

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННОГО УЧАСТКА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ В РЕЖИМЕ «ДВОЙНОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ»

Э.Ф. ХАКИМЗЯНОВ, А.И. ФЕДОТОВ, Р.Г. МУСТАФИН, Р.У. ГАЛЕЕВА

Казанский государственный энергетический университет

В статье предлагается методика расчета параметров режима «двойное замыкание на землю на одной линии» для уточнения определения поврежденных участков линии с ответвлением. В качестве информационного параметра при определении поврежденного участка сети был принят уровень напряжения обратной последовательности на стороне 0,4 кВ потребительских подстанций.

Ключевые слова: линия электропередачи, двойное замыкание на землю, измерительный орган сопротивления, ближайшее и дальней место повреждения, расчет параметров аварийного режима.

Наиболее распространенными повреждениями в распределительных сетях среднего напряжения являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), которые составляют около 60–80% от общего числа всех повреждений [1].

Продолжительная работа сети в режиме ОЗЗ может привести к появлению замыкания на землю в другой точке сети [2]. Второе замыкание на землю обычно возникает на участке сети с наиболее ослабленной изоляцией и сопровождается увеличением тока в поврежденных фазах.

Сложность двойных замыканий на землю заключается в том, что точки замыкания на землю могут находиться как на одной, так и на разных линиях, отходящих от шин распределительного устройства подстанции, что, несомненно, затрудняет и без того сложную задачу определения мест повреждений (ОМП) в электрических сетях среднего напряжения.

В соответствии с «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ) [3] линии электропередачи (ЛЭП) напряжением 3–35 кВ должны быть оборудованы системами релейной защиты от многофазных замыканий и от ОЗЗ. Современные микропроцессорные комплексы релейной защиты учитывают требования ПУЭ и имеют в своем составе многоступенчатые токовые защиты от многофазных повреждений и защиты нулевой последовательности от ОЗЗ, а также оборудованы алгоритмами ОМП, позволяющими определять места многофазных повреждений. В терминалах релейной защиты алгоритм работы ОМП основан на «захвате» массива аналоговых данных: векторных значений всех симметричных составляющих тока и напряжения линий и их приращений, тока нулевой последовательности параллельной линии. Заданные алгоритмы ОМП позволяют определять расстояния до мест междуфазных повреждений, в частности, и двухфазное короткое замыкание на землю. Определение мест двойных замыканий на землю, как правило, осуществляется силами оперативно-выездной бригады, которая проводит обход трассы линий.

В предыдущих работах [4–10] были предложены способы, позволяющие на основе измерений параметров аварийного режима определять расстояния до мест замыканий на землю при двойных замыканиях на одной и на разных линиях электропередачи, отходящих от шин подстанции.

© Э.Ф. Хакимзянов., А.И. Федотов., Р.Г. Мустафин., Р.У. Галеева
Проблемы энергетики, 2016, № 7-8

Измерительный орган сопротивления, включенный на фазное напряжение и фазный ток, позволяет определить ближнее и дальнее место замыкания на землю при повреждении на одной линии. Однако определить, на каком участке распределительной сети произошло двойное замыкание на землю, не представляется возможным. Для решения данной задачи предлагается проанализировать режим «двойное замыкание на землю на одной линии» в распределительной сети с одним ответвлением с целью определения дополнительных критериев выявления аварийного режима.

В качестве расчетной принята схема сети напряжением 10 кВ с одним ответвлением, по которой производится расчет параметров режима с замыканиями на землю ф. В (т. 1) и ф. С (т. 2) на расстоянии 1 км и 6 км соответственно.

Длина линии между подстанциями ПСА-ПСБ составляет 10 км, расстояние до места ответвления – 3 км, длина ответвления – 5 км. Нагрузка линий электропередачи принята активной мощностью 0,63 МВт, подключённой к распределительной сети понижающими трансформаторами 10/0,4 кВ мощностью 0,63 МВА (рис. 1). Замер токов и напряжений производится измерительными органами, подключенными к трансформаторам тока ТА1 и напряжения TV1.

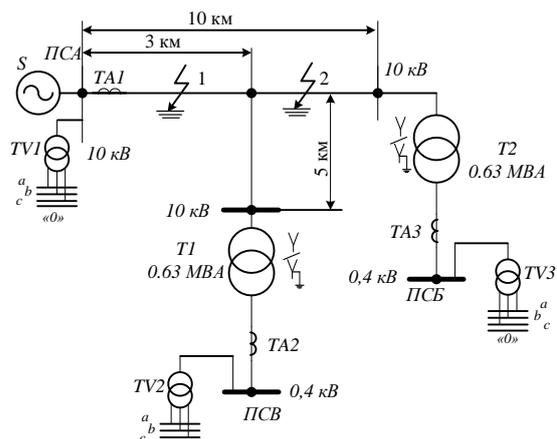


Рис. 1. Однолинейная схема моделируемой сети

Параметры схемы моделируемой сети следующие:

1. Питающая система задана сопротивлением $Z_c = (0,1 + j0,6)$ Ом.
2. Удельные активные и индуктивные сопротивления прямой и нулевой последовательности линии: $X_{1\text{луд}} = 0,37$ Ом/км; $X_{0\text{луд}} = 1,57$ Ом/км; $R_{1\text{луд}} = 0,57$ Ом/км; $R_{0\text{луд}} = 0,72$ Ом/км.
3. Сопротивления прямой и обратной последовательностей элементов сети равны между собой.
4. Влияние «земли» учитывается сопротивлением $R_3 = 10$ Ом, переходные сопротивления в местах замыканий приняты равными 0 Ом.
5. Понижающие трансформаторы T1 и T2 марки ТМГ-630/10/0,4.
6. Емкость прилегающей части системы $C_0 = 1$ мкФ.
7. Схемы замещения нулевой последовательности не включают в себя сопротивления понижающих трансформаторов и нагрузки потребителей ввиду того, что обмотки силовых трансформаторов соединены в звезду.

Расчеты параметров аварийного режима производятся на основании схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей [11] (рис.2).

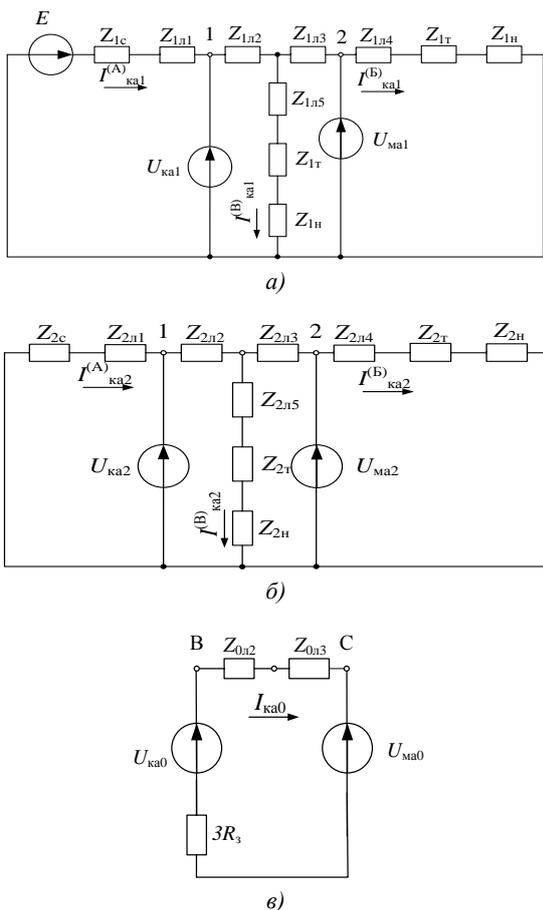


Рис. 2. Схема замещения прямой (а), обратной (б), нулевой (в) последовательностей моделируемой сети при двойном замыкании на землю фаз В и С в т. 1 и 2

Значения токов и напряжений, их симметричных составляющих для всех подстанций, полученные расчетом и моделированием аварийного режима, приведены в табл 1.

Таблица 1

Уровни напряжений на потребительских подстанциях

	ПС Б		ПС В	
	Расчет	Модель	Расчет	Модель
$U_1, В$	187,8	180,4	207,1	198
$U_2, В$	44,2	44	27,7	27,4
$K_{2U}, \%$	23,5	24,4	13,5	13,8
$I_A, А$	819,9	791,62	740,9	701,5
$I_B, А$	538,78	528,45	637,4	630,6
$I_C, А$	701,1	642,74	812,1	797,1
$U_A, В$	229,9	221,65	233,2	223,2
$U_B, В$	156,9	148	204,1	176,6
$U_C, В$	184,8	180	186,7	196,4

Напряжение обратной последовательности в каждой точке сети определяется падением напряжения обратной последовательности на участке цепи соответствующей

схемы замещения. Эпюра распределения напряжения обратной последовательности вдоль сети показана на рис. 3. Поскольку измерение напряжения предлагается осуществлять на низкой стороне потребительских подстанций счетчиками электроэнергии, то значение напряжения обратной последовательности приведено к соответствующей стороне 0,4 кВ.

Коэффициент несимметрии по обратной последовательности K_{2U} при двойном замыкании на землю равен 13,5 и 23,5% соответственно и в разы превышает нормально допустимый уровень 4% [12].

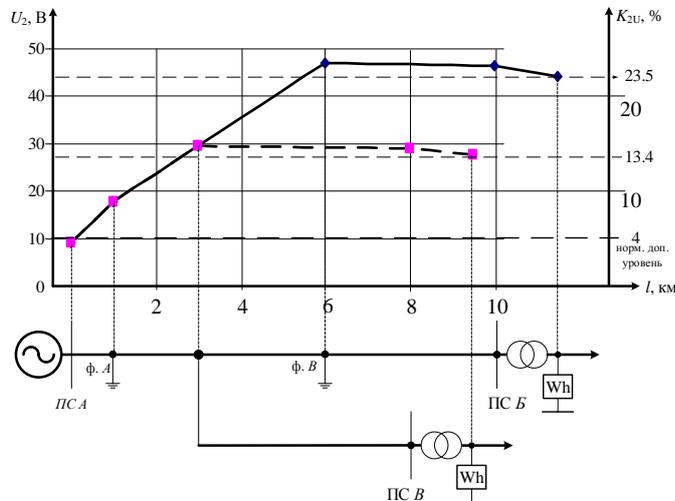
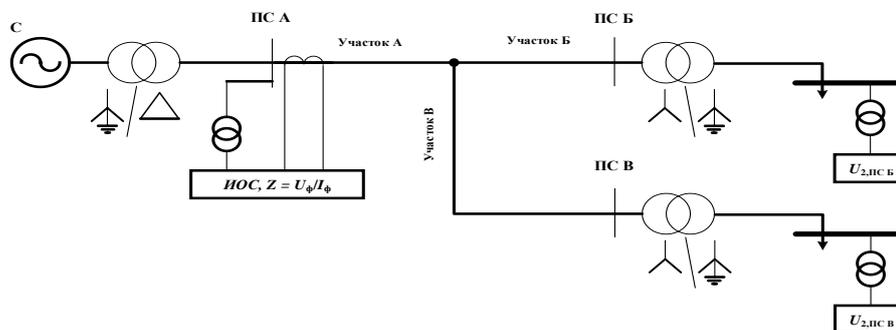


Рис. 3. Эпюра напряжения обратной последовательности при двойном замыкании на землю

Анализ результатов моделирования подтвердил выбранную методику расчета. Напряжение обратной последовательности U_2 на стороне 0,4 кВ потребительских подстанций, согласно модели, равны 44 и 27,4 В. Эти же напряжения согласно расчетам равны 44,2 и 27,7 В соответственно. Коэффициент несимметрии по обратной последовательности в данном случае оказался равным 24,4 и 14% соответственно.

Таким образом, напряжение обратной последовательности на стороне 0,4 кВ потребительских подстанций может служить информационным критерием при определении поврежденных участков сети при двойных замыканиях на землю. В программном комплексе *MatLab Simulink* было произведено моделирование аварийного режима в разных точках сети (рис. 4). Полученные соотношения между напряжениями обратной последовательности на шинах низкого напряжения потребительских подстанций позволяют разработать алгоритмы определения поврежденного участка распределительной сети с ответвлениями.



Отношение напряжений	Участок А	Участок Б	Участок В
$U_{2,пс Б} > U_{2,пс В}$			
			
$U_{2,пс Б} = U_{2,пс В}$			
			
$U_{2,пс Б} < U_{2,пс В}$			
			

Из полученных результатов расчета и моделирования можно сделать вывод, что по параметрам напряжения обратной последовательности можно более точно определить положение повреждений относительно точки отпайки линии с ответвлением.

Таким образом, выявлена принципиальная возможность точного определения поврежденного участка сети при двойных замыканиях на землю по параметрам режима на стороне 0,4 кВ. Для её практической реализации требуется организация интеллектуальной сети, объединяющей через каналы связи все локальные системы учета электроэнергии с привязкой к единому времени для согласования измеряемых величин.

Summary

In article the technique of calculation of parameters of mode "double earth fault on one line" to clarify the definition of damaged sections of line with a branch. As an information parameter in the definition of the damaged section of the network was adopted the level of negative sequence voltage on the side of 0,4 kV consumer substations.

Keywords: transmission line, double circuit to ground, measuring the body resistance, the near and the far point of the damage, the calculation parameters of the emergency mode.

Литература

1. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001. 104 с.
2. Манилов А.М., Барна А. «ОЗЗ в сетях 6-35 кВ в сетях с комбинированным заземлением нейтрали» // «Новости ЭлектроТехники». 2012. №6(78). Электронный доступ: <http://www.news.elteh.ru/arh/2012/78/06.php>.
3. Библия электрика: Правила устройства электроустановок. Межотраслевые правила по охране труда (Правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: сборник нормативных документов. М.: КНОРУС, 2013. 736 с.
4. Патент 2557375 Российская Федерация. Способ определения расстояния до мест замыканий на землю на двух линиях электропередачи в сетях с малыми токами замыкания на землю / Мустафин Р.Г., Хакимзянов Э.Ф. Заявл. № 2014117831/28, 29.04.2014. Опубл. 20.07.2015. Бюл. №20. © Проблемы энергетики, 2016, № 7-8

5. Патент 2558265 Российская Федерация. Способ определения расстояния до мест двойных замыканий на землю на линиях электропередачи в сетях с малыми токами замыкания на землю / Мустафин Р.Г., Хакимзянов Э.Ф. Заявл. № 2014117832/28, 29.04.2014. Оpubл. 27.07.2015. Бюл. №21.

6. Патент 2558266 Российская Федерация. Способ определения расстояния до мест замыканий на землю на двух линиях электропередачи в сетях с малыми токами замыкания на землю / Мустафин Р.Г., Хакимзянов Э.Ф., Исаков Р.Г. Заявл. № 2014117834/28, 29.04.2014. Оpubл. 27.07.2015. Бюл. №20.

7. Хакимзянов Э.Ф., Исаков Р.Г. Поведение измерительных органов сопротивления при двойных замыканиях на землю в распределительных сетях 6–35 кВ // Релейная защита и автоматизация. 2014. №1 (14). С. 18–21.

8. Хакимзянов Э.Ф., Мустафин Р.Г., Исаков Р.Г. Измерительный орган сопротивления, выявляющий двойное замыкание на землю в распределительных сетях 6–35 кВ // Релейная защита и автоматизация, 2014. №3 (16). С. 29–35.

9. Хакимзянов Э.Ф., Мустафин Р.Г., Федотов А.И., Исаков Р.Г. Определение расстояния до места повреждения линий электропередачи при двойных замыканиях на землю // Энергетика Татарстана. 2014. № 4. С. 84–88.

10. Хакимзянов Э.Ф., Мустафин Р.Г., Федотов А.И. Определение расстояний до мест двойных замыканий на землю на линии электропередачи распределительной сети среднего напряжения // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 3–4. С. 132–137.

11. Короткие замыкания и выбор электрооборудования: учебное пособие для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев и др.; под ред. И.П. Крючкова, В.А. Старшинова. М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 568 с.

12. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Поступила в редакцию

24 мая 2016 г.

Хакимзянов Эльмир Фердинатович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(927)4113395. E-mail: eig86@mail.ru.

Мустафин Рамиль Гамилович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Федотов Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Галеева Раиса Усмановна – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).