

УДК 621.311

АДАПТИВНАЯ РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ИСТОЧНИКАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

© 2020 г. М. В. Шарыгин¹, А. Л. Куликов¹, В. Ю. Вуколов¹, А. А. Петров^{2, *}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева”,
Нижегород, Россия

²Акционерное общество “Научно-исследовательское предприятие общего машиностроения”,
Нижегород, Россия
*e-mail: petrov85@inbox.ru

Поступила в редакцию 26.02.2020 г.

После доработки 22.05.2020 г.

Принята к публикации 28.05.2020 г.

Повышение технического совершенства релейной защиты в реконфигурируемых электрических сетях, содержащих источники распределенной генерации, возможно за счет увеличения размерности контролируемых величин по произвольным осям, более полного анализа поступающей от измерительных устройств информации и автоматизации расчетов параметров срабатывания (уставок) защит. Многомерный контроль состояния защищаемого объекта позволяет повысить чувствительность за счет сильно изменяющихся параметров в аварийных режимах. Быстродействующий алгоритм автоматического расчета уставок основан на применении статистических методов распознавания режимов. Его применение позволяет задавать параметры срабатывания защит в условиях динамического изменения топологии электрической сети, содержащей, в том числе, и маломощные источники электроэнергии. Разработан макет программного комплекса и приведены результаты автоматического расчета уставок для одномерных токовых защит.

Ключевые слова: релейная защита, повышение чувствительности, расчет уставок, многомерная защита, электроснабжение, микросеть, статистика, уставка, селективность

DOI: 10.31857/S000233102003005X

ВВЕДЕНИЕ

Микросетью в электроэнергетике принято называть электрическую сеть среднего или низкого напряжения, имеющую в своем составе источники электроэнергии распределенной генерации, и способную работать как в изолированном режиме, так и параллельно с объединенной электроэнергетической системой.

Наличие распределенной генерации и возможность динамического изменения топологии электрической сети негативным образом отражается на чувствительности релейной защиты, контролирующей ее состояние [1, 2]. Решением данной проблемы может являться применение адаптивной защиты, реализованной с использованием цифровых технологий и современных коммуникаций, основанных на применении стандарта МЭК 61850. Такая защита способна выявлять повреждения как во внешней сети, обеспечивая переход микросети на автономную работу, так и повреждения во внутренней сети, выделяя из нее наименьшую часть для устранения повреждения [3, 4].

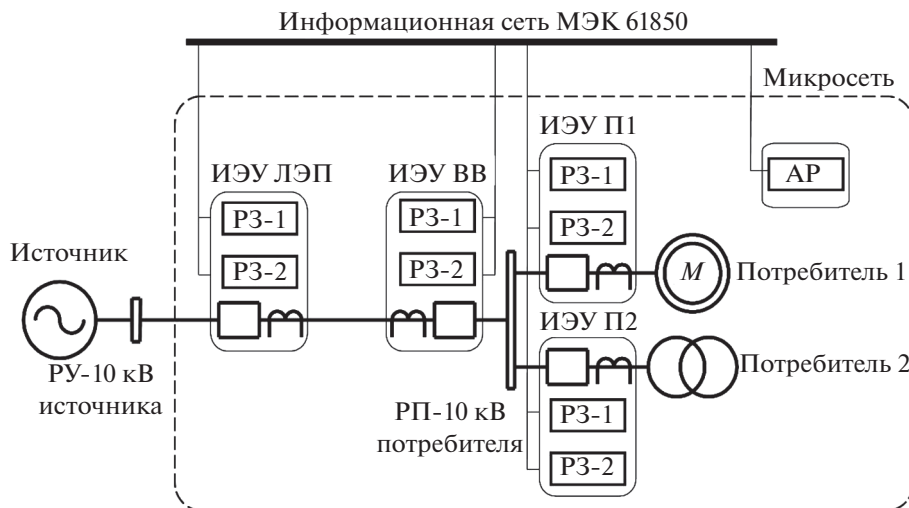


Рис. 1. Применение новых алгоритмов защиты микросети: ЛЭП — питающая линия; ВВ — вводной выключатель; П1 — потребитель 1; П2 — потребитель 2; РЗ-1 — устройство защиты первого уровня; РЗ-2 — устройство защиты второго уровня; АР — устройство автоматического расчета уставок защит.

Обычно при организации релейной защиты распределительная сеть делится на локальные зоны, охватывающие ее отдельные участки. Подключение нового источника распределенной генерации внутри сети приводит к необходимости корректировки настроек устройств защиты для обеспечения требуемого уровня селективности, быстродействия и чувствительности в режимах автономного и параллельного с внешней электрической сетью функционирования. Увеличение объемов распределенной генерации в составе микросети существенно повышает сложность параметрирования ее системы защиты, адаптация которой к существующим условиям работы может осуществляться как непрерывно, так и дискретно путем переключения заранее заданных групп уставок. В любом случае корректная работа и точная настройка защиты возможна только при условии непрерывного синхронизированного измерения различных параметров режима микросети в ее узлах с последующей обработкой полученной информации в специализированном устройстве, управляющем всей сетью и способном обрабатывать большие объемы информации. При возникновении аварийного режима в микросети такое устройство определяет тип и место повреждения, а затем отключает поврежденное оборудование.

РАЗВИТИЕ ЗАЩИТЫ МИКРОСЕТЕЙ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Перспективная организация системы релейной защиты в микросетях с источниками распределенной генерации предполагает построение двухуровневой защиты со взаимным резервированием функций (рис. 1). На первом уровне предлагается применение быстродействующей дифференциально-логической защиты [5] с использованием протокола обмена данными МЭК 61850 для передачи информации между распределенными интеллектуальными электронными устройствами (ИЭУ) с учетом топологии и режимов работы электрической сети. Второй уровень предполагает использование многопараметрических защит, построенных на статистических принципах [6–9]. В случае отказа информационной сети многопараметрические защиты обеспечивают функци-

онирование микросети аналогично традиционным защитами относительной селективности, обладая при этом, в силу своего принципа действия, большей чувствительностью к аварийным режимам.

Устройство автоматического расчета параметров срабатывания, выполненное в централизованном или децентрализованном исполнении, позволяет непрерывно настраивать и адаптировать ИЭУ под существующие режимы работы микросети за счет обмена информацией с помощью протокола МЭК 61850. Для внедрения концепции автоматического расчета уставок необходима коррекция нормативно-технической документации, поскольку действующие требования предписывают проведение проверки работоспособности устройства релейной защиты после каждого изменения настроек путем подачи тестовых сигналов от испытательного устройства, что невозможно осуществить в режиме автоматической настройки.

Предлагаемая концепция защиты микросетей позволяет:

- повысить чувствительность и быстродействие защиты микросетей с источниками распределенной генерации;
- повысить устойчивость системы релейной защиты к отказам информационной сети, измерительных преобразователей или отдельных устройств;
- исключить “человеческий фактор” при выполнении расчетов;
- обеспечить совместную работу устройств защиты, использующих различные алгоритмы и принципы действия, реализованных в ИЭУ как централизованного, так и децентрализованного исполнения.

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПРИНЦИП РАСПОЗНАВАНИЯ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ

В качестве теоретической базы разработки алгоритмов распознавания режимов электрической сети целесообразно применять статистические методы теории обнаружения.

ИЭУ, непрерывно анализируя параметры режима защищаемого элемента электросети, относит его текущее состояние к нормальным (гипотеза H_0) или аварийным (гипотеза H_1) режимам работы. Значения критериев, позволяющих классифицировать состояние объекта, определяются так, чтобы свести к минимуму средний риск R от работы защиты, который при двух возможных вариантах режима определяется:

$$R = C_{00}P_0(1 - P_F) + C_{10}P_0P_F + C_{11}P_1(1 - P_M) + C_{01}P_1P_M,$$

где C_{00} – потери при правильном выборе гипотезы H_0 ; C_{01} – потери при неправильном выборе гипотезы H_0 ; C_{10} – потери при неправильном выборе гипотезы H_1 ; C_{11} – потери при правильном выборе гипотезы H_1 ; P_0 , P_1 – априорные вероятности правильности гипотез H_0 и H_1 ; P_F – условная вероятность ложного отключения; P_M – условная вероятность пропуска аварийного режима.

Условная вероятность P_F является вероятностью отнесения защитой текущего состояния объекта к гипотезе H_1 при фактическом соответствии режима гипотезе H_0 . Условная вероятность P_M , напротив, представляет вероятность отнесения защитой состояния объекта к гипотезе H_0 при фактическом соответствии режима гипотезе H_1 :

$$P_F = P(H_1|H_0) = \int_{\Psi_1} p_{H_0}(\Phi|H_0)d\Phi; \quad P_M = P(H_0|H_1) = \int_{\Psi_0} p_{H_1}(\Phi|H_1)d\Phi,$$

где Φ – вектор наблюдаемых параметров режима; $p_{H_0}(\Phi|H_0)$ – функция плотности распределения наблюдаемых параметров в условиях существования нормального режима H_0 ; $p_{H_1}(\Phi|H_1)$ – функция плотности распределения наблюдаемых параметров в условиях существования аварийного режима H_1 [8]; Ψ_0 – часть пространства наблюдений, соответствующая допустимому состоянию защищаемого объекта, не требующего

его отключения от электрической сети; Ψ_1 — часть пространства наблюдений, соответствующая недопустимому (аварийному) состоянию защищаемого объекта.

Получение функций плотностей распределения параметров режимов производится за счет проведения достаточно большого количества статистических экспериментов на математических моделях электрической сети. Для этого, кроме информации, необходимой для расчета традиционных релейных защит, требуются сведения о вероятностных законах распределения режимов.

Очевидно, что полное пространство наблюдений Ψ представляет собой сумму:

$$\Psi = \Psi_0 + \Psi_1.$$

Для повышения чувствительности и распознающей способности релейной защиты размерность Ψ можно увеличить, причем это будет происходить эффективнее за счет параметров, наиболее сильно изменяющихся в аварийных режимах [6, 7]. Таким образом, разное сочетание наблюдаемых параметров дает различные вероятности распознавания режимов.

Особенности современных ИЭУ позволяют выполнять разносторонний анализ режимов электрической сети за счет применения универсальных многомерных измерительно-пусковых органов, использующих максимально информативные наблюдаемые параметры.

Критерий Байеса, в соответствии с которым производится выбор гипотезы (распознавание режима защищаемого объекта), выглядит следующим образом [10]:

$$\begin{cases} H_0, & \text{при } \Lambda(\Phi) > \eta; \\ H_1, & \text{при } \Lambda(\Phi) \leq \eta, \end{cases}$$

где η — порог критерия отношения правдоподобия [11]; $\Lambda(\Phi)$ — отношение правдоподобия:

$$\Lambda(\Phi) = \frac{p_{H_1}(\Phi|H_1)}{p_{H_0}(\Phi|H_0)}.$$

Отстройка защиты элемента от всех нормальных режимов, в которых она не должна срабатывать, задает значение условной вероятности $P_F = 0$, что позволяет устремить значение порога критерия отношения правдоподобия к бесконечности: $\eta \rightarrow \infty$ [12].

Распознавание аварийных режимов защищаемого элемента электрической сети на основании байесовского метода позволит:

- снизить риск ошибочной работы РЗА при принятии решений;
- реализовать адаптивные алгоритмы РЗА, учитывающие реальную статистику нормальных и аварийных режимов защищаемого элемента сети;
- разработать множество новых видов автоматики как аварийного, так и нормального режимов.

Сравним вероятности распознавания коротких замыканий защитой питающей линии при контроле различных наборов параметров, характеризующих режимы работы элемента электрической сети на примере схемы, представленной на рис. 2. Для этого на основании результатов имитационного моделирования в различных пространствах наблюдений Ψ построим функции плотности вероятностей характерных режимов объекта: нормального; короткого замыкания на питающей линии; короткого замыкания на шинах нагрузки; короткого замыкания в нагрузке 1; короткого замыкания в нагрузке 2.

Пример функций плотностей распределения параметров различных режимов, полученных на основании математического моделирования, для пространства наблюдения Ψ , включающего только один наблюдаемый параметр (ток), представлен на рис. 3. Функции плотности вероятностей различных режимов в многомерных пространствах

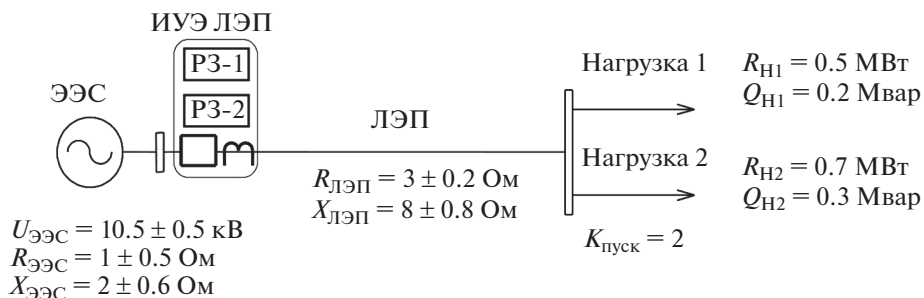


Рис. 2. Схема для моделирования режимов микросети.

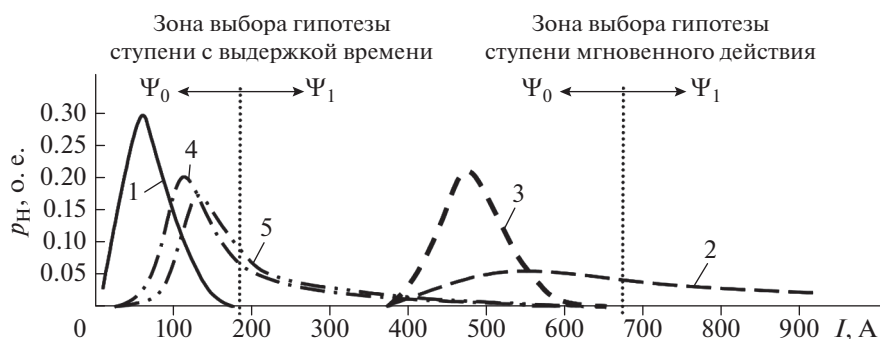


Рис. 3. Функции плотности распределения параметров режимов микросети для одномерного пространства наблюдения: 1 — нормального; 2 — короткого замыкания на питающей линии; 3 — короткого замыкания на шинах нагрузки; 4 — короткого замыкания в нагрузке 1; 5 — короткого замыкания в нагрузке 2.

наблюдения строятся аналогичным образом и представляют собой совокупные зависимости от нескольких параметров.

В силу вариативности характеристик факторов, влияющих на состояние защищаемого объекта, области существования его нормальных и аварийных режимов зачастую пересекаются, что не позволяет защите однозначно оценить его состояние. Требования селективности и недопустимости срабатывания защиты в нормальном режиме позволяют выбирать ее уставки, сопоставив лишь области существования различных режимов без учета численных значений плотности условной вероятности. Пример сопоставления таких областей для двухмерного пространства (ток, напряжение) приведен на рис. 4.

Вероятности распознавания аварийных режимов определяются интегрированием функций плотностей распределения параметров аварийных режимов $p_{H_1}(\Phi|H_1)$ по области пространства наблюдаемых параметров, ограниченной уставками защиты (Ψ_1). Полученные значения для защит, контролирующих различные наборы параметров, приведены в табл. 1.

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДЛАГАЕМЫХ ПРИНЦИПОВ ЗАЩИТЫ

В ходе проведения исследований было подготовлено техническое задание на разработку интеллектуального электронного устройства, вычислительной мощности которого было бы достаточно для реализации представленных задач. Образец, представ-

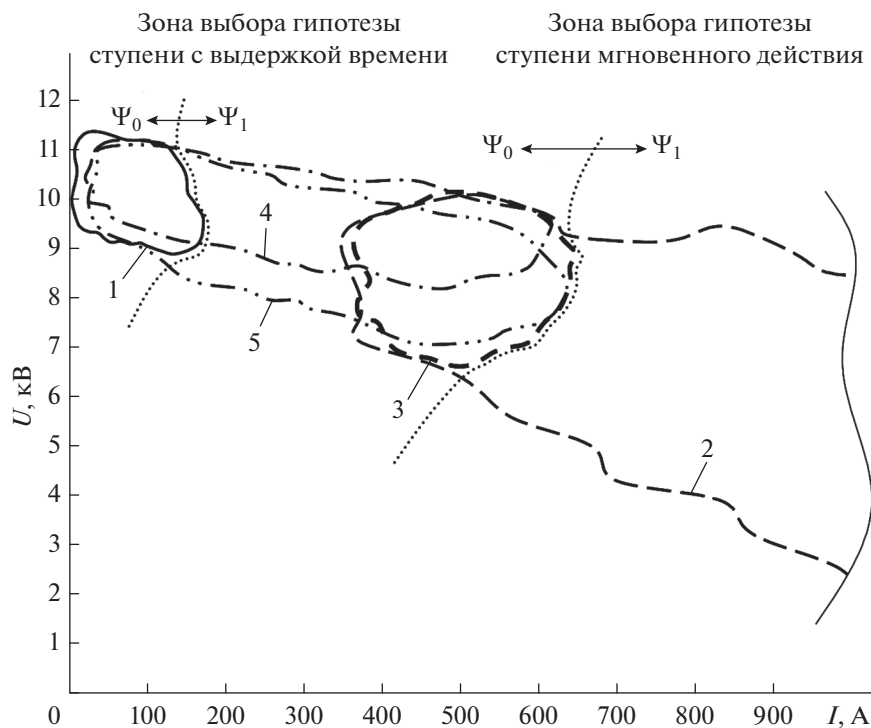


Рис. 4. Области существования режимов в двумерном пространстве наблюдения: 1 — нормального; 2 — короткого замыкания на питающей линии; 3 — короткого замыкания на шинах нагрузки; 4 — короткого замыкания в нагрузке 1; 5 — короткого замыкания в нагрузке 2.

ленный научно-производственным предприятием “Автоматизированные локационные искатели мест повреждения”, приведен на рис. 5. Особенностью устройства является его способность выполнять свои функции без привязки к производителю вычислительной платформы, что, в зависимости от сложности проводимых математических расчетов, позволяет использовать микропроцессоры как отечественного, так и импортного производства различной производительности без существенных конструктивных доработок.

Таблица 1. Сравнение вероятностей распознавания режимов защитой

Коэффициенты распознавания	Наблюдаемые параметры			
	I	I, U	P, Q	I, U, φ
Вероятность распознавания КЗ на питающей линии ступенью мгновенного действия	0.597	0.806	0.795	0.898
Вероятность распознавания КЗ на питающей линии ступенью с выдержкой времени	1	1	1	1
Вероятность распознавания КЗ в нагрузке 1 ступенью с выдержкой времени	0.255	0.322	0.937	0.955
Вероятность распознавания КЗ в нагрузке 2 ступенью с выдержкой времени	0.367	0.461	0.950	0.958
Общая вероятность распознавания КЗ в резервных зонах ступенью с выдержкой времени	0.311	0.392	0.944	0.957

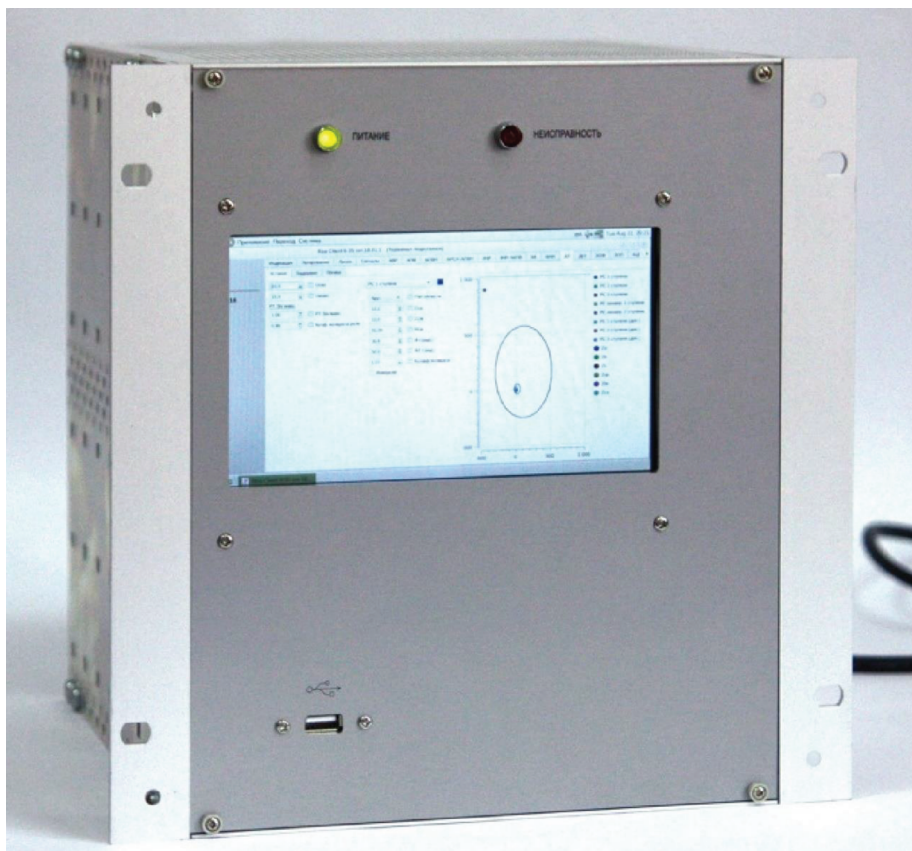


Рис. 5. Внешний вид интеллектуального электронного устройства.

Встраивание в информационные сети и реализация концепции защиты микросетей с источниками распределенной генерации осуществляется за счет полноценного использования устройством протокола передачи данных МЭК 61850.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА УСТАВОК ЗАЩИТ

Настройку и адаптацию элементов системы РЗА к текущим условиям работы микросети, в том числе ее топологии, целесообразно проводить с помощью технологии автоматического расчета и согласования параметров срабатывания релейной защиты, реализованной в виде централизованного или комплекта децентрализованных устройств, получающих информацию о состоянии микросети с помощью сетевых коммуникаций стандарта МЭК 61850.

Коррекция параметров срабатывания должна производиться в пределах границ, полученных моделированием режимов сети. Отказ комплекса автоматического расчета уставок переводит защиты в режим базовых настроек, полученных с помощью традиционных методов расчета для текущей топологии электрической сети.

Компоненты макета программного комплекса, реализующего технологию автоматического расчета, приведены на рис. 6.

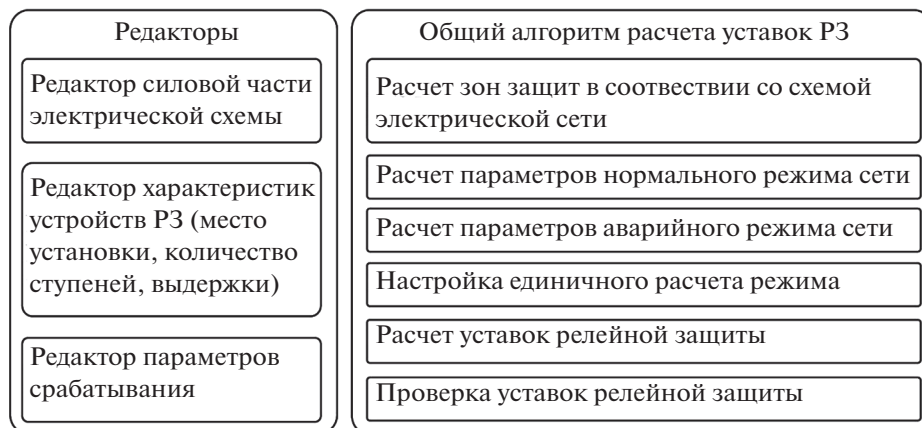


Рис. 6. Компоненты макета программного комплекса автоматического расчета и согласования параметров срабатывания РЗ сети.

Применение автоматизированного расчета уставок позволит исключить неправильные действия защит, связанные с ошибками в расчетах и выставлении параметров срабатывания при выполнении настройки устройств.

ВЫВОДЫ

1. Предложена концепция построения защиты микросетей с источниками распределенной генерации, предполагающая применение двухуровневой релейной защиты, элементы которой используют протокол МЭК 61850 для обмена информацией между собой.
2. В основу метода выявления аварийных режимов защищаемого элемента заложен байесовский принцип, использующий вероятности возникновения его возможных состояний.
3. Выполнено сравнение вероятностей выявления повреждений защитами, контролирующими различные наборы параметров объекта.
4. Разработано интеллектуальное электронное устройство, реализующее концепцию защиты микросетей с динамически изменяющейся топологией и наличием генерации, а также реализуемый на ее базе программный комплекс автоматического расчета уставок токовых защит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Онисова О.А. Характеристика влияния распределенной генерации на функционирование релейной защиты и автоматики // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 5. С. 88–93.
2. Онисова О.А. Особенности функционирования направленных максимальных токовых защит в электрических сетях с распределённой генерацией // Энергетик. 2015. № 1. С. 17–21.
3. Илюшин П.В. Особенности реализации многопараметрической делительной автоматики в энергорайонах с объектами распределенной генерации // Релейная защита и автоматизация. 2018. № 2. С. 12–24.
4. Terzija V., Valverde G., Cai D., Regulski P., Madani V., Fitch J., Skok S., Begovic M., Phadke A. Wide-area monitoring, protection and control of future electric power networks // Proceedings of the IEEE. 2011. V. 99. № 1. P. 80–93.

5. Куликов А.Л., Шарыгин М.В. Дифференциально-логический принцип релейной защиты сетей электроснабжения // Электрические станции. 2018. № 3. С. 37–46.
6. Куликов А.Л., Шарыгин М.В. Принципы объединения пусковых и измерительных органов релейной защиты для повышения ее чувствительности // Известия РАН. Энергетика. 2018. № 6. С. 38–49.
7. Нагай В.И., Нагай И.В., Сарры С.В., Киреев П.С., Украинцев А.В. Информационные признаки аварийного режима в высоковольтных электроустановках при наличии переходного сопротивления электрической дуги // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2017. Т. 60. № 6. С. 84–90.
8. Куликов А.Л., Шарыгин М.В. Определение уставок релейной защиты и автоматики, основанное на статистическом байесовском методе проверки гипотез // Электричество. 2017. № 7. С. 20–29.
9. Шарыгин М.В., Куликов А.Л., Петров А.А. Синтез универсального многомерного измерительно-пускового органа релейной защиты // Электричество. 2020. № 1. С. 4–11.
10. Куликов А.Л., Шарыгин М.В. Обеспечение селективности релейной защиты в системах электроснабжения на основе байесовского метода проверки гипотез // Электричество. 2017. № 9. С. 24–33.
11. Anil Kumar P., Shankar J., Nagaraju Y. Protection issues in microgrid // International J. Applied Control, Electrical and Electronics Engineering (IJACEEE). 2013. V. 1. № 1. P. 19–30.
12. Нудельман Г.С., Онисова О.А. Релейная защита и автоматика в условиях развития малой распределенной энергетики // Электроэнергия. Передача и распределение. 2014. № 4. С. 106–114.

Adaptive Relay Protection for Electrical Networks with Distributed Power Sources

M. V. Sharygin^a, A. L. Kulikov^a, V. Y. Vukolov^a, and A. A. Petrov^{b, *}

^a*Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia*

^b*Joint Stock Company “Scientific-Research Institute of General Machine-Building”,
Nizhny Novgorod, Russia*

**e-mail: petrov85@inbox.ru*

Improving of relay protection characteristics in reconfigurable electrical networks contained distributed power sources is possible by increasing of the controlled values dimension, more complete information analysis received from measuring devices and automating the protection response parameters calculation. Electrical object state multi-parametric monitoring allows increase the sensitivity of its relay protection due to the most highly variable mode parameters in emergency. Fast algorithm for setpoints automatic calculation is based on the statistical methods of recognizing modes using. Its application allows setting parameters for relay protection operation in change topology conditions of electrical network containing distributed power sources. The software package is presented and the results of setpoints automatically calculation for one-parametric current protections is obtained.

Keywords: relay protection, sensitivity increasing, setpoint calculation, multi-parametric relay protection, power supply, microgrid, statistics, setpoint, selectivity