

УДК 214.74

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ В СИСТЕМАХ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ**Д.А. Устинов, А.Р. Аисар***Санкт-Петербургский горный университет*

Современные тенденции развития систем электроснабжения промышленных объектов при применении принципов распределенной генерации заключаются в осуществлении электроснабжения от нескольких источников питания разных типов и характеристик (фотоэлектрические элементы, ветроэнергетические установки, микротурбинные установки, дизельные электростанции), максимальном приближении источников питания к электрическим нагрузкам, применении накопителей электроэнергии. Наличие таких установок вблизи потребителей снижает количественное потребление энергии за счет снижения технических потерь вырабатываемой энергии и снижения зависимости от ископаемых видов топлива. Однако, при наличии этих преимуществ распределенная генерация создала технические проблемы, одной из которых является усложнение систем релейной защиты в связи с возможностью питания точки повреждения с разных сторон. Данное обстоятельство требует разработки новых алгоритмов и схем защиты для обеспечения селективности и повышения чувствительности действия релейной защиты. **Цель исследования:** выполнить анализ алгоритмов работы дистанционной защиты в системах распределенной генерации. **Методы:** используется комплексный подход, включающий научный анализ, обработку и анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований в области релейной защиты электротехнических комплексов в сетях с распределенной генерацией. **Результаты:** выполнен анализ различных алгоритмов реализации защиты, которые были реализованы в качестве предложений для распределительных сетей. Представлена система дистанционной защиты в сетях, содержащих системы распределенной генерации, и проведено сравнение алгоритмов работы для повышения чувствительности устройств дистанционной защиты к случаям возникновения различных аварийных режимов: однофазных, трехфазных коротких замыканий. Рассмотрено несколько алгоритмов повышения чувствительности дистанционной защиты для распределительных сетей при наличии нескольких источников питания. Выполнено сравнение этих алгоритмов по критериям стоимости реализации, точности реализации, количества необходимых входных данных. **Практическая значимость:** результаты исследований могут быть использованы при учете влияния изменения параметров защищаемых присоединений в условиях работы электротехнических комплексов в сети с распределенной генерацией на эффективность действия дистанционной защиты. Они позволяют повысить чувствительность и селективность функционирования дистанционной защиты при возникновении аварийных ситуаций.

Ключевые слова: энергия, распределенная генерация (Рг), алгоритмы действия защиты, распределительные сети, дистанционная защита.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-41-55

Введение

Значительные запасы нефти, газа и угля и их доступность предопределили собственную российскую модель развития энергетики. Таким образом, установленная мощность возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в России, кроме гидроэлектростанций (ГЭС), практически полностью состоит из ветроэлектрических станций (ВЭС) и фотоэлектрических станций (ФЭС) и составляла 1,12 % в 2021 г. Аналогичный показатель для Германии составляет 60,1% (все виды ВИЭ) и 54 % (только ВЭС и ФЭС). Однако изменения в структуре энергетического

комплекса в последние годы стали более заметными: так, в 2020 г., впервые за 5 лет, произошло снижение суммарной установленной мощности тепловых электростанций (на 1320 МВт), что почти равно росту установленной мощности ВИЭ (на 1207 МВт). Следует отметить, что в целом энергетический комплекс России является низкоуглеродным, так как более половины установленной мощности энергосистем приходится на гидроэнергетику и атомные электростанции [1]. Последними тенденциями развития систем электроснабжения промышленных объектов при применении принципов распределенной генерации является реализация электроснабжения от нескольких источников энергии разных типов и характеристик (фотоэлектрические элементы, ветряные электростанции, микротурбинные установки, дизельные электростанции), максимальное приближение источников питания к электрическим нагрузкам, использование накопителей энергии [6]. Наличие таких установок вблизи потребителей снижает количественное потребление энергии за счет минимизации технических потерь на вырабатываемую энергию и снижения зависимости от ископаемого топлива. Однако при этих преимуществах распределенная генерация вызвала технические проблемы, одной из которых является сложность реализации систем релейной защиты из-за возможности питания места КЗ с разных сторон. Наиболее эффективным способом решения этих проблем является построение систем управления с использованием методов моделирования [2]. Это обстоятельство требует разработки новых алгоритмов и схем защиты для обеспечения селективности и повышения чувствительности релейной защиты.

1. Дистанционная защита

Дистанционная защита является одной из распространенных токовых защит, применяемых для защиты распределительных сетей от коротких замыканий [8].

Дистанционная защита основана на оценке полного сопротивления линии путем сравнения тока, проходящего через реле, и напряжения в точке установки реле [7]. Длина защищаемого участка обычно делится на три зоны или более. Каждая зона покрывает часть защищаемого участка, основного или резервируемого. Например, зона 1 обычно покрывает около 85 % длины линии от шины A до шины B. Зона 2 охватывает всю длину линии, соединяющей шину A и шину B, плюс часть длины следующей линии и так далее для оставшейся зоны, как показано на рис. 1.

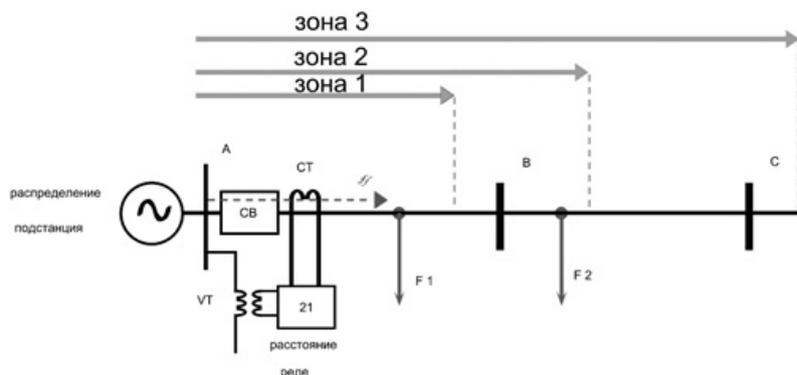


Рис 1 – Дистанционные зоны релейной защиты для радиальной системы [7]

Fig. 1 – Remote relay protection zones for a radial system

Дистанционное реле, расположенное на шине A , измеряет напряжение (U) и ток (I) на базовой частоте через трансформатор напряжения (ТВ) и трансформатор тока (ТА) соответственно. Полное сопротивление реле составляет:

$$Z_R = \frac{U_R}{I_R}; \quad (1)$$

$$U_R = I_R \alpha Z_{\text{line}}, \quad (2)$$

где U_R и I_R – значения напряжения и тока, измеренные реле; α представляет расстояние между точкой реле и точкой повреждения; Z_{line} – полное сопротивление защищаемой линии. Значение полного сопротивления Z_R для короткого замыкания на F_1 равно

$$Z_R = \alpha Z_{\text{line } AB}, \quad (3)$$

а при коротком замыкании в F_2

$$Z_R = Z_{\text{line } AB} + \alpha Z_{\text{line } BC}. \quad (4)$$

2. Дистанционная защита в системе с распределенной генерацией и эффект питания

Эффект питания приводит к тому, что полное сопротивление, воспринимаемое реле, оказывается больше, чем фактическое сопротивление прямой последовательности между реле и точкой повреждения, что может привести к снижению чувствительности действия защиты. Для каждой системы Z_A , Z_B и Z_C – полное сопротивление прямой последовательности линии; I_S , I_1 , I_2 , ..., I_n – токи в ветвях распределительной сети [7].

Радиальный распределительный фидер с источником генерации на шине B показан на рис. 2. В случае трехфазного короткого замыкания на шине C измеренное напряжение ДЗ на шине A составляет

$$U_A = I_S Z_A + (I_S + I_1) Z_B. \quad (5)$$

Полное сопротивление прямой последовательности до места повреждения, измеренное ДЗ, составляет:

$$Z_{DR} = Z_A + \left(1 + \frac{I_1}{I_S}\right) Z_B;$$

$$Z_{DR} = Z_A + Z_B + K Z_B, \quad (6)$$

где K определяется как постоянная питания ($K = I_1/I_S$). Основываясь на уравнении (6), ДЗ при шине A измеряет сопротивление, превышающее фактическое сопротивление между шиной A и местом короткого замыкания. Дополнительное сопротивление $K Z_B$ влияет на работу ДЗ, снижая чувствительность.

На рис. 2, б к одной шине подключено более одной линии РГ.

$$U_A = I_S Z_A + (I_S + I_1 + I_2 + \dots + I_n) Z_B. \quad (7)$$

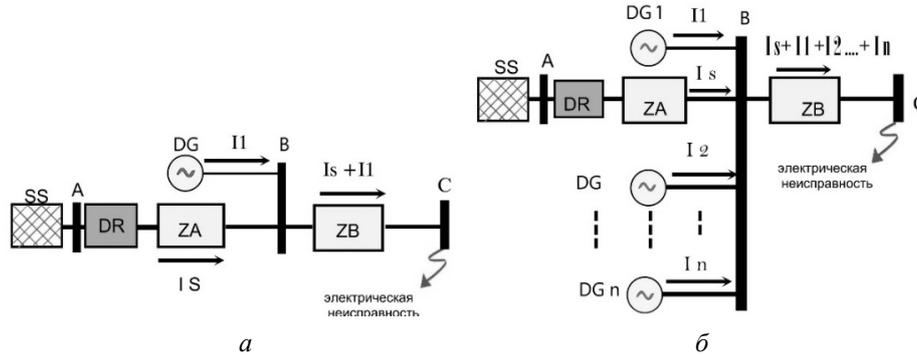


Рис. 2 – Схемы электроснабжения с объектами распределенной генерации:
 а – радиальный распределительный фидер с одним объектом РГ; б – радиальный распределительный фидер с n объектами РГ, подключенными к одной шине

Fig. 2 – Power supply schemes with distributed generation facilities:

а – a radial distribution feeder with one RG facility; б – a radial distribution feeder with n RG facilities connected to one bus

Сопротивление прямой последовательности линии до точки повреждения, определяемое ДЗ, составляет:

$$Z_{DR} = Z_A + \left(1 + \frac{I_1 + I_2 + \dots + I_n}{I_S} \right) Z_B =$$

$$= Z_A + Z_B + K_n Z_B, \quad (8)$$

где K_n – константа питания ($K = (I_1 + I_2 + \dots + I_n)$); n – количество объектов РГ, подключенных к шине B .

На рис. 3 показана зависимость сопротивления, определяемого дистанционной защитой, от расстояния до точки короткого замыкания для схемы рис 2, а. Понятно, что эффект питания изменяет измеренное сопротивление ДЗ на шине A . Сопротивление, измеренное ДЗ для схемы, показанной на рис. 3, а, для двух разных конфигураций, представлено на рис. 3, б. Если в системе нет объектов РГ, сопротивление, определяемое ДЗ, равно фактическому сопротивлению линии, которое пропорционально наклону отрезка $A'B'$ на рис. 3. Интеграция объектов РГ в систему приводит к изменению сопротивления, определяемого ДЗ, которое пропорционально наклону отрезка линии $B'D'$. Уравнения (9) и (10) представляют сопротивления, определяемые ДЗ, на основе наклона отрезков линии на рис. 3, б:

$$Z_{DR,AB} = m_{AB} d = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} d, \quad (9)$$

где $Z_{DR,AB}$ – измеренное сопротивление ДЗ, если короткое замыкание происходит в линии AB ; m_{AB} – наклон линии $A'B'$; d – расстояние от места расположения реле до точки повреждения.

Если в линии BC возникает короткое замыкание, то сопротивление, определяемое ДЗ, может быть рассчитано как

$$Z_{DR,BC} = m_{BC} d = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} d, \quad (10)$$

где $Z_{DR,BC}$ – измеренное полное сопротивление линии, которое видит ДЗ на шине A из-за неисправности на линии BC ; m_{BC} – это наклон линии BC .

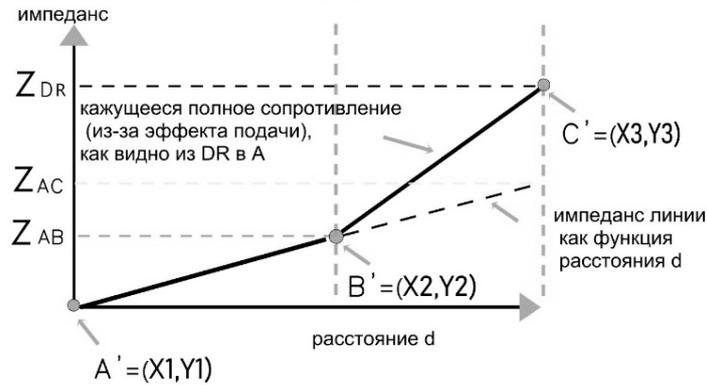


Рис. 3 – Зависимость сопротивления, определяемого дистанционной защитой, от расстояния до точки короткого замыкания [7]

Fig. 3 – The dependence of the resistance determined by the remote protection on the distance to the short circuit point [7]

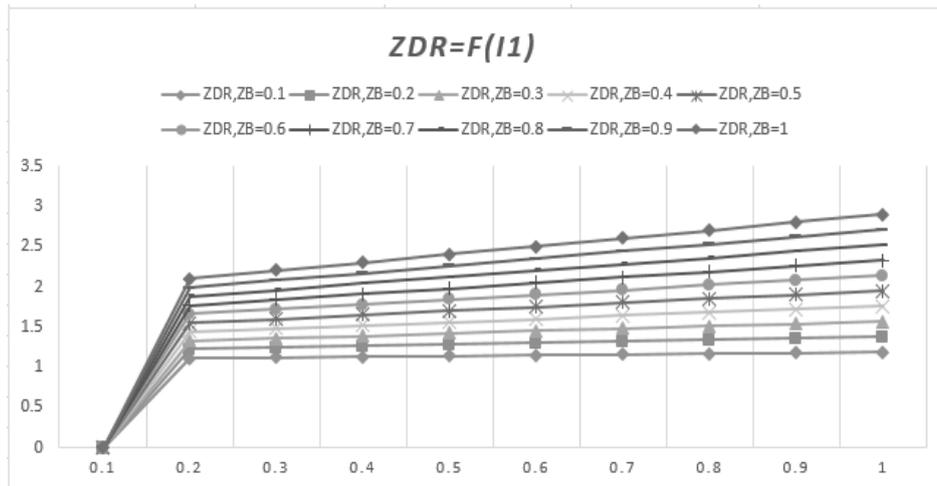


Рис. 4 – Влияние увеличения тока питания на сопротивление дистанционной защиты

Fig. 4 – The effect of increasing the supply current on the resistance of remote protection

3. Способы повышения чувствительности ДЗ

Из-за эффекта мощности, вызванного одним или несколькими источниками питания, распределенными между основным источником и местом повреждения, сопротивление прямой последовательности, измеренное дистанционной защитой, не является фактическим сопротивлением последовательности, как было показано в [2, 3, 9]. Выполним анализ алгоритмов работы дистанционной защиты для распределительных сетей при наличии нескольких источников питания, обеспечива-

ющих повышение селективности и чувствительности действия защиты. Это обстоятельство определяет особую актуальность в условиях комбинированного электроснабжения на основе параллельной работы централизованных и автономных источников распределенной генерации [5].

3.1. Первый способ

Для этого способа требуются следующие данные: 1) значение измеренного сопротивления в месте расположения реле; 2) знание мест расположения объектов РГ; 3) параметры линий электропередач.

В первом случае линия электропередачи содержит один источник питания, как показано на рис. 2. Уравнение сопротивления линии можно записать как функцию от расстояния:

$$Z_{DR} = md, \quad d = Z_{DR}/m. \quad (11)$$

Предполагается, что координаты подстанции составляют $(x_1, y_1) = (0, 0)$, поскольку ДЗ находится на шине 1. Местоположение координаты РГ1 составляют (x_2, y_2) , где x_2 представляет расстояние от местоположения ДЗ до шин 2 с объектом РГ1, а y_2 представляет фактическое полное сопротивление линии прямой последовательности от шин 1 с ДЗ до шин 2. Расстояние x_3 от места ДЗ до шины 3 известно, но из-за эффекта питания полное сопротивление y_3 не равно сопротивлению прямой последовательности до шины 3. Следовательно, полное сопротивление y_3 может быть определено с использованием следующего уравнения:

$$Z_{DR} = Z_A + (1 + K_1)Z_B + (1 + K_2)Z_C,$$

где Z_A , Z_B и Z_C – фактические сопротивления линии прямой последовательности; K – постоянная питания $K_1 = I_1/I_S$.

Шаги для корректировки истинного значения сопротивления Z_{DR} будут следующими.

- Расчет сопротивления в месте короткого замыкания для данной системы.
- Расчет тока короткого замыкания.
- Расчет вкладов от каждого источника в значение тока короткого замыкания.
- Фактическое сопротивление линии может быть найдено с помощью уравнения линии с учетом конфигурации схемы и наличия объектов РГ.

3.2. Второй способ

Способ 2 основан на построении двух зависимостей сопротивления от расстояния (ID Impedance, Distance, Импеданс, расстояние). Первая ID-кривая (ID-кривая 1) представляет соотношение между сопротивлением и расстоянием между шиной 1, на которой установлена ДЗ, и точкой КЗ с учетом влияния объектов РГ, а вторая ID-кривая (ID-кривая 2) представляет собой аналогичную первой зависимость, но без учета влияния объектов РГ. Зависимости сопротивления от расстояния должны быть сгенерированы в автономном режиме и сохранены в ДЗ. Хранение данных и автономных учетных записей (даже онлайн-учетных записей, если необходимо) несложно на современных реле с большой памятью. Чтобы найти фактическое сопротивление линии Z_{act} , нужно измеренное значение

сопротивления Z_{meas} сравнить с ID кривой 1, чтобы найти значение, соответствующее расстоянию. Затем значение расстояния сравнивается с ID кривой 2, чтобы получить Z_{act} .

3.3. Третий способ

Преимущество этого способа в том, что он не требует каких-либо автономных вычислений и основан только на локальных измерениях. Также требуется знание местоположения источника питания и его параметров. Эти данные вместе с параметрами линии, которые обычно известны и хранятся в РЗ как «входные данные», используются для иллюстрации принципа этого способа. На рис. 5 показаны расчетная схема и эквивалентная ей схема.

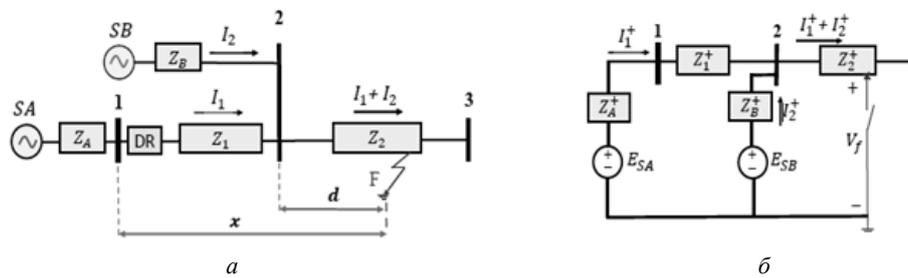


Рис. 5 – Расчетная схема (а), эквивалентная схема (б) [7]

Fig. 5 – Calculation scheme (a), equivalent scheme (b) [7]

Система, показанная на рис. 5, состоит из двух источников на шинах 1 и 2. Основной источник SA, подключенный к шине 1, и второй источник SB, подключенный к шине 2. Мощность источника SB может быть соизмерима с мощностью источника SA либо отличаться, как в большую, так и в меньшую сторону [2]. Рассмотрим случаи трехфазного и однофазного коротких замыканий

Трехфазное короткое замыкание

Токи замыкания от источников SA и SB вносят вклад в общий ток замыкания, и поскольку замыкание симметрично, каждый ток замыкания является током прямой последовательности. Этапы способа можно описать следующим образом.

1. Преобразование расчетной схемы: заменяем реальные источники питания идеальными источниками с ЭДС E_{SA} и E_{SB} и внутренним сопротивлением Z_A^+ и Z_B^+ .

2. Определение тока трехфазного короткого замыкания.

3. Определение фактического сопротивления до точки короткого замыкания:

$$x = \frac{Z_{DR act}}{Z1^+ + Z2^+}. \quad (12)$$

Однофазное короткое замыкание на землю SLG (Phase failure with the ground)

Замыкание SLG является наиболее частым повреждением в электрических сетях и является несимметричным. Этапы определения сопротивления аналогичны случаю трехфазного короткого замыкания, только необходимо учитывать сопротивление прямой, обратной и нулевой последовательности [7].

3.4. Четвертый способ с быстрым дискретным преобразованием Стоквелла

В [14] алгоритм обнаружения неисправности основан на быстром дискретном преобразовании Стоквелла **FDST (Fast Discrete Stockwell Transform)**, что позволяет улучшить функции дистанционной токовой защиты и устранить недостатки при отказе в системах с распределенной генерацией.

3.4.1. Расчет FDST

Предельные параметры для обнаружения неисправности задаются с помощью уравнений, связанных с быстрым дискретным преобразованием Стоквелла частотно-временного сигнала модулей дистанционной защиты, таких как обнаружение направления, выбор фазы и расчет сопротивления, что важно для селективности защиты.

Быстрое дискретное преобразование Стоквелла FDST дискретного временного ряда $x[kT]$, $k = 1, \dots, N$, соответствующего текущего сигнала $x(t)$, где интервал дискретизации равен T , может быть выражено в виде

$$S\left(jT, \frac{\pi}{NT}\right) = \sum_{m=1}^N [H^\circ W] e^{i2\pi mj/N}, \quad (13)$$

где $n = 1, \dots, N-1$ и $m = 1, \dots, (N/2)$ представляют время и индексы частотных точек данного цикла [6]. Матрица H представляет собой повернутую матрицу, полученную в результате FFT (Fast Fourier Transform, быстрое преобразование Фурье), примененного к $x[kT]$. Матрица разбита на N локализованных векторов в виде

$$H_{M \times N} = \begin{bmatrix} X_2 & \dots & X_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{M+1} & \dots & X_M \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где M равно $N/2$. Член W в (13) представляет собой модифицированное двумерное (2D) окно Гаусса [7], приобретающее локализацию в частотной и временной областях. Окно 2D Gaussian определяется как

$$W_{(m,n)} = e^{T_1} + e^{T_2}, \quad (15)$$

где

$$T_1 = -\frac{2\pi^2(n-1)^2 F}{(a + bm^c)^2}; \quad (16)$$

$$T_2 = \frac{2\pi^2(N-n+1)^2 F}{(a + bm^c)^2}. \quad (17)$$

В приведенном выше уравнении F – коэффициент окна; b – коэффициент масштабирования, который управляет числом колебаний в окне; a и c являются положительными константами. Значение параметра c , которое варьируется от 0 до 1, способствует захвату затухающих скрытых частот; N – смещенное гауссово окно, используемое в качестве фильтра для уменьшения вычислительной нагрузки дискретного S -преобразования путем фильтрации нежелательной частотной информации [8]. Чтобы получить оконную частотно-временную информацию,

составная матрица H умножается на $2D$, гауссовский матричный элемент окна. И так, G – это произведение матрицы H и W :

$$G = H \circ W. \quad (18)$$

3.4.2. Энергия быстрого дискретного преобразования Стоквелла

S -энергия может быть вычислена матрицей FDST из выражения

$$S_{\text{Energy}(t)} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |S^{\wedge 2}_{(m,n)}|. \quad (19)$$

В установившихся условиях S -энергия (S_{Energy}) представляет собой почти постоянный сигнал; однако она резко возрастает в переходных условиях. S -энергия является подходящим индикатором различных нарушений, включая отказы.

Сравнение рассмотренных способов

Каждый из предложенных способов имеет свои достоинства и недостатки [9]. Для выяснения различий выполнено сравнение рассмотренных способов, сопоставлены различные особенности, включая совокупность необходимых расчетных данных, сложность расчета, стоимость реализации и точность результатов.

1. Необходимые данные и расчеты. Все рассмотренные способы требуют локальных измерений и системных данных для определения места повреждения. В дополнение к системным данным и локальным измерениям первый и второй способы требуют результатов автономных расчетов для определения места неисправности. Первый способ требует вычисления текущих значений в составе данных, которые должны храниться в ДЗ. Точно так же второй способ требует учета неподключенных источников питания для построения кривых (расстояние – сопротивление). Третий способ отличается от других тем, что не требует каких-либо офлайн-расчетов, а его функция полностью зависит от локальных измерений, четвертый способ требует локальных измерений и системных данных, но характеризуется вычислительной сложностью, несмотря на точность результатов.

2. Стоимость. Способы, предложенные в статье, не требуют добавления каких-либо измерительных или коммуникационных устройств и, следовательно, не требуют дополнительных затрат на устройства.

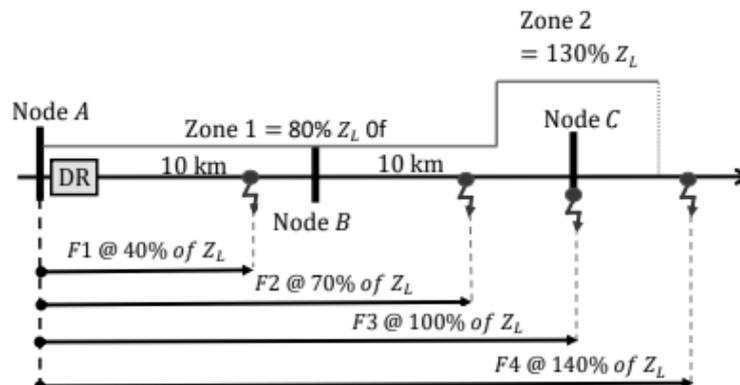


Рис. 6 – ДЗ схема аварийного восстановления с использованием двух зон защиты и мест повреждения [7]

Fig. 6 – DZ emergency recovery scheme using two protection zones and damage sites [7]

3. Точность результатов. Одним из наиболее важных показателей любого способа является его точность. Рассмотренные способы выполнения ДЗ были реализованы с использованием программ моделирования, таких как Matlab и PSCAD™ EMTDC™. Результаты подтвердили способность способов локализовать дефекты с высокой точностью при наличии эффекта питания. Третий способ оказался наименее точен, так как полностью зависит от онлайн-измерений, но снижение точности может быть компенсировано другими его преимуществами.

Исследование выполнено для первых трех рассмотренных способов. Были определены показания реле ДЗ при возникновении однофазного и трехфазного короткого замыкания в разных зонах действия защиты [7].

Результаты исследований обобщены в табл. 2. Сопротивление приведено в относительных единицах (pu) на основе величины положительного последовательного сопротивления.

Канал распределения Z_{act} представляет собой фактическое значение сопротивления прямой последовательности; Z_{m1} , Z_{m2} и Z_{m3} – сопротивления, изменяемые по предлагаемым способам 1–3 соответственно.

Таблица 1 / Table 1

**Сравнение предложенных способов
Comparison of the proposed methods**

Предлагаемые способы	Необходимые данные и расчеты	Стоимость	Точность результатов
Способ 1	Местные измерения Системные данные Офлайн-расчеты	Очень низкая	Очень высокая
Способ 2	Местные измерения Системные данные Офлайн-расчеты	Очень низкая	Очень высокая
Способ 3	Местные измерения Системные данные	Очень низкая	Высокая
Способ 4	Местные измерения Системные данные Офлайн-расчеты	Низкая	Очень высокая

Таблица 2 / Table 2

**Рабочие характеристики дистанционных реле [7]
Operating characteristics of remote relays [7]**

Тип повреждения	Место повреждения	Зона защиты	Z_{act} (pu)	Z_c	Z_{m1}	Z_{m2}	Z_{m3}
3LG	F1	1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
3LG	F2	1	0,7	2,39	0,7	0,7	0,7
3LG	F3	2	1,0	5,26	1,0	1,0	1,0
3LG	F4	Вне зон	1,4	9,09	1,4	1,4	1,4
SLG	F1	1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
SLG	F2	1	0,7	3,69	0,7	0,7	0,68
SLG	F3	2	1,0	8,49	1,0	1,0	1,01
SLG	F4	Вне зон	1,4	1,84	1,4	1,4	1,48

Заключение

Увеличение количества источников возобновляемой генерации в системе распределения привело к увеличению тока питания, что в результате создало новые проблемы для системы электрозащиты. В этой статье выполнено техническое сравнение четырех различных способов для устранения неправильной работы дистанционных реле. Предыдущие способы обеспечения селективности повышения чувствительности дистанционных защит при наличии объектов распределенной генерации были либо дорогими, либо малонадежными. Рассмотренные способы применимы к дистанционным реле как в радиальных распределительных сетях, так и магистральных. Эти способы не требуют для работы каких-либо периферийных устройств или каналов связи и, таким образом, являются более экономичными по сравнению с другими решениями.

Рассмотренные способы повышения селективности и чувствительности действия дистанционной защиты в сетях с распределенной генерацией обладают достоинствами и недостатками. Очевидно, что каждый из них обладает преимуществами в определенных условиях, характеризуемых топологией распределительной сети, типом, параметрами и режимами работы источников питания и нагрузки. Актуальным является исследование влияния параметров и режимов работы объектов распределенной генерации на действие дистанционной защиты. Перспективным направлением является применение средств и методов искусственного интеллекта, например, нейронных сетей, нечеткой логики и т.д. с целью повышения эффективности действия дистанционной защиты в сетях с распределенной генерацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lavrik A., Zhukovskiy Y., Tsvetkov P.** Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting // *Energies*. – 2021. – Vol. 14 (16). – P. 5059. – DOI: 10.3390/en14165059.
2. **Kovalchuk M.S., Baburin S.V.** Modelling and control system of multi motor conveyor // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 327 (2). – P. 022065. – DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022065.
3. **Pirog S., Shklyarskiy Y., Skamyin A.** Non-linear electrical load location identification // *Journal of Mining Institute*. – 2019. – Vol. 237. – P. 317–321. – DOI: 10.31897/PMI.2019.3.317.
4. Distortion load identification based on the application of compensating devices / Y. Shklyarskiy, A. Skamyin, I. Vladimirov, F. Gazizov // *Energies*. – 2020. – Vol. 13 (6). – P. 1430. – DOI: 10.3390/en13061430.
5. **Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю.** Повышение качества электроэнергии в системах электрообеспечения минерально-сырьевого комплекса гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами // *Записки Горного института*. – 2021. – № 247. – С. 132–140. – DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14.
6. **Gonen T.** *Electric power distribution engineering*. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2015. – 768 p.
7. **Hariri F., Crow M.** New infeed correction methods for distance protection in distribution systems // *Energies*. – 2021. – Vol. 14 (15). – P. 4652. – DOI: 10.3390/en14154652.
8. Adaptive Mho distance protection for interconnected transmission lines compensated with thyristor controlled series capacitor / G.M. Abo-Hamad, D.K. Ibrahim, E. Aboul Zahab, A.F. Zobaa // *Energies*. – 2021. – Vol. 14 (9). – P. 2477. – DOI: 10.3390/en14092477.
9. **Brearley B.J., Prabu R.R.** A review on issues and approaches for microgrid protection // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 67. – P. 988–997. – DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.047.
10. An update on power quality / ed. by D.D-Ch. Lu. – Sydney: Intech-Open, 2014. – 160 p.

11. **Wang Y., Orchard J.** Fast discrete orthonormal stockwell transform // *SIAM. Journal on Scientific Computing.* – 2009. – Vol. 31 (5). – P. 4000–4012.
12. **Krishnanad K.R., Dash P.K.** A new real-time discrete S-transform for cross-differential protection of shunt-compensated power systems // *IEEE Transactions on Power Delivery.* – 2013. – Vol. 28 (1). – P. 402–410.
13. **Nguyen T., Liao Y.** Power quality disturbance classification utilizing S-transform and binary feature matrix method // *Electrical Power System Research.* – 2009. – Vol. 79. – P. 569–575.
14. S-Transform based fault detection algorithm for enhancing distance protection performance / J.J. Chavez, M. Popov, D. López, S. Azizi, V. Terzija // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.* – 2021. – Vol. 130. – P. 106966. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.106966.
15. **Mishra P., Pradhan A.K., Bajpai P.** Adaptive distance relaying for distribution lines connecting inverter-interfaced solar PV plant // *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* – 2021. – Vol. 68. – P. 2300–2309.
16. **Thakre M.P., Kale V.S.** An adaptive approach for three zone operation of digital distance relay with Static Var Compensator using PMU // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.* – 2016. – Vol. 77. – P. 327–336.
17. **Tsimtsios A.M., Korres G.N., Nikolaidis V.C.** A pilot-based distance protection scheme for meshed distribution systems with distributed generation // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.* – 2019. – Vol. 105. – P. 454–469.
18. Anderson, P.M. *Power System Protection*; Wiley-IEEE Press: Piscataway, NJ, USA, 1999; p. 379.
19. **Kezunovic M., Ren J., Lotfifard S.** Design, modeling and evaluation of protective relays for power systems. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2016. – 297 p.
20. **Horowitz S.H., Phadke A.G.** *Power system relaying.* – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2014. – 111 p.
21. **Nikolaidis V.C., Tsimtsios A.M., Safigianni A.S.** Investigating particularities of infeed and fault resistance effect on distance relays protecting radial distribution feeders with DG // *IEEE Access.* – 2018. – Vol. 6. – P. 11301–11312.
22. Impact of inverter based generation on bulk power system dynamics and short-circuit performance: Technical Report PES-TR68 / IEEE Power & Energy Society. – New York, 2018.
23. International, M.H. *PSCAD Version 5.0.* Winnipeg, MB, Canada, 2021. – URL: <https://www.pscad.com/> (accessed: 30.07.2021).
24. **Ibrahim M.A.** *Disturbance analysis for power systems.* – 1st ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2011. – 223 p.
25. **Maali Amiri E., Vahidi B.** Integrated protection scheme for both operation modes of microgrid using S-Transform // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.* – 2020. – Vol. 121. – P. 106051.
26. **Suja S., Jerome J.** Pattern recognition of power signal disturbances using S Transform and TT Transform // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.* – 2010. – Vol. 32 (1). – P. 37–53.
27. IEEE 519–2014: IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems / PE/T&D – Transmission and Distribution. – IEEE, 2014.
28. **Koteleva N.I., Korolev N.A., Zhukovskiy Y.L.** Identification of the technical condition of induction motor groups by the total energy flow // *Energies.* – 2021. – Vol. 14 (20). – P. 6677. – DOI: 10.3390/en14206677.

STUDY OF THE PROTECTION ALGORITHMS IN DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS

Ustinov D.A., Aysar A.R.

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Current trends in the development of power supply systems for industrial facilities when applying the principles of distributed generation consist in the implementation of power supply from several power sources of different types and characteristics (photovoltaic cells, wind power

plants, microturbine plants, diesel power plants), the maximum approximation of power sources to electrical loads, the use of electricity storage. The availability of such installations near consumers reduces the quantitative energy consumption by reducing the technical losses of the generated energy and reducing dependence on fossil fuels. However, with these advantages, distributed generation has created technical problems, one of which is the complication of relay protection systems due to the possibility of powering the damage point from different sides. This circumstance requires the development of new algorithms and protection schemes to ensure selectivity and to increase the sensitivity of relay protection. The purpose of the study is to analyze the algorithms of remote protection in distributed generation systems. The methods used comprise an integrated approach, including scientific analysis, processing and analysis of the results of theoretical and experimental studies in the field of relay protection of electrical complexes in networks with distributed generation. The results obtained present the analysis of various algorithms for the implementation of protection, which were implemented as proposals for distribution networks. The system of remote protection in networks containing distributed generation systems is presented, and the algorithms of operation are compared to increase the sensitivity of remote protection devices to the occurrence of various emergency modes: single-phase and three-phase short circuits. Several algorithms for increasing the sensitivity of remote protection for distribution networks in the presence of several power sources are considered. The comparison of these algorithms according to the criteria of the implementation cost, the accuracy of implementation, the number of necessary input data is also carried out. Practical significance of the research the research results can be used to take into account the effect of changes in the parameters of protected connections under conditions of electrical complexes operation in a network with distributed generation on the effectiveness of remote protection. They make it possible to increase the sensitivity and selectivity of the remote protection operation in case of emergency situations.

Keywords: energy, distributed generation (DG), protection schemes, distribution networks, protection algorithms, distance protection.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-41-55

REFERENCES

1. Lavrik A., Zhukovskiy Y., Tsvetkov P. Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting. *Energies*, 2021, vol. 14 (16), p. 5059. DOI: 10.3390/en14165059.
2. Kovalchuk M.S., Baburin S.V. Modelling and control system of multi motor conveyor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327 (2), p. 022065. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022065.
3. Pirog S., Shklyarskiy Y., Skamyin A. Non-linear electrical load location identification. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 237, pp. 317–321. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.317.
4. Shklyarskiy Y., Skamyin A., Vladimirov I., Gazizov F. Distortion load identification based on the application of compensating devices. *Energies*, 2020, vol. 13 (6), p. 1430. DOI: 10.3390/en13061430.
5. Sychev Yu.A., Zimin R.Yu. Povyshenie kachestva elektroenergii v sistemakh elektro-snabzheniya mineral'no-syr'evogo kompleksa gibridnymi fil'trokompensiruyushchimi ustroystvami [Improving the quality of electricity in the power supply systems of the mineral resource complex with hybrid filter-compensating devices]. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*, 2021, no. 247, pp. 132–140. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14. (In Russian).
6. Gonen T. *Electric power distribution engineering*. Boca Raton, FL, CRC Press, 2015. 768 p.
7. Hariri F., Crow M. New infeed correction methods for distance protection in distribution systems. *Energies*, 2021, vol. 14 (15), p. 4652. DOI: 10.3390/en14154652.
8. Abo-Hamad G.M., Ibrahim D.K., Aboul Zahab E., Zobaa A.F. Adaptive Mho distance protection for interconnected transmission lines compensated with thyristor controlled series capacitor. *Energies*, 2021, vol. 14 (9), p. 2477. DOI: 10.3390/en14092477.
9. Brearley B.J., Prabu R.R. A review on issues and approaches for microgrid protection. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 67, pp. 988–997. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.047.
10. Lu D.D.-Ch., ed. *An update on power quality*. Sydney, Intech-Open, 2014. 160 p.

11. Wang Y., Orchard J. Fast discrete orthonormal stockwell transform. *SIAM. Journal on Scientific Computing*, 2009, vol. 31 (5), pp. 4000–4012.
12. Krishnanad K.R., Dash P.K. A new real-time discrete S-transform for cross-differential protection of shunt-compensated power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, vol. 28 (1), pp. 402–410.
13. Nguyen T., Liao Y. Power quality disturbance classification utilizing S-transform and binary feature matrix method. *Electrical Power System Research*, 2009, vol. 79, pp. 569–575.
14. Chavez J.J., Popov M., López D., Azizi S., Terzija V. S-Transform based fault detection algorithm for enhancing distance protection performance. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, vol. 130, p. 106966. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.106966.
15. Mishra P., Pradhan A.K., Bajpai P. Adaptive distance relaying for distribution lines connecting inverter-interfaced solar PV plant. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, vol. 68, pp. 2300–2309.
16. Thakre M.P., Kale V.S. An adaptive approach for three zone operation of digital distance relay with Static Var Compensator using PMU. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, vol. 77, pp. 327–336.
17. Tsimtsios A.M., Korres G.N., Nikolaidis V.C. A pilot-based distance protection scheme for meshed distribution systems with distributed generation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, vol. 105, pp. 454–469.
18. Anderson, P.M. *Power System Protection*; Wiley-IEEE Press: Piscataway, NJ, USA, 1999; p. 379.
19. Kezunovic M., Ren J., Lotfifard S. *Design, modeling and evaluation of protective relays for power systems*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2016. 297 p.
20. Horowitz S.H., Phadke A.G. *Power system relaying*. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2014. 111 p.
21. Nikolaidis V.C., Tsimtsios A.M., Safigianni A.S. Investigating particularities of infeed and fault resistance effect on distance relays protecting radial distribution feeders with DG. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 11301–11312.
22. *Impact of inverter based generation on bulk power system dynamics and short-circuit performance*. Technical Report PES-TR68. New York, IEEE Power & Energy Society, 2018.
23. International, M.H. PSCAD Version 5.0. Winnipeg, MB, Canada. 2021. Available at: <https://www.pscad.com/> (accessed 30.07.2021).
24. Ibrahim M.A. *Disturbance analysis for power systems*. 1st ed. Hoboken, NJ, Wiley, 2011. 223 p.
25. Maali Amiri E., Vahidi B. Integrated protection scheme for both operation modes of microgrid using S-Transform. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, vol. 121, p. 106051.
26. Suja S., Jerome J. Pattern recognition of power signal disturbances using S Transform and TT Transform. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2010, vol. 32 (1), pp. 37–53.
27. IEEE 519–2014: *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. PE/T&D – Transmission and Distribution. IEEE, 2014.
28. Koteleva N.I., Korolev N.A., Zhukovskiy Y.L. Identification of the technical condition of induction motor groups by the total energy flow. *Energies*, 2021, vol. 14 (20), p. 6677. DOI: 10.3390/en14206677.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Устинов Денис Анатольевич – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет. (Адрес: 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2. E-mail: Ustinov_DA@pers.spmi.ru).

Ustinov Denis Anatolevich – Doctor of Sciences (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the of Electricity and Electromechanics Department of Saint Petersburg Mining University. (Address: 2, 21st line, St. Petersburg, 199106, Russia. E-mail: Ustinov_DA@pers.spmi.ru).



Абу Рашид Айсар – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет. (Адрес: 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2. E-mail: Aysarabourashid91@gmail.com).

Abou Rashid Aysar – Postgraduate student of Saint Petersburg Mining University. (Address: 2, 21st line, St. Petersburg, 199106, Russia. E-mail: Aysarabourashid91@gmail.com).

*Статья поступила 17 февраля 2023 г.
Received February 17, 2023*

To Reference:

Ustinov D.A., Aysar A.R. Issledovanie algoritmov raboty distantsionnoi zashchity v sistemakh raspredelennoi generatsii [Study of the protection algorithms in distributed generation systems]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 2 (59), pp. 41–55. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-41-55.