

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

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

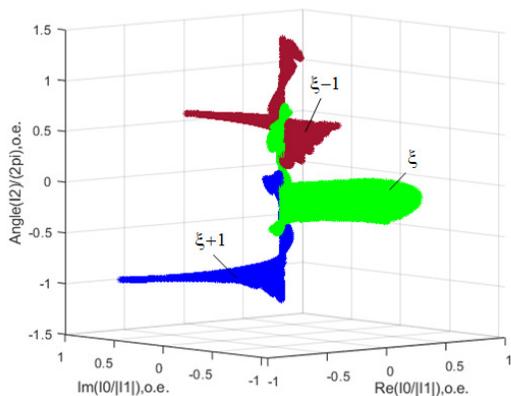
$$\mathbf{z}_v = \begin{bmatrix} \operatorname{Re} \left(\frac{I_{0,v}}{I_{1,v}} \angle (\varphi_{I_{0,v}} - \varphi_{U_{1,v}}) \right); \\ \operatorname{Im} \left(\frac{I_{0,v}}{I_{1,v}} \angle (\varphi_{I_{0,v}} - \varphi_{U_{1,v}}) \right); \\ \angle (\varphi_{I_{2,v}} - \varphi_{U_{1,v}}) / 2\pi; \end{bmatrix}. \quad (1)$$

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:

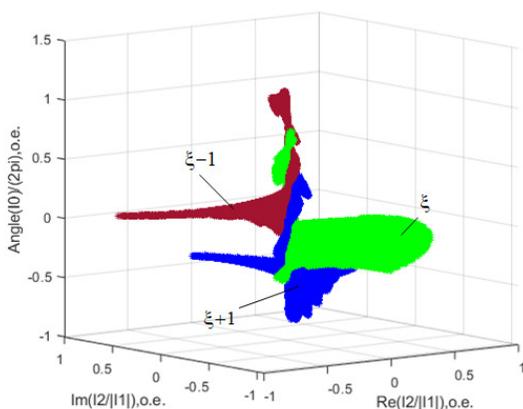
$$\mathbf{z}_v = \begin{bmatrix} \operatorname{Re} \left(\frac{I_{2,v}}{I_{1,v}} \angle (\varphi_{I_{2,v}} - \varphi_{U_{1,v}}) \right); \\ \operatorname{Im} \left(\frac{I_{2,v}}{I_{1,v}} \angle (\varphi_{I_{2,v}} - \varphi_{U_{1,v}}) \right); \\ \angle (\varphi_{I_{0,v}} - \varphi_{U_{1,v}}) / 2\pi; \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Здесь v – обозначение фазы дискриминатора; $I_{1,v}$ – ток прямой последовательности; $I_{2,v}$, $I_{0,v}$ и $\varphi_{2,v}$, $\varphi_{0,v}$ – модули и аргументы токов обратной и нулевой последовательностей; аргументы токов

обратной и нулевой последовательностей $\Phi_{2,v}$ и $\Phi_{0,v}$ отсчитываются относительно базового вектора $U_{1,v}$ с аргументом $\Phi_{U_{1,v}}$.



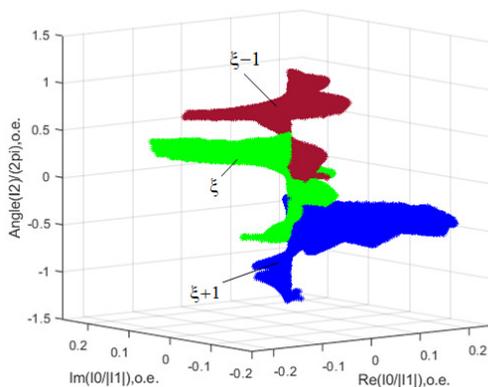
а)



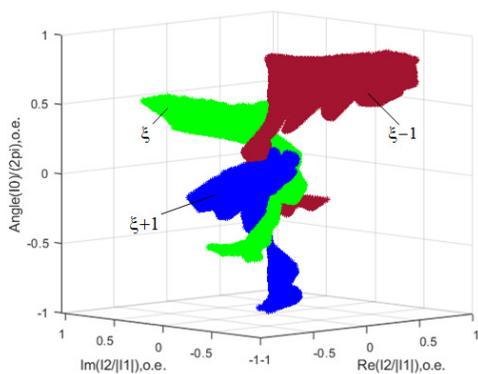
б)

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 X представляет собой множество многомерных векторов, каждый из которых принадлежит к тому или иному классу и определяется вектором признаков y . Вектор контролируемых параметров $x_j = z_v(j)$, снабженный соответствующим признаком y_j носит название *прецедента* [2]. При $y_j = 1$ объект 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 $(X; y)$ обучающей выборки

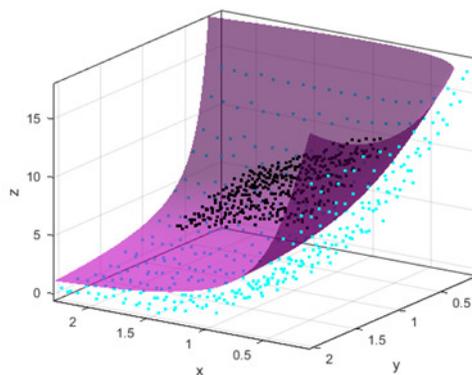
$$X = \{x_1, \dots, x_j, \dots, x_n\}, y = \{y_1, \dots, y_j, \dots, y_n\}.$$

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].

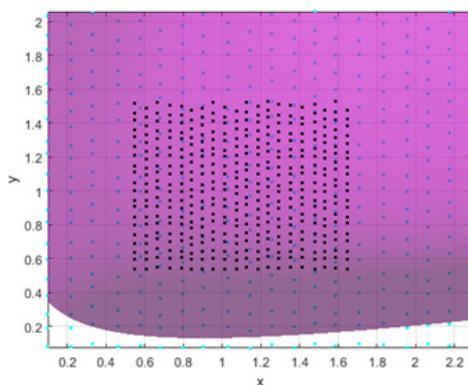
Идея метода заключается в построении оптимальной разделяющей гиперповерхности в многомерном пространстве контролируемых параметров, используя опорные векторы прецедентов обучающей выборки.

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.