. Sharma // *Journal of Electrical Systems and Information Technology.* – 2015. – Iss. 2. – P. 257–267. DOI: 10.1016/j.jesit.2015.03.015

16. Mishra, M. A Universal High Impedance Fault Detection Technique for Distribution System Using S-Transform and Pattern Recognition / M. Mishra, P. Routray, P.K. Rout // *Technol. Econ. Smart Grids Sustain. Energy.* – 2016. – Vol. 1. – Iss. 9. – 14 p. DOI: 10.1007/s40866-016-0011-4

17. Aleem, S.A. Methodologies in power systems fault detection and diagnosis / S.A. Aleem, N. Shahid, I.H. Naqvi // *Energy Systems.* – 2015. – Iss. 6. – P. 85–108. DOI: 10.1007/s12667-014-0129-1

18. Nouri, H. Time-based fault location method for LV distribution systems / H. Nouri, M.M. Alamuti, M. Montakhab // *Electrical Engineering.* – 2016. – Iss. 98. – P. 87–96. DOI: 10.1007/s00202-015-0346-1

19. Ghazi, Z. Fault detection and power distribution optimization of smart grids based on hybrid Petri net / Z. Ghazi, A. Doustmohammadi // *Energy Systems.* – 2016. – Published online 09-06-2016. DOI: 10.1007/s12667-016-0205-9

20. Калентионок, Е.В. Определение зоны междуфазного повреждения в воздушных распределительных электрических сетях / Е.В. Калентионок // *Изв. вузов. Энергетика.* – 2013. – № 4. – С. 13–21.

21. Хусаинов, Ш.Н. Исследование возможностей по определению места повреждения участка линии с отпайкой и величины проводимости изоляции в месте повреждения / Ш.Н. Хусаинов, Р.Р. Нараева // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика».* – 2009. – Вып. 34. – С. 37–40.

22. Лямец, Ю.Я. Алгоритмическое моделирование в задаче определения места повреждения в линиях электропередачи / Ю.Я. Лямец, И.С. Климатова // *Вестник Чувашского государственного университета.* – 2007. – № 2.

23. Ермаков, К.И. Моделирование в задачах определения места повреждения на линиях электропередачи / К.И. Ермаков // *Вестник Чувашского государственного университета.* – 2011. – № 3. – С. 67–70.

24. О точности определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи / В.С. Молодцов, М.М. Середин, А.И. Щербинин, В.Н. Александров // *Электрические станции.* – 1997. – № 1. – С. 47–50.

Панова Евгения Александровна, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; ea.panova@magtu.ru

Малафеев Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; malapheev_av@mail.ru

Павлова Алена Ивановна, магистрант, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; al-agp_94@mail.ru

Поступила в редакцию 26 октября 2017 г.

DOI: 10.14529/power170408

METHOD OF SINGLE PHASE SHORT CIRCUIT DETECTION ON OVERHEAD TRANSMISSION LINES OF AN INDUSTRIAL PLANT ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEM

E.A. Panova, ea.panova@magtu.ru,
A.V. Malafeev, malapheev_av@mail.ru,
A.I. Pavlova, al-agp_94@mail.ru

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Existing methods for a distant single-phase fault detection produce a desired effect for a long lines and inapplicable to industrial electric power supply systems with a relatively short 110-220 kV overhead transmission lines. Hence, the authors elaborated the method of a fault detection enabling distant single-phase fault detection

on a short overhead line (starting at under 0.7 km). To implement this method, the authors developed mathematical models of overhead transmission lines of different configuration and the algorithm of a line single-phase short circuit mode computation. This algorithm is based on the methods of subsequent reduction and symmetrical components. Overhead lines models take into account the number and type of a wire and rope and also their mutual arrangement and the distance between the wire and ground. The models and algorithms were applied to KATRAN-OMP software. The method accuracy assessment demonstrated that the error is within 700 m which is a satisfactory result for a distant single phase short circuit detection on a 100-220 kV transmission line in an industrial electric power supply system.

Keywords: fault detection, short-circuit, symmetrical components, electric power supply system, simulation.

References

1. Panova E.A., Al'brekht A.Ya. [Refined Electrical Parameters of Double-Circuit 110 kV Transmission Lines for Remote Fault Location]. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2016, no. 4, pp. 35–40. (in Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40
2. Kvrivishvili L.V. [Determination of Single-Phase Earth Fault Location 6-35 kV with the Help of Artificial Neural Networks]. *Elektricheskie Stantsii*, 2013, no. 6, pp. 48–52. (in Russ.)
3. Burchevskiy V.A., Vladimirov L.V., Goryunov V.N., Oshchepkov V.A. [Remote Location of Damage in Distribution Networks by Standing Wave Method]. *Omsk Scientific Bulletin*, 2009, no. 3, pp. 168–171. (in Russ.)
4. Garipov I.Kh., Rybakov L.M. [Determination of Fault Locations on 10 kV Overhead Lines]. *Elektrika (Electrics)*, 2010, no. 5, pp. 30–34. (in Russ.)
5. Grib O.G., Senderovich G.A., Kalyuzhnyy D.N. [Single-Sided Determination of the Fault Location of Overhead Lines by Emergency Mode Parameters in Networks with Effectively-Earthed Neutral]. *Elektricheskie Stantsii*, 2006, no. 2, pp. 42–45. (in Russ.)
6. Asanova S.M. [Computing Petri Nets for Designing a System for Remote Diagnostics of Wire Breaks in Overhead Lines of DEN 6–35 kV]. *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova*, 2013, no. 29, pp. 1–12. (in Russ.)
7. Kulikov A.L., Obalin M.D. [Development of Software to Support Decision Making in the Event of Elimination of Damage to Power Lines]. *Russian Electromechanics*, 2015, no. 2, pp. 70–75. (in Russ.) DOI: 10.17213/0136-3360-2015-2-70-75
8. Bychkov Yu.V., Vasil'ev D.S., Pavlov A.O. [Algorithmic Models on the Example of Protection of Long-Range Backup and Fault Location]. *Russian Electromechanics*, 2010, no. 6, pp. 63–67. (in Russ.)
9. Khuzhashev R.G., Piskovatskiy Yu.V., Yakimov O.V. [Sources of Methodical Error of a One-Way Algorithm for Determining the Location of a Fault on an Overhead Power Transmission Line by Emergency Mode Parameters]. *Proceedings of the Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems*, 2008, no. 11–12, pp. 96–104. (in Russ.)
10. Terzija V.V., Ciric R.M., Nouri H. [A New Iterative Method for Fault Currents Calculation Which Models Arc Resistance at the Fault Location]. *Electrical Engineering*, 2006, vol. 89, pp. 157–165. DOI: 10.1007/s00202-005-0328-9
11. Kalentionok E.V., Mazurek Yu.A. [Determination of the Type of Single-Phase Damage in Air Distribution Electric Networks with Isolated Neutral]. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 2012, no. 6, pp. 28–34. (in Russ.)
12. Gabr M.A., Ibrahim D.K., Ahmed E.S., Gilany M.I. [A New Impedance-Based Fault Location Scheme for Overhead Unbalanced Radial Distribution Networks]. *Electric Power Systems Research*, 2017, vol. 142, pp. 153–162. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.09.015
13. Weng J., Liu D., Luo N., Tang X. [Distributed Processing Based Fault Location, Isolation, and Service Restoration Method for Active Distribution Network]. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, 2015, no. 3(4), pp. 494–503. DOI: 10.1007/s40565-015-0166-3
14. De Almeida M.C., Costa F.F., Xavier-de-Souza S., Santana F. [Optimal Placement of Faulted Circuit Indicators in Power Distribution Systems]. *Electric Power Systems Research*, 2011, no. 81, pp. 699–706. DOI: 10.1016/j.epsr.2010.10.037
15. Jamil M., Singh R., Sharma S.K. [Fault Identification in Electrical Power Distribution System Using Combined Discrete Wavelet Transform and Fuzzy Logic]. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2015, no. 2, pp. 257–267. DOI: 10.1016/j.jesit.2015.03.015
16. Mishra M., Routray P., Rout P.K. [A Universal High Impedance Fault Detection Technique for Distribution System Using S-Transform and Pattern Recognition]. *Technol. Econ. Smart Grids Sustain. Energy*, 2016, vol. 1, no. 9, 14 pp. DOI: 10.1007/s40866-016-0011-4
17. Aleem S.A., Shahid N., Naqvi I.H. [Methodologies in Power Systems Fault Detection and Diagnosis]. *Energy Systems*, 2015, no. 6, pp. 85–108. DOI: 10.1007/s12667-014-0129-1

18. Nouri H., Alamuti M.M., Montakhab M. [Time-Based Fault Location Method for LV Distribution Systems]. *Electrical Engineering*, 2016, no. 98, pp. 87–96. DOI: 10.1007/s00202-015-0346-1
19. Ghazi Z., Doustmohammadi A. [Fault Detection and Power Distribution Optimization of Smart Grids Based on Hybrid Petri Net]. *Energy Systems*, 2016, published online 09-06-2016. DOI: 10.1007/s12667-016-0205-9
20. Kalentionok E.V. [Determination of the Zone of Phase-to-Phase Damage in Air Distribution Electric Networks]. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 2013, no. 4, pp. 13–21. (in Russ.)
21. Khusainov Sh.N., Naraeva R.R. [Investigation of the Possibilities for Determining the Fault Location of a Line Segment with a Tap and the Value of the Conductivity of the Insulation at the Fault Site]. *Bulletin of South Ural State University, Ser. Power Engineering*, 2009, no. 34, pp. 37–40. (in Russ.)
22. Lyamets Yu.Ya., Klimatova I.S. [Algorithmic Modeling in the Problem of Fault Location in Power Transmission Lines]. *Bulletin of Chuvash State University*, 2007, no. 2. (in Russ.)
23. Ermakov K.I. [Modeling in Problems of Fault Location on Power Lines]. *Bulletin of Chuvash State University*, 2011, no. 3, pp. 67–70. (in Russ.)
24. Molodtsov V.S., Seredin M.M., Shcherbinin A.I., Aleksandrov V.N. [On the Accuracy of the Location of Damage on Overhead Power Lines]. *Elektricheskie Stantsii*, 1997, no. 1, pp. 47–50. (in Russ.)

Received 26 October 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Панова, Е.А. Методика дистанционного определения места повреждения при однофазных коротких замыканиях на линиях электропередачи системы электроснабжения промышленного предприятия / Е.А. Панова, А.В. Малафеев, А.И. Павлова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 72–79. DOI: 10.14529/power170408

FOR CITATION

Panova E.A., Malafeev A.V., Pavlova A.I. Method of Single Phase Short Circuit Detection on Overhead Transmission Lines of an Industrial Plant Electric Power Supply System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 72–79. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170408