РЕЛАВЭКСПО 2021

20-23 АПРЕЛЯ 2021 ГОДА

Россия, Чувашская Республика, г. Чебоксары,
пр-т Тракторостроителей, д. 103 «А»

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Материалы научно-технической конференции молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2021»

Организаторы

При поддержке

Генеральные спонсоры

Официальный спонсор

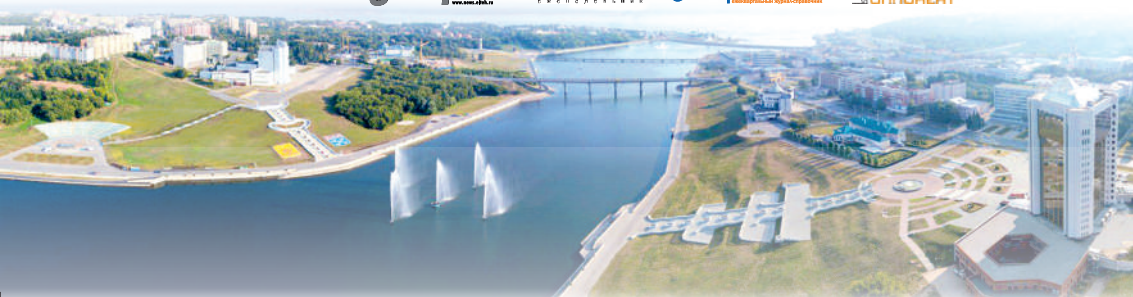
При участии

Спонсоры

Официальные медиа-партнеры

Партнер регистрации

Медиа-партнеры



Инновационный электротехнический кластер Чувашской Республики
Академия электротехнических наук Чувашской Республики
Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова
Подкомитет Б5 «Релейная защита и автоматика»
Российского национального комитета СИГРЭ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Материалы
научно-технической конференции
молодых специалистов форума
«РЕЛАВЭКСПО-2021»

Чебоксары
2021

УДК621.311-52+621.316.925](063)
ББК27-051я43
С23

Редакционная коллегия:

В.И. Антонов, доктор технических наук, гл. редактор
Г.С. Нудельман, кандидат технических наук, зам. гл. редактора
В.Г. Ковалев, кандидат технических наук
А.В. Жуков, кандидат технических наук
А.В. Мокеев, доктор технических наук
В.И. Нагай, доктор технических наук
В.А. Шуин, доктор технических наук
В.А. Наумов, кандидат технических наук
В.С. Петров, кандидат технических наук

С23 **Современные** тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики: материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2021». – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – 226 с.

ISBN 978-5-7677-3248-7

Представлены доклады научно-технической конференции молодых специалистов, состоявшейся в рамках форума РЕЛАВЭКСПО-2021. В сборнике приведены результаты актуальных научных исследований в области совершенствования алгоритмов релейной защиты и автоматики энергосистем, технологий цифровой обработки сигналов, векторных измерений и методов искусственного интеллекта в релейной защите. Рассматриваются научные и практические вопросы кибербезопасности цифровых устройств релейной защиты, её работа в сетях с распределенной генерацией, моделирование электроэнергетических систем для целей релейной защиты и автоматики, надежности релейной автоматики.

Для преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов старших курсов энергетических специальностей вузов, инженерно-технического персонала предприятий и энергосистем.

ISBN 978-5-7677-3248-7

УДК 621.311-52+621.316.925](063)
ББК 27-051я43
© Издательство
Чувашского университета, 2021

Программный комитет конференции

1. **Антонов Владислав Иванович** – Председатель программного комитета, д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», ООО «НПП «ЭКРА»
2. **Нудельман Года Семёнович** – Заместитель Председателя программного комитета, канд. техн. наук, Президент АЭН ЧР, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», ОАО «ВНИИР», член Президиума РНК СИГРЭ
3. **Булычев Александр Витальевич**, д-р техн. наук, Ассоциация «ИнТЭК», ООО «НПП «Бреслер»
4. **Ванин Валерий Кузьмич**, д-р техн. наук, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
5. **Волошин Александр Александрович**, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», представитель РНК СИГРЭ в SC B5 CIGRE
6. **Дони Николай Анатольевич**, канд. техн. наук, Ассоциация «ИнТЭК», ООО НПП «ЭКРА»
7. **Жуков Андрей Васильевич**, канд. техн. наук, член Технического комитета РНК СИГРЭ, руководитель подкомитета Б5, ОАО «СО ЕЭС»
8. **Илюшин Павел Владимирович**, д-р техн. наук, Институт энергетических исследований Российской Академии Наук
9. **Ковалев Владимир Геннадьевич**, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»
10. **Козлов Владимир Николаевич**, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», Ассоциация «ИнТЭК», ООО «НПП «Бреслер»
11. **Куликов Александр Леонидович**, д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»
12. **Лачугин Владимир Фёдорович**, д-р техн. наук, АО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» (АО «ЭНИН»)
13. **Лямец Юрий Яковлевич**, д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», ООО «Релематика»
14. **Мокеев Алексей Владимирович**, д-р техн. наук, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», ООО «ИЦ «Энергосервис»
15. **Наволочный Александр Альбертович**, канд. техн. наук, ОАО «ВНИИР», ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»
16. **Нагай Владимир Иванович**, д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»
17. **Онисова Ольга Александровна**, канд. техн. наук, ОАО «ВНИИР», ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»
18. **Петров Владимир Сергеевич**, канд. техн. наук, ООО «НПП «ЭКРА», ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»
19. **Попов Максим Георгиевич**, д-р техн. наук, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
20. **Шуин Владимир Александрович**, д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научно-техническая конференция молодых специалистов в рамках форума «РЕЛАВЭКСПО-2021»

Конференция молодых специалистов в рамках форума РЕЛАВЭКСПО обрела традицию и популярность. И отрадно, что молодые исследователи представляют на обсуждение полновесные научные доклады по всему спектру актуальных тем функционирования релейной защиты и автоматики электрических систем.

Расширилась и тематика конференции. Молодых ученых волнуют научные и практические вопросы, затрагивающие многие аспекты обеспечения надежной работы систем релейной защиты и автоматики, включая:

- Совершенствование алгоритмов релейной защиты и автоматики энергосистем.
- Цифровая обработка сигналов в системах релейной защиты и автоматики.
- Технологии векторных измерений в системах релейной защиты и автоматики.
- Методы искусственного интеллекта в релейной защите.
- Кибербезопасность цифровых устройств релейной защиты.
- Релейная защита в сетях с распределенной генерацией.
- Моделирование электроэнергетических систем для целей релейной защиты и автоматики.
- Надежность релейной защиты и автоматики.

Полагаем, что богатство экспозиции выставки и доброжелательная обстановка научной полемики, характерная для всех форумов Релеграда, оставят в молодом исследователе неизгладимый след причастности к настоящему действу.

С наилучшими пожеланиями

Нудельман Г.С., *президент Академии электротехнических наук Чувашской Республики*

Антонов В.И., *профессор кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики Чувашского госуниверситета*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЭНЕРГОСИСТЕМ, РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА В СЕТЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ, НАДЕЖНОСТЬ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

РАСПОЗНАВАНИЕ ПОВРЕЖДЕННОГО ОТВЕТВЛЕНИЯ ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ НАБЛЮДЕНИИ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Лямец Ю.Я., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия. E-mail: yu.ya.liamets@gmail.com.

Никонов И.Ю., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия. E-mail: ivan04031997@gmail.com.

Аннотация: *релейная защита линии электропередачи не располагает информацией о состоянии ответвлений, однако на нее возлагается функция дальнего резервирования собственной защиты ответвлений. В задачу наблюдателя, находящегося в начале линии, входит распознавание повреждения на стороне низшего напряжения ответвительной подстанции. Рассматриваемый метод распознавания поврежденного ответвления основан на подборе подходящего замера и представлении замера в виде двух функций – априорной и текущей.*

Ключевые слова: *линия электропередачи, ответвления, короткое замыкание, распознавание.*

Введение

Релейная защита линии электропередачи не располагает информацией о состоянии ответвлений. Тем не менее, на нее возлагается функция дальнего резервирования собственной защиты ответвлений [1-4]. В задачу наблюдателя, находящегося в начале линии, входит распознавание повреждения на стороне низшего напряжения ответвительной подстанции, при том, что их может быть несколько. Важно установить, что повреждено одно из ответвлений, но затем важно установить какое именно. Очевидно, что это не всегда представляется возможным: например, не всегда удается различить ответвления

одновременно близкие по мощности и по месту расположения. Тем очевиднее, что алгоритм, принципиально способный выявить поврежденное ответвление, решает задачу дальнего резервирования эффективнее, чем алгоритмы, не обладающие такой способностью. Рассматриваемый метод распознавания поврежденного ответвления основан на следующих принципиальных положениях: подборе подходящего замера в виде отношения напряжения текущего режима к аварийной составляющей и представление замера в виде двух функций – априорной и текущей.

Построение двух годографов – априорного и текущего

Предположим, что в линии повреждено *i*-ое ответвление и $\underline{A}_{if}$ – матрица прямой передачи, моделирующая ответвление как трехполюсник от входа в ответвление с координатой x_i до места КЗ f с переходным сопротивлением R_f (рис. 1). В текущем режиме КЗ трехполюсник преобразует напряжение ответвления $\underline{U}_{i\text{тк}}$ в ток $\underline{I}_f$ в месте КЗ

$$\underline{I}_f = \frac{\underline{U}_{i\text{тк}}}{\underline{A}_{if} R_f + \underline{B}_{if}}. \qquad (1)$$

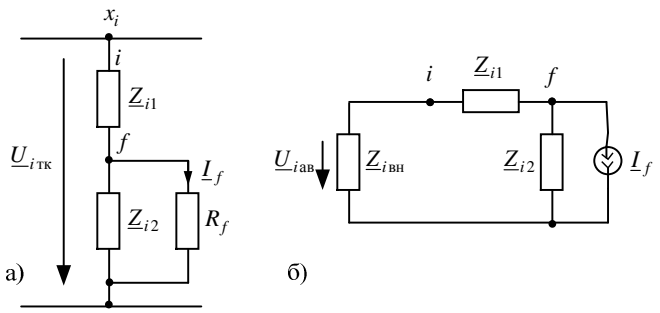


Рис. 1. Трехэлементная модель поврежденного ответвления
а – в текущем режиме, б – в чисто аварийном режиме

Электрическая сеть как эквивалентный генератор относительно *i*-го ответвления характеризуется ЭДС $\underline{E}_i$ и внутренним сопротивлением $\underline{Z}_{i\text{вн}}$. Важную роль играет в информационном плане искусственный чисто аварийный режим, создаваемый в пассивной структуре электрической сети источником тока КЗ $\underline{I}_f$. Трехполюсник ответвления при этом переходит в состояние обратной передачи с нагрузкой $\underline{Z}_{i\text{вн}}$, на которой создается аварийная составляющая текущего напряжения

$$\underline{U}_{i\text{ав}} = -\frac{\underline{Z}_{i\text{вн}}\underline{I}_f}{\underline{C}_{if}\underline{Z}_{i\text{вн}} + \underline{A}_{if}} \ . \qquad (2)$$

Еще одной его составляющей является напряжение предшествующего режима.

$$\underline{U}_{i\text{тк}} = \underline{U}_{i\text{пд}} + \underline{U}_{i\text{ав}} . \qquad (3)$$

Отношение текущего напряжения к аварийной составляющей, определяемое из (1) и (2), является линейной функцией сопротивления R_f и не зависит от тока КЗ $\underline{I}_f$

$$\underline{K}_i = \underline{K}_{i0} + \underline{Y}_i R_f . \qquad (4)$$

Зависимость (4) представляет собой линейный годограф в виде луча, исходящего на плоскости $\underline{K}$ из точки $\underline{K}_{i0}$. Применительно к трехэлементной модели ответвления (рис. 1) и, исходя из предположения, что модуль сопротивления $\underline{Z}_{i2}$, шунтируемого переходным сопротивлением R_f, намного больше этого сопротивления ($\underline{Z}_{i2} \to \infty$), получаем предельно простое описание годографа (4)

$$\underline{K}_i = -\left(1/\underline{Z}_{i\text{вн}}\right)\left(\underline{Z}_{i1} + R_f\right), \qquad (5)$$

которое дает наглядное представление о влиянии сопротивлений $\underline{Z}_{i\text{вн}} = Z_{i\text{вн}}\angle\varphi_{i\text{вн}}$, $\underline{Z}_{i1} = Z_{i1}\angle\varphi_{i1}$ на отображение комплекса $\underline{K}_i = K_i\angle\varphi_i$. Из (5) следует, что годограф ответвления допускает обобщенное описание

$$\underline{K}_i(\rho) = \underline{K}_{i0} + \rho_i e^{j(\pi - \varphi_{i\,\text{вн}})}, \qquad (6)$$

где $\rho_i = R_f / \underline{Z}_{i\,\text{вн}} \geq 0$ – вещественный варьируемый параметр, учитывающий не только вариации переходного сопротивления, но и возможные изменения внутреннего сопротивления сети.

Годографы ответвлений $\underline{K}_i(\rho_i)$, отображающие множество возможных режимов коротких замыканий в ответвлениях на стороне низшего напряжения, служат общей характеристикой электропередачи. Они должны быть получены на этапе обучения наблюдателя. Процедура распознавания конкретной ситуации на действующем объекте основывается на априорной информации о нем в виде его алгоритмической модели и годографов ответвлений, а также на результатах наблюдения конкретной ситуации в предшествующем и текущем режимах. Зафиксированные напряжения и токи $\underline{U}_{\text{пд}}(0)$, $\underline{I}_{\text{пд}}(0)$, $\underline{U}_{\text{тк}}(0)$, $\underline{I}_{\text{тк}}(0)$ преобразуются в алгоритмические величины — напряжения $\underline{U}^{\text{ал}}_{\text{пд}}(x)$, $\underline{U}^{\text{ал}}_{\text{тк}}(x)$, $x = 0...l$, где l – длина линии.

$$\underline{U}^{\text{ал}}_{\text{тк}}(x) = \underline{A}^{\text{ал}}_{\text{тк}}(x)\underline{U}_{\text{тк}}(0) + \underline{B}^{\text{ал}}_{\text{тк}}(x)\underline{I}_{\text{тк}}(0), \qquad (7)$$

$$\underline{U}^{\text{ал}}_{\text{ав}}(x) = \underline{A}^{\text{ал}}_{\text{ав}}(x)\underline{U}_{\text{ав}}(0) + \underline{B}^{\text{ал}}_{\text{ав}}(x)\underline{I}_{\text{ав}}(0). \qquad (8)$$

Из напряжений (7), (8) формируется итоговая алгоритмическая функция – координатный годограф

$$\underline{K}^{\text{ал}}(x) = \frac{\underline{U}^{\text{ал}}_{\text{тк}}(x)}{\underline{U}^{\text{ал}}_{\text{ав}}(x)}, \qquad (9)$$

который занимает свое место на плоскости $\underline{K}$ (рис. 2), где предварительно были размещены годографы всех n ответвлений в ситуации, когда повреждено какое-либо из них. Какое – должны показать точки пересечения координатного годографа с годографами ответвлений:

$$\underline{K}^{\text{ал}}(x) = \underline{K}_i(\rho_i) \Rightarrow \hat{x}_i, \hat{\rho}_i, \quad i = \overline{1, n.} \qquad (10)$$

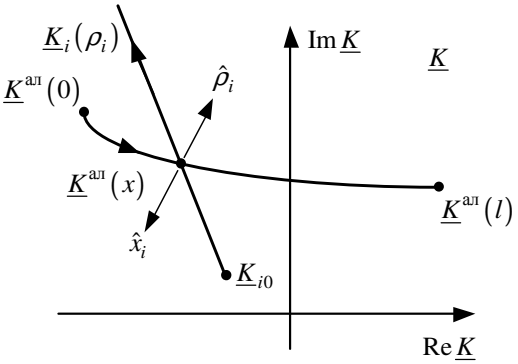


Рис. 2. Пересечение координатного годографа с годографом повреждения, относящимся к *i*-ому ответвлению

Оценку $\hat{x}_i$ определяет координатный годограф, а оценку $\hat{\rho}_i$ – годограф *i*-го ответвления. При благоприятном стечении обстоятельств задача распознавания поврежденного ответвления получает однозначное решение, о чем свидетельствует близость одной из оценок $\hat{x}_k$ к координате x_k *k*-го ответвления. В менее благоприятной ситуации, когда необходимо сделать выбор между двумя номерами i и k, можно учесть значения $\hat{\rho}_i$ и $\hat{\rho}_k$, отдавая предпочтение номеру с меньшим, и поэтому более вероятным, значением $\hat{\rho}$.

Заключение

Описанный подход к распознаванию поврежденного ответвления линии электропередачи подводит к общей концепции разделения информационной базы наблюдателя на две части – априорной, обрабатываемой заранее, и текущей, собираемой в процессе наблюдения. Обе преобразуются в специально подобранный замер, но по-разному. Априорная информация определяет его как функцию параметра КЗ в некоторых местах линии, а текущая информация – как функцию координаты места предполагаемого КЗ. Критерий распознавания КЗ устанавливается совпадением первой и второй функций при условии равенства координаты места привязки первой и аргумента второй. Наглядную интерпретацию этих функций дают годограф места КЗ и координатный годограф.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нагай В.И.* Релейная защита ответвительных подстанций электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 2002.

2. *Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Маслов А.Н.* Интервальные критерии распознавания места короткого замыкания в энергосистеме // Электричество. 2019. № 11. С. 33–39.

3. *Лямец Ю.Я., Воронов П.И., Мартынов М.В., Антишкин А.Б., Широкин М.Ю.* Модель неповреждённого энергообъекта как индикатор повреждения // Электротехника. 2017. № 7. С. 60–65.

4. *Fikri M., El-Sayed M.* New algorithm for distance protection of high voltage transmission lines // IEE Proc. 1988. V. 135, № 5. С. 436–440.

Авторы:

Лямец Юрий Яковлевич*, ООО «Релематика»/ЧГУ им. И.Н. Ульянова, председатель НТС, окончил в 1962 г. энергетический факультет Новочеркасского политехнического института (НПИ). В 1994 г. защитил во ВНИИЭ докторскую диссертацию на тему «Адаптивные реле: теория и приложение к задачам релейной защиты и автоматики электрических систем», e-mail: yu.ya.liamets@gmail.com.*

Никонов Иван Юрьевич*, ООО «Релематика»/ЧГУ им. И.Н. Ульянова, инженер-исследователь, окончил в 2019 г. факультет Энергетики и Электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», e-mail: ivan04031997@gmail.com.*

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Петров В.В., ООО «НИЦ ЧЭАЗ», Чебоксары, Россия, petrov.vp@yandex.ru

Аннотация: *рассматривается использование дистанционной защиты с различными характеристиками срабатывания и анализ её работы в тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ.*

Ключевые слова: *дистанционная защита, железная дорога, тяговая сеть, контактная сеть, моделирование.*

Введение

Ввиду особенностей строения системы железнодорожного

электроснабжения на присоединениях тяговых подстанций требуется использование определенных видов защит [1]. Фидеры контактной сети (далее – ФКС) РУ 27,5 кВ обеспечивают снабжение электроподвижного состава требуемой энергией.

На данный момент на большинстве тяговых подстанций России релейная защита и автоматика обеспечивается электромеханическими устройствами, среди которых можно выделить УЭЗФМ, ЯРЭЖ 2201 и др. Дистанционная защита этих устройств имеет круговые ненаправленные и направленные характеристики срабатывания. Микропроцессорные устройства производства ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО», АО «Радиус Автоматика», ООО «НТЦ Механотроника» для ФКС также имеют круговые и секторные характеристики срабатывания.

В то же микропроцессорные устройства релейной защиты линий 35 кВ и выше зачастую имеют в своем составе дистанционную защиту с полигональной характеристикой.

Для работы были поставлены следующие задачи:

1) проанализировать работу дистанционной защиты с круговыми характеристиками (направленными и ненаправленными);

2) оценить возможность и перспективность применения дистанционной защиты с полигональными характеристиками для защиты присоединения фидера контактной сети напряжением 25 и 2×25 кВ переменного тока.

Реализация характеристик и моделирование режимов

В терминале БЭМП РУ-ФКС (ФС 59.01) производства АО «ЧЭАЗ» реализовано 4 ступени – круговая ненаправленная, 3 ступени направленных секторов и дополнительная ступень с трапециевидной характеристикой для действия в режиме с преимущественно активным характером сопротивления КЗ. Также реализована блокировка срабатывания при просадке напряжения ниже 3% от номинального значения.

Выполнение дистанционной защиты со стандартными круговыми характеристиками значительно уменьшает гибкость настройки защиты. Рассматривается вариант разработки исполнения с полигональными характеристиками дистанционной защиты аналогично тому, как это реализовано в

исполнении БЭМП РУ-ДВ [2].

Моделирование показало, что в тяговом режиме угол фазового сдвига тока составляет примерно 20-40°. В режимах коротких замыканий угол увеличивается до 60-70°. При установившемся коротком замыкании в конце защищаемой зоны [3] и наличии тяговой нагрузки угол сдвига тока близок к значению 50°. Данные результаты подтверждают эффективность использования в качестве 1-3 ступени усеченной круговой характеристики. Однако при большой загрузке участка в режиме установившегося КЗ такие характеристики могут не обеспечить срабатывание защиты. В таком ситуации полигональная характеристика показывает свою эффективность.

При близких КЗ достаточную чувствительность обеспечивает первая ступень дистанционной защиты, которая может быть выполнена в виде ненаправленной круговой характеристики. При критическом снижении напряжения должна будет отработать резервная токовая защита или токовая отсечка (по мгновенному или действующему значению) [4].

Заключение

По результатам моделирования установлено, что использование полигональной характеристики для защиты контактной сети от коротких замыканий является оправданным. В данных условиях можем получить коэффициент чувствительности больше, чем при использовании усеченных направленных круговых характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Петров В.В.* Особенности реализации РЗА присоединений тяговых подстанций // Сборник докладов научно-технической конференции молодых специалистов. Материалы конференции в рамках форума РЕЛАВЭКСПО-2019. Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. 2019. С. 152-154

2. БКЖИ.656316.004-33.01 РЭ БЭМП РУ-ДВ. Микропроцессорные блоки релейной защиты и автоматики серии БЭМП РУ-ДВ. Руководство по эксплуатации.

3. Распоряжение ОАО «РЖД» от 25 декабря 2021 года №2680р «О мерах по совершенствованию защиты тяговой сети переменного тока».

4. *Петров В.В.* Особенности защиты и автоматики фидера контактной сети тяговой подстанции. // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники. Материалы конференции. Казан. гос. энерг. ун-т, 2020 – Т. 1. – С. 110-115.

Авторы:

***Петров Владимир Владиславович**, ООО «НИЦ ЧЭАЗ», инженер-исследователь 2 категории, закончил факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2019 г., petrov.vp@yandex.ru.*

ПРИМЕНЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В АЛГОРИТМАХ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ КРАТКОВРЕМЕННЫХ НАРУШЕНИЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ПИТАЮЩИХ СЕТЯХ

Кочетов И. Д., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия. E-mail: ivankochetov171298@mail.ru.

Лямец Ю. Я., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия. E-mail: yu.ya.liamets@gmail.com.

Макашкин Ф. А., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия, E-mail: fedya_makashkin@bk.ru.

Петряшин И.Е., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия, E-mail: petry1405@mail.ru.

Аннотация: *Рассматривается возможность применения унифицированных алгоритмов релейной защиты в противоаварийной автоматике быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР) для контроля состояния питающих цепей при наблюдении со стороны нагрузок. Показано, что задачу распознавания повреждений в цепи питания одной из двух нагрузок решает замер в виде отношения локальных токов, образованных при разделении аварийных составляющих наблюдаемых токов на два компонента – нормальный и локальный.*

Ключевые слова: *быстродействующий автоматический ввод резерва, короткое замыкание, нормальные и локальные составляющие, определение повреждённого питающего ввода.*

Введение

Нарушение электроснабжения может привести к экономическому ущербу, связанному с нарушением

непрерывности технологических процессов и возникновением гидравлических ударов, вызывающих повреждения оборудования насосных станций, трубопроводов и, как следствие, возникновение пожаров. Для предотвращения длительных перерывов питания применяются устройства быстродействующего автоматического ввода резерва, к которым предъявляется требование незамедлительной реакции на повреждение в питающих сетях, а именно переключение с повреждённого питающего ввода на резервный [1]. Таким образом, задача распознавания сводится к разграничению повреждений в первой и во второй подводящих цепях, и отдельно – в реакции на короткое замыкание (КЗ) в общей части сети, а также в точках за местом наблюдения тока на шинах нагрузки.

Распознавание КЗ в сети при наблюдении ее нагрузок

Рассмотрим алгоритм решения стоящей задачи на примере сети со схемой неявного резервирования по рис. 1а. Нагрузки Н1 и Н2 питаются от разных трансформаторов Т1 и Т2, которые получают энергию от одного источника с ЭДС $\underline{E}$ и внутренним сопротивлением $\underline{Z}_{\text{и}}$ по линиям электропередачи Л1 и Л2. Наблюдаются токи и напряжения нагрузок в предшествующем и текущем режимах $\underline{I}_{1\text{пд}}$, $\underline{U}_{1\text{пд}}$; $\underline{I}_{2\text{пд}}$, $\underline{U}_{2\text{пд}}$; $\underline{I}_{1\text{тк}}$, $\underline{U}_{1\text{тк}}$; $\underline{I}_{2\text{тк}}$, $\underline{U}_{2\text{тк}}$; по ним определяются как разности (1) аварийные составляющие $\underline{I}_{1\text{ав}}$, $\underline{U}_{1\text{ав}}$; $\underline{I}_{2\text{ав}}$, $\underline{U}_{2\text{ав}}$,

$$\underline{I}_{\text{ав}} = \underline{I}_{\text{тк}} - \hat{\underline{I}}_{\text{пд}}, \ \underline{U}_{\text{ав}} = \underline{U}_{\text{тк}} - \hat{\underline{U}}_{\text{пд}}, \qquad (1)$$

которые в свою очередь подразделяются на два компонента – нормальный и локальный

$$\underline{I}_{\text{ав}} = \underline{I}_{\text{лк}} + \underline{I}_{\text{нм}}, \ \underline{U}_{\text{ав}} = \underline{U}_{\text{лк}} + \underline{U}_{\text{нм}}. \qquad (2)$$

В рассматриваемой сети модель нормального режима представляет собой соединение ее пассивных элементов, ведущих от первой системы шин ко второй (рис. 1б). Эта модель, задается тремя коэффициентами – двумя собственными проводимостями $\underline{Y}_{11}$, $\underline{Y}_{22}$ и одной взаимной $\underline{Y}_{\text{вз}}$. Нормальные токи представляют собой реакцию модели на приложенные

напряжения аварийного режима

$$\underline{I}_{1\text{нм}} = -\underline{Y}_{11}\underline{U}_{1\text{ав}} + \underline{Y}_{\text{вз}}\underline{U}_{2\text{ав}}, \tag{3}$$

$$\underline{I}_{2\text{нм}} = \underline{Y}_{\text{вз}}\underline{U}_{1\text{ав}} - \underline{Y}_{22}\underline{U}_{2\text{ав}}; \tag{4}$$

$$\underline{Y}_{11} = -(\underline{Y}_2 + \underline{Y}_{\text{вз}}),\ \underline{Y}_{22} = -(\underline{Y}_1 + \underline{Y}_{\text{вз}}),$$

$$\underline{Y}_1 = \underline{Z}_1 / \underline{Z}^2,\ \underline{Y}_2 = \underline{Z}_2 / \underline{Z}^2,\ \underline{Y}_{\text{вз}} = \underline{Z}_{\text{и}} / \underline{Z}^2,$$

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{\text{т}1} + \underline{Z}_{\text{л}1},\ \underline{Z}_2 = \underline{Z}_{\text{т}2} + \underline{Z}_{\text{л}2},\ \underline{Z}^2 = (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)\underline{Z}_{\text{и}} + \underline{Z}_1\underline{Z}_2.$$

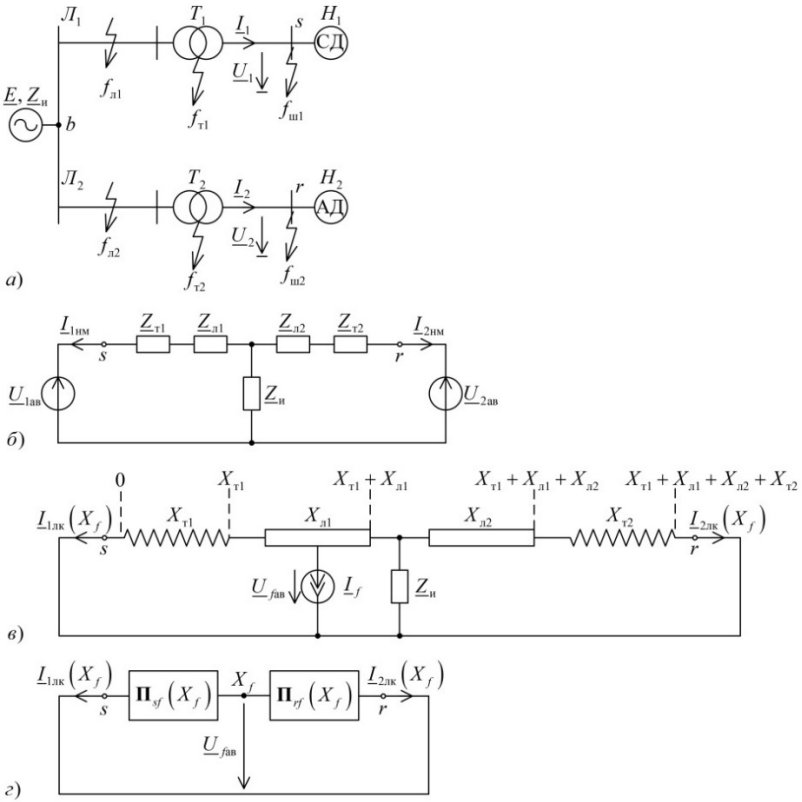


Рис. 1. Модели сети с двумя резервируемыми нагрузками а – имитационная модель; б – модель нормального режима; в, г – модель локального режима: в – развернутая, г – эквивалентированная относительно места КЗ

Информация о повреждении объекта заключена в замере, сформированном из локальных токов $\underline{I}_{1лк}$ и $\underline{I}_{2лк}$

$$\underline{K} = \frac{\underline{I}_{1лк} - \underline{I}_{2лк}}{\underline{I}_{1лк} + \underline{I}_{2лк}}. \qquad (5)$$

Наконец сравнение замера с его априорной функцией устанавливает связь замера (5) от места КЗ в питающей сети [2-4].

Априорная координатная функция замера

Априорная координатная функция замера определяется в модели локального режима (рис. 1в), переходя от первой системы шин *s* ко второй системе шин *r*. В качестве координаты примем значение индуктивного сопротивления X_f элементов цепи от точки *s* до произвольного места, предполагаемого КЗ, отнесенное к суммарному продольному индуктивному сопротивлению всей цепи

$$X_f^* = \frac{X_f}{X_{т1} + X_{л1} + X_{л2} + X_{т2}}, \qquad (7)$$

где $X_т$ – индуктивное сопротивление трансформаторов, а $X_л$ – линий.

Левая и правая части модели по рис. 1в эквивалентируются каждая относительно места *f* предполагаемого КЗ с координатой X_f пассивными блоками $\mathbf{\Pi}_{sf}(X_f)$ и $\mathbf{\Pi}_{rf}(X_f)$. Токи $\underline{I}_{1лк}(X_f)$ и $\underline{I}_{2лк}(X_f)$ в зашунтированных входах выражаются через одно и то же неизвестное напряжение $\underline{U}_{fав}$. Так, в схеме рис. 1г при КЗ в первой линии в месте x_{f1} возникают локальные токи

$$\underline{I}_{1лк}(x_{f1}) = \frac{\underline{U}_{fав}}{\underline{Z}_{т1} + \underline{Z}_1^0 x_{f1}}, \qquad (8)$$

$$\underline{I}_{2лк}(x_{f1}) = \frac{\underline{Z}_и}{\underline{Z}^2(x_{f1})}\underline{U}_{fав}, \qquad (9)$$

$$\underline{Z}^2(x_{f1}) = \underline{Z}_и\left(\underline{Z}_1^0\left(l_1 - x_{f1}\right) + \underline{Z}_{л2} + \underline{Z}_{т2}\right) + \underline{Z}_1^0\left(l_1 - x_{f1}\right)\left(\underline{Z}_{л2} + \underline{Z}_{т2}\right).$$

Искомая функция замера определяется при КЗ в линии $Л_1$ подстановкой (8) и (9) в отношение (5)

$$\underline{K}(x_{f1}) = \frac{\underline{Z}^2(x_{f1}) - \underline{Z}_{\text{и}}\left(\underline{Z}_{\text{т1}} + \underline{Z}_1^0 x_{f1}\right)}{\underline{Z}^2(x_{f1}) + \underline{Z}_{\text{и}}\left(\underline{Z}_{\text{т1}} + \underline{Z}_1^0 x_{f1}\right)}, \qquad (10)$$

где $x_{f1} \in (0, X_{\text{л1}})$. Аналогичным образом определяется функция координаты других элементов цепи. Согласно (10) зависимость носит унифицированный характер, так как не зависит от величины переходного сопротивления КЗ.

Заключение

Обнаруженная зависимость соотношения локальных токов решает задачу распознавания повреждений в разных частях сети, питающей нагрузки, и позволяет БАВР определить, в какой из подводящих цепей произошло КЗ, и выполнить блокировку при КЗ в общей части сети, а также на шинах нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лямец Ю.Я., Белянин А.А.* Составляющие токов короткого замыкания в наблюдаемой электрической сети. Электротехника, 2016. № 10. С. 40-44.

2. *Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я., Макашкин Ф.А.* Унификация моделей и характеристик поврежденной электропередачи при двухстороннем наблюдении. Изв. РАН. Энергетика, 2020. № 4. С. 55-65.

3. *Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я., Макашкин Ф.А.* Распознающая способность локальных токов при двухстороннем наблюдении линии электропередачи. Электрические станции, 2020. № 6. С. 54-58.

4. *Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я., Макашкин Ф.А.* Информационные свойства и приложения локальной составляющей тока короткого замыкания. Электротехника, 2021. № 2. С. 49-58.

Авторы:

***Кочетов Иван Дмитриевич**, ООО «Релематика»/ЧГУ им. И.Н. Ульянова, инженер-исследователь, e-mail: ivankochetov171298@mail.ru.*

***Лямец Юрий Яковлевич**, информация об авторе приведена на стр. 10.*

***Макашкин Федор Анатольевич**, ООО «Релематика»/ЧГУ им. И.Н. Ульянова, инженер-исследователь, e-mail: fedya_makashkin@bk.ru.*

***Петряшин Илья Евгеньевич**, ООО «Релематика»/ЧГУ им. И.Н. Ульянова, техник-исследователь, e-mail: petry1405@mail.ru.*

МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКЕ РОТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Иванов Н.Г., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail: ivanov_ng@ekra.ru.

Глазырин А.В., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail: glazyrin_av@ekra.ru.

Кудряшова М.Н., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail: kudryashova_mn@ekra.ru.

Степанова Д.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail: stepanova_da@ekra.ru.

Аннотация: *Традиционные защиты ротора не обеспечивают надежную защиту генератора от межвитковых повреждений, поскольку они не чувствительны к межвитковым замыканиям без гальванической связи обмотки ротора с корпусом. В работе рассматриваются принципы обнаружения межвитковых замыканий обмотки ротора, обеспечивающие выявление всех видов повреждений, и основанные на мониторинге четных гармоник в напряжении статора и сравнении фактической ЭДС генератора с расчётной, полученной на основе измерений тока ротора.*

Ключевые слова: *витковое замыкание на землю, межвитковое замыкание.*

Введение

Витковые замыкания в обмотке ротора синхронного генератора приводят к нарушению симметрии магнитного поля, подвергая тем самым ротор машины неравномерному нагреву и нежелательной вибрации. Наряду с этим тепловая энергия, выделяемая током замыкания в месте пробоя межвитковой изоляции, оплавляет обмотку и сталь ротора [1]. Поэтому во избежание тяжелых повреждений в режиме витковых замыканий генератор должен немедленно отключаться от электрической сети.

Различают витковые замыкания, вызванные повреждением изоляции между обмоткой и корпусом ротора в двух точках, и повреждение межвитковой изоляции без замыкания на корпус.

Традиционные защиты от межвитковых замыканий, например, КЗР-2, выявляют только замыкание обмотки ротора через корпус, что несомненно делает их функционирование в защитах генераторов неполноценным.

В настоящей работе рассматриваются принципы обнаружения всех видов витковых замыканий обмотки ротора.

Выявление межвитковых замыканий на основе контроля четных гармоник

Распределение магнитной индукции ротора турбо и гидрогенераторов в нормальном режиме имеет форму трапеции, симметричной относительно оси координат (рис. 1) [2]. Результирующий магнитный поток ротора можно представить, как сумму магнитных потоков, создаваемых токами в витках обмотки.

Межвитковое замыкание приводит к шунтированию части обмотки и по этой части обмотки перестает протекать ток.

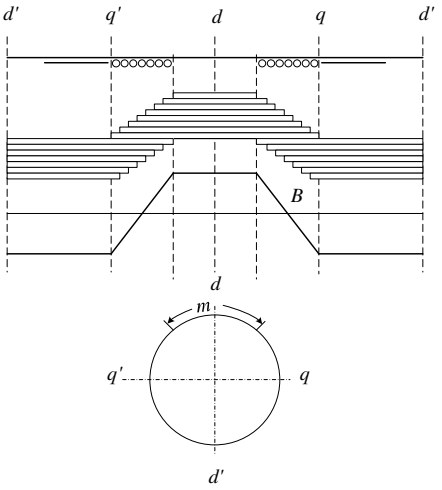


Рис.1. Магнитная индукция *B* двухполюсной машины, сопоставленная с развёрткой обмоток ротора

Магнитное поле ротора при витковом замыкании можно представить, как разность магнитного поля ротора в нормальном режиме и магнитного поля зашунтированной части обмотки (рис. 2). Несимметрия результирующего магнитного потока приводит к появлению в ЭДС генератора четных гармоник [2].

Амплитуды четных гармоник убывают с ростом порядка гармоники, поэтому для выявления межвитковых замыканий обычно осуществляют мониторинг второй гармоники, обладающей наибольшей амплитудой [3, 4]. Уровень четных гармоник зависит от числа замкнутых витков ротора, конструкции ротора и статора, и в случае турбогенератора - от положения замкнутых витков относительно главного зубца ротора.

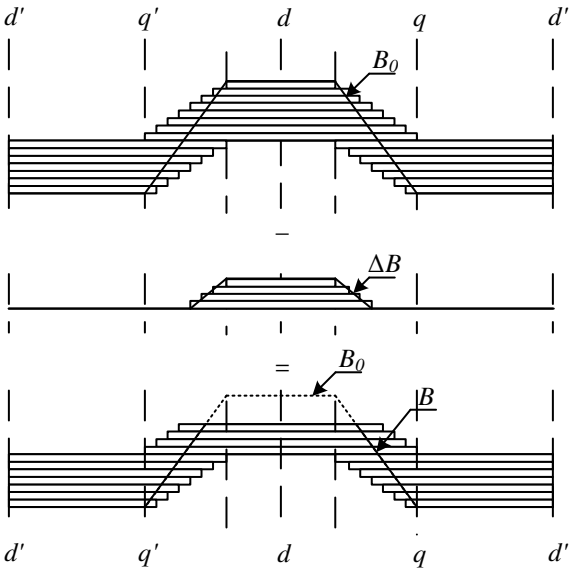


Рис.2. Магнитная индукция ротора турбогенератора: B_0 - магнитная индукция в нормальном режиме; ΔB - изменение магнитной индукции при витковом замыкании вблизи оси d'; B – результирующая магнитная индукция ротора при витковом замыкании

Пример зависимости уровня второй гармоники от числа замкнутых витков для турбогенератора типа ТВ2-30-2 (10,5кВ) приведен на рис. 3. Как видно из рисунка, при увеличении доли замкнутых витков γ от 0 до 100% уровень второй гармоники в ЭДС возрастает практически линейно. При этом замыкание вблизи оси *q* создает несколько больший уровень второй гармоники, чем замыкание вблизи оси *d* (около главного зубца). Из зависимости следует, что мониторинг уровня четных гармоник в напряжении генератора позволяет не только выявлять межвитковые повреждения, но и оценивать долю поврежденных витков.

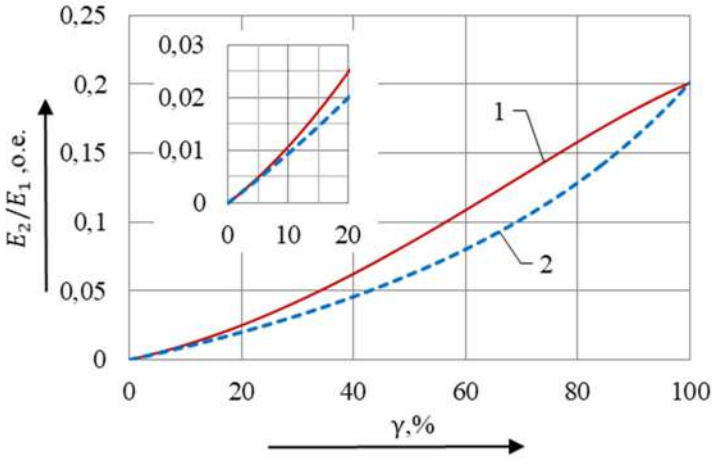


Рис. 3. Зависимость относительного значения ЭДС второй гармоники от количества замкнутых витков: 1 – замыкание вблизи к оси *q*; 2 – замыкание вблизи главного зубца

Главным преимуществом метода является то, что четные гармоники практически отсутствуют в нормальном режиме (из-за симметрии магнитной системы ротора) и их появление однозначно свидетельствует о межвитковом замыкании.

Недостатком метода является его неселективность при работе генератора на сборные шины или в укрупненном блоке. В таких схемах межвитковые повреждения одного из генераторов

приводят к появлению четных гармоник в напряжениях на выводах всех параллельно работающих генераторов.

Еще одним недостатком метода является изменение чувствительности защиты при изменениях в конфигурации и режимах электрической сети.

Выявление межвитковых замыканий на основе мониторинга основной гармоники ЭДС

В результате витковых замыканий происходит снижение амплитуды магнитного потока (рис. 2), что приводит к снижению ЭДС основной гармоники генератора. Этот факт может использоваться для выявления витковых замыканий.

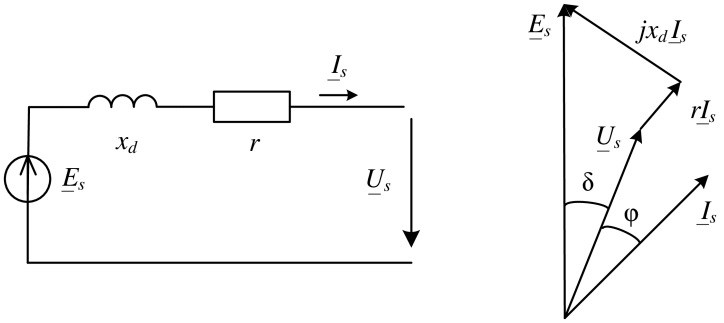
Одним из вариантов метода является сравнение значений ЭДС генератора, рассчитанного на основе измерений комплексных амплитуд тока $\underline{I}_s$ и напряжения $\underline{U}_s$ статора, и ЭДС генератора по диаграмме Потье, рассчитанного на основе измерений тока ротора. Согласно методу, сначала из измерений тока и напряжения рассчитывают падение напряжения на обмотках статора как показано на рис. 4, затем рассчитывают ЭДС:

$$\underline{E}_q = \underline{U}_s + r\underline{I}_s + jx_d\underline{I}_s ,$$

где r, x_d – активное и реактивное сопротивление схемы замещения генератора (рис. 4).

Далее на основе измерений тока ротора с помощью диаграммы Потье рассчитывается значение ЭДС. Различия между рассчитанными ЭДС свидетельствуют о наличии виткового повреждения в роторе генератора.

Величина различия расчетных ЭДС так же, как и в случае четных гармоник, зависит от числа замкнутых витков ротора, конструкции ротора и статора, и от положения замкнутых витков относительно главного зубца ротора. Пример изменения уровня ЭДС основной гармоники при витковых замыканиях для турбогенератора типа ТВ2-30-2 (10,5кВ) приведен на рис. 5.



а б

Рис. 4. Схема замещения неявнополюсного генератора (а) и векторная диаграмма (б), используемая для определения ЭДС по измерениям тока и напряжения статора при индуктивной нагрузке, где δ – угол между ЭДС и напряжением генератора; φ – угол между напряжением и током генератора

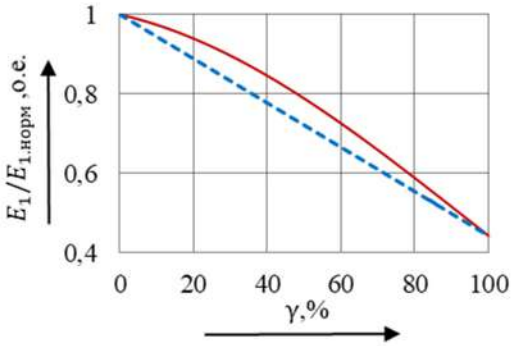


Рис.5. Зависимость уровня ЭДС первой гармоники от доли замкнутых витков обмотки ротора

Преимуществом рассматриваемого метода является его селективность при работе генератора на сборные шины или в укрупненном блоке.

Недостатком является необходимость отстройки защиты от небалансов, вызванных неточным заданием параметров модели

генератора. Из-за этого становится невозможным выявлять витковые замыкания с малым числом замкнутых витков, сопровождающиеся небольшим изменением ЭДС.

Заключение

1. Традиционные защиты не позволяют обеспечить надежную защиту генератора от межвитковых повреждений, поскольку они не чувствительны к межвитковым замыканиям без гальванической связи обмотки ротора с корпусом.

2. Появление четных гармоник в напряжении генератора является явным признаком межвитковых повреждений в роторе. Однако реализация защиты генератора, работающего на сборные шины или в укрупненном блоке, на этом принципе требует использования дополнительных информационных признаков для обеспечения ее селективности.

3. Выявление межвитковых замыканий в обмотке ротора может осуществляться на основе сравнения фактического уровня ЭДС основной гармоники со значением, рассчитанным по измерениям тока ротора. Такой метод обладает ограниченной чувствительностью, поскольку при малом числе поврежденных витков изменение амплитуды основной гармоники ЭДС не превышает уровня небаланса, вызванного неточностью задания параметров генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEEE Guide for Online Monitoring of Large Synchronous Generators (10 MVA and Above) // IEEE Power and Energy Society. IEEE Std 1129. – 2014.

2. В.И. Антонов, В.А. Наумов, А.В. Солдатов, Н.Г. Иванов, О.П. Николаева. Цифровая защита ротора турбогенератора от замыканий на землю в двух точках // Труды академии электротехнических наук ЧР. Чебоксары, 2017, №1, с. 98–101.

3. В.И. Антонов, В.А. Наумов, А.В. Солдатов, Н.Г. Иванов, О.П. Николаева. Фильтры симметричных составляющих с широким рабочим диапазоном частот для цифровой релейной защиты// Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 12 Всерос. Науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. С.388–391

4. Антонов В.И., Наумов В.А., Солдатов А.В., Иванов Н.Г., Николаева О.П. Точность оценки симметричных составляющих электрических величин в системах релейной защиты и автоматики // Материалы 10-й Всерос. Науч.-техн. конф. «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике». Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. С.229–232.

Авторы:

Иванов Николай Геннадьевич, *руководитель группы разработки ИЭУ департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», аспирант ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Получил степень магистра техники и технологии по направлению «Электроэнергетика и электротехника» на кафедре ТОЭ и РЗА электроэнергетического факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2013 году. E-mail: ivanov_ng@ekra.ru.*

Глазырин Анатолий Вячеславович*, инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», магистрант ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Автоматика энергосистем». Окончил в 2020 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: glazyrin_av@ekra.ru.*

Кудряшова Мария Николаевна*, инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». Окончила в 2020 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получила степень магистра по направлению «Автоматика энергосистем». E-mail: kudryashova_mn@ekra.ru.*

Степанова Дарья Александровна*, техник департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», бакалавр ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: stepanova_da@ekra.ru.*

ПРОВЕРКА ТЕРМИНАЛОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И РЕКЛОУЗЕРОВ С НИЗКОВОЛЬТНЫМИ ВХОДАМИ

Александрова Т.В., НПП «Динамика», Чебоксары, Россия. E-mail: alexandrova-tv@retom.ru

Аннотация: *В данном докладе представлены особенности проверки терминалов релейной защиты и реклоузеров с датчиками Роговского и делителями напряжения. Исследование выполнено с*

помощью компьютерно-управляемого испытательного комплекса РЕТОМ-71 (ООО НПП «Динамика»).

Ключевые слова: *релейная защита, реклоузер, датчик Роговского, испытательная система.*

Введение

Реклоузер – это интеллектуальный коммутационный аппарат, объединяющий в одном устройстве силовой вакуумный выключатель наружного исполнения с интегрированной системой измерения токов и напряжений и микропроцессорный шкаф управления с продвинутыми функциями защит и автоматики, специально адаптированными под нужды воздушных распределительных сетей.

Применение нетрадиционных датчиков тока в реклоузерах с низковольтными входами является перспективным, поскольку они обладают необходимой точностью измерений во всех режимах работы, имеют линейные рабочие характеристики, обладают компактными размерами и весят в разы меньше электромагнитных ТТ. Такие датчики тока имеют низкое напряжение выходного сигнала в нормальном режиме работы, а при повреждениях это напряжение не превышает допустимых безопасных пределов. Современные катушки Роговского обеспечивают требуемую точность, как для целей защиты, так и для целей учета электроэнергии.

Однако, в отличие от традиционных ТТ, вторичный ток которых пропорционален первичному току, выходное напряжение катушек Роговского является масштабированной производной по времени di(t)/dt первичного тока. Для устройств защиты, которые используют в работе аналоговые значения промышленной частоты, необходима дополнительная обработка входного сигнала от датчиков тока, а микропроцессорное оборудование должно иметь конструктивную возможность принимать сигналы такого типа.

Необработанный выходной сигнал пропорционален производной тока в первичной цепи по времени и для восстановления сигнала, пропорционального току, необходимо применить интегратор или фильтр нижних частот.

Выходной сигнал катушки Роговского – это низковольтный сигнал. Фазовый угол между вторичным напряжением и первичным током составляет 90°, что необходимо учитывать при проектировании комплексов РЗА.

В качестве нетрадиционных датчиков для канала напряжения используются делители напряжения.

Делителем напряжения называется прибор или устройство, которое понижает уровень выходного напряжения относительно входного, пропорционально коэффициенту передачи U_{out}= аU_{in} (он будет всегда ниже нуля 0≤ α ≤1). Такое название он получил, потому что представляет собой два и более последовательно соединенных участка цепи.

Различают линейные и нелинейные делители напряжения. В линейных – выходное напряжение изменяется по линейному закону в зависимости от входного. В нелинейных делителях выходное напряжение зависит от коэффициента α нелинейно. Нелинейные делители напряжения применяются в функциональных потенциометрах. Сопротивление может быть как активным, так и реактивным, а также и вовсе нелинейным, как, например, в параметрическом стабилизаторе напряжения.

В реклоузерах с нетрадиционными датчиками происходит дифференцирование сигнала напряжения в ток с помощью катушек Роговского и интегрирование сигнала делителем напряжения со сдвигом фазы тока и напряжения.

Например, с испытательного комплекса РЕТОМ-71 было выдано напряжение по фазе А $U = 1$ В на канал напряжения реклоузера, которое, в свою очередь, преобразуется в напряжение 20 кВ согласно коэффициенту трансформации из В в кВ $k = 20$. Также было выдано напряжение через $3U0 = 3$ В, преобразующееся в ток $I_a = 1{,}071$ кА, коэффициент трансформации из В в кА $k = 2{,}8$. Угол сдвига между сигналами равен нулю. На рис. 1 приведена осциллограмма напряжений, выдаваемых с РЕТОМ-71.

На рис. 2 приведены осциллограммы входных токов и напряжений с реклоузера. При выдаче напряжения на каналы тока и напряжения одной фазы в конечном счете получим ток и напряжение с разницей угла между ними 180 градусов.

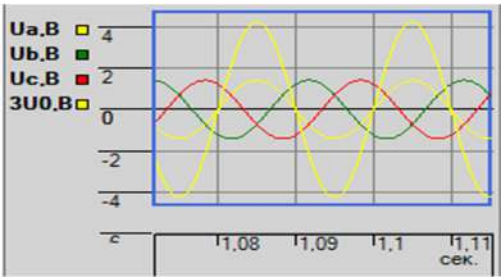


Рис. 1. Осциллограмма выходных напряжений с РЕТОМ-71

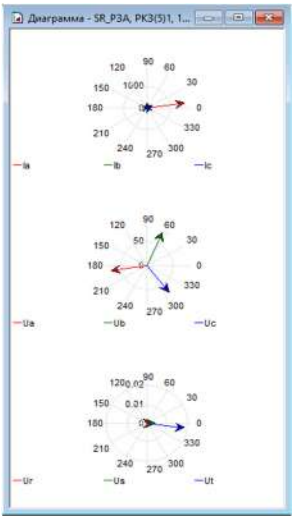


Рис. 2. Осциллограмма входных токов и напряжений с реклоузера

Перечень функций РЗА реклоузеров (или многофункциональных терминалов) достаточно большой: ненаправленная и направленная максимально-токовая защита (МТЗ), контроль напряжения (КН), защита от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), автоматическое повторное включение (АПВ), защита минимального напряжения (ЗМН), автоматическая частотная разгрузка (АЧР), включение на холодную нагрузку (ВХН), защита от обрыва фазы по напряжению обратной последовательности (ЗОФ U2), защита от обрыва фаз по току обратной последовательности (ЗОФ I2), токовая защита от коротких замыканий на землю (ЗЗЗ), защита

минимального напряжения (ЗМН), защита от повышения напряжения (ЗПН). Соответственно, актуальна задача автоматизации проверки данных устройств.

С помощью испытательного комплекса РЕТОМ-71 можно обеспечить подключение к реклоузеру/терминалу 6-ти каналов напряжения, которые в различных комбинациях могут выполнять моделирование сигналов тока катушек Роговского и/или делителей напряжения для проверки любых функций защиты и автоматики.

Заключение

Возможности испытательного комплекса РЕТОМ-71 с 6-ю каналами напряжения позволяют выполнять тестирование функций РЗА реклоузера с нетрадиционными измерительными датчиками, с учётом их особенностей, в ручном и автоматическом режимах. В дальнейшем планируется разработка приставки для комплекса приборов РЕТОМ-51/61/71 с целью одновременного использования от 3 до 6-ти каналов тока и от 4 до 6-ти каналов напряжения, что позволит увеличить количество преобразовываемых сигналов с катушки Роговского и делителей напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Федосеев А.М., Федосеев М.А.* Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.

2. СТО 34.01-2.2-033.1-2017 – Линейное коммутационное оборудование 6 - 35 кВ - секционирующие пункты (реклоузеры). Том 1.2 Секционирующие пункты (реклоузеры) Книга 1.2.1 "Реклоузеры АО "ГК "Таврида Электрик" – 200 с.

Автор:

Александрова Таисия Валерьевна*, инженер-исследователь, ООО «НПП «Динамика», бакалавр направления 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, ЧГУ им. И.Н.Ульянова, e-mail: alexandrova-tv@retom.ru.*

ПРЕЦИЗИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА КАЧАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Никитина А.Н., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail: nikitina_an@erka.ru.

Петров В.С., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail: petrov_vs@erka.ru.

Антонов В.И., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail: antonov_vi@ekra.ru.

Наумов В.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail: naumov_va@ekra.ru.

Аннотация: *в работе предлагается прецизионный способ определения места ЭЦК, основанный на декомпозиции входного сигнала асинхронного режима электрической сети.*

Ключевые слова: *асинхронный режим, электрический центр качаний, автоматика ликвидации асинхронного режима.*

Введение

Входной электрический сигнал АЛАР в асинхронном режиме представляет собой сумму двух гармоник [1]. Традиционно АЛАР не используют эту особенность сигнала в своих алгоритмах, более того она рассматривается как усложняющее условия её функционирования. В настоящей работе делается попытка использовать эту особенность сигнала при прецизионном определении места электрического центра качания (ЭЦК) в асинхронном режиме электрической сети.

Сигналы асинхронного режима и информационные параметры

АЛАР используют локальные измерения тока и напряжения (рис. 1). Векторы тока и напряжения в месте установки устройства АЛАР в двухчастотном асинхронном режиме состоят из векторов токов $\underline{I}_{\text{н}}(\omega_1)$ и $\underline{I}_{\text{н}}(\omega_2)$ и напряжений $\underline{U}_{\text{н}}(\omega_1)$ и $\underline{U}_{\text{н}}(\omega_2)$ частот ω_1 и ω_2 источников $\underline{E}_1(\omega_1)$ и $\underline{E}_2(\omega_2)$

соответственно:

$$\underline{I}_{\text{н}} = \underline{I}_{\text{н}}(\omega_1) - \underline{I}_{\text{н}}(\omega_2)\,, \tag{1}$$

$$\underline{U}_{\text{н}} = \underline{U}_{\text{н}}(\omega_1) + \underline{U}_{\text{н}}(\omega_2). \tag{2}$$

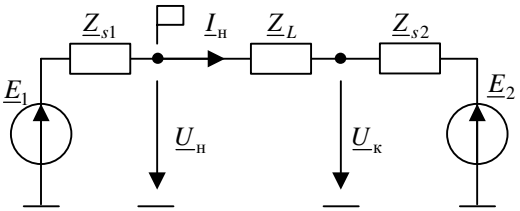


Рис. 1. Двухмашинная схема замещения ЭЭС: флажком обозначено место установки устройства АЛАР; $\underline{E}_1$, $\underline{E}_2$ и $\underline{Z}_{s1}$, $\underline{Z}_{s2}$ – эквивалентные ЭДС и сопротивления систем; $\underline{Z}_L$ – сопротивление линии электропередачи; $\underline{U}_{\text{н}}$ и $\underline{I}_{\text{н}}$ – измеряемые напряжение и ток; $\underline{U}_{\text{к}}$ – напряжение в конце контролируемого участка

Для функционирования АЛАР необходимо рассчитать напряжение в конце контролируемого участка [2], для расчета составляющих векторов напряжения используются измерения (1) и (2):

$$\underline{U}_{\text{к}}(\omega_1) = \underline{\mathbf{b}}(\omega_1) \left\| \begin{matrix} \underline{U}_{\text{н}}(\omega_1) \\ \underline{I}_{\text{н}}(\omega_1) \end{matrix} \right\| \tag{3}$$

$$\underline{U}_{\text{к}}(\omega_2) = \underline{\mathbf{b}}(\omega_2) \left\| \begin{matrix} \underline{U}_{\text{н}}(\omega_2) \\ \underline{I}_{\text{н}}(\omega_2) \end{matrix} \right\| \tag{4}$$

где $\underline{\mathbf{b}}(\omega_i) = \left\| 1 \quad \underline{Z}_L(\omega_i) \right\|^T$ – вектор параметров контролируемого участка, $i = 1,2$. Искомый вектор напряжения в конце контролируемого участка будет равен:

$$\underline{U}_{\text{к}} = \underline{U}_{\text{к}}(\omega_1) + \underline{U}_{\text{к}}(\omega_2)\,. \tag{5}$$

Локализация места ЭЦК

Местоположение ЭЦК на контролируемом участке определяется на основе анализа годографов векторов напряжения по его концам участка (2) и (5). Пример годографа, когда ЭЦК находится на контролируемом участке, приведен на рис. 2. Все векторы годографа находятся в движении в соответствии с

частотами своих гармоник, но относительное движение векторов статично относительно одной частоты. Удобно рассматривать годографы относительно векторов одной частоты, выражая другую частоту через первую: $\omega_2 = \omega_1 + \Delta\omega$, где $\Delta\omega$ – скольжение. Тогда составляющие результирующих векторов напряжений по концам участка представляются через векторы составляющих разных частот. Векторы составляющих частоты ω_1 будут фиксированы во времени, а векторы составляющих частоты ω_2 проскальзывают частотой скольжения $\Delta\omega$:

$$\underline{U}_{\text{н}}(k) = \underline{U}_{\text{н}}(\omega_1) + \underline{U}_{\text{н}}(\omega_2) e^{j\Delta\omega k T_s} \qquad (6)$$

и

$$\underline{U}_{\text{к}}(k) = \underline{U}_{\text{к}}(\omega_1) + \underline{U}_{\text{к}}(\omega_2) e^{j\Delta\omega k T_s}. \qquad (7)$$

Годографы напряжений (6) и (7) представляют собой окружности, положение центров которых определяются векторами напряжений частоты ω_1, а величина радиусов – модулями векторов напряжения частоты ω_2.

Признаком, что ЭЦК находится на контролируемом участке, является охват только одной из окружностей начала координат комплексной плоскости. В противном случае ЭЦК находится вне контролируемого участка.

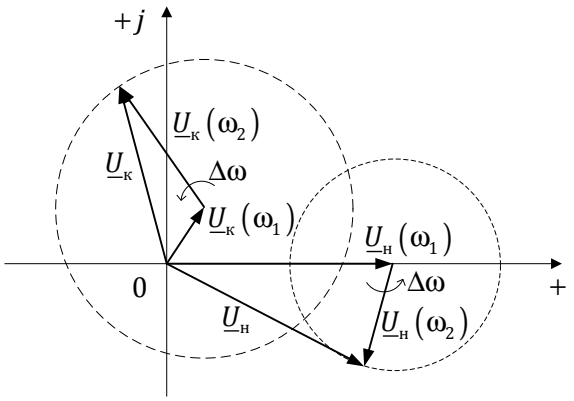


Рис. 2. Годографы векторов напряжения

Заключение

Декомпозиция сигнала асинхронного режима электрической сети на составляющие различных частот и использование моделей сети для отдельных составляющих сигнала повышает селективность и точность определения места электрического центра качания на контролируемом участке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антонов В.И., Наумов В.А., Петров В.С., Солдатов А.В., Никитина А.Н.* Новый способ выявления момента изменения режима электрической сети // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. С. 382–385.

2. *Никитина А.Н. Петров В.С., Наумов В.А., Антонов В.И.* Оптимальный учёт промежуточного отбора мощности в устройствах автоматики ликвидации асинхронного режима // Релейная защита и автоматизация», № 02 (39), 2020, с. 39 – 45.

Авторы:

Никитина Анастасия Николаевна*, аспирант Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, инженер-исследователь 3 категории департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». В 2020 г. окончила факультет энергетики и электротехники Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, получила степень магистра по направлению «Автоматика энергосистем». E-mail: nikitina_an@ekra.ru.*

Петров Владимир Сергеевич, *доцент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, руководитель группы департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». В 2010 г. окончил электроэнергетический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 2015 г. защитил в Чувашском государственном университете имени И.Н. Ульянова кандидатскую диссертацию «Цифровая система автоматического ограничения повышения напряжения сетей 110-750 кВ». E-mail: petrov_vs@ekra.ru.*

Антонов Владислав Иванович, *профессор кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики Чувашского государственного университета*

им. И.Н. Ульянова, главный специалист департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». В 2018 г. защитил докторскую диссертацию «Теория и приложения адаптивного структурного анализа сигналов в интеллектуальной электроэнергетике». E-mail: antonov_vi@ekra.ru.

***Наумов Владимир Александрович**, доцент кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем им. А.А. Федорова Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, заместитель генерального директора – технический директор ООО НПП «ЭКРА». Получил диплом инженера в 2001 г., защитил магистерскую диссертацию в 2002 г. на электроэнергетическом факультете ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2005 г. защитил во ВНИИЭ кандидатскую диссертацию «Анализ и совершенствование продольных дифференциальных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор». E-mail: naumov_va@ekra.ru.*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАБЛЮДАЕМОГО ПРОЦЕССА

Кочетов И. Д., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия. E-mail: ivankochetov171298@mail.ru.

Лямец Ю. Я., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия. E-mail: yu.ya.liamets@gmail.com.

Макашкин Ф. А., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия, E-mail: fedya_makashkin@bk.ru

***Аннотация:** в релейной защите широко известна практика разделения наблюдаемого процесса на предшествующий и текущий режимы. Производный от них чисто аварийный режим наряду с текущим несёт в себе информацию о повреждении наблюдаемого энергообъекта. Было обнаружено, что текущий и чисто аварийный режимы в свою очередь могут быть разделены на две составляющие: нормальную (или экстремальную) и локальную. Различный подход в определении первого компонента обусловлен различной природой активирующих их моделей: нормальная составляющая определяется моделью неповреждённого объекта, в то время как экстремальная – моделью его повреждённого состояния. Определяемая с их помощью локальная составляющая наблюдаемого процесса представляет особую информационную ценность для алгоритмов релейной защиты,*

поскольку непосредственно связанна с местом повреждения. Соотношения же локальных составляющих позволяют построить унифицированный алгоритм для оценки места повреждения, так как обнаруживают сильную зависимость от места замыкания и независимость от внешней по отношению к наблюдаемому объекту части энергосистемы.

Ключевые слова: *нормальный и экстремальный режимы, локальные составляющие, определение места повреждения.*

Введение

С развитием средств связи появляется возможность применять методы определения места повреждения (ОМП) линии электропередачи на основе наблюдаемых с двух сторон токов и напряжений. Одним из таких методов является ОМП на основе локальных составляющих наблюдаемого процесса. Так называемый локальный режим, будучи частью текущего или чисто аварийного режимов, концентрирует в себе информацию о повреждении наблюдаемого энергообъекта, а различные соотношения локальных составляющих наблюдаемых величин проявляют свойства, которые позволяют применять их в различных задачах РЗА, в частности в задаче определения места повреждения.

Информационный компонент локальных составляющих при повреждении энергообъекта

Пусть имеется некоторый энергообъект, наблюдаемый с двух сторон, наблюдателю доступны комплексы токов и напряжений $\underline{I}_s$, $\underline{U}_s$ и $\underline{I}_r$, $\underline{U}_r$. Предположим, что в данном объекте произошло повреждение в некотором неизвестном месте x_f, в котором действует неизвестный источник тока КЗ (рис. 1а) или ЭДС (рис. 1е). Таким образом, модель текущего или чисто аварийного режима содержит три источника: по одному от каждого места наблюдения, а также источник тока КЗ или ЭДС. Воспользовавшись принципом наложения, обнаружим двухкомпонентную структуру, первая из которых активируется источниками наблюдаемых величин токов или напряжений (рис. 1б, г, ж, и), а вторая – источником в месте повреждения (рис. 1в, д, з, к) [1]. Особую информационную ценность несёт в себе

вторая структура, получившая название локальной составляющей наблюдаемого процесса и концентрирующая в себе информацию о месте повреждения энергообъекта. Её ценность заключается ещё и в том, что она не зависит от внешних связей объекта, величины тока КЗ, а определяется только структурой и параметрами наблюдаемого объекта. Последнее свойство позволяет для объекта любой конфигурации построить априорную характеристику зависимости соотношения локальных составляющих от места повреждения.

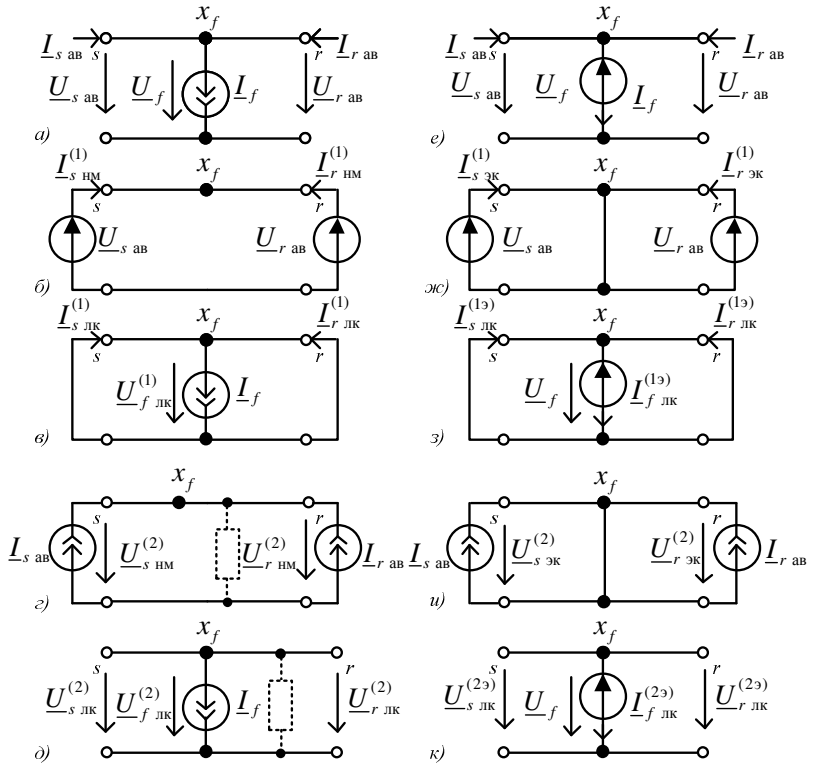


Рис. 1. Наблюдаемый чисто аварийный режим и его составляющие:
а, *е* – варианты аварийного режима с источником тока и ЭДС в месте повреждения, *б*, *г*, *ж*, *и* – варианты нормального или экстремального режимов, *в*, *д*, *з*, *к* – варианты локального режима.

Рассмотрим модели локального режима по рис. 1в, з, эквивалентные друг другу. В этом случае модель локального режима активируется источником тока или ЭДС, выходы которой зашунтированы в местах наблюдения. Полученные таким образом локальные токи обнаруживают любопытное свойство: их соотношение в виде

$$\underline{K} = \frac{\underline{I}_{s\,\text{лк}} - \underline{I}_{r\,\text{лк}}}{\underline{I}_{s\,\text{лк}} + \underline{I}_{r\,\text{лк}}} \qquad (1)$$

для однородной линии представляет собой простейшую линейную зависимость от места повреждения

$$k = 1 - 2x_f^*,$$

где x_f^* – координата места повреждения в о.е.

Модели же локального режима по рис. 1д, к имеют иные свойства: они также активируется источником тока или ЭДС, однако выходы моделей оказываются оборванными. Стоит отметить, что модель по рис. 1д оказывается чувствительной к различным видам погрешностей в задании источника тока, поэтому целесообразно применять её в случае наличия поперечных элементов. Данного недостатка лишена эквивалентная модель по рис. 1к. Аналогичное соотношение локальных напряжений

$$\underline{H} = \frac{\underline{U}_{s\,\text{лк}} - \underline{U}_{r\,\text{лк}}}{\underline{U}_{s\,\text{лк}} + \underline{U}_{r\,\text{лк}}} \qquad (2)$$

для каждого места повреждения оказывается равным нулю. Данное свойство может быть использовано в процедуре оценки координаты места повреждения отличным от замера (1) способом.

Локальные составляющие как часть наблюдаемого процесса

Определение локальной составляющей наблюдаемого процесса по текущим или аварийным токам и напряжениям связано с нахождением нормальных или экстремальных составляющих [2]. В то время как нормальные токи или напряжения могут быть получены путём воздействия на

пассивную модель неповреждённого объекта, именуемую нормальной моделью, текущих или аварийных составляющих напряжений или токов (рис. 1в, г), экстремальные составляющие возникают в пассивной модели предположительно повреждённого объекта путём воздействия всё тех же текущих или аварийных составляющих наблюдаемых величин (рис. 1ж, и). Отличие данных моделей заключается в различном представлении источника в месте повреждения в модели текущего или чисто аварийного режима: для нормальных составляющих это источник тока КЗ, который отключается от модели по принципу наложения, а для экстремальных – источник ЭДС, который закорачивается в модели соответствующего режима. В то же время сами локальные составляющие, полученные различными способами, не имеют принципиальных различий

$$\underline{I}_{\text{лк}} = \underline{I}^{\text{э}}_{\text{лк}} = \underline{I}_{\text{ав}} - \underline{I}_{\text{нм}} = \underline{I}_{\text{ав}} - \underline{I}_{\text{эк}},$$

$$\underline{U}_{\text{лк}} = \underline{U}^{\text{э}}_{\text{лк}} = \underline{U}_{\text{ав}} - \underline{U}_{\text{нм}} = \underline{U}_{\text{ав}} - \underline{U}_{\text{эк}}$$

и определяются как разность между текущими или чисто аварийными составляющими и их нормальными или экстремальными компонентами.

Оценка координаты места повреждения может производится двумя различными способами. Первый вариант заключается в определении локальных составляющих токов по моделям рис. 1б, в и соотношения (1), по которому координата места повреждения находится путём сопоставления замера (1) с заранее заданной априорной характеристикой. Второй же вариант заключается в нахождении экстремальных составляющих напряжений по модели экстремального режима (рис. 1и), в которой место предполагаемого повреждения варьируется по всей длине наблюдаемого объекта. Для каждого предполагаемого места повреждения рассчитываются экстремальные и локальные составляющие наблюдаемых напряжений, после чего строится замер (2), который при попадании в истинное место повреждения обращается в нуль. Последний вариант оценки координаты места повреждения может быть использован для проверки корректности ОМП по первому варианту, поскольку модель экстремального режима содержит закоротку (рис. 1и),

нивелирующую влияние возможных поперечных элементов модели, вносящих дополнительную погрешность в ОМП.

Заключение

Локальная составляющая, будучи частью наблюдаемого процесса, концентрирует в себе информацию о месте повреждения энергообъекта и не зависит ни от внешних связей объекта, ни от величины тока КЗ, а определяется только его структурой и параметрами. Данные особенности позволяют применять локальные составляющие в различных задачах РЗА, таких как ОМП линии электропередачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лямец Ю.Я., Белянин А.А.* Составляющие токов короткого замыкания в наблюдаемой электрической сети. Электротехника, 2016. № 10. С. 40-44.

2. *Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я., Макашкин Ф.А.* Унификация моделей и характеристик поврежденной электропередачи при двухстороннем наблюдении. Изв. РАН. Энергетика, 2020. № 4. С. 55-65.

Авторы:

Кочетов Иван Дмитриевич*, информация об авторе приведена на стр. 17.*

Лямец Юрий Яковлевич*, информация об авторе приведена на стр. 10.*

Макашкин Федор Анатольевич*, информация об авторе приведена на стр. 17.*

РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Касторова Д.А., ООО «НПП «Динамика», г. Чебоксары, Россия. E-mail: ilina-da@retom.ru.

Аннотация: *В докладе рассмотрены особенности проведения автоматических проверок современных микропроцессорных и цифровых терминалов шкафов РЗА традиционных и цифровых подстанций. Предложен состав программно-технического комплекса на основе устройств РЕТОМ-51/61/71 для формирования алгоритма автоматической диагностики для каждого типа шкафа.*

Ключевые слова: *цифровая подстанция, микропроцессорный терминал, автоматизированная проверка, релейная защита и автоматика.*

Введение

Сфера электроэнергетики постоянно развивается, происходит цифровая трансформация энергообъектов. Также меняются системы релейной защиты: электромеханические, полупроводниковые и традиционные микропроцессорные устройства (выполняющие функции РЗА) заменяются на цифровые терминалы с поддержкой стандарта МЭК 61850. Для того чтобы устройства РЗА сохраняли работоспособное состояние в течение всего жизненного цикла и надежно работали без отказов, необходимо выполнять их техническое обслуживание. В техническое обслуживание входит, в том числе и объективная диагностика функций РЗА микропроцессорных устройств (цифровых интеллектуальных электронных устройств).

Цифровая релейная защита

В связи с обширным внедрением цифровой (микропроцессорной) техники в релейной защите произошли значительные изменения. Процедуры цифровых обработок сигналов, применяющихся в устройствах РЗА, практически не изменили принципы построения систем защит. Но они оказали влияние на структуру новых устройств РЗА, на методы синтеза измерительной части микропроцессорных реле и на анализ их свойств. Благодаря цифровым приемам обработки информации расширяются функциональные возможности и улучшаются эксплуатационные характеристики устройств [1].

Разработка специального программного обеспечения

Повышение эффективности функционирования устройств за счет развития систем диагностики цифровой релейной защиты и автоматики является актуальной задачей. Требуется разработка новых подходов к автоматизированному тестированию таких защит. Применение специального программного обеспечения (СПО), автоматизирующего проверки оборудования РЗА и АСУ ТП, способствует повышению стабильности работы ЦПС.

С помощью СПО можно сопровождать весь жизненный цикл цифровой подстанции – от проектирования до пуско-наладочных работ.

Структура разработки СПО и его дальнейшее использование для автоматизированного тестирования шкафов РЗА представлена на рис. 1.

Рассмотрим процесс создания СПО для современных шкафов любых типов и производителей. Специалист в области релейной защиты разрабатывает программу автоматических проверок в ПО «Конструктор проверок» производства ООО «НПП «Динамика» [2]. Преимуществом данного ПО является возможность работы в нем без навыков программирования, достаточно лишь знать принципы работы релейной защиты и автоматики.

«Конструктор проверок» — это визуальная среда для разработки сценариев проверки каждого конкретного оборудования РЗА. Сценарии проверки – это файлы шаблонов, которые описывают структурные элементы устройств РЗА и метод их проверки. Шаблон создается под конкретные условия

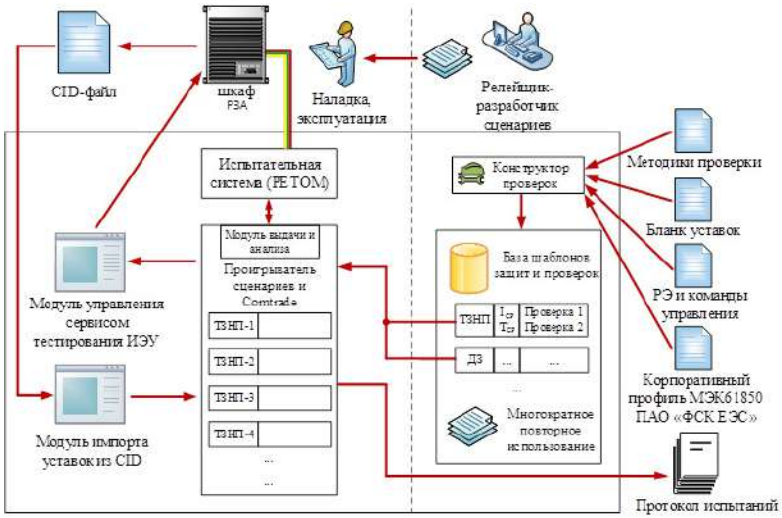


Рис. 1. Структура разработки и использования СПО

проверки либо добавляется из встроенной в ПО библиотеки базовых шаблонов. Созданная автоматическая программа состоит из редактируемых уставок, шаблонов проверок, схемы подключения терминала и протокола проверки. Разработанное СПО работает на базе приборов РЕТОМ-51/61/71.

Заключение

Таким образом, специальное программное обеспечение совместно с одним из испытательных устройств РЕТОМ-51/61/71 образуют полноценный программно-технический комплекс (ПТК), который позволяет провести автоматизированное тестирование современных и типовых шкафов РЗА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шнеерсон Э.М.* Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

2. Руководство пользователя для программы «Конструктор проверок» / ООО «НПП «Динамика». – Чебоксары, 2020. – 71 с.

Автор:

Касторова Дарья Андреевна*, инженер-исследователь, ООО «НПП «Динамика», магистр направления 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, ЧГУ им. И.Н.Ульянова, ilina-da@retom.ru.*

ОСОБЕННОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ПОМОЩЬЮ БЛОКА GPS СИНХРОНИЗАЦИИ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Митрюхин Е. Л., ООО «НПП «Динамика», г. Чебоксары, Россия. E-mail: mitryukhin-el@retom.ru.

Аннотация. *В докладе рассматривается синхронизация испытательных комплексов РЕТОМ-61 для проверки полукомплектов дифференциальной защиты линии. Произведен анализ особенностей синхронизации на основе терминалов дифференциальной защиты линии REL 551 ABB.*

Ключевые слова: *синхронизация, релейная защита, GPS, РЕТОМ-61*

Введение

В настоящее время для реализации быстродействующей защиты линии электропередачи 110-220 кВ с абсолютной селективностью все чаще находит применение дифференциальная защита линии (ДЗЛ). Для реализации ДЗЛ информация об измеряемых токах должна передаваться на противоположные концы ЛЭП на значительные расстояния. Современный уровень устройств релейной защиты позволил увеличить область применения ДЗЛ за счет использования волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) для передачи информации с одного конца ЛЭП на другой. Проверить подобную защиту можно с помощью двух приборов типа РЕТОМ, генерирующих токи с нулевым фазовым сдвигом благодаря синхронизации через спутниковую систему глобального позиционирования (GPS).

Особенности синхронизации

В качестве объекта испытаний выбрана схема ЛЭП с двумя терминалами дифференциальной защиты линии REL 551 ABB [1], расположенными на противоположных концах линии. В терминале для каждой фазы независимо рассчитываются действующие значения первой гармоники дифференциального и тормозного токов:

$$I_{\text{диф}} = \overline{|I_1|} + \overline{|I_2|}, \qquad (1)$$

$$I_{\text{торм}} = \frac{\overline{|I_1|} + + \overline{|I_2|}}{2}, \qquad (2)$$

где $\overline{|I_1|}$ и $\overline{|I_2|}$ – фазные токи двух сторон защищаемой линии в относительных единицах с учетом выравнивания по величине и синхронизации по фазе.

Для проверки функции ДЗЛ необходимо синхронизировать испытательные комплексы РЕТОМ-61 [2], расположенные удаленно на разных подстанциях. Для дистанционной синхронизации выдаваемых сигналов посредством GPS-связи использовался блок временной синхронизации РЕТ-GPS, с помощью которого получили возможность одновременного

управления двумя комплексами РЕТОМ-61, подключенных по концам линий. Структурная схема подключения представлена на рисунке 1.

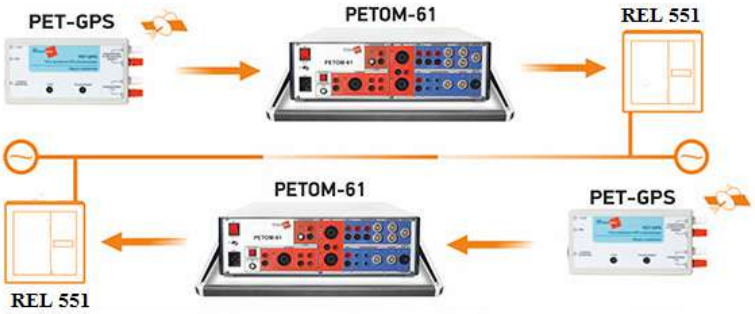


Рис. 1. Структурная схема подключения

При подключении выхода 1 (Синхронизация 1 Гц) блока к устройству РЕТОМ-61 на дискретный вход №8 (синхронизация по 8 контакту) все выдаваемые прибором РЕТОМ-61 сигналы будут синхронизированы 1 секундными импульсами, которые будут отображаться в виде замыканий 8-ого дискретного входа. В данном случае обеспечивается синхронное управление тестовыми воздействиями в ручном режиме и поочередная проверка уставок каждого полукомплекта ДЗЛ.

Для комплексной проверки поведения ДЗЛ при внешних и внутренних коротких замыканиях и оценки динамических характеристик (оценки срабатывания при наличии насыщения или апериодической составляющей) и временных характеристик (изменение времени срабатывания) необходимо подключить выход 2 (Запуск по времени) блока на вход РЕТОМ-61 для внешнего пуска. В результате чего, РЕТОМ-61 подготовится к работе, но будет ожидать внешнего пуска по дискретному входу от 2-ого канала блока PET-GPS в заданное время по Гринвичу.

Терминал ДЗЛ определяет три вектора фазных токов на своем конце линии и отправляет их в другой (удаленный) терминал по каналу связи. Соответственно этот же терминал получает информацию о трех токах от удаленного терминала и происходит пофазное сравнение токов. Таким образом, при внутреннем коротком замыкании при подаче в каждый из

полукомплектов трехфазных токов релейная защита срабатывает (вторичные токи суммируются в обмотке реле). При внешнем коротком замыкании при подаче токов с противоположными фазами ток в реле будет равен 0, и релейная защита не сработает (вторичные токи в обмотки реле вычитаются).

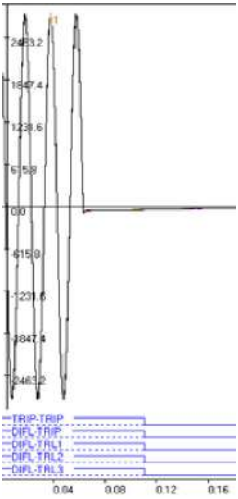


Рис. 2. Осциллограмма срабатывания ДЗЛ

Заключение

Применение блока временной GPS-синхронизации РЕТ-GPS необходимо для синхронизации нескольких испытательных комплексов с целью проверки функции дифференциальной защиты линии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техническое справочное руководство Protect^{IT} Терминал дифференциальной защиты линии REL 551*2.5. 1MRK 506152-UEN / ООО «АББ Автоматизация», 2003. – 290с.

2. Комплекс программно-технический измерительный РЕТОМ-61: руководство по эксплуатации. – Чебоксары, 2014. – 55 с.

Автор:

Митрюхин Евгений Леонидович*, инженер-исследователь ООО «НПП Динамика». E-mail: mitryukhin-el@retom.ru.*

ПРОВЕРКА ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННОГО ПРОВЕРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СЕРИИ РЕТОМ

Плеханов А.В., НПП «Динамика», г. Чебоксары, Россия.
Александров Н.М., НПП «Динамика», г. Чебоксары, Россия.

Аннотация: *В докладе рассмотрены особенности проверки трансформаторов тока (ТТ), применяемых в системах релейной защиты, с использованием устройств производства НПП «Динамика». Приведены методы и схемы тестирования ТТ, способы определения точки перегиба кривой намагничивания по нескольким стандартам ГОСТ, IEC, IEEE.*

Ключевые слова: *трансформатор тока, тестирование, РЕТОМ, вольт-амперная характеристика, сопротивление обмотки, точка перегиба.*

Введение

Трансформаторы тока (ТТ) играют важную роль в мониторинге и защите электроэнергетических систем. ТТ – это измерительные трансформаторы, используемые для преобразования первичного тока в пониженный вторичный ток. Важно регулярно проверять и калибровать ТТ и подключенные к ним приборы. Для обеспечения точности и оптимальной надежности обслуживания ТТ необходимо провести следующие электрические испытания [1]:

1. Проверка коэффициента трансформации;
2. Проверка полярности;
3. Снятие характеристики намагничивания. Расчет точки перегиба;
4. Проверка сопротивления изоляции;
5. Проверка сопротивления обмотки;
6. Нагрузочные испытания.

1. Проверка коэффициента трансформации

Коэффициент трансформации ТТ – это отношение первичного входного тока ко вторичному выходному току при полной нагрузке (например, 300/5) [2].

Коэффициент трансформации рассчитывается аналогично коэффициенту преобразования напряжения трансформаторов

напряжения:

$$N2 / N1 = U2 / U1,$$

где N – количество витков; U – показания напряжения.

Проверка соотношения выполняется путем подачи подходящего напряжения на вторичную обмотку ТТ, в то время как напряжение на первичной обмотке измеряется для вычисления отношения витков по приведенному выше выражению.

2. Проверка полярности

Трансформаторы тока имеют полярность и соответствующие обозначения для визуальной идентификации направления тока: Л – первичный ток; И – вторичный ток. Испытание полярности доказывает, что прогнозируемое направление вторичного тока ТТ верно для заданного направления первичного тока. При установке и подключении трансформатора тока к реле важно соблюдать правильную полярность. Для этих целей может использоваться вольтамперфазометр (ВАФ) РЕТОМЕТР-М2: ВАФ подключается к ТТ, запускается режим определения полярности, и после проверки на дисплее прибора выводится результат (прямая/обратная).

3. Снятие характеристики намагничивания. Расчет точки перегиба

Испытания на возбуждение выполняются путем подачи переменного напряжения на вторичную обмотку ТТ и постепенного увеличения напряжения до тех пор, пока ТТ не перейдет в режим насыщения. Точка перегиба определяется по небольшому увеличению напряжения, вызывающему большое увеличение тока.

Важным аспектом снятия характеристики намагничивания и определения точки перегиба являются типы измерения тока и напряжения в соответствии с разными стандартами (ГОСТ, IEC [3,4], IEEE). В испытательном устройстве РЕТОМ-21 реализованы все необходимые типы измерения (RMS, средневыпрямленный, амплитудный и др.), позволяющие проводить расчет точки перегиба по любому из стандартов.

4. Проверка сопротивления изоляции

Для определения состояния изоляции ТТ выполняются три

вида испытания:

1. От первичной (Л) обмотки к вторичной (И);
2. Первичной (Н) обмотки относительно земли;
3. Вторичной обмотки относительно земли;

Показания сопротивления изоляции должны оставаться постоянными в течение определенного периода времени. Минимальное общепринятое сопротивление изоляции составляет 1 МОм. На показания изоляции заметно влияет температура образца. Проверка сопротивления изоляции осуществляется с помощью устройства РЕТОМ-6000.

5. Проверка сопротивления обмотки

После снятия характеристики намагничивания необходимо размагнитить ТТ и только после этого проводить измерение сопротивления обмоток постоянному току. Данное измерение можно выполнить с помощью микроомметра РЕТ-МОМ.2 или испытательного устройства РЕТОМ-21 совместно с модулем РЕТ-СФ.

6. Нагрузочные испытания

Каждый трансформатор тока имеет нагрузку в виде подключения к реле или другим измерительным цепям.

Нагрузка ТТ обычно выражается в ВА. Испытание нагрузки выполняется с целью проверки способности ТТ подавать известный ток в известную нагрузку, сохраняя при этом заявленную точность.

Заключение

В представленной статье приведены основные проверки трансформаторов тока, используемых на объектах производства и передачи электроэнергии. Стоит отметить, что качественное тестирование возможно только с применением соответствующих методов и средств. Рассмотрены особенности проведения тестирования ТТ с использованием современного проверочного оборудования серии РЕТОМ. Также рассмотрены методы расчета точки перегиба кривой намагничивания по нескольким стандартам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Федосеев А.М., Федосеев М.А.* Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.

2. *Афанасьев В.В.* Трансформаторы тока. Энергоатомиздат, 1989.

3. ГОСТ МЭК 60044-1-2013 Трансформаторы измерительные. М.: Стандартинформ, 2019.

4. ГОСТ МЭК 60044-1-2013 Трансформаторы измерительные. М.: Стандартинформ, 2019.

Авторы:

Плеханов Андрей Владимирович*, ЧГУ им. Н.М. Ульянова/НПП «Динамика», инженер-исследователь отдела преобразовательной и измерительной техники, в 2020 году закончил факультет радиоэлектроники и автоматики Чувашского государственного университета им. Н.М. Ульянова, plehanov-av@retom.ru*

Александров Николай Михайлович*, НПП «Динамика», начальник отдела первичного оборудования, в 2010 году закончил Электротехнический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, alexandrov-nm@retom.ru*

УТОЧНЕНИЕ СПРЯМЛЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРОВ С АРВ И РАСЧЕТОВ ТОКОВ КЗ ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО МОМЕНТА ВРЕМЕНИ

к.т.н. ВОРОНОВ П.Л. ФГБОУ ВО Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. г. Чебоксары, Россия. E-mail: plv911@mail.ru

Аннотация:

В работе рассматривается применение упрощенных инженерных методов расчета токов короткого замыкания для произвольного момента времени, в частности построение спрямленных характеристик для конкретного типа генераторов с использованием ЭВМ.

Ключевые слова: *короткие замыкания, периодическая составляющая, режимы возбуждения, спрямленные характеристики генераторов.*

Введение

Современное развитие электроэнергетики предъявляет повышенные требования к скорости и точности режимных расчетов и токов короткого замыкания (КЗ) для выбора и проверки электротехнического оборудования на термическую и электродинамическую стойкость, для релейной защиты и автоматики, определения мест повреждения ЛЭП и т.п. Известно, что методы расчета токов КЗ в России стандартизированы [1,2,3]. Однако в отечественную практику внедрены и многочисленные программно-вычислительные комплексы (ПВК), в том числе и иностранных производителей, в которых проводится одновременный анализ и расчет электромагнитных и электромеханических переходных процессов, существенно отличающихся постоянными времени затухания апериодических составляющих токов КЗ и постоянных инерции агрегатов электростанций и узлов нагрузки. Дать оценку таким методам расчета токов КЗ для произвольного момента времени для крупномасштабных электроэнергетических систем не представляется возможным, поскольку такие алгоритмы и программы находятся все еще в стадии разработки и практически не могут быть реализованы для сложно-разветвлённых систем со многими агрегатами и источниками распределенной генерации. Одним из направлений эффективного решения этой актуальной задачи является применение тензорно-топологического метода и диакоптики [4].

Уточнение упрощенных инженерных методов расчета токов КЗ для произвольного момента времени

Практические стандартизованные инженерные методы, не требующие высокого уровня абстракции и обеспечивающие вполне приемлемую точность расчетов периодической составляющей тока КЗ при известных допущениях для начального момента времени $I_{\text{п0}}$, существенно усложняется при определении её для произвольного момента времени $I_{\text{п}t}$. В [1,2] предлагается применять типовые кривые, характеризующие изменение отношения $\gamma_t = I_{\text{п}t}/I_{\text{п0}}$ от времени при разной удаленности точки КЗ от источников электрической энергии. Удаленность определяется отношением $I_{\text{п0}}/I_{\text{ном}}$. Семейство

кривых $\gamma_t = f(t)$ построены для различных электрических агрегатов иди их групп, находящихся в одинаковом положении относительно точки КЗ.

Ранее [3,4] рекомендовались для определения $I_{\text{п}t}$ универсальные, построенные для типовых генераторов с помощью спрямления их внешних характеристик $U_{\text{п}t} = f(I_{\text{п}t})$, кривые, позволяющие находить предполагаемые значения ЭДС E_t и сопротивления X_t генераторов с момента возникновения КЗ. Идея метода состоит в том, что в нем для определения тока используется та же структурная формула, которая находит применение и при расчете начального и установившегося токов КЗ. Она имеет вид $I_t = E_t(\, X_t + \, X_{\text{вн}})$.

Поскольку ЭДС генератора по продольной оси в системе координат, вращающейся с синхронной скоростью зависит от внешнего сопротивления $X_{\text{вн}}$, то она изменяется в переходном режиме, характеризуемым постоянными времени T_d'', T_d', являющимися функциями $X_{\text{вн}}$ и типа систем возбуждения машин. Поэтому строгие функциональные зависимости $E_t = f(t)$, $X_t = \varphi(t)$, которые были бы справедливы при любой удаленности КЗ установить практически невозможно. Однако их можно подобрать с достаточной степенью точности.

В данной работе предлагается методика линеаризации на ЭВМ характеристик $U_{\text{г}} = f(t,\, X_{\text{вн}}, I_{\text{г}})$ и построения спрямленных характеристик генераторов на основании уточненной формулы для периодической составляющей тока КЗ с АРВ:

$$I_{t\,d} = \frac{E_{q(0)}}{x_d + x_{\text{вн}}} + \left(\frac{E'_{q0}}{x'_{d\text{П}} + x_{\text{вн}}} - \frac{E_{q(0)}}{x_d + x_{\text{вн}}} \right) e^{-t/T'_d} +$$

$$+ \left(\frac{E''_{q0}}{x''_d + x_{\text{вн}}} - \frac{E'_{q0}}{x'_{d\text{П}} + x_{\text{вн}}} \right) e^{-t/T''_d} + \qquad (1)$$

$$+ \left(\frac{E_{q\text{пот}} - E_{q(0)}}{x_d + x_{\text{вн}}} \right) \left[1 - \frac{T'_d - T_{\sigma D}}{T'_d - T''_d}\, e^{-t/T'_d} + \frac{T''_d - T_{\sigma D}}{T'_d - T''_d}\, e^{-t/T''_d} \right] \le \frac{U_{\text{ном}}}{X_{\text{вн}}}$$

Одна из спрямленных характеристик для генераторов типа СВ1470/149-104УХЛ4 Чебоксарской ГЭС приведена на рис. 1.

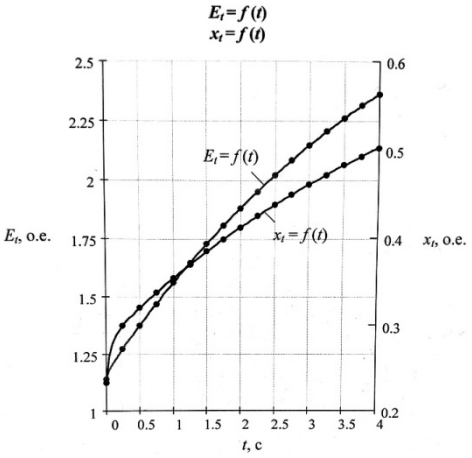


Рис.1 Спрямленные характеристики для гидрогенератора типа СВ1470/149-104УХЛ4

Заключение

Методика спрямленных характеристик легко реализуется на ЭВМ, при этом погрешность определения токов КЗ в результате использования конкретных систем АРВ и выражения (1) сводится к минимуму. Поэтому для целей релейной защиты и автоматики при уточнении уровней токов КЗ и их распределения по ветвям сложной схемы для произвольного момента времени целесообразно пользоваться данной методикой, поскольку основная сложность в данном случае заключается в определении параметров генератора, а расчет токов аналогичен расчету токов как для начального момента времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – Введ. 2008-07-01. – М: Стандартинформ, 2008. – 36 с.

2. ГОСТ Р 52736-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. – Введ. 2008-07-01. – М: Стандартинформ, 2008. – 39 с.

3. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты

токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110— 750 кВ. — М.: Энергия, 1979.— 152 с. ил.

4. *Щедрин В. А.* Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учеб. пособие / В. А. Щедрин – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2007. – 421 с.

Автор:

Воронов Павел Леонидович*, доцент кафедры «Электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова» ФГБОУ ВО ЧГУ им. И. Н. Ульянова. В 2019 году в Чувашском государственном университете им. И. Н. Ульянова защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка и реализация методик и алгоритмов расчета по частям симметричных и несимметричных режимов систем электроснабжения». E-mail: voronov_pl@ekra.ru.*

АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННОГО ТРАФИКА НА ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

Семенов К.Г., ООО НПП «Динамика», г. Чебоксары, Россия. E-mail: semenov-kg@retom.ru

Аннотация*: в докладе приводится обзор данных (GOOSE, SV), передаваемых по сети Ethernet на цифровой подстанции. В основной части доклада представлены возможности отображения и анализа этих данных при помощи специализированного программного обеспечения – «Сетевой анализатор».*

Ключевые слова: *GOOSE, SV, Сетевой анализатор.*

В настоящее время на энергообъектах активно внедряется все большее количество оборудования с поддержкой стандарта МЭК 61850. В связи с этим возникает необходимость в удобном и наглядном инструменте мониторинга и анализа передаваемых данных по локального-вычислительной сети (ЛВС) на цифровой подстанции (ЦПС).

Специалистами научно-производственного предприятия «Динамика» разработано ПО «Сетевой анализатор», решающее поставленную задачу.

Программа имеет два режима работы: PCAP и Ethernet. В первом случае данные для анализа берутся из записанного файла

PCAP, во втором – из сети Ethernet в режиме реального времени.

Основные возможности программы:

- просмотр наличия SV-потоков и GOOSE-сообщений в сети/файле;
- расчет электроэнергетических параметров SV-потока (амплитуда, угол, частота, мощностные параметры);
- осциллографирование принимаемых данных;
- отслеживание потерь пакетов;
- анализ временных параметров пакетов (задержка по времени, смещение от сигнала PPS и т.д.);

Рассмотрим некоторые возможности программы более подробно. Подключимся к интерфейсу Ethernet и выполним мониторинг сети.

Вывод списка SV-потоков и GOOSE-сообщений

На рис. 1 представлен список всех SV-потоков и GOOSE-сообщений, находящихся на данный момент в сети Ethernet.

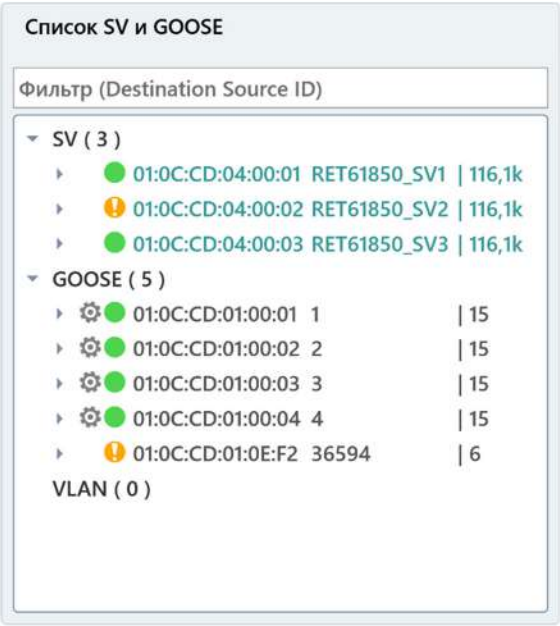


Рис. 1. Список SV и GOOSE

Благодаря автоматическому анализу данных по индикатору потока визуально видно его состояние: зеленый – поток «живой» и не имеет ошибок, оранжевый/красный – в потоке обнаружены ошибки. Так, например в SV-потоке *RET61850_SV2* видно, что в нем присутствуют ошибки. Перейдем в журнал событий, чтобы найти причину.

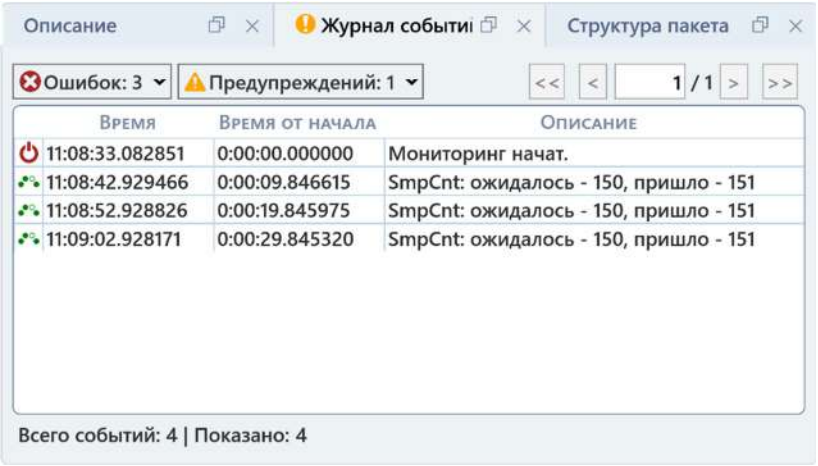


Рис. 2. Журнал событий

На рис. 2 видим, что в SV-потоке обнаружены пропуски пакетов, а именно пропущена 150-ая выборка, что и послужило причиной маркирования потока как ошибочного.

Помимо пропусков пакетов могут быть выявлены и другие ошибки, такие как: MAC-адрес вне рекомендованного диапазона МЭК 61850, дублирование пакета, нарушение синхронизации и т.д. Все перечисленные события также отслеживаются в программе «Сетевой анализатор».

Отображение аналоговых значений

Другой не менее важной задачей является расчет электроэнергетических параметров SV-потока. Значения токов и напряжений передаются мгновенными выборками в блоке данных ASDU по сети Ethernet. Блок данных ASDU, отображаемый в программе «Wireshark», приведен на рис. 3. Так,

при 80 выборках на период и 1 блоке ASDU в пакете, количество пакетов за секунду составит 4000, что, несомненно, приведет к трудностям при расчете аналоговых значений вручную.

Такое представление значений токов и напряжений не привычно для наладчика ЦПС. Поэтому была разработана функция расчета аналоговых значений (рис. 4).

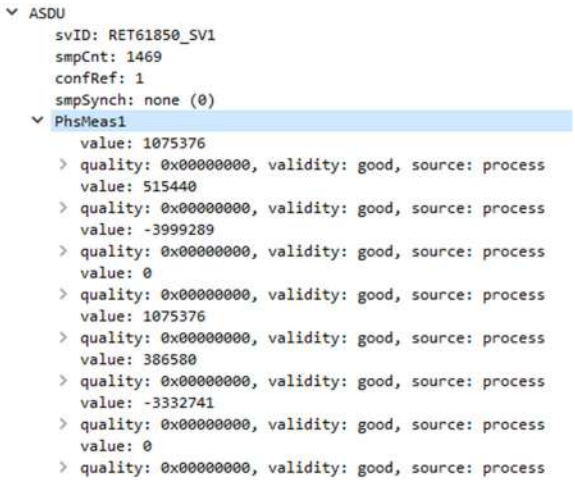


Рис. 3. Блок данных SV-потока

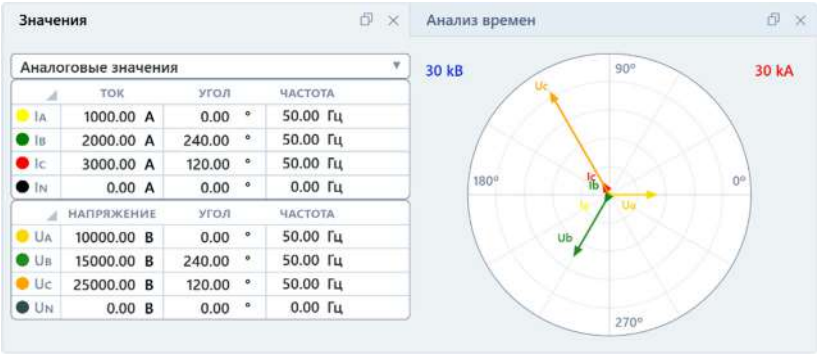


Рис. 4. Векторная диаграмма и таблица аналоговых значений

Следует отметить, что при работе с SV-потоками программный анализ блоков данных ASDU для расчета аналоговых значений с последующей визуализацией воспринимается гораздо нагляднее и понятнее.

Выводы:

1. Анализ информационного трафика является важной задачей при эксплуатации ЦПС. В связи с этим необходим инструмент для удобного восприятия данных, передаваемых по сети Ethernet.

2. В докладе описаны основные возможности программного инструмента «Сетевой анализатор», созданного для разработчиков оборудования, специалистов служб РЗА и АСУ ТП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программное обеспечение для анализа трафика ЦПС «Сетевой анализатор». Руководство пользователя. Редакция 06.05.20.

2. IEC 61850-9-2 LE. Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers using IEC 61850-9-2. UAC International Users Group. 2004.

Авторы:

Семенов Константин Геннадьевич*, инженер-программист 3 категории «НПП Динамика», в 2016 году получил степень бакалавра, факультет «Информатики и вычислительной техники» ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И. Н. Ульянова». E-mail: semenov-kg@retom.ru*

ДВУСТОРОННЕЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛЭП БЕЗ УЧЕТА МОДЕЛИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Убасева М.В., ООО НПП «ЭКРА», Чебоксары, Россия. E-mail: ubaseva_mv@ekra.ru.

Петров В.С., ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия. E-mail: petrov_vs@ekra.ru.

Аннотация: *измерения с двух сторон контролируемой линии электропередачи (ЛЭП) повышают точность определения места повреждения (ОМП). В данной статье предлагается способ*

двустороннего ОМП, инвариантный к виду замыкания, не зависящий от предшествующего режима и не использующий алгоритмическую модель нулевой последовательности.

Ключевые слова: *двустороннее определение места повреждения, алгоритмическая модель, короткое замыкание.*

Введение

Двустороннее наблюдение ЛЭП упрощает критерии определения места повреждения [1 – 3], а также обеспечивает высокую точность расчета, независимо от вида короткого замыкания, поскольку нет необходимости задания параметров эквивалентных электрических систем.

Существующие алгоритмы двустороннего ОМП с синхронизированными измерениями зависят от величин предшествующего режима или используют модель повреждения [4, 5]. Эти недостатки устранены в работе [6], где место повреждения идентифицируется по минимуму ошибки оценки токов в местах измерений. В настоящей работе предлагается способ двустороннего ОМП, основанный на поиске минимума ошибки оценки напряжений.

Способ двустороннего ОМП

Рассмотрим определение места повреждения на ЛЭП двусторонним ОМП. Наблюдение электрических величин устройствами ОМП ведется с двух сторон контролируемой ЛЭП, измерения синхронизированы.

В алгоритмической модели сети (рис. 1), согласно принципу компенсации, известные напряжения $\underline{U}_{s,\nu}(0)$ и токи $\underline{I}_{r,\nu}(l)$ заменяются соответствующими источниками ЭДС и источниками тока.

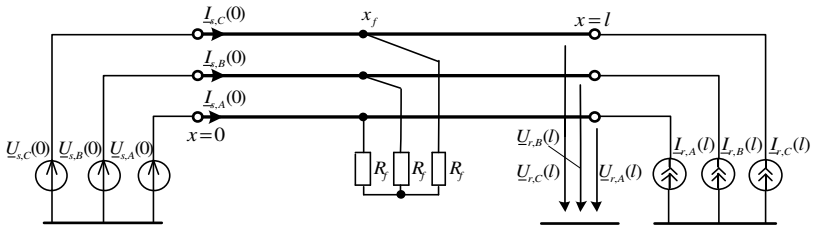


Рис. 1. Алгоритмическая модель контролируемой ЛЭП

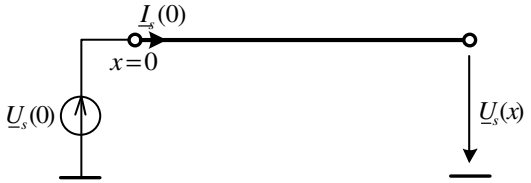


Рис. 2. Алгоритмическая модель сети слева от предполагаемого места повреждения

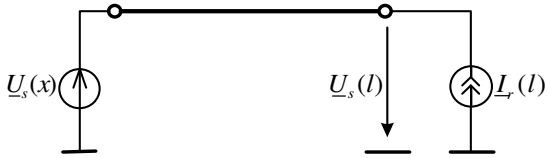


Рис. 3. Алгоритмическая модель сети справа от предполагаемого места повреждения

Для определения места замыкания сначала с помощью алгоритмической модели сети слева от предполагаемого места повреждения (рис. 2) определяются напряжения прямой $\underline{U}_{s,1}(x)$ и обратной $\underline{U}_{s,2}(x)$ последовательности в месте предполагаемого замыкания. Затем полученные напряжения подаются на вход алгоритмической модели сети справа от предполагаемого места повреждения (рис. 3) и определяются напряжения на выходе этой модели $\underline{U}_{s,1}(l)$ и $\underline{U}_{s,2}(l)$ соответственно, которые будут равны измеренным напряжениям в этом месте $\underline{U}_{r,1}(l)$ и $\underline{U}_{r,2}(l)$ только в том случае, когда предполагаемое место повреждения будет совпадать с истинным местом: $x = x_f$. Поэтому за место замыкания x_f принимается точка, в которой невязка

$$\delta = \left|\underline{U}_{s,1}(l) - \underline{U}_{r,1}(l)\right| + \left|\underline{U}_{s,2}(l) - \underline{U}_{r,2}(l)\right|$$

имеет минимальное значение.

Заключение

Предлагаемый способ двустороннего определения места повреждения инвариантен к виду замыкания и не зависит от предшествующего режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, В.А. Ефремов, Г.С. Нудельман, Н.В. Подшивалин*. Диагностика линий электропередачи // Межвуз. сборник науч. трудов. Электротехнические микропроцессорные устройства и системы. Изд-во Чуваш, ун-та, Чебоксары, 1992, С. 9-32.

2. *M. V. Ubaseva, V. S. Petrov, V. I. Antonov.* The novel method for determining locations of a double ground fault in networks with isolated neutral // 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), pp.394 – 399, 2020. DOI:10.1109/UralCon49858.2020.9216306.

3. Пат. 2737234 Рос. Федерация: МПК G01R31/08. Способ определения мест двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью / Убасева М.В., Петров В.С., Антонов В.И., Наумов В.А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие "ЭКРА". – №2020111296; заявл. 18.03.20; опубл. 26.11.20, Бюл. № 33. – 30 с.

4. Пат. 2542337 Рос. Федерация: МПК G01R31/08, H02H3/28. Способ определения места замыкания линии электропередачи при двухстороннем наблюдении / Лямец Ю. Я., Воронов П. И.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Исследовательский центр "Бреслер". – №2013142150/07; заявл. 13.09.13; опубл. 20.02.15, Бюл. № 5. – 12 с.

5. Пат. 2542331 Рос. Федерация: МПК G01R31/08, H02H3/28. Способ определения места замыкания линии электропередачи при двухстороннем наблюдении / Лямец Ю. Я., Воронов П. И., Белянин А. А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Исследовательский центр "Бреслер". – №2013144358/07; заявл. 02.10.13; опубл. 20.02.15, Бюл. № 5. – 14 с.

6. *П.И. Воронов.* Алгоритм определения места повреждения линии электропередачи при двухстороннем наблюдении без использования модели повреждения // Электроэнергетика глазами молодежи – 2016: материалы VII Международной молодёжной научно-технической конференции. 2016. С. 307-308.

Авторы:

Убасева Мария Витальевна*, инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», магистрант электроэнергетического факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: ubaseva_mv@ekra.ru.*

Петров Владимир Сергеевич, *информация об авторе приведена на стр. 33.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУШНЫХ ЛЭП НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10 кВ

Кутумов Ю.Д., Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина (ИГЭУ), г. Иваново, Россия. E-mail: kutumov97@mail.ru.

Кузьмина Н.В., ИГЭУ, г. Иваново, Россия. E-mail: natalialeb37@mail.ru.

Шадрикова Т.Ю., ИГЭУ, г. Иваново, Россия. E-mail: rza@rza.ispu.ru.

Шуин В.А., ИГЭУ, г. Иваново, Россия. E-mail: vshuin@mail.ru.

Аннотация: *Обоснован подход к параметрированию схем замещения и имитационных моделей воздушных ЛЭП 6–10 кВ при решении различных задач, связанных с расчетами переходных процессов при однофазных замыканиях на землю.*

Ключевые слова: *воздушные линии 6–10 кВ, однофазные замыкания на землю, переходные процессы, параметры воздушных линий.*

Введение

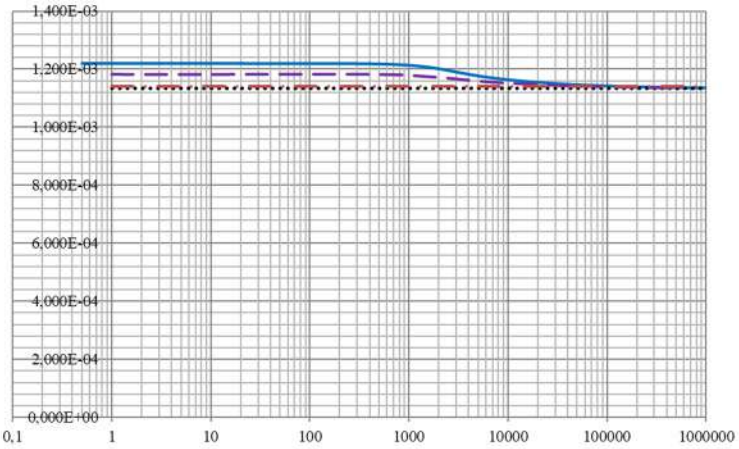
Существует ряд задач, связанных с расчетами переходных процессов при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) в распределительных воздушных сетях напряжением 6–10 кВ (расчеты максимальных перенапряжений и действующего значения тока в месте повреждения при дуговых перемежающихся ОЗЗ (ДПОЗЗ), проверка термической стойкости ограничителей перенапряжений при ДПОЗЗ, исследования влияния переходных процессов на устойчивость функционирования токовых и токовых направленных защит от ОЗЗ, основанных на использовании различных составляющих тока и напряжения нулевой последовательности установившегося режима замыкания, разработка защит от данного вида повреждений на основе электрических величин переходного процесса, разработка методов дистанционного определения места повреждения по параметрам переходных токов и напряжений и др.). Требования к достоверности расчетов переходных токов и напряжений определяют необходимость возможно более точного учета в аналитических или

имитационных моделях продольных параметров воздушных ЛЭП (ВЛЭП), прежде всего, индуктивностей, которые, в общем случае, зависят от частоты. В большинстве публикаций, посвященных исследованиям переходных процессов при ОЗЗ, либо вообще не содержатся рекомендации по выбору продольных параметров воздушных линий 6–10 кВ, либо используются постоянные (не зависящие от частоты) удельные параметры ВЛЭП, определенные по справочным данным для частоты 50 Гц, что может быть причиной существенных погрешностей расчетов. Поэтому актуальной задачей является обоснование подхода к параметрированию схем замещения и имитационных моделей ВЛЭП 6–10 кВ при решении различных задач, связанных с расчетами переходных процессов при ОЗЗ.

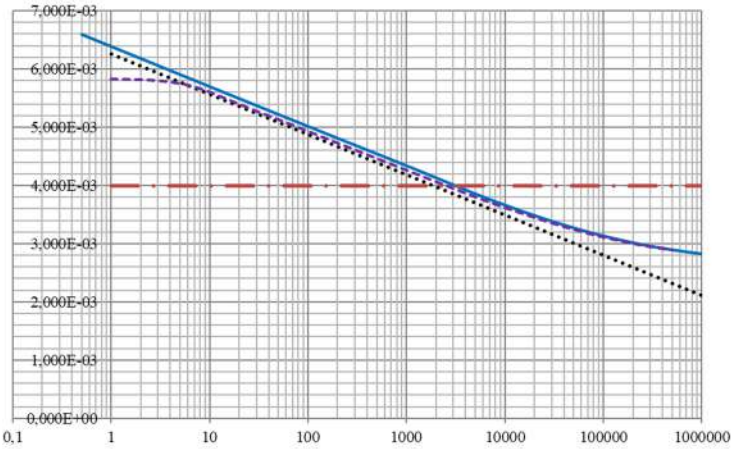
Частотно-зависимые модели воздушной ЛЭП 6–10 кВ

При оценке погрешностей, обусловленных применением различием подходов к параметрированию моделей ВЛЭП 6–10 кВ, важной является задача выбора эталонной частотно-зависимой модели. В качестве эталонной модели в работе принята модель ВЛЭП, полученная с применением программного комплекса COMSOL Multiphysics, позволяющего моделировать практически все физические процессы, которые описываются частными дифференциальными уравнениями. Полученные на эталонной модели частотные характеристики индуктивности контура «фаза-земля», взаимной индукции между фазами, индуктивности прямой и нулевой последовательности ВЛЭП 6–10 кВ сравнивались с аналогичными частотными характеристиками модели исследуемой линии, полученными непосредственно по уравнениям Карсона [1], частотно-зависимой модели ВЛЭП, используемой в программном комплексе PSCAD, и частотно-независимой модели ВЛЭП с параметрами, определенными по справочным данным, соответствующим частоте 50 Гц [2, 3].

На рис. 1 в качестве примера приведены частотные зависимости индуктивности прямой и нулевой последовательности ВЛЭП 10 кВ, выполненной проводом марки АС-50/8 на опоре П10-16, полученные на моделях в PSCAD, COMSOL Multiphysics, по уравнениям Карсона и справочные величины.



а)



б)

Рис. 1. Частотные зависимости индуктивности прямой (а) и нулевой последовательности (б) ВЛЭП, полученные на модели в PSCAD (сплошная линия), COMSOL Multiphysics (прерывистая линия), по уравнениям Карсона (показана точками) и справочные величины (штрихпунктирная линия)

Из осциллограмм по рис. 1 можно видеть, что индуктивности прямой и нулевой последовательности ВЛЭП 6–10 кВ зависят от частоты, причем зависимость в значительной степени начинает

проявляться на частоте более 1 кГц. Наиболее точно частотная зависимость параметров ВЛЭП 6–10 кВ учитывается в моделях, разработанных в программных комплексах PSCAD и COMSOL Multiphysics.

Заключение

Применение в расчетах переходных процессов при ОЗЗ в электрических сетях 6–10 кВ моделей ВЛЭП, параметры которых определены на основе справочных данных при частоте 50 Гц, может приводить к грубым ошибкам в оценке параметров высокочастотных разрядных составляющих токов и напряжений. Применение таких моделей допустимо только в расчетах зарядной стадии переходного процесса при небольших удаленностях места ОЗЗ от шин центра питания, когда индуктивность источника питания значительно больше индуктивности поврежденной ВЛЭП.

При расчетах переходных процессов при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ в целях решения задачи дистанционного определения места повреждения точность расчетов параметров разрядных составляющих токов и напряжений должна обеспечиваться в диапазоне частот от единиц килогерц до ~20 кГц. В указанном диапазоне частот требуемую точность расчетов параметров переходных токов и напряжений позволяет только применение частотно-зависимых моделей ВЛЭП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Carson J.R.* Wave Propagation in overhead wires with Ground Return // Bell System Tech. Journal. 1926. – Oct, vol V, №4, p. 539-554.

2. *Голубев М.Л.* Расчет токов короткого замыкания в электросетях 0,4-35 кВ. Библиотечка электромонтера. Вып. 505. – 1980 г. – 88 с.

3. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.

Авторы:

Кутумов Юрий Дмитриевич*, ИГЭУ, аспирант, закончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) в 2020 г., e-mail: kutumov97@mail.ru.*

Кузьмина Наталия Владимировна*, ИГЭУ, аспирант, закончила ЭЭФ в 2019 г., e-mail: natalialeb37@mail.ru.*

***Шадрикова Татьяна Юрьевна**, ИГЭУ, доцент, закончила ЭЭФ в 2013 г., степень кандидата технических наук присуждена в 2016 г. (тема диссертации «Разработка комплексной многофункциональной защиты от однофазных замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ»), e-mail: rza@rza.ispu.ru.*

***Шуин Владимир Александрович**, ИГЭУ, профессор, закончил ЭЭФ в 1969 г., степень доктора технических наук присуждена в 1994 г. (тема диссертации «Теория и практическая реализация защит от однофазных замыканий на землю, основанных на использовании переходных процессов, для электрических сетей 3–35 кВ»), e-mail: vshuin@mail.ru.*

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЕТИ С ИСТОЧНИКОМ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ СРАБАТЫВАНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Исаков Р.Г., КНИТУ-КАИ, Казань, Россия. E-mail: ruslanisakov@yandex.ru

Метелев И. С., КНИТУ-КАИ, Казань, Россия. E-mail: ismetelev@kai.ru.

Ференец А. А, КНИТУ-КАИ, Казань, Россия. E-mail: a.a.ferenets@icloud.com.

Юдина К. П. КНИТУ-КАИ, Казань, Россия. E-mail: Sarachevaksenia@yandex.ru

***Аннотация:** в условиях повышенного интереса к системам с источниками распределенной генерации возникает проблема правильного построения релейной защиты. Для решения этой проблемы необходимо определить влияние параметров сети с источником распределенной генерации на параметры срабатывания релейной защиты.*

***Ключевые слова:** распределенная генерация, релейная защита, параметры сети, электроэнергетика.*

Введение

Традиционно уже длительное время под электроэнергетической системой понимается совокупность крупных генерирующих станций, на которых вырабатывается электроэнергия, и далее передается на большие расстояния к конечным потребителям, при этом она понижается до требуемого среднего или низкого уровня. В последние годы с развитием

электроэнергетики повысился интерес к новым энергоэффективным технологиям производства электроэнергии. Это обусловлено высоким спросом на электроэнергию в целом, необходимостью обеспечения электроэнергией удаленных районов без развитой инфраструктуры, высоким износом оборудования и многими другими факторами.

Одна из наиболее актуальных энергоэффективных технологий на данный момент – использование систем с распределенной генерацией, которая позволяет уменьшить экономические потери, потери в сети, избежать перенасыщения электроэнергией. Однако, при этом усложняется проблема построения релейной защиты, ведь для согласования защиты с источниками распределенной генерации необходимо знать, как будут изменяться токи в системе в зависимости от параметров источников генерации. Определение этих зависимостей – главная задача данной статьи, которая решается путем моделирования системы с распределенной генерацией, построением и дальнейшим анализом графиков зависимостей токов от параметров источника генерации.

Основная часть

Исследуемая схема, представленная на Рис.1, включает в себя систему, от которой питаются три подстанции (ПС А, ПС Б и ПС В), на которых установлены устройства релейной защиты, и источник распределённой генерации (РГ), который подключается к схеме в точке Б. Короткое замыкание происходит на шине подстанции ПС В. Задача состоит в согласовании защит РЗ 1 и РЗ 2 при отсутствии источника РГ, при подключении источников РГ, а также при изменении точки присоединения источника РГ к линии Л1.

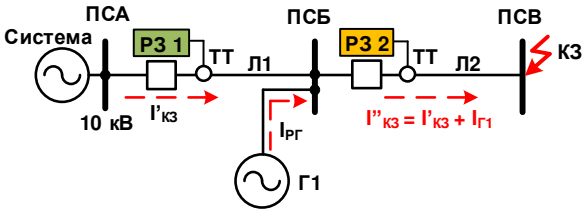


Рис. 1. Общая схема участка с источником распределённой генерации

Исходные параметры схемы приведены в Таблицах 1–3.

Таблица 1

Исходные данные системы

Напряжение U_s, кВ	**Ток КЗ $I_{s\,кз}$, кА**
10,5	2,73

Таблица 2

Исходные данные воздушных линий Л1 и Л2

	Линия Л1	**Линия Л2**
Марка провода	АС-95	АС-70
Удельное активное сопротивление r_0, Ом/км	0,34	0,46
Удельное реактивное сопротивление x_0, Ом/км	0,319	0,331
Длина L, км	10	10

В качестве источника РГ будут возьмём генератор фирмы AVKDIG 110/i4.

Таблица 3

Исходные данные генератора DIG 110/i4

Параметр	**Значение**
Номинальная мощность $S_{ном}$, кВА	1080
Номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ	10,5
Удельное сверхпереходное сопротивление x''_d, о.е.	0,290

Если обозначить точку подключения источника Г1 как т.Б, то участок между ПС А и ПС Б можно разбить на 2 с помощью относительного коэффициента Δ:

$$\Delta = \frac{L_{ПСА-Б}}{L_{ПСА-ПСБ}}$$

где $L_{ПС\,А-Б}$ – расстояние от ПС А до точки подключения Б источника Г1, км; $L_{Л1}$- длина линии Л1, км. Схема замещения

исследуемой схемы может быть представлена в виде (Рис.2.):

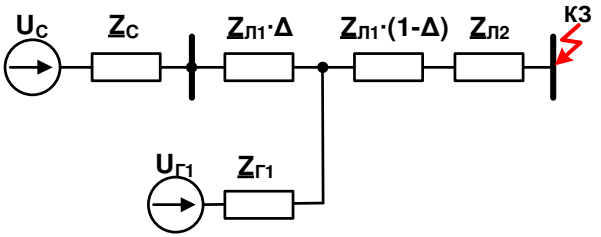


Рис. 2. Схема замещения участка сети с источником распределённой генерации

На рисунке индексом *с* обозначены параметры системы, индексом *Г1* – параметры источника Г1, *Л1* и *Л2* – линий Л1 и Л2 соответственно.

Ток КЗ в указанной точке можно посчитать по формуле:

$$I_{КЗ} = \frac{U_{ЭКВ} \cdot \left(z_C + z_{Л1} \cdot \Delta + z_{Г1}\right)}{\sqrt{3} \cdot \left[\left(z_C + z_{Л1} \cdot \Delta\right) \cdot z_{Г1} + \left(z_C + z_{Л1} \cdot \Delta + z_{Г1}\right) \cdot \left(z_{Л1} \cdot (1-\Delta) + z_{Л2}\right)\right]}$$

Можно выявить зависимость величины тока КЗ мощности подключённой генерации и места подключения источника Г1 (сопротивления линии). Рассматривается генерация в составе одного источника (1 МВт), двух (2х1МВт), трёх (3х1МВт) и четырёх (4х1МВт) параллельно работающих генераторов.

Анализируя график, представленный на рисунке 3, можно заключить, что ток КЗ будет тем больше, чем ближе к концу линии подключен источник, и чем больше мощность генерации.

Ток, проходящий через РЗ1, вычисляется по формуле:

$$I_1 = I_{КЗ} \cdot \frac{z_{Г1}}{\left(z_C + z_{Л1} \cdot \Delta + z_{Г1}\right)} =$$

$$= \frac{U_{экв} \cdot z_{Г1}}{\sqrt{3} \cdot \left[\left(z_C + z_{Л1} \cdot \Delta\right) \cdot z_{Г1} + \left(z_C + z_{Л1} \cdot \Delta + z_{Г1}\right) \cdot \left(z_{Л1}(1-\Delta) + z_{Л2}\right)\right]}.$$

Зависимость для тока, проходящего через защиту РЗ1, представлена на рисунке 4. Видно, что ток будет тем меньше, чем больше его мощность, и при этом зависит от места подключения источника генерации.

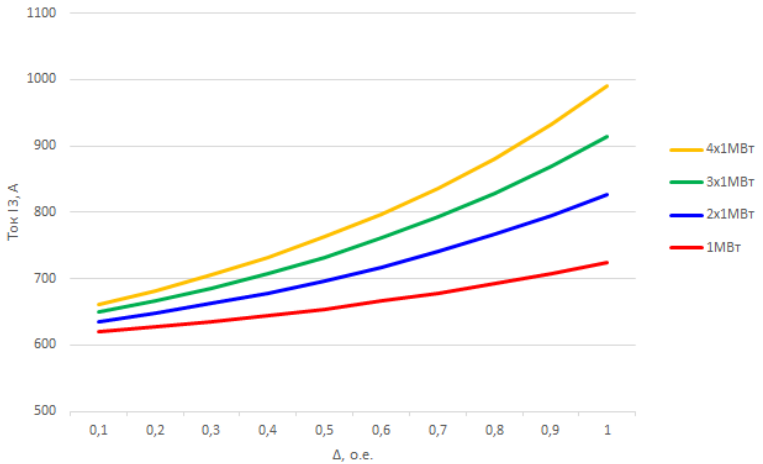


Рис. 3. Зависимость тока КЗ от относительного сопротивления источника Г1 и места его подключения

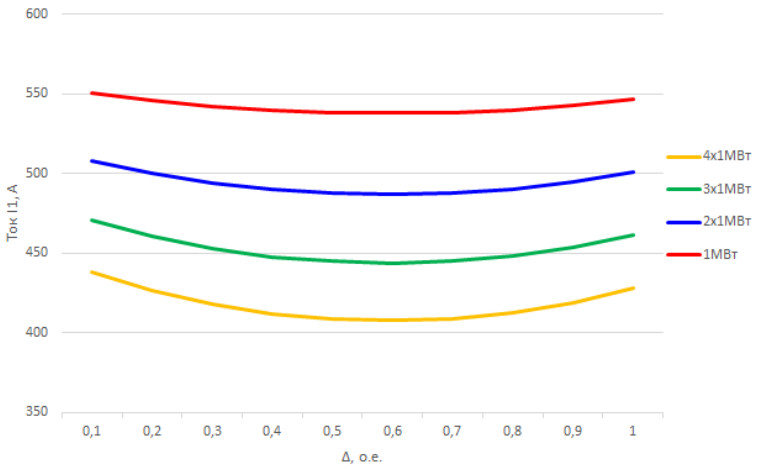


Рис. 4. Зависимость тока, протекающего через Р31 от относительного сопротивления источника Г1 и места его подключения

Можно рассчитать точку с наименьшим влиянием сети. Минимальный ток, протекающий через РЗ, в этой точке будет при $\frac{\partial I_1}{\partial \Delta} = 0$.

$$\frac{\partial I_1}{\partial \Delta} = \frac{(2 \cdot \Delta - 1) \cdot z_{Л1} + z_C - z_{Л2}}{\Delta^2 \cdot z^2{}_{Л1} + z_C \cdot [(\Delta - 1) \cdot z_{Л1} - z_{Г1} - z_{Л2}] - \Delta \cdot z_{Л1} \cdot (z_{Л1} + z_{Л2}) - z_{Г1} \cdot (z_{Л1} + z_{Л2})}$$

$$\frac{\partial I_1}{\partial \Delta} = 0 \rightarrow \Delta = \frac{-z_C + z_{Л1} + z_{Л2}}{2 \cdot z_{Л1}}$$

При данных значениях минимальный ток, проходящий через РЗ, будет при $\Delta = 0,593$.

Отношение тока, протекающего через защиту, к току в месте КЗ называется коэффициентом токораспределения:

$$k_{тр} = \frac{I_1}{I_{КЗ}} = \frac{z_{Г1}}{z_C + z_{Л1} \cdot \Delta + z_{Г1}}$$

Представляя этот параметр в зависимости от сопротивления системы и места подключения (Рис.5), можно сделать вывод, что коэффициент токораспределения почти равен единице при наибольшем сопротивлении источника Г1.

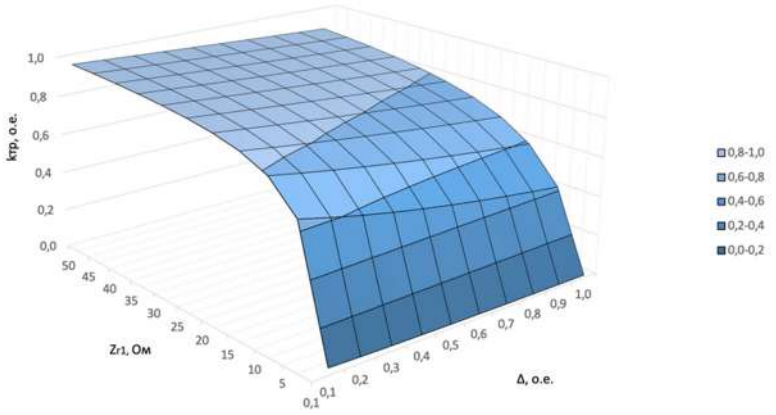


Рис. 5. Зависимость коэффициента токораспределения от относительного сопротивления источника Г1 и места его подключения

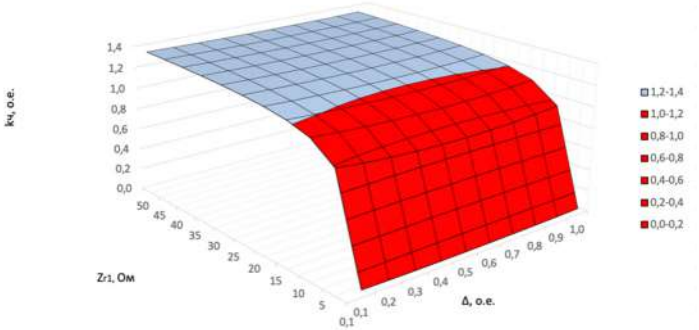


Рис. 6. Зависимость коэффициента чувствительности от относительного сопротивления источника Г1 и места его подключения

Для правильной работы релейной защиты необходимо вычислить коэффициент чувствительности (Рис. 6):

$$k_ч = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_З}{I_{с.з}}$$

при

$$I_{с.з} = \frac{k_н \cdot k_{сзп} \cdot I_{раб.макс}}{k_в}$$

где $k_н = 1{,}1$, $k_{сзп} = 1$, $k_в = 0{,}96$.

Нужно отметить, что при значении сопротивления источника менее 20 Ом (т.е. при подключении 2х и более генераторов параллельно), коэффициент чувствительности становится меньше 1,2, т.е., защита не может работать правильно.

Рассмотрим те же параметры – ток КЗ, ток, протекающий через РЗ1, коэффициенты токораспределения и чувствительности – в зависимости от относительного сопротивления системы и места подключения источника генерации Г1.

Ток КЗ, имеют такой же характер зависимости, как в случае зависимости от сопротивления источника генерации Г1 – увеличивается при уменьшении сопротивления системы.

Коэффициент токораспределения имеет зависимость, показанную на Рис. 7) и будет больше при наименьшем сопротивлении системы (при большей мощности). При этом

место необходимо учитывать и место подключения генерации.

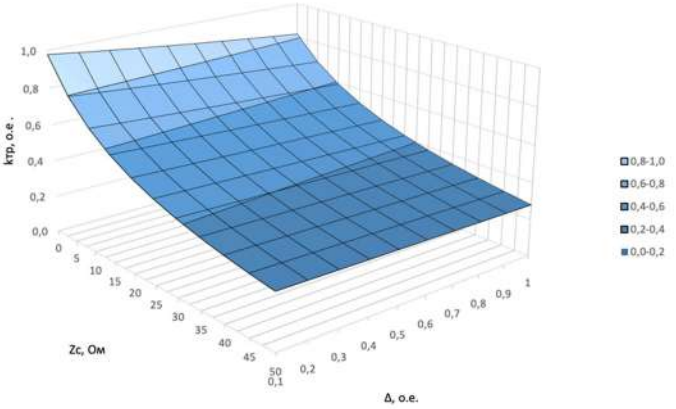


Рис. 7. Зависимость коэффициента токораспределения от относительного сопротивления системы и места подключения источника генерации Г1

Аналогично, зависимость чувствительности защиты от относительного сопротивления системы (Рис. 8) будет обратной зависимости от сопротивления источника генерации Г1. Наибольшая чувствительность будет при сопротивлении системы близким к нулю.

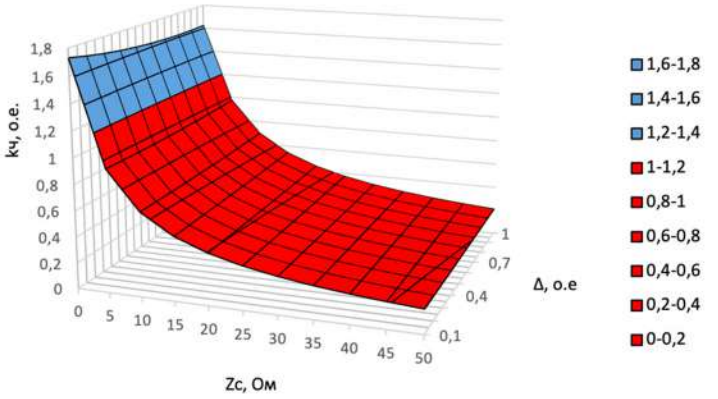


Рис. 8. Зависимость коэффициента чувствительности от относительного сопротивления системы и места подключения источника генерации Г1

При рассмотрении зависимостей тех же параметров от сопротивлений линий Л1 и Л2 можем сделать следующие выводы:

- ток КЗ имеет увеличивается при уменьшении значений сопротивлений;
- ток, протекающий через РЗ1 – уменьшается при уменьшении сопротивлений линий;
- коэффициент токораспределения увеличивается при увеличении расстояния от места подключения источника генерации Г1 и уменьшении сопротивлений линий;
- коэффициент чувствительности будет расти при уменьшении сопротивлений линий (Рис. 9).

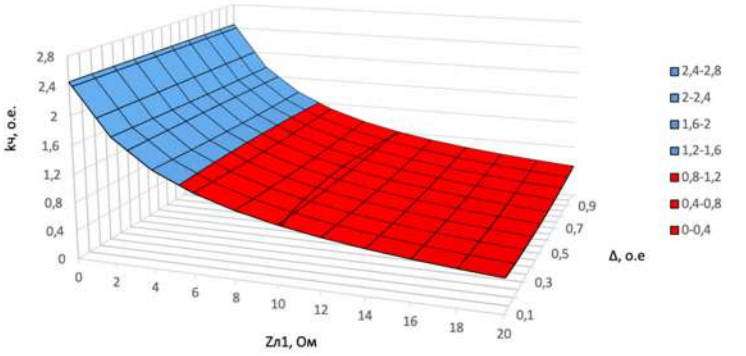


Рис. 9. Зависимость коэффициента чувствительности от относительного сопротивления линии Л1 и места подключения источника генерации Г1

Заключение

Проанализировано влияние параметров системы на токи КЗ. Наибольший интерес представляет зависимость токов от мощности и места подключения РГ. Так, при подключении РГ в начале и конце линии, токи КЗ увеличиваются следующим образом (Таблица 4):

Таблица 4

Изменения токов КЗ при подключении генерации

Генерация	**Изменение тока КЗ относительно тока при отсутствии РГ, при подключении в начале линии Л1, %**	**Изменение токов относительно тока при отсутствии РГ, при подключении в конце линии Л1, %**
1 МВт	3,09	20,55
2х1 МВт	5,68	37,5
3х1 МВт	7,94	52,1
4х1 МВт	9,9	64,68

Максимальное отклонение тока в РЗ1 (при подключении в точке $\Delta = 0,593$ (Таблица 5):

Таблица 5

Изменения токов через РЗ1 при подключении генерации

Генерация	**Изменение тока КЗ относительно тока при отсутствии РГ, при подключении в точке $\Delta = 0,593$ Л1, %**
1 МВт	10,57
2х1 МВт	19,06
3х1 МВт	21,75
4х1 МВт	32,22

В дальнейшем планируется использовать полученную информацию для разработки алгоритма адаптивной релейной защиты для сетей с распределённой генерацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *NEWAGE/STAMFORD/AVK* [Электронный ресурс]: Datasheets URL: https://www.stamford-avk.com/downloads/data-sheets. Дата обращения: 20.03.2021.

2. *Исаков Р. Г., Ференец А. В., Метелев И. С.* Исследование релейной защиты и автоматики в сетях с распределённой генерацией на ПАК RDTS/ Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2017: Материалы VIII Международной

научно-технической конференции.-Казань: Издательство: Акционерное общество "Казанский научно-исследовательский институт авиационных технологий" (Казань); 2017, с. 239-244

Авторы:

***Исаков Руслан Геннадьевич**, к.т.н, доцент кафедры ЭО КНИТУ-КАИ. E-mail: ruslanisakov@yandex.ru.*

***Метелев Иван Сергеевич**, старший преподаватель КНИТУ-КАИ. E-mail: ismetelev@kai.ru.*

***Ференец Анна Андреевна**, студентка 4 курса КНИТУ-КАИ. E-mail: a.a.ferenets@icloud.com.*

***Юдина Ксения Павловна**, студентка 4 курса КНИТУ-КАИ. E-mail: Sarachevaksenia@yandex.ru.*

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ДВУХСТОРОННИМ ВОЛНОВЫМ МЕТОДОМ

Христофоров В.А., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.

Фёдоров Александр О., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.

Петров В.С., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.

Аннотация:

При возникновении короткого замыкания на кабельно-воздушной линии электропередачи (КВЛ) заранее неизвестен поврежденный сегмент. Это не позволяет, даже приняв во внимание разную скорость движения фронта волны на сегментах КВЛ, сразу определить место повреждения.

В настоящем докладе обобщается метод двухстороннего волнового определения места повреждения на КВЛ, основанный на поиске поврежденного сегмента КВЛ и локализации места КЗ на нем. Предлагаемый метод может использоваться на КВЛ любой конфигурации.

***Ключевые слова:** волновое ОМП, двухсторонний метод, кабельно-воздушная ЛЭП*

Введение

Расчет места повреждения $\hat{m}$ двухсторонним волновым методом [1] на однородной ЛЭП базируется на неизменности скорости движения фронта волны v на всем контролируемом участке длиной L:

$$\hat{m} = \frac{1}{2}\left[L + \left(\hat{t}_1 - \hat{t}_2\right) v \right], \qquad (1)$$

где $\hat{t}_1$ и $\hat{t}_2$ – оценки времен возникновения фронтов волн на концах контролируемой ЛЭП.

Определение места повреждения (ОМП) (1) на кабельно-воздушных ЛЭП (КВЛ) встречает следующие сложности: каждому сегменту КВЛ характерна своя скорость движется фронта волны (рис. 1) и поврежденный сегмент заранее неизвестен.

В настоящем докладе обобщается метод двухстороннего волнового ОМП на КВЛ.

Основная часть

При КЗ на КВЛ заранее неизвестен поврежденный сегмент. В связи с чем даже если учесть разную скорость движения фронта волны на сегментах КВЛ это не позволяет аналогично (1) сразу определить место повреждения.

Очевидно, что расчет ОМП на КВЛ должен начинаться с идентификации поврежденного сегмента [2]. Для этого сначала формируются оценки времен возникновения фронтов волн на концах КВЛ при КЗ на b-ом сегменте (рис. 1):

$$\begin{cases} \hat{t}_1 = t_0 + \sum\limits_{i=1, b\neq 1}^{b-1} \dfrac{L_i}{v_i} + \dfrac{\hat{m} - \sum_{i=1, b\neq 1}^{b-1} L_i}{v_b}, \\ \hat{t}_2 = t_0 + \dfrac{\sum_{i=1}^{b} L_i - \hat{m}}{v_b} + \sum\limits_{i=b+1}^{n} \dfrac{L_i}{v_i}, \end{cases} \qquad (2)$$

где t_0 – время возникновения КЗ; L_i, v_i – длина и скорость распространения фронта волны на i-ом сегменте; n – количество сегментов КВЛ.

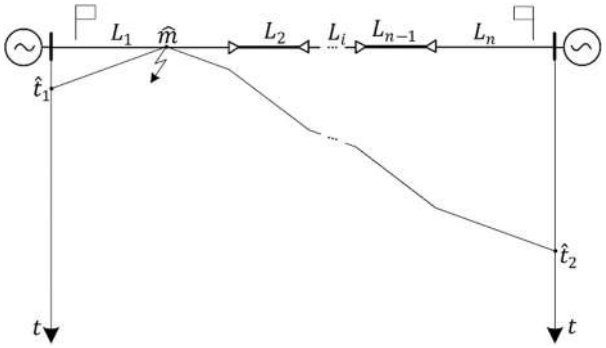


Рис. 1. Диаграмма Бьюли, поясняющая распространение волн по КВЛ

После чего, решая систему (2), можно получить предполагаемые места повреждений:

$$\hat{m} = \frac{v_b}{2}\left[\hat{t}_1 - \hat{t}_2 - \sum_{i=1,b\neq 1}^{b-1}\frac{L_i}{v_i} + \frac{1}{v_b}\left(\sum_{i=1,b\neq 1}^{b-1} L_i\right) + \right.$$
$$\left. + \frac{1}{v_b}\left(\sum_{i=1}^{b} L_i\right) + \sum_{i=b+1}^{n}\frac{L_i}{v_i}\right], \qquad (3)$$

где $b = \overline{1,n}$.

За поврежденный сегмент b принимается тот, для предполагаемого места повреждения $\hat{m}$ которого выполняется неравенство:

$$\sum_{i=1}^{b-1} L_i \le \hat{m} < \sum_{i=1}^{b} L_i. \qquad (4)$$

Следовательно, за истинное место повреждения принимается предполагаемое место повреждения $\hat{m}$, соответствующее поврежденному сегменту (4).

Выводы

В настоящей работе обобщен двухсторонний волновой метод определения места повреждения на кабельно-воздушных ЛЭП. Предложенный метод может использоваться на ЛЭП любой конфигурации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A. Fedorov, V. Petrov, O. Afanasieva and I. Zlobina,* "Limitations of Traveling Wave Fault Location," 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Ekaterinburg, 2020, pp. 21-25, DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281153.

2. *S. Marx, Y. Tong and M.V. Mynam,* "Traveling-Wave Fault Locating for Multiterminal and Hybrid Transmission Lines", 45th Annual Western Protective Relay Conference Spokane, October 16–18, 2018.

Авторы:

Христофоров Виталий Андреевич*, техник департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», студент факультета энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: hristoforov_va@ekra.ru.*

Фёдоров Александр Олегович*, окончил в 2020 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень магистра по направлению «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность». Инженер-исследователь 3 категории департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». E-mail: fedorov_ao@ekra.ru.*

Петров Владимир Сергеевич*, сведения об авторе приведены на стр. 33.*

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ФРОНТА ВОЛНЫ В СИГНАЛЕ

Егоров В.А., ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия. E-mail: egorov_va@ekra.ru.

Фёдоров Алексей О., ООО НПП «ЭКРА», Россия. E-mail: fedorov_a@ekra.ru.

Петров В.С., ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия. E-mail: petrov_vs@ekra.ru.

Антонов В.И., ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия. E-mail: antonov_vi@ekra.ru.

Наумов В.А., ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия. E-mail: naumov_va@ekra.ru.

Аннотация: *Решение задачи определения места повреждения волновым методом требует локализации фронтов волн во входном сигнале для оценки моментов их возникновения. В настоящей работе предлагается новый способ локализации фронтов волн с*

использованием интерполирующего фильтра, состоящего из основного и дополнительного операторов линейного предсказания.

Ключевые слова: *волновое определение места повреждения, фронт волны, обработка сигнала*

Введение

Все волновые методы ОМП основаны на анализе высокочастотного волнового процесса в месте установки устройства, вызванного КЗ на ЛЭП, с целью локализации фронта волны и оценки момента его возникновения. Очевидно, что точность локализации фронта волны напрямую влияет на точность определения места повреждения [1] – [3].

В настоящем докладе предлагается новый способ локализации фронта волны в сигнале, основанный на выделении его высокочастотных составляющих.

Основная часть

В предлагаемом способе (рис. 1) сначала с использованием входных сигналов фазных величин $x_\vartheta(k)$, $\vartheta = \overline{A,B,C}$ выполняется модальное преобразование [3] (блок MT). После чего, для сигнала $x_\gamma(k)$, имеющего наибольший уровень фронта первой волны [4] (определяется селектором рабочего волнового канала WCS), основным и дополнительным операторами линейного предсказания формируется оценка одного и того же произвольно выбранного отсчета сигнала волнового канала (в блоке FLT).

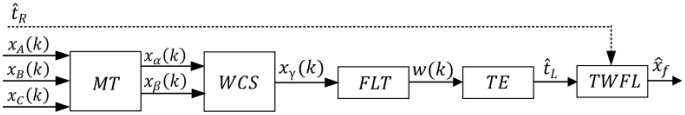


Рис. 1. Структурная схема локализации фронта волны в сигнале: $x_\vartheta(k)$, $\vartheta = \overline{A,B,C}$ – сигналы фазных величин; MT – блок модального преобразования; $x_\alpha(k)$, $x_\beta(k)$ – сигналы воздушных волновых каналов; WCS – селектор рабочего волнового канала; $x_\gamma(k)$ – сигнал рабочего волнового канала; FLT, $w(k)$ – итоговый интерполирующий фильтр и сигнал на его выходе; TE – блок оценки момента возникновения фронта волны; $\hat{t}_L$, $\hat{t}_R$ – оценка момента возникновения фронта волны на собственном и противоположном конце ЛЭП; $TWFL$ – блок определения расстояния до места повреждения

Основная идея заключается в том, что в каждый момент времени с помощью основного и дополнительного операторов линейного предсказания формируется оценка одного и того же произвольно выбранного отсчета сигнала. Операторы представляют собой линейные фильтры предсказания вперед и назад, а их АФЧХ выбираются таким образом, чтобы сигналы ошибки операторов были равны и противоположны по знаку. Основной и дополнительный операторы вместе образуют интерполирующий фильтр. Поэтому в отсутствии фронтов волн уровень сигнала на выходе фильтра, представляющего полусумму ошибок предсказания операторов, будет мал. Если же в сигнале появится фронт волны, то благодаря сдвигу во времени последовательностей отсчетов, используемых операторами, отсчет фронта волны вначале попадает только в окно обработки основного оператора, а окно обработки дополнительного оператора будет без отсчета фронта волны. Поэтому ошибка предсказания основного оператора $e_0(k)$ значительно возрастет, а ошибка предсказания дополнительного оператора $e_д(k)$ останется на уровне предсказания отсчета при отсутствии фронта волны. Это приведет к резкому повышению уровня сигнала на выходе фильтра:

$$w(k) = \frac{1}{2}\left[e_o(k) + e_д(k)\right], \qquad (1)$$

что будет свидетельствовать о возникновении фронта волны на текущем отсчете k.

Операторы используют разные последовательности отсчетов, причем их сдвиг относительно друг друга может осуществляться по-разному [5]. Невязка дополнительного оператора представляет собой инвертированную по знаку невязку основного оператора, вычисленную по последовательности отсчетов со сдвигом на шаг назад. Поэтому АФЧХ невязок основного и дополнительного операторов будут противоположны по знаку и сдвинуты на угол $\alpha = \omega T_s$, равный угловому расстоянию между отсчетами на частоте ω.

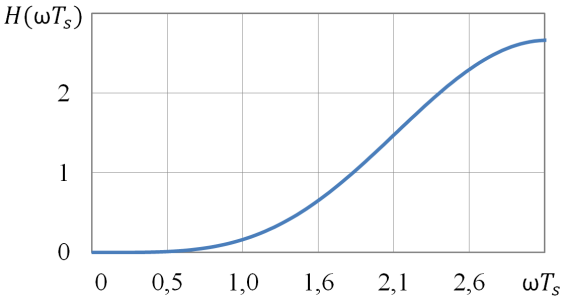


Рис. 2. АЧХ итогового интерполирующего фильтра

Рабочая область частот АФЧХ итогового интерполирующего фильтра (1) [рис. 2] должна располагаться в низкочастотной области – области значительного подавления входного сигнала. Тогда сигнал на выходе итогового фильтра при отсутствии во входном сигнале фронтов волн будет иметь невысокий уровень небаланса. Это важно, поскольку уровень небаланса влияет на выбор порога, по которому оценивается момент $\hat{t}_L$ возникновения фронта волны (*TE* на рис. 1), который используется для определения расстояния до места повреждения (*TWFL* на рис. 1).

Выводы

Предложен новый способ локализации фронта волны в сигнале. Его основная идея заключается в том, что в каждый момент времени с помощью основного и дополнительного операторов линейного предсказания формируется оценка одного и того же произвольно выбранного отсчета сигнала. В отсутствии фронтов волн уровень сигнала на выходе фильтра, представляющего полусумму ошибок предсказания операторов, будет мал. Если же в сигнале появится фронт волны, то благодаря сдвигу во времени последовательностей отсчетов, используемых операторами, отсчет фронта волны вначале попадает только в окно обработки основного оператора, а окно обработки дополнительного оператора будет без отсчета фронта волны. Это приведет к резкому повышению уровня сигнала на выходе фильтра, что будет свидетельствовать о возникновении фронта волны на текущем отсчете.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A. Fedorov, V. Petrov, O. Afanasieva and I. Zlobina,* "Limitations of Traveling Wave Fault Location," 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Ekaterinburg, 2020, pp. 21-25, DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281153.

2. *A. Fedorov, V. S. Petrov and V. Naumov*, "Theory of single-end traveling wave fault location", 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2021.

3. *B. Kasztenny,* "Improving Line Crew Dispatch Accuracy When Using Traveling-Wave Fault Locators," 46th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington – 2019, – pp. 1 – 13.

4. *V. Alekseev, V. Petrov and V. Naumov*, "Invariance of Modal Transformations of Electrical Values in Traveling Wave Fault Locator", 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2020, pp. 1-5, DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111912.

5. *Петров В.С.*, "Цифровая система автоматического ограничения повышения напряжения сетей 110-750 кВ". Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Чебоксары, 2015.

Авторы:

Егоров Владимир Алексеевич*, техник департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», студент факультета энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: egorov_va@ekra.ru.*

Фёдоров Алексей Олегович*, инженер-исследователь 3 категории департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». Окончил в 2020 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень магистра по направлению «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность». E-mail: fedorov_a@ekra.ru.*

Петров Владимир Сергеевич, *сведения об авторе приведены на стр. 33.*

Антонов Владислав Иванович*, сведения об авторе приведены на стр. 33.*

Наумов Владимир Александрович*, сведения об авторе приведены на стр. 34.*

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

МОДАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В УСТРОЙСТВЕ ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

Фёдоров Алексей О., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail: fedorov_a@ekra.ru.

Петров В.С., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail: petrov_vs@ekra.ru.

Алексеев В. С., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail: alekseev_vs@ekra.ru.

Аннотация: *Для повышения точности устройств волнового ОМП в них используется модальное преобразование входных величин тока и напряжения. В настоящей статье показано, что преобразования Кларк, Карренбауэра и Ведпола, используемые в устройствах волнового ОМП, инвариантны. Следовательно, для локализации места повреждения может использоваться любое из них. Иллюстрируется применение преобразований Кларк, Карренбауэра и Ведпола при установке волнового ОМП на двухцепных ЛЭП.*

Ключевые слова: *модальное преобразование, преобразование Кларк, преобразование Ведпола, преобразование Карренбауэра, одноцепная ЛЭП, двухцепная ЛЭП*

Введение

Волны в фазах, образующиеся при возникновения КЗ на ЛЭП, состоят из составляющих двух воздушных и одного земляного волновых каналов [1]. Эти составляющие имеют разную скорость распространения и, следовательно, в месте установки устройства волнового определения места повреждения (ОМП) возникают в разное время. В результате чего фронты волн в фазах теряют выраженность, что приводит к снижению точности определения времени их возникновения и, следовательно, точности определения места повреждения. Для решения этой проблемы в устройствах волнового ОМП выполняется модальное преобразование фазных величин,

позволяющее выделить независимые составляющие волновых каналов [2]. Традиционно предполагают, что ЛЭП является симметричной, и используют модальное преобразование Кларк [3], [4], Карренбауэра [5] или Ведпола [6].

Цель настоящего доклада – иллюстрация инвариантности преобразований Кларк, Карренбауэра и Ведпола, а также возможности их использования как при установке волнового ОМП на одноцепных, так и на двухцепных ЛЭП.

Основная часть

Для анализа волновых процессов в линии электропередачи применяются преобразования, позволяющие перейти от фазных величин к независимым волновым каналам:

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_0 \end{bmatrix} = \boldsymbol{T} \begin{bmatrix} w_A \\ w_B \\ w_C \end{bmatrix},$$

где w_ϑ – волны в фазах, $\vartheta = \overline{A, B, C}$; w_γ – составляющие в волновых каналах, $\gamma = \overline{1, 2, 0}$.

Известны матрицы преобразования:

Кларк

$$\boldsymbol{T}_C = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

Карренбауэра

$$\boldsymbol{T}_K = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

и Ведпола

$$\boldsymbol{T}_W = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} -1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{3}{2} & \frac{3}{2} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрица перехода от одного преобразования $\boldsymbol{T}_A$ к другом $\boldsymbol{T}_B$ может быть получена как:

$$\boldsymbol{T}_{BA} = \boldsymbol{T}_A \boldsymbol{T}_B^{-1}.$$

Тогда матрица перехода от преобразования Ведпола к преобразованию Кларк [7]:

$$\boldsymbol{T}_{WC} = \begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & -\dfrac{2}{\sqrt{3}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

а матрица перехода от преобразования Карренбауэра к преобразованию Кларк:

$$\boldsymbol{T}_{KC} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Видно, что воздушные каналы по преобразованию Кларк и преобразованию Карренбауэра линейно комбинируемы, а воздушные каналы по преобразованию Кларк и Ведпола и вовсе подобны, поскольку достаточно использовать линейный коэффициент для волнового канала для перехода к другому преобразованию. Через линейную связь с матрицей преобразования Кларк также линейно связаны друг с другом матрицы преобразования Ведпола и Карренбауэра.

При установке устройства волнового ОМП на двухцепной ЛЭП для перехода к волновым каналам

$$\begin{bmatrix} w_1^I \\ w_2^I \\ w_1^{II} \\ w_2^{II} \\ w_0^{I-II} \\ w_0 \end{bmatrix} = \boldsymbol{T} \begin{bmatrix} w_A^I \\ w_B^I \\ w_C^I \\ w_A^{II} \\ w_B^{II} \\ w_C^{II} \end{bmatrix} \qquad (1)$$

используют матрицу преобразования [8], [9]

$$\boldsymbol{T} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

где w_1^I, w_2^I, w_1^{II}, w_2^{II} – составляющие воздушных волновых каналов для первой и второй цепи ЛЭП, w_0^{I-II}, w_0 – составляющие земляных волновых каналов, w_ϑ^I, w_ϑ^{II} – волны в фазах первой и второй цепи.

Из (1) видно, что воздушные каналы одной цепи ЛЭП не зависят от воздушных каналов другой цепи. В связи с чем в устройстве волнового ОМП, установленном на двухцепной ЛЭП, для контроля составляющих воздушных каналов может быть применено традиционное преобразование Кларк. Также могут быть использованы преобразования Карренбауэра или Ведпола, линейно связанные с преобразованием Кларк.

Заключение

Для определения места повреждения может использоваться любое из линейно-связанных преобразований Кларк, Карренбауэра и Ведпола – результат работы устройства волнового ОМП будет одинаков.

В устройстве волнового ОМП, установленном на двухцепной ЛЭП, для контроля составляющих воздушных волновых каналов может быть применено традиционное преобразование Кларк или же любое линейно связанное с ним преобразование Карренбауэра или Ведпола.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Попов И.Н., В.Ф. Лачугин, Соколова Г.В.* Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. Москва: Энергоатомиздат, 1986.

2. *A. Fedorov, V. Petrov, O. Afanasieva and I. Zlobina,* "Limitations of Traveling Wave Fault Location," 2020 Ural Smart Energy Conference

(USEC), Ekaterinburg, 2020, pp. 21-25, DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281153.

3. *I. E. Clarke,* Circuit Analysis of Alternating Current Power Systems, vol. 1. New York: Wiley, 1943.

4. *M. M. Saha, J. J. Izykowski, E. Rosolowski,* "Fault Location on Power Networks", Springer, 2010 – 432 p.

5. A. Lei, X. Dong, S. Shi, "A Novel Method to Identify the Travelling WaveReflected from the Fault Point or the Remote-end Bus", IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015.

6. *L. M. Wedepohl,* "Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems", Proc. IEE 110 (1963) no. 12, pp. 2200-2212.

7. *V. Alekseev, V. Petrov and V. Naumov*, "Invariance of Modal Transformations of Electrical Values in Traveling Wave Fault Locator", 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2020, pp. 1-5, DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111912.

8. *H. Benteng, H. Weijin*, "Mode transformation of double-circuit line tower", Power System Technology, vol. 22, No.1, Aug. 1998.

9. *Q. Xin, S. Wei,* "Mode analysis of different transported double circuit on same tower", Power System Technology, vol. 25, No.8, Aug. 2001.

Авторы:

Фёдоров Алексей Олегович*, сведения об авторе приведены на стр. 82.*

Петров Владимир Сергеевич, *сведения об авторе приведены на стр. 33.*

Алексеев Валерий Сергеевич*, инженер-исследователь 3 категории департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». Окончил в 2020 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень магистра по направлению «Автоматика энергосистем». E-mail: alekseev_vs@ekra.ru.*

СИГНАЛЫ ВОЛНОВОГО ДИСКРИМИНАТОРА ПОВРЕЖДЕННЫХ ФАЗ

Алексеев В.С., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. alekseev_vs@ekra.ru

Фёдоров Алексей О., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. fedorov_a@ekra.ru

Петров В.С., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. petrov_vs@ekra.ru

***Аннотация**: При использовании волновых методов традиционные способы определения поврежденных фаз теряют работоспособность. Нужны методы обработки сигналов, учитывающие волновой характер процесса. В настоящем докладе рассматривается определение вида КЗ на основе использования модальных преобразований сигналов волнового процесса.*

***Ключевые слова:** фазный дискриминатор, короткое замыкание, волновой процесс*

Введение

При использовании волновых методов традиционные способы определения поврежденных фаз теряют работоспособность. В этом случае приобретают значимость методы обработки сигналов, учитывающие волновой характер процесса.

В настоящем докладе рассматривается определение вида КЗ на основе использования модальных преобразований сигналов волнового процесса.

Составляющие волновых каналов

При междуфазных и земляных КЗ волновые процессы развиваются по-разному. Известно, что причиной этому является разная скорость распространения электромагнитных волн в так называемых воздушных и земляных каналах. Это свойство волн приводит к усложнению измерения их в фазных величинах [1]. Для разделения волн воздушного канала от земляного обычно используют модальные преобразования фазных величин, рассматривая распространение волн по отдельным волновым каналам. Составляющие волновых каналов, получаемые при

модальных преобразованиях распространяются с одинаковой скоростью и затуханием [1]. Для выделения составляющих воздушных и земляного каналов используются различные преобразования, например, Кларк [1]:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_C \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \end{bmatrix},$$

где x_α, x_β, x_0 – так называемые α, β и 0 составляющие;

x_A, x_B, x_C – фазные величины;

$\mathbf{T}_C = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ – матрица Кларк.

Определение вида повреждения

Вид КЗ определяется по соотношению фронтов волн i_w в волновых каналах (таблицы 1 – 3).

Таблица 1

Составляющие волновых каналов тока при однофазных КЗ

		Вид КЗ		
		γG	$(\gamma+1)G$	$(\gamma+2)G$
Волновые каналы	$i_\alpha^{(\gamma)}$	$2i_{w,\gamma}$	$-i_{w,(\gamma+1)}$	$-i_{w,(\gamma+2)}$
	$i_\beta^{(\gamma)}$	0	$\sqrt{3}i_{w,(\gamma+1)}$	$-\sqrt{3}i_{w,(\gamma+2)}$
	i_0	$i_{w,\gamma}$	$i_{w,(\gamma+1)}$	$i_{w,(\gamma+2)}$

Таблица 2

Составляющие волновых каналов тока при двухфазных КЗ на землю

		Вид КЗ		
		$(\gamma,\gamma+1)G$	$(\gamma+1,\gamma+2)G$	$(\gamma+2,\gamma)G$
Волновые каналы	$i_\alpha^{(\gamma)}$	$2i_{w,\gamma} - i_{w,(\gamma+1)}$	$-i_{w,(\gamma+1)} - i_{w,(\gamma+2)}$	$2i_{w,\gamma} - i_{w,(\gamma+2)}$
	$i_\beta^{(\gamma)}$	$\sqrt{3}i_{w,(\gamma+1)}$	$\sqrt{3}\left(i_{w,(\gamma+1)} - i_{w,(\gamma+2)}\right)$	$-\sqrt{3}i_{w,(\gamma+2)}$
	i_0	$i_{w,\gamma} + i_{w,(\gamma+1)}$	$i_{w,(\gamma+1)} + i_{w,(\gamma+2)}$	$i_{w,(\gamma+2)} + i_{w,\gamma}$

Таблица 3

Составляющие волновых каналов тока при междуфазных КЗ

		Вид КЗ			
		$(\gamma,\gamma+1)$	$(\gamma+1,\gamma+2)$	$(\gamma+2,\gamma)$	трехфазное
Волновые каналы	$i_{\alpha}^{(\gamma)}$	$3i_{w,\gamma}$	0	$3i_{w,\gamma}$	$3i_{w,\gamma}$
	$i_{\beta}^{(\gamma)}$	$-\sqrt{3}i_{w;\gamma}$	$2\sqrt{3}i_{w,(\gamma+1)}$	$\sqrt{3}i_{w,\gamma}$	$\sqrt{3}\left(i_{w,(\gamma+1)}-i_{w,(\gamma+2)}\right)$
	i_0	0	0	0	0

Примечание: ɣ = *A, B, C*; все значения, приведенные в таблицах 1 – 3, умножены на 3.

Выводы

Несмотря на то, что в волновом дискриминаторе поврежденных фаз используются информационные сигналы совершенно иного характера, чем в традиционном дискриминаторе, но в принципах их построения прослеживаются одинаковые правила: оба разделяют междуфазные и земляные КЗ по наличию составляющих нулевой последовательности, а особую фазу и вид КЗ определяют по соотношениям соответствующих составляющих поврежденных фаз. В традиционном дискриминаторе информационными составляющими являются симметричные составляющие, а в волновом – составляющие волновых каналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *V. Alekseev, V. Petrov and V. Naumov, "Invariance of Modal Transformations of Electrical Values in Traveling Wave Fault Locator," 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111912*

Авторы:

Алексеев Валерий Сергеевич*, сведения об авторе приведены на стр. 87.*

Фёдоров Алексей Олегович*, сведения об авторе приведены на стр. 82.*

Петров Владимир Сергеевич, *сведения об авторе приведены на стр. 33.*

АДАПТИВНЫЙ ФИЛЬТР ОРТОГОНАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рослова К.С., Наровлянский В.Г. ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», г. Москва, ОАО «ВНИИР», г. Чебоксары, Россия. E-mail: kroslova@abselectro.com

Аннотация: *В работе рассматриваются особенности построения фильтров ортогональных составляющих (ФОС) для измерительных органов релейной защиты, способных работать в широком диапазоне отклонений частоты. С помощью математической модели, разработанной для изучения погрешностей измерения сигналов, были выполнены эксперименты по работе нового алгоритма ФОС в условиях линейного изменения частоты сигнала в диапазонах 45–55 Гц и 20–100 Гц. Результаты экспериментов подтвердили высокую точность работы нового алгоритма.*

Ключевые слова: *релейная защита, фильтр ортогональных составляющих, подстройка по частоте.*

Введение

Развитие электроэнергетических систем (ЭЭС) в современных условиях предполагает наличие электростанций различного типа, в том числе и широкое внедрение так называемой малой генерации. Соответственно изменяются характеристики ЭЭС. Так, например, может иметь место отклонение частоты в достаточно широком диапазоне. При аварийном отклонении частоты ЭЭС в диапазоне 45–55 Гц требуется обеспечение правильного функционирования всех устройств релейной защиты (РЗА) с приемлемым соотношением надежностей срабатывания и несрабатывания [1]. Для генерирующего электрооборудования правильная работа систем РЗА должна обеспечиваться и при отклонении частоты за пределы диапазона 45–55 Гц. Таким образом, обеспечение правильной работы алгоритмов РЗА при изменении частоты воздействующих величин является актуальной задачей.

Характер входных сигналов устройств РЗА

Применение фильтров Фурье в устройствах релейной

защиты позволяет выделить ортогональные составляющие без погрешности только при условии чисто синусоидального входного сигнала постоянной частоты 50 Гц. При отклонении частоты от номинального значения, возникают методические погрешности определения параметров сигнала. Также весьма неблагоприятной с точки зрения вносимой погрешности является апериодическая составляющая. Поэтому для правильного функционирования устройств защиты следует применять специальные алгоритмы, направленные на исключение такой составляющей.

Определение погрешностей фильтра ортогональных составляющих (ФОС)

Важным элементом оценки качества реализации измерительного фильтра является получение некоторой единообразной оценки результата его работы на различных по составу тестовых сигналах.

Для оценки качества ФОС по значению модуля сигнала используется значение полной погрешности измерения модуля (TME - total module error) [2], вычисляемое по формуле 5.

$$TME = \left| \frac{\hat{x}_m(n) - x_m}{x_m} \right| \tag{5}$$

где $\hat{x}_m(n)$ – значение модуля сигнала вектора, выданного измерительным устройством в некоторый момент времени; x_m – модуль исходного сигнала в тот же момент времени.

Для оценки качества работы ФЦФ по векторам используется значение полной погрешности измерения вектора сигнала (TVE - total vector error), вычисляемое по формуле 6.

$$TVE = \sqrt{\frac{\left(\hat{x}_r(n) - x_r\right)^2 + \left(\hat{x}_i(n) - x_i\right)^2}{x_r^2 + x_i^2}} \tag{6}$$

где $\hat{x}_r$ и $\hat{x}_i$ – значения действительной и мнимой части вектора, выданные измерительным устройством; x_r и x_i – значения действительной и мнимой части тестового сигнала в этот же момент времени.

Особенности построения ФОС

Тестируемый фильтр ортогональных составляющих основан на автоматической подстройке основной частоты фильтрации и предназначен для обеспечения единообразной работы средств РЗА в диапазоне частоты входного сигнала 10–100 Гц без существенного усложнения алгоритма работы.

Для решения задачи определения частоты сигнала возможно применить метод измерения частоты сигнала по его переходам через нулевой уровень.

Тестирование ФОС

В качестве моделируемого сигнала принят синусоидальный сигнал с линейным изменением частоты во времени.

$$f(t) = f_0 + R_t t \qquad (7)$$

где f_0 – начальная частота сигнала (Гц), выданного измерительным устройством в некоторый момент времени; $R_t = df(t)/dt$ – скорость нарастания частоты (Гц/с).

Параметры моделируемых тестовых сигналов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры моделируемых сигналов

	Длительность интервала, с	**Скорость изменения частоты, Гц/с**	**Начальная частота, Гц**	**Конечная частота, Гц**
Тест 1				
Интервал 1	0,1	0,0	45	**45**
Интервал 2	**10**	**1,0**	45	55
Интервал 3	0,1	0,0	55	**55**
Тест 2				
Интервал 1	0,1	0,0	20	**20**
Интервал 2	**10**	**8,0**	20	100
Интервал 3	0,1	0,0	100	**100**

В табл. 2 приведена сравнительная статистика погрешности модулей векторов, полученных в результате тестирования модели.

Таблица 2

Сравнительная статистика погрешности модулей векторов

Сравнительная статистика	**Максимальная погрешность, %**	**Минимальная погрешность, %**
max	1,089%	0,327%
min	0,952%	0,310%
mean	0,010%	0,269%
median	0,004%	0,272%

Максимальная погрешность измерения угла в диапазоне частот 20 ÷ 100 Гц относительно модельного сигнала составляет около 4°. Среднее значение разности фаз первого и второго вектора, полученных с помощью ФОС, соответствует разности фаз исходных векторов. Погрешность разницы фаз не превышает 0,7°.

Заключение

С помощью математической модели, разработанной для изучения погрешностей измерения стационарных и нестационарных аварийных сигналов, были выполнены эксперименты по работе нового алгоритма ФОС в условиях линейного изменения частоты сигнала в диапазоне 45 -55 Гц и в расширенном диапазоне 20 -100 Гц.

Испытания алгоритма ФОС в условиях линейного изменения частоты сигнала в диапазоне 20–100 Гц подтвердили высокую точность расчетов векторов сигналов, напряжения, и расчетного сопротивления на входе измерительного органа на всем указанном диапазоне изменения частоты исходных сигналов и составляют от 0,1 до 1 % по амплитуде, не более 4 градусов по углу вектора и не более 0,7 градуса по углу сопротивления. Значения погрешности с большим запасом превышают требования, предъявляемым к измерительным органам РЗА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Требования к участию генерирующего оборудования в общем первичном регулировании частоты. Приказ Минэнерго РФ от 9 января 2019 г. № 2.

2. IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems.IEEE Std C37.118.1-2011, page 17, table 4.

Авторы:

Наровлянский Владимир Григорьевич*, ОАО «ВНИИР», научный консультант, доктор технических наук, e-mail: vnarovlyanskiy@abselectro.com.*

Рослова Кристина Сергеевна*, инженер 3 категории ОАО «ВНИИР», студент второго курса магистратуры института Электроэнергетики ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», e-mail: kroslova@abselectro.com.*

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТОКА, ИСКАЖЕННОГО ВСЛЕДСТВИЕ НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА, ПО МАЛОМУ ЧИСЛУ ОТСЧЕТОВ

Лямец Ю. Я., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия. E-mail: yu.ya.liamets@gmail.com.

Никонов И.Ю., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия, ivan04031997@gmail.com.

Петряшин И.Е., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия, E-mail: petry1405@mail.ru.

Аннотация: *рассматривается задача цифрового восстановления тока, искаженного в результате насыщения трансформатора тока. Для решения этой задачи привлекается информация с участка неискаженной трансформации, а также с участка насыщения. Приведены примеры восстановления смоделированных токов и реальных токов, записанных терминалами релейной защиты.*

Ключевые слова: *насыщение трансформатора тока, восстановление искажённого тока.*

Введение

В связи с повышением уровня токов короткого замыкания в электрических системах все более серьезной проблемой становится преодоление последствий насыщения трансформатора тока [1–3]. В настоящее время в цифровой

релейной защите широкое применение нашли алгоритмы восстановления нелинейно искаженного тока, в основе которых лежит процедура сегментации – разделение тока на интервалы неискаженной трансформации и интервалы насыщения. Однако, интервалы неискаженной трансформации не всегда достаточно продолжительны для полноценного восстановления тока. В связи с этим возникает необходимость в объединении информации, полученной на этом интервале с информацией, доставляемой последующими интервалами – интервалом неискаженной трансформации, или же, что лучше для быстродействия, соседним интервалом насыщения.

Принимаемые допущения

Модель тока полагается аддитивной с гармонической и апериодической составляющей

$$i_{\text{сети}}(t) = i_{\text{гарм}}(t) + i_{\text{апер}}(t); \tag{1}$$

$$i_{\text{гарм}}(t) = I_{ms}\sin\omega t + I_{mc}\cos\omega t. \tag{2}$$

Длительное насыщение трансформатора тока вызывается медленно затухающей апериодической составляющей, поэтому естественно принять, что изменение тока сети происходит вследствие изменения гармонической составляющей

$$\frac{di_{\text{сети}}(t)}{dt} = \frac{di_{\text{гарм}}(t)}{dt}; \tag{3}$$

Также предполагается совпадение наблюдаемого тока с током сети на участках неискаженной трансформации

$$i(t) = i_{\text{сети}}(t), \quad t \in (t_{\text{н}}, t_{\text{к}}), \tag{4}$$

где $t_{\text{н}}$ и $t_{\text{к}}$ - границы интервала данного типа.

Описанные допущения позволяют предположить, что на участке восстановления ток сети описывается выражением

$$i_{cemu}(t) = I_{ms}\sin\omega t + I_{mc}\cos\omega t + I_0. \tag{5}$$

Информация с интервала неискажённой трансформации

Предполагается, что на интервале неискаженной трансформации доступно 2 отсчета тока в моменты времени t_1 и t_2. Согласно допущению (4) ток на данном интервале будет соответствовать току сети, описываемому выражением (5).

Очевидно, что информации, поставляемой данными отсчетами недостаточно для разрешения выражения (5) относительно I_{ms}, I_{mc} и I_0 поэтому необходимо привлечение дополнительной информации, например, с соседнего участка искаженной трансформации.

Информация с интервала искажённой трансформации

В дополнение к трём ранее принятым допущениям, отражаемым выражениями (1)–(4), на интервале насыщения необходимо принять ещё одно допущение о применимости линейной модели трансформатора тока с тремя неизвестными параметрами – дифференциальной индуктивностью ветви намагничивания $L_{\mu\,\text{диф}}$ и параметрами вторичной обмотки *R* и *L*.

Модель описывается двумя уравнениями:

$$L_{\mu\,\text{диф}}\frac{di_{\mu}(t)}{dt} = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt}; \tag{6}$$

$$\frac{di_{\mu}(t)}{dt} = \frac{di_{c}(t)}{dt} - \frac{di(t)}{dt}, \tag{7}$$

которые приводятся с учётом выражений (1) – (4) к одному уравнению с тремя неизвестными величинами и четырьмя известными функциями.

$$(\cos\omega t)x_1 - (\sin\omega t)x_2 - \left(\frac{di(t)}{dt}\right)x_3 = i(t); \tag{8}$$

$$x_1 = \frac{\omega L_{\mu\,\text{диф}}}{R}I_{ms};\ x_2 = \frac{\omega L_{\mu\,\text{диф}}}{R}I_{mc};\ x_3 = \frac{L_{\mu\,\text{диф}} + L}{R}.$$

Необходимую информацию несёт отношение двух первых неизвестных

$$\lambda = \frac{x_2}{x_1} = \frac{I_{mc}}{I_{ms}}. \tag{9}$$

Для его определения потребуются значения переменных коэффициентов в уравнении (8) в три момента времени t_3, t_4, t_5, которые располагаются на интервале насыщения.

Информация с участка правильной трансформации дополняется отношением (9), после чего становится возможным разрешение выражения (5) относительно I_{ms}, I_{mc} и I_0.

Апробация алгоритма

Рассматриваются осциллограммы токов КЗ, полученные путем математического моделирования, а также осциллограммы реальных процессов. Осциллограмма тока сети приводится только в случае его моделирования. Восстановленный ток $\hat{i}(t)$ во всех случаях представлен пунктиром.

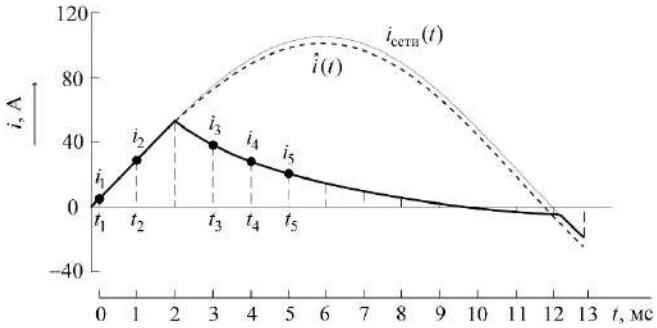


Рис.1. Пример восстановления тока, полученного с помощью программного комплекса Matlab/Simulink

Об эффективности восстановления тока в данном случае можно судить исходя из сравнения тока сети и восстановленного тока – они практически совпадают.

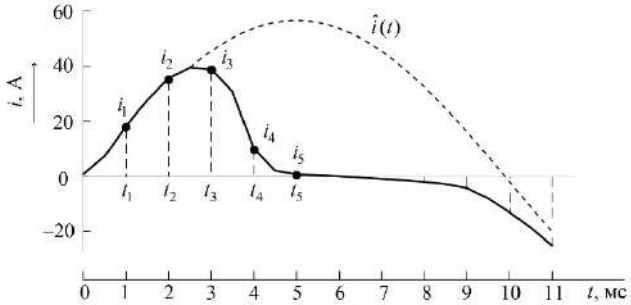


Рис.2. Пример восстановления тока реального КЗ

В данном случае не представляется возможным сравнить восстановленный ток с током сети, тем не менее о правильности процедуры восстановления можно судить исходя из

сопоставления восстановленного тока с током на участках правильной трансформации.

Заключение

В основе процедуры восстановления искаженного тока лежит операция объединения информации с интервалов неискаженной и искаженной трансформации. Принятие допущений (1) – (4) и (6) – (7) позволяет ограничиться для восстановления двумя отсчетами тока на участке неискаженной трансформации и тремя – на участке искаженной. Об эффективности предлагаемого метода можно судить исходя из сопоставления восстановленного тока с током сети, либо с током на участках правильной трансформации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лямец, Ю.Я.* Мониторинг процессов в электрической системе / [Текст] / Ю.Я. Лямец, Ю.В. Романов, Д.В. Зиновьев // Электричество. -- 2006. -- № 10. -- С. 2 -- 10; № 11. С. 2 - 10.

2. *Wiszniewski, A.* Correction of current transformer transient performance [Text] / A. Wiszniewski, W. Rebizant, L. Schiel // IEEE Trans. Power Deliv. – 2008. – Vol. 23. – No. 2. – P. 624 - 632.

3. *Кужеков, С.Л.* Анализ способов восстановления информации о первичном токе трансформатора тока, работающего с насыщением сердечника [Текст] / С.Л. Кужеков, А.А. Дегтярев, Б.Б. Сербиновский // Релейная защита и автоматизация. – 2017. -- № 3. – С. 43 - 51.

Авторы:

Лямец Юрий Яковлевич*, сведения об авторе приведены на стр. 10.*

Никонов Иван Юрьевич*, сведения об авторе приведены на стр. 10.*

Петряшин Илья Евгеньевич, *сведения об авторе приведены на стр. 17.*

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В УСТРОЙСТВАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АПВ ЛЭП С ШУНТИРУЮЩИМИ РЕАКТОРАМИ

Иванов Н.Г., ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия. E-mail: ivanov_ng@ekra.ru.

Александрова М.И., ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия. E-mail: aleksandrova_mi@ekra.ru.

Воробьев Е.С., ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия. E-mail: vorobev_es@ekra.ru.

Антонов В.И., ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия. E-mail: antonov_vi@ekra.ru.

Наумов В.А., ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия. E-mail: naumov_va@ekra.ru.

Аннотация: *Интеллектуальное АПВ, основанное на выборе оптимального момента повторного включения линии, является одним из эффективных методов предотвращения опасных коммутационных перенапряжений, возникающих в цикле АПВ протяженных ЛЭП сверхвысокого напряжения. Для реализации наиболее эффективного алгоритма интеллектуального АПВ принципиально необходимо применение алгоритмов предсказания сигналов на основе методов адаптивного структурного анализа. В работе предлагается новый способ прецизионного распознавания сигнала напряжения ЛЭП с шунтирующими реакторами в паузе цикла трехфазного АПВ, основанный на методе адаптивного структурного анализа и обладающий более высокой точностью по сравнению с классической реализацией этого метода.*

Ключевые слова: *интеллектуальное АПВ, адаптивный структурный анализ, распознавание сигнала*

Постановка задачи

Преимущество технологии интеллектуального АПВ заключается в снижении интенсивности электромагнитного переходного процесса за счет прецизионного управления моментом повторного включения ЛЭП [1 – 3]. Поскольку команда включения подается на выключатель с опережением, равным времени его действия, то для принятия решения устройство должно предсказывать напряжение на контактах выключателя.

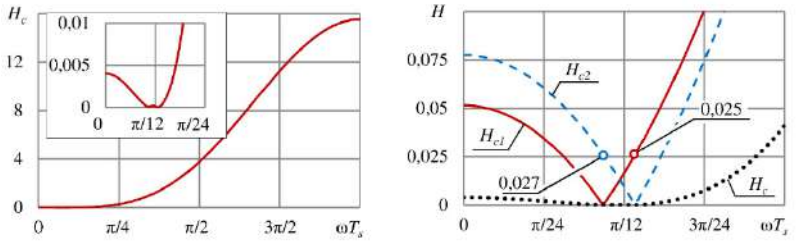
При предсказании напряжения на контактах выключателя нужно различать процессы при однофазном и трехфазном АПВ.

При ОАПВ восстанавливающееся напряжение отключенной фазы, обусловленное взаимной электрической и магнитной связью с неповрежденными фазами, содержит две составляющие близкой частоты: принужденную составляющую, наводимую от «здоровых» фаз, и свободную составляющую.

В паузе цикла трехфазного АПВ характер колебательного разряда распределенной емкости линии электропередачи через индуктивность реактора зависит от предшествующего режима. Если отключению предшествует несимметричный режим линии (например, несимметричное короткое замыкание), колебательный свободный процесс происходит одновременно во всех схемах симметричных составляющих. Параметры схем прямой и обратной последовательности, будучи одинаковыми, отличаются от параметров схемы нулевой последовательности, главным образом, из-за разницы в распределенной емкости линии. Поэтому напряжение ЛЭП в паузе цикла трехфазного АПВ в общем случае содержит две составляющие с близкими частотами: первая из них связана со свободным процессом в контурах прямой и обратной последовательностей, а вторая – с процессом в контуре нулевой последовательности.

Таким образом, стратегия интеллектуального АПВ, подразумевающая повторное включение ЛЭП в заданный момент времени, требует применения методов распознавания и предсказания многокомпонентных сигналов свободного процесса. Одним из таких методов является адаптивный структурный анализ [4, 5].

Модель сигнала для предсказания напряжения на контактах выключателя может быть получена двумя способами. В первом способе составляющие модели получают как сумму составляющих сигналов напряжения шин и напряжения ЛЭП. Второй способ подразумевает определение компонентов модели по отсчетам сигнала напряжения на контактах выключателя, полученным в результате суммирования отсчетов напряжений шин и ЛЭП [6]. Однако при распознавании сигнала напряжения на контактах выключателя условия настройки адаптивной структурной модели существенно усложняются из-за наличия в сигнале принужденной и свободной составляющих с близкими частотами. Это приводит к усилению конкуренции между фильтрами эффективного ядра адаптивной структурной модели, приводя к снижению точности распознавания параметров сигнала.



а) б)

Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики фильтра эффективного ядра (а) и канонических фильтров эффективного ядра (б)

Иллюстрация конкуренции фильтров приведена на рис. 1. Здесь кривая H_c – результирующая АЧХ фильтра эффективного ядра, кривые H_{c1} и H_{c2} – АЧХ канонических фильтров эффективного ядра – фильтра свободной составляющей прямой и нулевой последовательностей соответственно. Как видно из АЧХ, фильтр прямой последовательности (кривая H_{c1}) ослабляет сигнал нулевой последовательности (коэффициент передачи равен 0,025), тем самым мешает настройке фильтра нулевой последовательности. Аналогично фильтр нулевой последовательности ослабляет сигнал прямой последовательности. Таким образом, конкуренция канонических фильтров эффективного ядра приводит к снижению точности оценок, что особенно сильно проявляется при наличии в сигнале шумов.

В данной работе рассматриваются новые принципы предсказания напряжения свободного процесса в паузе цикла АПВ ЛЭП с ШР, повышающие точность предсказания.

Адаптивный структурный анализ

Предсказание сигнала с применением адаптивного структурного анализа предусматривает формирование его компонентной модели в виде суммы составляющих и экстраполяцию сигнала.

Распознавание сигнала осуществляется в два этапа. На первом из них определяется структура сигнала и комплексные

частоты его составляющих. Для этого используется структурная модель сигнала

$$a_0\hat{x}(k) = -\sum_{m=1}^{M} a_m x(k - mv), \qquad (1)$$

где $a_0\hat{x}(k)$ – взвешенная с коэффициентом a_0 оценка текущего отсчета сигнала $x(k)$, a_m – искомые коэффициенты модели, M – порядок модели, v – коэффициент внутримодельной децимации. Коэффициент a_0 может быть произвольным, обычно $a_0 = 1$. Настройка структурной модели осуществляется на заданной выборке отсчетов сигнала размера N по критерию наименьших квадратов

$$E(k) = \sum_{l=k-N+1}^{k} e(l)^2 \xrightarrow[a_m]{} \min, \qquad (2)$$

где

$$e(k) = \left[a_0 x(k) - a_0 \hat{x}(k) \right] - \qquad (3)$$

сигнал невязки модели.

Корни характеристического полинома структурной модели

$$P(\underline{\zeta}) = \sum_{m=0}^{M} a_m \underline{\zeta}^{-m},$$

определяют комплексные частоты слагаемых

$$\underline{p}_i v T_s = (\alpha_i + j\omega_i) v T_s = \ln \underline{\zeta}_i,$$

где T_s – интервал дискретизации сигнала. В общем случае часть корней $\underline{\zeta}_i$ ассоциирована со слагаемыми измеряемого напряжения (образуют эффективное ядро структурной модели), а другая часть – с шумом в сигнале (образуют фильтр шума). Поэтому для следующего этапа структурного анализа отбираются только те корни, которые согласованы с полезными слагаемыми.

На втором этапе распознавания полезных составляющих входного сигнала составляется компонентная модель

$$\hat{x}(k) = \sum_{m=1}^{M_c} \underline{A}_m e^{(-\alpha_m + j\omega_m) k T_s}, \qquad (4)$$

где M_c – порядок модели.

Комплексные амплитуды слагаемых сигнала A_m определяются путем настройки компонентной модели сигнала, которая, как и в случае структурной модели осуществляется по критерию наименьших квадратов (2). Экстраполяция сигнала осуществляется по выражению (4).

Повышение разрешающей способности адаптивной структурной модели

Как было сказано ранее, распознавание и предсказание сигнала напряжения ЛЭП в паузе цикла трехфазного АПВ вызывает сложности, поскольку он содержит две свободные составляющие с близкими частотами [7]. Из-за конкуренции фильтров этих составляющих происходит снижение точности распознавания параметров сигнала.

Для повышения точности предсказания напряжения ЛЭП в паузе цикла трехфазного АПВ был разработан новый способ цифровой обработки сигнала, основанный на использовании процедур адаптивного структурного анализа и обладающий лучшей точностью по сравнению с классическими алгоритмами адаптивного структурного анализа. Идеи нового метода заключаются в одновременном использовании информации, заключенной в сигналах напряжений всех фаз, и устранении взаимной конкуренции между каноническими фильтрами свободных составляющих.

Сравнительное исследование характеристик классического алгоритма адаптивного структурного анализа и нового способа проводилось на примере распознавания сигналов фазных напряжений ЛЭП в паузе трехфазного АПВ, содержащих белый гауссовский шум. Для оценки эффективности устранения конкуренции между каноническими фильтрами эффективного ядра были проведены эксперименты по распознаванию сигналов, содержащих составляющие с частотами, отличающимися на 10 Гц ($f_{12} = 43,44$ Гц и $f_0 = 53,44$ Гц) и 3 Гц ($f_{12} = 43,44$ Гц и $f_0 = 46,44$ Гц).

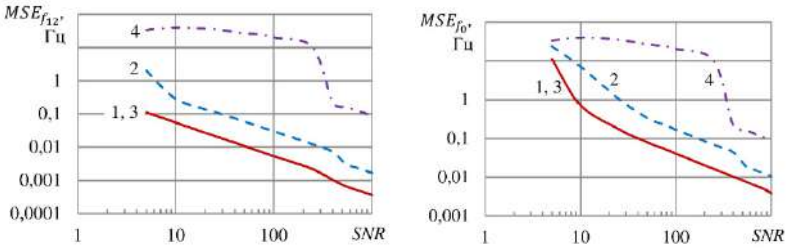
Результаты экспериментов (рис. 2) показывают, что:

1) конкуренция между каноническими фильтрами эффективного ядра негативно сказывается на точности

классического алгоритма адаптивного структурного анализа: при уменьшении разности частот с 10 Гц до 3 Гц погрешность оценки частоты увеличивается более чем на порядок (кривые 2 и 4 на рис. 2);

2) в новом способе полностью устранена конкуренция между каноническими фильтрами эффективного ядра, поэтому ему удается сохранить точность и при уменьшении разности частот составляющих напряжения с 10 до 3 Гц (кривые 1 и 3 на рис. 2 совпадают);

3) новый способ обеспечивает лучшую точность оценки частот составляющих сигнала по сравнению с классическим алгоритмом: погрешность оценки частоты снижается до 6,5 раз при разности частот 10 Гц, и до 210 раз при разности частот 3 Гц.



а) б)

Рис. 2. Среднеквадратическая погрешность оценки частоты прямой/обратной (а) и нулевой последовательностей (б) в сигнале по новому способу и с использованием классического алгоритма адаптивного структурного анализа. На рисунке приняты следующие обозначения: погрешности нового и классического способов соответственно при $f_{12} = 43,44$ Гц и $f_0 = 53,44$ Гц – кривые 1 и 2 соответственно; кривые тех же погрешностей при $f_{12} = 43,44$ Гц и $f_0 = 46,44$ Гц – кривые 3 и 4.

Выводы

1. Эффективность устройств интеллектуального АПВ ЛЭП с ШР обеспечивается высокой точностью предсказания сигналов напряжения со стороны питающей системы и со стороны линии.

Такой высокой точностью предсказания обладают методы адаптивного структурного анализа.

2. Разрешающая способность классического алгоритма адаптивного структурного анализа ограничивается конкуренцией фильтров эффективного ядра структурной модели.

3. Новый метод полностью устраняет конкуренцию между фильтрами эффективного ядра и использует весь объем информации, заключенной в сигналах всех фаз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ivanov N.* An Optimal Strategy for Three-Phase Intelligent Auto-Reclosing of Power Lines with Shunt Reactors / N. Ivanov [et al.] // 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Ekaterinburg, 2020, pp. 31-34. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281271.

2. *Ivanov N.* A Damage Prevention of Circuit Breaker During Energizing of Low-loaded Line with Shunt Reactors / N. Ivanov [et al.] // 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Ekaterinburg, 2020, pp. 72-75. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281269.

3. *Ivanov N.G.* Fundamentals of Intelligent Automatic Reclosing of Long-Distance Transmission Lines with Shunt Reactors / Ivanov N.G. [et al.] // Russian Electrical Engineering, 2019, Vol. 90, No. 8, PP. 558–564.

4. *Антонов В.И.* Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике / В.И. Антонов – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – 333 с.

5. Антонов В.И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория для инженера / В.И. Антонов, В.А. Наумов, М.Н. Кудряшова, М.И. Александрова, Д.А. Степанова // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 2 (35) – С. 18–27.

6. *Иванов Н.Г.* Анализ структуры напряжения компенсированной ЛЭП в паузе цикла автоматического повторного включения / Н.Г. Иванов, В.И. Антонов, В.А. Наумов, А.В. Солдатов //Материалы 11-й Всерос. Науч.-техн. конф. «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике». Чебоксары: Изд-во Чуваш. Ун-та, 2018. С.249–253.

7. *Иванов Н.Г.* Анализ алгоритмов предсказания напряжения в паузе цикла интеллектуального АПВ / Н.Г. Иванов [и др.] // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: сборник докладов III Международной научно-технической конференции. - Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. С. 151-159.

Авторы:

Иванов Николай Геннадьевич*, сведения об авторе приведены на стр. 25.*

Александрова Марина Ивановна*, инженер 3 категории группы разработки интеллектуальных устройств департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», аспирант ЧГУ им. И.Н. Ульянова по профилю 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы». E-mail: aleksandrova_mi@ekra.ru.*

Воробьев Евгений Сергеевич*, инженер 3 категории группы разработки интеллектуальных устройств департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», ассистент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2019 г. окончил электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Получил степень бакалавра в 2017 г., защитил магистерскую диссертацию в 2019 г. по направлению «Автоматика энергосистем»: vorobev_es@ekra.ru.*

Антонов Владислав Иванович, *сведения об авторе приведены на стр. 33.*

Наумов Владимир Александрович, *сведения об авторе приведены на стр. 34.*

УЛУЧШЕННЫЙ МЕТОД АКТИВНО-АДАПТИВНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ СЛАБЫХ СЛАГАЕМЫХ НА ФОНЕ ПРЕОБЛАДАЮЩЕЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА ОЗЗ

Иванов М.О., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.

Кудряшова М.Н., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.

Солдатов А.В., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.

Иванов Н.Г., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.

Антонов В.И., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.
Наумов В.А., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.

Аннотация: *В работе рассматриваются методы измерения слабых гармонических составляющих на фоне преобладающей основной гармоники в релейной защите от однофазных замыканий на землю. Исследуется новый способ повышения разрешающей способности активно-адаптивного метода распознавания, сохраняющий высокую точность в условиях отклонения параметров элементов тракта АЦП и погрешности цифровой обработки сигналов.*

Ключевые слова: *замыкание на землю, гармоники, активно-адаптивное распознавание сигналов*

Введение

Для защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью еще в прошлом веке предлагалось применение контроля уровня высших гармоник в фазных токах защищаемого объекта [1]. Однако высшие гармоники как информационные сигналы защит от ОЗЗ [2] до настоящего времени не нашли применения, поскольку уровень высших гармоник в токе замыкания на несколько порядков уступает уровню составляющей основной гармоники. Например, уровень третьей гармоники тока ОЗЗ в турбогенераторе может составлять всего одну десятитысячную уровня основной гармоники [3]. Выделение таких слабых составляющих непосредственно из входного сигнала традиционными методами цифровой обработки сигналов практически невозможно, поскольку энергия этих составляющих оказывается ниже энергии шумов квантования аналого-цифрового преобразователя. Нужны принципиально новые методы обработки таких сигналов, способных распознать слабые составляющие сигнала на фоне остальных доминирующих слагаемых.

Изучению именно таких методов измерения слабых гармонических составляющих сигнала на фоне преобладающих составляющих сигнала, в частности, составляющей основной гармоники тока замыкания, посвящена настоящая работа.

Тракт АЦП с аналоговым фильтром

Классическим подходом при выделении слабых гармоник является использование в измерительном тракте АЦП селективного аналогового фильтра [4], предназначенного для ослабления основной гармоники и усиления распознаваемых составляющих входного сигнала защиты – высших гармоник (рис. 1).

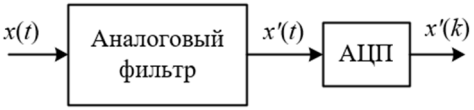


Рис. 1. Структурная схема тракта АЦП с аналоговым фильтром: $x(t)$ – входной сигнал, $x'(t)$ – преобразованный сигнал и $x'(k)$ – его цифровой образ

В рассматриваемой схеме аналоговый фильтр должен обеспечивать ослабление основной гармоники в сотни или даже тысячи раз, повышая вес высших гармоник в преобразованном сигнале $x'(t)$. Такие уникальные характеристики тракта АЦП достигаются путем выполнения аналогового фильтра в виде высокодобротного режекторного фильтра.

Однако исключительность характеристик тракта АЦП является и его главным недостатком, поскольку отклонение частоты режекции в силу чисто технических причин или отклонения частоты сети приводят к резкому и существенному снижению коэффициента подавления основной гармоники, ухудшая чувствительность и устойчивость функционирования защиты.

Тракт АЦП с активно-адаптивным распознаванием

Совсем недавно был разработан новый метод распознания слабых высших гармоник, свободный от недостатков классического подхода, – метод активно-адаптивного распознавания (рис. 2) [5, 6].

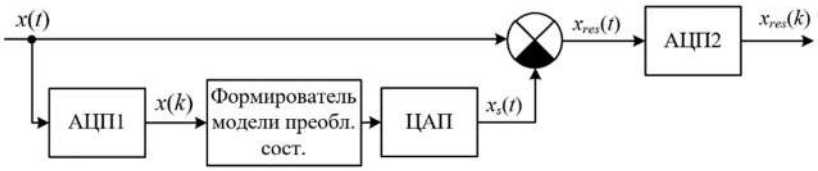


Рис. 2. Структурная схема тракта АЦП с активно-адаптивным распознаванием: $x(t)$ – входной сигнал и его цифровой образ $x(k)$, $x_s(t)$ – сигнал после ЦАП, $x_{res}(t)$ – остаточный сигнал, содержащий ослабленную основную гармонику и высшие гармоники, и его цифровой образ $x_{res}(k)$

Суть метода заключается в подавлении преобладающей основной гармоники во сигнале до его аналого-цифрового преобразования. Для этого входной сигнал преобразуется в цифровой сигнал при помощи АЦП1 (рис. 2). Методами цифровой обработки сигнала формируется цифровая модель составляющей основной гармоники во входном сигнале, и затем при помощи ЦАП формируется электрический сигнал основной гармоники, амплитуда и фаза которого совпадает с амплитудой и фазой основной гармоники во входном сигнале. Далее формируется сигнал высших гармоник путем вычитания сигнала основной гармоники из входного сигнала. Сигнал высших гармоник, свободный от основной гармоники, оцифровывается при помощи АЦП2. Диапазон измерений АЦП2 выбирается из расчета на максимальную амплитуду сигнала высших гармоник, которая существенно ниже амплитуды входного сигнала. Благодаря этому удается существенно снизить уровень шумов квантования при измерении высших гармоник.

В отличие от тракта измерения с аналоговым фильтром, новый тракт позволяет реализовать адаптивные частотные характеристики, подстраивая частоту заграждения под актуальную частоту сети.

Исследования показали, что коэффициент подавления основной гармоники реальной схемы активно-адаптивного распознавания составляет около 100 [5]. Дальнейшее повышение коэффициента подавления ограничено влиянием отклонения параметров элементов тракта АЦП и погрешностями цифровой обработки сигналов.

Повышение разрешающей способности

С целью повышения коэффициента подавления основной гармоники было предложено дополнить тракт активно-адаптивного распознавания специальным каналом, обеспечивающим подстройку схемы за счет контроля отношения сигнал/шум остаточного сигнала в условиях погрешности обработки цифрового входного сигнала.

Для подтверждения характеристик тракта был изготовлен и исследован опытный образец измерительного тракта АЦП с улучшенным активно-адаптивным распознаванием (рис. 3).

На рисунке 4 приведены результаты одного из испытаний тракта при распознавании сигнала третьей гармоники на фоне преобладающей основной гармоники. Отношение сигнал/шум при испытании составляло 10^{-3}. Как видно из рисунка 4, классический тракт активно-адаптивного распознавания обеспечивает подавление основной гармоники примерно в 100 раз (рис. 4, б). Добавление специального канала позволило компенсировать уход параметров схемы и обеспечить подавление основной гармоники более чем в 10^6 раз (кривая сигнала на рисунке 4,в практически не содержит основной гармоники).

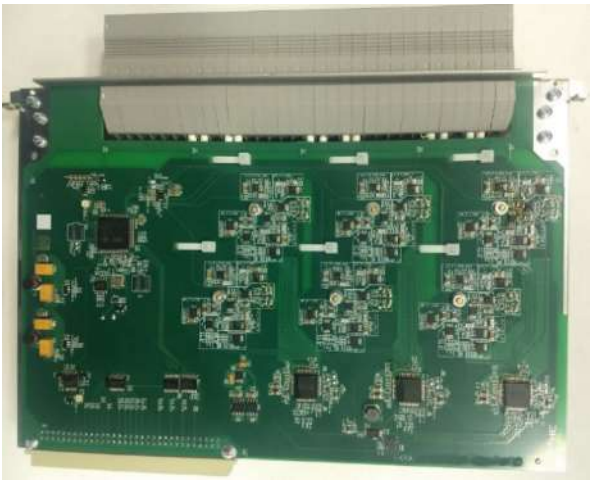


Рис. 3. Опытный образец датчика тока, реализующего улучшенный метод с активно-адаптивного распознавания высших гармоник

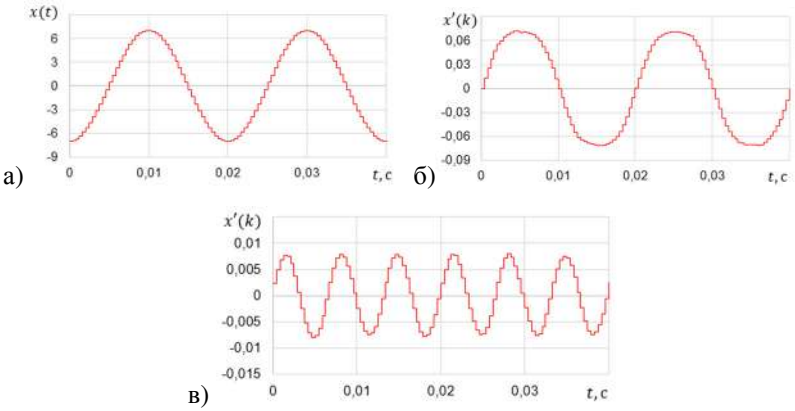


Рис. 4. Осциллограммы сигналов, полученные при испытании нового датчика тока: а) входной сигнал; б) сигнал высших гармоник после классического активно-адаптивного распознавания; в) сигнал высших гармоник после улучшенного активно-адаптивного распознавания. При испытании подводился ток $x(t) = 5\sqrt{2}\sin(2\pi 50t) + 0,005\sqrt{2}\sin(2\pi 150t)$

Заключение

1. В реальном устройстве, реализующем классический метод активно-адаптивного распознавания, коэффициент подавления основной гармоники ограничивается значением 100. Это не позволяет обеспечить точное измерение очень слабых слагаемых сигнала на фоне преобладающей основной гармоники тока ОЗЗ.

2. Предложена и исследована улучшенная схема активно-адаптивного распознавания со специальным каналом, обеспечивающим подстройку схемы за счет контроля отношения сигнал/шум остаточного сигнала, что позволяет повысить коэффициент подавления основной гармоники до нескольких миллионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кискачи В.М.* Использование гармоник э.д.с. генераторов энергоблоков при выполнении защиты от замыканий на землю/ В.М. Кискачи // Электричество. – 1974. – №2. – С. 24-29.

2. *Солдатов А.В.* Информационный базис защиты генератора от однофазных замыканий статора на землю с контролем высших

гармоник дифференциального тока/ А.В. Солдатов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – №3 (24). – С. 12-20.

3. *Кудряшова, М.Н.* Оценка уровня токов высших гармоник в турбогенераторах для целей релейной защиты. / М.Н. Кудряшова, М.О. Иванов, А.В. Солдатов, В.И. Антонов // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы IV Междунар. научн.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. – С. - 84.

4. *Антонов В.И., Наумов В.А., Солдатов А.В., Егоров Н.В.* Оценка гармоники электрической величины на фоне преобладающего гармонического спектра шума. // Электричество. 2014. №5. С.29-33.

5. *Антонов, В.И.* Распознавание слабых гармонических составляющих сигналов в защите генератора от однофазного замыкания на землю / В.И. Антонов [и др.] // Электрические станции. – 2018. – №1. – С.52-55.

6. *Антонов В.И., Наумов В.А., Солдатов А.В., Иванов Н.Г.* Способ выделения слагаемой электрической величины // Патент России № 2564536. 2015. Бюл. №28.

Авторы:

Иванов Михаил Олегович*, инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», магистрант ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Автоматика энергосистем». Окончил в 2020 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: ivanov_mo@ekra.ru.*

Кудряшова Мария Николаевна*, сведения об авторе приведены на стр. 25.*

Солдатов Александр Вячеславович*, заместитель директора департамента автоматизации энергосистем по научному сопровождению продукции ООО НПП «ЭКРА», старший преподаватель кафедры ЭИЭС имени А.А. Федорова ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Получил диплом инженера на электроэнергетическом факультете ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2006 г. E-mail: soldatov_av@ekra.ru.*

Иванов Николай Геннадьевич, *сведения об авторе приведены на стр. 25.*

Антонов Владислав Иванович*, сведения об авторе приведены на стр. 33.*

Наумов Владимир Александрович*, сведения об авторе приведены на стр. 34.*

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ АДАПТИВНЫЙ СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

Воробьев Е.С., Антонов В.И., Иванов Н.Г., Наумов В.А., Солдатов А.В., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары.

Аннотация. *В докладе рассматривается новый подход к адаптивному структурному анализу на основе многоканального адаптивного фильтра. Достоинства многоканальных структур заключаются в возможности различного шага внутримодельной децимации в фильтрах. Основные характеристики многоканального адаптивного структурного анализа рассмотрены на примере двухканального фильтра основной гармоники.*

Ключевые слова: *многоканальный адаптивный структурный анализ, канонический фильтр компонента, фильтр шума, интерактивная среда адаптивного структурного анализа.*

Введение

Существующая структурная неопределенность сигнала аварийного процесса, заключающаяся в неизвестности размерности модели и неопределенности вида слагаемых процесса, требует использования специальных методов и моделей распознавания сигналов, способных работать в условиях априорной неопределенности. На разрешающую способность структурной модели влияют частота дискретизации входного сигнала, конкуренция составляющих фильтра эффективного ядра, внутримодельная децимация отсчетов сигнала, децимация отсчетов невязки и порядок M первоначального фильтра [1]. С ростом порядка фильтра растет окно обработки сигнала, поэтому неоправданное увеличение порядка адаптивного фильтра является нежелательным [2]. В настоящем докладе рассматривается новый метод многоканального адаптивного структурного анализа, преодолевающие эти недостатки.

Многоканальная система

Наибольший интерес для структурного анализа представляет собой переходный режим работы электрической системы, так как сигнал переходного процесса включает в себя как множество слагаемых принужденного режима, так и множество слагаемых свободного движения электрической

системы. Нас интересует сумма гармоник и слагаемые свободного процесса

$$x(k) = \sum_{i=1}^{M_h} X_i \cos(\omega_i k T_s + \psi_i) + \sum_{j=1}^{M_d} e^{-\alpha_j} \cos(\omega_j k T_s + \psi_j),$$

где M_h и M_d – порядок гармонического сигнала и свободной составляющей соответственно. Ее модель представляется адаптивными каноническими фильтрами отдельных гармоник

$$x_{r,q}^{\sigma}(k) = \sum_{m=0}^{M_h} a_m x_{r,q-1}(k - m\nu) = (\mathbf{a}_q^{\sigma-1})^T \mathbf{x}_{r,q-1} = F_q\left\{\mathbf{x}_{r,q-1}\right\}, \qquad (1)$$

и фильтром шума

$$x_{r,n}^{\sigma}(k) = (\mathbf{a}_n^{\sigma-1})^T \mathbf{x}_{r,q-1} = F_n\left\{\mathbf{x}_{r,q-1}\right\}, \qquad (2)$$

где r – номер канала, q – номер фильтра, σ – номер этапа настройки.

Многоканальная система (рис. 1) представляет собой отдельные каналы настройки канонических фильтров (1) и фильтра шума (2). Таким образом, число каналов R будет равно числу канонических фильтров R–1 и фильтра шума.

Настройка многоканальной системы включает в себя этап инициализации каналов ($\sigma = 0$) и этапы настройки ($\sigma \geq 1$).

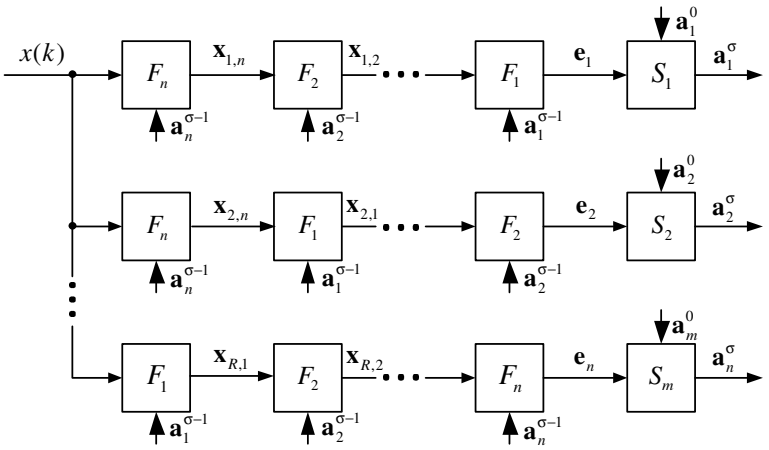


Рис. 1. Структура многоканальной системы

Инициализация каналов

В общем случае фильтр шума может инициализироваться произвольно [1]. Если известны характеристические параметры некоторых компонентов сигнала, то их целесообразно предусмотреть в фильтре шума F_n, инициализируя его как фильтр составляющих сигнала. Тогда фильтр шума может быть представлен как каскад нескольких фильтров (рис. 2) [3].

Аналогично инициализируются канонические фильтры искомых слагаемых (гармоник), имея ввиду предназначение каждого из них.

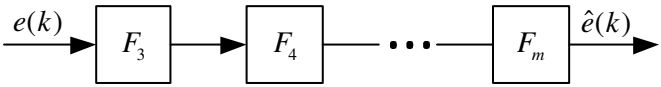


Рис. 2. Представление фильтра шума при известных характеристических параметрах компонентов шума (F_3 и F_4 – канонические фильтры известных компонентов)

Работа решателей

Решатели $S_1 \div S_R$ всегда находят оптимальные модели для своих входных сигналов $\mathbf{e}_r$, получаемых после преобразования входного сигнала предшествующими фильтрами, которые могут быть и неоптимальными.

В классическом случае принципы действия решателей S_r основаны на методе наименьших квадратов, и они определяют вектор коэффициентов своих фильтров (1) и (2), оптимизируя критерий

$$E_r(k) = \mathbf{e}_r^T \mathbf{e}_r \xrightarrow[\mathbf{a}_q^{\sigma-1}]{} \min.$$

На каждой итерации настройки σ входные сигналы решателей $\mathbf{e}_r$ формируются предшествующими каноническими фильтрами компонентов $\mathbf{a}_r^{\sigma-1}$ и фильтра шума $\mathbf{a}_n^{\sigma-1}$ предыдущего этапа $\sigma-1$. Ход настройки многоканального фильтра контролируется путем расчета разности норм векторов коэффициентов предыдущей и текущей итерации.

Возможности решателей обширны – предусмотрены методы

настройки структурной модели по: а) методу наименьших квадратов (Винеровская оценка), б) решению МНК с минимальной нормой, в) базовому решению общей задачи МНК, г) решению общей задачи МНК с минимальной нормой [1].

Такая организация фильтра позволяет решателю в каждом канале системы определять характеристические параметры искомых компонентов без решения общего характеристического уравнения всего фильтра.

Моделирование в среде MatLab Simulink

Для упрощения иллюстрации основ многоканального метода рассмотрим настройку двухканального фильтра, состоящего из канала настройки основной гармоники и канала настройки фильтра шума.

Настройка многоканального фильтра выполнялась в интерактивной среде MatLab Simulink. Окончание настройки определялось по факту, когда относительная разность норм векторов коэффициентов фильтров предыдущей и текущей итерации становилась менее 1%.

Результаты настройки многоканального фильтра верифицировались работой классического адаптивного фильтра с использованием интерактивной среды адаптивного структурного анализа [1]. Использовался общий метод наименьших квадратов (TLSM – Total Least Square Method). Необходимые параметры интерактивной среды описаны в [2].

Граничным отрезком, необходимым для распознавания основной гармоники и представления третьей гармоники в фильтре шума классическим и многоканальным фильтрами, является отрезок длиной 29 отсчетов. При этом для настройки многоканального фильтра потребовалось 5 этапов настройки $(\sigma = 5)$. Результаты моделирования приведены в таблице 1, а характеристики фильтров – на рисунках 3, 4.

Коэффициенты фильтра основной гармоники классического адаптивного фильтра и многоканального фильтра практически идентичны, поэтому их АЧХ совпадают (рис. 3).

Таблица 1

Результаты моделирования

Номер коэф-та	Классический фильтр		Многоканальный фильтр	
	Фильтр гармоники	Фильтр шума	Фильтр гармоники	Фильтр шума
1	1	1	1	1
2	–1,9310	1,3020	–1,9305	2,2679
3	1	1,1670	0,9990	1,4712
4		0,8947		1,5100
5		0,6413		1,5021
6		0,4616		0,7252
7		0,2535		0,3954
8		–0,07219		0,0194
9		–0,4856		–0,8027
10		–0,8467		–0,9128
11		–0,9879		–1,2987
12		–0,8113		–1,6338
13		–0,3882		–0,8731

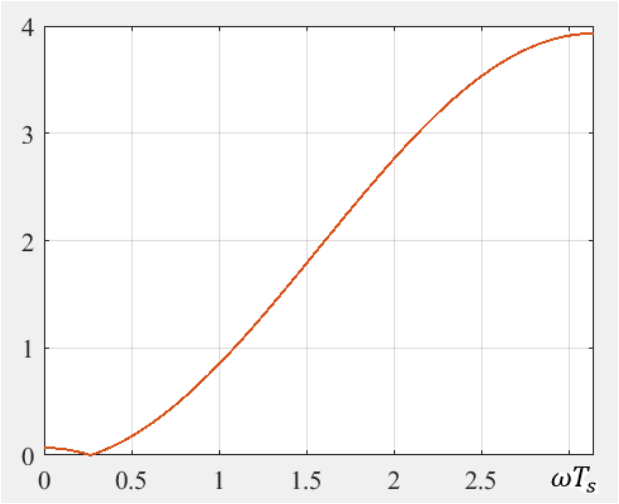


Рис. 3. АЧХ фильтра основной гармоники

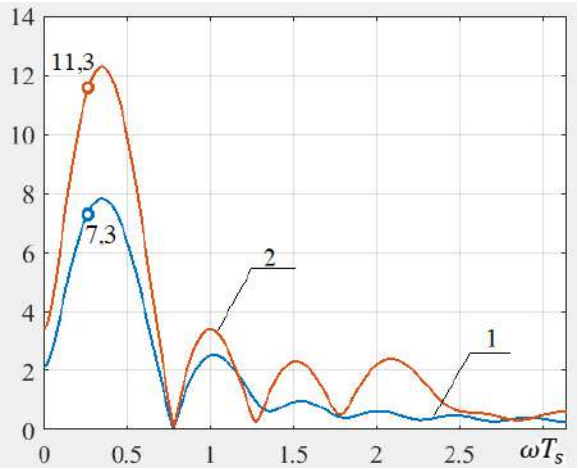


Рис. 4. АЧХ фильтра шума: 1 – классический адаптивный фильтр, 2 – многоканальный фильтр

Использование многоканального фильтра усилило потенциал фильтра шума (рис. 4, коэффициенты усиления классического и многоканального фильтра равны 7,3 и 11,3 соответственно), создавая тем самым лучшие условия для распознавания основной гармоники.

Присутствующие в сигнале апериодическая составляющая и третья гармоника ожидаемо оказались в составе фильтра шума.

Выводы

Важнейшим из преимуществ многоканального фильтра перед классическими адаптивными фильтрами является лучшая способность распознавания сигнала на одинаковом отрезке времени, поскольку фильтр шума больше усиливает основную гармонику.

Структура многоканального фильтра позволяет определять характеристические параметры искомых компонентов без решения общего характеристического уравнения всего фильтра, избегая процедуры определения корней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антонов В.И.* Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике // Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018.

2. *Воробьев Е.С.* Принципы управления размерностью структурных моделей электрических сигналов интеллектуальной энергетики/ Е.С. Воробьев и др. // Релейная защита и автоматизация. – 2021. –№1. –С. 20-27.

3. *Антонов В.И., Наумов В.А., Солдатов А.В., Иванов Н.Г.* Фундаментальные свойства эффективных структурных моделей тока короткого замыкания электрической сети // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. трудов НПП «ЭКРА». Выпуск 3. – Чебоксары: РИЦ «СРЗАУ». – 2014. – С.18–29.

Авторы:

Воробьев Евгений Сергеевич, *сведения об авторе приведены на стр. 107.*

Антонов Владислав Иванович, *сведения об авторе приведены на стр. 33.*

Иванов Николай Геннадьевич, *сведения об авторе приведены на стр. 25.*

Наумов Владимир Александрович, *сведения об авторе приведены на стр. 34.*

Солдатов Александр Вячеславович*, сведения об авторе приведены на стр. 113.*

ТЕХНОЛОГИИ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В СИСТЕМАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

ПОИСК ИСТОЧНИКОВ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Родионов А.В., ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Архангельск, Россия. E-mail: a.rodionov@ens.ru.

Бутин К.П., ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия. E-mail: k.butin@ens.ru.

Данилов М.А., ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия. E-mail: m.danilov@ens.ru.

Попов А.И., ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия. E-mail: a.popov@ens.ru.

Аннотация: *В докладе рассматривается опыт применения energy-based методов для определения источника низкочастотных колебаний на примере исследования ряда реальных случаев колебаний в энергосистеме России. Описывается оригинальный подход к организации вычислений, позволяющий варьировать алгоритмы и их параметры на этапах обработки данных, не меняя общую схему метода. Приводится описание программной реализации данного подхода, рассматриваются практические вопросы повышения производительности вычислений.*

Ключевые слова: *синхронизированные векторные измерения, низкочастотные колебания, энергия колебаний, анализ данных.*

Введение

Широкое внедрение технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ) предоставляет большой объем данных для решения ряда масштабных задач анализа функционирования энергосистем. Одним из современных приложений компьютерной обработки данных СВИ является анализ колебательной устойчивости энергосистем [1].

Системными операторами в настоящее время востребовано эффективное решение задачи выявления источника вынужденных низкочастотных колебаний (НЧК) [2], неконтролируемое развитие которых в целом снижает эффективность функционирования энергосистемы, а иногда приводит к опасным последствиям [3].

Цель данной работы – исследование методов выявления источника вынужденных НЧК на ряде реальных случаев в энергосистеме России, а также развитие соответствующих вычислительно-программных средств.

Материалы и методы

В период с 2019 по 2021 год Системный оператор Единой энергетической системы (СО ЕЭС) предоставил данные по 9 реальным случаям низкочастотных колебаний, произошедших на различных участках энергосистемы России. Анализ производился по измерениям с устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ), установленных на линиях высокого и сверхвысокого классов напряжения. По предоставленным данным было выявлено, что в рассматриваемых событиях в колебания были вовлечены от десяти до ста линий. Во всех случаях моды лежали в частоте от 0.1 до 0.7 Гц. Максимальная амплитуда мощности моды от 12 до 55 МВт. Продолжительность колебаний от 30 секунд до 10 минут.

К наиболее развитым методам выявления источника НЧК относятся методы, основанные на оценке энергии колебаний [4, 5, 6, 7]. В данной работе использован метод диссипации энергии (DEF, dissipation energy flow) [6]. Исходными данными для метода DEF для является активная и реактивная мощности, а также вектор напряжения.

Результаты

Во всех случаях метод DEF показал достоверный результат, совпадающий с результатами других методов, а также с выводами специалистов СО ЕЭС.

Рассмотрим подробно случай, произошедший в 2020 году в энергосистеме России. По предоставленному архиву измерений

были исследованы данные активной и реактивной мощности и векторы напряжения с 47 линий. Произведен расчет амплитудного спектра мощности (см. рисунок 1.а). Прерывистыми линиями показан спектр мощности по каждому источнику данных. Жирной линией – среднее значение по всем источникам. Обнаружена мода в районе 0.25 Гц. На рисунке 1.б показан расчет поиска источника методом диссипации энергии. На верхнем графике показаны моды активной мощности. Максимальная амплитуда колебаний порядка 40 МВт. На среднем графике – значения диссипации энергии на небольших участках, охватывающих более 5 периодов колебаний. На нижнем – угол наклона касательной к интегралу DEF.

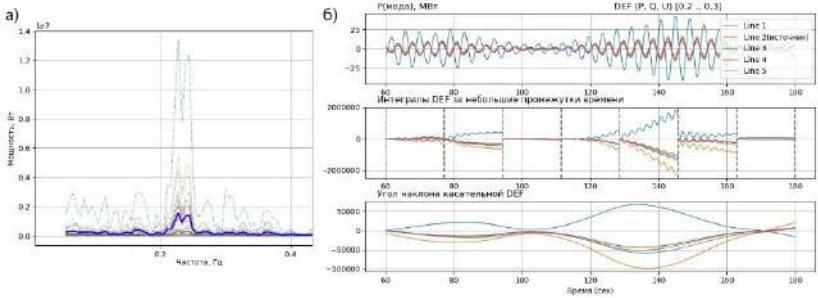


Рис. 1. Реальный случай НЧК

Источнику соответствует сигнал, для которого угол наклона касательной максимален. Используется значение по модулю, так как режим работы сети и направление транзита энергии в точках подключения УСВИ за исследуемый период неизвестны.

Данный случай интересен тем, что источником колебаний не является линия с максимальным значением амплитуды колебаний активной мощности. Еще можно предположить, что источник мог находиться за пределами наблюдаемой части сети, так как географически линия-источник находится на границе двух стран. Исследование подтверждено методом оценки формы моды, а также выводами специалистов СО ЕЭС.

Реализация алгоритма вычислений методом диссипации энергии предполагает вариативность подхода, например, применение различных фильтров, а также порядка применения

отдельных процедур. Будем называть планом обобщенную схему вычислений. В узлах данной схемы будут находиться работы – вычислительные процедуры. Используя функциональную парадигму, обозначим план потоков работ как ориентированный граф, где вершинами являются работы, содержащие в себе вычислительный процесс, а ребрами – каналы передачи данных между ними. Для создания подобных планов был разработан фреймворк на языке Go. Средства языка позволяют удобным образом организовать как параллельное выполнение потоков работ, так и их синхронизацию. Такой подход позволяет распараллеливать большое количество вычислений без высоких накладных расходов, эффективно использовать ядра, а также масштабировать задачу. Производительность операций особенно важна для вычислений в реальном времени.

Заключение

В докладе представлен опыт применения метода диссипации энергии для анализа нескольких реальных случаев низкочастотных колебаний в энергосистеме России. Подтверждается высокая способность метода к выявлению источника колебаний или его направления. При этом собственно применение метода рассматривается в качестве одного из многих этапов обработки измерительных сигналов и в контексте обобщенной схемы вычислений. С позиций распараллеливания расчетов рассматриваются некоторые особенности разрабатываемой авторами программно-вычислительной платформы для онлайн обработки данных синхронизированных векторных измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Kundur P. et al.* Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions //IEEE transactions on Power Systems. – 2004. – V. 19. – №. 3. – P. 1387-1401.

2. *Wang B., Sun K.* Location methods of oscillation sources in power systems: a survey //Journal of modern power systems and clean energy. – 2017. – V. 5. – №. 2. – P. 151-159.

3. *Maslennikov S., Litvinov E.* Online oscillations management at

ISO New England //Power System Grid Operation Using Synchrophasor Technology. – Springer, Cham, 2019. – P. 257-283.

4. *Hu W. et al.* Disturbance source location of forced power oscillation in regional power grid //2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference. – IEEE, 2011. – V. 2. – P. 363-366.

5. *L. Chen, Y. Min, W. Hu*, "An energy-based method for location of power system oscillation source," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 828-836, May 2013.

6. *Maslennikov S., Wang B., Litvinov E.* Dissipating energy flow method for locating the source of sustained oscillations //International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2017. – V. 88. – P. 55-62.

7. *Guo S. et al.* An Alternative Way to Locate Disturbance Source for Low Frequency Oscillation Considering Control Devices of Generator //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – V. 740. – №. 1. – P. 012099.

Авторы:

Родионов Андрей Вячеславович*, начальник отдела аналитики и обработки данных ООО «Инженерный центр «Энергосервис». Окончил математический факультет САФУ (ПГУ). e-mail: a.rodionov@ens.ru.*

Бутин Кирилл Павлович*, инженер программист отдела аналитики и обработки данных ООО «Инженерный центр «Энергосервис», кафедра математики и информатики Северного (Арктического) федерального университета, аспирант. E-mail: k.butin@ens.ru*

Данилов Максим Алексеевич*, инженер программист отдела разработки программного обеспечения ООО «Инженерный центр «Энергосервис». Магистрант Северного (Арктического) федерального университета. E-mail: m.danilov@ens.ru.*

Попов Александр Игоревич, *инженер программист отдела аналитики и обработки данных ООО «Инженерный центр «Энергосервис», доцент кафедры прикладной информатики и информационной безопасности Северного (Арктического) федерального университета, к.т.н. E-mail: a.popov@ens.ru.*

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВИ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, ЗАЩИТЫ И МОНИТОРИНГА

Пискунов С.А., ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Архангельск, Россия. E-mail: s.piskunov@ens.ru.

Хромцов Е.И., Северный (Арктический) федеральный университет, ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Архангельск, Россия. E-mail: e.khromtsov@ens.ru.

Мокеев А.В., Северный (Арктический) федеральный университет, ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Архангельск, Россия. E-mail: a.mokeev@narfu.ru.

Аннотация: *В докладе рассматриваются вопросы применения СВИ для совершенствования систем управления, защиты и мониторинга распределительных сетей 6-20 кВ. Приведены преимущества СВИ для создания системы определения поврежденной кабельной линии при ОЗЗ, системы мониторинга состояния понижающего трансформатора, распределенных систем релейной защиты понижающих трансформаторов, сборных шин подстанций, воздушных и кабельных линий распределительных сетей.*

Ключевые слова: *синхронизированные векторные измерения (СВИ), однофазное замыкание на землю (ОЗЗ), мониторинг состояния трансформатора.*

Введение

Синхронизированные векторные измерения (СВИ) могут быть использованы в электроэнергетике для решения различных задач: мониторинга переходных процессов, идентификации аварийных ситуаций и технологических нарушений, анализа возмущений энергосистемы, выявления низкочастотных колебаний, мониторинга состояния оборудования подстанций [1], а также для создания эффективных, надежных и быстродействующих устройств релейной защиты [2].

В работе рассматриваются вопросы применения СВИ для создания системы определения поврежденного участка кабельной распределительной сети 6-20 кВ при однофазном замыкании на землю, мониторинга состояния силового трансформатора, в устройствах РЗА сборных шин подстанций, понижающих трансформаторов. Авторами статьи представлены

результаты исследований в указанных направлениях, приведены примеры их реализации.

Определение поврежденного участка кабельной сети при ОЗЗ

Российские распределительные кабельные сети 6-20 кВ в большинстве случаев работают в режиме с изолированной или компенсированной нейтралью. При этом поиск места повреждения при ОЗЗ часто занимает значительное время.

В сетях с компенсированной нейтралью ток ОЗЗ может составлять всего несколько процентов от максимального тока нулевой последовательности (НП) в сети, что осложняет поиск поврежденной кабельной линии. Авторами работы предлагается использовать измерение синхровекторов тока НП по участкам сети (кабельным линиям) и напряжений НП на шинах источника питания (ПС/РП), чтобы осуществлять определение поврежденной кабельной линии при ОЗЗ [1].

Для работы системы формируются участки кабельной сети (кабельная линия или группа кабельных линий), на концах каждого участка устанавливаются устройства измерения синхровекторов тока НП. Определение поврежденного участка осуществляется в общем случае по максимальному значению угловой характеристики, рассчитываемой по формуле:

$$\psi_{\Delta n} = \Delta\varphi_n \frac{I_{0nmax}}{I_{0b}}, \qquad (1)$$

где $\psi_{\Delta n}$ – угловая характеристика *n*-го участка сети; I_{0nmax} – максимальный модуль синхровектора тока НП на *n*-м участке; $\Delta\varphi_n$ – фазовый сдвиг синхровекторов тока НП на *n*-м участке; I_{0b} – базовое значение тока НП.

Величина $\psi_{\Delta n}$ позволяет определить поврежденный участок сети даже при полной компенсации емкостного тока.

Предложенный алгоритм позволяет определять поврежденный участок только по синхровекторам тока НП, измеряемым на ТП. Измерение синхровекторов напряжения НП требуется только на шинах источника питания (РП/ПС).

Для работы системы необходимо, чтобы емкостный ток

участков не превышал 50% суммарного емкостного тока сети и 90% емкостного тока присоединений источника питания. Для устранения указанных ограничений разработаны дополнительные критерии распознавания ОЗЗ [3].

Система определения поврежденного участка кабельной сети при ОЗЗ реализована в рамках программно-аппаратного комплекса «Цифровой РЭС», разработанного специалистами ООО «Инженерный центр «Энергосервис». Основные компоненты комплекса: устройства ЭНЛЗ для измерения синхровекторов тока и напряжения нулевой последовательности, устройство для сбора и передачи данных ЭНКМ-3 со встроенным GPS/ГЛОНАСС-приёмником, программное обеспечение «ES-Граф» [1]. ПТК «Цифровой РЭС» используется в качестве пилотного проекта в Архангельских электрических сетях, а также находится в опытной эксплуатации на нескольких ТП и РП МУП «Электросеть» г. Череповец.

Мониторинг состояния трансформатора

Система мониторинга состояния силового трансформатора реализована с помощью измерения синхровекторов фазных токов и напряжений на выводах его обмоток [1]. Система позволяет рассчитывать параметры Г-образной схемы замещения трансформатора, оценивать его перегрузочную способность, производить вычисления остаточного ресурса витковой изоляции. В состав системы интегрированы другие подсистемы мониторинга подстанции: телемеханики, энергомониторинга, мониторинга качества электроэнергии.

Применение СВИ в устройствах РЗА

Применение СВИ совместно с технологиями цифровой подстанции позволит создать эффективные устройства релейной защиты. В работе [2] авторами предложены алгоритмы дифференциальной защиты на базе СВИ для понижающих трансформаторов, сборных шин подстанций, воздушных и кабельных линий распределительных сетей. Рассмотрены новые принципы обеспечения селективности дифференциальной защиты трансформатора при броске намагничивающего тока (БНТ) и внешних коротких замыканиях.

Заключение

Технология СВИ обладает значительными возможностями для совершенствования систем управления, защиты и мониторинга электрических сетей и подстанций. Рассмотренные в докладе примеры подтверждают эффективность использования СВИ для совершенствования систем управления, защиты и мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Popov A.I., Mokeev A.V., Piskunov S.A., Rodionov A.V.* Applications of synchrophasor measurement to improve the reliability and efficiency of power systems // E3S Web of Conf., Volume 216, 01045, 2020.

2. *Mokeev A.V., Piskunov S.A., Ulyanov D.N., Khromtsov E.I.* Improving the efficiency and reliability of RPA systems of digital step-down substations and digital grids // E3S Web of Conf., Volume 216, 01044, 2020.

3. *Piskunov S.A., Mokeev A.V., Khromtsov E.I.* Application of synchronized phasor measurements in RPA devices of distribution networks // SUSE-2021 (в процессе публикации).

Авторы:

Пискунов Сергей Александрович*, инженер группы комплексного проектирования ООО «Инженерный центр «Энергосервис». В 2016 году получил диплом инженера-электрика в САФУ, e-mail: s.piskunov@ens.ru.*

Хромцов Евгений Иосифович*, аспирант кафедры электроэнергетики и электротехники Северного (Арктического) федерального университета, программист отдела разработки микропроцессорных устройств ООО «Инженерный центр «Энергосервис». В 2014 году получил диплом инженера –электрика в САФУ, e-mail: e.khromtsov@ens.ru.*

Мокеев Алексей Владимирович*, Северный (Арктический) федеральный университет, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника». ООО «Инженерный центр «Энергосервис», заместитель генерального директора. Получил диплом инженера-электрика в 1981 году, Ленинградский политехнический институт (ныне СПбГПУ), электромеханический факультет. В 2011 году защитил докторскую диссертацию «Методы и алгоритмы обработки сигналов в интеллектуальных электронных устройствах энергосистем различного функционального назначения» в СПбГПУ, e-mail: a.mokeev@narfu.ru.*

ПРИМЕНЕНИЕ ПТК «ЦИФРОВОЙ РЭС» В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6-10 кВ

Горячевский И.А., ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Архангельск, Россия. E-mail: i.goryachevsky@ens.ru.

Петров К.В., ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Архангельск, Россия. E-mail: k.petrov@ens.ru.

Андреев П.И., ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Архангельск, Россия. E-mail: p.andreev@ens.ru.

Ульянов Д.Н., ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Архангельск, Россия. E-mail: d.ulyanov@ens.ru.

Аннотация: *В докладе приведён анализ возможностей и состав оборудования ПТК «Цифровой РЭС», который предназначен для повышения уровня автоматизации распределительных кабельных сетей 6-10 кВ. Описаны результаты ОПЭ ПТК «Цифровой РЭС» на действующих объектах.*

Ключевые слова: *программно-технический комплекс, автоматизация, ОЗЗ, опытно-промышленная эксплуатация (ОПЭ).*

Введение

В составе района электрических сетей (РЭС) значительную долю составляют распределительные кабельные сети, которые имеют низкий уровень автоматизации. Применение программно-технического комплекса (ПТК) «Цифровой РЭС» позволит повысить автоматизацию распределительной сети и обеспечить положительную динамику в достижении ключевых целевых показателей электросетевой компании: снижение операционных затрат, коммерческих и технических потерь, времени восстановления электроснабжения после аварий, повышение наблюдаемости и управляемости сети.

В докладе приведён анализ возможностей и результат опытно-промышленной эксплуатации ПТК на действующих объектах.

Анализ возможностей ПТК «Цифровой РЭС»

Модернизация оборудования распределительных пунктов (РП) и трансформаторных подстанций (ТП) РЭС путём внедрения ПТК «Цифровой РЭС» позволит использовать

следующие возможности комплекса [1]:

– определение повреждения на кабельных линиях (КЛ) 6-10 кВ (вид аварии, участок фидера) на основе синхронизированных векторных измерений (СВИ) для сокращения времени вывода в ремонт аварийных участков фидеров;

– автоматизация учёта электроэнергии (ЭЭ) на фидерах 6-10 кВ РП и вводах 0,4 кВ ТП для контроля распределения ЭЭ, выявления районов завышенных потерь ЭЭ;

– измерение параметров электрической сети, в том числе параметров качества электроэнергии (ПКЭ), с передачей информации на сервер сбора данных SCADA (ОИК) для определения текущего режима электрической сети, повышения наблюдаемости, оперативного выявления фактов некачественной ЭЭ и поиска источника её ухудшения;

– использование в качестве каналов передачи данных GSM сети с возможностью резервирования и защиты информации;

– применение типовых решений без вмешательства в первичную схему при монтаже оборудования.

ПТК «Цифровой РЭС» состоит из трех подсистем: подсистема фиксации КЗ и ОЗЗ на кабельных линиях 6-10 кВ на основе СВИ; подсистема энергомониторинга сети 6-10 кВ и 0,4 кВ (контроль состояния коммутационных аппаратов, учёт ЭЭ и регистрация ПКЭ); подсистема сбора и передачи данных [2].

Рис. 1. Оборудование комплекса

Перечень основного оборудования ПТК «Цифровой РЭС» (рис. 1): устройство локализации замыканий ЭНЛЗ; устройства ESM-ET, ЭНКМ-3, ЭНМВ-1; трансформатор VMT; маломощные

ТТ нулевой последовательности LPCT (ТТНП); индикатор тока КЗ (ИТКЗ); измерительный датчик тока (ИДТ); лазерные датчики положения; ПО «ES-Граф».

Результаты опытно-промышленной эксплуатации

В качестве первого полигона для тестирования ПТК «Цифровой РЭС» выступил участок Архангельских городских распределительных сетей с компенсированной нейтралью. Оборудование смонтировано на РП-7 и ТП-154.

Для фиксации тока КЗ используются ИТКЗ, установленные на фазы А и С. Для измерения амплитуды и фазы тока $3I_0$ применяются ТТНП LPCT. ИТКЗ (по оптоводу) и LPCT (по меди) подключаются в ЭНЛЗ. Для подсистемы энергомониторинга в каждую фазу устанавливаются ИДТ, которые выдают низкоуровневый сигнал тока для устройства ESM-ET. Также в ESM-ET заводятся фазные напряжения.

ЭНЛЗ может получать данные с двух соседних присоединений, поэтому на каждый объект потребовалось по 2 устройства. Также дополнительно контролируется состояние коммутационных аппаратов с помощью модуля ЭНМВ. На РП-7 и ТП-154 были установлены приборы ЭНКМ-3, которые собирают, синхронизируют и передают данные с полевого на верхний уровень через GSM сеть. ПО «ES-Граф» собирает данные и выводит результаты анализа в Web-интерфейс или в SCADA систему «ОИК Диспетчер».

За временной интервал ОПЭ все события передавались и фиксировались в журнале SCADA системы. За год эксплуатации «ES-Граф» зафиксировал два КЗ и пятнадцать ОЗЗ.

Вторым полигоном для ОПЭ стало МУП «Электросеть» в г. Череповец. На данном объекте оборудование было установлено на одном РП и семи ТП.

За год использования зафиксировано шесть КЗ, одиннадцать ОЗЗ за спиной системы и девять ОЗЗ внутри системы с локализацией до поврежденного участка сети.

Для подтверждения эффективности подсистемы определения повреждения на кабельных линиях в рамках ОПЭ было дополнительно проведено натурное испытание комплекса: из действующей сети выделили участок с низкоомным

заземлением нейтрали и устроили на нём искусственное ОЗЗ в заранее неизвестном месте. ПТК успешно выявил место замыкания на землю в соответствии с предъявляемыми к нему требованиями. Во время испытаний также была установлена необходимость в резервном источнике питания для полевых устройств локализации повреждений.

Заключение

Таким образом ОПЭ продемонстрировала высокий потенциал использования функционала ПТК «Цифровой РЭС» для повышения уровня автоматизации распределительных кабельных сетей 6-10 кВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бовыкин В.Н., Мокеев А.В., Ульянов Д.Н.* Автоматизация подстанций и распределительных сетей // Автоматизация и IT в энергетике. – 2019. – № 10. – С. 30-38.

2. *Мокеев А.В., Пискунов С.А., Ульянов Д.Н., Хромцов Е.И.* Повышение эффективности и надежности систем управления, релейной защиты и автоматики цифровых понизительных подстанций и цифровых РЭС // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 71.

Авторы:

Горячевский Иван Александрович*, ООО «Инженерный центр «Энергосервис», начальник лаборатории, 2016 г., Электроэнергетика и электротехника САФУ, i.goryachevsky@ens.ru.*

Петров Кирилл Витальевич*, ООО «Инженерный центр «Энергосервис», инженер ГМиНР, 2017 г., Электроэнергетика и электротехника САФУ, k.petrov@ens.ru.*

Андреев Павел Игоревич*, ООО «Инженерный центр «Энергосервис», инженер-программист, 2017 г., Механотроника и робототехника САФУ, p.andreev@ens.ru.*

Ульянов Дмитрий Николаевич*, ООО «Инженерный центр «Энергосервис», заместитель генерального директора, 1998 г., Электроснабжение АГТУ, d.ulyanov@ens.ru.*

МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

ОСНОВЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДИСКРИМИНАТОРА РЕЖИМОВ ЗЕМЛЯНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Степанова Д.А., ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail: Stepanova_DA@ekra.ru.

Антонов В.И., ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail: Antonov_VI@ekra.ru.

Наумов В.А., ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия. E-mail: Naumov_VA@ekra.ru.

Аннотация: *Излагаются основы применения методов машинного обучения в интеллектуальном дискриминаторе режимов земляных коротких замыканий в электрической системе. Идея дискриминатора заключается в локализации признаков особой фазы в спрямляющем пространстве различных параметров токов симметричных составляющих. В режимах земляных коротких замыканий используется трехмерное признаковое пространство.*

Ключевые слова: *классификация режимов электрической системы, обучение релейной защиты, машинное обучение, метод опорных векторов.*

Введение

В релейной защите различают отслеживаемые и альтернативные режимы [1]. Первые из них представляют собой режимы, в которых обеспечивается срабатывание, а вторые – режимы, в которых срабатывание категорически запрещено. В классической теории селективность релейной защиты обеспечивается путем надлежащего выбора характеристик срабатывания. Можно считать, что защита проходит своего рода обучение, благодаря чему она приобретает способность к разграничению отслеживаемых и альтернативных режимов. С этой точки зрения использование современных методов глубокого обучения в современных устройствах релейной защиты выглядит вполне обоснованным [1]–[4].

Традиционно, развитие теории классической релейной

защиты направлено на усовершенствование характеристик срабатывания. Магистральным направлением дальнейшего развития релейной защиты является обретение ею развитого интеллекта, основанного на использовании в ней методов машинного обучения. Новые принципы построения умных устройств релейной защиты [4] будут обладать уникальными характеристиками, благодаря присущему им свойству принимать решение в многомерном пространстве контролируемых параметров.

Настоящий доклад посвящен изложению основ построения умного устройства релейной защиты на примере интеллектуального дискриминатора режимов короткого замыкания в электрической системе.

Признаковые пространства интеллектуального дискриминатора

Задача распознавания повреждения предполагает анализ характеристических признаков интеллектуальными дискриминаторами всех трех фаз: особой фазы ξ (признаки отслеживаемых режимов), отстающей $\xi-1$ и опережающей $\xi+1$ фаз относительно нее (признаки альтернативных режимов). Распознавание предполагает отделение отслеживаемых режимов электропередачи от альтернативных.

Информационной базой интеллектуального дискриминатора режимов – так же, как и для традиционного дискриминатора [5] – являются замеры токов и напряжений в месте установки реле. Само же обучение интеллектуального дискриминатора осуществляется посредством имитационного моделирования электрической сети.

Алгоритм интеллектуального дискриминатора будет универсальным для любой особой фазы и не зависеть от класса напряжения сети. Эти свойства алгоритма достигаются путем представления замеров электрических величин в нормированном базисе и использования в качестве базисного вектора, относительно которого вычисляются фазные соотношения, вектора напряжения прямой последовательности фазы соответствующего интеллектуального дискриминатора.

Признаковые пространства обучающей выборки при однофазном и двухфазном коротких замыканиях на землю формально стереотипны, но приводят к разным их конфигурациям. Доступны два признаковых пространства.

Первое из них использует нормированный ток нулевой последовательности и нормированный угол тока обратной последовательности, отсчитываемый относительно базового вектора – напряжения прямой последовательности фазы дискриминатора. Каждая точка признакового пространства, согласованная с одним из режимов имитационной модели, определяется вектором координат признакового пространства

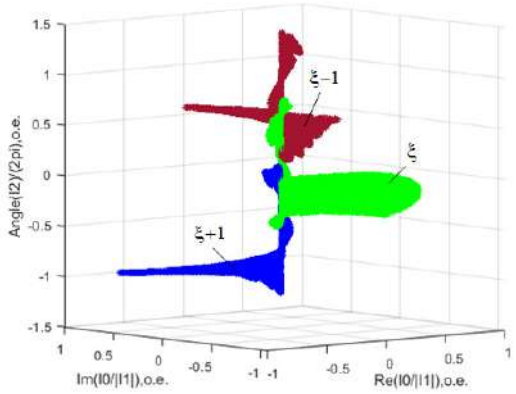
$$\mathbf{z}_{\nu} = \begin{bmatrix} \mathrm{Re}\left(\dfrac{I_{0,\nu}}{I_{1,\nu}} \angle\left(\varphi_{I_{0,\nu}} - \varphi_{U_{1,\nu}} \right) \right); \\ \mathrm{Im}\left(\dfrac{I_{0,\nu}}{I_{1,\nu}} \angle\left(\varphi_{I_{0,\nu}} - \varphi_{U_{1,\nu}} \right) \right); \\ \angle\left(\varphi_{I_{2,\nu}} - \varphi_{U_{1,\nu}} \right) / 2\pi; \end{bmatrix}. \qquad (1)$$

Второе признаковое пространство идентично по структуре первому и следует из него при замене соответствующих контролируемых величин на нормированный ток обратной последовательности и нормированный угол тока нулевой последовательности. Тогда вектор координат точки второго признакового пространства определяется следующим образом:

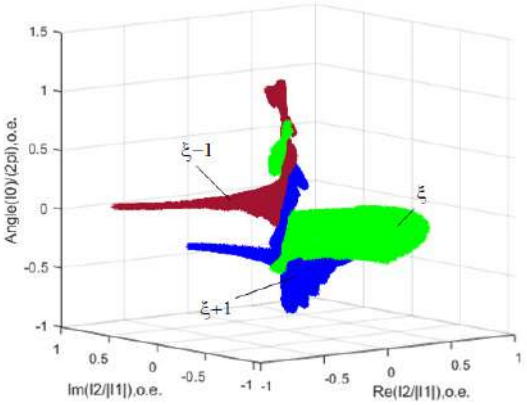
$$\mathbf{z}_{\nu} = \begin{bmatrix} \mathrm{Re}\left(\dfrac{I_{2,\nu}}{I_{1,\nu}} \angle\left(\varphi_{I_{2,\nu}} - \varphi_{U_{1,\nu}} \right) \right); \\ \mathrm{Im}\left(\dfrac{I_{2,\nu}}{I_{1,\nu}} \angle\left(\varphi_{I_{2,\nu}} - \varphi_{U_{1,\nu}} \right) \right); \\ \angle\left(\varphi_{I_{0,\nu}} - \varphi_{U_{1,\nu}} \right) / 2\pi; \end{bmatrix}. \qquad (2)$$

Здесь ν – обозначение фазы дискриминатора; $I_{1,\nu}$ – ток прямой последовательности; $I_{2,\nu}$, $I_{0,\nu}$ и $\varphi_{2,\nu}$, $\varphi_{0,\nu}$ – модули и аргументы токов обратной и нулевой последовательностей; аргументы токов

обратной и нулевой последовательностей $\varphi_{2,v}$ и $\varphi_{0,v}$ отсчитываются относительно базового вектора $U_{1,v}$ с аргументом $\varphi_{U_{1,v}}$.



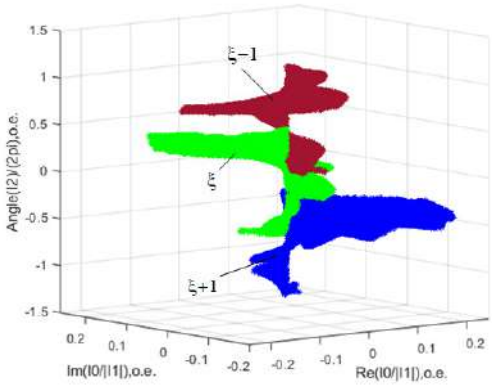
а)



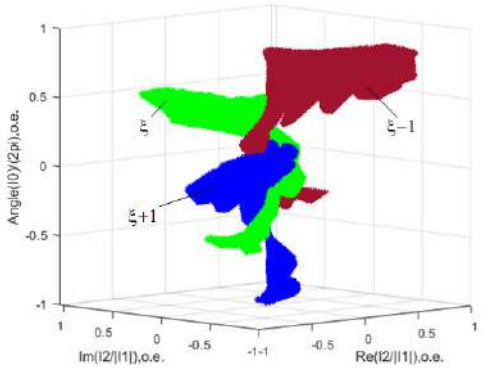
б)

Рис. 1. Признаковые пространства в режиме однофазного короткого замыкания в системе координат: а) вектора (1), б) вектора (2). Подпространства дискриминаторов особой, отстающей и опережающей фаз обозначены как ξ , $\xi-1$ и $\xi+1$ соответственно

Как видно из рис. 1 и 2, режимы однофазного и двухфазного коротких замыканий представляются в одних и тех же признаковых пространствах интеллектуального дискриминатора по-разному, причем можно заметить, что подпространства особой фазы зеркально отображаются относительно горизонтальной плоскости.



а)



б)

Рис. 2. Признаковые пространства в режиме двухфазного короткого замыкания на землю. Обозначения соответствуют обозначениям рис. 1

Обучение интеллектуального дискриминатора

В терминах машинного обучения задача отслеживания режимов интеллектуального дискриминатора произвольной фазы формулируется как создание нейронной сети, относящей каждый из векторов (1) или (2) признакового пространства к классу отслеживаемых или альтернативных режимов.

Основу обучения нейронной сети интеллектуального дискриминатора режимов составляют результаты имитационного моделирования нормальных и аварийных режимов защищаемой электрической сети. Обучающая выборка $\mathbf{X}$ представляет собой множество многомерных векторов, каждый из которых принадлежит к тому или иному классу и определяется вектором признаков $\mathbf{y}$. Вектор контролируемых параметров $\mathbf{x}_j = \mathbf{z}_{\mathrm{v}}(j)$, снабженный соответствующим признаком y_j носит название *прецедента* [2]. При $y_j = 1$ объект $\mathbf{x}_j$ будет отнесен к отслеживаемому режиму, при $y_j = -1$ – к альтернативному. Таким образом, обучение интеллектуального дискриминатора режимов короткого замыкания ведется на множестве прецедентов $(\mathbf{X};\mathbf{y})$ обучающей выборки

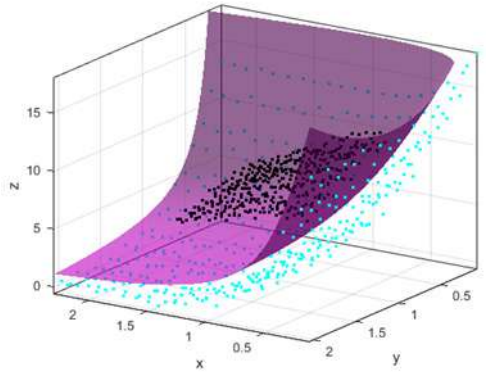
$$\mathbf{X} = \left\{\mathbf{x}_1,\ldots,\mathbf{x}_j,\ldots,\mathbf{x}_n\right\}, \mathbf{y} = \left\{y_1,\ldots,y_j,\ldots,y_n\right\}.$$

В качестве метода настройки нейронной сети мы используем метод опорных векторов, известный в англоязычной литературе как Support Vector Machine (SVM). Метод использует единые принципы для построения линейных и нелинейных классификаторов, формулируя задачу разграничения сложных несвязанных областей в традициях теоремы Каруша–Куна–Таккера [6].

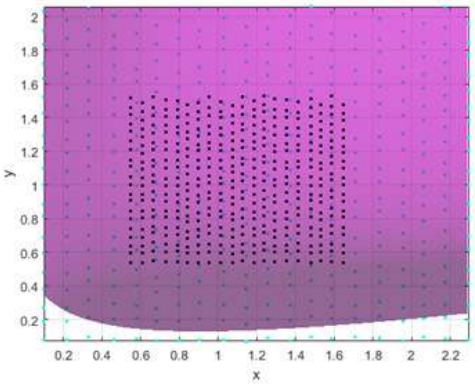
Идея метода заключается в построении оптимальной разделяющей гиперповерхности в многомерном пространстве контролируемых параметров, используя опорные векторы прецедентов обучающей выборки.

Возможности интеллектуального дискриминатора велики: методы его обучения придают ему способность устойчиво функционировать и в условиях пересечения областей отслеживаемого и альтернативного режимов в рамках

традиционной релейной защиты (рис. 3, б), использующей характеристики срабатывания на плоскости. Интеллектуальный дискриминатор, используя многомерное признаковое пространство, способен конструировать классификаторы со сложной конфигурацией разделяющих гиперповерхностей. Он легко разрешает проблему классической релейной защиты, предлагая свое изящное решение в многомерном пространстве контролируемых параметров (рис. 3, а).



а)



б)

Рис. 3. Разделяющая гиперповерхность в многомерном пространстве (а) с изяществом отделяет прецеденты отслеживаемых режимов (темные точки) от прецедентов альтернативных режимов (светлые точки), хотя разделение отслеживаемых режимов от альтернативных на плоскости (б) принципиально невозможно

Заключение

Интеллектуальный дискриминатор режимов, использующий многомерное признаковое пространство, формируемое еще на этапе обучения, обладает распознающей способностью отслеживаемых режимов, близкой к предельному. Универсальность и эффективность интеллектуальному дискриминатору режимов придает продуманная стратегия выбора размера и вида признакового пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лямец, Ю.Я.* Иерархия режимов электроэнергетических систем в методологии обучения релейной защиты / Ю.Я. Лямец, Д.В. Кержаев // Вестник Чувашского университета. – 2007. – №2. – С. 134-147.

2. *Степанова, Д.А.* Фундаментальные основы глубокого обучения в релейной защите / Д.А. Степанова, В.А. Наумов, В.И. Антонов. // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы 3-й Междун. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. Ун-та, 2019. – С. 594-601.

3. *Stepanova, D.A.* Deep learning in relay protection of digital power industry / D.A. Stepanova, V.A. Naumov, V.I. Antonov // Proceedings – 2019 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA), 2019. – P. 299–315. DOI: 10.1109/RPA47751.2019.8958378.

4. *Antonov, V.I.* Fundamental Principles of Smart Protection Device / Vladislav Antonov, Vladimir Naumov, Alexander Soldatov, Daria Stepanova // 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC) – P. 130–133. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281227.

5. *Фабрикант В.Л.* Дистанционная защита. – М.: Высш. шк., 1978.

6. *Hastie, T.* The Elements of Statistical Learning, 2nd edition / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman // Springer, 2009.

Авторы:

***Степанова Дарья Александровна**, сведения об авторе приведены на стр. 25.*

***Антонов Владислав Иванович**, сведения об авторе приведены на стр. 33.*

***Наумов Владимир Александрович**, сведения об авторе приведены на стр. 34.*

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ КЛАССИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ML В ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ ЭНЕРГЕТИКИ

Дементий Ю. А., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия, dementiy.yu.a@gmail.com.

Петряшин А. Е., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия, petryashin.a.e@mail.ru.

Петряшин И. Е., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия, petryashin.i.e@mail.ru.

Аннотация: *одной из важных задач в энергетике и, в частности, релейной защите является разграничение режимов работы энергообъекта. В данной работе проанализированы основные подходы к решению этой задачи с использованием классических алгоритмов машинного обучения. Произведено сравнение следующих алгоритмов: метода ближайших соседей (KNN), дерева принятия решений и логистической регрессии. Также проведен анализ ограничений их использования. Изучена проблема влияния данных на правильность классификации режимов для простых и сложных моделей. Дана оценка применимости алгоритмов машинного обучения в рассмотренной задаче и сформулированы основные положения для дальнейших исследований.*

Ключевые слова: *машинное обучение, поиск границы области, классификация режимов работы энергообъекта.*

Введение

В данной работе рассматриваются возможности и ограничения классических алгоритмов машинного обучения (ML) для решения задачи разграничения режимов работы энергообъекта. На примере задачи построения релейной защиты анализируется возможность выполнения требований максимизации чувствительности с сохранением селективности. В качестве разграничиваемых режимов выступают отслеживаемые и альтернативные режимы (α- и β-режимы) объекта. Задача, а также ограничения на ее решение формулируются в терминологии машинного обучения.

Планирование эксперимента

Рассматривается задача построения алгоритма релейной

защиты. Она решается на основе информации, накопленной в результате наблюдения за объектом (обучение по прецедентам) [1]. Под информацией понимаются точки наблюдаемого пространства, которые могут быть получены как с имитационной модели объекта (ИМО), так и с реального объекта.

В данном эксперименте источником информации является ИМО абстрактного объекта. Для наглядности выбрана ИМО, выходные величины которой принадлежат двухмерному наблюдаемому пространству с заранее известными границами областей отображаемых режимов. Внутри областей режимов точки располагаются случайным образом, что имитирует режимы работы реального объекта.

Алгоритм, построенный в результате решения поставленной задачи, должен соответствовать требованиям селективности и максимальной чувствительности, что эквивалентно одновременному выполнению условий (1) и (2)

$$recall_{\beta} = 1, \tag{1}$$

$$precision_{\alpha} \to \max . \tag{2}$$

На предмет соответствия этим условиям анализируются следующие алгоритмы классификации: метод k-ближайших соседей (KNN), дерево принятия решений (DTC) и линейные модели (LC).

Выполнение условий (1) – (2) достигается путем изменения гиперпараметров модели. В качестве гиперпараметров, отвечающих за сложность моделей, выступают: число соседей – для KNN, глубина дерева – для DTC и размерность спрямляющего пространства – для LC, кроме того, для каждого алгоритма производится подбор весов классов (показатель важности класса в задаче оптимизации функции ошибки классификатора) или порога (минимальный уровень, после которого точка относится к классу β-режимов).

Применение алгоритмов

Рассматривается случай, когда α- и β-режимы ограничены в наблюдаемом пространстве окружностями, которые пересекаются, причем каждый режим описывается 40 наблюдениями. Гиперпараметры алгоритмов подбираются таким

образом, чтобы разделяющая кривая строилась с учетом условий (1) – (2).

На рисунках 1–3 представлены разделяющие кривые, построенные в результате работы алгоритмов, а также истинные границы режимов. Белым и черным показаны точки α- и β-режимов соответственно.

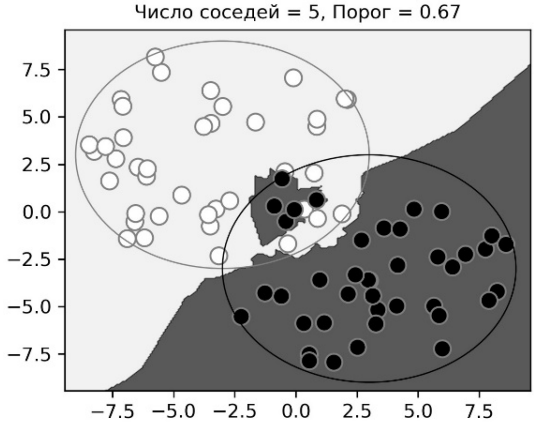


Рис.1. Разделяющая кривая, построенная алгоритмом KNN

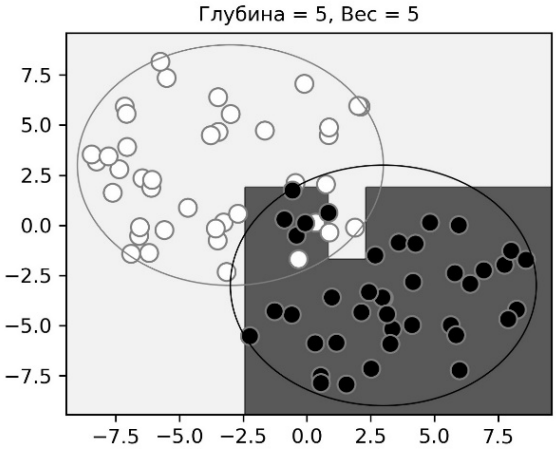


Рис.2. Разделяющая кривая, построенная алгоритмом DTC

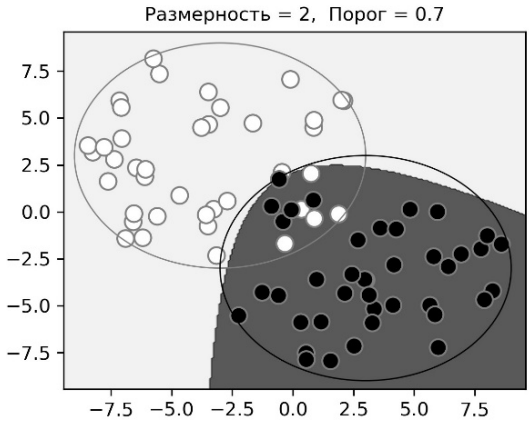


Рис.3. Разделяющая кривая, построенная LC

Для всех трех алгоритмов, несмотря на выполнение условия (1), характерно классифицирование части области β-режимов, как области α-режимов. Это объясняется нехваткой данных вблизи границы области β-режимов – классифицируется неправильно та ее часть, в которой недостаточно точек, описывающих ее. Такое явление приводит к неверной классификации части области β-режимов, поэтому для построения алгоритма, разграничивающая линия которого соответствует истинной, необходимо получение дополнительной информации об областях с недостаточной плотностью точек, а также о граничных режимах.

Для алгоритма KNN характерно классифицирование части области β-режимов, в которой недостаточна плотность точек, как области α-режимов. Поэтому для правильного построения разделяющей кривой данным алгоритмом необходимо, чтобы плотность точек β-режимов была постоянной и большей, чем у α-режимов.

Из недостатков алгоритма DTC следует отметить форму разделяющей кривой – она состоит из участков, параллельных координатным осям. Из-за этого восстановление гладкой границы классов является затруднительным.

Алгоритм LC способен строить нелинейные гладкие разделяющие кривые. Повышение сложности алгоритма LC позволяет аппроксимировать границу классов с большей точностью, тем не менее чрезмерное увеличение сложности при нехватке данных может привести к переобучению.

Таким образом, ни один из представленных алгоритмов не позволяет решить задачу с выполнением условий (1) – (2). Для их выполнения необходимо увеличение количества информации до бесконечности, либо применение метода, позволяющего синтезировать информативные прецеденты для обучения. При необходимости построения разделяющей кривой по имеющимся данным необходимо подбирать гиперпараметры моделей таким образом, чтобы обобщающая способность модели не утрачивалась в результате чрезмерного повышения ее сложности. Тем не менее, влияние случайности данных не позволяет в общем случае утверждать возможность построения алгоритма, соответствующего условиям (1) – (2).

Влияние сложности модели и случайности данных на границу режимов

С увеличением сложности моделей повышается их способность строить границы сложной формы, что при случайности данных может приводить к переобучению. Простые модели менее подвержены этому явлению, однако, они не всегда позволяют описывать границу достаточно точно. Поэтому в условиях недостатка данных необходимо соблюдение баланса между сложностью модели и ее способностью к обобщению данных (bias-variance tradeoff) [2].

Заключение

Главной проблемой, возникающей при обучении по прецедентам, полученным без учета их информативности, является невозможность построения классификатора, разделяющая линия которого соответствует истинной. Для приближения разделяющей границы к истинной необходимо увеличить число информативных данных, что при случайности их формирования оказывается труднодостижимым.

Простые модели менее чувствительны к недостатку

информативных данных, однако они не обладают достаточной точностью, сложные модели при нехватке данных, а также их случайном характере, переобучаются и показывают плохие результаты. При переходе из двумерного пространства к многомерному проблема будет усугубляться, так как задача станет подвержена «проклятью размерности», поэтому требуемое количество информативных данных будет увеличиваться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aurelien G.* Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow. 2019, 1150 с.

2. Bias-Variance-Covariance Decomposition. In: Sammut C., Webb G.I. (eds) Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7687-1_932

Авторы:

Дементий Юрий Анатольевич, *к.т.н., руководитель группы ООО «Релематика». Окончил электроэнергетический факультет Вологодского государственного университета в 2015 г. В 2018 защитил кандидатскую диссертацию на тему «Методы и средства компенсации полного тока однофазного замыкания на землю в распределительных сетях». E-mail: dementiy.yu.a@gmail.com.*

Петряшин Александр Евгеньевич*, ООО «Релематика»/ЧГУ им. И.Н. Ульянова, инженер-исследователь, окончил в 2020 г. факультет Энергетики и Электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: petryashin.a.e@mail.ru.*

Петряшин Илья Евгеньевич*, сведения об авторе приведены на стр. 17.*

НЕЙРОСЕТЕВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОБЪЕКТА

Дементий Ю. А., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия, dementiy.yu.a@gmail.com

Маслов А.Н., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия, maslov.a.n@list.ru

Николаев К. П., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия, nikolaev.kirill.p@mail.ru

Аннотация: *В работе показано решение задачи классификации режимов работы объекта с использованием нейросетевого алгоритма. Обсуждаются статистическая и геометрическая интерпретации алгоритмов. Показана зависимость качества работы от распределения прецедентов, на основании которых производится обучение, а также от структуры и параметров нейронной сети. Показаны пределы применимости подобных алгоритмов для задачи классификации режимов работы объекта в электроэнергетике и сформулированы рекомендации для практического их применения.*

Ключевые слова: *машинное обучение, нейронная сеть, классификация режимов работы объекта.*

Введение

Для всех широко применяемых алгоритмов релейной защиты существуют руководящие указания по расчёту уставок. Эти методики позволяют выбрать параметры срабатывания защит на основе информации о структуре и параметрах защищаемого объекта. Как правило, такие защиты не используют всю доступную информационную базу и соответственно не могут обеспечить максимально возможную чувствительность при гарантированной селективности. Возможным решением данной проблемы является использование нейросетевых алгоритмов.

Нейросетевая классификация режимов

Универсальным классификатором является простейшая нейронная сеть – персептрон, так как для него доказана теорема о сходимости, показывающая, что если классификация существует, то персептрон достаточной сложности способен её описать. По своей сути персептрон является простейшей нейронной сетью, но тем не менее представляет собой "чёрный ящик", что ограничивает его применение в технике и в то же время обуславливает необходимость подробного анализа ограничений этой применимости.

Нейронные сети способны классифицировать режимы работы энергообъекта, однако в данный момент неясно как выполнить обучение нейронной сети используя ту же

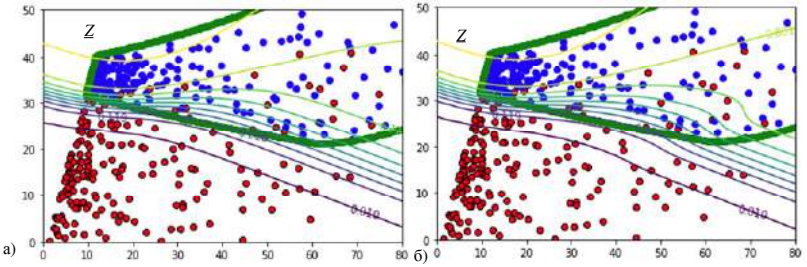
информацию, которая доступна для расчёта параметров классических алгоритмов. Для обучения нейронной сети, то есть в общем случае для решения многопараметрической задачи нелинейной оптимизации используются наборы данных, представляющие собой пары векторов входных данных и идентификаторов класса. Применительно к задаче классификации режимов работы энергообъекта в роли таких данных выступают токи и напряжения, наблюдаемые в месте установки защиты, для которых точно известно – относится наблюдаемый режим к повреждению защищаемого участка или повреждению смежного.

Обучение на прецедентах

Пусть имеется линия с двухсторонним питанием, на которой в течение долгого промежутка времени фиксировались значения токов и напряжений в режимах короткого замыкания. Кроме этого, отмечалось к каком классу относится каждый режим – внешнее или внутреннее короткое замыкание. Эти данные генерировались с помощью математической модели такой линии, для которой все параметры принимались фиксированными, а варьировались лишь угол передачи линии δ, расстояние до места повреждения x_f, а также величину переходного сопротивления в месте повреждения R_f. Угол передачи линии, а также место повреждения распределены равномерно. Величина переходного сопротивления распределена логарифмически равномерно исходя из предположения, что наиболее часто возникают короткие замыкания через сравнительно небольшие переходные сопротивления.

Простейшим примером, для которого известны аналитические выражения, определяющие истинную границу области, в пределах которой отображаются все короткие замыкания вне защищаемой зоны, является комплексная плоскость замера сопротивления $\underline{Z}$ [1]. На данной плоскости красными точками показаны прецеденты, соответствующие коротким замыканиям в пределах защищаемого участка, синими точками – вне защищаемого участка (рис. 1). Зелёная линия показывает истинную границу, в пределах которой могут находиться все теоретически возможные прецеденты,

соответствующие внешним коротким замыканиям для рассматриваемой модели линии.



а) б)

Рис. 1. Отображение прецедентов и граничной линии на комплексной плоскости: *а* – изолинии для нейронной сети с 15 нейронами в скрытом слое, *б* – изолинии для нейронной сети с 30 нейронами в скрытом слое

Полученные данные (по 200 прецедентов для каждого класса) используются для обучения нейронной сети. Выходной величиной нейронной сети является вероятность p принадлежности прецедента к первому или второму классу [1]:

$$p = f\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\, w_i\right),$$

где x_i – значение i-го входа нейрона, w_i – вес i-ой связи, n – число входов нейрона, f – функция активации (в данном примере используется сигмоида).

Для того, чтобы нейронная сеть работала как классификатор режимов необходимо выбрать пороговое значение, которое выбирается исходя из требования селективности релейной защиты. Значение вероятности на выходе нейронной сети выше этого порога будет означать принадлежность режима к первому классу, вероятность ниже порога – ко второму. На той же комплексной плоскости $\underline{Z}$ показаны изолинии, каждая из которых будет соответствовать определённой вероятности. При обучении на прецедентах селективность защиты оценивается с помощью метрики полноты классификации имеющихся прецедентов.

В идеальном случае изолиния совпадает с истинной границей (зелёная линия). Как видно из рисунка, вне зависимости от сложности нейронной сети, при обучении на ограниченном

числе прецедентов нет возможности выбрать порог так, чтобы это обеспечивало наибольшую чувствительность и при этом гарантировало селективность. Можно заметить, что даже если изолиния расположена близко к истинной границе в области, где количество прецедентов значительное, то в правой части рисунка изолиния не загибается вверх и сильно отклоняется от истинной границы, что отрицательно сказывается на чувствительности. В случае слишком простой нейронной сети изолинии, расположенные близко к истинной границе практически вырождаются в прямую линию, а в случае слишком сложной начинают излишне ориентироваться на отдельно расположенные прецеденты. Таким образом, все имеющиеся изолинии не подходят либо по условию селективности, либо излишне перестраховываются и тем самым не обеспечивают максимальную чувствительность.

Если имеется гораздо более объёмная и информативная база прецедентов (в данном примере по 5000 для каждого класса), то появляется возможность выбрать порог так, чтобы соответствующая изолиния совпадала с истиной границей, в пределах которой на комплексной плоскости отображаются внешние короткие замыкания (рис. 2).

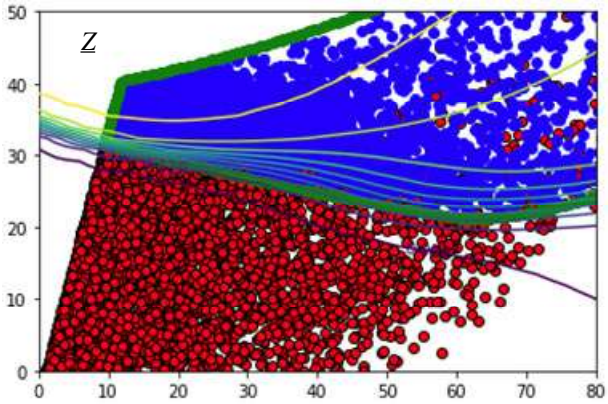


Рис. 2. Изолинии нейронной сети (15 нейронов в скрытом слое) при большом объёме информационной базы

Заключение

Показано, что обучение на прецедентах в общем случае не позволяет решить задачу классификации рассматриваемых режимов, обеспечивая наивысшую чувствительность при гарантированной селективности. Решение может быть достигнуто лишь в частном случае - при наличии достаточно информативной информационной базы, что не может быть достигнуто в реальных условиях. Кроме того, такой подход не позволяет построить защиту для вновь сооружаемых объектов, так как для них вовсе отсутствуют прецеденты. Это приводит к необходимости разработки методов обучения классификаторов на основании имитационной модели в качестве источника информативных прецедентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мартынов М.В.* Исследование и разработка обучаемых модулей микропроцессорных защит линий электропередачи: Автореф. … дис. канд. техн. наук – Чебоксары, 2014. – 24 с.

2. *Haykin S.* Neural Networks: A Comprehensive Foundation Subsequent Edition. - Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, United States: 1998. - 842 c.

Авторы:

Дементий Юрий Анатольевич*, сведения об авторе приведены на стр. 147.*

Маслов Александр Николаевич*, аспирант Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, инженер-исследователь ООО «Релематика», E-mail: maslov.a.n@list.ru.*

Николаев Кирилл Петрович*, студент кафедры ТОЭ И РЗА Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, техник-исследователь ООО «Релематика». E-mail: nikolaev.kirill.p@mail.ru.*

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ ИНТЕРВАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА

Дементий Ю. А., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия, dementiy.yu.a@gmail.com

Шорников Е.В., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия, shornikov.ev.vl@gmail.com

Аннотация: *В работе показаны подходы к решению задачи интервальной оценки параметров объекта с использованием методов машинного обучения. Проанализированы ограничения методов. Даны рекомендации по улучшению качества работы подобных алгоритмов.*

Ключевые слова: *машинное обучение, интервальная оценка, параметрическая идентификация.*

Введение

В работах [1,2] рассматривается подход к решению задачи параметрической идентификации, в котором поиск неизвестных параметров реализован путем оптимизации однозначной целевой функции. При этом в общем случае обратная функция многозначна, поэтому решения, предлагаемые в рассматриваемых работах не универсальны.

Необходимость использования многозначных функций [3] может являться следствием низкой информативности объектных параметров по отношению к наблюдаемым или наличия случайного процесса, влияющего на наблюдаемый объект.

В данной работе предлагается алгоритм, использующий инструментарий машинного обучения для решения задачи интервальной оценки параметров объекта. Данная задача относится к классу задач регрессионного анализа, для которого характерно обучение с учителем. В качестве учителя выступает обучающая выборка, содержащая пары векторов наблюдаемых значений и объектных параметров.

Постановка задачи

Пусть имеется некоторая информация о режимах работы наблюдаемого объекта, представляющая собой соответствующие друг другу пары наблюдаемых векторов $\boldsymbol{v}$ и векторов

неизвестных объектных параметров $\boldsymbol{x}$, которые могут быть получены как из имитационной модели объекта (ИМО), так и путем наблюдения за реальным объектом. Необходимо по наблюдаемым параметрам определить интервал возможных значений объектных параметров.

Наблюдаемый вектор $\boldsymbol{v}$ определен в области S наблюдаемого пространства A. Область S является областью допустимых значений вектора $\boldsymbol{v}$ и определяется структурой (моделью) объекта и допустимыми значениями его параметров.

$$\boldsymbol{v} \in S \subset A$$
$$L = \partial S$$

где L – граница области S.

Объектные параметры $\boldsymbol{x}$ определены в области G объектного пространства C, элементами которого являются векторы параметров наблюдаемого объекта.

$$\boldsymbol{x} \in G \subset C$$
$$H = \partial G$$

где H – граница области G.

Наблюдаемые величины связаны с объектными при помощи ИМО F. При отсутствии ИМО её функцию может выполнять реальный объект.

$$F: C \to A$$
$$\boldsymbol{v} = F(\boldsymbol{x})$$

Задачу параметрической идентификации можно переформулировать в задачу поиска обратной функции F^{-1}, которая, в общем случае, является многозначной.

$$\boldsymbol{x} = F^{-1}(\boldsymbol{v})$$

Алгоритм интервальной оценки реализован в виде двух моделей: верхней и нижней границы интервала. Модели определены полиномами, обучение которых происходит посредством решения задачи квантильной регрессии [4], то есть минимизации функции квантильных потерь (1).

Для задания границ интервала предлагается использовать квантили, стремящиеся к q_{100} и q_1. Для обеспечения устойчивости оптимизации в данном исследовании для верхней границы применяется q_{99}, а для нижней q_1 квантиль.

$$\varepsilon(e_i|q) = \begin{cases} qe_i\,, & e_i \geq 0 \\ (q-1)e_i\,, & e_i < 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где ε – квантильные потери; q – выбранный квантиль; где e – ошибка.

Эксперимент

Для тестирования алгоритма интервальной оценки параметров использован абстрактный объект, для которого составлена имитационная модель, определенная функцией (2).

$$v = \sin(3x + 1.5) + n \quad (2)$$

где n – шумовая компонента, заданная случайным распределением (3).

$$n \sim U(-0.1 - x, 0.1 + x) \quad (3)$$

С помощью имитационной модели получены точки, характеризующие режимы работы объекта.

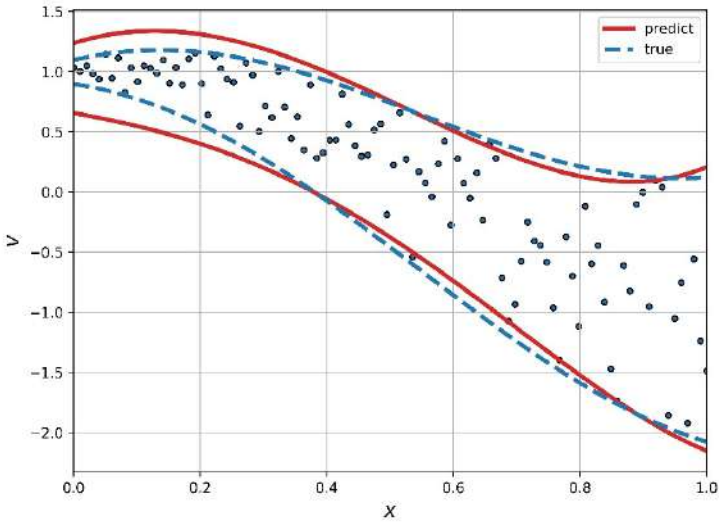


Рис. 1. Результаты работы алгоритма интервальной оценки

На рис. 1 представлены результаты работы алгоритма. Получены границы интервала объектных параметров,

прогнозируемых моделью (сплошная линия), истинные границы интервала отмечены пунктирной линией.

Влияние информативности данных

Результирующие интервалы стремятся к истинным по мере увеличения количества и информативности точек в обучающей выборке. Под информативностью точки подразумевается её мера влияния на изменение коэффициентов модели.

Данный алгоритм не позволяет получить границы интервала, стремящиеся к истинным (рис. 1). Для достижения истинных границ требуется повысить информативность используемой при обучении выборки путем повышения информативности отдельных точек (например, перемещения их ближе к границе) или увеличения их общего количества (без повторений) и, как следствие, общей информативности.

Заключение

Разработан алгоритм интервальной оценки параметров объекта, основанный на решении задачи квантильной регрессии.

При отсутствии имитационной модели наблюдаемого объекта, когда её функцию выполняет объект, являющийся источником информации, предлагаемый алгоритм интервальной оценки параметров позволяет получить наилучший результат. При увеличении количества и информативности точек определяемые границы интервала стремятся к истинным.

Зависимость результатов работы алгоритма от информативности обучающих данных обуславливает необходимость разработки метода поиска информативных точек на основе имитационной модели объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дементий Ю.А., Шорников Е.В.* Обучаемый модуль параметрической идентификации сигнала // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XII Всероссийской науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. – С. 395-398.

2. *Дементий Ю.А., Шорников Е.В.* Анализ эффективности обучаемого модуля параметрической идентификации // Электроэнергетика глазами молодежи-2020: материалы XI

международной науч.-техн. конф. том I – Ставрополь: Изд-во Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. – С. 323-326.

3. *Горбань И. И.* Многозначные величины, последовательности и функции / И. И. Горбань // Математические машины и системы. – 2012. – № 3. – С. 147-161.

4. *Васильева С.Н., Кан Ю.С.* Метод линеаризации для решения задачи квантильной оптимизации с функцией потерь, зависящей от вектора малых случайных параметров // АиТ. 2017. № 7. С. 95–109.

Авторы:

***Дементий Юрий Анатольевич**, сведения об авторе приведены на стр. 147.*

***Шорников Евгений Владимирович**, инженер – исследователь ООО «Релематика». Окончил электроэнергетический факультет Чувашского государственного университета им. И.Я. Ульянова в 2017 г., получил диплом магистра в 2019 г. E-mail: shornikov.ev.vl@gmail.com.*

АКТИВНОЕ ОБУЧЕНИЕ КЛАССИФИКАТОРА РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Дементий Ю.А., ООО «Релематика», Чебоксары, Российская Федерация. E-mail: dementiy.yu.a@gmail.com

***Аннотация:** В работе обсуждается проблема зависимости эффективности работы алгоритмов машинного обучения от информативности и количества имеющихся прецедентов, определяемых режимом работы объекта. Формулируется задача активного обучения с использованием имитационной модели объекта для синтеза наиболее информативных прецедентов. Рассматриваются вопросы сходимости процесса обучения моделей при таком подходе. Анализируется зависимость эффективности от параметров базового алгоритма классификации.*

***Ключевые слова:** машинное обучение, активное обучение, селективность, классификация режимов работы объекта.*

Введение

Обучение моделей классификации режимов работы объекта предполагает построение разграничивающей поверхности в наблюдаемом пространстве. Её форма и положение зависят только от структуры и допустимых диапазонов параметров

объекта. Однако классические подходы к построению классификаторов демонстрируют зависимость итогового алгоритма от обучающих данных, доступных на момент построения. Кроме того, области режимов в наблюдаемом пространстве могут пересекаться, что является причиной существования различных разделяющих кривых для одного набора данных, соответствующих различным ограничениям на решение задачи. Это обуславливает необходимость разработки метода построения классификаторов, для которого входными данными будут являться модель объекта и диапазоны ее параметров, а не заранее сформированная обучающая выборка.

Задача

В работе рассматривается подход к решению группы задач, в которых имеет место приоритет классификации одного режима над другим. То есть в случае, когда один и тот же набор наблюдаемых значений может соответствовать различным классам (точка в наблюдаемом пространстве находится на пересечении областей режимов), ответ классификатора соответствует приоритетному классу.

Задачи из этого класса в общем виде можно описать следующим образом. Пусть имеются имитационные модели двух режимов работы объекта (α- и β-режимов), описываемые функциями F_α, F_β, отображающими соответствующие множества (области) $G_\alpha, G_\beta \subset C$ векторов объектного пространства во множества векторов наблюдаемого пространства S_α, S_β. Векторы из множеств S_α, S_β являются элементами одного общего наблюдаемого пространства A. Области G_α, G_β являются m-мерными гиперпрямоугольниками, определенными векторами, компонентами которых являются максимальные и минимальные значения объектных параметров $\mathbf{x}_{\min} = [\mathrm{x}_{1\min} \dots \mathrm{x}_{m\min}]$, $\mathbf{x}_{\max} = [\mathrm{x}_{1\max} \dots \mathrm{x}_{m\max}]$. Требуется на основании имеющихся моделей F_α, F_β и векторов $\mathbf{x}_{\min}, \mathbf{x}_{\max}$ построить (обучить) классификатор $a(\mathbf{v})$ векторов $\mathbf{v} \in S_\alpha \cup S_\beta$ так, чтобы, при определении класса β-режимов приоритетным, выполнялись

условия (1) и (2).

$$TPR_{\beta}(a \mid S_{\alpha}, S_{\beta}) = 1 \quad (1)$$

Где *TPR* – true positive rate или метрика полноты классификации; *a* – алгоритм классификации.

$$PPV_{\beta}(a \mid S_{\alpha}, S_{\beta}, TPR_{\beta} = 1) \to \max \quad (2)$$

Где *PPV* – positive predictive value или метрика точности классификации.

Активное обучение классификатора

Предлагаемый подход основан на концепции активного обучения [1]. Он представляет собой итерационный поиск наиболее информативных векторов $\mathbf{v} \in S_{\alpha} \cup S_{\beta}$ и использование их в качестве обучающей выборки для получения $a(\mathbf{v})$, удовлетворяющего условиям (1) и (2).

Поиск векторов происходит в объектном пространстве *C*. Это обусловлено тем, что прямоугольная форма областей G_{α}, G_{β} делает проверку попадания точки в одну них тривиальной задачей, тогда как форма областей S_{α}, S_{β} заранее неизвестна и определена имитационными моделями и их диапазонами допустимых объектных параметров. Таким образом, алгоритм активного обучения ищет наиболее информативные точки в наблюдаемом пространстве и пытается получить новые информативные точки рядом с ними. При этом нет возможности создавать новые точки прямо в наблюдаемом пространстве, так как в таком случае невозможно проверить соблюдение ограничений, накладываемых задачей на объектные параметры. Формирование новых точек выполняется в пространстве *C*, с последующим их отображением имитационными моделями в *A*. Такой подход позволяет отказаться от заранее сформированной обучающей выборки и использовать имитационные модели объектов как основные источники информации для обучения классификатора.

Поиск может выполняться как с применением методов стохастической оптимизации, так и с использованием методов локальной оптимизации на основе частных производных на основании заранее определённых критериев информативности и

критерия остановки обучения, выбираемых исхода из особенностей модели классификации.

Критерии информативности и сходимость

Информативность может быть выборочной и точечной. Точечная (условная) информативность является мерой влияния точки на форму и положение поверхности, разделяющей режимы в наблюдаемом пространстве. Она зависит от текущих параметров обучаемого классификатора (полученных в результате обучения на предыдущей итерации) и текущего количества и расположения точек обучающей выборки. Выборочная (безусловная) информативность является способностью обучающей выборки как множества точек характеризовать форму, размеры и положение областей S_α, S_β.

Максимальной информативности выборка достигает только тогда, когда она состоит из бесконечного количества точек, равномерно распределенных в пространстве внутри областей S_α, S_β, в том числе равномерно заполняющих границы областей. Такие выборки, очевидно, являются невозможными и целесообразно говорить о выборках, информативность которых только стремится к максимальной.

Генерация новых точек, объединение их в единую обучающую выборку и фильтрация выборки на основании точечной информативности увеличивает безусловную информативность выборки. В процессе обучения классификатора на каждой итерации происходит дообучение модели на выборке, имеющей увеличенную по сравнению с прошлой итерацией информативность. Этот процесс приводит к постепенному замедлению роста выборочной информативности, что говорит о сходимости обучения.

Однако, высокая сложность алгоритма классификации (количество степеней свободы разделяющей кривой) может привести к тому, что даже достаточно высокая выборочная информативность не гарантирует выполнение условия (1) вследствие недостаточной плотности точек. В такой ситуации возможна генерация новых условно информативных точек, заполняющих пустоты и повышающих плотность. Таким

образом, скорость роста выборочной информативности не должна являться основным признаком того, что сходимость достигнута. Общий критерий остановки обучения должен основываться на скорости нарастания выборочной информативности и результативности поиска точек с высокой условной информативностью.

Одним из аспектов анализа сходимости является анализ сложности алгоритма классификации. В случае её дефицита сходимость обучения к результату, обеспечивающему выполнение условия (2) однозначно невозможна. При этом на основании сформулированного выше требования к общему критерию остановки, можно говорить о том, что завышенная сложность алгоритма не приводит к эффекту переобучения, являющемуся одной из главных проблем обучения по прецедентам [2]. Однако завышение сложности может привести к существенному замедлению сходимости. В качестве общего решения этой проблемы возможно использование механизма регуляризации совместно с завышенной сложностью алгоритма классификации.

Заключение

Задача построения классификатора режимов работы объекта в общем случае не может быть решена с использованием прецедентов как основного источника информации. В качестве такого источника целесообразно использовать имитационные модели режимов объекта.

Отбор информации, получаемой из имитационных моделей, производится на основании информативности, оцениваемой как для точек, так и для обучающей выборки в целом. Критерии информативности могут быть определены произвольно в зависимости от задачи и особенностей модели классификации.

Сходимость процедуры обучения, основанной на предлагаемом подходе, возможна для классифицирующих моделей достаточной сложности. При этом правильно выбранные критерии информативности и критерий остановки обучения позволяют избежать проблемы переобучения модели даже в случае значительного завышения её сложности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

3. Balcan MF., Urner R. (2016) Active Learning – Modern Learning Theory. In: Kao MY. (eds) Encyclopedia of Algorithms. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2864-4_769

4. Миронов, А. М. Машинное обучение [Текст]: учебное пособие / А. М. Миронов; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Механико-математический факультет, Кафедра математической теории интеллектуальных систем. - Москва : МАКС Пресс, 2018.

Авторы:

Дементий Юрий Анатольевич*, сведения об авторе приведены на стр. 147.*

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АКТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ РАЗГРАНИЧЕНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭНЕРГООБЪЕКТА

Дементий Ю. А., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия, dementiy.yu.a@gmail.com.

Петряшин А. Е., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия, petryashin.a.e@mail.ru.

Петряшин И. Е., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия, petryashin.i.e@mail.ru.

Аннотация: *в статье рассматривается применение активного обучения для разграничения режимов работы энергообъекта. Рассмотрена реализация алгоритма, позволяющего решить эту задачу в двумерном пространстве. Сформулированы принципы формирования частей, составляющих алгоритм. Произведено сравнение алгоритма с аналогами. Приведены качественные и количественные характеристики, позволяющие оценить эффективность алгоритма.*

Ключевые слова: *машинное обучение, активное обучение.*

Введение

Работа алгоритма релейной защиты может быть сформулирована как решение задачи разграничения режимов работы энергообъекта. Множество режимов объекта состоит из множеств отслеживаемых и альтернативных режимов (α - и β - режимов). В случае возникновения α -режимов требуется

срабатывание защиты, при этом должна гарантироваться блокировка работы в случае возникновения бета режимов для обеспечения селективности.

В контексте машинного обучения данная задача рассматривается как задача двухклассовой классификации, где в роли классов выступают α - и β -режимы. Требование селективности, а также тот факт, что области α - и β -режимов в общем случае пересекаются, накладывают на решение этой задачи ограничения. Для её решения предлагается использовать концепцию активного обучения [1] с применением в роли "оракула" (источника информации) имитационных моделей α - и β - режимов.

Условия, накладываемые на алгоритм обучения

Решение задачи классификации означает построение в наблюдаемом пространстве (пространство, элементами которого являются вектора, образованные доступными для измерения величинами) линии, а в общем случае - гиперповерхности, разделяющей классы. В случае линейной модели уравнение этой линии имеет вид:

$$\vec{\omega}^T \vec{x} = 0, \qquad (1)$$

где $\vec{\omega}$ - вектор параметров модели (ее веса), $\vec{x}$ - обучающая выборка.

В наиболее распространённой, статистической формулировке задачи классификации, это решение является результатом оптимизации функции потерь, не предполагающей выполнения требования селективности, поэтому часть области пересечения может быть классифицирована как область α - режимов. Для обеспечения селективности защиты необходимо изменить работу классификатора таким образом, чтобы точки из области пересечения были полностью отнесены к классу β - режимов. В таком случае полнота (recall) классификации β - режимов будет равна 1:

$$recall_\beta = 1 \qquad (2)$$

Условие (2) достигается путем изменения параметров обучения модели. Необходимо отметить, что это условие будет

выполняться и в случаях, когда классификатор относит часть области α - режимов, лежащей вне пересечения, к классу β - режимов, что является нежелательным, так как вследствие этого снижается чувствительность защиты. Поэтому к условию (2) необходимо добавить дополнительное требование (3), ограничивающее излишнее расширение области, классифицируемой как область β-режимов. Условие сформулировано с использованием точности (precision) классификации, которая может быть интерпретирована как мера распознающей способности классификатора:

$$precision_{\alpha} \to \max \qquad (3)$$

Одновременное выполнение условий (2) и (3) означает, что максимально возможная часть α-режимов классифицируется верно.

Построение границы классов

Процесс построения границы классов имеет итеративный характер. Вначале формируются вектора x_{α} и x_{β} со случайными комбинациями объектных параметров. Имитационные модели отображают эти вектора в наблюдаемое пространство: $X_{\alpha} = F(x_{\alpha})$, $X_{\beta} = F(x_{\beta})$. Классификатор обучается на векторах X_{α} и X_{β} до тех пор, пока не будут выполнены условия (2) – (3), после чего в наблюдаемом пространстве отбираются наиболее информативные точки. В качестве критерия информативности в данном исследовании выбрана близость точки к разделяющей линии – чем ближе точка, тем выше ее информативность. Наиболее информативные точки используются для получения дополнительной информации об областях α - и β - режимов - для каждой точки создается семейство подобных ей точек, объектные параметры которых распределены вокруг объектных параметров исходной точки. Таким образом формируются новые векторы x'_{α} и x'_{β}, которые на следующей итерации объединяются в единое множество с векторами x_{α} и x_{β}.

Описанный процесс повторяется до тех пор, пока граница классов не будет построена с необходимой точностью.

Базовый алгоритм

В качестве базового алгоритма используется линейный классификатор – логистическая регрессия. Это означает, что разделяющей классы линией является прямая. В общем случае форма границы областей возможных режимов может быть слишком сложна для точного её описания прямой линией. Одним из возможных решений этой проблемы является дополнение вектора обучающей выборки X новыми признаками, полученными при перемножении и возведении в степень исходных. Такой подход позволяет сохранить преимущества работы с линейным классификатором и получить в наблюдаемом пространстве нелинейную (полиномиальную) границу классов [2].

Режимы объекта и имитационная модель

В качестве объекта, режимы которого подлежат разграничению, выбрана линия 110 кВ с двухсторонним питанием. Её имитационная модель показана на рисунке 1 и имеет три варьируемых параметра $x = \left[x_f, R_f, \delta \right]$, где x_f - место повреждения, R_f - переходное сопротивление, $\delta = \arg(\frac{E_s}{E_r})$ - угол передачи.

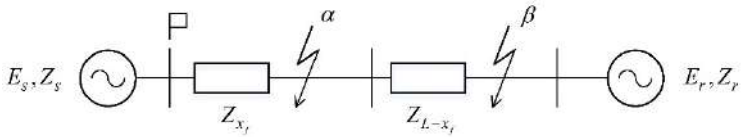


Рис.1. Имитационная модель

Неизменяемые параметры модели:

$E_s = E_r = \frac{110}{\sqrt{3}}$ кВ, $Z_s = 20 + j15$ Ом, $Z_r = 20 + j25$ Ом,

$Z_0 = 0.1 + j0.4$ Ом/км, $L = 100$ км,

$-60° \le \delta \le 60°$, $0.001 \le R_f \le 100$, $0 \le x_f \le L$

α-режимами считаются замыкания, для которых $0 \le x_f \le 0.7L$, а β-режимами – замыкания, для которых $0.7L < x_f \le L$.

Имитационные модели отображают вектора x_α и x_β на плоскость замера сопротивления:

$$X_\alpha = F(x_\alpha) = \frac{\dot{U}(x_\alpha)}{\dot{I}(x_\alpha)},\ X_\beta = F(x_\beta) = \frac{\dot{U}(x_\beta)}{\dot{I}(x_\beta)},$$

где $\dot{U}$ и $\dot{I}$ - напряжение и ток в месте наблюдения.

Результат работы алгоритма

На рисунке 2 представлена граница классов, построенная при помощи описанного алгоритма. Также представлена истинная граница β - режимов, построенная согласно [3]. Белым и черным показаны точки обучающих выборок X_α и X_β соответственно.

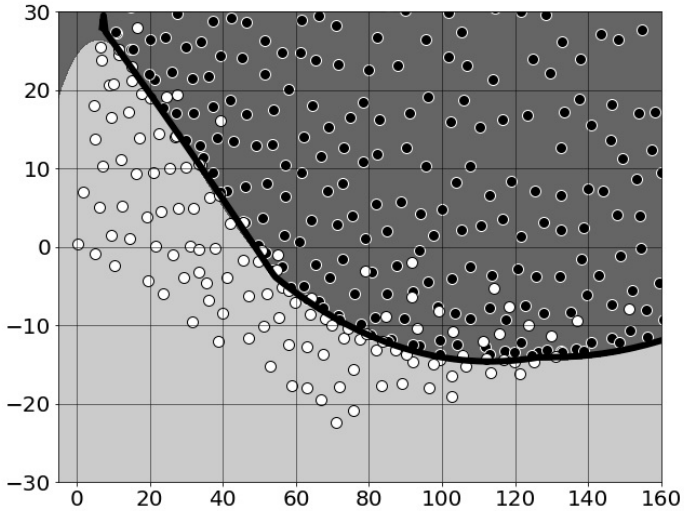


Рис.2. Граница классов, полученная при обучении классификатора

Построенная граница позволяет разделить точки, соответствующие β-режимам, от точек α-режимов со 100% полнотой, что свидетельствует о выполнении условия (2). Кроме того, в области наблюдаемого пространства, заполненной точками, эта граница практически совпадает с границей β-режимов, что говорит о выполнении требования (3).

Заключение

1. Реализован метод, позволяющий провести построение релейной защиты путем итеративного обучения с учетом ограничений селективности.

2. Задача построения защиты и ограничения на её решение сформулированы в терминах машинного обучения с использованием общепринятых метрик точности и полноты классификации.

3. Показано, что близость точки к разделяющей кривой является удобным и эффективным критерием её информативности для использования в задаче активного обучения.

4. Предлагаемый метод применен для задачи построения дистанционной защиты линии. Результирующий алгоритм релейной защиты имеет предельно возможную для заранее заданной информационной базы распознающую способность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Balcan MF., Urner R.* (2016) Active Learning – Modern Learning Theory. In: Kao MY. (eds) Encyclopedia of Algorithms. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2864-4_769

2. *Миронов, А. М.* Машинное обучение [Текст]: учебное пособие / А. М. Миронов; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Механико-математический факультет, Кафедра математической теории интеллектуальных систем. - Москва : МАКС Пресс, 2018.

3. *Мартынов, М. В*. Исследование и разработка обучаемых модулей микропроцессорных защит линий электропередачи: специальность 05.14.02 "Электрические станции и электроэнергетические системы" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мартынов Михаил Владимирович. – Чебоксары, 2014. – 22 с.

Авторы:

Дементий Юрий Анатольевич, *сведения об авторе приведены на стр. 147.*

Петряшин Александр Евгеньевич*, сведения об авторе приведены на стр. 147.*

Петряшин Илья Евгеньевич*, сведения об авторе приведены на стр. 17.*

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ОБРАЗА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

Дементий Ю.А., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия, dementiy.yu.a@gmail.com

Николаев К.П., ООО «Релематика», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия, nikolaev.kirill.p@mail.ru

Аннотация: *предложен подход, основанный на решении оптимизационной задачи поиска максимума. Составлена гладкая оптимизируемая функция. Предлагаемый подход применён для решения задачи построения образа имитационной модели объекта и нахождения граничной линии образа. Проанализированы результаты работы алгоритма, приведены преимущества и недостатки.*

Ключевые слова: *детерминированный метод, образ имитационной модели объекта, оптимизационная задача.*

Введение

В работе описывается решение задачи разграничения (классификации) режимов работы объекта путем построения областей, соответствующих каждому из рассматриваемых типов режимов, с последующей проверкой попадания точки, определяемой наблюдаемым состоянием, в одну из областей. В данной работе предлагается осуществлять их построение с использованием имитационной модели объекта, при этом задача сводится к получению образа (области значений) имитационной модели.

Реализация метода

Для удобства описания подхода под имитационной моделью подразумевается преобразование F, объединяющее, собственно, функцию имитационной модели, отображающую объектное пространство в наблюдаемое и функцию замера, отображающую наблюдаемое пространство на плоскость замера. На вход имитационная модель принимает m-мерный вектор параметров модели $\boldsymbol{x}$: $\boldsymbol{x} \in G \subset C$, где G – заданная область определения параметров модели, C – пространство, образованное векторами параметров модели (объектное пространство). На выходе модели формируется двухмерный вектор замера $\boldsymbol{v} \in S \subset A$, где S – образ имитационной модели, A – пространство, образованное

векторами замера (уставочное пространство). Таким образом $\boldsymbol{v} = F(\boldsymbol{x})$, $F: S \to G$ [1].

Область определения имитационной модели задаётся двумя векторами $\boldsymbol{x_{min}} = [x_{1\,min}, x_{2\,min}, \dots, x_{m\,min}]$ и $\boldsymbol{x_{max}} = [x_{1\,max}, x_{2\,max}, \dots, x_{m\,max}]$, где $\boldsymbol{x_{min}}$ – вектор, компонентами которого являются минимальные значения объектных параметров, $\boldsymbol{x_{max}}$ - вектор, компонентами которого являются максимальные значения объектных параметров. Таким образом, область определения представляет собой m-мерный гиперпрямоугольник.

Для проверки попадания точки $\boldsymbol{v}$ в область S достаточно иметь информацию о некотором количестве граничных замеров, образующих полигон в двухмерном пространстве, аппроксимирующий границу области S. Таким образом, для поставленной задачи достаточно описать границу области S в виде точек $\boldsymbol{v_1}, \boldsymbol{v_2}, \dots, \boldsymbol{v_k} = F(\boldsymbol{x_1}), F(\boldsymbol{x_2}), \dots, F(\boldsymbol{x_k})$, таких, что $\{\boldsymbol{v_1}, \boldsymbol{v_2}, \dots, \boldsymbol{v_k}\} \subset L, L = \delta S$, где δS – подмножество граничных точек множества S.

Из условия принадлежности к искомой области, включающей в себя отображения всей области определения (соответствующие всем возможным режимам), следует, что задачу построения образа можно сформулировать как оптимизационную задачу поиска точек в объектном пространстве, отображения которых определяют полигон максимально возможной площади с учетом ограничений в объектном пространстве:

$$\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_2}, \dots, \boldsymbol{x_k} = \underset{\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_2}, \dots, \boldsymbol{x_k} \in G}{\operatorname{argmax}} \operatorname{area}(F(\boldsymbol{x_1}), F(\boldsymbol{x_2}), \dots, F(\boldsymbol{x_k}))$$

Согласно оптимизационной задаче, оптимизируемая функция примет вид:

$$loss(\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_2}, \dots, \boldsymbol{x_k}) = -\operatorname{area}(F(\boldsymbol{x_1}), F(\boldsymbol{x_2}), \dots, F(\boldsymbol{x_k})), \quad (1)$$

Многие методы оптимизации требуют задания начального приближения искомых параметров, установка же случайных значений может привести к замедлению сходимости алгоритма или попаданию в локальный минимум. Опытным путём установлено, что точки прообраза граничной линии искомого образа в большинстве своем располагаются на поверхности области определения имитационной модели вблизи рёбер [2]. На

основании данного факта целесообразен поиск границы вдоль рёбер посредством перебора пар вершин с последующим формированием линии между ними. Из множества точек, расположенных на этих линиях, интерес представляют лишь граничные. Они выделяются из всего множества посредством алгоритма alpha shape [3], а их прообразы принимаются за начальное приближение $\boldsymbol{x_1, x_2, \dots, x_k}$ в процедуре оптимизации.

Вычислительные эксперименты показали, что оптимизация функции (1) в общем случае может приводить к некорректному результату. Это связано с тем, что:

1) Общепринятый метод расчёта площади полигона (метод Гаусса [4]) имеет ограничения на упорядоченность точек полигона. В процессе работы оптимизатор может нарушить упорядоченность точек, что приведёт к некорректному вычислению площади полигона.

2) Интерполяция границы, полученной в процессе градиентного спуска, приводит к искажённому представлению о виде области, если точки, формирующие полигон, расположены на неодинаковом расстоянии друг от друга. Наибольшая информативность полученной области достигается при расположении точек на одинаковом расстоянии друг от друга.

Из вышесказанного возникают требования: располагать точки, формирующие границу, на одинаковом расстоянии друг от друга и сохранять порядок точек неизменным. Для выполнения данных требований в оптимизируемую функцию вводятся регуляризаторы.

Регуляризатор равного расстояния:

$$MAD(F(\boldsymbol{x_1}), F(\boldsymbol{x_2}), \dots, F(\boldsymbol{x_k})) = \frac{\sum_i^n (y_i - \bar{y})}{n},$$

где y_i - длина i-ого отрезка, определенного соседними точками полигона, $\bar{y}$ - среднее арифметическое длин отрезков, определенных соседними точками полигона, n - количество отрезков.

Данный регуляризатор накладывает штраф за различия длин сторон полигона и представляет собой их среднее абсолютное отклонение.

Регуляризатор порядка:

$$Ord(F(\boldsymbol{x_1}), F(\boldsymbol{x_2}), \dots, F(\boldsymbol{x_k}), m, \theta) = \sum_{i}^{n-m} f(angle_i),$$

где n - количество углов полигона, $angle_i$ – смежный угол i-го угла [градусы], f – функция из класса сигмоид, m – количество игнорируемых углов, θ – параметры сигмоиды.

Указанный регуляризатор направлен на предотвращение пересечений сторон полигона. Регуляризатор штрафует оптимизатор за появление острых углов в результирующем полигоне. Для предотвращения штрафа на острые углы, являющиеся частью формы искомого образа, в регуляризатор введен параметр m, позволяющий игнорировать некоторое количество углов при расчете штрафа.

Количество игнорируемых углов, коэффициенты перед регуляризаторами и параметры сигмоиды являются гиперпараметрами, а их настройка является неотъемлемым этапом построения области [5].

Итоговая оптимизируемая функция примет вид:

$$loss(\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_2}, \dots, \boldsymbol{x_k}, k, p, m, \theta) = -area(F(\boldsymbol{x_1}), \dots, F(\boldsymbol{x_k})) + k \cdot MAD(F(\boldsymbol{x_1}), \dots, F(\boldsymbol{x_k})) + p \cdot Ord(F(\boldsymbol{x_1}), \dots, F(\boldsymbol{x_k}), m, \theta)$$

где k – коэффициент перед первым регуляризатором, p – коэффициент перед вторым регуляризатором.

Заключение

Предложен универсальный подход к решению задачи построения образов имитационной модели объекта, основанный на постановке и решении оптимизационной задачи. Предложен способ получения начального приближения искомой области. Проанализированы стабильность работы оптимизатора и корректность получаемых результатов. Предложены аддитивные регуляризаторы, при использовании которых гарантируется корректность получаемых результатов.

Получаемые образы могут быть использованы в качестве основы классификатора режимов работы объекта. Процедура оптимизации в данном случае будет являться процедурой обучения классификатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Лямец Ю.Я., Кержаев Д.В., Нудельман Г.С., Романов Ю.В*. Граничные режимы в методике обучения релейной защиты. Часть 1. Граничные условия и обучающие процедуры - Известия вузов. Электромеханика – 2009. – С. 24 – 30.

2. *Мартынов М. В*. Исследование и разработка обучаемых модулей микропроцессорных защит линий электропередачи: дис. … канд. техн. наук. ЧГУ им. Ульянова, Чебоксары, 2014 – 226 с.

3. *Edelsbrunner, Herbert; Kirkpatrick, David G.; Seidel, Raimund*. On the shape of a set of points in the plane // IEEE Transactions on Information Theory, Vol.29, No.4– 1983. – p. 551–559.

4. *Meister, A. L. F*. Generalia de genesi figurarum planarum et inde pendentibus earum affectionibus, Vol.1 – 1769 – p. 144.

5. *Wolpert, D.H., Macready, W.G*. No Free Lunch Theorems for Optimization // IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.1, No.1, – 1997 – p. 67–82.

Авторы:

Дементий Юрий Анатольевич, *сведения об авторе приведены на стр. 147.*

Николаев Кирилл Петрович, *сведения об авторе приведены на стр. 152.*

ФИКСАЦИЯ НАЛИЧИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ПО СИНУСОИДЕ НАПРЯЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Кондрашов М.А., НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия, kondrashov.michael@mail.ru.

Максимов Р.С., НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия, maksimow.roma2018@yandex.ru.

Чжоу Хаочэнь, НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия, ChzhouK@mpei.ru.

Лай Денцзюнь, НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия, LaiD@mpei.ru.

Колобродов Е.Н., НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия, KolobrodovYN@mpei.ru

Аннотация: *в течение срока эксплуатации электротехнического оборудования, повторяющиеся частичные разряды ведут к разрушению изоляции, что в конце концов приводит к пробою, а*

следовательно, и повреждению оборудования. В связи с этим, преждевременная регистрация частичных разрядов помогает вовремя обнаружить повреждение и принять необходимые меры. Для этого могут использоваться современные методы машинного обучения.

Ключевые слова: *частичные разряды, машинное обучение, прогнозирование, упреждение.*

Введение

Частичный разряд (ЧР) – это искровой разряд очень маленькой мощности, который образуется внутри изоляции, или на ее поверхности, в оборудовании среднего и высокого классов напряжения. С течением времени, периодически повторяющиеся частичные разряды, разрушает изоляцию, приводя в конечном итоге к ее пробою. Обычно разрушение изоляции под действием частичных разрядов происходит в течение многих месяцев, и даже лет. Регистрация частичных разрядов, оценка их мощности и повторяемости, а также локализация места их возникновения, позволяет своевременно выявить развивающиеся повреждения изоляции и принять необходимые меры для их устранения. Для фиксации частичных разрядов могут быть использованы методы машинного обучения, а именно нейронные сети, в частности – свёрточные сети, которые совмещают получение и обработку необходимых признаков.

Формализация задачи машинного обучения

Фиксация наличия частичных разрядов проводится на основе анализа синусоид напряжений. К сожалению, в настоящий момент нет достаточных по числу осциллограмм наборов данных с синусоидами напряжений с реального оборудования. Таким образом, первым шагом является генерация данных для обучения, а именно самих синусоид.

Для генерации наборов данных для обучения и тестирования нейронных сетей будем считать, что к испытуемому оборудованию прикладывается переменное синусоидальное напряжение, которое изменяется по синусоидальному закону. Тогда, при отсутствии ЧР, напряжение на испытуемом объекте будет изменяться синусоидально, в то время как при появлении ЧР, вид осциллограммы изменится.

При воздействии на испытуемый объект первого полупериода, ЧР возникают, когда напряжение достигает значения $U_{\text{в.з.}}$ (напряжение пробоя). При ЧР напряжение на включении падает до напряжения $U_{\text{в.п.}}$, при котором частичный разряд гаснет. После погасания разряда, напряжение продолжит начнёт нарастать от значения $U_{\text{в.п.}}$ по кривой, соответствующей изменению приложенного напряжения со смещённым по вертикали значению постоянной составляющей (возникшей из-за появления зарядов на поверхности включения/на ёмкости объекта) [1]. Общий вид синусоиды с частичными разрядами представлен на рис. 1.

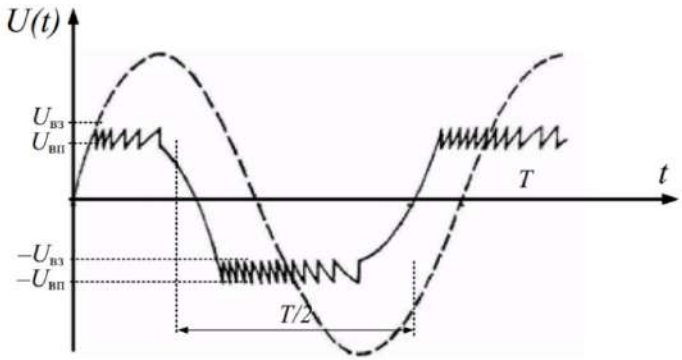


Рис. 1. Развитие ЧР во времени

Получение и предобработка данных для обучения.

По описанному закону получаются необходимые наборы данных. Генерация осциллограмм проводится в среде программирования Python. С целью получения различных осциллограмм, для них задавались параметры амплитуды напряжения, частоты основной гармоники, параметры двух высших гармоник, с помощью которых имитировались шумы (их частоты, амплитуды, сдвиги по фазе), сдвиг по фазе основной гармоники, а также параметры частичных разрядов: напряжение пробоя и напряжение, при котором гаснет частичный разряд.

Всего для обучения, валидации в процессе обучения, а также контрольного теста было получено 15239 осциллограмм. Часть

осциллограмм сгенерированы без частичных разрядов. Сравнение осциллограмм с одинаковыми параметрами, кроме наличия частичных разрядов, представлено на рис. 2.

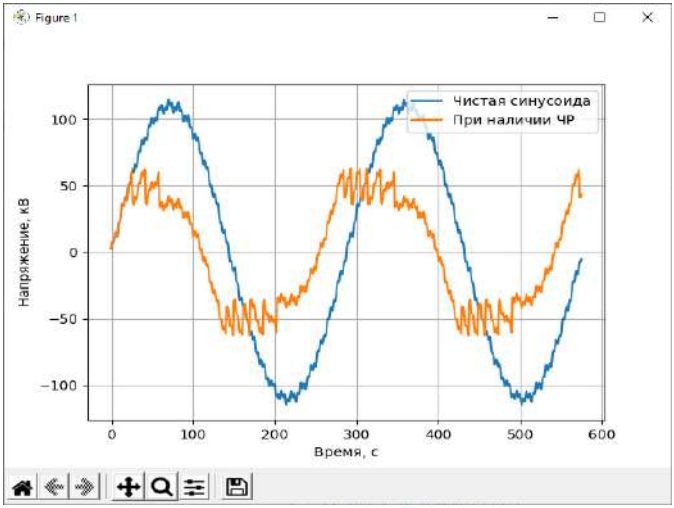


Рис. 2. Сравнение генерируемых осциллограмм

В машинном обучении данные имеют первостепенную важность. От качества и правильности представления данных для обучения или обработки зависит качество работы модели. Как правило, данные представляются в виде векторов, матриц либо графов [2].

Для корректной работы нейронной сети необходимо провести нормализацию данных. Если не произвести нормализацию, то входные данные будут оказывать дополнительное влияние на нейрон, что приведет к неверным решениям. В процессе обработки осциллограмм, для каждой из них будет вычитаться среднее для каждой временной последовательности, после чего будет поделено на стандартное отклонение.

Перед обучаемой моделью стоит задача классификации. Ей необходимо определить присутствуют или отсутствуют частичные разряды на синусоидах, представляемых в виде векторов значений.

Согласно выбранной модели данных, необходимо к уже полученным данным добавить массив нулей и единиц (либо массив логических переменных), означающий, соответственно, 1 (TRUE) – наличие ЧР, 0 (FALSE) – отсутствие ЧР. После этих действий получим два массива – ответов и признаков. Массив ответов – одномерный, из данных логического типа. Массив признаков – одномерный, но объектами в нём являются вещественные массивы, содержащие запись значений синусоид напряжения.

Выбор алгоритма машинного обучения.

Для анализа полученных данных используются, главным образом, свёрточные сети [2]. Наиболее часто они применяются для распознавания и классификации изображений (двумерные объекты), где они показывают лучшие результаты, по сравнению с другими видами нейроных сетей. Так, например, на конкурсе ImageNet LSVRC-2012 в 2012 году, свёрточная сеть для классификации изображений AlexNet оказалась лучшей с количеством ошибок 15,3% против 26,2% у второго места. Уже в 2015 году свёрточная сеть ResNet обогнала [3] уровень человека в задаче распознавания изображений. Однако, также эффективно они могут использоваться для работы с одномерными объектами – текстом, численными векторами. Свёрточная сеть ищет конкретные локальные признаки, и по ним классифицирует осциллограммы, подобно тому, как это делал бы человек.

Для сравнения эффективности работы свёрточных сетей также будет приведено их сравнение с сетями полносвязного перцептрона и рекуррентными нейронными сетями.

Выбор метрик качества алгоритма машинного обучения

В любой задаче машинного обучения необходимо оценить качество обучения модели. Для сравнения качества работы используемых нейронных сетей используются метрики Precision, Recall, F1-score, AUC и графическая метрика - ROC-кривая. На основе метрик Precision и Recall строится матрица ошибок – таблица для визуализации точности работы модели.

Важность метрики Precision определяется тем, насколько высока для рассматриваемой задачи «цена» ложно

положительного результата. В решаемой задаче, если стоимость проверки оборудования на ЧР достаточно высока, либо время, необходимое на проверку оборудования, слишком велико, и мы не можем проверить все ложно положительные результаты, то стоит максимизировать данную метрику. Recall показывает, какую долю объектов положительного класса из всех объектов положительного класса нашел алгоритм. Данной оценке стоит уделить внимание, если в поставленной задаче ошибка необнаружения положительного класса высока. Например, при поиске ЧР на дорогом или критически важном оборудовании.

Метрика F1-score является неким средним значением для оценки результатов. ROC (receiver operating characteristic) – график, показывающий зависимость верно классифицируемых объектов положительного класса от ложно положительно классифицируемых объектов негативного класса. AUC (Area Under Curve) – в качестве численной оценки ROC кривой принято брать площадь под этой кривой. Метрика AUC обладает определённым статистическим смыслом: она показывает вероятность того, что случайно выбранный экземпляр негативного класса будет иметь меньше вероятность быть распознанным как позитивный класс, чем случайно выбранный позитивный класс.

При выборе конкретной метрики качества необходимо опираться не на желание её оптимизации, а на поставленную задачу, предметную область. ЧР приводят к постепенному разрушению изоляции и возникновению электрического пробоя, что в итоге может повлечь за собой повреждение оборудования (возможно достаточно дорогостоящего), а в наихудшем случае – спровоцировать развитие аварии. На сегодняшний день решение рассматриваемой в данной работе проблемы достаточно востребовано [4].

Обучение алгоритма и анализ результатов.

Для работы с данными в реальном времени, данные в нейронные сети передаются через функцию-генератор, которая формирует окно с данными из временного ряда (в данном случае – осциллограммы). Если проводить обучение алгоритма только на осциллограммах, имеющих определённые

фиксированные размеры, то это сильно ограничит её функционал, и сделает невозможным её запуск в реальном времени.

При формировании архитектуры свёрточной нейронной сети важно соблюсти баланс в числе слоёв, количестве ядер свёртки, количестве нейронов в полносвязных слоях. Если установить, например, слишком малое число ядер свёртки, либо сделать их слишком широкими, алгоритм будет работать быстрее, но при этом с низкой точностью. Усложнение сети приведёт к увеличению времени её работы, однако вырастет и точность. При этом может возникнуть ситуация, когда модель переобучается – явление, когда построенная модель хорошо объясняет примеры из обучающей выборки, но при этом плохо работает на примерах, не участвовавших в обучении. В ходе подбора и сравнения различных комбинаций слоёв была выбрана архитектура сети, состоящая из двух свёрточных и двух полносвязных слоёв.

Листинг 1. Архитектура свёрточной сети

```
model = Sequential()
model.add(Conv1D(40, 5,  activation='relu',
input_shape=(lookback//step, 1 ) ))
model.add(MaxPooling1D(pool_size=2))
model.add(Conv1D(80, 5, activation='relu'))
model.add(MaxPooling1D(pool_size=2))
model.add(Flatten())
model.add(Dense(32, activation='relu'))
model.add(Dense(NB_CLASSES))
model.add(Activation('softmax'))
model.summary()
```

За счёт того, что объекты представляются относительно небольшим набором признаков, получилось создать относительно небольшую нейронную сеть, состоящую всего из двух слоёв свёртки, с двумя слоями пулинга. Один полносвязный слой, связанный с выходным, передающим на выход вероятность отнесения полученной осциллограммы к одному из двух классов (с наличием, либо с отсутствием осциллограмм). Для полученной нейронной сети проводится 10 эпох обучения. На каждой эпохе используется половина числа всех объектов из обучающей выборки, и 1000 объектов для валидации.

Доля верных ответов на обучающей выборке по оценке F-score показана на рис. 3, доля верных ответов на валидационной выборке – на рис. 4

Согласно графику на обучающей выборке, качество нейронной сети достаточно резко возрастает уже на первых эпохах обучения, после чего плавно возрастает. На валидационной выборке мы видим периодические снижения качества обучения модели, поскольку при валидации каждый раз сеть встречает новые объекты.

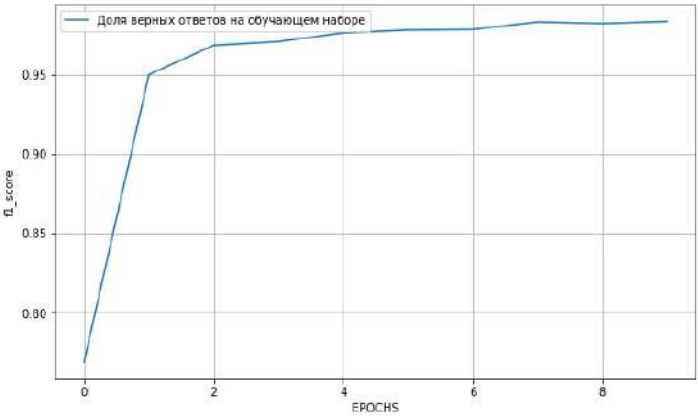


Рис. 3. Качество работы модели на обучающей выборке.

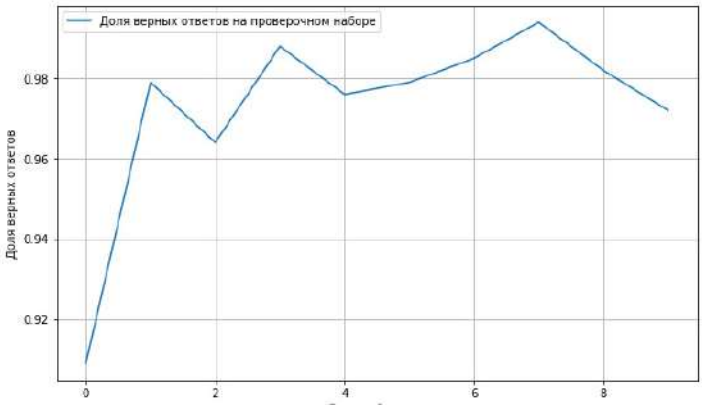


Рис. 4. Качество работы модели на валидационной выборке

Для оценки качества работы алгоритма нас интересует точность его работы на тестовом (контрольном наборе данных). Для оценки его работы построим матрицу ошибок, а также AUC-кривую. Матрица ошибок на тестовом наборе данных показана на рис. 5, график ROC-кривой и значение метрики AUC – на рис. 6.

	Predicted without PD	Predicted with PD
Actual without PD	1654	105
Actual with PD	15	2496

Рис. 5. Матрица ошибок для тестового набора данных

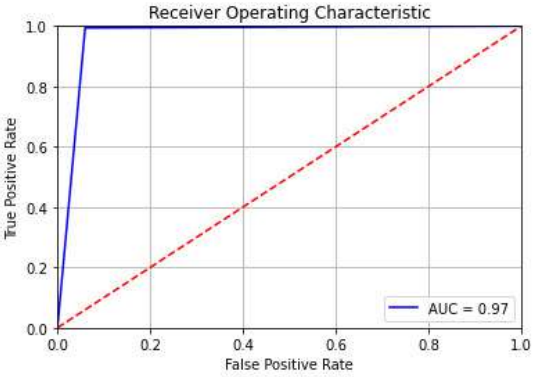


Рис. 6. ROC-кривая для тестового набора данных

Точность работы на контрольном наборе данных оказывается такой же высокой, как и на валидационном или учебном наборах. Свёрточная нейронная сеть способно хорошо обучиться классифицировать объекты, полученные из исходного набора данных. Однако вызывает интерес, как модель поведёт себя и на других наборах, с параметрами генерации осциллограмм, отличными от исходных.

Помимо контрольного набора, были сформированы также два дополнительных набора данных. В обоих наборах изменялись пределы и шаг изменения параметров, перечисленных в пункте «*Формализация задачи машинного обучения*». Матрица ошибок для первого дополнительного набора данных представлена на рис. 7, ROC-кривая на рис. 8:

	Predicted without PD	Predicted with PD
Actual without PD	8193	556
Actual with PD	137	10363

Рис. 7. Матрица ошибок на первом дополнительном наборе контрольных данных

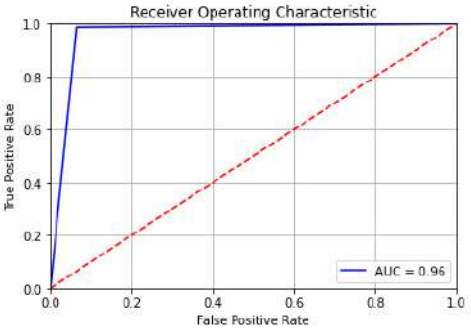


Рис. 8. ROC-кривая для первого дополнительного набора контрольных данных.

Для второго дополнительного набора данных матрица ошибок показана на рис.9, ROC-кривая на рис.10.

На обоих дополнительных данных наборах модель также показывает результат, близкий к полученному на обучающей и валидационной выборках. Стоит отметить, что доля ошибочно предсказанных осциллограмм с ЧР в несколько раз меньше, чем доля ошибочно предсказанных осциллограмм без ЧР. В рамках данной задачи важнее добиваться снижения именно неверно предсказанных осциллограмм с ЧР, поскольку в этом случае снижается риск «не увидеть» развитие ЧР. В противном случае потребуется только дополнительная проверка оборудования.

	Predicted without PD	Predicted with PD
Actual without PD	8070	679
Actual with PD	140	12460

Рис. 9. Матрица ошибок на втором дополнительном наборе контрольных данных

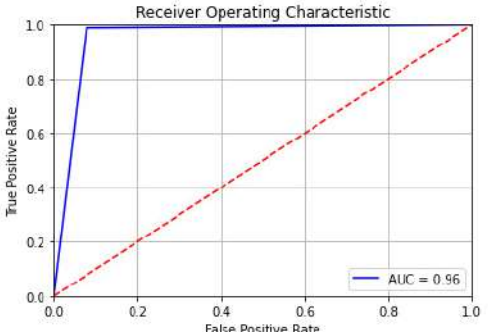


Рис. 10. ROC-кривая для второго дополнительного набора контрольных данных

Помимо свёрточной сети, для анализа данных могут также использоваться другие модели нейронных сетей, например модели полносвязного перцептрона, модель рекуррентной сети. Доля верных ответов на обучающей выборке, при использовании полносвязного перцептрона показана на рис. 11. Аналогичный график для валидационной выборке представлен на рис. 12.

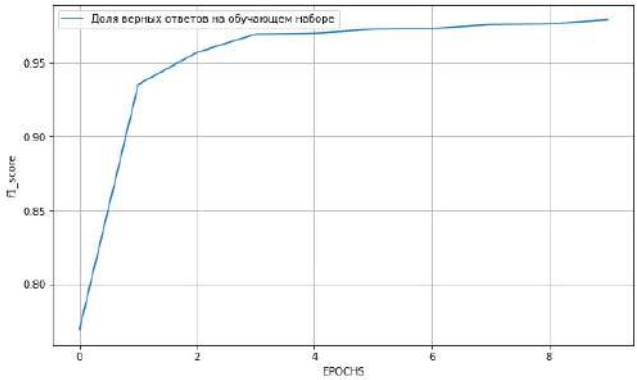


Рис. 11. Качество работы модели на обучающей выборке

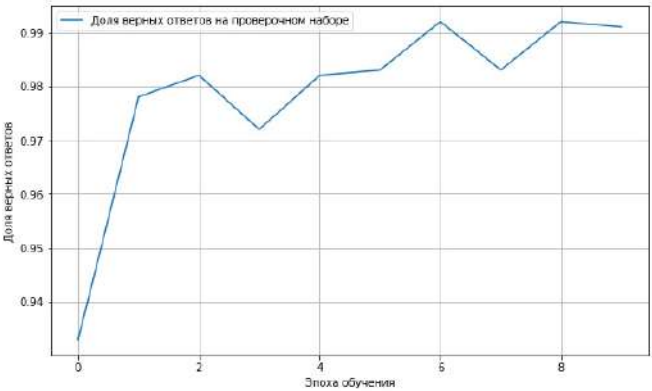


Рис. 12. Качество работы модели на валидационной выборке

Как можно увидеть по графикам, данная модель также, как и свёрточная сеть показывает отличные результаты. Данное явление может быть объяснимо сравнительной простотой решаемой задачи. Также это показывает, что при решении каких-либо задач с помощью машинного обучения не стоит пренебрегать более простыми моделями.

Для рекуррентной модели качество обучения на обучающей и валидационной выборках показано на рис. 13 и рис. 14 соответственно.

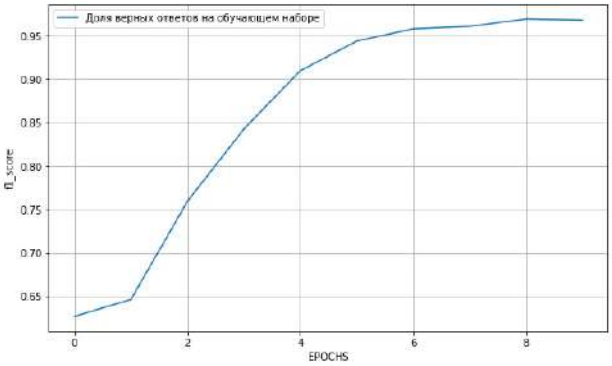


Рис. 13. Качество работы модели на обучающей выборке

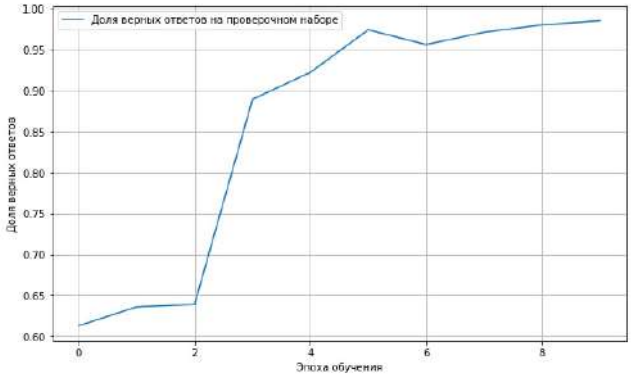


Рис. 14. Качество работы модели на валидационной выборке

Рекуррентная модель также показала высокие результаты. Рекуррентные нейронные сети предназначены для обработки последовательностей (временных рядов). Вместе с этим, ввиду отличной от свёрточных и полносвязных сетей архитектуры, такие сети показывают наибольшее время работы, поэтому для задач, критичных ко времени работы, их использование может быть нерациональным.

Заключение

Применяемая в данной работе модель свёрточной нейронной сети хорошо показала себя в задаче обнаружения частичных разрядов, поскольку в основе её работы лежит принцип распознавания локальных шаблонов в объектах. Можно сказать, что цель нейронной сети – «увидеть» локальное пилообразное изменение напряжения. Также для подобных задач могут быть использованы рекуррентные сети, в которых данные обрабатываются последовательно. При этом не стоит забывать и о более простых моделях машинного обучения, например, нейронной сети многослойного перцептрона, которые также могут показать хорошие результаты.

Стоит отметить, что практически в любом высоковольтном оборудовании в рабочих режимах существуют ЧР (в виду неоднородности изоляции). ЧР с малой интенсивностью позволяют работать оборудованию в течение всего срока

эксплуатации. ЧР же большей интенсивности уже представляют реальную угрозу для оборудования и приводят к его разрушению.

Для повышения точности работы модели, перед анализом осциллограмм может быть проведена фильтрация исходного сигнала от шумов.

С развитием открытых библиотек машинного обучения, в сфере электроэнергетики появился мощный инструмент для решения как задач анализа, так и для более прикладных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *И. М. Бортник, И. П. Верещагин*, Ю. Н. Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учеб. для вузов.-М.: Энергоатомиздат, 1993. – 543 с.

2. *Нишант Шакла*. Машинное обучение и TensorFlow.- СПб.: Питер, 2019. – 336с.: ил. – (Серия «Библиотека программиста»).

3. Large Scale Visual Recognition Challenge 2015 (ILSVRC2015): http://image-net.org/challenges/LSVRC/2015/

4. Кейс №3. Локализация частичных разрядов в кабелях сети электроснабжения метрополитена: https://test-energy.ru/kejs-3-lokalizacziya-chastichnyix-razryadov-v-kabelyax-seti-elektrosnabzheniya-metropolitena/?utm_source=vk&utm_medium=post&utm_campaign=kejs-3-lokalizacziya-chastichnyix-razryadov-v-kabelyax-seti-elektrosnabzheniya-metropolitena

Авторы:

***Кондрашов Михаил Андреевич**, НИУ «МЭИ», магистр, e-mail: kondrashov.michael@mail.ru.*

***Максимов Роман Сергеевич**, НИУ «МЭИ», магистр, e-mail: maksimow.roma2018@yandex.ru.*

***Чжоу Хаочэнь**, НИУ «МЭИ», бакалавр, e-mail: ChzhouK@mpei.ru.*

***Лай Денцзюнь**, НИУ «МЭИ», бакалавр, e-mail: LaiD@mpei.ru.*

***Колобродов Евгений Николаевич**, НИУ «МЭИ», старший преподаватель кафедры релейной защиты и автоматизации энергосистем НИУ «МЭИ», кандидат технических наук, e-mail: KolobrodovYN@mpei.ru.*

КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК НА ПОДСТАНЦИИ С ВЫСШИМ КЛАССОМ НАПРЯЖЕНИЯ 500 КВ С ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ АРХИТЕКТУРОЙ ВТОРИЧНЫХ ПОДСИСТЕМ

Карпенко В.И., НИУ МЭИ, Москва, Россия. E-mail: Vladislav.karpenko.97@mail.ru

Карантаев В.Г., Центр НТИ МЭИ, Москва, Россия. E-mail: Vladimir.karantaev@gmail.com

Аннотация: *Современные тренды развития электроэнергетики декларируют широкое применение информационно-коммуникационных технологий и цифровых сервисов для улучшения работы подсистем РЗА, АСУ ТП, АИИС КУЭ и т.д. Однако это сопряжено с ростом количества киберугроз и рисков нарушения устойчивого функционирования объектов электроэнергетики вследствие деструктивных информационных воздействий. В докладе представлены результаты синтеза гибридного способа моделирования киберугроз с возможными кибер-физическими последствиями и разработки демонстрационного прототипа экспертной системы, реализующей данный способ.*

Ключевые слова: *кибербезопасность, РЗА, критическая инфраструктура, модель угроз и нарушителя, искусственный интеллект, онтологии.*

Введение

Отрасль электроэнергетики в России и мире на сегодняшний день стоит на пороге масштабной модернизации и технологических изменений. Вопросы «цифровой трансформации» включены в повестку всех крупнейших отраслевых конференций, форумов и круглых столов, прошедших в последние несколько лет.

На отраслевых мероприятиях обсуждаются разнообразные аспекты развития электроэнергетики, в основном дискуссии

касаются выбора технологических основ для будущего роста данной экономической сферы. Но по факту выбор уже сделан в пользу дальнейшего развития отрасли посредством цифровизации, которая подразумевает массовое внедрение информационно-коммуникационных и иных готовых коммерческих технологий COTS (Commercial Off-The-Shelf – любые аппаратные или программные компьютерные технологии с открытого коммерческого рынка, основанные на международных стандартах, готовые или адаптированные к использованию в специальных условиях) во вторичные подсистемы объектов электроэнергетического комплекса, включая подсистему РЗА и ПА.

Вектор цифровизации направляется по большей части международной электротехнической комиссией (МЭК). В частности, техническим комитетом № 57 (ТК 57), который разрабатывает стандарты серий IEC 61850, 60870-5, 61968, 61970, 62351 и т.д., которые находят применение при цифровой трансформации отрасли энергетики. В бизнес-плане ТК 57 МЭК [1] зафиксировано, что дальнейшее развитие электроэнергетических систем возможно с применением цифровых подстанций, использованием распределенных систем энергоснабжения, реализацией подходов demand response, развитием концепции IIoT, созданием систем управления нагрузкой и генерацией.

Практическая реализация планов МЭК в России и мире уже начата, примерами этого являются: виртуальная электростанция в Сингапуре [2]; управление спросом и распределенные системы электроснабжения в США, Австралии, Великобритании ([3], [4]); торговля электроэнергией с учетом индивидуальных особенностей потребителей [5]; перевод подстанций на телеуправление из удаленных центров [6]; внедрение цифровых подстанций различных классов напряжения ([6], [7], [8]); внедрение цифровых распределительных электрических сетей [9].

С расширением внедрения цифровых технологий и информационно-коммуникационных технологий на объектах электроэнергетики расширяется и спектр угроз, связанных с уязвимостями применяемых технологий. Растут риски

нарушения устойчивого функционирования «цифровых объектов» энергетики и их объединений при деструктивном влиянии кибератак.

Выдвигаемый тезис не является новым, но авторы делают на этом акцент. Несмотря на тот факт, что к проблематике киберугроз «цифровых объектов электроэнергетики» обращались авторы ряда публикаций [10], [11], [12], многие методологические и практические вопросы на сегодняшний день не решены.

Несколько технических отчетов и исследований прошлого десятилетия посвящены рассмотрению возможных компьютерных атак, направленных на подсистемы управления в электроэнергетике. Технический отчет [10] подготовлен организацией Sandia National Laboratories, штат Нью-Мексико, США, 2009г. В документе коротко освещены возможности атак на системы релейной защиты линий электропередач и генераторов, а также на системы АСУ ТП, которые были смоделированы в лаборатории. Отчет [11] подготовлен в 2015 году Центром изучения рисков Кембриджского университета, (г. Кембридж, Великобритания). В данной работе описаны масштабные последствия кибератаки на электроэнергетическую систему США и потери в экономике от останова работы предприятий. Доклад [12] содержит подробный анализ систем РЗА и распределение уровня опасности для каждой составляющей функции РЗА и АСУ ТП и последствий влияния кибератак на функции этих систем.

Таким образом, одним из важных нерешенных вопросов для отрасли электроэнергетики является обеспечение кибербезопасности подсистем РЗА цифровых подстанций, так как при оказании деструктивных воздействий кибератак они могут спровоцировать наиболее критичные кибер-физические последствия. Решение данного вопроса начинается с разработки модели киберугоз, но при этом возникают проблемы со сложившейся методической неопределенностью. Поэтому авторами было проведено исследование, которое было направлено на разработку способа решения методических вопросов анализа киберугороз подсистемы РЗА цифровых подстанций. Промежуточные результаты исследования

представлены в данной статье. Проработка вопроса моделирования сценариев кибератак остается за рамками публикации.

Проблемы создания модели угроз кибербезопасности для объектов электроэнергетики

Несмотря на очевидную необходимость решения задач по обеспечению кибербезопасности, киберустойчивости объектов электроэнергетики с практической точки зрения, данная проблематика остается дискуссионной.

Обеспечение кибербезопасности цифровой подстанции – это комплексная задача, решение которой начинается с анализа киберугроз и их ранжирования по потенциальному ущербу, который они несут. На первом этапе исследования была поставлена цель по разработке гибридного способа моделирования киберугроз для объекта электроэнергетики, цифровой подстанции, который бы учитывал следующие критерии:

- определение физических последствий успешной кибератаки (аварии);
- определение кибер-физических последствий, приводящих к авариям;
- определение результатов реализации киберугроз в компонентах подсистемы РЗА ЦПС;
- киберугрозы, присутствующие в компонентах подсистемы РЗА ЦПС;
- определение слабостей и уязвимостей компонентов подсистемы РЗА ЦПС;
- определение нарушителя, тактик и техник, используемых им при проведении кибератаки.

Был проведен анализ современных российских и зарубежных методик и баз знаний, относящихся к моделированию киберугроз на предмет соответствия выдвинутым критериям:

- MITRE Matrix Enterprise ATT&CK и ICS ATT&CK;
- Cyber Kill Chain и ICS Cyber Kill Chain;
- STRIDE;
- Attack tree;

- Attack Library (MITRE CVE, CWE, CAPEC, OWASP);
- Проект методики МУиН ФСТЭК России 2015гг и 2020 гг.

Общим для всех рассмотренных методик стало то, что ни одну из них в нельзя использовать без дополнительных материалов для удовлетворения сформулированных выше критериев. Поэтому в ходе исследования авторами было принято решение использовать гибридный подход - объединить несколько методик, используя достоинства каждой. Далее был определен набор методик, наиболее подходящих для решения задачи синтеза подходящего способа моделирования киберугроз.

Ими стали:

- проект методики МУиН ФСТЭК России 2020гг – так как имеет наиболее общий подход и набор этапов;
- библиотеки MITRE CVE и CWE – источники знаний об уязвимостях и слабостях программного обеспечения;
- MITRE Matrix ICS ATT&CK – источник знаний о тактиках и техниках, используемых нарушителями кибербезопасности.

Предлагаемый в настоящей работе способ может быть визуализирован структурой на Рис. 1.

Рис. 1. Визуализация способа моделирования угроз кибербезопасности.

Для проверки данного способа было решено разработать частную модель угроз для воображаемой цифровой подстанции 3-й архитектуры [13] с двумя ИЭУ РЗА популярного в России иностранного вендора (РЗА ЛЭП 500 кВ и РЗА

автотрансформатора 500/220/10кВ) и АРМ инженера РЗА. Были проанализированы информационные потоки и существующие уязвимости рассматриваемых компонентов подсистемы РЗА, а также проведена валидация угроз, которые порождают выявленные уязвимости.

Была разработана частная модель угроз и при выполнении этой работы были выявлены следующие проблемы и дополнительные возможности [14]:

- комбинаторика вариантов существующих угроз даже в детерминированных ограниченных условиях очень большая и требует больших трудозатрат при разработке вручную;
- сложная комбинаторика указывает на то, что масштабирование полученных результатов очень сложно;
- человек, который вручную разрабатывает модель угроз для объекта электроэнергетики данным способом, должен обладать значительными компетенциями в областях информационной безопасности, электроэнергетики, релейной защиты и автоматики;
- данный способ моделирования угроз при исключении рассмотрения атак, может быть использован для анализа текущей ситуации на энергетическом объекте, если есть возможность получать мгновенно данные о событиях безопасности в инфраструктуре технологического объекта.

На основе полученного опыта разработки гибридной МУиН была выдвинута гипотеза о возможности использования систем искусственного интеллекта (ИИ) для автоматизации применения предлагаемого гибридного способа.

Сравнение подходов ИИ для создания модели киберугроз

Для решения задачи моделирования киберугроз и нарушителя кибербезопасности цифровой подстанции могут быть использованы системы искусственного интеллекта, основанные на следующих подходах:

- обучение моделей машинного обучения (МО) и нейронных сетей (НС) на размеченных данных;

- применение моделей МО для кластеризации;
- методы «дообучения» моделей МО и НС;
- методы инженерии знаний.

Обучение моделей МО и НС на размеченных данных – популярный в мире способ решения прикладных задач для предсказания (регрессии), классификации и ранжирования. Задача разработки модели угроз кибербезопасности относится к задачам классификации. Поэтому опишем задачу, которую должна решить система ИИ:

$X -$ множество *объектов (samples) (описания киберугроз по выбранным метрикам)*;

$Y -$ множество *ответов (target, label) (вид киберугрозы);*

$X \to Y -$ неизвестная зависимость (target function)

Дано: $\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \in X -$ обучающая выборка (training sample);

$y_i = y(x_i),\ i = 1,2 \dots n -$ известные ответы

Найти: a: $X \to Y -$ алгоритм, решающую функцию (decision function), приближающую y на всем множестве X.

Вектор $(f_1(x), \dots f_l(x)) -$ признаковое описание объекта x.

Матрица «объекты-признаки» (features data):

$$F = \left\|f_j(x_i)\right\|_{n \times l} = \begin{pmatrix} f_1(x_1) & \dots & f_l(x_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ f_1(x_n) & \dots & f_l(x_n) \end{pmatrix}$$

*Модель (*predictive model*)* $-$ параметрическое семейство функций

$A = \{a(x) = g(x, \theta)\ |\theta \in \Theta\} -$ *модель (*predictive model*),* где $g: X \times \Theta \to Y -$ фиксированная функция. $\Theta -$ множество допустимых значений параметра θ (искомый вектор параметров).

Например, если взять линейную модель с вектором параметров $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n), \Theta = \mathbb{R}^n$

То для классификации хоты бы на два класса ($Y = \{-1; +1\}$) она будет выглядеть так:

$$g(x, \theta) = sign \sum_{j=1}^{l} \theta_j f_j(x)$$

На данном этапе возникают трудности с применением такого подхода:

- не имеется размеченного набора данных с признаковым

описанием угроз кибербезопасности для подсистемы РЗА ЦПС, на котором можно было бы обучать модель (по крайней мере в открытых источниках);
- классов угроз больше двух, и они могут пересекаться, соответственно сложность модели сильно возрастает;
- выбор моделей МО для достижения поставленной цели – нетривиальная задача.

Аналогичные проблемы с методами кластеризации и дообучения моделей МО. Для первого необходимо провести разделительную кластеризацию, однако нет набора данных. Для последнего дополнительно возникает проблема с тем, что не существует моделей специально обученных для классификации киберугроз подсистемы РЗА ЦПС.

Подходы инженерии знаний при решении данной задачи не имеют таких проблем. А именно, системы, основанные на знаниях (экспертные системы (ЭС)). Экспертные системы позволяют накапливать и консолидировать знания экспертов об определенной предметной области и на их основе строить логические цепочки и получать ответы при формировании запросов. ЭС бывают различных архитектур из них выделяют две большие группы, разделенные по возможности учета временного фактора:

- статические (условия задачи не меняются в ходе ее решения);
- динамические (условия задачи могут меняться в ходе ее решения).

Динамические ЭС могут быть использованы для решения задач повышения ситуационной осведомленности по части событий информационной безопасности для диспетчеров объектов электроэнергетики при реализации предлагаемого в настоящей работе способа. Для этого необходимо, чтобы на объекте были установлены сенсоры безопасности и системы корреляции событий, и ЭС имела функционал обработки этих событий в реальном времени, чтобы на их основе можно было сделать вывод, например, о том, какой объект инфраструктуры скомпрометирован и к каким последствиям это может привести.

Статические экспертные системы могут быть использованы для моделирования угроз кибербезопасности на стадиях

проектирования объектов электроэнергетики и актуализации модели угроз. В рамках исследования в настоящей работе был разработан демонстрационный прототип статической экспертной системы, реализующий гибрибридный способ моделирования угроз, предложенный ранее, с базой знаний на основе семантической сети (онтологией).

Общая архитектура такой системы и источники знаний для нее приведены на Рис. 2.

В базу знаний в текущем эксперименте были заложены все данные из анализа воображаемой ЦПС, для которой формировалась частная модель угроз. В качестве физических последствий рассматривались отключения и повреждения силового оборудования, а в качестве воздействий – нарушения основных свойств подсистемы РЗА (чувствительность, селективность, быстродействие, надежность). Визуализация базы знаний, которая была получена при проведении эксперимента приведена на Рис. 3.

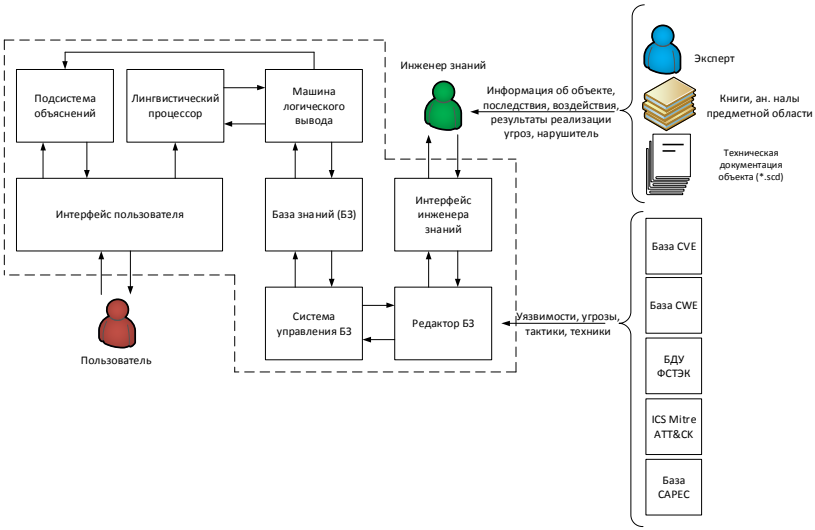


Рис. 2. Общая архитектура статической экспертной системы для МУиН.

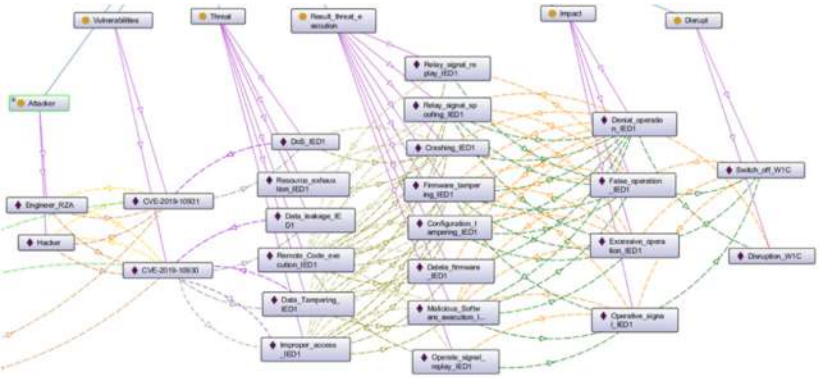


Рис. 3. Визуализация базы знаний.

Посредством разработанного прототипа экспертной системы была произведена обработка полученной базы знаний и таким образом сформирована частная модель угроз для воображаемой ЦПС в автоматизированном режиме.

Фрагмент модели угроз приведен в Таблице 1.

Данная модель угроз содержит описание нескольких возможных угроз кибербезопасности в соответствии предложенному в данном исследовании способу. Результаты разработки МУиН с помощью ЭС и вручную полностью совпали. Таким образом гипотеза о возможности использования ЭС для разработки МУиН подтверждена. Необходимо отметить, что по итогам моделирования было установлено, что одни и те же физические последствия могут быть вызваны реализацией разных киберугроз, и при этом не в каждом случае происходит нарушение основных свойств подсистемы РЗА, упомянутых выше. Это позволяет выдвинуть гипотезу, что для устойчивого функционирования подсистемы РЗА энергетического объекта недостаточно обеспечивать только основные ее свойства, а необходимо дополнительно обеспечивать и свойство кибербезопасности.

Таблица 1

Фрагмент частной модели угроз.

№	Последствие	Воздействие	Результат реализации угрозы	Кибер-угроза	Уязвимость	Нарушитель
1	Отключение ЛЭП	Излишнее срабатывание РЗА	Подмена прошивки	Подмена данных	CVE-2019-10930	Инженер РЗА
2	Отключение ЛЭП	Излишнее срабатывание РЗА	Подмена прошивки	Подмена данных	CVE-2019-10930	Внешний хакер
3	Отключение ЛЭП	Излишнее срабатывание РЗА	Подмена прошивки	НСД	CVE-2019-10930	Инженер РЗА
4	Отключение ЛЭП	Излишнее срабатывание РЗА	Подмена прошивки	НСД	CVE-2019-10930	Внешний хакер
5	Отключение ЛЭП	Излишнее срабатывание РЗА	Подмена конфигурации	Подмена данных	CVE-2019-10930	Инженер РЗА
6	Отключение ЛЭП	Излишнее срабатывание РЗА	Подмена конфигурации	Подмена данных	CVE-2019-10930	Внешний хакер
7	Отключение ЛЭП	Излишнее срабатывание РЗА	Подмена конфигурации	НСД	CVE-2019-10930	Инженер РЗА
8	Отключение ЛЭП	Излишнее срабатывание РЗА	Подмена конфигурации	НСД	CVE-2019-10930	Внешний хакер
9	Отключение ЛЭП	Излишнее срабатывание РЗА	Внедрение вредоносного ПО	Подмена данных	CVE-2019-10930	Инженер РЗА
10	Отключение ЛЭП	Излишнее срабатывание РЗА	Внедрение вредоносного ПО	Подмена данных	CVE-2019-10930	Внешний хакер

Выводы

Основными результатами исследования являются:

- Сформированная гипотеза о недостаточности обеспечения классических свойств подсистемы РЗА для ее устойчивого функционирования;
- Предложен способ моделирования угроз кибербезопасности на основе проекта методики МУиН

ФСТЭК России 2020 с учетом отраслевой специфики электроэнергетики;

- Продемонстрирована возможность использовать подходы инженерии знаний для моделирования угроз кибербезопасности подсистемы РЗА ЦПС;
- Разработан демонстрационный прототип экспертной системы, учитывающий возможную комбинаторику в детерминированных условиях;

Результаты данного исследования имеют возможность масштабирования при дальнейшем развитии за счет разработки референсных моделей угроз для каждого типа компонента подсистемы РЗА. Далее планируются работы по созданию действующего прототипа экспертной систем и его апробация на реальных объектах (в рамках НИОКР).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Strategic Buisiness Plan: официальное издание: утвержден IEC Technical Committee No. 57: Power systems management and associated information exchange от 29 ноября 2019.

2. В Сингапуре создается первая виртуальная электростанция: статья на интернет-сайте /В. Сидорович. – дата публикации 14.10.2019. – URL: https://medium.com/internet-of-energy/vpp-416fa87671f5. (дата обращения: 02.03.2020) – Текст: электронный.

3. Децентрализация системной надежности: статья на интернет-сайте /И. Чаусов. – дата публикации 23.01.2020. – URL:https://medium.com/internet-of-energy/https-medium-com-p-89bf0a444f2a-89bf0a444f2a (дата обращения: 02.03.2020) – Текст: электронный.

4. Региональные сети покупают услуги гибкости у потребителей энергии: статья на интернет-сайте / В. Сидорович. – дата публикации 27.11.2019. – URL: https://medium.com/internet-of-energy/northern-powergrid-1d82c816c6aa. (дата обращения: 02.03.2020) – Текст: электронный.

5. Гипер-персонализация — новое слово в торговле электричеством: статья на интернет-сайте / И. Чаусов. – дата публикации 05.02.2020. – URL: https://medium.com/internet-of-energy/ed04c55a46ae. (дата обращения: 02.03.2020) – Текст: электронный.

6. Интегрированный годовой отчет 2018: ПАО ФСК ЕЭС. - URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/GO%20FSK%20EES%202018.pdf . (дата обращения: 02.07.2019) – Текст: электронный.

7. Особенности проектирования системы РЗА при новом строительстве и реконструкции ЦПС: презентация / Леонтьев И.Ю., Гурьев А.В., Несмеянов Д.А.; ООО НПП «ЭКРА». – URL: http://digitalsubstation.com/wp-content/uploads/2019/08/ Osobennosti-proektirovaniya-sistem-RZA-TSPS.pdf (дата обращения: 02.08.2019) – Текст: электронный.

8. Д.Б. Гвоздев, М.А. Грибков, Опыт реализации цифровых подстанций в компании "Россети Московский регион": научно-технический журнал Электроэнергия. Передача и распределение; учредитель и издатель ООО «Кабель» – Москва, 2019 –№ 4(55) с.42-46. – ISSN 2218-3116. – Текст : непосредственный.

9. Концепция проекта «Цифровой РЭС». Опыт реализации : Янтарьэнерго.: презентация / Е. Повираев.; НТИ Энерджинет. – URL: https://digitalsubstation.com/wp-content/uploads/2017/11/Tavrida-Elektrik-EnergyNet-TSPS-Kontseptsiya-TSRES.pdf (дата обращения 02.08.2019) – Текст: электронный.

10. Impacts Analysis for Cyber Attack on Electric Power Systems: технический отчет / Jason E. Stamp, Randall A. Laviolette, Laurence R. Phillips [и др.]. – Альбукерк, Нью-Мексико: Sandia National Laboratories, 2009. – Текст : непосредственный.

11. Business Blackout. The insurance implications of a cyber attack on the US power grid: отчет об исследовании рисков/ Lloyd’s and the University of Cambridge Centre for Risk Studies – Кембридж, 2015. – Текст : непосредственный.

12. А.К. Моторин и В.А. Харламов, Варианты возможных векторов воздействия на оборудование РЗА в реальных условиях эксплуатации: сборник докладов конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем 2017», 25-28 апреля 2017. – С.-Петербург, 2017 – с. 896-899. – Текст : непосредственный.

13. Технические решения по РЗА, предлагаемые ПАО «Россети» в рамках создания «Цифровых подстанций»: презентация / В.С. Кириленков, С.Ю. Вергазов; ПАО Россети. – Москва, 2018. – URL: http://digitalsubstation.com/wp-content/uploads/2018/04/3.-Rosseti.pdf, (дата обращения: 30.03.2020). – Текст : электронный.

14. Пример экспертной системы по ИБ на базе онтологичекой модели: онлайн-доклад на конференции EnergyNet Con: видео-материалы на интернет-сайте YouTube/ Карантаев В.Г.; ФГБОУ ВО НИУ "МЭИ". – Москва, 2020. – URL: https://www.youtube.com/ watch?v=MEWS9lVEGWA. (дата обращения: 20.12.2020). – Текст. Изображение. Устная речь : электронные.

Авторы:

***Карпенко Владислав Игоревич**, НИУ МЭИ, аспирант, ИЭЭ каф. РЗиАЭ, e-mail: vladislav.karpenko.97@mail.ru.*

***Карантаев Владимир Геннадьевич**, Центр НТИ МЭИ, старший преподаватель, e-mail: vladimir.karantaev@gmail.ru.*

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ ДЛЯ СЕТЕВОГО АНАЛИЗАТОРА ДАННЫХ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

Кокшев П.А., ООО «НИЦ ЧЭАЗ», Чебоксары, Россия. E-mail: p.kokshev@cheaz.ru

***Аннотация:** Данный доклад освещает механизм и принципы работы сетевого анализатора данных, предназначенной для применения на цифровой подстанции.*

***Ключевые слова:** IEC 61850, цифровая подстанция, SCL, протоколы передачи данных, интеллектуальное электронное устройство (ИЭУ), нейронная сеть, информационная безопасность.*

Введение

С развитием цифровых устройств и внедрением новых протоколов передачи данных начали формироваться новые требования к цифровым системам и объединяющим их сетям. Кроме очевидных требований к производительности и надежности, становятся актуальными и требования по информационной безопасности.

Наиболее распространенной угрозой является сетевая атака, так как успешное вторжение в сеть открывает для злоумышленника огромные возможности для хищения, порчи и искажения данных. Все эти действия могут привести к сбоям, компрометации информации и нарушению функционирования системы.

В статье описана необходимость применения сетевого анализатора данных и общий принцип его работы.

Информационная безопасность

Согласно приказу Федеральной службы по техническому и экспортному контролю от 25 декабря 2017 г. №239 «Об

утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» в значимых объектах в зависимости от их категории значимости и угроз безопасности информации должны быть реализованы определенные организационные и технические меры. В части анализа сетевого трафика к такой мере относится аудит безопасности управления доступом АУД.5 «Контроль и анализ сетевого трафика» [1].

Анализ данных

Анализ данных представляет собой процесс сбора всех данных, проходящих через определенный сетевой интерфейс. Благодаря чему появляется возможность мониторинга сети и перехвата пакетов, проходящих через заданную сеть. Это открывает широкие возможности для контроля состояния ее узлов.

Важно отметить, что кроме выполнения своей основной функции мониторинга состояния сети, анализатор данных цифровой подстанции способен анализировать информационные потоки в сети на соответствие с файлом описания конфигурации подстанции (Substation Configuration Description). Данный файл содержит информацию обо всех устройствах, их сетевые настройки, а также данные об информационных потоках между этими устройствами.

Применение сетевого анализатора данных позволяет выявлять неправильные пакеты и аномальные инциденты на подстанции. Таким образом, появляется возможность проверить правильность настройки конфигурации оборудования на подстанции. Что так же облегчает интеграцию нового устройства в уже готовую систему, путем проверки соответствия публикуемых им информационных потоков с файлом конфигурации подстанции [2].

Применение нейронной сети

Задача сетевого анализатора состоит в идентификации и реагировании на подозрительную деятельность внутри сети и на неправильную работу подключенных в эту сеть устройств. Для этих целей разумно применять алгоритмы нейронных сетей, что

позволит:

1) выявить сетевые атаки в режиме реального времени;
2) по набору признаков определить тип атаки и ее характеристики;
3) определить неправильное функционирование устройств сети;
4) предупредить аномальные явления и противодействовать им.

Основное преимущество применения нейронной сети для выявления вторжений — гибкость, которую предоставляет эта технология. Нейронная сеть может анализировать данные из сети, даже если данные являются неполными или искаженными. Кроме того, она способна выполнять анализ с данными в нелинейном виде. Обе эти характеристики важны в сетевой среде, где получаемая информация подвержена случайным системным ошибкам.

Практическая реализация

Сетевой анализатор выступает, как отдельная программа. Для возможности анализа всех узлов подстанции, она должна иметь доступ, как к шине процесса, так и шине подстанции.

На рис. 1 приведен пример интерфейса программы, в данном случае это процесс просмотра и анализа информационных потоков цифровой подстанции.

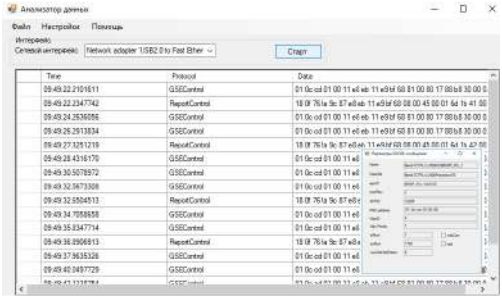


Рис. 1. Пример работы программы

Как уже было сказано, в файле конфигурации подстанции содержится вся информация о сетевых параметрах всех

устройств на объекте. С помощью этой информации создается белый список IP-адресов и MAC-адресов. Если в сети появляется устройство с IP-адресом или MAC-адресом, которого нет в списке, программа сигнализирует об этом путем выделения цветом неправильное сообщение. В данном случае красный цвет означает то, что устройства, посылающего данные пакеты, нет в списке разрешенных устройств, а желтый цвет – что устройство есть в списке разрешенных устройств, но неправильно сконфигурировано. Пример анализа показан на рисунке 2.

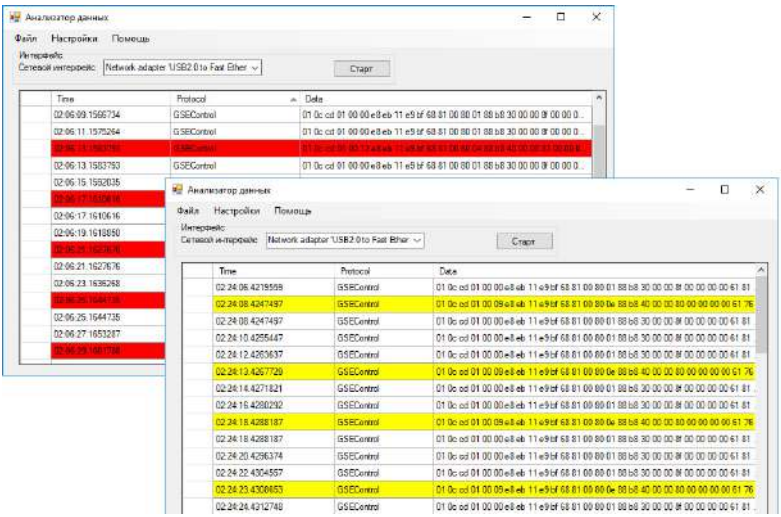


Рис. 2. Пример анализа данных

Заключение

Разработанное программное обеспечение позволяет выявлять сетевые атаки в режиме реального времени, осуществлять анализ данных в сети на соответствие проекту и файлу конфигурации подстанции и предупредить возможные негативные последствия в случае возникновения сбоев в работе оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Федеральной службы по техническому и экспортному контролю от 25 декабря 2017 г. № 239 «Об утверждении требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/1592-prikaz-fstek-rossii-ot-25-dekabrya-2017-g-n-239 (дата обращения 15.02.2021).

2. *Кокшев, П.А.* Поддержка протокола «МЭК 61850-8-1 (MMS)» в SCADA-системе КВАНТ-ЧЭАЗ / П.А. Кокшев, А.А. Андреева // Информатика и вычислительная техника: сб. науч. трудов. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. С. 130-134.

Авторы:

Кокшев Павел Андреевич*, ООО «НИЦ ЧЭАЗ», инженер-программист 1 кат., ЧувГУ, факультет информатики и вычислительной техники, 2020 – магистратура ЧувГУ по специальности «Математическое и программное обеспечение автоматизированных систем», p.kokshev@cheaz.ru.*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПО ДЕТАЛЬНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В БОЛЬШИХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Шамис М.А., Иванов Ф.А., Васильев С.П., Zakonjsek J. (Законьшек Я.), ЗАО "ЭнЛАБ", г.Чебоксары, РФ, E-mail: mail@ennlab.ru

Аннотация: *Доклад посвящен обзору пятой версии программного комплекса PSCAD. Нововведения и программные усовершенствования, в первую очередь, позволили существенно увеличить размер моделируемой энергосистемы для исследования в ней электромагнитных и электромеханических переходных процессов, включая быстродействующие процессы в силовых полупроводниковых преобразователях. Новые возможности позволяют проводить исследования центральных энергосистем регионов и стран с учетом новых условий при подключении многочисленных объектов малой генерации.*

Ключевые слова: *Симулятор больших электроэнергетических систем, PSCAD V5, моделирование переходных процессов.*

Введение

Программный симулятор PSCAD для моделирования переходных процессов в электроэнергетических системах (ЭЭС) за последние годы приобрел большую популярность среди специалистов-электроэнергетиков. Этому способствуют следующие его качества: наглядность, информативность, простота использования, быстрота получения решения, максимальная ориентированность на решение электротехнических задач и возможность моделирования ЭЭС практически любой сложности. Возможности PSCAD стали широко востребованы учащимися вузов при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ. В первом квартале 2021 года вышла новая версия симулятора – PSCAD V5. Группа разработчиков из компании Manitoba Hydro International

провела большую работу по расширению возможностей симулятора, улучшению процесса вычислений, а также учла запросы пользователей PSCAD из более чем 90 стран [1].

Моделирование больших энергосистем

Для упрощения процесса моделирования больших ЭЭС команда разработчиков PSCAD представила следующие вспомогательные приложения:

- PRSIM™ – программная среда импорта моделей из PSS/E и PowerFactory, симуляторов для анализа режимов работы ЭЭС. При импорте моделей из указанных симуляторов в PSCAD переносятся данные о динамических характеристиках элементов ЭЭС, сведения о симметричных составляющих и протяженности ЛЭП, информация об эквивалентных сопротивлениях участков сети и потокораспределениях в установившихся режимах.
- PSCAD Initializer –программная среда расчета установившегося режима ЭЭС для инициализации модели PSCAD в первоначальный момент симуляции. Это позволяет начинать симуляцию с устойчивого предаварийного состояния ЭЭС, в которой напряжения на шинах, фазовые сдвиги, состояния регуляторов возбуждения и частоты и многие другие параметры заранее выставлены в устойчивые положения.
- Enerplot™ - среда автоматизации обработки результатов расчетов по заданному сценарию. Enerplot может легко обрабатывать большие объемы данных и имеет мощный математический аппарат, систему визуализации графиков, удобные инструменты для сопоставления и сравнения кривых.

Новые возможности PSCAD V5

В программном комплексе PSCAD V5 оптимизирован процесс вычислений и расширены возможности выполнения их в параллельном режиме, увеличено число возможных элементов, модулей, каналов передачи данных и многое другое. Хотелось бы отметить следующие нововведения:

1. Добавлен модуль автоматизации испытаний по сценариям

моделирования с поддержкой языка Python. Пользователи симулятора получили дополнительные возможности обработки данных и формирования отчетов.
2. Реализован новый двоичный формат сохранения данных. Это позволяет компактно сохранять в одном файле результаты расчетов, включая результаты многоразовой симуляции.
3. Введена многоязыковая поддержка, в том числе на кириллице, для оформления комментариев на полях модели.
4. Добавлен API и появилась возможность совместной работы внешними программными приложениями – режим сосимуляции. Например, симулятор ETAP может выполнять расчеты большой ЭЭС с шагом 1-2 мс в фазных координатах, а подключенный к нему симулятор PSCAD моделирует работу силового электронного преобразователя в мгновенных значениях и с шагом 1 мкс. Такой подход к моделированию позволяет выполнять анализ устойчивости сложных ЭЭС, содержащих системы переменного и постоянного тока.
5. Улучшено моделирование воздушных и кабельных линий электропередач (ЛЭП). Как и раньше, симулятор автоматически рассчитывает взаимоиндукцию в коридоре ЛЭП, содержащем до 30 проводников, с учетом их фазочастотных характеристик. Добавлена возможность разделения одной ЛЭП на участки с произвольным соотношением их длины, чтобы имитировать КЗ вдоль линии.
6. Добавлены новые возможности при рисовании схем: тянущиеся связи, огибающие переходы в местах пересечения, новый дизайн окна управления параметрами компонентов и проекта целиком, улучшена анимации состояний, окон графиков, меню навигации. Повышено качество копируемых в отчет изображений модели.
7. Введен новый тип переменных для комплексных чисел, который поддерживается в библиотеке математических функций.
8. Появилась возможность многократно сократить время симуляции за счет использования до 64 параллельных вычислений на многоядерных процессорах одного или нескольких компьютеров. Технология параллельных вычислений особенно эффективна при симуляции больших ЭЭС и при многократной симуляции одной и той же модели с различными

начальными условиями – MultiRun.
9. Расширена библиотека компонентов и добавлены элементы: трансформаторы, однофазные электродвигатели, насыщаемые реакторы, новые системы возбуждения генераторов по стандарту IEEE 2016 г, мостовые схемы электронных ключей и системы формирования импульсов зажигания для них, множество элементов для систем управления и преобразования и многое другое.
10. Важным для пользователей моментом PSCAD V5 является то, что стоимость новой профессиональной версии PSCAD V5 повысилась незначительно, а вузы могут бесплатно перейти с PSCAD 4 на PSCAD V5 на имеющихся у них образовательных лицензиях.

Заключение

Обновленный симулятор PSCAD V5 существенно расширил границы применения имитационного моделирования и позволяет выполнять исследования быстрых переходных процессов в единых ЭЭС целых стран. Для этого PSCAD V5 получил целый ряд новых вспомогательных приложений, функций и возможностей. Пользовательская библиотека симулятора была заметно расширена, и в ней появились новые компоненты и модели электрооборудования, позволяющие повысить уровень проводимых исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *What's* New in PSCAD v5.0.0. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.pscad.com/knowledge-base/article/638 (дата обращения: 26.03.2021).

Авторы:

Шамис Михаил Александрович*, к.т.н., генеральный директор ЗАО "ЭнЛАБ". E-mail: mail@ennlab.ru.*

Иванов Федор Анатольевич*, заместитель технического директора ЗАО "ЭнЛАБ".*

Васильев Степан Петрович*, научный сотрудник ЗАО "ЭнЛАБ".*

Законьшек Янез (Zakonjsek J.)*, технический директор ЗАО "ЭнЛАБ".*

КОМПЛЕКС ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА В ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Иванова Т.В., ООО «Интеллектуальные Сети», г. Чебоксары, РФ. ivanova_tatyana_99@mail.ru

Никандров М.В., ООО «Интеллектуальные Сети», г. Чебоксары, РФ, директор, к.т.н., nikandrov@igrids.ru

Белебенцев Д.Э., Чебоксарский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», г. Чебоксары, РФ. belebentsevdanil@mail.ru

Аннотация: *В работе представлен программный комплекс обучения персонала электроэнергетического объекта в виртуальной реальности. С его помощью возможно тестирование устройств РЗА, что значительно снизит финансовые затраты на проведение опытных испытаний, время на обучение сотрудников и сократит возможные несчастные случаи при реализации работ на опасных специализированных объектах.*

Ключевые слова: *виртуальная реальность, 3D-тренажер, электроэнергетика.*

Введение

В энергетике наиболее очевидным и востребованным выглядит спектр решений виртуальной реальности (VR) для обучения сотрудников. Обучение в виртуальной реальности позволяет погрузить работника в среду, максимально приближенную к реальной, для отработки навыков безопасного поведения на промышленных объектах и действий эксплуатационного персонала при ликвидации технологических нарушений. 3D – тренажер виртуальной реальности даёт возможность смоделировать ситуации, которые при обычных тренировках в реальности создать нельзя: разлив масла, нефтепродуктов, загорание, разрушение оборудования и т. п.

Виртуальная реальность – это искусственно созданная информационная среда, подменяющая обычное восприятие окружающей действительности информацией, генерируемой

различными техническими средствами. Причем уровень развития этой искусственной информационной среды может быть различным в зависимости от того, в какой мере разработчику удастся задействовать те структуры человеческой организации, которые отвечают за связь с внешним миром. Логику взаимодействия объектов в виртуальном мире мы опять же можем соотнести с логикой взаимодействия действительных объектов, и снова результат будет в той степени впечатляющим, в какой разработчикам искусственной среды удастся сымитировать действительный мир.

В целом виртуальная реальность – это технология человеко-машинного взаимодействия, которая обеспечивает погружение пользователя в трехмерную интерактивную информационную среду.

Процессы, происходящие в сфере электроэнергетики сложные и опасные, требуют тщательной подготовки обслуживающего персонала, действия которого должны быть доведены до автоматизма, для исключения возможных ошибок, приводящих как к поломкам, так и к травмам. Обучение новых сотрудников требует значительных экономических и временных затрат, которые не каждый работодатель может предоставить. На помощь в освоении персоналом необходимых навыков приходит технологии виртуальной реальности. При помощи VR-системы: отрабатывается порядок действий в режиме чрезвычайной ситуации; достигается оптимизация временных затрат на проведение срочного ремонта; отрабатывается демонтаж/монтаж элементов оборудования.

На данный момент используется VR шлем HTC Vive, оснащенный датчиками, обеспечивающими максимально точное определение положения пользователя, даже при вращении на 360° вокруг своей оси. Также, чтобы пребывание в VR было полностью реалистичным шлем оборудован QLED дисплеем с углом обзора 110°. Подобные характеристики позволяют взаимодействовать с объектами синтезированного компьютером мира, исследовать пространство и примерить на себя новые роли.

Уже разработана сцена с 3D-моделью релейной защиты в межплатформенной среде разработки компьютерных игр Unity.

Сама модель была сделана в приложении для создания трёхмерной компьютерной графики Blender. Текстуры создавались в приложении Substance Painter 2017, используя метод Physically based rendering, который позволяет отображать объекты более достоверно. При самом рендере использовался blender ivy 2.8. На языке программирования C# написаны скрипты, которые позволяю взаимодействовать с объектами виртуальной реальности: открывать и закрывать двери, крутить переключатели.

Целью данной разработки является повышение качества обучения персонала за счет более глубокого погружения обучаемого в виртуальную среду, приближенную к реальным условиям. Повышение надежности и безопасности эксплуатации электроустановок за счет формирования у персонала профессиональных навыков, умений принятия и выполнения решений при обслуживании электроустановок в условиях реального времени.

В целом экспериментальные исследования подтвердили, что виртуальная реальность (специальные дидактические программы) существенно влияет на познавательные процессы личности. Это характерно как для молодежи, взрослого населения, так и для людей пожилого и даже старческого возраста.

Статья Селиванова В.В. и Селивановой Л.Н., «Эффективность использования виртуальной реальности при обучении в юношеском и взрослом возрасте» [1], которые провели теоретических и эмпирических исследования и сформулировали следующие выводы:

1. Обучающие программы, созданные в VR, прежде всего стимулируют мышление человека. VR способствует прогрессивному формированию как процессуальных, так и операциональных характеристик мышления, а также развивает формы мыслительной активности. Данное влияние, в конечном итоге, сказывается на более успешном решении испытуемыми задач.

2. Образы VR, когда они включены в качестве содержания, компонента задачи, существенно сказываются на повышении креативности (количества коллатералей), стимулируют

процессуальные характеристики мышления.

3. Работа в обучающих VR-программах улучшает традиционные показатели образной кратковременной памяти, наблюдательности, устойчивости, концентрации внимания, способности к обобщению и классификации, способствует повышению поленезависимости (когнитивный стиль).

4. Развивающий эффект дидактических программ в VR определяется трехмерным изображением познаваемых объектов, широкой возможностью осуществления действий с предметами (анимацией), эффектом присутствия, интерактивностью ситуации, осуществлением визуализации абстрактных моделей и др.

5. В обучении за счет использования информационных систем VR резко увеличивается субъектность как учителя, так и учащегося, расширяются границы реализации принципов наглядности и доступности, включенного обучения, связи обучения с жизнью, ресурса эмоционального воздействия на ученика.

6. Использование VR в обучении, очевидно, имеет и негативные моменты. Например, «сверхобразная», наглядная подача содержания образования (при неправильном построении) может редуцировать развитие абстрактных понятий, символического мышления.

7. Обучающие виртуальные программы не могут полностью заменить преподавание в учебных заведениях (потому что в итоге представляют собой имитацию реальных действий и объектов в информационном пространстве), их целесообразно широко использовать при изучении наиболее сложных тем различных предметов, а также для тренинга профессиональных навыков в различных видах деятельности.

Ссылаясь на исследование авторов вышеупомянутой статьи, в работе которой подчеркивается целесообразность использования обучающих программ виртуальной реальности в обучении школьников, появилась идея проведения исследования на людях более взрослого возраста, а именно на студентах Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова.

В недалеком будущем виртуальный 3D-тренажер будет

разработан и представлен стендами ДЗТ (дифференциальная защита трансформатора), ДЗЛ (дифференциальная защита линии), ТНЗНП (токовая направленная защита нулевой последовательности), ДФЗ (дифференциально фазная защита), ГЗТ (газовая защита трансформатора), автоматика УРОВ (устройство резервирования выключателя), КПН (контроль пуска по напряжению), АУВ (автоматика управления выключателем).

Крупные предприятия наукоёмких отраслей давно присматриваются к технологиям виртуальной и дополненной реальности, и энергетика не исключение. В 2018 году инвестиции в проекты на основе промышленных VR/AR-решений в России составили около 1,6 млрд рублей. В ряде крупнейших индустриальных компаний России сейчас тестируются платформы дополненной реальности и решения ассистинговой реальности, используется обучение сотрудников с помощью VR-тренажёров.

В ближайшие годы этот тренд будет только усиливаться. Согласно совместному исследованию CROC VR и аналитического центра TAdviser, даже по пессимистичным оценкам, при среднегодовом темпе роста в 55% объём российского рынка промышленных VR/AR-решений в 2022 году может составить 9,2 млрд рублей. По наблюдениям TAdviser, практически все компании энергетической, промышленной, нефтегазовой, горнодобывающей отраслей в той или иной степени сегодня интересуются и экспериментируют с технологиями VR/AR.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Селиванов В.В. и Селиванова Л.Н.* Эффективность использования виртуальной реальности при обучении в юношеском и взрослом возрасте: Непрерывное образование: XXI век. – 2015. – Вып. 1 (9).

Авторы:

***Иванова Татьяна Валерьевна**, ООО «Интеллектуальные Сети»/Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, студент, ivanova_tatyana_99@mail.ru*

***Никандров Максим Валерьевич**, ООО «Интеллектуальные Сети», директор, к.т.н, nikandrov@igrids.ru*

***Белебенцев Данил Эдуардович**, Чебоксарский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», студент, belebentsevdanil@mail.ru*

ЦИФРОВОЙ ПОЛИГОН ИГЭУ

Лебедев В.Д., ФГБОУ ВО «ИГЭУ им. Ленина», Иваново, Российская Федерации. E-mail: vd_lebedev@mail.ru

Петров А.Е., ФГБОУ ВО «ИГЭУ им. Ленина», Иваново, Российская Федерации. E-mail: usetheforcealex@yandex.ru

Иванов Ф.А., ЗАО «ЭнЛАБ», Чебоксары, Российская Федерации. E-mail: ivanov@ennlab.ru

Jennifer(Xinru) Liu, PONOVO Power Co. LTD, Пекин, Китайская Народная Республика. E-mail: jennifer.liu@relaytest.com

Gregory Jackson, RTDS Technologies Inc., Виннипег, Канада. E-mail: gjackson@rtds.com

***Аннотация:** В докладе описывается создание инструментария для снятия характеристик трансформаторов тока (ТТ), исследования переходных процессов в сетях с изолированной нейтралью и организация работы учебного стенда релейной защиты и автоматики (РЗиА) цифровой подстанции (ЦПС) архитектуры 3-го типа на основе RTDS. Отдельное внимание уделяется вопросу сбора данных и анализа переходных процессов для изучения насыщения традиционных ТТ, феррорезонансных явлений и работы коммутационной аппаратуры в условиях цифрового шторма.*

***Ключевые слова:** релейная защита, цифровая подстанция, RTDS, 4Q усилители, насыщение, трансформаторы тока, феррорезонанс, МЭК 61850*

Актуальность

Широко известные случаи неправильной работы устройств РЗ стали причиной инициализации ряда работ, включая разработку новых требований и технических условий на ТТ. Для ряда крупных энергообъектов РФ стал обязательным мониторинг состояния ТТ и оценка времени до насыщения ТТ при КЗ. В соответствие с требованием из письма АО «СО ЕЭС»

необходимо произвести расчет времени до насыщения ТТ на примерно 100 энергообъектов до 31.12.2020.

Феррорезонансные явления приводят к повреждению оборудования и развитию аварийных ситуаций в электроэнергетических системах. В нормативных документах [1, 2] в качестве основного метода предотвращения феррорезонансных явлений предлагается использование антирезонансных трансформаторов напряжения, которые не должны вызывать устойчивого феррорезонанса. Однако, зафиксированы случаи возникновения феррорезонансных явлений при эксплуатации некоторых типов антирезонансных трансформаторов [3].

Согласно установленным стандартами [4] нормам и требованиям к методикам проверки совместимости оборудования ЦПС и при участии АО «РАДИУС Автоматика» на базе полигона «Цифровая подстанция» идёт разработка учебно-методической документации для создания комплекса ЦПС архитектуры третьего типа. Огромное внимание уделяется обучению работе с оборудованием ЦПС в рамках образовательных программ ВУЗа.

Актуальным является осваивание полигона, позволяющего проводить научно-исследовательские работы различных направлений. Моделирование работы электроэнергетической системы (ЭЭС) осуществляется с использованием комплекса RTDS, функционал которого позволяет не только безопасно управлять ходом эксперимента, но и обрабатывать полученные данные по обратной связи при подключении к высоковольтной зоне.

Использование полигона

В рамках выполнения НИОКР по определению времени до насыщения ТТ для нужд ПАО «ФСК ЕЭС» был проведён ряд исследований с целью уточнения параметров и характеристик ТТ. Результаты работ могут быть использованы для проведения типовых автоматизированных испытаний ТТ с целью определения времени до насыщения на различного рода объектов электроэнергетики [5].

Цикл работ, посвященный физико-математическому

моделированию феррорезонансных явлений с использованием связки ПАК RTDS и 4Q усилителей производства PONOVO, является продолжением разработки методики, позволяющей проводить испытания антирезонансных и традиционных конструкций трансформаторов напряжения 6-220 кВ с целью определения возможности возникновения при их работе феррорезонансных явлений.

Следует отметить, что явление феррорезонанса до конца не изучено и требует дальнейшего исследования. Пока в эксплуатации находиться оборудование, которое подвержено влиянию феррорезонанса требуется знать безопасную зону, в котором данное оборудование может устойчиво работать. Разработанные методики апробированы в Научно-образовательном центре «Высоковольтные цифровые измерительные преобразователи и трансформаторы».

Разработка учебно-методической документации для создания обучающего комплекса ЦПС архитектуры третьего типа стала возможным благодаря непосредственному участию АО «РАДИУС Автоматика». Так, по задумке обеих сторон, силовая часть ЦПС моделируется в программе RSCAD и уже согласно 8 и 9 разделам IEC 61850 организуется связь с физической частью комплекса. В физическую часть комплекса входят терминалы основных и резервных защит оборудования ЦПС 110/10 кВ, блоки преобразования дискретных сигналов (ПДС), а также промышленные коммутаторы.

По завершению создания комплекса планируется изучение работы сетевого оборудования в условиях, максимально приближенных к реальным. В качестве анализаторов сетевого трафика имеется такое оборудование как DANEO 400 и PNS630 производства Omicron и PONOVO соответственно.

Заключение

Статья посвящена основным направлениям использования полигона «Цифровая подстанция» в «ИГЭУ им. В.И. Ленина». Представлены результаты работы и перспективы исследований по трем основным темам: снятие характеристик ТТ и определение времени до их насыщения; исследования переходных процессов в сетях с изолированной нейтралью;

разработка учебного стенда РЗиА ЦПС архитектуры третьего типа. Центральным элементом трех работ является комплекс моделирования в режиме реального времени RTDS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО 56947007-29.240.10.191-2014 «Методические указания по защите от резонансных повышений напряжения в электроустановках 6-750 кВ».

2. РД 34.20.517-87 «Методические указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110 - 500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения».

3. *Макаров А.В.* Об эффективности функционирования антирезонансных трансформаторов напряжения // Энергоэксперт. 2013. № 6.

4. СТО 56947007-29.240.10.253-2018 «Типовые методики испытаний компонентов ЦПС на соответствие стандарту МЭК 61850 первой и второй редакций».

5. Simulation of Cable Current Transformers for Protection Against Single-Phase Ground Fault in 6–10 kV Networks [Электронный ресурс] / *В.А. Шуин, А.Е. Евдаков, Г.А. Филатова, М.Р. Батманов* // 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE): сборник трудов конференции, Mar 12, 2020 - Mar 14, 2020, Moscow. — New York, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc..— 2020

Авторы:

Лебедев Владимир Дмитриевич*, ФГБОУ ВО «ИГЭУ им. Ленина», заведующий кафедрой АУЭС, в 1993 году закончил кафедру АУЭС в ИГЭУ им. В.И.Ленина, в 1997 году получил кандидата технических наук: «Разработка магнитотранзисторных датчиков тока для систем защиты и измерений», ИГЭУ, 05.14.02 Электростанции и электроэнергетические системы, e-mail: vd_lebedev@mail.ru*

Петров Алексей Евгеньевич*, ФГБОУ ВО «ИГЭУ им. Ленина», магистр второго года обучения на кафедре АУЭС в ФГБОУ ВО «ИГЭУ им. Ленина», в 2019 году получил диплом бакалавра закончив кафедру АУЭС в ФГБОУ ВО «ИГЭУ им. Ленина», e-mail: usetheforcealex@yandex.ru*

Иванов Фёдор Анатольевич*, ЗАО «ЭнЛАБ», заместитель технического директора, e-mail: ivanov@ennlab.ru*

***Jennifer(Xinru) Liu**, PONOVO Power Co. LTD, директор по международным продажам, e-mail: jennifer.liu@relaytest.com*
***Gregory Jackson**, RTDS Technologies Inc., P.Eng. Senior Simulation Engineer, M.Sc.E.E, e-mail: gjackson@rtds.com*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ДЛЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ С УЧЁТОМ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ

Смирнов С.Ю., Наумов И.А., Седова М.С., Шивиров А.В.
ОАО «ВНИИР», Чувашский государственный университет, Россия, г. Чебоксары. E-mail: syusmirnov@vniir.ru

***Аннотация:** выбор трансформаторов тока (ТТ) только по значению погрешности в установившемся режиме короткого замыкания (КЗ) не учитывает погрешности, возникающие в переходном режиме КЗ. Не учет данного вопроса может приводить к неправильной работе быстродействующих систем релейной защиты (РЗ). Вопрос координации РЗ и ТТ в переходном режиме является актуальной задачей.*

***Ключевые слова:** трансформаторы тока, время правильной трансформации, релейная защита, насыщение трансформатора тока.*

Введение

На сегодняшний день значительная часть ТТ, эксплуатируемых на объектах электроэнергетики Единой Электроэнергетической Системы Российской Федерации (ЕЭС РФ) и используемых для целей РЗ, принадлежат к классу точности P (Protection) [1]. Выбор ТТ класса P выполняется с учётом максимальной полной погрешности (5% или 10%) при токе номинальной предельной кратности в установившемся режиме. Анализ крупных аварий, произошедших за последнее десятилетие на объектах ЕЭС РФ по причине неправильной работы систем РЗ, показал, что устоявшаяся методика выбора ТТ не всегда позволяет обеспечить корректную работу устройств защиты, поскольку не учитывает особенностей поведения ТТ в переходном режиме КЗ, а также не учитывает наличие остаточной магнитной индукции. В связи с этим, Министерством энергетики РФ было направлено письмо № ЧА-3440/10 от 02.04.2019 «О мерах по недопущению неправильной работы

устройств релейной защиты» с рекомендациями по выполнению расчётов времени до насыщения ТТ и применению специализированных мероприятий [2].

Современные требования к выбору трансформаторов тока для целей релейной защиты

К наиболее распространенным мероприятиям, способствующим корректному функционированию устройств РЗ в режимах КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ, относятся:

- снижение нагрузки на вторичные цепи ТТ;
- усовершенствование алгоритмов функционирования защит;
- замена ТТ.

На данный момент, методология выбора ТТ в ЕЭС РФ определена в нормативных документах [3, 4]. В основе методики выбора ТТ для РЗ лежит определение коэффициента переходного процесса в момент времени, соответствующий требованиям, предъявляемым заводами-изготовителями устройств РЗ в части времени правильной трансформации. Для большинства микропроцессорных защит требуемое время правильной трансформации должно составлять не менее 10-25 мс (исключение составляют защиты, функционирующие на основе мгновенных выборок тока, для которых значение может быть ограничено 3-5 мс). На рисунке 1 представлены примеры построения зависимостей коэффициента переходного режима $К_{пр}$ при различных начальных условиях возникновения КЗ и определение времени до насыщения ТТ.

В большинстве случаев расчетные параметры ТТ, предполагаемых на замену существующим,

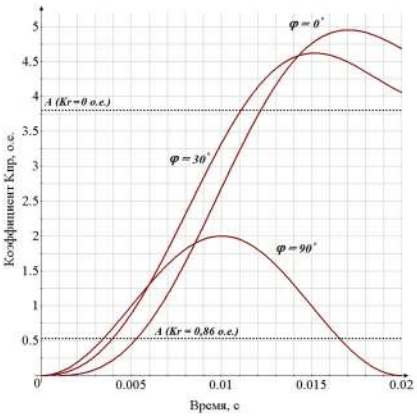


Рис. 1. Определение времени до насыщения ТТ с применением $К_{пр}$

оказываются завышенными (в частности, это приводит к увеличению габаритных размеров ТТ). Причиной этому являются большие кратности токов КЗ, а также наличие в сердечнике остаточной магнитной индукции, совпадающей по знаку с апериодической составляющей тока КЗ. Согласно [4] значение остаточной магнитной индукции может достигать 0.86 о.е. Наличие остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ может приводить к значительным погрешностям при повторном включении на КЗ, что в свою очередь приведет к неправильной работе систем РЗ. Значение остаточной индукции ТТ определяется его конструктивными особенностями.

Характеристики ТТ с немагнитными зазорами

По характеристикам в переходном режиме стандартом [1] определены следующие классы ТТ: TPZ, TPY, TPX. ТТ классов TPZ, TPY, PR имеют ограничения по значению остаточной индукции за счет наличия воздушного зазора в магнитопроводе. На рисунке 2 приведены характеристики коэффициента переходного режима в цикле автоматического повторного включения (АПВ) для ТТ различных классов.

В связи с этим требования к габаритным размерам ТТ могут быть снижены, поскольку, в большинстве случаев, значение остаточной индукции в сердечнике ТТ выступает определяющим фактором при оценке минимального времени правильной трансформации тока.

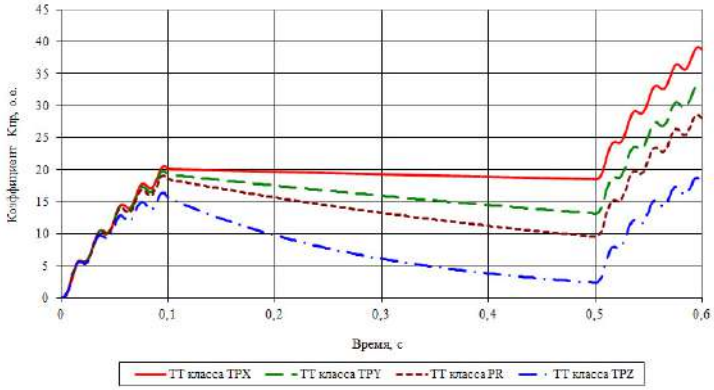


Рис. 2. Характеристика $К_{пр}$ в цикле АПВ

Заключение

Рассматриваемый в докладе вопрос относится к общей задаче координации систем РЗ и ТТ. Актуальность данной задачи для отечественных производителей РЗ и ТТ объясняется тем, что, в перспективе, возможен переход от «традиционных» методик выбора ТТ классов Р к разрабатываемым в настоящее время стандартам, учитывающим применение ТТ с немагнитными зазорами. В докладе приведены результаты проведенных исследований, выполненных на имитационных моделях ТТ различного класса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC 61869-2(2012). Instrument transformers – Part 2: Additional requirements for current transformers, 2012. – 144 P.

2. Письмо Министерства Энергетики РФ №ЧА-3440/10 от 02.04.2019 «О мерах по недопущению неправильной работы устройств релейной защиты».

3. ПНСТ 283-2018. Трансформаторы измерительные. Часть 2. Технические условия на трансформаторы тока. Введен с 01.01.19. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 42 с.

4. ГОСТ Р 58669-2019. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Введен с 19.11.19. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 58 с

Авторы:

Наумов Иван Андреевич*, студент 2-го курса магистратуры факультета энергетики и электротехники ФГБОУ «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». E-mail: ianautov@vniir.ru.*

Смирнов Сергей Юрьевич*, студент 2-го курса магистратуры факультета энергетики и электротехники ФГБОУ «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». E-mail: syusmirnov@vniir.ru.*

Седова Мария Сергеевна*, студентка 4-го курса факультета энергетики и электротехники ФГБОУ «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». E-mail: mssedova@vniir.ru.*

Шивиров Артем Викторович*, инженер 1-ой категории ОАО «ВНИИР», закончил специалитет факультета энергетики и электротехники ФГБОУ «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». E-mail: ashivirov@vniir.ru.*

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 4

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЭНЕРГОСИСТЕМ, РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА В СЕТЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ, НАДЕЖНОСТЬ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ 5

Лямец Ю.Я., Никонов И.Ю. (ООО «Релематика»)
Распознавание поврежденного ответвления при одностороннем наблюдении линии электропередачи 5

Петров В.В. (ООО «НИЦ ЧЭАЗ»)
Анализ функционирования дистанционной защиты в тяговой сети железной дороги 10

Кочетов И. Д., Лямец Ю. Я., Макашкин Ф. А., Петряшин И.Е. (ООО «Релематика»)
Применение локальных составляющих в алгоритмах противоаварийной автоматики для устранения кратковременных нарушений электроснабжения в питающих сетях 13

Иванов Н.Г., Глазырин А.В., Кудряшова М.Н., Степанова Д.А. (Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)
Методы обнаружения витковых замыканий в обмотке ротора синхронного генератора 18

Александрова Т.В. (НПП «Динамика»)
Проверка терминалов релейной защиты и реклоузеров с низковольтными входами 25

Никитина А.Н., Петров В.С., Антонов В.И., Наумов В.А. (Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)
Прецизионное определение электрического центра качания в электрической сети 30

Кочетов И. Д., Лямец Ю. Я., Макашкин Ф. А. (ООО «Релематика»)
Теоретические и прикладные аспекты выделения локальной составляющей наблюдаемого процесса 34

Касторова Д.А. (ООО «НПП «Динамика»)
Разработка специального программного обеспечения для диагностики электротехнического оборудования 39

Митрюхин Е. Л. (ООО «НПП «Динамика»)
Особенности синхронизации испытательных комплексов с помощью блока GPS синхронизации для проверки устройств релейной защиты 42

Плеханов А.В., Александров Н.М. (ООО «НПП «Динамика»)
Проверка трансформаторов тока с использованием современного проверочного оборудования серии РЕТОМ 46

Воронов П.Л.
(Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова)
Уточнение спрямленных характеристик генераторов с АРВ и расчетов токов КЗ для произвольного момента времени 49

Семенов К.Г. (ООО НПП «Динамика»)
Анализ информационного трафика на цифровой подстанции 53

Убасева М.В., Петров В.С. (ООО НПП «ЭКРА»)
Двустороннее определение места повреждения ЛЭП без учета модели короткого замыкания 57

Кутумов Ю.Д., Кузьмина Н.В., Шадрикова Т.Ю., Шуин В.А.
(Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина)
Исследование частотных характеристик воздушных ЛЭП напряжением 6–10 кВ..... 61

Исаков Р.Г., Метелев И. С., Ференец А. А, Юдина К. П. (КНИТУ-КАИ)
Анализ влияния параметров сети с источником распределённой генерации на параметры срабатывания релейной защиты 65

Христофоров В.А., Фёдоров Александр О., Петров В.С. (Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)
Локализация повреждений на кабельно-воздушных линиях электропередачи двухсторонним волновым методом..... 75

Егоров В.А, Фёдоров Алексей О., Петров В.С., Антонов В.И., Наумов В.А. (ООО НПП «ЭКРА», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)
Локализация фронта волны в сигнале 78

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ 83

Фёдоров Алексей О., Петров В.С., Алексеев В. С. (ООО НПП «ЭКРА»)
Модальные преобразования в устройстве волнового определения места повреждения 83

Алексеев В. С., Фёдоров Алексей О., Петров В.С. (ООО НПП «ЭКРА»)
Сигналы волнового дискриминатора поврежденных фаз 88

Рослова К.С., Наровлянский В.Г.
(ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», ОАО «ВНИИР»)
Адаптивный фильтр ортогональных составляющих для релейной защиты в условиях изменяющейся частоты электроэнергетической системы 91

Лямец Ю. Я., Никонов И.Ю., Петряшин И.Е. (ООО «Релематика»)
Восстановление тока, искаженного вследствие насыщения трансформатора тока, по малому числу отсчетов 95

Иванов Н.Г., Александрова М.И., Воробьев Е.С., Антонов В.И., Наумов В.А. (ООО НПП «ЭКРА», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)
Цифровая обработка сигналов в устройствах интеллектуального АПВ ЛЭП с шунтирующими реакторами 99

Иванов М.О., Кудряшова М.Н., Солдатов А.В., Иванов Н.Г., Антонов В.И., Наумов В.А. (ООО НПП «ЭКРА», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)
Улучшенный метод активно-адаптивного распознавания слабых слагаемых на фоне преобладающей составляющей тока ОЗЗ 107

Воробьев Е.С., Антонов В.И., Иванов Н.Г., Наумов В.А., Солдатов А.В. (ООО НПП «ЭКРА»)
Многоканальный адаптивный структурный анализ 114

ТЕХНОЛОГИИ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В СИСТЕМАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ 121

Родионов А.В., Бутин К.П., Данилов М.А., Попов А.И.
(ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет)
Поиск источников низкочастотных колебаний на основе технологии синхронизированных векторных измерений 121

Пискунов С.А., Хромцов Е.И., Мокеев А.В.
(ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет)
Применение технологии СВИ для совершенствования систем управления, защиты и мониторинга 126

Горячевский И.А., Петров К.В., Андреев П.И., Ульянов Д.Н. (ООО «Инженерный центр «Энергосервис»)
Применение ПТК «Цифровой РЭС» в распределительных кабельных сетях 6-10 кВ 130

МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ 134

Степанова Д.А., Антонов В.И., Наумов В.А. (Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)
Основы интеллектуального дискриминатора режимов земляных коротких замыканий в электрической системе 134

Дементий Ю.А., Петряшин А.Е., Петряшин И.Е. (ООО «Релематика»)
Анализ применимости классических алгоритмов ML в практических задачах энергетики 142

Дементий Ю.А., Маслов А.Н., Николаев К.П. (ООО «Релематика»)
Нейросетевая классификация режимов работы объекта 147

Дементий Ю. А., Шорников Е.В. (ООО «Релематика»)
Машинное обучение для интервальной оценки параметров объекта 153

Дементий Ю.А. (ООО «Релематика»)
Активное обучение классификатора режимов работы объекта с использованием имитационной модели 157

Дементий Ю. А., Петряшин А. Е., Петряшин И. Е. (ООО «Релематика»)
Анализ эффективности активного обучения в задаче разграничения режимов работы энергообъекта 162

Дементий Ю.А., Николаев К.П. (ООО «Релематика»)
Детерминированный метод построения образа имитационной модели объекта 168

Кондрашов М.А., Максимов Р.С., Чжоу Хаочэнь, Лай Денцзюнь, Колобродов Е.Н. (НИУ «МЭИ»)
Фиксация наличия частичных разрядов по синусоиде напряжений с применением методов машинного обучения 172

КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ 186

Карпенко В.И., Карантаев В.Г. (НИУ МЭИ, Центр НТИ МЭИ)
Разработка экспертной системы для оценки влияния деструктивных воздействий компьютерных атак на подстанции с высшим классом напряжения 500 кВ с децентрализованной архитектурой вторичных подсистем 186

Кокшев П.А. (ООО «НИЦ ЧЭАЗ»)
Применение нейросетевых алгоритмов обнаружения вторжений для сетевого анализатора данных цифровой подстанции 199

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ 204

Шамис М.А., Иванов Ф.А., Васильев С.П., Zakonjsek J. (Законьшек Я.) (ЗАО "ЭнЛАБ")
Новые возможности по детальному моделированию переходных процессов в больших энергосистемах 204

Иванова Т.В., Никандров М.В., Белебенцев Д.Э.
(ООО «Интеллектуальные Сети», Чебоксарский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»)
Комплекс обучения персонала электроэнергетического объекта в виртуальной реальности 208

Лебедев В.Д., Петров А.Е., Иванов Ф.А., Jennifer(Xinru) Liu, Gregory Jackson (ФГБОУ ВО «ИГЭУ им. Ленина», ЗАО «ЭнЛАБ», PONOVO Power Co. LTD, RTDS Technologies Inc)
Цифровой полигон ИГЭУ 213

Смирнов С.Ю., Наумов И.А., Седова М.С., Шивиров А.В.
(ОАО «ВНИИР», Чувашский государственный университет)
Моделирование трансформаторов тока для релейной защиты с учётом современных требований 217

Научное издание

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Материалы научно-технической конференции молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2021»

Публикуется в авторской редакции

Отв. за выпуск М.И. Александрова

Согласно Закону № 436-ФЗ от 29 декабря 2010 года
данная продукция не подлежит маркировке

Подписано в печать 08.04.2021. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 13,13.
Тираж 300 экз. Заказ № 382.

Отпечатано в соответствии с представленным оригиналом-макетом в типографии Чувашского университета
428015 Чебоксары, Московский просп., 15

ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ

ИнТЭК

Чувашская Республика, г.Чебоксары, пр.Тракторостроителей, 103А
8 (8352) 22-45-60 rci21@electroclaster.ru www.cssi.electroclaster.ru

Испытательная лаборатория Ассоциации «ИнТЭК» – современный, высокотехнологический комплекс для проведения испытаний на электромагнитную совместимость.

Лаборатория оснащена современными испытательным оборудованием и средствами измерения ведущих мировых производителей: Rohde & Schwarz (Германия), Milmega (Великобритания), Amplifier Research (США), EM TEST (Швейцария), Teledyne LeCroy (США), в том числе полубезэховой модифицированной экранированной камерой с 3-х метровым измерительным расстоянием типа SAC-3 (COMTEST Engineering, Голландия).

Испытательное оборудование позволяет проводить ЭМС-испытания на соответствие стандартам широкой номенклатуры. Перечень работ насчитывает более 50 методов испытаний на помехоустойчивость и помехоэмиссию.

Испытательная лаборатория аккредитована в Росаккредитации

ISBN 978-5-7677-3248-7