ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

Владимир Александрович Шуин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: vshuin@mail.ru

Татьяна Юрьевна Шадрикова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: tanya-vinokurova@mail.ru

Наталия Владимировна Кузьмина

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-06, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Константин Сергеевич Алёшин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: alyoshin@rza.ru

Многопараметрическая токовая защита от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью

Авторское резюме

Состояние вопроса. В распределительных сетях напряжением 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, для защиты от однофазных замыканий на землю преимущественно применяются токовые защиты, основанные на контроле составляющей основной частоты тока нулевой последовательности. На селективность и устойчивость функционирования таких защит существенное влияние оказывают интенсивные переходные процессы при дуговых перемежающихся однофазных замыканиях на землю. Одним из перспективных направлений совершенствования токовых защит от однофазных замыканиях на землю является повышение селективности и устойчивости их функционирования на основе распознавания разновидностей замыканий на землю с применением многопараметрического подхода к выполнению релейной защиты.

Материалы и методы. Для разработки и исследования методов и алгоритмов распознавания разновидностей замыканий на землю в сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью и оценки эффективности их применения в целях повышения селективности и устойчивости функционирования токовых защит от однофазных замыканий на землю использовано имитационное моделирование в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. Конфигурация и параметры имитационных моделей выбраны с учетом основных особенностей распределительных кабельных и воздушных сетей напряжением 6–10 кВ систем промышленного, городского и сельскохозяйственного электроснабжения, определяющих характеристики установившихся и переходных режимов при однофазных замыканиях на землю.

Результаты. Разработаны принципы выполнения и схема многопараметрической токовой защиты от однофазных замыканий на землю для сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью, обеспечивающей распознавание всех учитываемых разновидностей замыканий на землю (устойчивых, дуговых перемежающихся и неопасных для сети дуговых прерывистых) и возможность автоматического выбора на этой основе наиболее эффективного способа ее действия (сигнал или отключение). Результатами функциональных испытаний на имитационных моделях подтверждена эффективность разработанных алгоритмов функционирования многопараметрической токовой защиты при всех учитываемых видах однофазных замыканий на землю в сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью.

[©] Шуин В.А., Шадрикова Т.Ю., Кузьмина Н.В., Алёшин К.С., 2025 Вестник ИГЭУ, 2025, вып. 1, с. 39–46.

Выводы. Разработанное техническое решение реализует многопараметрическую токовую защиту от однофазных замыканий на землю, обеспечивающую повышение селективности и устойчивости функционирования при всех видах замыканий на землю по сравнению с традиционными исполнениями токовых защит от данного вида повреждений, непрерывность действия не только при устойчивых, но и при наиболее опасных дуговых перемежающихся замыканиях на землю, а также возможность выбора способа действия защиты при данных разновидностях замыканий на землю.

Ключевые слова: кабельные сети, воздушные сети напряжением 6–10 кВ с изолированной нейтралью, однофазные замыкания на землю, защита от замыканий на землю, селективность, устойчивость функционирования токовой защиты

Vladimir Alexandrovich Shuin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: vshuin@mail.ru

Tatyana Yurievna Shadrikova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tanya-vinokurova@mail.ru

Nataliya Vladimirovna Kuzmina

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-06, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Konstantin Sergeevich Alyoshin

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: alyoshin@rza.ru

Multiparameter current protection against earth faults in 6–10 kV networks with isolated neutral

Abstract

Background. In distribution networks with a voltage of 6–10 kV operating with an isolated neutral, current protections based on monitoring the fundamental frequency component of the zero-sequence current are used for protection against singlephase earth faults (SPEF). The selectivity and stability of such protections are significantly affected by intense transient processes during arc intermittent SPEF. One of the promising areas to improve current protection against SPEF is to increase the selectivity and stability of their operation based on recognizing the types of earth faults using a multiparameter approach to implementing relay protection.

Materials and methods. To develop and study methods and algorithms to recognize types of earth faults in 6–10 kV networks with isolated neutral and to evaluate the efficiency of their application to improve the selectivity and stability of current protection against single-phase earth faults, simulation modeling in Matlab, SimPowerSystems and Simulink has been used. The configuration and parameters of the simulation models consider the key features of distribution cable and overhead networks with a voltage of 6–10 kV of industrial, urban, and agricultural power supply systems, determining the characteristics of steady-state and transient modes during single-phase earth faults.

Results. The principles of implementation and the scheme of multiparameter current protection against single-phase earth faults for 6–10 kV networks with isolated neutral have been developed. They ensure recognition of all considered types of earth faults (stable, arc intermittent faults and non-hazardous for the network arc faults) and the possibility of automatic selection of the most effective method of its operation (signal or trip action). Functional tests on simulation models have confirmed the efficiency of the developed algorithms of operation of multiparameter current protection for all considered types of single-phase earth faults in 6–10 kV networks with isolated neutral.

Conclusions. The developed technical solution implements multiparameter current protection against earth faults ensuring increased selectivity and stability of operation for all types of earth faults compared to traditional designs of current protection against this type of damage, continuity of operation not only for stable, but also for the most dangerous arc intermittent earth faults, as well as the ability to select the method of protection for these types of earth faults.

Key words: cable networks, overhead networks with a voltage of 6–10 kV with isolated neutral, single-phase earth faults, earth fault protection, selectivity, stability of current protection operation

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.1.039-046

Введение. В системах электроснабжения городов, промышленных предприятий и объектов сельской местности большая часть электрической энергии распределяется потребите-

лям через кабельные и воздушные сети напряжением 6–10 кВ. В настоящее время примерно 80 % кабельных сетей и практически все воздушные сети напряжением 6–10 кВ работают с

изолированной нейтралью. В таких сетях однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются преобладающим видом повреждений и часто являются первопричиной аварий, сопровождающихся значительным экономическим ущербом [1-5]. Чем быстрее ликвидируется повреждение, тем меньше вероятность аварийных отключений кабельных и воздушных линий (КЛ и ВЛ) вследствие перехода ОЗЗ в многофазное короткое замыкание (КЗ). Надежность электроснабжения потребителей во многом зависит от эффективности функционирования устройств защиты от ОЗЗ, обеспечивающих быстрое селективное определение поврежденного присоединения, участка или элемента защищаемой сети.

В распределительных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, наиболее широкое применение получили токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП), основанные на контроле значений полных токов нулевой последовательности $3l_0$ защищаемого присоединения или их составляющих основной частоты $3l_{0(50)}$ [6–9]. На эффективность функционирования традиционных исполнений ТЗНП существенное влияние оказывают интенсивные переходные процессы при дуговых перемежающихся ОЗЗ, ограничивающие их селективность и устойчивость функционирования (техническое совершенство (TC) [6]) и, соответственно, область возможного применения.

Более высокое ТС обеспечивают защиты с двумя подведенными величинами, например токовые направленные защиты нулевой последовательности (ТНЗНП [6, 8–10]), однако их недостатком является меньшая надежность функционирования по сравнению с ТЗНП из-за возможных в реальных условиях эксплуатации нарушений в цепях напряжения, а также ограничения области их применения только объекоборудованными трансформаторами тами напряжения для измерения напряжения нулевой последовательности. В связи с этим ТНЗНП применяются только в тех случаях, когда использование более простых и надежных токовых защит не позволяет обеспечить селективность или требуемую чувствительность.

Одним из перспективных направлений совершенствования ТЗНП является повышение их ТС на основе распознавания устойчивых и всех разновидностей дуговых ОЗЗ с применением принципа выполнения релейной защиты, получившего название многопараметрического [11]. Применение данного принципа означает расширение информационной базы ТЗНП за счет использования в целях распознавания вида повреждения и поврежденного присоединения не одного параметра тока нулевой последовательности 3*b* защищаемого присоединения (например, среднеквадратичного значения полного тока $3l_0$ или его составляющей основной частоты 50 Гц $3l_{0(50)}$), а двух или более параметров. К таким дополнительным параметрам относятся, например, общий уровень высших гармоник $3l_{0(B\Gamma)}$ в токе $3i_0$, а при дуговых прерывистых замыканиях – величина интервалов времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги, определяющие степень опасности дуговых ОЗЗ [12]. Распознавание всех разновидностей ОЗЗ может быть использовано для управления уставкой по току срабатывания и выбора наиболее эффективного способа действия защиты (на сигнал или на отключение).

Разновидности ОЗЗ, учитываемые при выполнении многопараметрической токовой защиты, и критерии их распознавания. По требованиям СТО ПАО «ФСК ЕЭС»¹, защита в сетях с изолированной нейтралью. а также в сетях с заземлением нейтрали через дугогасящий реактор или резистор должна быть чувствительна к устойчивым и дуговым ОЗЗ (УЗЗ и ДЗЗ). Наиболее опасной разновидностью ДЗЗ в сетях с изолированной нейтралью являются так называемые дуговые перемежающиеся ОЗЗ (ДПЗЗ), сопровождающиеся опасными перенапряжениями на неповрежденных фазах сети и значительным увеличением среднеквадратичного значения тока в месте повреждения по сравнению с УЗЗ. В сетях 6–10 кВ, прежде всего кабельных, при ДПЗЗ во многих случаях целесообразно действие защиты от ОЗЗ на отключение, а не на сигнал [13]. Характерным признаком ДПЗЗ является эскалация напряжения на поврежденной фазе, бросков переходных токов и перенапряжений при повторных зажиганиях заземляющей дуги (рис. 1,а). Опасными для распределительных сетей 6–10 кВ считаются перенапряжения с кратностью $K_{\Pi} = U_{\Pi,\text{макс}}/U_{\text{m.db,HOM}} > 2,6-2,7$ [14]. На основе исследований на имитационных моделях показано, что в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью кратность дуговых перенапряжений достигает опасных значений Kn = 2,7 и более, если интервалы времени Δt между повторными пробоями изоляции не превышают ~3-х периодов промышленной частоты (~60 мс).

При $\Delta t > ~60$ мс эскалация перенапряжений при повторных зажиганиях дуги практически отсутствует, а их кратность не превышает опасных для изоляции элементов сети значений $K_n = 2,7$. Такие ОЗЗ, в отличие от ДПЗЗ, могут быть названы дуговыми прерывистыми (ДПрЗЗ) (рис. 1,6). Таким образом, в качестве критерия распознавания наиболее опасных для защищаемой сети ДПЗЗ и не представляющих особой опасности ДПрЗЗ в токовой многопараметрической защите может быть использована длительность интервалов Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги.

¹ Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА / СТО 56947007- 29.120.70.241-2017, дата введения: 28.02.2017.

В качестве критерия распознавания УЗЗ (рис. 1,в) и ДЗЗ (ДПЗЗ и ДПрЗЗ) в многопараметрической защите используется соотношение суммарного уровня высших гармонических составляющих (ВГ) и составляющей основной частоты в токе нулевой последовательности защищаемого присоединения З*I*_{0(ВГ)}/З*I*₀₍₅₀₎. В [12] на основе данных, полученных на имитационных моделях сетей 6–10 кВ, показано, что при УЗЗ максимальные значения отношения З*I*_{0(ВГ)}/З*I*₀₍₅₀ не превышают 0,5–0,55. При дуговых ОЗЗ (ДПЗЗ и ДПрЗЗ) относительный уровень ВГ в токе ОЗЗ в сетях 6–10 кВ возрастает в 5 и более раз, что обеспечивает надежное распознавание УЗЗ и ДЗЗ.

Рис. 1 иллюстрирует основные особенности распознаваемых защитой разновидностей ОЗЗ.

Степень разработанности направления исследований. Разработки многопараметрических ТЗНП ведутся в ИГЭУ с 2014 г. в сотрудничестве с НПП «ЭКРА». Разработанные в указанный период технические решения реализуют двухпараметрический и многопараметрический принципы выполнения ТЗНП для сетей 6–10 кВ [12, 15, 16].

Двухпараметрический принцип выполнения ТЗНП основан на измерении составляющей основной частоты 310(50) и суммарного уровня высших гармонических составляющих 3 Іо(вг) в токе 3іо защищаемого присоединения, на сравнении составляющих 3 I₀₍₅₀₎ и 3 I_{0(ВГ)} и автоматическом уменьшении уставки по току срабатывания защиты *I*уст при 3*I*₀₍₅₀₎ > 3*I*_{0(ВГ)} для повышения ее чувствительности при УЗЗ [15]. Основными недостатками двухпараметрической токовой защиты являются: не всегда достаточная чувствительность при ДПЗЗ и тем более при ДПр33; отсутствие распознавания разновидностей дуговых ОЗЗ (ДПЗЗ и ДПрЗЗ), что не позволяет обеспечить повышение чувствительности при ДПр33; отсутствие непрерывности действия, обусловливающее дребезг контактов измерительного органа тока при наиболее опасных дуговых перемежающихся замыканиях и снижение надежности функционирования защиты при выполнении ее с действием на отключение.

Принцип действия многопараметрической ТЗНП основан на контроле значения составляющей основной частоты 3*l*₀₍₅₀₎ и суммарного уровня высших гармонических составляющих 3*l*_{0(ВГ)} в токе 3*i*₀ при устойчивых и дуговых ОЗЗ, а также величины интервалов времени ∆*t* между повторными пробоями изоляции при ДПЗЗ и ДПрЗЗ [16]. Основным недостатком данного устройства многопараметрической токовой защиты является неполнота распознавания разновидностей дуговых ОЗЗ (ДПЗЗ и ДПрЗЗ), что ограничивает ее селективность и чувствительность при указанных видах замыканий.



Рис. 1. Классификация разновидностей ОЗЗ, учитываемых при выполнении многопараметрической токовой защиты от данного вида повреждений: а – ДПЗЗ; б – ДПрЗЗ; в – УЗЗ; 1 – напряжение на поврежденной фазе; 2 – ток ОЗЗ 3*b*; 3 – среднеквадратичное значение тока ОЗЗ 3*b*; 4 – напряжение на неповрежденной фазе

Методы исследования. Наиболее эффективным методом анализа сложных динамических режимов функционирования устройств релейной защиты является математическое имитационное моделирование. Для анализа селективности и устойчивости алгоритмов многопараметрической токовой защиты от ОЗЗ и проведения ее функциональных испытаний использовалась комплексная имитационная модель «сеть 6-10 кВ - устройство защиты», реализованная в SimPowerSystems и Simulink. Конфигурация и параметры модели учитывали основные особенности кабельных и воздушных сетей напряжением 6-10 кВ в системах электроснабжения промышленного, городского и сельскохозяйственного назначения.

Общая структурная схема многопараметрической токовой защиты. На рис. 2 приведена структурно-функциональная схема трехступенчатой многопараметрической ТЗНП, обеспечивающей распознавание УЗЗ, ДПЗЗ и ДПрЗЗ в целях повышения селективности и устойчивости функционирования и возможности применения различных способов действия защиты при разных видах ОЗЗ.

Схема на рис. 2 включает 4 основных функциональных блока: блок формирования сравниваемых величин, блок распознавания разновидностей ОЗЗ, измерительный блок и блок логики формирования выходных сигналов.

Блок формирования сравниваемых величин включает в себя вторичный преобразователь тока (TLA), фильтр низших частот (ZF1), обеспечивающий подавление гармонических составляющих с частотами *f* > 1,5–2 кГц, блок вычисления среднеквадратичного значения *Зl*₀ входного тока нулевой последовательности на интервале времени усреднения *T*_{yc.1} = 3*T*₅₀ = 60 мс

(RMS), первый и второй блоки преобразования Фурье (FFT1 и FFT2), обеспечивающие вычисление среднеквадратичного значения составляющей основной частоты $3I_{0(50)}$ тока $3i_0$ соответственно на интервале времени усреднения $T_{yc.1} = 3T_{50} = 60$ мс и $T_{yc.2} = T_{50} = 20$ мс, и преобразователь *F* для вычисления суммарного уровня ВГ $3I_{0(B\Gamma)}$ в токе $3i_0$ по выражению

$$3I_{0 (B\Gamma)} = \sqrt{(3I_0)^2 - (3I_{0 (50)})^2}.$$
 (1)

Принятый в блоках RMS и FFT1 интервал времени усреднения $T_{yc} = 60$ мс при вычислении среднеквадратичных значений $3I_0$, $3I_{0(50)}$ и $3I_{0(BF)}$ составляющих тока $3I_0$ обеспечивает непрерывность действия защиты при ДПЗЗ ($\Delta t \le 60$ мс).

Блок распознавания разновидностей ОЗЗ включает схему сравнения значений З *l*_{0(ВГ)} и З *l*₀₍₅₀₎ с двумя выходами (СМР), элемент логического умножения (AND1) и логический элемент задержки на включение (DT).

Как уже отмечалось выше, в качестве критерия распознавания УЗЗ и ДЗЗ (ДПЗЗ и ДПрЗЗ) в защите используется соотношение **3/**0(ВГ) И 3*I*₀₍₅₀₎. При дуговых замыканиях $3I_{0(B\Gamma)} > 3I_{0(50)}$ и на выходе 1 схемы сравнения СМР появляется логический сигнал «1», а на выходе 2 СМР – логический сигнал «0». При устойчивых O33 310(50) > 310(BF) и на выходах СМР логические сигналы меняют свои значения на противоположные. Элемент задержки на включение DT (T₃ = 60 мс) обеспечивает «расфильтровку» дуговых перемежающихся $(\Delta t \le 60 \text{ мс})$ и дуговых прерывистых ($\Delta t > 60 \text{ мс}$) ОЗЗ. Таким образом, логические состояния выходов 1-3 блока распознавания в зависимости от вида ОЗЗ определяется табл. 1.



Рис. 2. Структурно-функциональная схема многопараметрической токовой защиты с распознаванием всех разновидностей ОЗЗ

Вид	Состояние выходов		
O33	выход 1	выход 2	выход 3
ДПр33	1	0	0
ДП33	1	1	0
У33	0	0	1

Таблица 1. Состояния выходов блока распознавания при различных видах ОЗЗ

Измерительный блок содержит три измерительных органа тока (ИОТ): І ступени I>>>; II ступени I>>; III ступени I>. ИОТ I ступени предназначен для действия при ДПЗЗ, II ступени – при УЗЗ, III ступени – при ДПр33. Отметим, что при достаточной чувствительности ИОТ III ступени может фиксировать также однократные пробои изоляции (так называемые кратковременные самоустраняющиеся ОЗЗ - КрЗЗ). В ИОТ І ступени и ИОТ II ступени в качестве воздействующей величины используется среднеквадратичное значение 31/0(50), измеренное на интервале времени *Т*_{ус.1} = 3*T*₅₀ = 60 мс (блок FFT1), в ИОТ III ступени в целях повышения ее быстродействия и чувствительности – значение 3 /0(50), измеренное на интервале времени $T_{yc.1} = T_{50} = 20 \text{ мс}$ (блок FFT2).

При недостаточной чувствительности I ступени сигнал на выходе 2 блока распознавания, соответствующий ДПЗЗ, будет «0». Анализ состояний выходов блока распознавания (табл. 1) показывает, что в этом случае отказа защиты не происходит, а замыкание будет зафиксировано как ДПрЗЗ.

Блок логики на основе входных сигналов, полученных от блока распознавания и измерительного блока, формирует выходные сигналы, соответствующие виду ОЗЗ. При ДПЗЗ выходной сигнал «1» появляется только на первом выходе защиты, при УЗЗ – только на втором выходе, при ДПрЗЗ – только на третьем выходе.

Методика выбора уставок ступеней по току срабатывания. Все три ступени многопараметрической токовой защиты представляют собой максимальную ТЗНП, уставка по току срабатывания *l*_{уст} которой выбирается из условия отстройки от собственного емкостного тока защищаемого присоединения *l*_{с собс} при внешних ОЗЗ по выражению [3–5 и др.]

$$I_{\rm VCT} \ge K_{\rm OTC} \, K_{\rm Dp} \, I_{\rm C \, cobc} \,, \tag{2}$$

где *К*_{отс} = 1,2–1,3 – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности измерительного органа тока и расчета значения *l*_{c собс}; *К*_{бр} – коэффициент броска, учитывающий увеличение воздействующей величины в переходных режимах при дуговых O33.

Значение коэффициента *К*_{бр} зависит от вида воздействующей величины, используемой в измерительных органах тока защиты. В цифровых исполнениях ТЗНП в качестве воздействующей величины, как правило, используется среднеквадратичное значение составляющей основной частоты 3*I*₀(50)</sub> тока 3*i*₀. Первая ступень рассматриваемой защиты предназначена для действия при ДПЗЗ, поэтому при выборе уставки *l*уст.1 по (2) в значении *К*_{бр} должно учитываться влияние эскалации бросков переходного тока при повторных зажиганиях заземляющей дуги. С учетом этого для первой ступени, как и для традиционных ТЗНП, основанных на использовании составляющей З*l*₀₍₅₀₎, рекомендуется принимать в (2) *К*_{бр.1} = 2,5–3 [3, 5].

Вторая ступень предназначена для действия только при УЗЗ и блокируется при всех дуговых замыканиях, поэтому при выборе уставки *I*_{уст.2} можно принять *К*_{бр.2} = 1.

Третья ступень предназначена для действия при ДПр33, включая Кр33. В отличие от первой и второй ступеней, для повышения быстродействия и чувствительности в третьей ступени в качестве воздействующей величины используется среднеквадратичное значение составляющей основной частоты 310(50) тока 310, измеренное на интервале времени усреднения $T_{yc} = T_{50} = 20$ мс. При повторных зажиганиях заземляющей дуги через интервалы времени ∆t > ~60 мс эскалация амплитуд бросков переходных токов практически отсутствует, что позволяет уменьшить значение Кбр в (2) по сравнению с ДПЗЗ. Вычислительные эксперименты на имитационных моделях кабельных и воздушных сетей 6-10 кВ показали, что при ограничении рабочего диапазона ВГ устройства защиты верхней частотой fpa6 < 1,5-2 кГц (рис. 2, фильтр ZF1) можно с некоторым запасом принять Кбр.3 ≈ 1,5. Отметим, что при указанном значении Кбр.3 обеспечивается также отстройка третьей ступени от бросков переходных токов 3 іо, возникающих при коммутационных переключениях в сети (например, при включении зашишаемого присоединения под напряжение).

Функциональные испытания многопараметрической токовой защиты при разных видах ОЗЗ на имитационных моделях кабельных и воздушных сетей 6–10 кВ. Цель функциональных испытаний - проверка селективности и устойчивости функционирования основных функциональных блоков защиты при внутренних и внешних ДПЗЗ, ДПрЗЗ и УЗЗ: блока распознавания разновидностей ОЗЗ; измерительного блока; блока логики формирования выходных сигналов. Для анализа селективности и устойчивости алгоритмов основных функциональных блоков многопараметрической токовой защиты от ОЗЗ использовалась комплексная имитационная модель, реализованная в SimPowerSystems и Simulink и включающая модель кабельной или воздушной сети напряжением 6-10 кВ и модель устройства защиты, реализующую структурно-функциональную схему (рис. 2). Функциональные испытания защиты выполнялись при ДПЗЗ и ДПрЗЗ, смоделированным в соответствии с теориями W. Petersen'a и J.F. Peters, J. Slepian [17, 18]. При всех видах внутренних и внешних ОЗЗ, как металлических, так и через переходное сопротивление, блок распознавания разновидностей ОЗЗ, измерительный блок и блок логики обеспечивали распознавание вида ОЗЗ, селективность и устойчивость функционирования разработанных алгоритмов многопараметрической защиты от данного вида повреждений. На рис. 3 в качестве примера приведены осциллограммы электрических величин и выходных сигналов, иллюстрирующие функционирование основных блоков защиты при внутреннем сложном виде ОЗЗ, начинающегося со стадии ДПрЗЗ, переходящего затем в стадии ДПЗЗ и УЗЗ.



Рис. 3. Осциллограммы, иллюстрирующие работу многопараметрической токовой защиты при внутреннем ДПрРЗЗ, переходящем в ДПЗЗ и УЗЗ: 1 – ток $3i_0$ на входе защиты; 2 и 3 – среднеквадратичные значения составляющих $3l_{0(B\Gamma)}$ и $3l_{0(50)}$ тока $3i_0$; 4, 5 и 6 – соответственно зоны ДПрЗЗ, ДПЗЗ и УЗЗ, определенные блоком распознавания разновидностей замыканий на землю; 7, 8 и 9 – среднеквадратичные значения токов уставки $l_{ycr.1}$, составляющей $3l_{0(50)}$ тока $3i_0$ и выходной сигнал «ДПЗЗ» первой ступени защиты; 10, 11 и 12 – среднеквадратичные значения токов уставки $l_{ycr.2}$, составляющей $3l_{0(50)}$ тока $3i_0$ и выходной сигнал «УЗЗ» второй ступени защиты; 13, 14 и 15 – среднеквадратичные значения токов уставки $l_{ycr.3}$, составляющей $3l_{0(50)}$ тока $3i_0$ и выходной сигнал «ДПрЗЗ» первой сигнал «ДПрЗЗ» и выходной сигнал «УЗЗ» второй ступени защиты; 13, 14 и 15 – среднеквадратичные значения токов уставки $l_{ycr.3}$, составляющей $3l_{0(50)}$ тока $3i_0$ и выходной сигнал «ДПрЗЗ» первой сигнал «ДПрЗЗ» первой сигнал ($l_{ycr.3}$, составляющей $3l_{0(50)}$ тока $3i_0$ и выходной сигнал ($l_{ycr.3}$) составляющей $3l_{0(50)}$ тока $3i_0$ и выходной сигнал ($l_{ycr.3}$) составляющей $3l_{0(50)}$ тока $3i_0$ и выходной сигнал ($l_{ycr.3}$) составляющей $3l_{0(50)}$ тока $3i_0$ и выходной сигнал ($l_{ycr.3}$) составляющей $3l_{0(50)}$ тока $3i_0$ и выходной сигнал ($l_{ycr.3}$) составляющей $l_{ycr.3}$.

Результаты. Разработаны принципы выполнения и схема многопараметрической токовой зашиты от ОЗЗ для сетей 6-10 кВ с изолированной нейтралью, обеспечивающие распознавание всех разновидностей данного вида повреждений, непрерывность действия не только при устойчивых, но и при наиболее опасных для защищаемой сети дуговых перемежающихся замыканиях на землю, а также возможность выбора при каждой разновидности ОЗЗ эффективного способа действия (сигнал или отключение). Функциональные испытания на имитационных моделях подтвердили эффективность функционирования многопараметрической токовой защиты при всех учитываемых видах ОЗЗ в кабельных и воздушных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью.

Выводы. Разработанное техническое решение обеспечивает новые свойства защиты от ОЗЗ, заключающиеся в возможности распознавания опасных и неопасных для защищаемой сети видов замыканий на землю и повышения на этой основе селективности и устойчивости функционирования по сравнению с традиционными исполнениями токовых защит нулевой последовательности от данного вида повреждений.

Функциональные испытания разработанной защиты на имитационных моделях подтвердили перспективность применения многопараметрического подхода для совершенствования принципов выполнения защиты от ОЗЗ кабельных и воздушных сетей 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью.

Список литературы

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971.

2. Цапенко Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

3. Шуцкий В.И., Жидков В.О., Ильин Ю.Н. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1988. 4. Кадомская К.П., Качесов В.Е., Лавров Ю.А. Диагностика и мониторинг кабельных сетей средних классов напряжения // Электротехника. – 2000. – № 11. – С. 48–51.

5. Шабад М.А. Обзор режимов заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ России // Энергетик. – 1999. – № 3. – С. 11–13.

6. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. – М.: Энергия, 1976.

7. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.

8. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 3(33). http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php.

9. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.:
НТФ «Энергопрогресс». – 2001.
10. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях

10. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Направленные защиты. Особенности применения // Новости электротехники. – 2005. – № 6(36). http://www.news.elteh.ru/arh/2005/36/09.php.

11. **Нагай И.В., Нагай В.И.** Проблемы и решения дальнего резервирования трансформаторов ответвительных и промежуточных подстанций // Релейщик. – 2009. – № 4.

12. **Multiparameter** current protections against ground faults in 6–10 kV cable networks / A.N. Golubev, O.A. Dobryagina, T.Yu. Shadrikova, V.A. Shuin // Power Technology and Engineering. – 2018. – Vol. 51, No. 5.

13. Дударев Л.Е., Запорожченко С.И., Лукьянцев Н.М. Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях // Электрические станции. – 1971. – № 8. – С. 64–66.

14. **Защита** сетей 6–35 кВ от перенапряжений / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002.

15. Пат. РФ № 2629373 Н02Н3/16. Способ защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью и устройство для его осуществления / В.А. Шуин, Т.Ю. Шадрикова, О.А. Добрягина и др.; опубл. 29.08.2017, Бюл. 25.

16. **Пат.** РФ № 2629373 Н02Н3/16. Устройство защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью // В.А. Шуин, Т.Ю. Шадрикова, О.А. Добрягина и др.; опубл. 29.08.2017, Бюл. 25.

17. **Petersen W.** Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss // ETZ. – 1917. – H. 47, 48.

18. Peters J.F., Slepian J. Voltage Induced by Areign Grounds // Tr. AIEE. – 1928, Apr. – P. 478.

References

1. Likhachev, F.A. *Zamykaniya na zemlyu v* setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiey emkostnykh tokov [Groundfaults in networks with isolated neutral and with capacitive currents compensation]. Moscow: Energiya, 1971.

2. Tsapenko, E.F. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV* [Ground faults in 6–35 kV networks]. Moscow: Energoatomizdat, 1986.

3. Shutskiy, V.I., Zhidkov, V.O., Il'in, Yu.N. Zashchitnoe shuntirovanie odnofaznykh povrezhdeniy elektroustanovok [Protective shunting of single-phase faults in electrical installations]. Moscow: Energoatomizdat, 1988.

4. Kadomskaya, K.P. Kachesov, V.E., Lavrov, Yu.A. Diagnostika i monitoring kabel'nykh setey srednikh klassov napryazheniya [Diagnostics and monitoring of medium voltage cable networks]. *Elektrotekhnika*, 2000, no. 11, pp. 48–51.

5. Shabad, M.A. Obzor rezhimov zazemleniya neytrali i zashchity ot zamykaniy na zemlyu v setyakh 6–35 kV Rossii [Review of neutral grounding modes and earth fault protection in 6–35 kV networks in Russia]. *Energetik*, 1999, no. 3, pp. 11–13.

6. Fedoseev, A.M. *Releynaya zashchita elektricheskikh sistem* [Relay protection of electrical systems]. Moscow: Energiya, 1976.

7. Shabad, M.A. *Raschety releynoy zashchity i avtomatiki raspredelitel'nykh setey* [Calculations of relay protection and automation of distribution networks]. Saint-Petersburg: PEIPK, 2003. 350 p.

8. Shalin, A.I. Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV. Dostoinstva i nedostatki razlichnykh zashchit [Earth faults in networks 6–35 kV. Advantages and disadvantages of various protections]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2005, vol. 3(33). Available at: http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php

9. Shuin, V.A., Gusenkov, A.V. Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV [Protection against groundfaults in 6–10 kV electrical networks]. Moscow: NTF «Energoprogress», 2001. 104 p.

10. Shalin, A.I. Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV. Napravlennye zashchity. Osobennosti primeneniya [Earth faults in networks 6–35 kV. Directional protection. Application features]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2005, vol. 6(36). Available at: http://www.news.elteh.ru/arh/2005/36/09.php

11. Nagay, I.V., Nagay, V.I. Problemy i resheniya dal'nego rezervirovaniya transformatorov otvetvitel'nykh i promezhutochnykh podstantsiy [Problems and solutions of long-distance backup of transformers of branch and intermediate substations]. *Releyshchik*, 2009, no. 4.

12. Golubev, A.N., Dobryagina, O.A., Shadrikova, T.Yu., Shuin, V.A. Multiparameter current protections against ground faults in 6–10 kV cable networks. *Power Technology and Engineering*, 2018, vol. 51, no. 5.

13. Dudarev, L.E., Zaporozhchenko, S.I., Luk'yantsev, N.M. Dugovye zamykaniya na zemlyu v kabel'nykh setyakh [Arc groundfault in cable networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1971, vol. 8, pp. 64–66.

14. Khalilov, F.Kh., Evdokunin, G.A., Polyakov, V.S. *Zashchita setey* 6–35 *kV ot perenapryazheniy* [Protection of 6–35 kV networks from overvoltage]. Saint-Petersburg: Energoatomizdat, 2002.

15. Shuin, V.A., Shadrikova, T.Ju., Dobryagina, O.A., Shagurina, E.S., Pashkovskiy, S.N. *Sposob zashchity ot odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of protection against single-phase earth faults in networks with isolated neutral and device for its implementation]. Patent RF, no. 2629373, 2017.

16. Shuin, V.A., Shadrikova, T.Yu., Dobryagina, O.A., Shagurina, E.S., Pashkovskiy, S.N. *Ustroystvo zashchity ot odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu* [Device for protection against single-phase earth faults in networks with isolated neutral]. Patent RF, no. 2629373, 2017.

17. Petersen, W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss. *ETZ*, 1917, pp. 47, 48.

18. Peters, J.F., Slepian, J. Voltage Induced by Areign Grounds. Tr. AIEE, 1928, Apr., p. 478.