

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ КРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С НИЗКООМНЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ¹

COMPUTER SIMULATION OF THE SINGLE-PHASE SHORT CIRCUITS IN ELECTRIC NETWORKS WITH LOW-RESISTANCE NEUTRAL GROUNDING²

**D. Kudelina
V. Biryulin**

Summary. The article deals with the issues related to the operation of medium voltage cable electrical networks with low-resistance resistive grounding of the neutral, made by power cables with screens. The computer model created by the authors gives the investigation results. This model presents the voltages values arising on grounding devices in the event of a short circuit between a current-carrying core cable and a screen grounded on both sides. It is shown that the values of the voltage arising on the grounding devices can be dangerous. Designing medium voltage electrical networks, it is necessary to analyze the operation of the lines relay protection in order to avoid cases of the existence of a dangerous voltage with a time exceeding the maximum allowable voltage on the grounding devices.

Keywords: neutral, grounding, relay protection, touch voltage, insulation, grounding device.

Куделина Дарья Васильевна

кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, Россия, Курск
mary_joy@mail.ru

Бирюлин Владимир Иванович

кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, Россия, Курск
bir1956@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы, связанные с работой кабельных электрических сетей среднего напряжения с низкоомным резистивным заземлением нейтрали, выполненных силовыми кабелями с экранами. Представлены результаты исследования на созданной авторами компьютерной модели значений возникающих напряжений на заземляющих устройствах при появлении короткого замыкания между токоведущей жилой кабеля и заземленным с двух сторон экраном. Показано, что значения возникающего на заземляющих устройствах напряжения могут быть опасными, и при проектировании электрических сетей среднего напряжения необходимо проводить анализ работы релейной защиты линий для избежания случаев существования опасного напряжения с временем, превышающим предельно допустимое, на заземляющих устройствах.

Ключевые слова: нейтраль, заземление, релейная защита, напряжение прикосновения, изоляция, заземляющее устройство.

Введение

В системах электроснабжения городов и промышленных предприятий важную роль играют электрические сети, осуществляющие распределение электроэнергии на среднем напряжении, значения которого могут варьироваться от 6 до 35 кВ. В нашей стране работа этих электросетей допускается согласно нормативным документам с разными системами — заземления нейтрали. До недавнего времени применялись два способа заземления нейтрали — изолированная нейтраль и резонансно-заземленная или компенсированная нейтраль. На сегодняшний день в российской энергетике может использоваться также и соединение нейтрали с землей через резистор, имеющий большое сопротивление (высокоомное заземление) или малое сопротивление (низкоомное заземление) [1–3].

Таким образом, при первоначальном строительстве или реконструкции в зависимости от тех или иных факторов электрическая сеть среднего напряжения может быть выполнена с разными способами заземления нейтрали, причем по своим свойствам значительно отличающимися друг от друга.

Литературный обзор

Выбор конкретной системы заземления нейтрали во многом влияет на многие важные показатели рассматриваемой электрической сети:

- возможность работы данной сети при возникновении замыкания одной фазы на землю или появления однофазного замыкания на землю (ОЗЗ); электросети, допускающие такую работу, обеспечивают потребителей электрической энергией с достаточно высокой степенью надежности;

¹ Исследование выполнено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук МК-5109.2022.4 «Разработка автоматизированной системы выявления объектов, оказывающих негативное влияние на качество электроэнергии».

² The publication was carried out with the Russian Federation President Grant financial support for young scientists state support — Candidates of Science, project No. MK-5109.2022.4 «An automated system development for identifying objects which have a negative impact on power quality».

- обеспечение безопасности обслуживающего персонала и других людей при возникновении ОЗЗ;
- влияние ОЗЗ на работу электрооборудования (в первую очередь, изоляции) при появлении ОЗЗ, учитывая при этом происходящие изменения величин напряжений на неповрежденных фазах сети относительно земли;
- создание больших по своей величине перенапряжений в электрических сетях, величина которых может превышать номинальное фазное напряжение сети в два и более раза;
- величина тока повреждения, возникающего при появлении ОЗЗ;
- способы построения и уставки срабатывания устройств релейной защиты от ОЗЗ;
- необходимый уровень изоляции, используемой в электрических сетях среднего напряжения.

Исходя из этого, можно прийти к заключению, что выбор системы заземления нейтрали во многом влияет на применение различных конструктивных решений в той или иной электрической сети среднего напряжения. Распределительные электрические сети среднего напряжения имеют значительно большую протяженность по отношению к электросетям класса 110 кВ и выше. Поэтому от их надежной работы во многом зависит бесперебойность снабжения электрической энергией многочисленных потребителей, как в промышленности, так и других потребителей.

Рассмотрим работу электрических сетей среднего напряжения при появлении в них ОЗЗ, учитывая при этом, что данный вид повреждений встречается чаще, чем другие виды нарушения нормальной работы токоведущих частей и электрооборудования в электросетях [4, 5].

Если в электрической сети используется режим изолированной нейтрали, то такое повреждение приведет к протеканию тока замыкания в электрической сети. Значение возникающего тока повреждения будет определяться емкостью фаз этой сети относительно земли. В свою очередь, величина емкости в сети в итоге зависит от конструкции примененных силовых кабелей и суммарной длины кабельных линий, проложенных в данной электрической сети.

Небольшая величина тока ОЗЗ (при относительно небольшой длине кабельных линий) позволит не производить быстрое отключение данного повреждения, так как при таких значениях тока не возникает опасных нагревов электрооборудования. Это обстоятельство, несомненно, увеличивает надёжность электроснабжения потребителей, подключенных к данной электрической сети. Если кабельная электрическая сеть имеет большую длину, то в этом случае токи замыкания на землю будут иметь более высокие значения по сравнению с предельно до-

пустимыми значениями, приведенными в нормативных документах, и тогда для их снижения необходимо использовать компенсирующие устройства (дугогасящие реакторы), обеспечивающие низкий уровень емкостных токов в сети и работу электрической сети с компенсированной нейтралью.

Следует отметить, что для режимов изолированной и компенсированной нейтралей, несмотря на отсутствие необходимости их быстрого отключения при ОЗЗ, характерны следующие негативные свойства:

- существование вероятности возникновения больших перенапряжений на неповрежденных фазах электрической сети, отрицательно воздействующих на изоляцию элементов этих электросетей, особенно опасных при неустойчивом горении дуги в месте возникновения ОЗЗ, сопровождающихся прерываниями и повторными зажиганиями электрической дуги;
- опасность попадания людей под шаговое напряжение, возникающее на поверхности грунта при ОЗЗ, учитывая, что данный вид повреждения не отключается быстро защитными устройствами;
- рост напряжения на неповрежденных фазах сети относительно земли до междуфазного значения.

Чтобы снизить уровень перенапряжений в электрических сетях среднего напряжения при появлении замыканий на землю, особенно сопровождающихся неустойчивым горением дуги в месте повреждения, попутно снижая вероятность появления феррорезонансных явлений, обеспечивая тем самым снижение числа дополнительных повреждений изоляции оборудования электрической сети, применяется относительно новый для российских электрических сетей режим работы с резистивно-заземленной нейтралью или комбинированно заземленной (через параллельно включенные дугогасящий реактор и резистор между нейтралью сети и землей) нейтралью.

Одной из современных тенденций развития электрических сетей среднего напряжения является использование системы низкоомного резистивного заземления нейтрали и широкое применение силовых кабелей, (как трехфазных, так и трехфазных групп из трех одножильных кабелей) [6–9]. Внедрение низкоомного резистивно-заземления нейтрали придает электрическим сетям следующие свойства [10, 11]:

- исключение появления больших по величине перенапряжений, так как отсутствуют замыкания с перемежающимися дугами [12–14];
- уменьшаются возможности для перехода замыкания одной фазы на землю в многофазные повреждения изоляции элементов таких сетей;
- устранение опасности появления опасных феррорезонансных явлений, сопровождающихся не-

нормальными режимами работы измерительных трансформаторов напряжения, которые могут привести к их повреждениям;

- значительно снижается вероятность поражения электрическим током людей при пробое фазной изоляции на землю, так как этот режим будет являться аварийным и будет существовать только на время действия релейной защиты и срабатывания выключателя [4].

Материалы и методы

Для современных городских электрических сетей, особенно в крупных городах, характерны высокий уровень потребления электрической энергии и плотности нагрузки потребителей. Поэтому в таких электросетях все шире и шире используются силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Данные кабели имеют прогрессивную конструкцию, изготавливаются по современной технологии из материалов с высокими механическими и электрическими свойствами, что обеспечивает им значительное преимущество перед ранее разработанными типами кабелей, в том числе по допустимым температурам, пропускной способности.

Данные кабели в настоящее время выпускаются как трехжильными, так и одножильными. Одножильные кабели имеют большой диапазон выпускаемых сечений и применяются в составе трехфазной группы (три однофазных кабеля). Отличительной особенностью однофазных кабелей по сравнению с трехфазными является наличие у них проводящего экрана, расположенного поверх фазной изоляции и обеспечивающего выравнивание электрического поля (устранение локальных максимумов напряженности) в этой изоляции. При монтаже трехфазной группы однофазных кабелей экраны этих кабелей присоединяют к заземляющим устройствам подстанций или распределительных пунктов по обоим концам кабельной линии, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Заземление экранов однофазных кабелей:
1 — токоведущие жилы кабелей; 2 — экраны кабелей

Заземление экранов кабелей выполняется для обеспечения равномерности электрического поля, создаваемого токоведущей жилой, находящейся под напряжением. Выравнивание электрического поля обеспечивает хорошие условия для работы изоляции токоведущей жилы [15].

Но если заземление экрана выполняется только с одной стороны кабеля, то на незаземленном конце экрана может возникнуть в нормальном режиме работы напряжение достаточно большой величины, создающее опасность для персонала энергетических объектов. Для исключения этой опасности выполняется заземление экранов кабелей с двух сторон, как показано на рис. 2.

Но при таком заземлении создаются пути протекания токов в экранах, как в нормальном режиме работы (емкостной и индуктивный механизм создания токов в экранах), так и в аварийном режиме — пробоем изоляции между токоведущей жилой и экраном (однофазное КЗ). Протекание токов в экранах приводит к появлению напряжения на заземляющих устройствах.

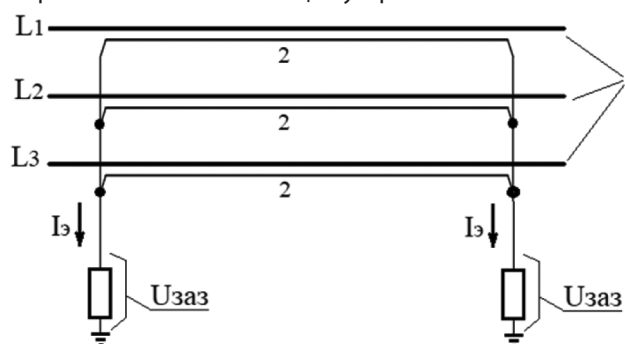


Рис. 2. Напряжения на заземляющих устройствах

Очевидно, что максимальное значение токов в экранах кабелей возникает в режиме однофазного КЗ, если электрическая сеть работает в режиме низкоомного заземления нейтрали. В этом случае большой практический интерес представляет определение напряжений, возникающих на заземляющих устройствах во время протекания тока однофазного КЗ.

Авторы статьи выполнили компьютерное моделирование режима однофазного КЗ трехфазной кабельной линии с заземлением экранов кабелей, входящих в эту группу по обоим концам линии. Это моделирование проводилось на основании данных конкретного энергетического объекта. Описываемая в статье модель была создана в программном пакете PSCAD, обеспечивающем проведение расчетов установившихся и переходных режимов работы электрических систем и различного электрооборудования.

Процесс моделирования производился для кабельной сети напряжением 20 кВ, выполненной кабелями сечением 500 мм² с экранами сечением 70 мм². Данная сеть обеспечивает передачу электрической энергии от двух секций шин, подключенных к силовому трансформатору через реакторы.

При составлении модели рассматривалась кабельная линия длиной 10 км. С одной стороны этой линии

экраны кабелей подключены к заземляющему устройству подстанции, имеющему сопротивление, равное 0,17 Ом, с другой стороны к заземляющему устройству распределительного пункта с сопротивлением 0,3 Ом. При проведении моделирования изменялось положение точки короткого замыкания с некоторым шагом от начала до конца линии. Поэтому модель линии была разделена на два фрагмента, схемы которых приведены на рис. 3 и рис. 4.

Первый фрагмент модели кабельной линии представляет собой участок рассматриваемой линии от шин подстанции до точки однофазного короткого замыкания, создаваемого между фазой А и экраном кабеля. Для этой цели применяется короткозамыкатель, подключа-

емый при создании модели ко всем трем фазам линии. При наладке модели был выбран вид повреждения — однофазное короткое замыкание (между фазой А и заземленным экраном).

Результаты

Измерение значений токов в экранах линии с помощью токовых измерителей выполнялось для начала линии, места возникновения повреждения (в данном месте экраны первого фрагмента линии соединяются с экранами второго фрагмента линии, и одна фаза замыкается на экран) и конце линии.

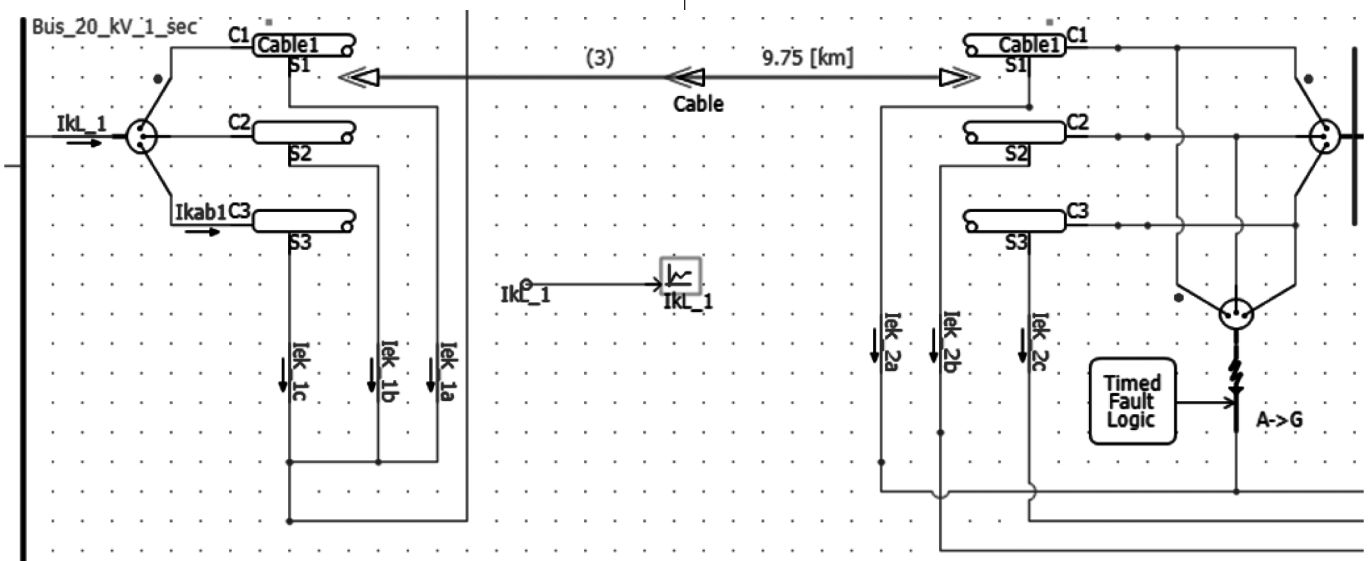


Рис. 3. Первый фрагмент модели

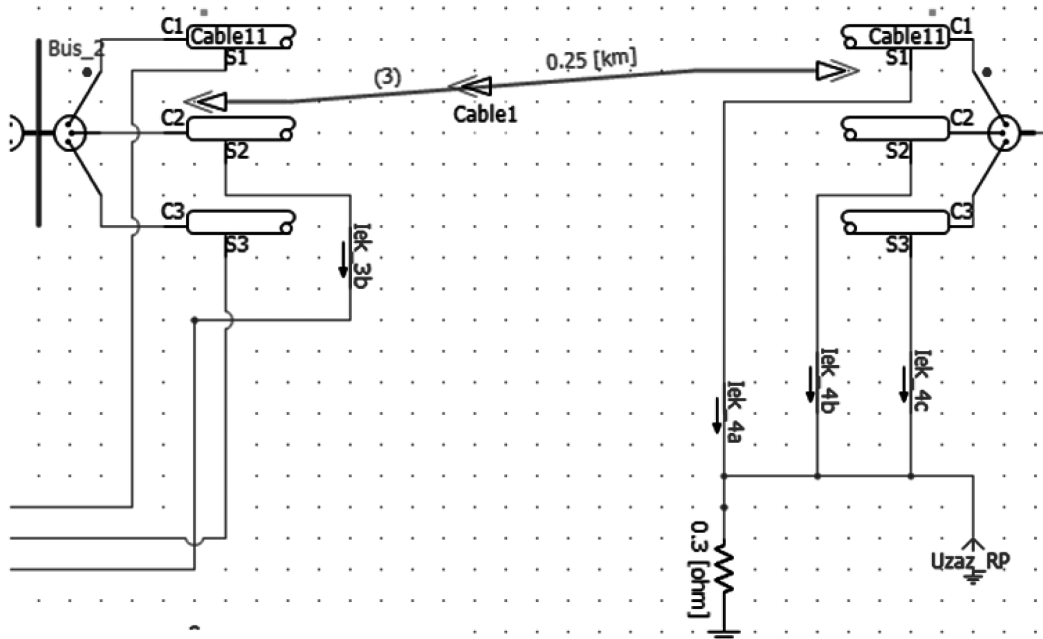


Рис. 4. Второй фрагмент модели кабельной линии

В рассматриваемой схеме ток однофазного КЗ (между фазой и экраном кабеля) протекает от поврежденной фазы через экран и заземляющие устройства, к которым он присоединен. Ток однофазного КЗ в системе с низкоомным заземлением нейтрали имеет большую величину, поэтому во время существования данного повреждения на заземляющих устройствах могут возникать значительные напряжения, представляющие опасность для персонала энергетических объектов. Поэтому, кроме величины токов экранов линии, также проводились измерения напряжений на заземляющих устройствах.

Результаты измерений показаны в таблице 1. В ней приведены длины фрагментов модели кабельной линии. L_1 представляет расстояние от начала линии до точки возникновения повреждения, L_2 — расстояние от места возникновения повреждения до конца линии. Далее приведены значения тока однофазного КЗ (в столбце $I_{окз}$).

Токи экранов приведены в таблице по каждой фазе, как в начале линии, так и в конце линии, через разделяющий символ «/». Также в этой таблице представлены значения напряжений на заземляющих устройствах подстанции ($U_{зав}$ ПС) и распределительного пункта ($U_{зав}$ РП).

Обсуждение

Поведем анализ полученных результатов. Ток однофазного КЗ на рассматриваемой линии изменялся в пределах от 1348,7 до 1230,0 А. Эти значения обеспечивают селективное действие релейной защиты при возникновении такого повреждения, что предоставляет возможность быстрого отключения возникшего повреждения.

В экране фазы А протекает значительный ток, величина которого зависит от места возникновения повреждения. При моделировании наибольшее значение тока экрана было зафиксировано в случае возникновения замыкания фазы А на экран кабеля при расстоянии от места возникающего повреждения до начала линии, равного 100 метров или 0,1 км. Для оценки допустимости такого тока с точки зрения термической стойкости кабельной линии (в том числе и по температуре экрана) воспользуемся приведенными в ряде источников данными по проверке кабелей на термическую стойкость и невозгораемость.

Так, в [1] приведены предельные значения токов КЗ, протекающих по различным сечениям медных экранов в течение одной секунды, для обеспечения термической стойкости и невозгораемости. Для сечения 70 мм² термическая стойкость достигается при токах, не превышающих значения 12,2 кА, невозгораемость — при токах, не превышающих 14,5 кА. Приведенные в табл. 1 значения токов однофазного КЗ позволяют сделать вывод, что при времени существования такого повреждения до одной секунды условия термической стойкости и невозгораемости кабеля не будут нарушены.

Перейдем к анализу значений напряжений на заземляющих устройствах. Как видно по данным табл.1, самое большое значение напряжения создается на заземляющем устройстве подстанции. Оно изменяется от 127,8 до 113,1 В. Воспользуемся приведенными в табл. 2 [17] значениями допустимых напряжений прикосновений. В этой таблице приведены значения допустимых напряжений прикосновений для продолжительности воздействия тока (в нашем случае — это длительность существования однофазного КЗ) в целых долях секунды.

Таблица 1.

Результаты измерений токов и напряжений

L_1 , км	L_2 , км	$I_{окз}$, А	Токи экранов, А			$U_{зав}$ ПС, В	$U_{зав}$ РП, В
			Фаза А	Фаза В	Фаза С		
0,10	9,90	1348,7	1330,5/18,4	16,9/11,0	20,1/7,3	127,8	6,1
1,0	9,00	1325,6	1230,7/95,3	36,2/34,1	22,7/43,8	125,3	6,6
2,00	8,00	1302,5	1125,1/177,9	74,6/73,2	61,4/83,8	122,7	7,1
3,00	7,00	1282,3	1024,8/258,3	113,3/111,8	100,1/122,8	120,5	7,8
4,00	6,00	1265,2	929,3/336,7	151,3/149,6	138,2/160,7	118,5	8,5
5,00	5,00	1251,3	838,1/414,0	188,8/186,8	175,7/198,2	116,8	9,1
6,00	4,00	1240,7	750,7/490,8	226,1/223,8	212,9/235,3	115,5	9,8
7,00	3,00	1233,3	666,4/567,6	263,4/260,9	250,2/272,5	114,4	10,5
8,00	2,00	1229,3	584,7/645,2	301,0/298,4	287,8/310,0	113,7	11,3
9,00	1,00	1228,6	504,9/724,2	339,2/336,5	326,1/348,2	113,2	12,1
9,50	0,50	1229,0	465,6/764,4	358,8/355,9	345,6/367,6	113,1	12,4
9,75	0,25	1230,0	446,0/784,8	368,7/365,8	355,6/377,4	113,1	12,7

Таблица 2.

Допустимое время существования напряжения на заземляющем устройстве подстанции в зависимости от положения точки КЗ на линии

Расстояние от начала линии до точки КЗ	Напряжение на заземляющем устройстве, В	Допустимое время существования напряжения, с
0,10	127,8	0,44
5,00	116,8	0,49
8,00	113,7	0,51
9,75	113,1	0,52

Чтобы получить значения, соответствующие найденным значениям напряжений на заземляющих устройствах, определим функцию, показывающую зависимость длительности существования опасного повреждения от величины напряжения прикосновения. Для этой цели использовалась компьютерная система научно-технических расчетов MatLab.

Поиск функции производился как подбор наиболее подходящего данным таблицы 2 [17] полинома некоторой степени. В результате вычислений было определено, что наилучшее приближение дает полином третьей степени со следующими коэффициентами:

$$a_1 = -1,1990e-07, a_2 = 0,0001, a_3 = -0,0242, a_4 = 2,1484$$

и выражение для нахождения допустимого времени существования напряжения на заземляющем устройстве $t_{доп}$ будет иметь следующий вид:

$$t_{доп} = a_1 \cdot U^3 + a_2 \cdot U^2 + a_3 \cdot U + a_4.$$

Для проверки точности приближения используем два предельных значения напряжения прикосновения 120 В и 160 В, которым соответствуют допустимые длительности воздействия 0,4 с и 0,2 с. Для первого значения напряжения (120 В) допустимое время его существования на заземляющем устройстве в с:

$$t_{доп} = -1,1990e-07 \cdot 120^3 + 0,0001 \cdot 120^2 + (-0,0242) \cdot 120 + 2,1484 = 0,3946 \text{ с.}$$

Для второго значения напряжения (160 В) допустимое время его существования на заземляющем устройстве в с:

$$t_{доп} = -1,1990e-07 \cdot 160^3 + 0,0001 \cdot 160^2 + (-0,0242) \cdot 160 + 2,1484 = 0,1980 \text{ с.}$$

Сравнивая приведенные расчетные значения времени существования напряжения на заземляющем устройстве с заданными в [17], можно сделать вывод о хорошей точности вычислений по найденному полиному. Определим допустимое время существования напряжений на заземляющих устройствах.

Приведенные в табл. 2 значения допустимых времен существования однофазных КЗ в разных точках линии, по существу, определяют требования к быстрдействию защит на этой линии. Поэтому при проектировании электрических сетей среднего напряжения, работающих с низкоомным заземлением нейтрали, следует выполнять проверку на допустимость времени существования напряжения на заземляющих устройствах. Для примера рассмотрим значение выдержки времени срабатывания защиты от однофазного КЗ, равное 0,2–0,4 с, взятое из [17].

Если защита от однофазных КЗ работает с выдержкой времени, не превышающей указанных выше значений, по всей длине кабельной линии, то очевидно, что время существования напряжения на заземляющем устройстве подстанции не превышает допустимого значения. Но при этом нужно учитывать тот факт, что может произойти отказ защиты от однофазных КЗ, и в действие должна вступать резервная защита, выдержка времени действия которой окажется больше допустимой длительности существования напряжения на заземляющем устройстве.

Заключение

Проведенный анализ режимов работы электрических сетей среднего напряжения с низкоомным заземлением нейтрали на созданной авторами статьи компьютерной модели показал, что при возникновении однофазного КЗ на кабельной линии, выполненной в виде трехфазной группы однофазных кабелей, на заземляющих устройствах появляется напряжение, достаточно большое по своей величине. Поэтому при проектировании таких кабельных сетей необходимо выполнение проверки времени отключения однофазных КЗ, возникающих как в начале, так и в конце рассматриваемых линий устройствами релейной защиты, для избежания ситуации, когда на заземляющем устройстве подстанции будет существовать с недопустимой продолжительностью опасное напряжение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурчевский, В.А., Владимиров, Л.В., Ощепков, В.А., Суриков, В.И. Обзор режимов заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ // Омский научный вестник. 2009. №1 (77). С. 122–126.
2. Кузьмин, А.А., Алтандулга, Б. К вопросу выбора режима заземления нейтрали в сети среднего класса напряжения городского электроснабжения // Вестник Чувашского университета. 2015. №3. С. 62–67.
3. Михеев, Г.М., Зиганшин, А.Г. Возможность влияния современных технологий на режим нейтрали электрических сетей // Вестник Чувашского университета. 2021. №3. С. 103–112. doi: 10.47026/1810-1909-2021-3-103-112.
4. Андреев, А.А. Анализ существующих разновидностей защит от однофазных замыканий на землю и условия их применения // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2021. №4 (72). С. 56–70. doi: 10.14498/tech.2021.4.5.
5. Булычев, А.В. Выбор параметров срабатывания защит от однофазных замыканий на землю в распределительных сетях при разных режимах нейтрали // Релейная защита и автоматизация. 2022. №1(46). С.36–45.
6. Евминов, Л.И., Алферова, Т.В. Резистивное заземление нейтрали в распределительных сетях 6–35 кВ // Агротехника и энергообеспечение. 2019. №4 (25). С. 94–109.
7. Евминов Л.И., Алферова Т.В. Применение резистивного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2022. №2 (89). С. 53–67.
8. Короткевич, М.А., Подгайский, С.И., Голомуздов, А.В. Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Часть 1 // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2017. №5. С. 417–432.
9. Бакиров, А.Р., Васильева, А.Ю., Ширковец, А.И., Телегин, А.В. Опыт применения резистивного заземления нейтрали в сетях 6–10 кВ горнорудной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. №4. С. 328–334.
10. Куликова, Н.А., Титаренко, О.Н., Тяпкина, В.А. Резистивное заземление нейтрали — способ повышения надёжности работы электрических сетей 6–35 кВ // Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4, № 2. С. 32–38.
11. Майоров, А.В., Челазнов, А.А., Ильиных, М.В. Экспериментальные исследования переходных процессов при однофазных замыканиях в сети 20 кВ // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. №6. С. 23–29.
12. Ощепков, В.А., Владимиров, Л.В., Плотников, Д.И., Шакинов, Е.Е., Мельников, С.А., Паламарчук, Д.В. Влияние режима работы нейтрали распределительных электрических сетей на уровень перенапряжений при однофазном замыкании на землю // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. №1 (67). С. 119–123. doi: 10.23670/IRJ.2018.67.090.
13. Аюурзана, Э., Петров, М.И., Кузьмин, А.А. Экспериментальное исследование эффективности работы дугогасящих реакторов в улан-баторских городских электрических сетях 6–10 кВ // Вестник Чувашского университета. 2016. №1. С. 30–38.
14. Бадалян, Н.П., Колесник, Г.П., Чашин, Е.А. Заземление экрана однофазных силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. №30. С. 63–78.
15. Дмитриев М.В. Проверка кабельных линий 6–500 кВ при коротких замыканиях. Условия термической стойкости и невозгораемости // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. №4 (49). С. 76–82.
16. ГОСТ 12.1.038-82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. 7 с.

© Куделина Дарья Васильевна (mary_joy@mail.ru); Бирюлин Владимир Иванович (bir1956@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»