

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СЕТЕЙ 6–35 кВ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА STA/LTA

Р.Р. Саттаров, Р.Р. Гарафутдинов, Р.Р. Хафизов

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

Быстрое и точное обнаружение однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в электрических сетях представляет собой актуальную задачу. При этом существующие методы и средства не всегда обеспечивают удовлетворительное качество, поэтому не прекращается разработка новых методов и средств обнаружения ОЗЗ. В работе предложен новый метод обнаружения ОЗЗ, основанный на методе STA/LTA, который широко применяется для обнаружения сейсмических событий. Приведено описание метода и разработан алгоритм его работы для определения ОЗЗ в распределительных электрических сетях. На основе алгоритма разработана программа на VBA для обнаружения ОЗЗ. Для апробации метода в программном комплексе PSCAD реализована компьютерная модель кабельной сети, соответствующей участку реально существующих городских сетей. Полученные в модели осциллограммы токов и напряжений при ОЗЗ обрабатывались разработанной программой. Анализ результатов моделирования и расчета позволяет определить пороги срабатывания алгоритма STA/LTA, позволяющие надежно обнаружить ОЗЗ. Границы срабатывания определяются в относительных единицах, то есть метод STA/LTA является адаптивным по отношению к изменениям топологии сети. Таким образом, апробация метода STA/LTA на компьютерной модели PSCAD показывает его эффективность и перспективность для обнаружения и выявления ОЗЗ.

Ключевые слова: однофазные замыкания на землю, надежность, метод STA/LTA, PSCAD, моделирование режимов, ЭЭС.

Введение

Повышение надежности работы электрических сетей 6–10 кВ является важной задачей, поскольку это связано с увеличением надежности электроснабжения потребителей. Однофазные замыкания на землю являются основным видом повреждений и характеризуются повышением напряжения неповрежденных фаз относительно земли в $\sqrt{3}$ раз при металлическом замыкании и в 3–4 раза при дуговых замыканиях. Довольно часто это приводит к пробое изоляции, переходу однофазного замыкания в двойные и тройные замыкания, а также появлению многоместных замыканий на землю с повреждением нескольких кабелей [1, 2].

По данным [3], качественные селективные защиты от замыканий на землю на различных предприятиях страны представляют большую редкость, а селективные токовые защиты от ОЗЗ отсутствуют на 80 % подстанций России. Во многих сетях поиск поврежденного присоединения при ОЗЗ до сих пор производится устаревшим методом – поочередным отключением присоединений, который занимает несколько часов. Однако создать селективную и высокочувствительную защиту от ОЗЗ, пригодную для любых видов сетей с малым током замыкания на землю, представляется довольно сложной задачей, трудно создать универсальную защиту от ОЗЗ для разных типов электро-

установок. Особые трудности при выполнении селективных защит от ОЗЗ имеют место в сетях 6–10 кВ с резонансно-заземленной нейтралью, где ток полностью компенсируется током дугогасящего реактора (ДГР) и поэтому использование его в качестве источника информации невозможно.

Комплекс мер по повышению надежности электроснабжения, в том числе обеспечение бесперебойным питанием потребителей, а также своевременное устранение аварий и повреждений всегда является важной задачей в области электроэнергетики. Своевременное определение поврежденного участка сети, его отделения от сети без отключения потребителя, путем перевода его на другие направления питания – задача, которую стремится идеально выполнить любой центр управления сетями. Изучение и применение новых адаптивных методов обнаружения замыканий на землю позволяет совершенствовать и автоматизировать выполнение этой задачи, снижая при этом временные и материальные затраты на ее выполнение.

В настоящее время в России и за рубежом принципы построения защиты строятся на следующих основных алгоритмах от ОЗЗ [2]:

- реагирующие на ток промышленной частоты;
- реагирующие на составляющие переходного процесса;

- реагирующие на направление мощности нулевой последовательности;
- реагирующие на высшие гармонические составляющие тока нулевой последовательности;
- наложение в контур нулевой последовательности тока с частотой, отличной от основной, и измерение его с помощью трансформатора тока нулевой последовательности.

Однако, для обнаружения однофазного КЗ в сетях с заземленной нейтралью, двух- и трехфазных КЗ в сетях с заземленной или изолированной нейтралью применяются различные методы и индикаторы КЗ, неспособные достоверно определять все виды коротких замыканий. В то же время для автоматического обнаружения сейсмических событий в зашумленной среде успешно применяется метод, основанный на анализе отношения амплитуд в коротком и длинном временных окнах. Подобные методики выделения событий из зашумленной среды можно применять для обнаружения повреждений в электрических сетях.

Одним из методов обнаружения замыкания на землю, который стало возможно реализовать благодаря быстрдействию вычислительной техники, является метод отношения короткого и длинного временных окон STA/LTA [4, 5].

Метод STA/LTA

Предлагаемый метод позволяет формализовать процесс обнаружения любых отклонений тока и напряжения от нормальных, исключив при этом из процесса человека, автоматически определяя время и место наступления ОЗЗ. Метод STA/LTA позволяет отстраивать защиту от «шумов», возмущений или реакций на переходные процессы, которые возникают в сети, но не являются сигналом на срабатывание защиты.

Для реализации алгоритма не требуются дополнительные средства измерения и датчики. Алгоритм может быть реализован на существующем оборудовании.

В соответствии с алгоритмом постоянно ведется анализ осциллограмм токов и напряжений в фазах, формируются длинное и короткое временные окна, в которых вычисляются средние значения. Отношение средних STA/LTA постоянно сравнивается с заранее отстроенными коэффициентами порогового уровня запуска. Если отношение превышает этот порог – фиксируется нарушение [6, 7].

Для обнаружения реальных событий из большого количества данных используются триггеры. В данном случае, согласно [8], под триггером понимают алгоритм, проверяющий сигнал на соответствие условиям, которые могут указывать на событие. Например, триггер может выполнять поиск амплитуды, превышающей заданный порог.

Триггер с длинным и коротким временными интервалами (STA/LTA) является наиболее часто

используемым триггерным алгоритмом. Один канал сигнала обычно обрабатывается следующим образом: сигнал пропускается через полосовой фильтр и определяется абсолютное среднее значение STA (среднее значение короткого временного интервала). Тот же фильтрованный сигнал также используется для вычисления LTA (среднего значения длинного временного интервала) во временном окне LTA. Таким образом, LTA дает долгосрочный уровень фонового сигнала, в то время как STA отвечает за краткосрочные колебания сигнала. Отношение STA и LTA постоянно контролируется и, как только оно превышает заданный порог, объявляется уровень триггера, который служит сигналом для записи полезного сигнала.

Как только событие начинается, значение LTA «замораживается», в таком случае опорное значение длинного окна не может повлиять на сигнал события. Конец события объявляется, когда отношение STA/LTA достигает определенного уровня.

Алгоритм должен постоянно анализировать осциллограммы, поэтому значения STA и LTA рассчитываются как скользящие средние [8–11]:

$$STA_i = STA_{i-1} + \frac{|x_i| - STA_{i-1}}{N_{STA}}, \quad (1)$$

$$LTA_i = LTA_{i-1} + \frac{|x_i| - LTA_{i-1}}{N_{LTA}}, \quad (2)$$

$$R_i = \frac{STA_i}{LTA_i}, \quad (3)$$

где x_i – сигнал; STA_i – среднее значение короткого временного интервала; LTA_i – среднее значение длинного временного интервала; R_i – отношение временных интервалов; N_{STA} и N_{LTA} – количество отсчетов в окнах STA и LTA, соответственно.

Промежуток времени между отсчетами определяется частотой дискретизации записывающего осциллографа.

На рис. 1 показан пример сигнала, который обрабатывает алгоритм STA/LTA.

Для применения метода в электроэнергетике использован адаптированный алгоритм STA/LTA, при этом сам метод использован в классическом виде, без применения частотных фильтров и пороговых триггеров.

Величины значений окон STA и LTA рассчитываются как [12]:

$$STA(t) = \frac{1}{N_S} \sum_{i=1}^{N_S} x_i^2, \quad (4)$$

$$LTA(t) = \frac{1}{N_L} \sum_{i=1}^{N_L} x_i^2, \quad (5)$$

где N_S и N_L – число отсчетов в коротком и длинном окнах ($N_S \ll N_L$); t – дискретное время. В качестве x_i будут применяться значения токов или напряже-

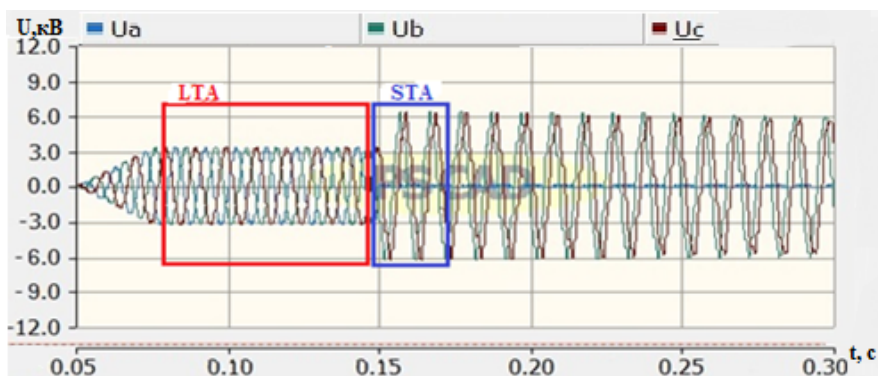


Рис. 1. Визуализация алгоритма. Данные представлены в относительном времени

ний, взятых на определенном временном интервале осциллограммы в соответствии с ее частотой дискретизации.

Расчет значений окон необходимо выполнять рекурсивно, чтобы метод работал в режиме реального времени, при этом каждый i -й шаг получаем, исходя из следующих выражений:

$$STA_i = STA_{i-1} + C_S(x_i^2 + STA_{i-1}), \quad (6)$$

$$C_S = 1/N_S, \quad (7)$$

$$LTA_i = LTA_{i-1} + C_L(x_i^2 + LTA_{i-1}), \quad (8)$$

$$C_L = 1/N_L. \quad (9)$$

Далее на каждом i -м шаге выполняется расчет по выражению (10). Данное выражение является непрерывной оценкой подсчетов, а также границей, от которой отстраивается алгоритм:

$$r(t) = \frac{STA(t)}{LTA(t)}. \quad (10)$$

Алгоритм в виде блок-схемы представлен на рис. 2.

Число r_g представляет собой пороговое значение для выражения (10), превышение которого приводит к формированию сигнала о фиксации

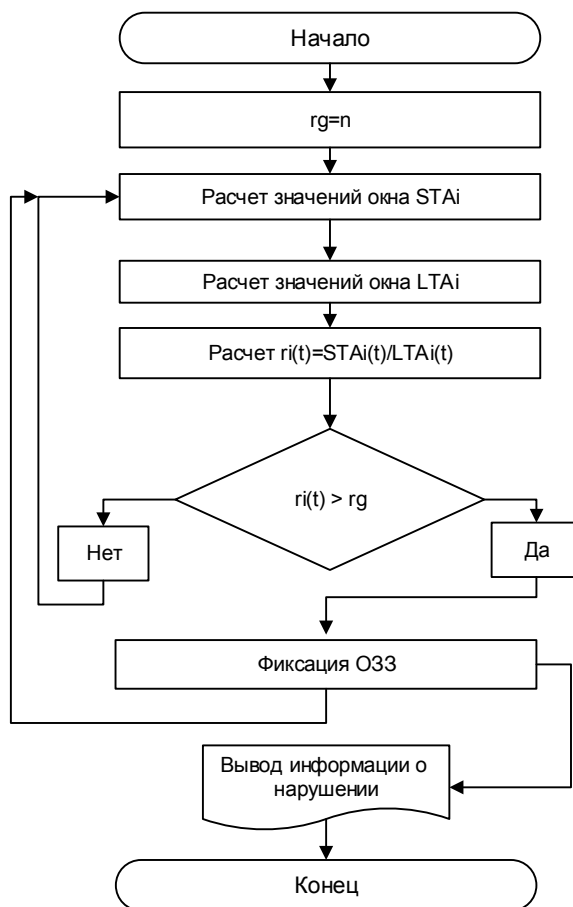


Рис. 2. Блок-схема алгоритма STA/LTA

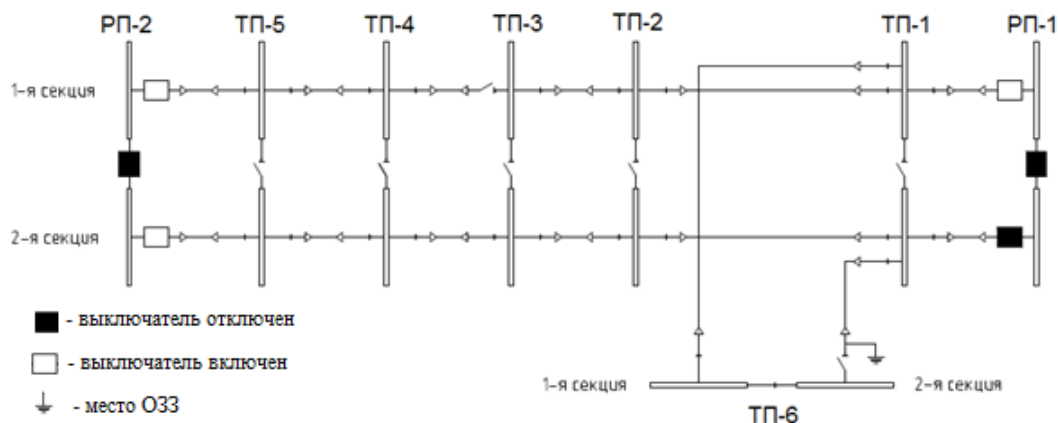


Рис. 3. Расчетная схема сети 6 кВ

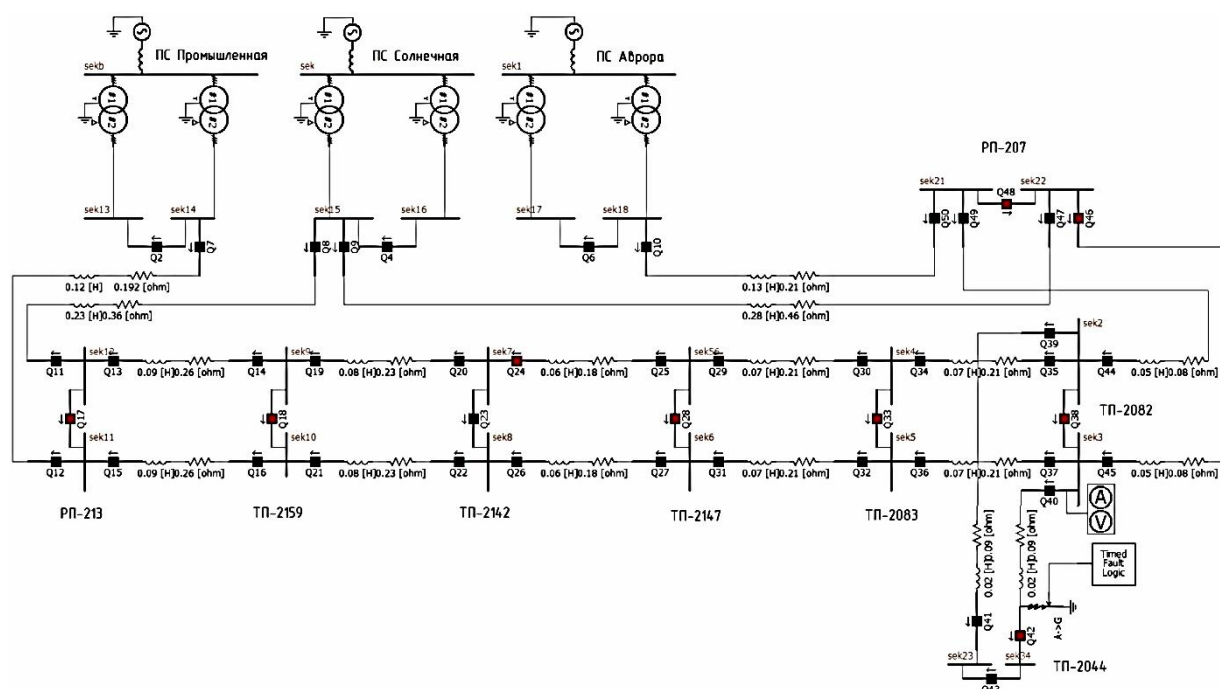


Рис. 4. Модель рассматриваемого участка в PSCAD

ОЗЗ. r_g задается на основании опыта и информации о характеристиках электрической сети. В данной работе r_g принимается равным 1,085.

Моделирование сети

Для проверки работоспособности метода был смоделирован участок электрической кабельной сети, схожий по составу и по параметрам с действительно существующим участком сети 6 кВ «Уфимских городских электрических сетей» (рис. 3).

В данной модели проводилось моделирование различных аварийных ситуаций, связанных с повреждением кабеля от ТП-1 к ТП-6.

Расчетная модель участка электрической сети была составлена на программном продукте PSCAD [12–14]. Параметры элементов модели: выключателей, кабелей – введены аналогичные

реальным параметрам оборудования. Модель моделируемого участка представлена на рис. 4.

Полученные в результате расчета осциллограммы токов и напряжений приведены на рис. 5.

Реализация метода STA/LTA

Полученные результаты в виде осциллограммы токов и напряжений переводятся в числовой массив, для демонстрации работоспособности алгоритма STA/LTA. Сам алгоритм для более удобной обработки массива реализован на языке программирования Visual Basic for Applications (VBA), встроенного в линейку многих программных продуктов Microsoft Office, в том числе Excel (рис. 6) [15, 16].

После преобразования осциллограмм в числовой массив данных и конвертацию его в книгу MS Excel выполняется алгоритм.

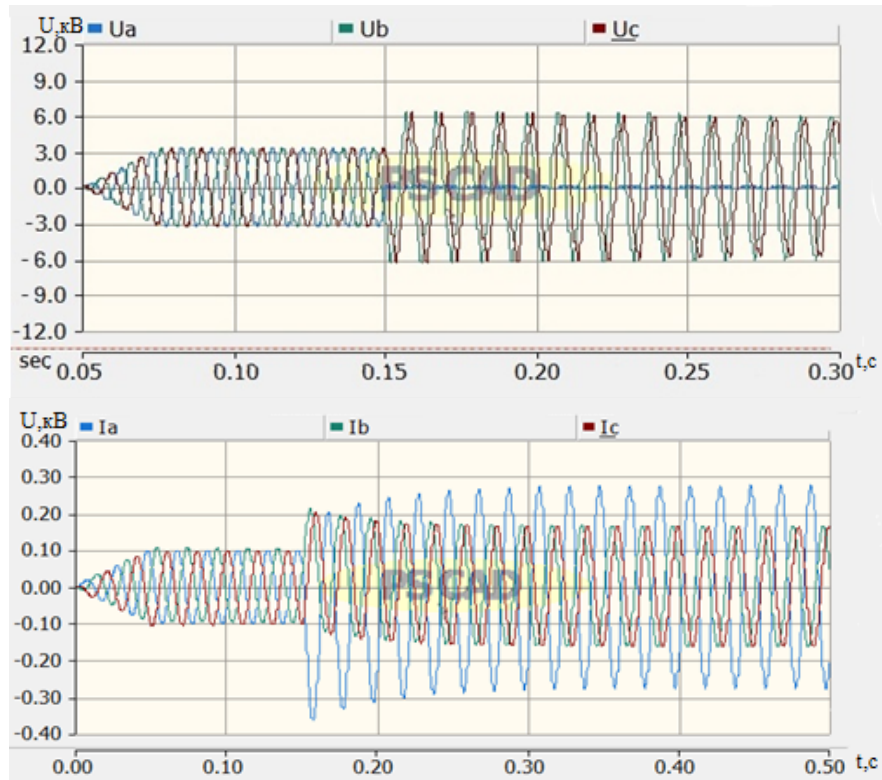


Рис. 5. Полученные осциллограммы: фазные напряжения и токи, нейтраль – изолированная

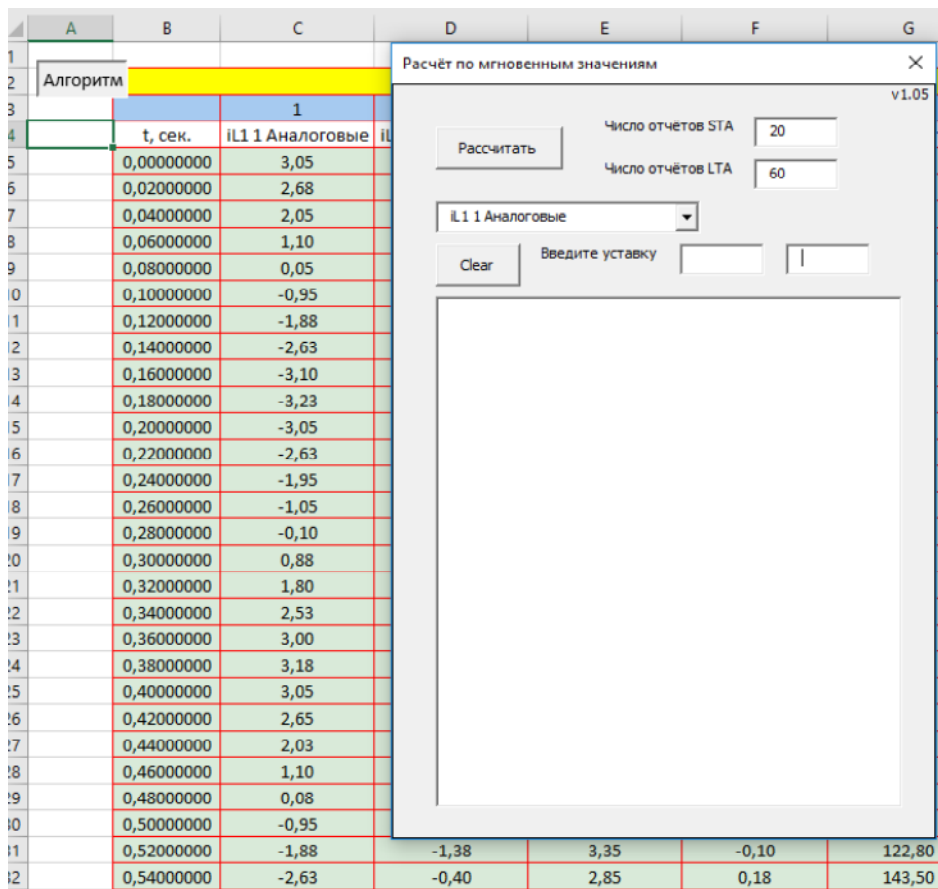


Рис. 6. Реализация алгоритма STA/LTA в VBA

Результатом работы программы становится вывод результатов об интервале времени. Начало полезного события, то есть повреждения, программа обнаружила в момент времени $t = 0,16$ с. Что на 0,01 с больше, чем первое увеличение амплитуды на неповрежденной фазе. Второе значение временного интервала программа показала, потому как закончился массив обработки данных. В реальном случае полагается, что осциллограммы будут сниматься непрерывно, в таком случае второе число в интервале программы будет показывать окончание аварийного сигнала, например при самоустраниющихся ОЗЗ или «клевках» на землю. Что также позволит сделать выводы о характере замыканий на землю.

Заключение

В электрических сетях сложной конфигурации нецелесообразно использование устройств абсолютного замера на индивидуальных фидерах, направленных на оценивание $3I_0$ и $3U_0$, а также требуемых для этого задания абсолютных уставок, что подразумевает наличие их расчетов. При этом уставки должны пересчитываться при любом серьезном изменении топологии сети, что еще раз подчеркивает невозможность использования из-за огромного числа индивидуальных фидеров. Оптимальным вариантом в данном случае становятся устройства относительного замера, не требующего задания уставок.

Метод STA/LTA показывает высокую эффективность в решении задач обнаружения и выявления ОЗЗ. Практика показывает, что при задании определенных параметров алгоритму: размер длинного и короткого окон, границ срабатывания и т. п., его возможно адаптировать к районам с любой топологией сети, при этом не теряя качества дифференцирования полезного сигнала от посторонних шумов. Широкая адаптация к различным районам позволяет говорить о том, что при определенной интерпретации алгоритма его возможно применять в различных областях, связанных с распространением каких-либо волн в определенной среде. Написание программы VBA, реализующей данный алгоритм, позволило с уверенностью говорить о возможности использования данного метода в электроэнергетике.

Программа VBA, в которой реализован метод STA/LTA, показывает возможность использования данного метода для обнаружения однофазных замыканий на землю. Алгоритм STA/LTA позволяет использовать данный метод в непрерывном анализе осциллограмм на наличие повреждений. Важно отметить тот факт, что границы срабатывания задавались в относительных единицах, а не в именованных, как это делается на традиционных защитах, а это значит, метод является адаптивным, что позволяет использовать его в сетях с различными режимами работы нейтрали.

Разработанный специально для электроэнергетической отрасли программный продукт PSCAD является оптимальным инструментом для моделирования процессов, происходящих в электрических сетях. Современный модуль моделирования переходных процессов EMTDC позволяет с высокой точностью воспроизводить поведение коммутационных аппаратов.

Благодарности

Выражаем благодарность М.А. Шамису и Ф.А. Иванову, специалистам компании ЗАО «ЭнЛАБ», которая является представителем RTDS Technologies, Manitoba HVDC Research Centre (MHRC) в России, за предоставленную помощь и материалы по программному комплексу PSCAD, а также предоставление временной лицензии для выполнения моделирования электрической сети, представленной в настоящей статье.

Литература

1. Стогний, Б.С. О необходимости изменений режимов нейтрали в сетях 3–35 кВ / Б.С. Стогний, В.В. Масляник, В.В. Назаров // *Энергетика и электрификация*. – 2001. – № 4. – С. 27–29.
2. Шуин, В.А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ / В.А. Шуин, А.В. Гусенков. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001. – 105 с.
3. Борухман, В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию / В.А. Борухман // *Энергетик*. – 2000. – № 1. – С. 20–22.
4. Бармасов, А.В. Курс общей физики для природопользователей. Колебания и волны: учеб. пособие / А.В. Бармасов, В.Е. Холмогоров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 244 с.
5. Риянов, Л.Н. Определение места повреждения линии короткого замыкания методом STA/SLA / Л.Н. Риянов, Ю.В. Никитин // *Материалы конференции «VII слет молодых энергетиков Башкортостана 14–16.09.2016»*. – 2016.
6. Гурвич, И.И. Сейсмическая разведка: учеб. для вузов / И.И. Гурвич, Г.Н. Боганик. – 3-е изд., перераб. – М.: Недра, 1980. – 551 с.
7. Авроров, С.А. Разработка и исследование методов и программ геоакустической локализации мобильными сейсмическими группами / С.А. Авроров. – Новосибирск, 2010. – 436 с.
8. Havskov, J. Instrumentation in Earthquake Seismology / J. Havskov, G. Alguacil // *Springer International Publishing Switzerland*. – 2016. – P. 149–196. DOI: 10.1007/978-3-319-21314-9_5
9. Dr. Amadej Trnkoczy. Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. Application Note #41, Kinometrics Inc., 1998. – 30 p.
10. Rui-Sheng Jia. Automatic event detection in low SNR microseismic signals based on multi-scale

permutation entropy and a support vector machine / Rui-Sheng Jia // Springer Science Business Media Dordrecht. – 2016. – P. 1–14.

11. Fischer, T. *Automatic location of swarm earthquakes from local network data / T. Fischer // StudiaGeo s.r.o., Pragu. – 2003. – P. 83–98.*

12. Шамис, М.А. *Современные аппаратные и программные средства для изучения устройств релейной защиты и автоматизации энергетических систем / М.А. Шамис, Ф.А. Иванов, Ю.В. Коновалов // Вестник Ангарского государственного технического университета. – 2017. – № 11. – С. 70–73.*

13. Саттаров, Р.Р. *Компьютерное моделирование коротких замыканий в простейших электрических системах – возможности использова-*

ния в обучении / Р.Р. Саттаров, Р.Р. Гарафутдинов // Электротехнические комплексы и системы: материалы междунар. науч.-практ. конф., Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: РИК УГАТУ, 2016. – 294 с.

14. *Перевод встроенной справки симулятора PSCAD. – <https://enlab.ru/products/perevod-vstroennoj-spravki-simuljatora-pscad/> (дата обращения 27.05.2018).*

15. Уокенбах, Д. *Профессиональное программирование на VBA в Excel 2002 : пер. с англ. / Д. Уокенбах. – М.: Издат. дом «Вильямс», 2003. – 784 с.*

16. Бандаренко, С. *Популярный самоучитель Excel 2003 / С. Бандаренко, М. Бондаренко. – СПб.: Питер, 2005. – 320 с.*

Саттаров Роберт Радилович, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электромеханика», Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; sattar.rb@gmail.com.

Гарафутдинов Рустам Разифович, магистрант, кафедра «Электромеханика», Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; garafutdinov_r_r@mail.ru.

Хафизов Ринат Рустемович, магистрант, кафедра «Электромеханика», Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; nysson@yandex.ru.

Поступила в редакцию 17 июля 2018 г.

DOI: 10.14529/power180304

IMPROVING THE RELIABILITY OF 6–35 kV NETWORKS BY USING STA/LTA METHOD

R.R. Sattarov, sattar.rb@gmail.com,

R.R. Garafutdinov, garafutdinov_r_r@mail.ru,

R.R. Khafizov, nysson@yandex.ru

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

Quick and accurate detection of single phase to earth faults (SPEF) in electric grids is a relevant problem. However, the existing methods and tools are not always capable of ensuring sufficient quality of such detection, which is why developing SPEF detection tools and methods is an ongoing effort. This paper proposes an STA/LTA-based SPEF detection method; the STA/LTA method is widely used for detecting seismic activity. The paper describes this method and presents an algorithm of using it to detect SPEF in distribution grids. An SPEF-detection VBA application has been developed based on this algorithm. To test the method, a cable-grid computer model was made in PSCAD, matching a real-world urban grid segment. The model-generated SPEF voltage and current oscillograms were processed by the developed application. Simulation and computation results analysis can identify STA/LTA trigger thresholds for reliable SPEF detection. Trigger boundaries are defined in relative units, making the method adaptive to changes in grid topology. Therefore, testing the STA/LTA method by means of a PSCAD model proves its efficiency and great potential for SPEF detection.

Keywords: single-phase earth faults, reliability, STA/LTA method, SCAD, mode modeling, EPS.

References

1. Stogniy B.S., Maslyanik V.V., Nazarov V.V. [On the Need to Change the Neutral Modes in 3–35kV Networks]. *Energetika i Elektrifikatsiya* [Energy and Electrification], 2001, vol. 4, pp. 27–29. (in Russ.)
2. Shuin V.A., Gusenkov A.V. *Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV* [Protection Against Earth Faults in Electrical Networks 6–10 Square Meters]. Moscow, NTF Energoprogress Publ., *Energetik*, 2001. 105 p.
3. Borukhman V.A. [On the Operation of Selective Earth-Fault Protection in the 6–10 kV Networks and Measures for Their Improvement]. *Energetik*, 2000, vol. 1, pp. 20–22. (in Russ.)
4. Kholmogorov V.E., Barmasov A.V. *Kurs obshchey fiziki dlya prirodopol'zovateley. Kolebaniya i volny: ucheb. posobiye* [The Course of General Physics for Naturalists. Oscillations and Waves: Textbook]. St. Petersburg, BKHV-Peterburg Publ., 2009. 244 p.
5. Riyanov L.N., Nikitin YU.V. [Determination of the Fault Location of the Short-Circuit Line by the CTA/SLA Method]. *Materialy konferentsii "VII Slet molodykh energetikov Bashkortostana"* [Proceedings of the Conference "VII Meeting of Young Power Engineers in Bashkortostan"], 2016.
6. Gurvich I.I., Boganik G.N. *Seysmicheskaya razvedka. Uchebnyk dlya vuzov* [Seismic Exploration. Textbook for High Schools]. 3rd ed. Moscow, Nedra Publ., 1980. 551 p.
7. Avrorov S.A. *Razrabotka i issledovaniye metodov i programm geoakusticheskoy lokatsii mobil'nymi seysmicheskimi gruppami* [Development and Research of Geoacoustic Methods and Programs by Mobile Seismic Groups]. Novosibirsk, 2010. 436 p.
8. Havskov J., Alguacil G. Instrumentation in Earthquake Seismology. *Springer International Publishing Switzerland*, 2016, pp. 149–196. DOI: 10.1007/978-3-319-21314-9_5
9. Dr. Amadej Trnkoczy. *Understanding and Parameter Setting of STA/LTA Trigger Algorithm*. Application Note #41, Kinematics Inc, 1998. 30 p.
10. Rui-Sheng Jia. Automatic Event Detection in Low SNR Microseismic Signals Based on Multi-Scale Permutation Entropy and a Support Vector Machine. *Springer Science Business Media Dordrecht*, 2016, pp. 1–14.
11. Fischer T. Automatic Location of Swarm Earthquakes from Local Network Data. *StudiaGeo s.r.o.*, Pragu, 2003, pp. 83–98.
12. Shamis M.A., Ivanov F.A., Konovalov Yu.V. [Modern Hardware and Software for Studying Relay Protection Devices and Automation of Power Systems]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Angarsk State Technical University], 2017, no. 11, pp. 70–73. (in Russ.)
13. Sattarov R.R., Garafutdinov R.R. [Computer Simulation of Short Circuits in the Simplest Electrical Systems – the Possibility of Using in Training]. *Elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Electrotechnical Complexes and Systems: Materials of the International Scientific Conference], Ufa, RIK UGATU Publ., 2016. 294 p.
14. *Perevod vstroynennoy spravki simulyatora PSCAD* [Translation of the Built-in Help of the PSSAD Simulator]. Available at: <https://ennlab.ru/products/perevod-vstroynennoj-spravki-simulyatora-pscad/> (accessed 27.05.2018).
15. Uokenbakh D. *Professional'noye programmirovaniye na VBA v Excel 2002* [Professional BWA Programming in Excel 2002]. Translation from English, Moscow, Izdatel'skiy dom "Vil'yame" Publ., 2003. 784 p.
16. Bandarenko S. *Populyarnyy samouchitel' Excel 2003* [The Popular Tutorial "Excel 2003"], St. Petersburg, Piter Publ., 2005. 320 p.

Received 17 July 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Саттаров, Р.Р. Повышение надежности сетей 6–35 кВ путем применения метода STA/LTA / Р.Р. Саттаров, Р.Р. Гарафутдинов, Р.Р. Хафизов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 30–37. DOI: 10.14529/power180304

FOR CITATION

Sattarov R.R. Garafutdinov R.R. Khafizov R.R. Improving the Reliability of 6–35 kV Networks by Using STA/LTA Method. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 30–37. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180304