

Информационные параметры электрических величин переходного процесса для определения места замыкания на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ¹

В.А. Шуин, Г.А. Филатова, Е.А. Воробьева, Д.И. Ганджаев
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: vshuin@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Быстрое определение поврежденной линии при однофазном замыкании на землю и места (зоны) замыкания в распределительных кабельных сетях среднего напряжения чрезвычайно важно для скорейшей ликвидации повреждения и восстановления нормального режима работы электрической сети. Для кабельных сетей среднего напряжения до сих пор не существует реально используемых эффективных методов дистанционного определения места (зоны) однофазного замыкания на землю на линиях, находящихся под рабочим напряжением. В связи с этим исследование и разработка методов дистанционного определения места однофазного замыкания на землю в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ представляет практический интерес.

Материалы и методы: Наиболее универсальными методами решения задачи определения места однофазных, в том числе, кратковременных самоустраняющихся замыканий на землю являются методы на основе контроля параметров электрических величин переходного процесса, возникающего при пробое изоляции. Для исследования переходных процессов использовано сочетание аналитических методов решения рассматриваемой задачи на основе упрощенной модели электрической сети и имитационного моделирования на ЭВМ.

Результаты: С использованием приближенного аналитического решения уравнений переходного процесса и имитационного моделирования на ЭВМ получены выражения для расчета параметров переходных токов и напряжений для решения задачи определения места замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ. Приведены результаты исследования влияния искажающих замер факторов на параметры электрических величин переходного процесса. Показано, что наиболее эффективный алгоритм решения рассматриваемой задачи можно получить на основе замера переходного напряжения поврежденной фазы и производной переходного тока $i_0(t)$ в моменты времени, соответствующие переходу последнего через нулевые значения.

Выводы: Полученные результаты могут быть использованы при разработке способов и устройств дистанционного определения места однофазного замыкания на землю в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ.

Ключевые слова: распределительные сети 6–10 кВ, однофазные замыкания на землю, on-line методы определения места замыкания, информационные параметры величин переходного процесса.

Information parameters of transient electrical quantities for earth fault location in 6–10 kV distribution cable lines

V.A. Shuin, G.A. Filatova, E.A. Vorobyova, D.I. Gandzhayev
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: vshuin@mail.ru

Abstract

Background: Quick detection of the faulty line under single-phase earth fault and fault location in medium-voltage distribution cable lines is extremely important for quick fault elimination and restoration of normal operation of the power supply. There are still no efficient techniques of distant location of single-phase earth faults in medium voltage cable lines under operating voltage. All this makes it quite interesting to study and develop methods of distant location of single-phase earth faults in 6–10 kV distribution cable lines.

Materials and methods: The most universal methods of solving problems of single-phase earth fault location (including short-term self-extinguishing ones) are those based on controlling electrical parameters of the transient occurring at isolation breakthrough. The transients were studied by a combination of analytical methods of solving this problem based on a simplified power grid model and computer simulation modeling.

Results: Using the approximate analytical solutions of the transient equations and computer simulation modeling the authors obtained equations for calculating parameters of transient currents and voltages in order to solve the problem of earth fault location in 6–10 kV cable lines. The paper represents the results of studying the influence of the factors dis-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в Ивановском государственном энергетическом университете в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» на тему «Разработка комплекса научно-технических решений по автоматической локализации однофазных замыканий на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ» (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57716X0215).

torting the measurement on parameters of transient electrical characteristics. It has been shown that the most efficient algorithm of solving this problem can be obtained by measuring transient voltage of the faulty phase and transient current derivative $\dot{i}_0(t)$ at the moments of time corresponding to the $\dot{i}_0(t)$ crossing the zero value.

Conclusions: The obtained results can be used to develop methods and devices of distant location of single-phase earth faults in 6–10 kV distribution cable lines.

Key words: 6–10 kV distribution lines, single-phase earth faults, online earth fault location methods, information parameters of transient characteristics.

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.2.034-042

Введение. Через кабельные сети напряжением 6–10 кВ распределяется более половины вырабатываемой в России электроэнергии². Аварии в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ составляют около 70 % всех нарушений электроснабжения промышленных и бытовых потребителей и, как правило, сопровождаются значительным экономическим ущербом. Поэтому повышение уровня эксплуатационной надежности распределительных кабельных сетей 6–10 кВ является одним из ключевых факторов повышения надежности электроснабжения потребителей систем электроснабжения.

В кабельных сетях 6–10 кВ преобладающим видом повреждений и часто первопричиной аварий являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) [1]. Большая часть ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, прежде всего, в начальной стадии развития повреждения имеет дуговой перемежающийся характер, сопровождающийся значительными перенапряжениями на неповрежденных фазах, а также увеличением среднеквадратичного значения тока в месте повреждения [1, 2]. Перенапряжения, охватывающие всю электрически связанную сеть, и увеличение эффективного значения тока в месте ОЗЗ обуславливают переходы ОЗЗ в двойные и многоместные замыкания на землю или междуфазные короткие замыкания (КЗ) в месте пробоя изоляции [3]. Поэтому эксплуатационная надежность кабельных сетей 6–10 кВ существенно зависит от технического совершенства средств локации ОЗЗ, обеспечивающих определение поврежденного присоединения и места (зоны) повреждения на кабельной линии (КЛ), находящейся под рабочим напряжением. Первая из указанных задач решается с помощью устройств селективной сигнализации ОЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, возникающего при пробое изоляции [4, 5], вторая – за счет применения специальных методов и средств определения места ОЗЗ (ОМЗЗ) на поврежденной КЛ. От эффективности последних зависит быстрота определения места повреждения на КЛ и возможность его ликвидации без нарушения электроснабжения потребителей. Особенно актуальным является решение

задачи ОМЗЗ для магистральных КЛ городских распределительных кабельных сетей 6–10 кВ.

Постановка задачи и обоснование метода исследований. Вследствие малых значений установившегося тока ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью, высокоомным заземлением нейтрали или компенсацией емкостных токов, и отсутствия зависимости значения этого тока от удаленности места повреждения от места установки устройства ОМЗЗ, для кабельных сетей 6–10 кВ до сих пор не удается создать широко используемые эффективные методы дистанционного определения (локации) места устойчивого ОЗЗ (УОЗЗ) на КЛ, находящихся под рабочим напряжением. Кроме того, использование электрических величин установившегося режима ОЗЗ не позволяет определить место (зону) возникновения значительно более опасных дуговых перемежающихся ОЗЗ, а также кратковременных самоустраняющихся пробоев изоляции, информация о которых может быть использована в целях диагностирования состояния изоляции сети.

Поэтому в известных разработках методов дистанционного ОМЗЗ (ДОМЗЗ) для электрических сетей среднего напряжения в основном применяются специальные методы, основанные на использовании электрических величин не промышленной частоты. К ним относятся: локационные методы, основанные на измерении интервала времени между моментом посылки зондирующего электрического импульса и моментом прихода к началу линии отраженного от места повреждения импульса [6]; волновые методы, основанные на измерении времени между моментом прихода к началу линии фронта волны, возникшей в месте повреждения, и моментом вторичного прихода фронта волны после двух отражений от начала линии и места повреждения или на использовании временных различий распространения волн в каналах «фаза-фаза» и «фаза-земля», фиксируемых в точках контроля [7–9]; методы, основанные на использовании высших гармонических составляющих или «наложенных» токов повышенной частоты [10, 11]; методы, основанные на использовании алгоритмической (имитационной) модели контролируемой КЛ и сравнении измеренного сигнала и сигнала, полученного с использованием модели при перемещении в ней точки повреждения [12, 13]; параметрические методы, основанные на изме-

² Файбисович Д.Л., Карапетян И.Г., Шапиро И.М. Справочник по проектированию электрических сетей. – М.: НЦ ЭНАС, 2012. – 376 с.

рении различных параметров переходных токов и напряжений и определении по результатам измерений зоны пробоя изоляции [14–16].

Локационные методы и методы, основанные на использовании высших гармонических составляющих или «наложенных» токов повышенной частоты, не пригодны для определения зоны ОЗЗ при дуговых перемежающихся ОЗЗ и кратковременных самоустраняющихся пробоях изоляции. Использование волновых методов одностороннего измерения сталкивается с трудностями на КЛ, имеющих значительные неоднородности волнового сопротивления по длине линии, вызванные соединением кабелей различных типов и сечений, а также соединительными муфтами. Такие неоднородности, характерные, прежде всего, для магистральных КЛ городских кабельных сетей, вызывают дополнительные отражения электромагнитных волн, что приводит к ложным измерениям. Методы, основанные на использовании алгоритмической модели контролируемой КЛ, требуют регистрации значений наблюдаемых сигналов – переходных токов $i(t)$ и напряжений $u(t)$ – для последующих расчетов реакции модели при перемещении в ней точки повреждения, что снижает эффективность их применения в условиях, когда требуется быстрое определение места ОЗЗ (например, при опасных дуговых перемежающихся ОЗЗ). С учетом изложенного большую универсальность обеспечивают, на наш взгляд, методы, основанные на контроле параметров электрических величин переходного процесса, возникающего при пробое изоляции фазы сети на землю.

Для решения задачи дистанционного определения зоны повреждения при всех разновидностях ОЗЗ могут использоваться различные параметры токов и напряжений переходного процесса, например длительность первых полуволн, начальные значения производных электрических величин и др. В связи с этим необходимо выявить наиболее устойчивые к влиянию различных искажающих факторов параметры электрических величин переходного процесса, несущие информацию об удаленности места ОЗЗ.

Наиболее эффективным методом исследования электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6–10 кВ для определения информационных параметров, которые можно использовать для решения задачи дистанционного ОМЗЗ, представляется сочетание аналитических методов решения рассматриваемой задачи на основе упрощенной модели электрической сети и имитационного моделирования на ЭВМ.

Приближенное аналитическое решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ на основе двухчастотной схемы замещения кабельной сети 6–10 кВ (рис. 1). В переходном процессе при ОЗЗ в электрических сетях с малыми токами замыкания на землю принято раз-

личать две основные стадии, связанные соответственно с разрядом емкостей поврежденной фазы, сопровождающимся перезарядом междофазных емкостей, и дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз сети. Анализ осциллограмм, полученных при ОЗЗ в реальных кабельных сетях 6–10 кВ, а также на физических моделях, учитывающих распределенный характер параметров КЛ, показывает, что в разрядных и зарядных составляющих тока и напряжения переходного процесса при ОЗЗ преобладает по одной свободной частотной составляющей, определяющей их форму и амплитуду.

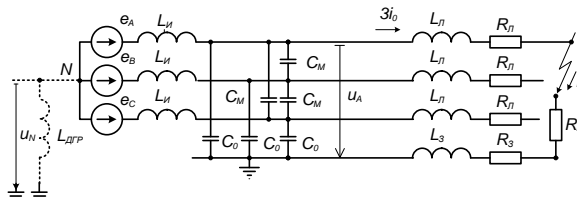


Рис. 1. Двухчастотная схема замещения кабельной сети 6–10 кВ для исследования переходных процессов при ОЗЗ

Исключение составляют ОЗЗ на шинах или в непосредственной близости от шин, когда необходимо учитывать явно выраженный волновой характер разрядных составляющих [17]. В [18] показано, что для приближенных расчетов переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ можно использовать двухчастотную схему замещения (рис. 1).

На рис. 2 приведена комплексная схема замещения по методу симметричных составляющих, соответствующая трехфазной схеме замещения по рис. 1.

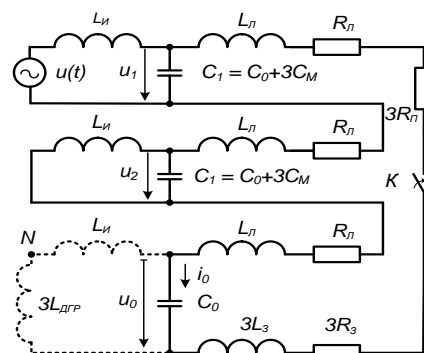


Рис. 2. Комплексная схема замещения по методу симметричных составляющих

Для сети, работающей с изолированной нейтралью, из схемы замещения по рис. 2 при $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ и «малых потерях» в контуре тока ОЗЗ, когда разрядные и зарядные составляющие электрических величин переходного процесса сохраняют колебательный характер, в [19] получено приближенное решение для напряжения $u_0(t)$:

$$u_0(t) = u_{0np}(t) + u_{op}(t) + u_{o3}(t) \approx U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_{pm} e^{-\delta_p t} \cos \omega_p t - U_{3m} e^{-\delta_3 t} \cos \omega_3 t, \quad (1)$$

где $u_{0np}(t)$, $u_{op}(t)$, $u_{o3}(t)$ – принужденная, разрядная и зарядная составляющие переходного напряжения нулевой последовательности соответственно; U_{pm} , U_{3m} , ω_p , ω_3 , δ_p , δ_3 – амплитуды, частоты и постоянные затухания разрядной и зарядной свободных составляющих соответственно, определяемые по выражениям:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{k_c \omega_1^2 + \omega_2^2 + \sqrt{k_c^2 \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4)\omega_1^2 \omega_2^2}}; \quad (2)$$

$$\omega_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{k_c \omega_1^2 + \omega_2^2 - \sqrt{k_c^2 \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4)\omega_1^2 \omega_2^2}}; \quad (3)$$

$$\delta_p = \alpha \frac{\omega_p^2 - \omega_2^2}{2(2\omega_p^2 - \omega_2^2 - k_c \omega_1^2)}; \quad (4)$$

$$\delta_3 = \alpha \frac{\omega_3^2 - \omega_2^2}{2(2\omega_3^2 - \omega_2^2 - k_c \omega_1^2)}; \quad (5)$$

$$U_{pm} = a_1 [U_m \sin \varphi - u_N(0)]; \quad (6)$$

$$U_{3m} = a_2 [U_m \sin \varphi - u_N(0)], \quad (7)$$

где $R_1 = 3R_{n1} + 3R_3 + 3R_{n3}$; $L_1 = 3L_{n1} + 3L_3$; $L_2 = 2L_n$; $\alpha = R_1/L_1$; $a_1 = (\omega_1^2 - \omega_3^2)/(\omega_p^2 - \omega_3^2)$; $C_1 = C_0$; $a_2 = (\omega_1^2 - \omega_p^2)/(\omega_3^2 - \omega_p^2)$; $C_2 = (C_0 + 3C_m)/2$; $k_c = 1 + C_1/C_2$; $\omega_1^2 = 1/L_1 C_1$; $\omega_2^2 = 1/L_2 C_2$.

Из схем замещения по рис. 1, 2 для переходного тока в месте ОЗЗ и в поврежденной фазе получим

$$i_3 = 3i_0 = 3C_0 \frac{du_0}{dt} = i_{0np} + i_{op} + i_{o3} = 3C_0 \frac{d}{dt} (u_{0np} + u_{op} + u_{o3}). \quad (8)$$

При известных напряжении u_0 и токе i_0 напряжение на поврежденной фазе А также определяется из схемы замещения по рис. 2 как сумма составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности:

$$u_A = u_1 + u_2 + u_0. \quad (9)$$

Параметры электрических величин переходного процесса, используемые для решения задачи ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ. Для решения задачи ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ могут быть использованы электрические величины переходного процесса, которые технически могут быть измерены и параметры которых существенно зависят от удаленности места повреждения l_3 от шин контролируемого объекта. В электрических сетях среднего напряжения с малыми токами замыкания на землю релейная защита от междуфазных КЗ, как правило, выполняется в двухфазном исполнении. Учитывая это, фазные токи в рассматриваемых сетях не могут быть использованы для решения задачи ДОМЗЗ. На всех кабельных линиях напряжением 6–10 кВ для выполнения селективной защиты от

ОЗЗ предусматривается установка кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП), обеспечивающих измерение тока $3i_0$. На центрах питания кабельных сетей предусматривается установка трансформаторов напряжения контроля изоляции (ТНКИ), обеспечивающих измерение всех фазных напряжений и напряжения $3u_0$. Установка ТНКИ, как правило, предусматривается также и на распределительных подстанциях (пунктах) кабельных сетей 6–10 кВ.

Таким образом, к электрическим величинам переходного процесса при ОЗЗ, которые технически могут быть измерены и использованы в параметрических методах ДОМЗЗ, в кабельных сетях 6–10 кВ относятся: переходное напряжение $u_0(t)$; переходный ток $i_0(t)$; переходное напряжение поврежденной фазы $u_\phi(t)$.

На рис. 3 приведены зависимости $u_\phi(t)$, $3u_0(t)$ и $3i_0(t)$ для кабельной сети 6 кВ с суммарным емкостным током $I_{c\sum} \approx 30$ А.

Анализ полученных кривых (рис. 3) показывает, что наиболее очевидными параметрами, зависящими от удаленности l_3 места ОЗЗ от шин источника питания, являются временные параметры – длительность первых полувольт переходного тока $3i_0(t)$, переходное напряжение поврежденной фазы $u_\phi(t)$, моменты времени, соответствующие первому максимуму переходного тока $3i_0(t)$ и переходного напряжения $3u_0(t)$, а также параметры, характеризующие крутизну передних фронтов $u_\phi(t)$, $3u_0(t)$ и $3i_0(t)$ – начальные значения производных указанных величин.

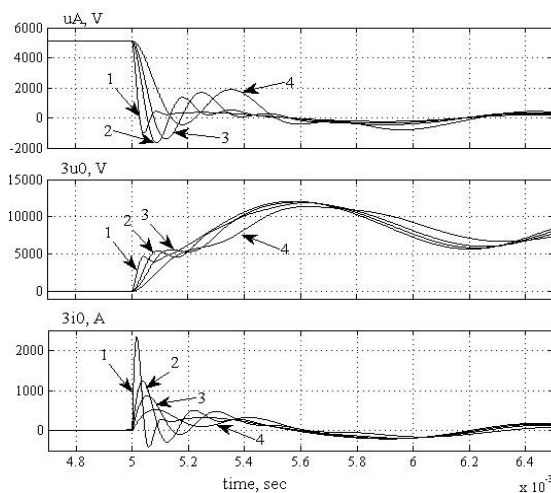


Рис. 3. Электрические величины переходного процесса для кабельной сети 6 кВ ($I_{c\sum} = 25$ А, $R_{n1} = 1$ Ом) при различных значениях удаленности ОЗЗ от шин: 1 – $l_3 = 0,1$ км; 2 – $l_3 = 1$ км; 3 – $l_3 = 2$ км; 4 – $l_3 = 5$ км

Основные факторы, влияющие на параметры электрических величин переходного процесса при ОЗЗ. Согласно (1), (6) и (7), значения электрических величин переходного процесса, а следовательно, и их производных зависят от начальной фазы пробоя изоляции φ и напряжения смещения нейтрали сети $u_N(0)$ в момент возникновения ОЗЗ. При первом пробое изоляции в нормальном режиме работы сети ве-

личина $u_M(0)$ определяется несимметрией емкостей фаз на землю, которая для кабельных сетей не превышает единиц процентов и ее влиянием можно пренебречь. Однако при повторных зажиганиях заземляющей дуги при дуговых перемежающихся ОЗЗ величина $u_M(0)$ возрастает и может оказывать существенное влияние на результаты измерений контролируемых величин.

Влияние начальной фазы пробоя изоляции φ и смещения нейтрали сети $u_M(0)$ на значения измеренных величин можно исключить, если для решения задачи ДОМЗЗ использовать не полные токи и напряжения, а их нормированные свободные составляющие, которые могут быть выделены из полных токов и напряжений с помощью частотных фильтров. Необходимо учитывать, что в кабельных сетях 6–10 кВ частотное разделение разрядной и зарядной составляющих возможно только при определенных параметрах сети и поврежденной линии [19], потому для решения задачи ДОМЗЗ в общем случае может использоваться только сумма указанных свободных составляющих.

Нормирование осуществляется делением измеренных значений свободных составляющих переходных токов и напряжений на величину $[U_m \sin \varphi - u_M(0)]/U_m$. Следует отметить, что использование методов, требующих нормирования электрических величин переходного процесса, усложняет алгоритмы ДОМЗЗ.

Основными факторами, влияющими на точность ДОМЗЗ с использованием параметров электрических величин переходного процесса, являются величина суммарного емкостного тока $I_{\Sigma} = 3C_1 \omega U_{\text{ф.ном}}$, который может значительно изменяться в зависимости от режима работы контролируемой сети, а также активное сопротивление контура тока ОЗЗ (включая R_n). Поэтому наиболее эффективными информационными параметрами электрических величин переходного процесса следует считать те из них, которые не критичны к влиянию указанных факторов.

Особенности использования для ДОМЗЗ временных параметров электрических величин переходного процесса. К таким параметрам, как уже отмечалось выше, относятся длительности первых полувольт переходного тока $3i_0(t)$, переходное напряжение поврежденной фазы $u_{\text{ф}}(t)$, моменты времени, соответствующие первому максимуму переходного тока $3i_0(t)$ и переходного напряжения $3u_0(t)$ (например, рис. 3).

При малых потерях в контуре тока ОЗЗ, когда разрядная составляющая имеет колебательный характер, значения указанных временных параметров определяются частотой ω_p . Для кабельных сетей 6–10 кВ, как правило, $\omega_p^2 \gg \omega_3^2$, $\omega_p^2 \gg \omega^2$, $\omega_3^2 \gg \omega^2$. При указанных соотношениях между частотами разрядных и зарядных

колебаний после преобразований из (2) и (3) получим:

$$\omega_p \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2k_c \omega_1^2} = \omega_1 \sqrt{k_c} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1 C_2 / (C_1 + C_2)}}; \quad (10)$$

$$\omega_3 \approx \frac{\omega_2}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2L_2 C_2}} = \frac{1}{\sqrt{2L_2 C_1 (k_c - 1)}}. \quad (11)$$

Согласно (10), частота разрядных колебаний ω_p зависит не только от индуктивности L_1 , пропорциональной удаленности l_3 места ОЗЗ от шин источника питания, но и от емкости C_1 , т.е. от суммарного емкостного тока сети I_{Σ} . Частота зарядных колебаний ω_3 в предельном случае, согласно (11), не зависит от L_1 , но так же, как и ω_p , изменяется при изменении суммарного емкостного тока сети I_{Σ} .

В кабельных сетях, содержащих КЛ большой протяженности (например, отдельные магистральные КЛ городских кабельных сетей 6–10 кВ), частоты разрядных и зарядных колебаний могут быть соизмеримы, что может обусловить значительные погрешности оценок l_3 по временным параметрам электрических величин переходного процесса при ОЗЗ.

Практически частота разрядных колебаний ω_p будет существенно зависеть также от активного сопротивления контура тока ОЗЗ R_1 , включая переходное сопротивление в месте повреждения, а при достаточно больших активных потерях может иметь апериодический характер, что приведет к ошибкам при определении временных параметров электрических величин переходного процесса.

С учетом изложенного использование временных параметров электрических величин переходного процесса в качестве информационных параметров для решения задачи ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ неэффективно.

Использование для определения места ОЗЗ параметров производных переходного напряжения $u_0(t)$. Согласно (8), первая производная напряжения $u_0(t)$ по форме совпадает с переходным током $i_0(t)$. С учетом этого основными параметрами производной $du_0(t)/dt$, зависящими от расстояния l_3 до места ОЗЗ, как и переходного тока $i_0(t)$, являются длительность первой полувольты и крутизна переднего фронта первой полувольты, определяемая в основном скоростью нарастания разрядной составляющей и пропорциональная второй производной напряжения нулевой последовательности $d^2 u_0(t)/dt^2$.

О недостатках использования временных параметров переходного тока (в том числе, и первой производной напряжения $u_0(t)$) говорилось выше. С учетом этого рассмотрим основные свойства $d^2 u_0(t)/dt^2$.

При малых активных потерях в контуре тока ОЗЗ и $\omega_p^2 \gg \omega_3^2$, $\omega_p^2 \gg \omega^2$, $\omega_3^2 \gg \omega^2$ из (1) получим следующее приближенное соотношение:

$$u_0''(t)_{\max} = u_0''(0) \approx a_1 U_m \sin \varphi \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] (\omega^2 - a_1 \delta_p^2 + a_1 \omega_p^2 + a_2 \omega_3^2 - a_2 \delta_3^2) \approx \frac{U_m \sin \varphi \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right]}{L_1 C_1} \quad (12)$$

При использовании нормирования измеренных значений напряжения $u_0(t)$ из (12) получим

$$u_0''(0) \approx \frac{U_m}{L_1 C_1} \quad (13)$$

Согласно (13), максимальное значение $u_0''(0)$ в момент пробоя практически не зависит от активных потерь в контуре тока ОЗЗ, но зависит от величины C_1 , т.е. от суммарного емкостного тока сети I_{Σ} . Известно, что переходное сопротивление при пробое в кабелях 6–10 кВ, определяемое сопротивлением заземляющей дуги, имеет небольшое значение, не превышающее единиц Ом [19]. Поэтому зависимость значения параметра $u_0''(0)$ от I_{Σ} является более существенным недостатком, ограничивающим область его возможного использования в целях ДОМЗЗ только кабельными сетями с достаточно стабильным значением суммарного емкостного тока.

Использование для ДОМЗЗ параметров производной переходного тока $i_0(t)$. Производная переходного тока $i_0(t)$ определяется практически производной суммы свободных составляющих, а ее начальное значение – его разрядной составляющей. С учетом этого из (1) и (8) при малых активных потерях в контуре тока ОЗЗ и соотношениях для частот разрядной и зарядной составляющих $\omega_p^2 \gg \omega_3^2$, $\omega_p^2 \gg \omega^2$, $\omega_3^2 \gg \omega^2$ получим

$$i_0'(0) \approx C_1 a_1 U_m \sin \varphi \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] (\omega^2 - a_1 \delta_p^2 + a_1 \omega_p^2 + a_2 \omega_3^2 - a_2 \delta_3^2) \approx \frac{U_m \sin \varphi \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right]}{L_1} \quad (14)$$

При использовании нормирования измеренных значений напряжения переходного тока $i_0(t)$ из (14) получим

$$i_0'(0) \approx \frac{U_m}{L_1} \quad (15)$$

Согласно (15), начальное значение производной свободных составляющих тока $i_0(t)$ является функцией $L_1 \equiv l_3$ и не зависит от суммарного емкостного тока сети I_{Σ} и активных потерь в контуре тока ОЗЗ (в том числе, и от переходного сопротивления в месте повреждения). Последнее можно объяснить тем, что максимуму произ-

водной $i_0'(t)$ соответствует момент времени, когда ток $i_0(t) = 0$ и падение напряжения на активных сопротивлениях контура тока ОЗЗ, включая переходное сопротивление, также равно нулю. Изложенное подтверждается расчетами, выполненными на имитационной модели трехфазной радиальной кабельной сети 6 кВ, реализованной в системе моделирования Matlab (рис. 4).

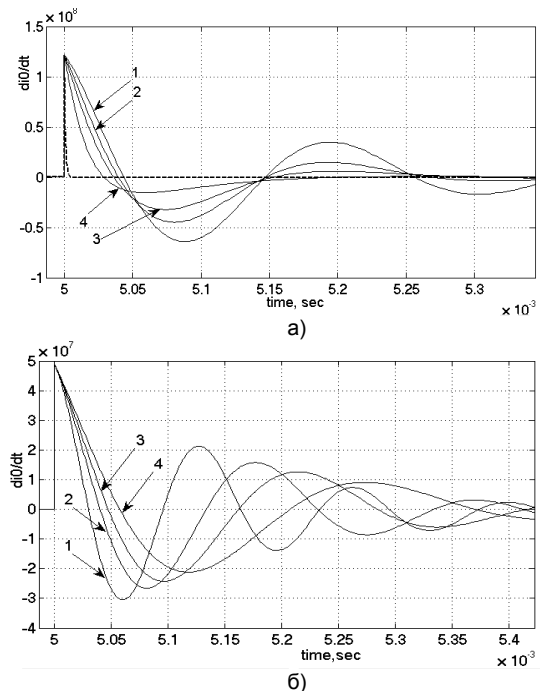


Рис. 4. Зависимости $i_0'(t)$ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $l_3 = 1$ км при $\varphi = 90^\circ$ и $u_N(0) = 0$: а – от $R_{П}$ при $I_{\Sigma} = 30$ А (1 – $R_{П} = 0,1$ Ом; 2 – $R_{П} = 1$ Ом; 3 – $R_{П} = 2$ Ом; 4 – $R_{П} = 5$ Ом); б – от I_{Σ} при $R_{П} = 0,1$ Ом (1 – $I_{\Sigma} = 10$ А; 2 – $I_{\Sigma} = 20$ А; 3 – $I_{\Sigma} = 30$ А; 4 – $I_{\Sigma} = 50$ А)

Однако для достаточно точной фиксации начального значения производной переходного тока $i_0(t)$ требуется быстродействующий пуск устройства ДОМЗЗ, что является недостатком использования данного параметра для решения задачи ДОМЗЗ. Для исключения зависимости замера значения $i_0'(0)$ от начальной фазы пробоя изоляции φ и смещения нейтрали $u_N(0)$ необходимо нормирование измеренных значений переходного тока, что усложняет алгоритм ДОМЗЗ.

Использование для ДОМЗЗ параметров напряжения поврежденной фазы $u_{\phi}(t)$ и производной переходного тока $i_0(t)$. Рассмотренные выше свойства производной переходного тока $i_0(t)$ могут быть более эффективно использованы в сочетании со свойствами переходного напряжения на поврежденной фазе.

Из комплексной схемы замещения (рис. 2) можно получить следующее выражение для переходного напряжения на поврежденной фазе:

$$u_{\phi}(t) = L_1 \frac{di_0(t)}{dt} + R_1 i_0(t) \quad (16)$$

Полное выражение для $u_{\phi}(t)$ можно получить из (16), используя (1) и (8).

Согласно (26), зависимость измеренных значений $u_{\phi}(t)$ от активных потерь в контуре тока ОЗЗ можно исключить, если измерения мгновенных значений переходного напряжения $u_{\phi}(t)$ осуществлять в моменты перехода тока $i_0(t)$ через нулевое значение. Для указанных моментов времени из (16) получим

$$u_A(t_{0i}) = L_1 \frac{di_0}{dt}(t_{0i}), \quad (17)$$

где t_{0i} – моменты перехода тока $i_0(t)$ через нулевое значение ($i = 1, 2, \dots, n$).

Если для моментов времени t_{0i} определить также значения производной переходного тока $i_0(t)$, то из (17) получим

$$L_1(t_{0i}) = \frac{u_A(t_{0i})}{\frac{di_0}{dt}(t_{0i})}. \quad (18)$$

Значения L_1 , определенные по (18), не зависят ни от суммарного емкостного тока сети I_{Σ} , ни от активных потерь в контуре тока ОЗЗ (в том числе, и от R_{Γ}).

Таким образом, используя в качестве информационных параметров мгновенные значения переходного напряжения на поврежденной фазе $u_A(t)$ и производной переходного тока $i_0(t)$, измеренные в моменты перехода последнего через нулевое значение, в принципе можно обеспечить независимость измерений расстояния до места ОЗЗ от основных влияющих факторов – суммарного емкостного тока сети I_{Σ} и активных потерь в контуре тока ОЗЗ. Преимуществами данного метода ДОМЗЗ является также отсутствие необходимости в нормировании измеренных величин.

Выводы. При решении задачи дистанционного определения места повреждения при всех разновидностях ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ наиболее перспективными являются методы, основанные на контроле параметров электрических величин переходного процесса, возникающего при пробое изоляции фазы сети на землю.

На измеряемые параметры электрических величин переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ наиболее существенное влияние оказывают суммарный емкостный ток сети I_{Σ} , активные потери в контуре тока ОЗЗ, начальная фаза пробоя изоляции и смещение нейтрали сети в момент возникновения ОЗЗ.

Зависимость измеряемых параметров электрических величин от начальной фазы пробоя и смещения нейтрали сети можно устранить нормированием измеренных токов и напряжений, однако это приводит к усложнению алгоритмов ДОМЗЗ.

На основе исследований, выполненных с использованием аналитической модели имитационного моделирования в системе переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, показано, что наиболее эффективный алгоритм ДОМЗЗ можно получить на основе замера пере-

ходного напряжения поврежденной фазы и производной переходного тока $i_0(t)$ в моменты времени, соответствующие переходу последнего через нулевые значения.

Список литературы

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
2. Дударев Л.Е., Запорожченко С.И., Лукьянцев Н.М. Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях // Электрические станции. – 1971. – № 8. – С. 64–66.
3. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др.; под ред. Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокунина, А.И. Таджикибаева. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 2002. – 272 с.
4. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001. – 104 с.
5. Лачугин В.Ф., Иванов С.В., Белянин А.А. Разработка импульсных защит от замыканий на землю // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 3(8). – С. 50–57.
6. Куликов А.Л., Мисриханов М.Ш., Петрухин А.А. Определение мест повреждений ЛЭП 6–35 кВ методами активного зондирования. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 161 с.
7. Кудрявцев Д.М., Куликов А.Л., Петрухин А.А. Анализ подходов к дистанционному определению нарушений изоляции // Научные технологии. – 2008. – № 12. – С. 22–27.
8. Integrated use of time-frequency wavelet decompositions for fault location in distribution networks: Theory and experimental validation / A. Borghetti, M. Bosetti, C.A. Nucci, M. Paolone, A. Abur // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2010. – 25 (4), art. no. 5456138. – P. 3139–3146.
9. A traveling wave fault location method for earth faults based on mode propagation time delays of multi-measuring points / Y. Liu, G. Sheng, Z. He, X. Jiang // Prz. elektrotechn. – 2012. – Vol. 88, № 3a. – P. 254–258.
10. Dan A., Raisz D. Comparison of different methods for earth fault location in compensated networks // Electric Power Quality and Supply Reliability Conf. (PQ), 16–18 June 2010. – P. 237–242.
11. Пат. 2446533 Российская Федерация. Способ определения места однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью / Р.Г. Мустафин. Приоритет изобретения от 27.03.2012 г.
12. Lyamets Y.Y., Belyanin A.A. Description of 6–35 kV lines in recognition of earth fault in a distribution network // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Т. 85, № 3. – С. 121–126.
13. Пат. 2516371 Российская Федерация, МПК G01R31/08. Способ определения поврежденного фидера при замыкании на землю в распределительной сети / Ю.Я. Лямец, С.В. Иванов, А.А. Белянин. Заявл. 05.02.2013; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14.
14. Kachesov V.E., Lavrov V.Yu., Cherepanov A.B. Parametric method of fault location in distribution networks // Power Technology and Engineering. – 2003. – Т. 37, № 4. – С. 262–268.
15. Качесов В.Е. Метод определения зоны однофазного замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением // Электричество. – 2005. – № 6. – С. 9–18.
16. Шалин А.И., Сарин Л.И., Ильиных М.В. Определение места замыкания на землю на воздушных линиях 6–35 кВ // Новости Электротехники. – 2005. – № 1 (31). – С. 73–75.
17. Шуин В.А. Влияние разряда емкости поврежденной фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных сетях 3–10 кВ // Электричество. – 1983. – № 12. – С. 4–10.
18. Шуин В.А. Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ // Электричество. – 1991. – № 10. – С. 58–61.
19. Солдатов В.Ф., Кобазев В.П., Чупайленко А.А. Оценка сопротивления дуги при однофазном замыкании на землю // Электрические станции. – 1996. – № 8. – С. 47–48.

References

1. Likhachev, F.A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiyey emkostnykh tokov* [Earth faults in networks with isolated neutral and compensated capacitive currents]. Moscow, Energiya, 1971. 152 p.
2. Dudarev, L.E., Zaporozhchenko, S.I., Luk'yantsev, N.M. Dugovye zamykaniya na zemlyu v kabel'nykh setyakh [Arc earth faults in cable lines]. *Elektricheskie stantsii*, 1971, no. 8, pp. 64–66.
3. Khalilov, F.Kh., Evdokunin, G.A., Polyakov, V.S. *Zashchita setey 6–35 kV ot perenapryazheniy* [6–35 kV network overvoltage protection]. Saint-Petersburg, Energoatomizdat, 2002. 272 p.
4. Shuin, V.A., Gusenkov, A.V. *Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV* [Earth fault protection in 6–10 kV networks]. Moscow, NTF Energoprogress, Energetik, 2001. 104 p.
5. Lachugin, V.F., Ivanov, S.V., Belyanin, A.A. Razrabotka impul'snykh zashchit ot zamykaniy na zemlyu [Development of impulse earth protection]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2012, no. 3(8), pp. 50–57.
6. Kulikov, A.L., Misrikhanov, M.Sh., Petrukhin, A.A. *Opreделение mest povrezhdeniy LEP 6–35 kV metodami aktivnogo zondirovaniya* [Fault location in 6–35 kV lines by active impulse testing]. Moscow, Energoatomizdat, 2009. 161 p.
7. Kudryavtsev, D.M., Kulikov, A.L., Petrukhin, A.A. Analiz podkhodov k distantsionnomu opredeleniyu narusheniy izolyatsii [Analysis of approaches to distant fault location]. *Naukoemkie tekhnologii*, 2008, no. 12, pp. 22–27.
8. Borghetti, A., Bosetti, M., Nucci, C.A., Paolone, M., Abur, A. Integrated use of time-frequency wavelet decompositions for fault location in distribution networks: Theory and experimental validation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25 (4), art. no. 5456138, pp. 3139–3146.
9. Liu, Y., Sheng, G., He, Z., Jiang, X. A traveling wave fault location method for earth faults based on mode propagation time delays of multi-measuring points. *Prz. Elektrotechn.*, 2012, vol. 88, no. 3a, pp. 254–258.
10. Dan, A., Raisz, D. Comparison of different methods for earth fault location in compensated networks. *Electric Power Quality and Supply Reliability Conf. (PQ)*, 16–18 June 2010, pp. 237–242.
11. Mustafin, R.G. *Sposob opredeleniya mesta odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v seti s izolirovannoy neytral'yu* [Method of single-phase earth fault location in an isolated neutral network]. Patent RF, no. 2446533, 2012.
12. Lyamets, Yu.Ya., Belyanin, A.A. Description of 6–35 kV lines in recognition of earth fault in a distribution network. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85, no. 3, pp. 121–126.
13. Lyamets, Yu.Ya., Ivanov, S.V., Belyanin, A.A. *Sposob opredeleniya povrezhdennoy fidera pri zamykanii na zemlyu v raspredelitel'noy seti* [Method of damaged cable detection in the event of earth fault in a distribution network]. Patent RF, no. 2516371, 2014.
14. Kachesov V.E., Lavrov V.Yu., Cherepanov A.B. Parametric method of fault location in distribution networks. *Power Technology and Engineering*, 2003, vol. 37, no. 4, pp. 262–268.
15. Kachesov, V.E. Metod opredeleniya zony odnofaznogo zamykaniya v raspredelitel'nykh setyakh pod rabochim napryazheniem [Online earth fault location method in distribution networks]. *Elektrichestvo*, 2005, no. 6, pp. 9–18.
16. Shalin, A.I., Sarin, L.I., Il'inykh, M.V. Opreделение mesta zamykaniya na zemlyu na vozduzhnykh liniyakh 6–35 kV [Location of earth faults in 6–35 kV overhead lines]. *Novosti Elektrotekhniki*, 2005, no. 1(31), pp. 73–75.
17. Shuin, V.A. Vliyanie razryada emkosti povrezhdennoy fazy na perekhodnyy protsess pri zamykaniyakh na zemlyu v kabel'nykh setyakh 3–10 kV [The impact of the faulty phase capacity discharge on the transient in the event of earth faults in 3–10 kV cable networks]. *Elektrichestvo*, 1983, no. 12, pp. 4–10.
18. Shuin, V.A. Nachal'nye fazovye sootnosheniya elektricheskikh velichin perekhodnogo protsessa pri zamykaniyakh na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV [The initial phase relations of the transient electrical characteristics in the event of single phase earth faults in 6–10 kV cable networks]. *Elektrichestvo*, 1991, no. 10, pp. 58–61.
19. Soldatov, V.F., Kobazev, V.P., Chupaylenko, A.A. Otsenka soprotivleniya dugi pri odnofaznom zamykanii na zemlyu [Evaluation of the arc resistance under single-phase earth fault]. *Elektricheskie stantsii*, 1996, no. 8, pp. 47–48.

Шуин Владимир Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-06,
e-mail: shuin@rza.ispu.ru
Shuin Vladimir Aleksandrovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor of the Department of Electric Power Systems Automatic Control,
telephone (4932) 26-99-06,
e-mail: shuin@rza.ispu.ru

Филатова Галина Андреевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
старший преподаватель кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-06,
e-mail: fgala90@mail.ru
Filatova Galina Andreyevna,
Ivanovo State Power Engineering University,
Senior Lecturer of the Department of Electric Power Systems Automatic Control,
telephone (4932) 26-99-06,
e-mail: fgala90@mail.ru

Воробьева Екатерина Андреевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-06,
e-mail: v_ea@rambler.ru
Vorobyova Ekaterina Andreyevna,
Ivanovo State Power Engineering University,
Post-Graduate Student of the Department of Electric Power Systems Automatic Control,
telephone (4932) 26-99-06,
e-mail: v_ea@rambler.ru

Ганджаев Дмитрий Ильгарович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
старший преподаватель кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-06,
e-mail: gandzhaev@mail.ru
Gandzhayev Dmitry Ilgarovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Senior Lecturer of the Department of Electric Power Systems Automatic Control,
telephone (4932) 26-99-06,
e-mail: gandzhaev@mail.ru