



НОРМИРОВАНИЕ АМПЛИТУДЫ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ФИДЕРА С ОДНОФАЗНЫМ ЗАМЫКАНИЕМ НА ЗЕМЛЮ

А.И. Федотов¹, Л.В. Ахметвалеева¹, Р.Ш. Басыров², Г.В. Вагапов¹,
Е.А. Федотов¹

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технический университет им.
А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия

Резюме: Цель работы заключается в теоретическом и экспериментальном исследовании процессов при однофазных замыканиях на землю в электрических распределительных сетях 6-10-35 кВ с изолированным режимом работы нейтрали. Используется метод математического нормирования, применяемый при анализе спектрального состава токов и напряжений с целью повышения информативности выделяемых высших гармонических составляющих тока и напряжения. В статье приведено сопоставление результатов спектрального анализа с учетом и без учета математического нормирования, полученных на имитационной модели. Натурные эксперименты продемонстрировали эффективность использования метода математического нормирования высших гармонических составляющих тока и напряжения при различных видах однофазных замыканий на землю. Результаты натурных экспериментов предоставили возможность улучшения методики раннего выявления однофазных замыканий на землю в электрических сетях 6-10-35 кВ с изолированным режимом работы нейтрали. Выводом исследования является возможность существенно более точного выделения резонансных частот спектра токов и напряжений, получаемых с использование метода математического нормирования. Одновременно продемонстрирована возможность более ранней и уточненной локализации фидера с замыканием на землю на основе более точного выделения резонансных частот токов и напряжений.

Ключевые слова: высшие гармонические составляющие тока и напряжения, однофазные замыкания на землю.

Для цитирования: Федотов АИ., Ахметвалеева ЛВ., Басыров РШ., Вагапов ГВ., Федотов ЕА. Нормирование амплитуды высших гармоник при определении фидера с однофазным замыканием на землю // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 58-68. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-58-68.

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта темы научного исследования «Методы повышения надежности систем электроснабжения и качества электроэнергии на основе электрохимических накопителей и цифрового мониторинга состояния распределительных электрических сетей» (мнемокод 0672-2020-0007, № FZSW-2020-0007).

RATING OF AMPLITUDES OF HIGH HARMONICS IN DETERMINING FEEDER WITH SINGLE-PHASE GROUND FAULT

¹AI Fedotov, ¹LV Akhmetvaleeva, ²RS Basyrov, ¹GV Vagapov, ¹EA Fedotov

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia

Abstract: The aim of the paper is theoretical and experimental research of processes during the single-phase ground faults in electrical distribution grids of 10/06/35 kV with isolated neutral mode. The mathematical method of rationing is used for the analysis of the spectral composition of currents and voltages increasing the information content of the allocated higher harmonics of

current and voltage. The paper show a comparison of the results of spectral analysis with and without taking into account the mathematical rationing obtained on the simulation model. Field experiments have demonstrated the effectiveness of using of the method of mathematical rationing of the higher harmonic components of current and voltage for various types of single-phase ground faults. The results of field experiments provided an opportunity of improving the methodology of yearling detection of single-phase ground faults in electric grids of 6-10-35 kV with an isolated mode of neutral. The conclusion of the research is the possibility of a significantly more accurate selection of the resonant frequencies of the spectrum of currents and voltages obtained by using of the method of mathematical rationing. The possibility of earlier and more precise localization of the feeder with ground fault is shown on the base more precise selection of the resonant frequency currents and voltages.

Keywords: *higher harmonics of current and voltage, single-phase ground fault.*

For citation: Fedotov AI , Akhmetvaleeva LV, Basyrov RS, Vagapov GV, Fedotov EA. Rating of amplitudes of high harmonics in determining feeder with single-phase ground fault. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020; 22(1):58-68. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-58-68.

Введение

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются достаточно часто возникающим видом повреждений в воздушных распределительных электрических сетях (РЭС) напряжением 6-35 кВ с изолированным режимом работы нейтрали. По различным оценкам ОЗЗ составляют 60-80 % от общего числа повреждений [1]. Не смотря на значительное число публикаций по тематике проблемы обнаружения мест ОЗЗ, часть из которых представлена в [2-5], на сегодняшний день не существует общепринятого технического решения [6, 7, 8]. Как следствие, рассматриваемая проблема не теряет своей актуальности [9,10]. Одновременно, различные производители релейной защиты и автоматики закладывают те или иные варианты реализации технических решений [11, 12, 13] исходя из существенного экономического эффекта. В работах [14,15] предложено развитие методики диагностирования ОЗЗ на ранних стадиях его проявления на основе анализа высших гармоник (ВГ) тока и напряжения для РЭС, выполненных воздушными линиями (ВЛ) электропередачи. Для определения места несимметрии на ВЛ в общем спектре выделяется так называемая «резонансная» гармоника, значение частоты которой связано с расстоянием до места повреждения [13]. В перечисленных публикациях априори принято, что амплитуда «резонансной» гармоники, которая и служит её маркером, всегда выше амплитуды соседних ВГ. Проведенные исследования на имитационных моделях показали, что наличие сопротивления в месте замыкания на землю плюс характер замыкания в виде перемежающейся дуги могут замаскировать «резонансную» гармонику. В настоящей работе предлагается методика её распознавания.

Теоретические основы методики исследования

Методика раннего диагностирования ОЗЗ основывается на анализе спектра фазных токов и напряжений. Одной из наиболее важных задач при обработке спектра фазных токов и напряжений является подход на основе разложения сигналов в ряд Фурье. Для повышения универсальности и уменьшения размерности задачи использовалось быстрое преобразование Фурье (БПФ). Данный процесс достаточно подробно раскрывался в публикациях [3]. Однако при его реализации возникали определенные особенности с интерпретацией результатов БПФ в виде не четко выраженного максимума ВГ. В этой связи необходимо проводить предварительную нормировку ВГ фазных токов и напряжения нулевой последовательности, измеряемого на шинах центра питания, по гармоникам фазного напряжения той фазы, где произошло замыкание на землю. В идеале необходимо было бы использовать фазное напряжение именно в месте замыкания ВЛ на землю. Однако доступным для измерения является только напряжение на шинах центра питания. В силу незначительной величины токов ОЗЗ в воздушных электрических сетях 6-10 кВ предложено для нормирования использовать фазное напряжение в центре питания.

Существует достаточное количество разнообразных математических подходов к решению проблемы нормирования. Достаточно часто для решения задач используется формула Байеса. Но, например, в [16] показано, что возможно использование более простой формулы для решения выше обозначенной проблемы

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i}{\max X}, \quad (1)$$

где $X=\{x_1, x_2, \dots, x_x\}$ значения входных амплитуд ВГ токов и напряжений, а \tilde{x}_i нормированное значение. Одним из значимых ограничений нормирования по формуле (1) выступает интервал нормирования $[1, \min X / \max X]$. Применительно к рассматриваемой задаче нормирование выполнимо исходя из требований к интервалу нормирования.

Для теоретического анализа адекватности применения метода математического нормирования было использовано имитационное моделирование на программно-аппаратном комплексе *RTDS*. Однолинейная схема модели РЭС представлена на рис.1, где было принято, что ВЛ выполнены проводами марки АС-120, трансформаторы имеют одинаковую номинальную мощность 400 кВА и загружены на 70%, длины линий: $L_{11}=L_{22}=L_2=L_3=L_4=L_5=16$ км. Моделирование ОЗЗ на основе коммутации ключа *K* осуществлялось на фазе «А» (одна коммутация на полупериоде промышленной частоты, угол задержки замыкания ключа по отношению к нулевому значению фазного напряжения принят 30° . Переходное активное сопротивление в месте замыкания составило 100 Ом. В процессе моделирования не использовалась схема натурального эксперимента вследствие наличия ограничения у программно-аппаратного комплекса *RTDS* по количеству точек моделирования.

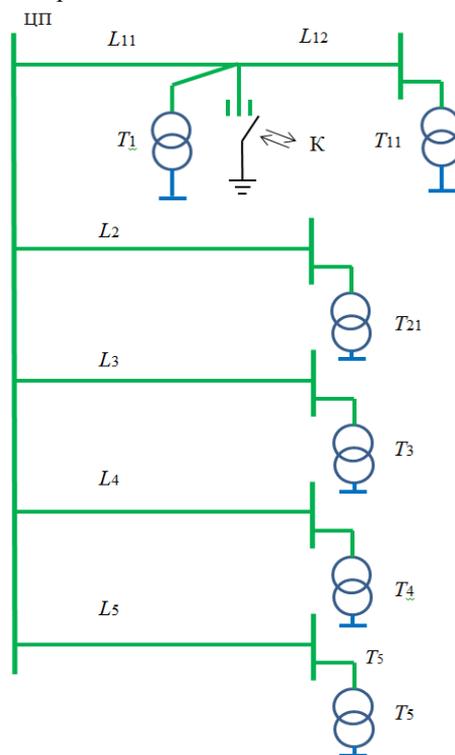


Рис. 1. Схема РЭС модельного эксперимента:

ЦП – центр питания; *L* – воздушная линия электропередачи; *T* – потребительская трансформаторная подстанция; *K* – коммутационный ключ для моделирования ОЗЗ.

Фазные осциллограммы напряжений представлены на рис.2, где обозначение шин измерения на модели *N4* соответствует фазе «а» шин ЦП, *N5* – фазе «b», *N6* – фазе «с». Результаты БПФ после цифрового подавления первой гармоники для тока фазы «А» представлены на рис. 3, где размерность токов по оси ординат – килоамперы. Они дают основание считать, что в сигнале проявляются две «резонансные» гармоники. Далее к полученному спектру было применено согласно (1) нормирование по высшим гармоникам напряжения фазы «а», рис. 2. Для этого на основе БПФ был получен спектральный состав и получены следующие коэффициенты нормирования:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_3 = 1,24; \tilde{x}_5 = 0,98; \tilde{x}_7 = 0,68; \tilde{x}_9 = 0,52; \tilde{x}_{11} = 0,37; \tilde{x}_{13} = 0,27; \tilde{x}_{15} = 0,21; \\ \tilde{x}_{17} = 0,20; \tilde{x}_{19} = 0,20; \tilde{x}_{21} = 0,19. \end{aligned} \quad (2)$$

На рис. 4 представлена сомещенная спектрограмма токов, где нормализованные гармоники масштабированы до значения максимальной гармоники 1,5 А.

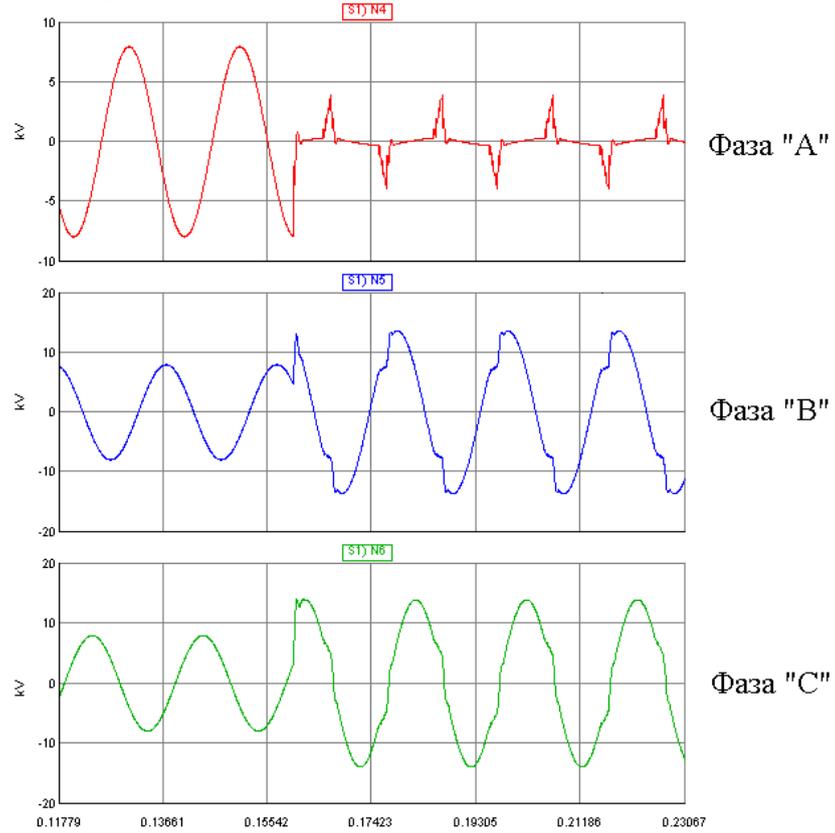


Рис. 2. Фазные напряжения на шинах ЦП

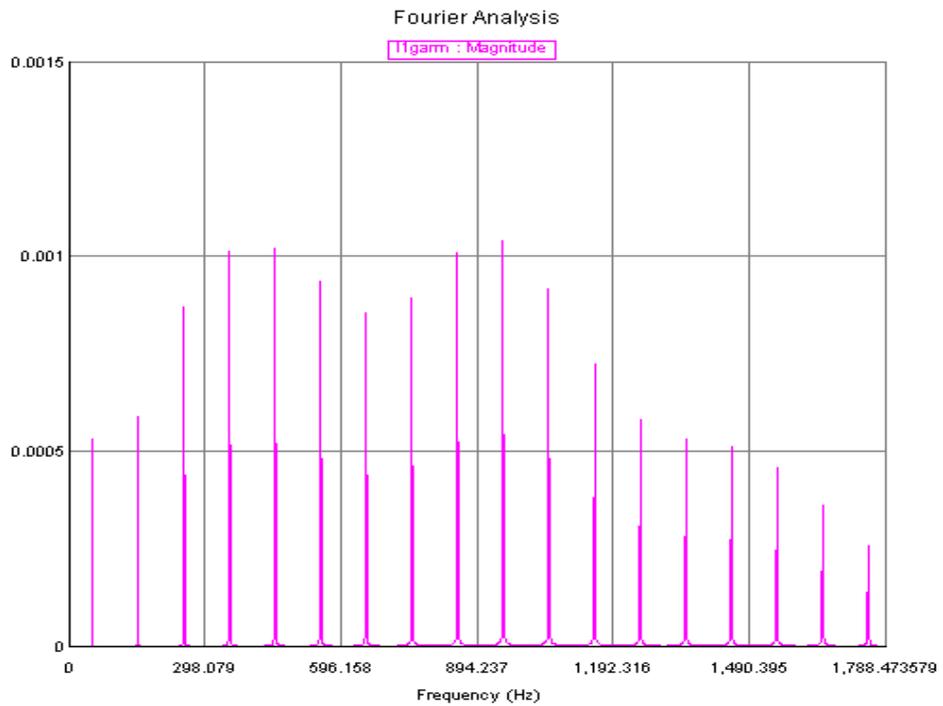


Рис. 3. Спектрограмма фазного тока линии

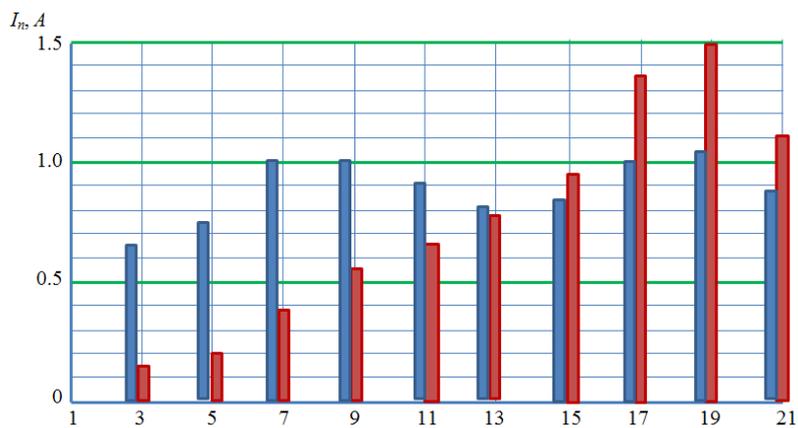


Рис. 4. Диаграмма спектрального состава ВГ тока фазы «А» на входе линии L11.

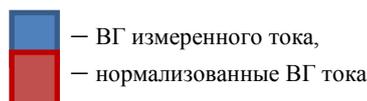


Рис. 4 демонстрирует, что, нормирование позволяет более четко идентифицировать «резонансную» ВГ: по исходному ненормированному спектру можно заключить, что первой «резонансной» является либо 7-я, либо 9-я ВГ. После нормирования ВГ хорошо видно, что первой «резонансной» является 19-я гармоника, что подтверждается и частотной характеристикой рассматриваемой сети, рис. 3, получаемой при подключении однофазного источника ВГ вместо короткозамыкателя к линии L11.

Методика проведения натурального эксперимента

Для практической апробации выше изложенных теоретических основ была проведена серия натуральных экспериментов в действующих РЭС напряжением 10 кВ. Схема натурального эксперимента представлена на рис. 5. Натурное моделирование различных видов замыканий предусмотрено на фидерной отпайке, обозначенной цифрой 2. Цифрой 1 обозначены места подключения измерительных приборов. Одновременно, подключение измерительных приборов осуществлялось на потребительских подстанциях со стороны 0,4 кВ для проведения вторичного контроля измеряемых параметров тока и напряжения.

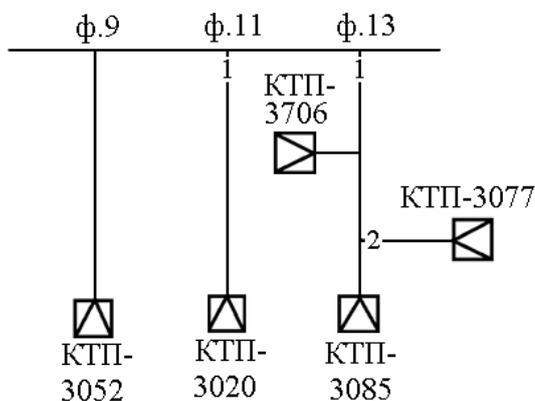


Рис. 5. Схема натурального эксперимента:

1 – место подключения измерительных приборов; 2 – место установки разрядника

Рис. 6 иллюстрирует экспериментальную установку моделирования перемежающего дугового ОЗЗ, установленную на опоре ВЛ и подключенную, с одной стороны, к фазному проводу, с другой – к заземлителю.

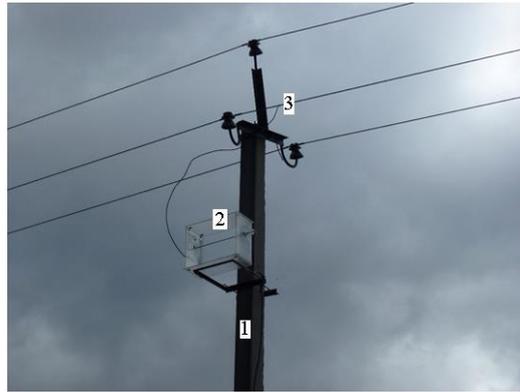
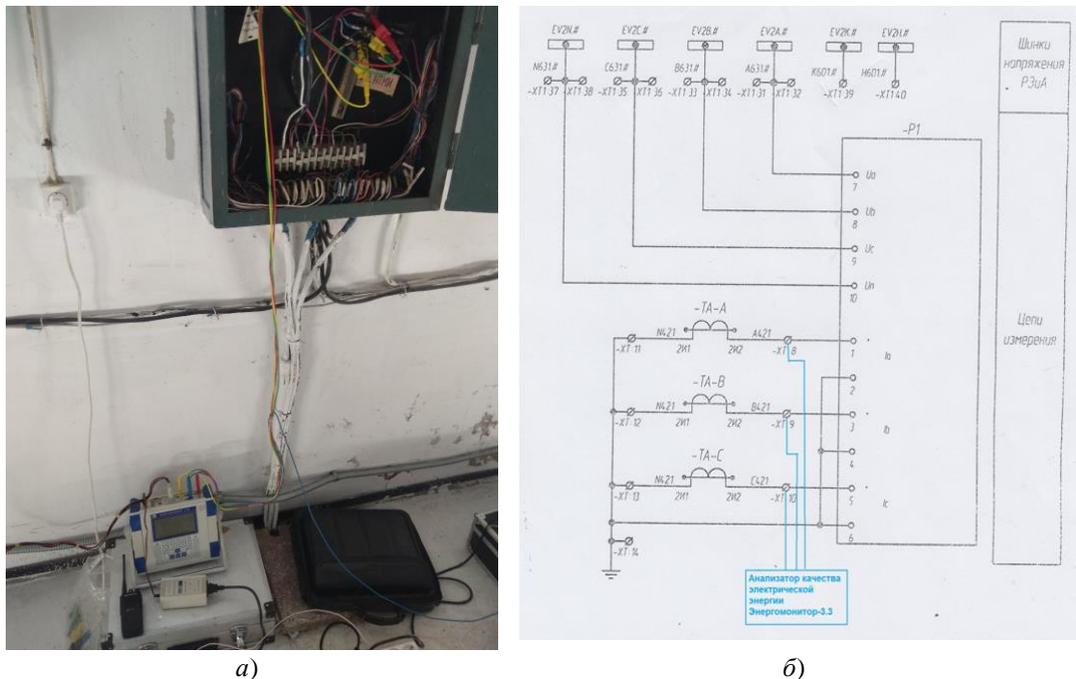


Рис. 6. Иллюстрация натурального эксперимента ОЗЗ через разрядник на опоре ВЛ: 1 – опора ВЛ; 2 – разрядник; 3 – место подключения разрядника к фазному проводу

В качестве фиксирующих измерительных устройств использовались поверенные анализаторы качества электрической энергии «Энергомонитор 3.3». Рис. 7 иллюстрирует подключение измерительных приборов и схему подключения.



а) – общий вид подключения измерительного прибора;
 б) – схема подключения измерительного прибора в начале фидера

Основные результаты натурального эксперимента

Обработка результатов экспериментов осуществлялась в программном продукте *Matlab* на основе разработанного программного кода. На рис.8 приведены в качестве примера осциллограммы напряжение фаз «А», «В» и «С» на фидере с повреждением. Поврежденная фаза «С» имеет ярко выраженный характер.

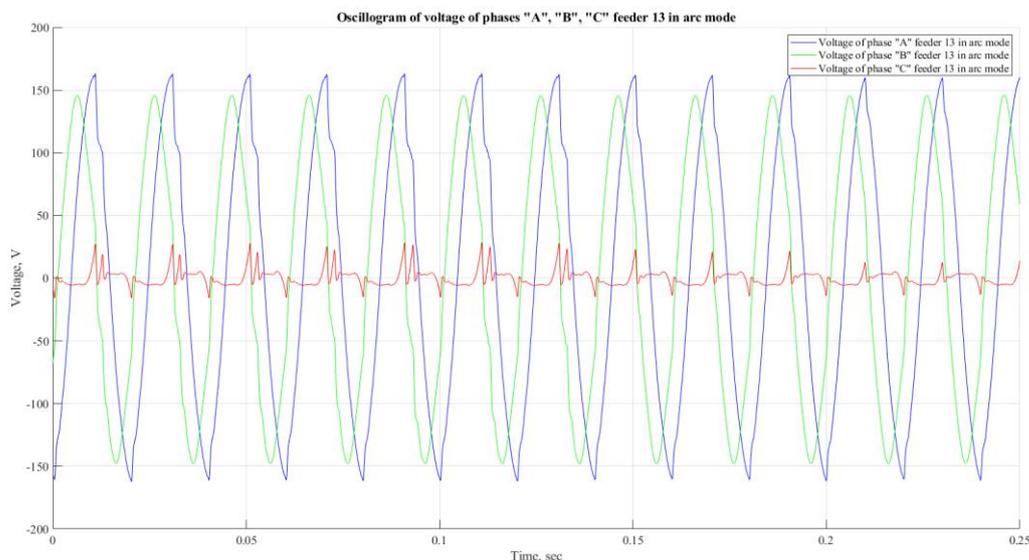


Рис. 8. Осциллограмма напряжение фаз *A*, *B* и *C* на фидере с ОЗЗ в режиме дугового замыкания

Применение БПФ предоставляет возможность определения фазы с повреждением, в том числе и на начальном этапе зарождения ОЗЗ. На рис. 9 представлен результаты БПФ анализа утроенного тока нулевой последовательности ($3I_0$) нормального и аварийного режимов. Окно выборки соответствует рис. 8, из чего следует, что представленный на рис. 9 спектр является усредненным: на рассматриваемом интервале наблюдения имеет место изменение характера дугового замыкания (меняется форма кривой напряжения фазы «С», рис. 8).

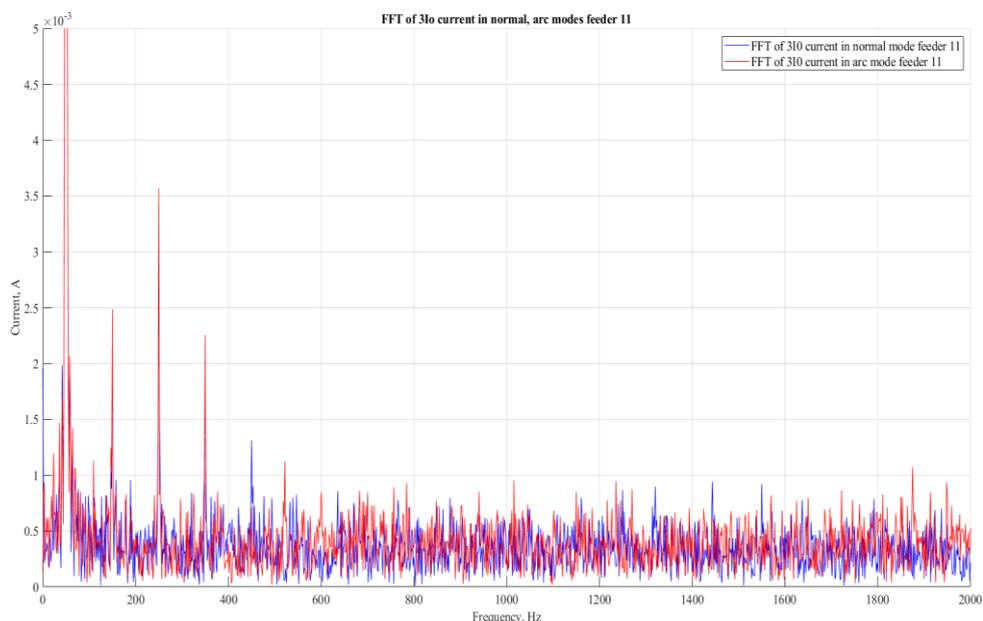


Рис. 9. БПФ-анализ тока $3I_0$ в нормальном режиме и в режиме дугового ОЗЗ

Для однозначного выделения резонансных ВГ из всего спектра был использован метод математического нормирования. В качестве нормирующего значения была принята 3 гармоника.

БПФ тока $3I_0$ иллюстрирует рис. 10 до и после математического нормирования. По оси абсцисс обозначены порядковые номера ВГ, кратные 50 Гц. Наличие четных гармоник объясняется неодинаковым характером ОЗЗ для положительного и отрицательного полупериодов напряжения, рис. 8.

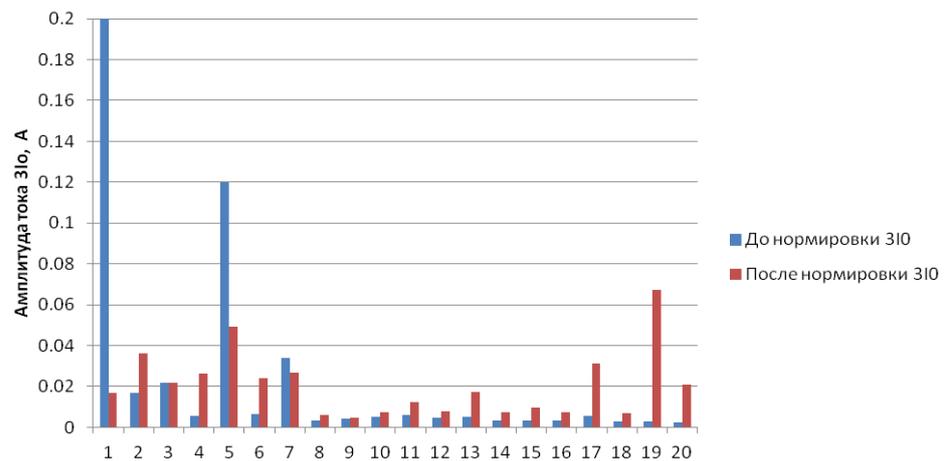


Рис. 10. Диаграмма спектрального состава ВГ тока $3I_0$

Амплитуды ВГ тока в области второй «резонансной» гармоники второй группы после применения метода математического нормирования имеют более ярко выраженный характер, что позволяет производить их существенно более точную идентификацию места ОЗЗ [4, 7, 9].

Обсуждение результатов

Для надежного выделения именно резонансной гармоники необходимо производить нормирование высших гармоник. Оно заключается в приведении имеющего место состава высших гармоник к теоретическим условиям построения частотных характеристик, когда напряжение тестового сигнала не изменяется при изменении его частоты.

В конкретном случае (рис. 10) нормирование не оказывает существенного влияния на амплитуды канонических нечетных ВГ в начальной части спектра, где находится первая «резонансная» гармоника (5-я высшая гармоника). Вторая «резонансная» гармоника (11-я высшая гармоника) может быть выделена только по результатам нормирования.

Частотные характеристики РЭС зависят от места подключения тестового сигнала. В связи с этим первоначально необходимо установить поврежденный фидер. Методика его идентификации заключается в сравнении уровня высших гармоник в одноименных фазах воздушных линий, измеряемых на трансформаторах тока, установленных в распределительном устройстве центра питания. Максимальный их уровень соответствует поврежденному фидеру. Наличие в начальной части спектра в аварийном режиме неканонических четных ВГ иллюстрирует (рис. 10). После их нормирования они существенно увеличились. Тем самым получаем дополнительный индикатор появления в сети ОЗЗ и маркер поврежденного фидера.

Выполненные имитационные расчеты показали, что при определенных соотношениях параметров электрической сети и величины переходного сопротивления может быть смещение на одну нечетную гармонику резонанса в сравнении с идеальным замыканием на землю.

Заключение

Использование частотных характеристик РЭС, получаемых для режимов однофазной поперечной несимметрии, позволяет сопоставить их резонансы с расстоянием до места однофазного замыкания на землю. Резонансные частоты определяются по спектрам токов отходящих от ЦП воздушных линий и спектрам напряжений на шинах ЦП. Наличие переходного активного сопротивления в месте контакта провода с землей оказывает негативное влияние на распознавание искомой резонансной частоты, поскольку увеличение сопротивления приводит к «уплощению» максимумов амплитудно-частотных характеристик.

Для повышения чувствительности и достоверного выделения резонансных ВГ необходимо использовать методику их нормализации, т.е. осуществлять их перерасчет для классической ЧХ, когда тестовый источник переменной частоты имеет одинаковую амплитуду сигнала на любой частоте. Для этого предлагается использовать форму фазного напряжения на шинах центра питания и по ней восстанавливать форму напряжения в месте замыкания на землю. В работе рассмотрен вариант нормировки ВГ тока при условии относительно малой величины переходного сопротивления. Получены соответствующие коэффициенты для перерасчета ВГ тока.

Полученные на имитационной модели осциллограммы ОЗЗ через активное сопротивление порядка 100 Ом и более показали необходимость учета влияния остаточного

емкостного напряжения на линии при погасании дуги, что потребует использования более сложного алгоритма для расчета коэффициентов нормирования высших гармоник.

Проведенные натурные эксперименты продемонстрировали возможность использования ВГ тока и напряжения, как для определения поврежденного фидера, так и для определения фазы с повреждением. Применение метода математического нормирования позволяет более точно выделять резонансные гармоники тока и напряжения и всего спектра частот, что свою очередь повышает точность метода определения ОЗЗ и позволяет существенно поднять чувствительность, что в свою очередь положительно сказывается на экономической эффективности функционирования электрических сетей вследствие снижения времени поиска ОЗЗ и недоотпуска электроэнергии конечному потребителю.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта темы научного исследования «Методы повышения надежности систем электроснабжения и качества электроэнергии на основе электрохимических накопителей и цифрового мониторинга состояния распределительных электрических сетей» (мнемокод 0672-2020-0007, № FZSW-2020-0007).

Литература

1. Манилов А., Барна А. Способ обеспечения чувствительности защит. ОЗЗ в сетях 6–10 кВ с комбинированным заземлением нейтрали. Новости электротехники 2012. №6 (78).
2. Fedotov A., Fedotov E., Chernova N., et al. Sensors and methods for the diagnosis of higher harmonics in overhead power lines // Elektroenergetika 2015. September 16-18, 2015, Stará Lesná, Slovakia. 2015. pp. 50-52.
3. Fedotov A., Abdullazyanov E., Grazkova L., et al. Detection of places of single-phase ground fault by frequency of the resonance. // 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering, 2016. Latvia Riga Technical University. 2016. pp. 214-219.
4. Fedotov A., Vagapov G., Chernova N. Location of single-phase ground fault by positive, negative and zero sequence of overhead power lines in ungrounded power grids of 6-10 - 35 kV level voltage // Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering Elektroenergetika 2017 September 12-14, 2017, Stará Lesná, Slovak Republic. Technical University of Košice. pp. 384-388.
5. Fedotov A., Vagapov G., Basirov R., Abdullin L., Grackova L. Single-Phase Ground Fault Test of Overhead Power Lines in Ungrounded Power Grids of 6-10 kV / 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (Riga, 12-14 November, 2018). Riga. 2018. pp. 1-5.
6. Fedotov A., Vagapov G., Abdullin L. Identificacin of feeder with single-phase ground fault / 2019 International Conference on Industrial Engineering Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. Sochi, Russian Federation. 25-29 March 2019. pp. 1-5.
7. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Чернова Н.В. Распределение токов и напряжений вдоль воздушных линий электропередачи напряжением 6-35 кВ на «резонансных» частотах при ОЗЗ // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2017. №5-6. С.69-78.
8. Федотов А.И., Макаров В.Г., Вагапов Г.В., и др. Спектральный состав токов и напряжений воздушной распределительной электрической сети с изолированной нейтралью при однофазных замыканиях на землю и его использование для определения мест повреждения // Известия вузов. Электромеханика. 2019. № 2. С. 72-84.
9. Абдуллин Л.И. Раннее выявление замыканий на землю по параметрам напряжения на приемных подстанциях // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. №11-12. С. 133-136.
10. Вагапов Г.В., Амосов А.М., Чернова Н.В., и др. Экспериментальное исследование проявления высших гармоник напряжения на стороне 0,4 кВ потребительских подстанций как метода ранней диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью // Известия вузов. Электромеханика. 2014. №4. С. 89-92.
11. Хакимзянов Э. Ф., Мустафин Р. Г., Федотов А.И., и др. Выявление режима однофазного замыкания на землю на основе измерения сопротивления петли замыкания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 11-12. С. 107-113.
12. Хузяшев Р.Г., Кузьмин И.Л., Новиков С.И., и др. Алгоритмы локации сигналов тока и напряжения при однофазных замыканиях на землю в распределительных воздушных сетях // Электротехника. 2015. № 2. С. 41-44.
13. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Абдуллин Л.И. Закономерности изменения «резонансных» частот электропередачи в условиях однофазной поперечной несимметрии // 8 Междунар. науч.-техн. конф. «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов»: сб. мат. докл. Благовещенск, 2015. С. 24-30.

14. Хузяшев Р.Г., Кузьмин И.Л., Новиков С.И., и др. Исследование скорости распространения сигналов переходных процессов по воздушным линиям электропередачи // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. № 3. С. 24-31.

15. Новиков С.И., Кузьмин И.Л., Хузяшев Р.Г. Простейшие алгоритмы обнаружения сигналов переходного процесса в линиях электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. № 7-8. С. 114-125.

16. Долгов А.И., Маршаков Д.В. О применимости математического масштабирования и нормирования // Вестник Донского государственного технического университета. 2018. Т. 18. № 1. С. 92-101.

17. Abdul Barik Md.; Ameen Gargoom ; Apel Mahmud Md. A Decentralized Fault Detection Technique for Detecting Single Phase to Ground Faults in Power Distribution Systems With Resonant Grounding. IEEE Transactions on Power Deliver. 2018.V. 33, Is.: 5.

18. Krasnykh A.A., Krivoshein IL., Kozlov AL. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).

19. Peng Ji., Yujie Pei., Shihui Zhao. et al. A Novel Location Method for Single-phase Grounding Fault for Distribution Network Based on Transient Technique. 2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC) doi: 10.1109/CCDC.2018.8408033.

Авторы публикации

Федотов Александр Иванович – д-р. техн. наук, проф., в.н.с. отдела НИОКР Инжиниринговый центр, Казанский государственный энергетический университет.

Ахметвалеева Ляля Вахитовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника, Казанский государственный энергетический университет.

Басыров Рафик Шайхолович – доц. кафедры «Техническая физика», Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ.

Вагапов Георгий Валериянович – канд. техн. наук, доцент, с.н.с. отдела НИОКР Инжиниринговый центр, Казанский государственный энергетический университет.

Федотов Евгений Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Manilov A, Barna A. OZZ in grids of 6-10 kV with combined neutral grounding. The way to ensure of the sensitivity of the defenses. *Electrical News*. 2012;6 (78) .

2. Fedotov A, Fedotov E, Chernova N, et al. Sensors and methods for the diagnosis of higher harmonics in overhead power lines. *Elektroenergetika* 2015. September 16-18, 2015, Stará Lesná, Slovakia. 2015. pp. 50-52.

3. Fedotov A, Abdullazyanov E, Grazkova L, et al. Detection of places of single-phase ground fault by frequency of the resonance. *57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering, 2016. Latvia Riga Technical University*. 2016. pp. 214-219.

4. Fedotov A, Vagapov G, N. Chernova. Location of single-phase ground fault by positive, negative and zero sequence of overhead power lines in ungrounded power grids of 6 - 10 - 35 kV level voltage // Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2017 September 12-14, 2017, Stará Lesná, Slovak Republic. Technical University of Košice. 2017.pp. 384-388.

5. Fedotov A, Vagapov G, Basirov R, et al. Single-Phase Ground Fault Test of Overhead Power Lines in Ungrounded Power Grids of 6-10 kV / 2018. *IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University* (Riga, 12-14 November, 2018). Riga, 2018. pp. 1-5. doi:10.1109/RTUCON.2018.8659833.

6. Fedotov A, Vagapov G, Abdullin L. Identificacin of feeder with single-phase ground fault / 2019 International Conference on Industrial Engineering Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. Sochi, Russian Federation, 25-29 Marc 2019. pp. 1-5. doi: 10.1109/ICIEAM.2019.8742969.

7. Fedotov AI, Vagapov GV, Chernova NV. Distribution of currents and voltages along the overhead power lines with a voltage of 6 - 35 kV at “resonant” frequencies in case of SPG. *University News. Energy issues*. 2017;5-6:69-78.

8. Fedotov AI, Makarov VG, Vagapov GV, et al. Spectral composition of currents and voltages of an air distribution electric grid with isolated neutral in case of single-phase earth faults and its using for

determining the places of fault. *University News. Electromechanics*. 2019;2:72-84.

9. Abdullin LI. Early detection of earth faults by voltage parameters at receiving substations. *University News. Energy Issues*. 2013;11-12:133-136.

10. Vagapov GV, Amosov AM, Chernova NV, et al. Experimental research of display higher voltage harmonics on the side 0.4 kV substations the consumer as a method for early diagnosis of single phase ground faults in grids with isolated neutral. *University News. Electromechanics*. 2014;4:89-92.

11. Khakimzyanov EF, Mustafin RG, Fedotov AI, et al. Identification of the single-phase ground fault mode based on measuring the loop resistance. *University News. Energy issues*. 2014;11-12:107-113.

12. Khuzyashev RG, Kuzmin IL, Novikov SI, et al. Algorithms for locating current and voltage signals with single-phase earth faults in air distribution networks. *Electrical Engineering*. 2015;2:41-44.

13. Fedotov AI, Vagapov GV, Abdullin LI. Laws of change "resonant" frequency of transmission under single-phase transverse asymmetry. *8 Int. scientific and technical conf. "Energy: management, quality and efficiency of energy use": Sat. mat. doc. Blagoveshchensk*, 2015. pp. 24-30.

14. Khuzyashev RG, Kuzmin IL, Novikov SI, et al. The study of the propagation speed of transient signals overhead power lines. *Electrical and information systems and systems*. 2017;3:24-31.

15. Novikov SI, Kuzmin IL, Khuzyashev RG. Simple Transient Signal Detection Algorithms in Power Lines. *University News. Energy issues*. 2017;7-8:114-125.

16. Dolgov AI, Marshakov DV. On applicability of mathematical scaling and normalization in applied problem solving. *Vestnik of DSTU*, 2018,18(1):92-101.

17. Abdul Barik Md, Ameen Gargoom, Apel Mahmud Md. A Decentralized Fault Detection Technique for Detecting Single Phase to Ground Faults in Power Distribution Systems With Resonant Grounding. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018;33:Is.: 5.

18. Krasnykh AA, Krivoshein IL, Kozlov AL. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911013.

19. Peng Ji, Yujie Pei, Shihui Zhao, et al. Novel Location Method for Single-phase Grounding Fault for Distribution Network Based on Transient Technique. 2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC) doi: 10.1109/CCDC.2018.8408033.

Authors of the publication

Alexander I. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Lyalya V. Akhmetvaleeva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Rafik S. Basyrov – Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia.

Georgii V. Vagapov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Evgeniy A. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

20 ноября 2019 г.