

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



УДК 621.3.056.5

DOI:10.30 724/1998-9903-2021-23-1-146-155

ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

А.И. Федотов¹, Г.В. Вагапов¹, А.Ф. Абдуллазянов¹, А.М. Шаряпов²

¹Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия
vagapov@list.ru

Резюме. ЦЕЛЬ. Внедрение цифровой системы мониторинга однофазных замыканий на землю на воздушных линиях электропередачи в распределительных электрических сетях напряжением 10 кВ с изолированным режимом работы нейтрали. МЕТОДЫ. Реализация программного обеспечения осуществлена на основе использования математических моделей имитационного моделирования. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье представлена внедренная цифровая система мониторинга повреждений на воздушных линиях электропередачи напряжением 10 кВ с изолированным режимом работы нейтрали в действующих распределительных электрических сетях, основанная на выделении высших гармонических составляющих токов и напряжений, как один из технических вариантов решения проблемы определения однофазных замыканий на землю. Представлены особенности технических решений по выделению полезных сигналов, реализованных в цифровой системе мониторинга. Одновременно, приведены компоновочные решения по подключению системы мониторинга к вторичным измерительным цепям в распределительном устройстве 10 кВ подстанции 110/10 кВ. На основе выше обозначенных технических решений и ранее разработанных математических моделей, а также с учетом результатов серий натурных экспериментов по моделированию различных видов однофазных замыканий на землю в действующих распределительных электрических сетях, реализовано программное обеспечение дистанционного мониторинга распределительной электрической сети и выявления различных видов однофазных замыканий на землю. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Представлены основные функционалы разработанного программного обеспечения с описанием решений отдельных технических задач. Приведены дальнейшие направления исследований в области диагностики и мониторинга однофазных замыканий на землю в распределительных электрических сетях, выполненных воздушными линиями электропередачи на основе анализа высших гармонических составляющих.

Ключевые слова: мониторинг, линии электропередачи, цифровая система, программное обеспечение, замыкание на землю.

Для цитирования: Федотов А.И., Вагапов Г.В., Абдуллазянов А.Ф., Шаряпов А.М. Цифровая система мониторинга повреждений на линиях электропередачи // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 146-155. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155.

DIGITAL POWER LINES FAULTS MONITORING SYSTEM

AI. Fedotov¹, GV. Vagapov¹, AF. Abdullazyanov¹, AM. Sharyapov²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia
vagapov@list.ru

Abstract. *THE PURPOSE.* paper show digital system for monitoring of single-phase earth faults on overhead power lines of 10 kV voltage in distribution power grids with an isolated neutral mode. *METHODS.* Digital system analyze frequency and amplitude of higher harmonics of voltage and current. The digital monitoring system includes the features of technical solutions for the selection of higher harmonics. *RESULTS.* Simultaneously, the paper shows the layout solutions for connecting a monitoring system to the control circuits on the 10 kV side of 110/10 kV voltage substation. Software implemented for the far monitoring of the power grids and can detect of various types of single-phase earth faults. *CONCLUSION.* Software base on the mathematical models, as well as taking into account the results of a series of full-scale experiments of modeling various types of single-phase earth faults in the distribution power grids. The main functionalities the developed software presented for the description of solutions. Paper show further directions of research of the diagnostics and monitoring of single-phase earth faults in distribution power grids with overhead power lines based on the analysis of higher harmonic components.

Keywords: Monitoring, power lines, digital system, software, earth fault.

For citation: Fedotov AI, Vagapov GV, Abdullazyanov AF, Sharyapov AM. Digital power lines faults monitoring system. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):146-155. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155.

Введение и литературный обзор

Проблема однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в электрических распределительных сетях напряжением 6-10-35 кВ с изолированным режимом работы нейтрали (РЭС) не нова и является актуальной в настоящее время [1, 2, 3, 4, 5], не смотря на значительное количество ежегодно публикуемых работ по данной тематике [6, 7, 8]. Исторически ретроспектива решения обозначенной проблемы [9] указывает на существенное количество задействованных ресурсов, как временных, так и научно-практических. Данное обстоятельство связано, в первую очередь с вариативностью видов ОЗЗ [10, 11, 12, 13, 14]. Во-вторых, физические процессы в РЭС, протекающие при ОЗЗ, определяются параметрами режимов функционирования не только РЭС, но и потребителей, получающих питание на рассматриваемом классе напряжения [15, 16, 17, 18, 19]. Совокупность данных параметров определяет существенную вариативность конечных процессов в РЭС в режиме ОЗЗ, и как следствие, отсутствие единого диагностического признака наступления режима ОЗЗ, в отличие от других аварийных режимов, где, как правило, присутствует один диагностический признак, позволяющий осуществить построение систем релейной защиты и автоматики, основанных на результатах его измерений [20, 24]. Соответственно, проводимые исследования по данной проблеме стараются выявить несколько диагностических признаков, проявляющихся при всем многообразии как видов ОЗЗ, так и вариативности режимов функционирования РЭС и потребителей.

Ранее опубликованные результаты исследований предлагают различные технические решения, основанные на: использовании высших гармонических составляющих [1-4] и использовании результатов математического моделирования параметров воздушных линий в режиме повреждения [5-6]. Идентификация резонансных высших гармонических составляющих напряжения возможна как на шинах питающих подстанций, так и на шинах 0,4 кВ потребительских подстанций. Так, на шинах питающих подстанций всегда устанавливается измерительный трансформатор напряжения, имеющий две вторичные обмотки: одну, собранную по схеме «звезда с нулём», и вторую – «разомкнутый треугольник», которую используют для выявления по напряжению нулевой последовательности самого факта ОЗЗ.

Также необходимо выделить классические общепринятые подходы к решению проблемы ОЗЗ [8, 9, 10, 11, 12, 24] различных отечественных школ, что еще раз подчеркивает важность поиска решений обозначенной проблемы. Обобщенно, в кратком виде, выделяются следующие особенности представленных подходов: волновые методы определяют моменты прихода на подстанцию возникающих в месте повреждения линии электромагнитных волн; локационные методы основаны на измерении времени между моментом времени послышки в ВЛ зондирующего импульса и моментом прихода к началу линии импульса отраженного от места повреждения. За указанное время импульсы проходят путь равный двойному расстоянию до места повреждения; метод стоячих волн использует измерение полного входного сопротивления, поврежденной линии в

широком диапазоне частот. Расстояние между резонансными частотами, т.е. максимальное и минимальное входные сопротивления зависят от расстояния до места повреждения; петлевой метод основан на измерении сопротивления постоянному току жил кабеля, отключенного из-за пробоя фазы на землю. Переходное сопротивление в месте повреждения предварительно снижают прожиганием изоляции от специальных источников тока; емкостной метод определяет емкость жилы от места измерения до места обрыва; Метод определения места повреждения по параметрам аварийного режима основан на измерении параметров сети в момент возникновения КЗ.

Одновременно с отечественными школами имеется существенное количество публикаций зарубежных исследователей [13, 14, 15, 22] по проблеме замыканий на землю с вариативностью предлагаемых как теоретических подходов, так и практически реализованных технических решений. Однако, не смотря на наличие, как классических школ, так и новых теоретических и практических направлений, актуальность проблемы ОЗЗ не снижается.

Материалы и методы

Представленная актуальность проблемы раннего выявления ОЗЗ явилась основанием для проведения теоретических исследований мониторинга ОЗЗ и выявления диагностических признаков, проявляющих себя в равной степени при различных видах ОЗЗ таких, как например, «металлические замыкания», перемежающиеся дуговые замыкания, кратковременные замыкания через дерево и т.д. Теоретические модели и результаты моделирования достаточно подробно описаны в [1-3].

Теоретическое моделирование было осуществлено на программно-аппаратном комплексе RTDS. Рис.1 в качестве примера иллюстрирует фрагмент имитационной схемы РЭС с открытым диалоговым окном ввода параметров источника напряжения. В моделируемой схеме РЭС от шин питающей подстанции отходят четыре воздушных линии электропередачи (ВЛ) длиной 16 км, а на пятой линии в середине имеет место ОЗЗ с различными моделируемыми параметрами.

На рис. 2 в качестве примера представлены осциллограммы фазного напряжения на шинах питающей подстанции, когда переходное сопротивление в месте ОЗЗ равно нулю. Графики иллюстрируют, что форма напряжения поврежденной фазы практически однозначно имеет отличия по форме, что позволяет выделять повреждение.

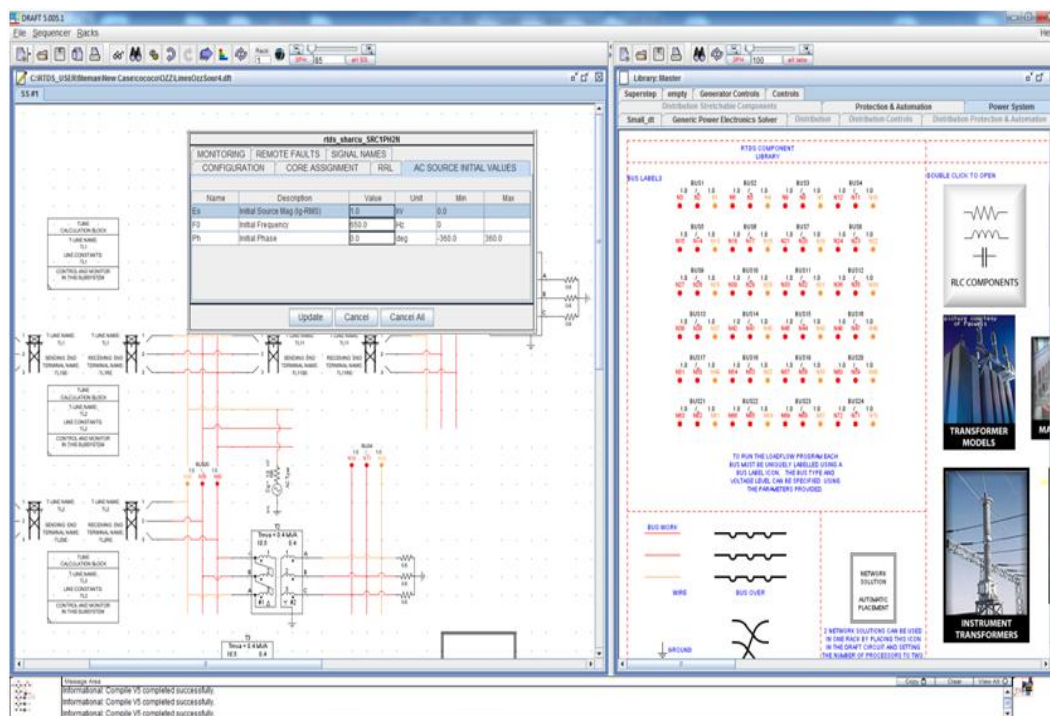


Рис.1. Фрагмент имитационной схемы РЭС с открытым диалоговым окном ввода параметров источника напряжения

Fig.1. A fragment of the simulation circuit of the RES with an open dialog box for entering voltage source parameters

Одновременно с теоретическими исследованиями были реализованы серии

натурных экспериментов в действующих РЭС с целью сопоставления теоретических и экспериментальных результатов, показавшие их сходимость, что представлено в [4]. Сходимость теоретических результатов с результатами натурных экспериментов позволила перейти непосредственно к созданию цифровой системы мониторинга повреждений на воздушных линиях электропередачи в распределительных сети напряжением 10 кВ с изолированным режимом работы нейтрали. В основе цифровой системы находятся математические модели, полученные в результате теоретических исследований [1-3].

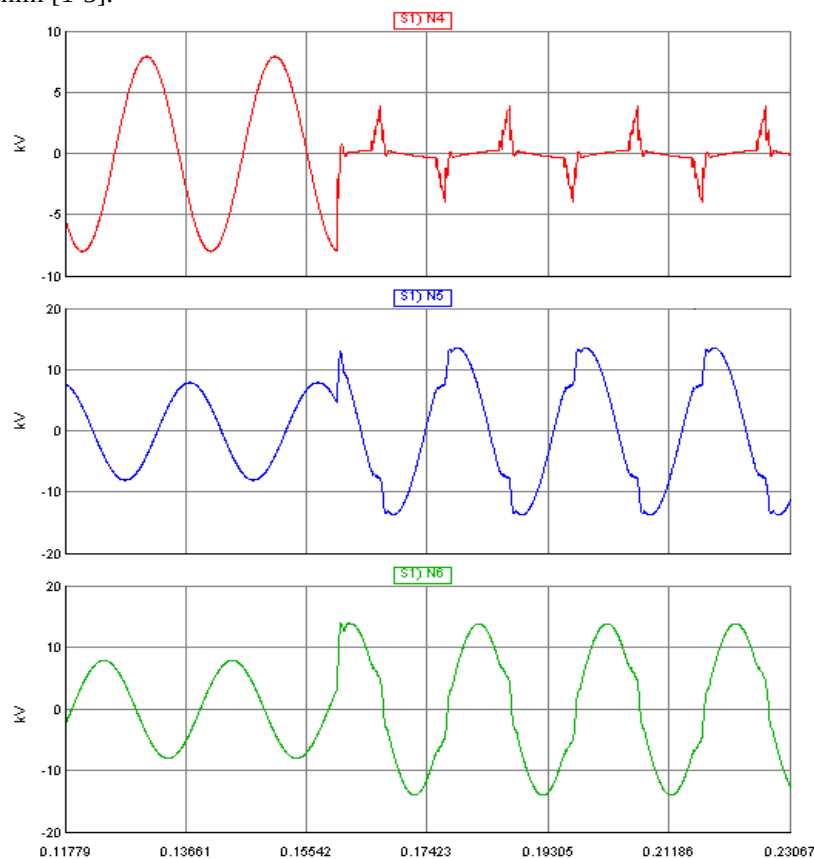


Рис. 2. Фазные напряжения на шинах питающей подстанции

Fig.2. Phase voltages on the busbars of the supply substation

Наиболее важные функциональные свойства схемного решения системы пофидерного контроля однофазных замыканий на землю для воздушных линий 6-10 - 35 кВ, характеризующие основное назначение системы, заключаются в следующем:

- осуществление непрерывного мониторинга отходящих фидеров на подстанции, заключающегося в проведении анализа спектра высших гармонических составляющих тока и напряжения;
- выявление превышений значений высших гармонических составляющих токов и напряжение на отходящих фидерах;
- сигнализация о превышении значений высших гармонических составляющих токов и напряжений на отходящем фидере;
- локализация отходящего фидера с однофазным замыканием на землю;
- передача информации на компьютер в диспетчерском пункте;
- визуализация информации о повреждении на компьютере в диспетчерском пункте.

Цифровая система условно подразделяется на две части, а именно, база данных, установленная на сервере в распределительном устройстве 10 кВ подстанции 110/10 кВ, и клиентское приложение, установленное на АРМ в диспетчерской. База данных организованная по классическому сценарию сбора и хранения данных, получает первичные данные с вторичных цепей каждого отходящего фидера. В качестве первичных данных выступают значения амплитуд и частот напряжений и токов. Далее осуществляется процесс обработки первичных данных, согласно математических моделей, представленных в [1-3]. Результаты обработки первичных данных визуализируются на экране АРМ диспетчера в виде основного диалогового окна цифровой системы мониторинга, рис.3.

Цифровая система позволяет отображать информацию по параметрам напряжения по каждой из секций шин. Рис.4 в качестве примера визуализирует фотографию диалогового окна параметров напряжения на первой секции шин. Представлена возможность визуализации фазных значений напряжений, по фазного гармонического состава напряжений, амплитуды значений напряжения нулевой последовательности и по фазного коэффициента гармонических искажений.



Рис. 3. Фотография основного диалогового окна цифровой системы на АРМ диспетчера
Fig.3. Photo of the main dialog box of the digital system on the dispatcher's WORKSTATION

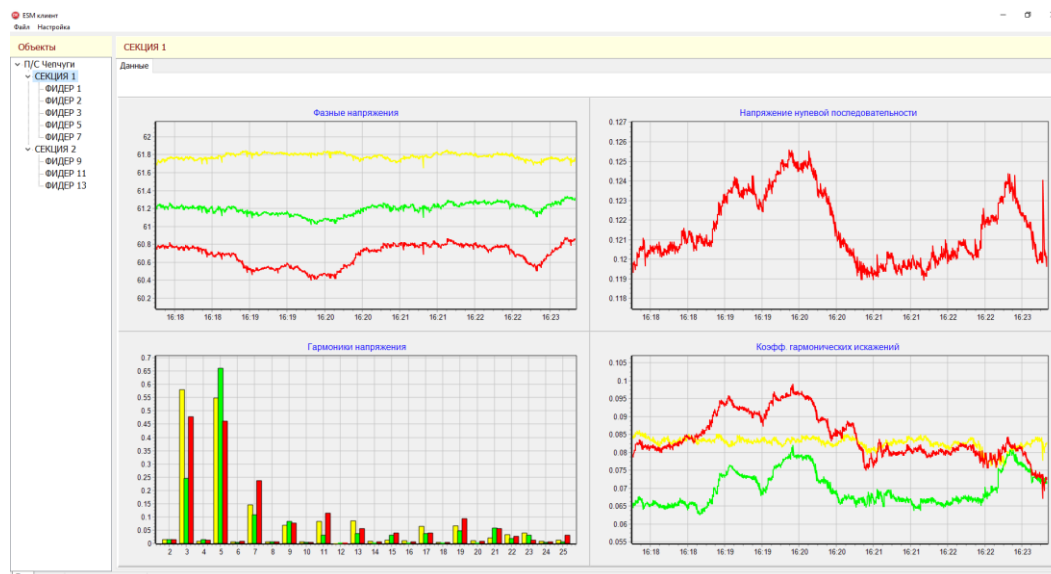


Рис.4. Фотография диалогового окна оценки параметров напряжений на секции шин
Fig.4. Photo of the bus section Voltage parameter estimation dialog box

В качестве примера для демонстрации результатов цифровой системы мониторинга представлены результаты мониторинга ОЗЗ через большое сопротивление при интенсивном снегопаде. Рис.5 иллюстрирует гармонический анализ токов на первом фидере. Значения ВГ тока находятся в пределах 0,002 от значения первой гармоники. Значение коэффициента гармонических искажений находится в пределах менее 0,003. Рис.4 иллюстрирует аналогичный анализ токов на девятом фидере соседней секции шин. Значения ВГ токов находят аналогично значениям на первом фидере. Рис.7 иллюстрирует гармонический анализ одиннадцатого фидера, на котором произошло ОЗЗ через большое переходное сопротивление. Анализ фазных токов визуализирует броски по току. Однако данные броски по току могут быть присущи не только лишь режиму

перемежающегося ОЗЗ, но и характерны для нагрузки с резко переменным характером. Причин подобных бросков по току может быть множество. Одновременно и ток нулевой последовательности равен нулевому значению. Однако гармонический анализ демонстрирует увеличение ВГ тока по одиннадцатому фидеру в десять раз, что однозначно определяет его, как фидер с повреждением. Картина сопоставления по фазных ВГ тока не дает однозначный ответ на определение фазы с повреждением. Такой случай ОЗЗ является наиболее сложно выявляемым.

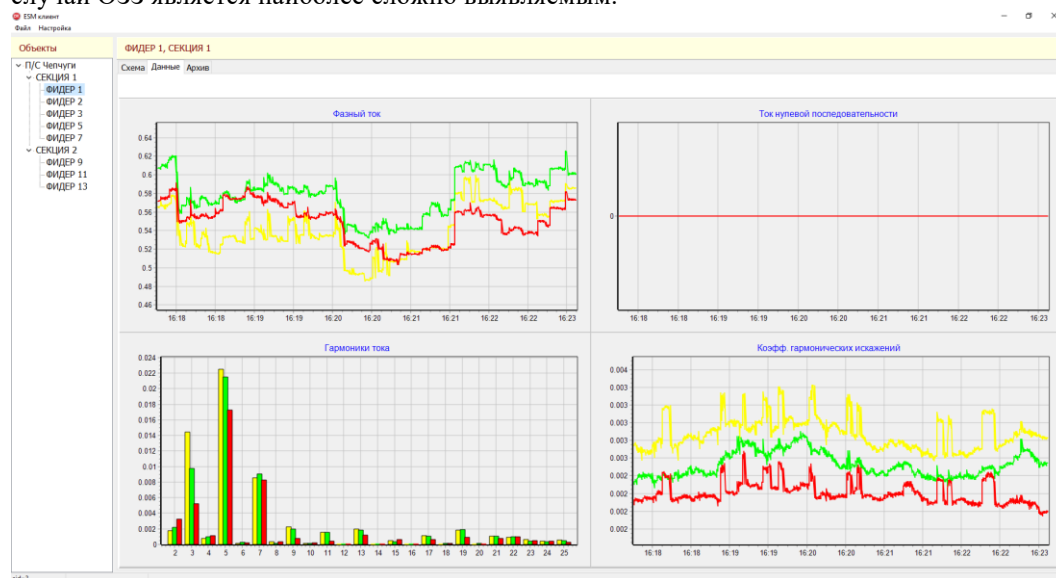


Рис.5. Фотография диалогового окна ВГ тока на первом фидере в режиме ОЗЗ через большое сопротивление

Fig.5. Photo of the VG current dialog box on the first feeder in the OZZ mode through a large resistance

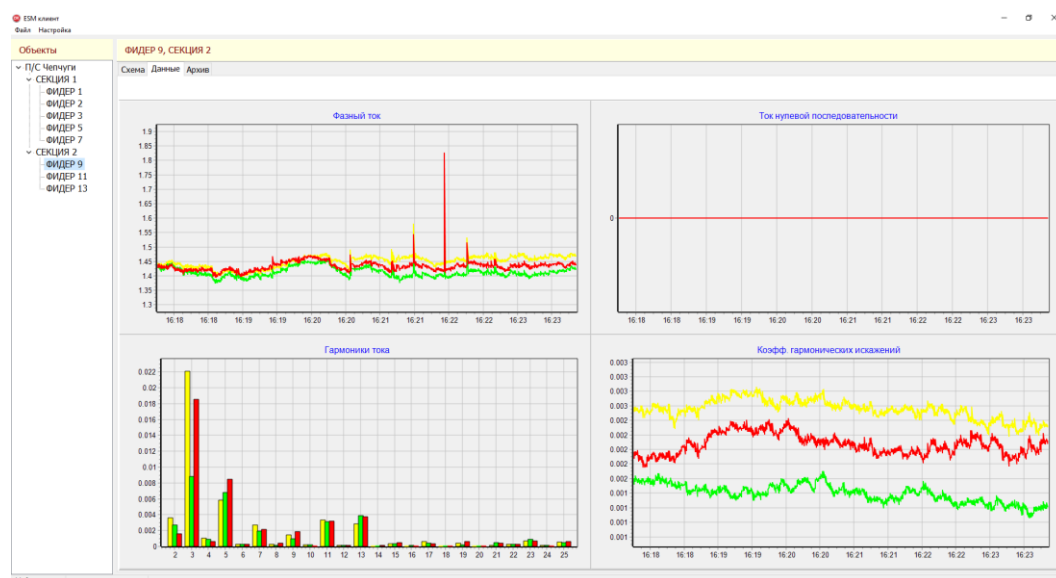


Рис.6. Фотография диалогового окна ВГ тока по девятому фидеру в режиме ОЗЗ через большое сопротивление

Fig.6. Photo of the VG current dialog box on the ninth feeder in the OZZ mode through a large resistance

Однозначно фазу с повреждением визуализирует диалоговое окно ПО, демонстрирующее коэффициент гармонических искажений, рис. 5. Необходимо также отметить существенный рост четных гармоник, что не является классическим случаем и подлежит дальнейшему исследованию.

Одновременно в цифровой системе мониторинга повреждений на воздушных линиях электропередачи предусмотрено диалоговое окно с поопорной схемой отходящих фидеров. Рис.6 в качестве примера иллюстрирует по опорную схему одного

из отходящих фидеров. Данная схема предполагает визуализацию зоны поиска места повреждения. Одновременно имеется возможность инсталляции геоподложки места прохождения ВЛ, что также существенно снизить затраты временного ресурса на поиск места ОЗЗ.

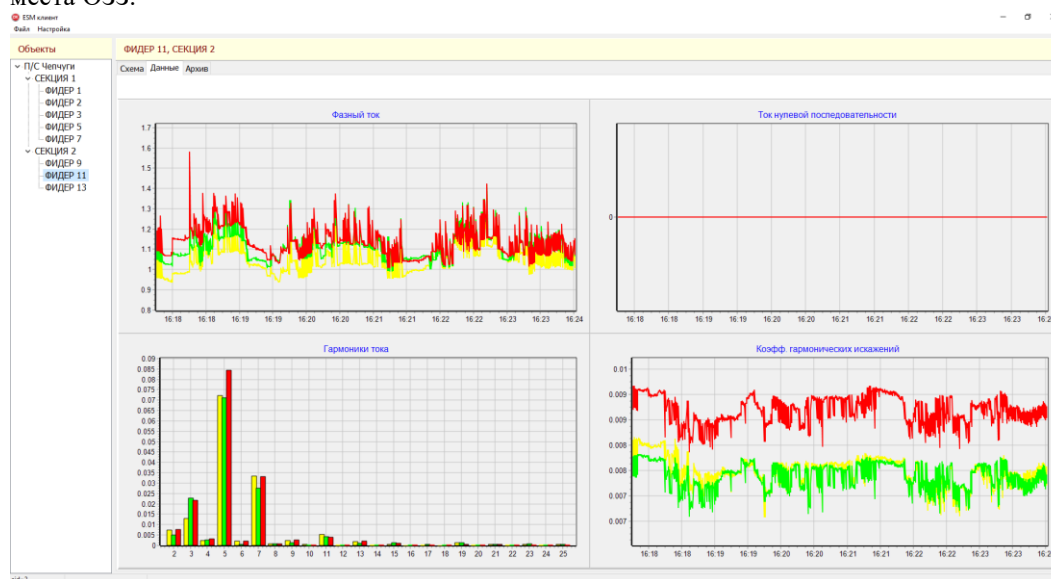


Рис.7. Фотография диалогового окна тока по одиннадцатому фидеру в режиме ОЗЗ через большое сопротивление

Fig.7. Photo of the current dialog box for the eleventh feeder in the OZZ mode through a large resistance

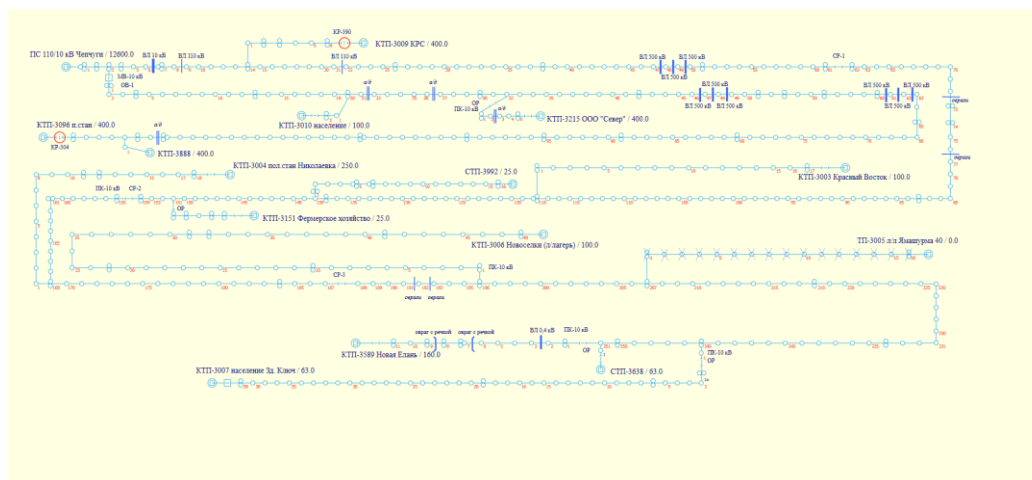


Рис.8 Фотография диалогового окна по опорной схеме отходящего фидера

Fig.8.Photo of the dialog box for the reference scheme of the outgoing feeder

Выводы

1. Результаты эксплуатации цифровой системы мониторинга демонстрируют сложность и не однозначность физических процессов, происходящих при ОЗЗ.
2. Спектральный анализ и осциллограммы токов и напряжений, полученные по результатам эксплуатации, раскрывают невозможность выделения всех типов ОЗЗ только лишь одному выбранному параметру.
3. Практическая эксплуатация показала перспективность подхода на основе анализа ВГ токов и напряжений для различных видов ОЗЗ, в том числе и одного из наиболее сложно диагностируемого вида – кратковременного.
4. Цифровая система мониторинга полностью исключает необходимость пофидерного отключения для определения фидера с повреждением.

Литература

1. Федотов А.И., Ахметвалеева Л.В., Басыров Р.Ш., и др. 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.
2. Абдуллин Л.И., Вагапов Г.В., Чернова Н.В., и др. Влияние параллельно работающих фидеров на резонансные частоты воздушной линии при однофазном замыкании на землю Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 1-2. С. 54-61.
3. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Чернова Н.В. Распределение токов и напряжений вдоль воздушных линий электропередачи 6-35 кВ на резонансных частотах при ОЗЗ Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 5-6. С. 69-78.
4. Fedotov A., Abdullazyanov R., Vagapov G., et al. Detection of places of single-phase ground fault by frequency of the resonance. В сборнике: 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2016; 57. pp. 7763116
5. Сидоров С.В., Сушков В.В., Сухачев И.С. Особенности моделирования определения мест повреждения воздушных линий электропередачи напряжением 6(10) кВ // Промышленная энергетика. 2020. № 3. С. 33-40.
6. Sidorov S., Sukhachev I., Sushkov V. Development of a method for determining the location of a single line-to-ground fault of an overhead power line with voltage of 6(10) kV considering climatic factors // В сборнике: E3S Web of Conferences. International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019, SES 2019. 2019. p. 05003
7. Анализ причин обрывов фазных проводов воздушных линий напряжением 6-10 кВ. Хлопова А.В. Безопасность жизнедеятельности. 2018. № 4 (208). С. 38-43.
8. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Режимы заземления нейтрали в электрических системах. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 118 с.
9. Сирота И.М. Защита от однофазных замыканий в электрических системах: Киев. Изд. АН УССР. 1955. 208 с.
10. Шабад М.А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ: М.: Энергопрогресс: Энергетик, 2007. 63 с.
11. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. Направленные защиты. Особенности применения // Новости электротехники. 2005. №6 (36). С. 52-55.
12. Шуин В.А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ: М.: НТФ «Энергопрогресс». 2001. 104 с.
13. Burkhardt E., Fickert L and Jenau F. The Short-term Compensation Change to Detect Earth Faults in Compensated Networks. 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Torino, Italy, 2020, pp. 1-5.
14. Orsáková J., Topolánek D., Toman P., et al. Localization method for the resistive earth faults in compensated network based on simultaneous earth faults evaluation. 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014), Copenhagen, 2014, pp. 1-6.
15. Achleitner G., Obkircher C., Fickert L., et al. An earth fault distance location algorithm in compensated networks with additional estimation of the fault impedance and fault current. 2008 Power Quality and Supply Reliability Conference, Parnu, 2008, pp. 193-198,
16. Schmidt U., Frowein K., Druml G., et al. New method for calculation of the harmonics in the residual earth fault current in isolated and compensated networks. 2016 Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ), Tallinn, 2016, pp. 309-313.
17. Bartholomäus K and Derbel F. Earth Fault Measurement with the Frequency-Selective Earth Fault. 2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Hammamet, 2018, pp. 83-87.
18. Wang Z and Wang F. Earth fault detection in distribution network based on wide-area measurement information, 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, Yichang, 2011, pp. 5855-5859.
19. Burkhardt E., Hilbrich D., Offermann N., et al. The Short-term Isolated Star Point Grounding to Detect Earth Faults in Compensated Networks. The Concept. 2020. 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Torino, Italy, 2020, pp. 1-5.
20. Zhang H. A Segmented Network Method Based Faulted Line Selection Strategy for Single-Phase Earth Fault in Small Current Grounding Distribution Network. 2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC), Dalian, 2017, pp. 1582-1585.

21. Minullin R.G., Piskovatskiy Y.V. and Kasimov V.A. Model and Experimental Detection of Single Phase-to-Earth Faults of Overhead Conductors in 6–10 Kv Distribution Circuits by a Location Method. 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2020, pp. 411-415,

22. Kolcunová I., Zbojovský J., Kurimský J. Measurement of corona discharges using uv camera. Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2019. V.10. pp. 251-255.

23. Антонов В.И., Лазарева Н.М., Пуляев В.И. Методы обработки цифровых сигналов энергосистем. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2000. 84 с.

24. Нагай В.И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей. Энергоатомиздат, 2002. 312 с.

Авторы публикации

Федотов Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрические станции им. В.К.Шибанова», Казанский государственный энергетический университет.

Вагапов Георгий Валериянович – канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник отдела «НИОКР» Инжиниринговый центр, Казанский государственный энергетический университет.

Абдуллазянов Айнура Фоатович – аспирант кафедры «Электрические станции им. В.К.Шибанова», Казанский государственный энергетический университет.

Шарьянов Ахмет Маратович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедра «Электропривода и электротехники», Казанский национальный исследовательский технологический университета.

References

1. Fedotov AI, Ahmetvaleeva LV, Basyrov RSH. Normirovanie amplitudy vysshih garmonik pri opredelenii fidera s odnofaznym замыканием на землю. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki*. 2020;22(1):58-68.

2. Abdullin LI, Vagapov GV, Chernova NV, et al. Vliyaniye parallel'no rabotayushchih fiderov na rezonansnye chastoty vozduшной линии pri odnofaznom замыкании на землю. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki*. 2018;20(1-2):54-61.

3. Fedotov AI, Vagapov GV, Chernova NV. Raspredeleniye tokov i napryazhenij vdol' vozduшных линий электропередачи 6-35 kV na rezonansnyh chastotah pri OZZ. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki*. 2017;19(5-6):69-78.

4. Fedotov A, Abdullazyanov R, Vagapov G, et al. *Detection of places of single-phase ground fault by frequency of the resonance*. 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2016;57:7763116.

5. Sidorov SV, Sushkov VV, Suhachev IS. Osobennosti modelirovaniya opredeleniya mest povrezhdeniya vozduшных линий электропередачи napryazheniem 6(10) kV. *Promyshlennaya energetika*. 2020;3:33-40.

6. Sidorov S, Sukhachev I, Sushkov V. *Development of a method for determining the location of a single line-to-ground fault of an overhead power line with voltage of 6(10) kV considering climatic factors*. E3S Web of Conferences. International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019, SES 2019. P. 05003

7. Hlopova AV. Analiz prichin obryvov faznyh provodov vozduшных линий napryazheniem 6-10 kV. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2018;4(208):38-43.

8. Vajnshteyn PA, Kolomic NV, SHeStakova VV. *Rezhimy zazemleniya nejtrali v elektricheskikh sistemah*: Tomsk: Izd-vo TPU, 2006. 118 P.

9. Sirota IM. *Zashchita ot odnofaznyh замыканий v elektricheskikh sistemah*. Kiev. Izd. AN USSR. 1955. 208 P.

10. Habad S, Zashchita MA. Ot odnofaznyh замыканий на землю v setyah 6-35 kV: uchebnoye posobie. M.: Energoprogress: *Energetik*. 2007. 63 P.

11. Shalin AI. Zamykaniya na zemlyu v setyah 6-35 kV. Napravlennye zashchity. Osobennosti primeneniya. *Novosti elektrotekhniki*. 2005;6 (36):52-55.

12. SHuin VA, Gusenkov AV. *Zashchity ot замыканий на землю v elektricheskikh setyah 6-10 kV*. M.: NTF «Energoprogress», 2001. 104 P.

13. Burkhardt E, Fickert L and Jenau F. *The Short-term Compensation Change to Detect Earth Faults in Compensated Networks*. 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Torino, Italy, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/UPEC49904.2020.9209841.
14. Orságová J, Topolánek D, Toman P, et al. *Localization method for the resistive earth faults in compensated network based on simultaneous earth faults evaluation*. 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014), Copenhagen, 2014, pp. 1-6. doi: 10.1049/cp.2014.0090.
15. Achleitner G, Obkircher L, Fickert M, et al. *An earth fault distance location algorithm in compensated networks with additional estimation of the fault impedance and fault current*. 2008 Power Quality and Supply Reliability Conference, Parnu, 2008, pp. 193-198, doi: 10.1109/PQ.2008.4653760.
16. Schmidt U, Frowein K, Druml G. *New method for calculation of the harmonics in the residual earth fault current in isolated and compensated networks*. 2016 Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ). Tallinn. 2016. pp. 309-313. doi: 10.1109/PQ.2016.7724132.
17. Bartholomäus K and F. Derbel. *Earth Fault Measurement with the Frequency-Selective Earth Fault*. 2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Hammamet. 2018, pp. 83-87. doi: 10.1109/SSD.2018.8570533.
18. Wang Z and F. Wang. *Earth fault detection in distribution network based on wide-area measurement information*. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, Yichang, 2011. pp. 5855-5859. doi: 10.1109/ICECENG.2011.6057020.
19. Burkhardt E, Hilbrich D, Offermann N, et al. *The Short-term Isolated Star Point Grounding" to Detect Earth Faults in Compensated Networks*. The Concept, 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Torino, Italy, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/UPEC49904.2020.9209762.
20. Zhang H, et al. *A Segmented Network Method Based Faulted Line Selection Strategy for Single-Phase Earth Fault in Small Current Grounding Distribution Network*. 2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC), Dalian, 2017, pp. 1582-1585, doi: 10.1109/ICCSEC.2017.8446834.
21. Minullin RG, Piskovatskiy YV and Kasimov VA. *Model and Experimental Detection of Single Phase-to-Earth Faults of Overhead Conductors in 6–10 Kv. Distribution Circuits by a Location Method*. 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2020, pp. 411-415, doi: 10.1109/UralCon49858.2020.9216267.
22. Kolcunová I, Zbojovský J, Kurimský J. *Measurement of corona discharges using uv camera*. Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2019;10:251-255.
23. Antonov VI, Lazareva NM, Pulyae VI. *Metody obrabotki cifrovyyh signalov energosistem*. M: NTF «Energoprogress», 2000. 84 p.
24. Nagaj VI. *Relejnaya zashchita otvetvitel'nyh podstancij elektricheskikh setej*. Energoatomizdat, 2002. 312 p.

Authors of the publication

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

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

Ainur F. Abdullazyanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Akhmet M. Sharyapov – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Получено

26 февраля 2021г.

Отредактировано

02 марта 2021г.

Принято

03 марта 2021г.