УДК 621.316.925

Автор:
д.т.н. Булычев А.В.,
ООО «НПП Бреслер»,
г. Чебоксары, Россия,

D.Sc. Bulychev A.V.,
«NPP Bresler» LLC,
Cheboksary, Russia.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ПРИ РАЗНЫХ РЕЖИМАХ НЕЙТРАЛИ

SELECTION OF PARAMETERS FOR TRIGGERING PROTECTIONS AGAINST SINGLE-PHASE EARTH FAULTS IN DISTRIBUTION NETWORKS UNDER DIFFERENT NEUTRAL MODES

Аннотация: рассмотрена методика выбора параметров срабатывания и оценки чувствительности защит от однофазных замыканий на землю при разных режимах нейтрали. Выбор параметров срабатывания защит основан на отстройке от максимальных режимов, а оценка чувствительности защит – на проверке возможности срабатывания защит при наиболее неблагоприятных условиях. Показано, что чувствительность токовых защит от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью существенно зависит от суммарного емкостного тока сети в целом, и снижается при уменьшении этой емкости. При резистивном заземлении нейтрали сети чувствительность защит во многом зависит от проводимости электрической связи между заземляющим устройством питающей подстанции и возможной точкой однофазного замыкания на землю. Показано, что в условиях, когда обратным проводником является только земля, приемлемая чувствительность защит не обеспечивается.

Ключевые слова: релейная защита, однофазные замыкания на землю, ток срабатывания, чувствительность защиты.

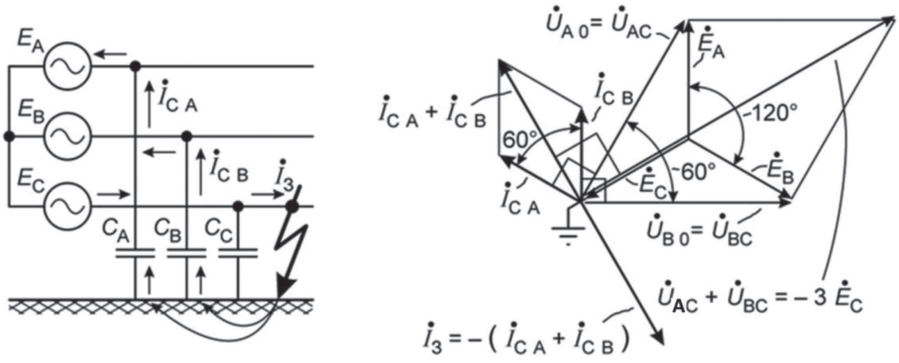
Abstract: the method of selecting the response parameters and assessing the sensitivity of protections against single-phase earth faults under different neutral modes is considered. The choice of the protection response parameters is based on detuning from the maximum modes, and the assessment of the sensitivity of the protections is based on checking the possibility of triggering the protections under the most unfavorable conditions. It is shown that the sensitivity of current

Введение

Преимущества трехфазной сети с изолированной нейтралью позволили обеспечить достойную высокую надежность отечественного электроснабжения на протяжении более сотни лет. Наиболее часто возникающие однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью не являются короткими замыканиями (т.к. проводимость в месте повреждения не шунтирует трехфазную нагрузку) и обычно не требуют быстрого (экстренного) отключения (рис. 1, а). Благодаря этому можно не нарушать электроснабжение потребителей внезапным отключением элемента сети, в котором произошло ОЗЗ.

В месте замыкания возникает ток $\dot{I}_З$, обусловленный распределёнными ёмкостями фазных проводников сети относительно земли. В сущности - это однофазный ток (ток нулевой последовательности), распределенный между тремя фазами. Вторым (обратным) проводником для этого тока является земля, экраны кабелей, заземленные металлически конструкции и заземленные грозозащитные тросы линий электропередачи (если они имеются).

При расчёте этого тока для целей релейной защиты (РЗ) обычно пренебрегают активными и реактивными сопротивлениями генераторов, трансформаторов и линий, поскольку они значительно меньше ёмкостного сопротивления сети. Сеть в исходном состоянии (до момента возникновения ОЗЗ) считают симметричной относительно нейтрали и земли. Ток замыкания на землю равен геометрической сумме токов в фазах А и В ($\dot{I}_{CA}$ и $\dot{I}_{CB}$, соответственно) и противоположен им по фазе (рис. 1, б):



а) *б)*

Рис. 1. Упрощенная схема замещения сети с изолированной нейтралью (а) и векторная диаграмма (б) при ОЗЗ

$$\dot{I}_3 = -\left(\dot{I}_{CA} + \dot{I}_{CB}\right) = -\left(\frac{\dot{U}_{A0}}{\frac{1}{j\omega C_A}} + \frac{\dot{U}_{B0}}{\frac{1}{j\omega C_B}}\right),$$

где $\dot{U}_{A0}$ и $\dot{U}_{B0}$ – напряжения неповреждённых фаз А и В относительно земли (фактически это линейные напряжения $\dot{U}_{AC}$ и $\dot{U}_{BC}$); $\frac{1}{j\omega C_A}$ и $\frac{1}{j\omega C_B}$ – реактивные сопротивления фаз А и В относительно земли.

Применительно к сети с симметричным питанием $\dot{U}_{AC} + \dot{U}_{BC} = -3\dot{E}_C$ (рис. 1, б), а также считая ёмкости фаз относительно земли равными ($C_A = C_B = C_C = C$):

$$\dot{I}_3 = -j\omega C\left(\dot{U}_{AC} + \dot{U}_{BC}\right) = 3j\omega C\dot{E}_C$$

$$\text{или } I_3 = 3U_\Phi \omega C = 6\pi U_\Phi f C,$$

где U_Φ – фазное напряжение сети.

Основные неблагоприятные факторы, возникающие при ОЗЗ в этой сети, связаны с повышением напряжения неповреждённых фаз относительно земли до линейных, и значительный ток в месте замыкания на землю в сетях большой протяженности. Они создают опасность возникновения возгораний, опасность поражения электрическим током людей и животных, и способствуют возникновению других, более тяжёлых видов замыканий.

Защита от ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью

Защиту от ОЗЗ реализуют на основе двух разных подходов [1]. Во-первых, путем общего (неселективного) контроля состояния изоляции сети, содержащей группу гальванически связанных элементов, относительно земли. Во-вторых, избирательно (селективно) действующими средствами, выявляющими замыкания на землю на отдельных присоединениях.

Общий контроль состояния изоляции и выявление ОЗЗ, как правило, основан на непрерывном измерении напряжения нулевой последовательности в контролируемой электрической сети. При этом выявляется лишь факт возникновения ОЗЗ. Но определить по напряжению нулевой последовательности на каком из присоединений произошло повреждение невозможно. Поэтому приходится их поочередно отключать. При отключении поврежденного присоединения напряжение нулевой последовательности в сети снижается до фонового уровня. Этот признак и используется при поиске повреждения.

В соответствии с определением симметричных составляющих напряжение нулевой последовательности представляется так:

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3}\left(\dot{E}_{A0} + \dot{E}_{B0} + \dot{E}_{C0}\right).$$

Здесь $\dot{E}_{A0}, \dot{E}_{B0}, \dot{E}_{C0}$ - векторы э.д.с. фаз А, В, С, соответственно, относительно земли.

Отсюда следует, что в нормальном симметричном режиме, когда потенциал нейтрали сети равен нулю, а модули векторов $\dot{E}_{A0}, \dot{E}_{B0}, \dot{E}_{C0}$ равны соответствующим модулям векторов фазных э.д.с., напряжение нулевой последовательности в сети $\dot{U}_0 = 0$.

При замыкании фазы С на землю:

$$\dot{E}_{C0} = 0;\ \dot{E}_{A0} = \dot{E}_{AC};\ \dot{E}_{B0} = \dot{E}_{BC}.$$

protections against single-phase earth faults in networks with an isolated neutral significantly depends on the total capacitive current of the network as a whole, and decreases with a decrease in this capacity. With resistive grounding of the neutral of the network, the sensitivity of the protection largely depends on the conductivity of the electrical connection between the grounding device of the supply substation and the possible point of a single-phase earth fault. It is shown that in conditions when the reverse conductor is only the earth, the acceptable sensitivity of protection is not provided.

Keywords: relay protection, single-phase earth faults, tripping current, protection sensitivity.

Булычев Александр Витальевич
В 1980 г. окончил Вологодский политехнический институт по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства», инженер-электрик.
В 1984 г. окончил аспирантуру и защитил кандидатскую диссертацию по разработке и исследованию отдельных узлов комплексной (микроэлектронной) системы защиты турбогенераторов.
В 1998 г. окончил докторантуру и защитил докторскую диссертацию на тему «Совершенствование защит блоков генератор-трансформатор и электродвигателей».
Технический директор ООО «НПП Бреслер», профессор.

Тогда

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{E}_{A0} + \dot{E}_{B0} + \dot{E}_{C0}) = \frac{1}{3}(\dot{E}_{A0} + \dot{E}_{B0}) =$$

$$= \frac{1}{3}(\dot{E}_{AC} + \dot{E}_{BC}) = -\frac{1}{3}(3 \cdot \dot{E}_{C0}) = -\dot{E}_{C0}.$$

Как видно, при металлическом замыкании фазы на землю модуль напряжения нулевой последовательности равен модулю фазной э.д.с. сети. Следовательно, действующее значение напряжения нулевой последовательности равно действующему значению фазного напряжения. Интегральное значение этого напряжения можно контролировать непосредственно с помощью реле (или цифрового терминала РЗ), которое подключается к нейтрали сети через трансформатор напряжения TV (рис. 2), если существует физически вывод нейтральной точки сети.

Если в сети нет вывода нейтральной точки, то напряжение нулевой последовательности формируют и измеряют с помощью фильтра нулевой последовательности. Наиболее распространенным является фильтр напряжения нулевой последовательности, построенный на основе трехфазного измерительного трансформатора напряжения, вторичные обмотки которого соединены по схеме разомкнутого треугольника (рис. 3) [1]. Для измерения текущих (фоновых) значений напряжения нулевой последовательности параллельно катушке реле напряжения KV подключают вольтметр PV (см. рис. 2 и рис. 3).

Значение напряжения срабатывания (в масштабе первичных величин) выбирают по условию отстройки от максимально возможного напряжения нулевой последовательности, возникающего в контролируемой сети в нормальных для нее режимах:

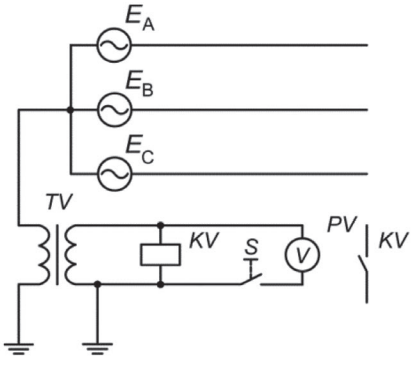


Рис. 2. Схема контроля напряжения нулевой последовательности в нейтральной точке сети

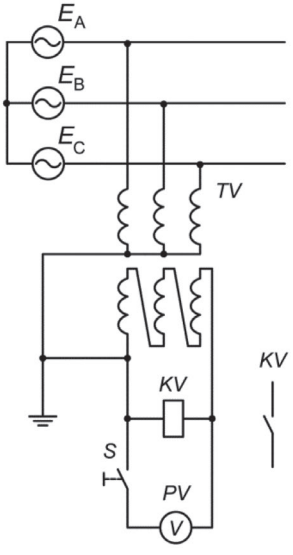


Рис. 3. Схема контроля напряжения нулевой последовательности с помощью фильтра на основе трансформатора напряжения

$$U_{СЗ} > U_{0НРМАХ}.$$

Здесь $U_{СЗ}$ – действующее (первичное) значение напряжения срабатывания защиты;

$U_{0НРМАХ}$ – наибольшее возможное в нормальных режимах действующее (первичное) значение напряжения нулевой последовательности в контролируемой сети.

Значение напряжения $U_{0НРМАХ}$ определяется предельно допустимым потенциалом нейтрали (U_{NMAX}), которое, в свою очередь, обусловлено степенью несимметрии емкостей фаз сети относительно земли:

$$U_{NMAX} = (5 - 10)\ \%\ U_{ФНОМ},$$

где $U_{ФНОМ}$ – номинальное фазное напряжение сети.

Кроме этого, напряжение нулевой последовательности может возникать в сети как проявление замыканий на землю в смежных (внешних) сетях и погрешностей тракта измерений. В результате возможного совместного воздействия этих двух факторов оно может составить (3 – 5) % $U_{ФНОМ}$.

Принимая во внимание возможность появления напряжения нулевой последовательности под действием всех отмеченных факторов, как правило, выбирают [2]:

$$U_{СЗ} = 0{,}15 \cdot U_{ФНОМ}.$$

Напряжение срабатывания реле (если защита выполняется на электромеханических реле) определяется с учетом коэффициента трансформации трансформатора напряжения ($k_{ТН}$):

$$U_{СР} = U_{СЗ}/\ k_{ТН}\,.$$

При стандартном значении максимального выходного напряжения трансформатора (фильтра) напряжения нулевой последовательности 100 В, напряжение срабатывания реле равно 15 В. Это значение напряжения срабатывания иногда устанавливается без расчетов, т.к. оно соответствует минимально возможному напряжению срабатывания реле тип РН-53/60Д, используемому в защитах.

Время срабатывания защиты выбирается исходя из требований отстройки от действия основных (селективных) защит от ОЗЗ и может приниматься в диапазоне от 0,5 до 9 с.

Селективная защита от ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью

Селективную защиту от ОЗЗ, способную действовать избирательно (автоматически выявлять поврежденное присоединение), в соответствии с ПУЭ [2] выполняют по принципу контроля тока нулевой последовательности в присоединениях. Для реализации этого принципа на каждом присоединении устанавливают трансформатор (фильтр) тока нулевой последовательности (рис. 4), в цепь вторичной обмотки которого включают катушку реле тока или соответствующий вход цифрового терминала РЗ (рис. 5).

Защита работает следующим образом. При ОЗЗ, например, на втором присоединении (в точке К1) ток нулевой последовательности в месте установки трансформатора ТА0-2 этого присоединения определяется суммарной емкостью исправной части сети, т.е. суммарной емкостью всей сети кроме собственной емкости поврежденного второго присоединения. Токи нулевой последовательности в местах установки других трансформаторов тока нулевой последовательности определяются только собственными емкостями присоединений на которых установлены эти трансформаторы. Например, ток нулевой последовательности в месте установки ТА0-1 определяется емкостями первого присоединения. Если емкости отдельных присоединений, примерно, одинаковы, и присоединений достаточно много, то ток нулевой последовательности поврежденного присоединения значительно больше, чем других, не поврежденных присоединений. Этот признак используется для автоматического выявления поврежденного присоединения. Таким образом, при возникновении однофазного замыкания на одном из присоединений срабатывает реле тока защиты, установленной на этом присоединении, и формируется сигнал на отключение именно поврежденного присоединения.

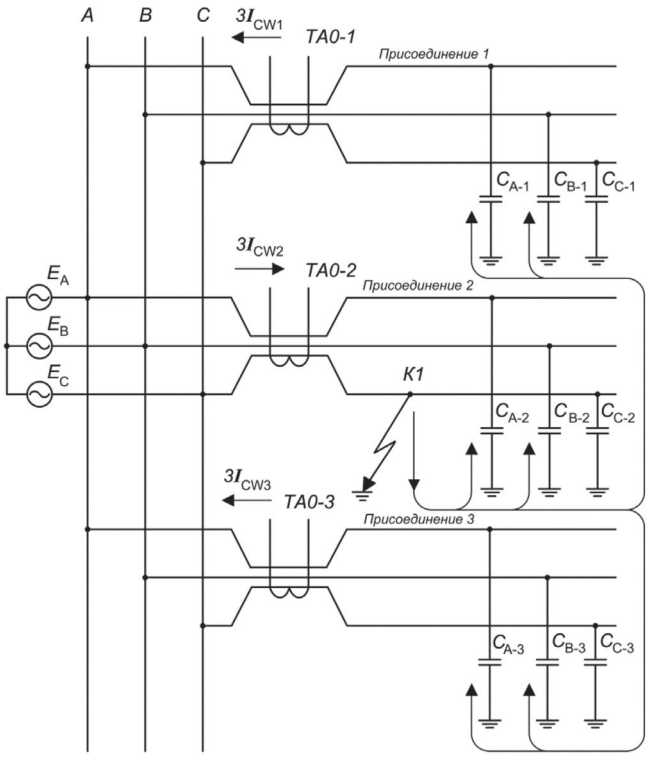


Рис. 4. Схема сети и распределение токов при ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью

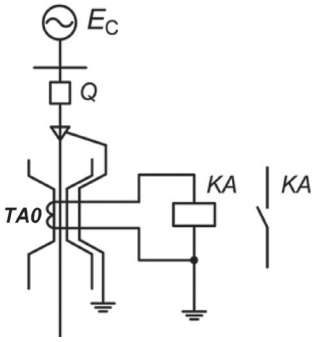


Рис. 5. Схема контроля тока нулевой последовательности

Ток срабатывания защиты выбирают по следующим условиям:

• Ток срабатывания должен быть больше собственного емкостного тока замыкания на землю контролируемого присоединения ($I_{СПР}$) во всех нормальных режимах работы контролируемого присоединения и при повреждениях на смежных присоединениях:

$$I_{СЗ} > I_{СПР}\,.$$

• Ток срабатывания должен быть больше возможного броска емкостного тока замыкания на землю контролируемого присоединения ($I_{СБР}$) в переходных ре-

жимах при внешних перемежающихся замыканиях на землю:

$$I_{СЗ} > I_{СБР}.$$

В соответствии с этими условиями действующее значение первичного тока срабатывания защиты определяют так:

$$I_{СЗ} = k_З\, k_{БР}\, I_{СПР},$$

где $k_З$ и $k_{БР}$ – соответственно, коэффициент запаса и коэффициент отстройки от бросков емкостного тока в переходных режимах.

Значение собственного емкостного тока присоединения определяется так:

$$I_{СПР} = 3\omega C U_{ФНОМ},$$

где ω – угловая частота;

C – емкость одной фазы присоединения относительно земли;

$U_{ФНОМ}$ – номинальное фазное напряжение сети.

Если конфигурация присоединения может изменяться (например, подключаться и отключаться участки кабельных линий (КЛ) или обмотки электрических машин), то в качестве расчетного значения емкости принимается максимально возможное значение.

При реализации защиты, как на электромеханической, так и на цифровой элементной базе коэффициент запаса принимают равным 1,1–1,2. Второй коэффициент $k_{БР}$ может иметь значения в диапазоне от 2 до 5. Меньшие значения выбирают, если защита выполняется на реле типа РТЗ-51 или цифровом терминале защиты; средние, если – на РТЗ-50 и большие, если – на РТ-40/0,2. Однако, если в защите ввести выдержку времени, то можно, таким образом, отстроить защиту от возможных бросков емкостного тока, и принять $k_{БР} = 1$. Для этого необходимо выбирать выдержку времени срабатывания защиты не менее 0,5 с.

Ток срабатывания реле при реализации на электромеханической базе и задании параметра срабатывания во вторичных величинах:

$$I_{СР} = I_{СЗ} / k_{Т0},$$

где $k_{Т0}$ – коэффициент трансформации трансформатора тока нулевой последовательности.

Если расчетное значение тока срабатывания защиты меньше, чем минимально возможный ток срабатывания защиты (реле), то ток срабатывания защиты принимается равным этому технически достижимому минимальному значению.

Чувствительность защиты, установленной на присоединении с номером K, оценивают по значению коэффициента чувствительности:

$$k_{ЧWK} = (I_{CWM} - I_{CWK}) / I_{СЗWK}.$$

Здесь I_{CWM} – минимальный суммарный емкостный ток всей сети, определяемый неотключаемыми присоединениями;

I_{CWK} – емкостный ток присоединения с номером K, на котором установлена защита;

$I_{СЗWK}$ – ток срабатывания защиты, установленной на присоединении K.

Пример 1

Пусть имеется электрическая сеть с шиной 10 кВ и присоединенными отходящими линиями (рис. 6). Необходимые для расчетов параметры сети приведены в табл. 1. Требуется определить параметры срабатывания защит, установленных на первом и втором присоединениях.

Ток срабатывания защиты, установленной на первом присоединении (питание электродвигателя) определяется так:

$$I_{СЗW1} = k_З\, k_{БР}\, I_{CW1}.$$

Принимаются следующие значения коэффициентов (для реализации на реле типа РТЗ-51 или цифровом терминале защиты типа «Бреслер-0107» без выдержки времени, и трансформаторе тока нулевой последовательности типа ТЗЛМ): $k_З = 1{,}2$; $k_{БР} = 2{,}5$.

Емкостный ток первого присоединения определяется суммарной емкостью КЛ и обмотки статора электродвигателя:

$$I_{CW1} = 3\omega\,(C_{W1} + C_М)\, U_{ФНОМ} =$$
$$= 3\cdot 314\cdot(0{,}047 + 0{,}085)\cdot 10^{-6}\cdot 5{,}78\cdot 10^{3} \approx 0{,}7\ \text{А}.$$

Здесь $C_{W1} = 0{,}047$ мкФ – емкость КЛ W1, значение которой получено путем умножения удельной емкости кабеля [3] на длину линии (0,2 км);

$C_М = 0{,}085$ мкФ – емкость обмоток статора электродвигателя (табл. П9.1 [3]).

Если в рассматриваемой электрической сети имеются крупные электродвигатели, емкости фаз которых не известны, то приближенное значение составляющей емкостного тока (I_{CM}), определяемой обмотками электродвигателя (при внешнем замыкании на землю), можно получить с помощью эмпирических формул [4]:

$I_{CM} \approx 0\ 017\cdot S_{НМ}$ (при номинальном напряжении 6 кВ);

$I_{CM} \approx 0{,}03\cdot S_{НМ}$ (при номинальном напряжении 10 кВ).

Здесь $S_{НМ} = P_{НМ}/(\cos\varphi_Н\cdot\eta_Н)$ – полная номинальная мощность электродвигателя (МВА);

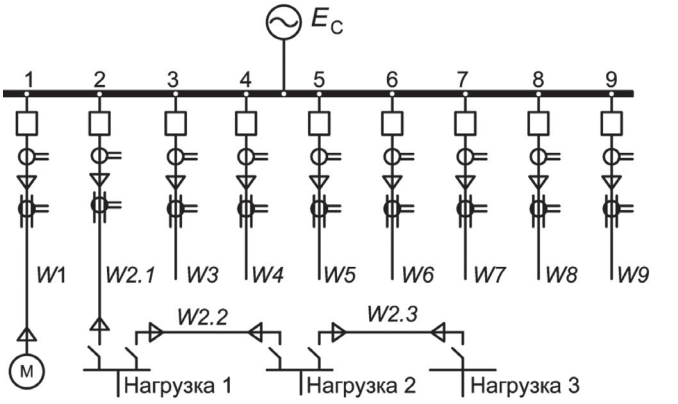


Рис. 6. Схема сети с изолированной нейтралью к примеру 1

Таблица 1. Параметры сети с изолированной нейтралью

Параметр	Значение параметра для присоединения										
	W1	W2			W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9
		W2.1	W2.2	W2.3							
Длина линии, км	0,2	1,4	0,5	0,75	3,1	2,7	2,9	3,3	3,5	2,8	2,4
Сечение, мм²	150	240	120	95	120	120	120	95	95	95	150
Емкость линии, мкФ	0,047	0,4	0,1	0,14	0,66	0,58	0,62	0,63	0,67	0,53	0,57
Емкость обмотки машины, мкФ	0,085	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Емкостный ток, А	0,7	3,5			3,59	3,16	3,38	3,43	3,65	2,88	3,1

$P_{НМ}$ – номинальная активная мощность электродвигателя (МВт);

$\cos\varphi_Н$ и $\eta_Н$ – номинальный коэффициент мощности и номинальный к.п.д. электродвигателя, соответственно.

Первичный ток срабатывания защиты:

$$I_{СЗW1} = 1{,}2\cdot 2{,}5\cdot 0{,}7 = 2{,}1\ А.$$

Коэффициент чувствительности защиты при всех подключенных к шине присоединениях:

$$k_{чW1}=(I_{CWM} - I_{CW1})/ I_{СЗW1} =$$
$$= (27{,}4 - 0{,}7)/2{,}1 = 12{,}7 > 1{,}25.$$

Требования по чувствительности защиты выполняются.

Здесь $I_{CWM}=3\omega((C_{W1}+C_M)+C_{W2}+C_{W3\text{-}W9})U_{ФНОМ}$ – максимальный суммарный емкостный ток сети;

$C_{W3\text{-}W9}$ – суммарная емкость присоединений от W3 до W9;

значение $I_{CWM} =3\cdot 314\cdot((0{,}047+0{,}085)+4{,}9)\cdot 10^{-6}\cdot$ $\cdot 5{,}78\cdot 10^3 \approx 27{,}4\ А$.

При неблагоприятных условиях, когда к питающей шине подключены лишь два присоединения, например, W1 и W2-1 (головной участок второй линии), и на первом присоединении произошло ОЗЗ, коэффициент чувствительности значительно меньше:

$$k_{чW1}=(I_{CW1\ 2} - I_{CW1})/ I_{СЗW1} =$$
$$= (2{,}9 - 0{,}7)/2{,}1 = 1{,}05 < 1{,}25.$$

Здесь $I_{CW1\text{-}2} =3\cdot 314\cdot((0{,}047+0{,}085)+0{,}4)\cdot 10^{-6}\cdot$ $\cdot 5{,}78\cdot 10^3 \approx 2{,}9\ А$.

Требования по чувствительности защиты, как видно, не выполняются. В этом случае целесообразно ввести выдержку времени срабатывания защиты 0,5 с, и уменьшить ток срабатывания за счет коэффициента отстройки от броска емкостного тока, приняв $k_{БР}$ =1. Тогда ток срабатывания $I_{СЗW1} = 1{,}2\cdot 0{,}7 = 0{,}84\ А$. Коэффициент чувствительности при этом имеет другое приемлемое значение:

$$k_{чW1}=(I_{CW1\text{-}2} - I_{CW1})/ I_{СЗW1} =$$
$$= (2{,}9 - 0{,}7)/0{,}84 = 2{,}6 > 1{,}25.$$

Требования по чувствительности защиты выполняются и можно принять выбранные параметры срабатывания защиты.

Ток срабатывания защиты, установленной на втором присоединении (линия магистрального типа, протяженность которой может изменяться) определяется так:

$$I_{СЗW2} = k_З\, k_{БР}\, I_{CW2}.$$

Значения коэффициентов можно выбрать так же как для защиты первого присоединения: $k_З$=1,2; $k_{БР}$=2,5.

Емкостный ток второго присоединения определяется суммарной емкостью отдельных участков КЛ:

$$I_{CW2} = 3\omega(C_{W2.1} + C_{W2.2} + C_{W2.3})\ U_{ФНОМ} =$$
$$=3\cdot 314\cdot(0{,}4+0{,}1+0{,}14)\cdot 10^{-6}\cdot 5{,}78\cdot 10^{-3} \approx 3{,}5\ А.$$

Здесь $C_{W2\ 1}$=0,4 мкФ; $C_{W2.2}$=0,1 мкФ; $C_{W2.3}$=0,14 мкФ – емкости отдельных участков КЛ W2, значения которых получены путем умножения удельной емкости кабеля на длину участка линии [3].

Тогда первичный ток срабатывания защиты без выдержки времени срабатывания:

$$I_{СЗW2} =1{,}2\cdot 2{,}5\cdot 3{,}5=10{,}5\ А.$$

Коэффициент чувствительности защиты:

$$k_{чW2} = (I_{CWM} - I_{CW2}) / I_{СЗW2} =$$
$$= (27{,}4 - 3{,}5)/10{,}5 = 2{,}27 > 1{,}25.$$

Требования по чувствительности выполняются при максимальной емкости сети, когда все присоединения подключены к питающей шине. Если отключено, например, четыре присоединения W6-W9, то чувствительность защиты оказывается недостаточной:

$$k_{чW2} = (I_{CW} - I_{CW2}) / I_{СЗW2} =$$
$$= (14{,}34 - 3{,}5) / 10{,}5 \approx 1{,}03 < 1{,}25.$$

Чувствительность защиты второго присоединения можно повысить по аналогии с защитой первого присоединения за счет отстройки от броска емкостного тока путем ввода выдержки времени срабатывания. Приняв $k_{БР}$ = 1 и $t_{С32}$ =0,5 с, будем иметь:

$$I_{СЗW2} = 1{,}2\cdot 3{,}5 = 4{,}2\ А.$$

При этом требования по чувствительности выполняются при условии, что в сети имеется не менее, например, трех первых W1-W3 подключенных к питающей шине присоединений.

Сети с резистивным заземлением нейтрали

В электрических сетях с напряжением 6-35 кВ начинает применяться резистивное заземление нейтрали [5]:

• Низкоомное резистивное заземление нейтрали. Нейтраль сети соединяется с землей через небольшое сопротивление. При ОЗЗ возникает значительный ток, достаточный для работы РЗ на отключение.

• Высокоомное резистивное заземление нейтрали. Нейтраль сети соединяется с землей через большое сопротивление (соизмеримое с емкостным сопротивлением фаз относительно земли). Ток, возникающий при ОЗЗ, достаточен для определения повреждённого присоединения и работы РЗ на сигнал.

• Комбинированное заземление нейтрали. Этот вид заземления осуществляется путем присоединения высокоомного резистора параллельно дугогасящему реактору (ДГР) и позволяет снижать уровень перенапряжений при неточной настройке ДГР, а также способствовать работе на сигнал простых средств РЗ.

Способы реализации резистивного заземления связаны с особенностями устройства электрических сетей. В сетях, где нет вывода нейтральной точки, эту точку формируют искусственным путем с помощью своеобразного сумматора напряжений фаз относительно земли. Заземляющий резистор подключается к искусственной нулевой точке, образованной первичными обмотками специального трансформатора заземления нейтрали (ТЗН) со схемой соединения обмоток, например, «звезда с нулевым выводом/треугольник» или «зигзаг с нулевым выводом» (рис. 7, а).

Если имеется трехобмоточный силовой трансформатор с выведенной на крышку трансформатора нейтралью обмотки (обычно в сетях 20 кВ и 35 кВ), то заземляющий резистор присоединяют к этому выводу (рис. 7, б).

Комбинированное заземление осуществляется путем подключения заземляющего резистора параллельно ДГР к имеющимся электрическим цепям (рис. 8, а и рис. 8, б).

Определить токи при ОЗЗ в электрических сетях с резистивным заземлением нейтрали можно следующим образом.

В сети с непосредственным присоединением резистора к нейтрали трансформатора, на основе упрощенной с учетом общепринятых допущений и ограничений схемы замещения (рис. 9), комплексные токи в месте повреждения и в заземляющем резисторе, соответственно, определяются так:

$$\dot{I}_3 = g \cdot \dot{U}_3 = \frac{g(g_N + j3\omega C)}{(g + g_N) + j3\omega C}\dot{E}_C;$$

$$\dot{I}_N = g_N \cdot \dot{U}_N = \frac{g_N \cdot g}{(g + g_N) + j3\omega C}\dot{E}_C.$$

Здесь g и g_N – соответственно, проводимости места повреждения и заземляющего резистора;

$g = 1/R_П$, где $R_П$ – сопротивление в месте повреждения;

$g_N = 1/R_N$, где R_N – сопротивление заземления нейтрали;

$\dot{U}_N$ и $\dot{U}_3$ - векторы напряжений нейтрали и поврежденной фазы относительно земли, соответственно;

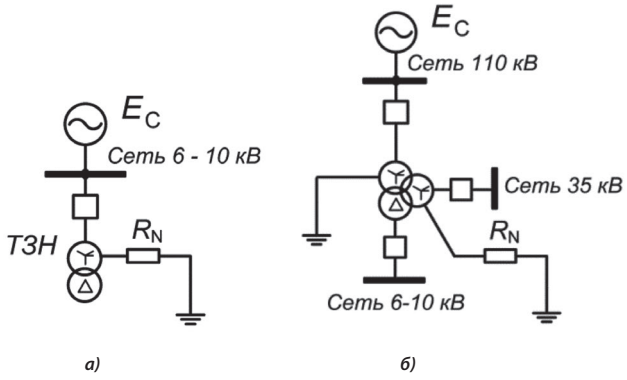


Рис. 7. Схема сети с резистивным заземлением нейтрали с искусственной нулевой точкой, создаваемой ТЗН (а), и нулевым выводом трансформатора (б)

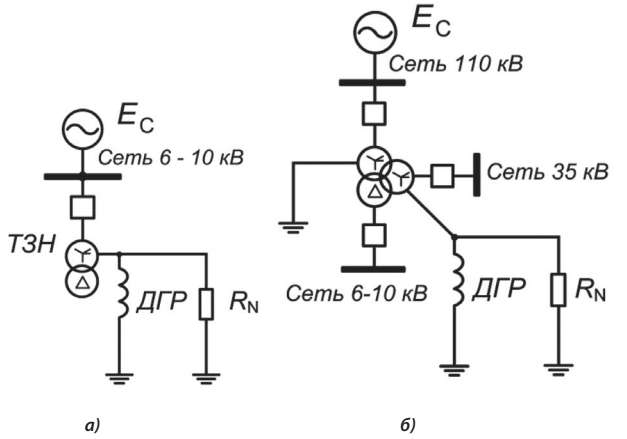


Рис. 8. Схема сети с комбинированным заземлением нейтрали с искусственной нулевой точкой, создаваемой ТЗН (а), и нулевым выводом трансформатора (б)

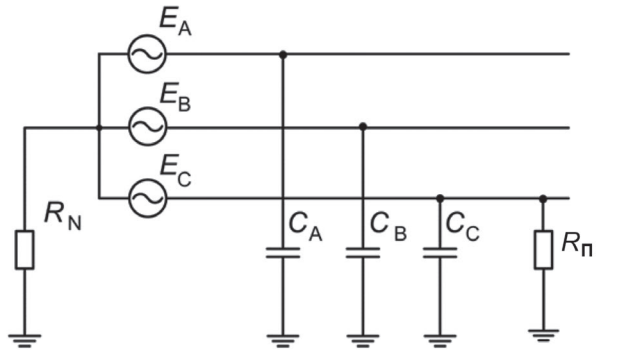


Рис. 9. Схема замещения сети с непосредственным резистивным заземлением нейтрали

$\dot{E}_C$ - вектор фазной э.д.с. поврежденной фазы С;

C – емкость фазы относительно земли.

При низкоомном заземлении нейтрали $\omega C << g_N$. Поэтому можно принять $\omega C = 0$. Тогда векторы токов в

месте повреждения и в заземляющем резисторе равны и определяются так:

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_N = \frac{g \cdot g_N}{g + g_N} \dot{E}_C .$$

Для действующих значений этих токов можно записать:

$$I_3 = I_N = \frac{g \cdot g_N}{g + g_N} E_C .$$

При стационарных металлических замыканиях $g_N << g$ и $g + g_N \approx g$. В этих условиях действующие значения токов в месте повреждения и в заземляющем резисторе можно определить так:

$$I_3 = I_N \approx E_C \, g_N = E_C / R_N .$$

Токи при ОЗЗ в сетях с резистивным заземлением искусственной нулевой точки можно определить по аналогичной методике.

В реальных условиях, как правило, $z_{0T} << R_N$ (где z_{0T} - сопротивление нулевой последовательности заземляющего трансформатора) и z_{0T} можно принять равным нулю. Тогда для тока в месте установки защиты при идеализированном стационарном металлическом ОЗЗ можно записать:

$$I_3 = I_N \approx E_C / R_N .$$

Однако, существующие распределительные электрические сети, традиционно работающие с изолированной нейтралью, не адаптированы к применению резистивного заземления нейтрали.

Во-первых, поврежденное присоединение должно отключаться от сети с минимальной задержкой по времени [2]. При этом потребители электроэнергии внезапно теряют питание, и расходуется ресурс выключателей, коммутирующих значительные токи ОЗЗ. Таким образом, теряется важнейшее преимущество сети с изолированной нейтралью – способность в течение сравнительно длительного периода времени передавать электрическую энергию потребителям при наличии ОЗЗ в сети.

Во-вторых, отсутствие специальной электрической связи с малым сопротивлением между точкой заземления резистора R_N на питающей подстанции (ПС) и возможным местом ОЗЗ приводит к появлению непредсказуемых путей растекания тока ОЗЗ. Это создает повышенный риск поражения электрическим током, риск повреждения оборудования, и в целом снижает электрическую и пожарную безопасность распределительных сетей.

В-третьих, чувствительность защит, реагирующих на ток нулевой последовательности присоединений, изменяется под воздействием случайных (не контролируемых персоналом электрических сетей) факторов, которые невозможно учесть в полной мере при выборе параметров срабатывания. Следствием этого может быть неправильное действие защит, и, в частности, низкая чувствительность и несрабатывание защит при ОЗЗ.

Селективная защита от ОЗЗ в сетях с резистивным заземлением нейтрали

Защита от ОЗЗ, способная действовать селективно, в электрических сетях с резистивным заземлением нейтрали может быть выполнена по принципу контроля тока нулевой последовательности в присоединениях, так же как и в сетях с изолированной нейтралью.

Выбор тока срабатывания защит (так же как и защит, устанавливаемых в сетях с изолированной нейтралью) производят по двум условиям:

1. Ток срабатывания должен быть больше собственного емкостного тока замыкания на землю контролируемого присоединения ($I_{СПР}$) во всех нормальных режимах работы контролируемого присоединения и при внешних повреждениях:

$$I_{СЗ} > I_{СПР} .$$

2. Ток срабатывания должен быть больше возможного броска емкостного тока замыкания на землю контролируемого присоединения ($I_{СБР}$) в переходных режимах при внешних замыканиях на землю:

$$I_{СЗ} > I_{СБР} .$$

В общем, ток срабатывания защиты определяют так:

$$I_{СЗ} = k_З \, k_{БР} \, I_{СПР} .$$

Однако, значения коэффициента отстройки от бросков емкостного тока могут находиться в диапазоне от 1 до 1,5, что позволяет приблизить токи срабатывания к значениям собственного тока присоединения $I_{СПР}$. Это обусловлено сравнительно низким уровнем броска тока при внешних ОЗЗ в сетях с резистивным заземлением нейтрали [4].

При низкоомном заземлении нейтрали активная составляющая тока в месте повреждения и в месте установки защиты на поврежденном присоединении значительно больше емкостной составляющей. Емкостной составляющей тока можно пренебречь и считать, что защита реагирует на активную составляющую контролируемого тока. Тогда коэффициент чувствительности защиты можно определить так:

$$k_{ЧWK} = I_{RW} / I_{СЗWK} .$$

Здесь $I_{RW} = E_Ф / R_N$ – активная составляющая тока в месте установки защиты на поврежденном присоединении;

$E_Ф$ – действующее значение фазной э.д.с. сети;

R_N – сопротивление заземляющего резистора;

$I_{СЗWK}$ – ток срабатывания защиты, установленной на присоединении с номером K.

Если учесть, что ток при повреждении на контролируемом присоединении в этих сетях составляет несколько десятков Ампер (определяется параметрами заземляющего резистора), то можно получить значительно более высокую чувствительность защиты от ОЗЗ, чем в сетях с изолированной нейтралью.

Однако, в реальных условиях чувствительность защит может быть значительно ниже.

Пример 2

Пусть имеется электрическая сеть 10 кВ (рис. 10), аналогичная сети рассмотренной в примере 1, но с резистивным заземлением нейтрали (R_N=100 Ом). ТЗН и резистор заземления R_N подключены к питающей шине через короткую линию W9. Основные параметры сети приведены в табл. 2. Требуется определить параметры срабатывания наиболее чувствительной защиты, установленной на первом присоединении и оценить ее чувствительность, как и в первом примере.

Таблица 2. Параметры сети с резистивным заземлением нейтрали

Параметр	Значение параметра для присоединения										
	W1	W2			W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9
		W2.1	W2.2	W2.3							
Длина линии, км	0,2	0,8	1,2	1,5	3,1	2,7	2,9	3,3	3,5	2,8	0,1
Сечение, мм²	150	120	95	70	120	120	120	95	95	95	95
Емкость линии, мкФ	0,047	0,17	0,23	0,24	0,66	0,58	0,62	0,63	0,67	0,53	0,02
Емкость обмотки машины, мкФ	0,085	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Емкостный ток, А	0,7	3,5			3,59	3,16	3,38	3,43	3,65	2,88	0,1

Ток срабатывания защиты, установленной на первом присоединении (питание электродвигателя) определяется так:

$$I_{C3W1} = k_З\, k_{БР}\, I_{CW1}.$$

При реализации защиты на основе реле типа РТЗ-51 или цифрового терминала РЗ и трансформатора тока нулевой последовательности типа ТЗЛМ можно принять: $k_З = 1{,}2;\ k_{БР} = 1{,}25$.

Емкостный ток первого присоединения, определяемый суммарной емкостью КЛ и обмотки статора электродвигателя (табл. 2): $I_{CW1} = 0{,}7\ \text{А}$.

Первичный ток срабатывания защиты:

$$I_{C3W1} = 1{,}2 \cdot 1{,}25 \cdot 0{,}7 = 1{,}05\ \text{А}.$$

Коэффициент чувствительности защиты, установленной на первом присоединении при идеальном металлическом замыкании на землю (при идеальном электрическом соединении места ОЗЗ с точкой заземления резистора на питающей ПС):

$$k_{чW1} = I_{RW}/I_{C3W1} = 57\ 8\ /1\ 05 = 55 > 1\ 25.$$

Здесь $I_{RW} = E_Ф/R_N = 5{,}78 \cdot 10^3\ /100 = 57{,}8\ \text{А}$. Требования по чувствительности выполняются. Но в реальной сети идеальная надежная электрическая связь случайной точки ОЗЗ с точкой заземления резистора RN возможна, пожалуй, только по экрану кабеля в случае непосредственного подключения экрана к контуру заземления питающей ПС.

Учитывая, что чувствительность защиты должна оцениваться применительно к самым неблагоприятным условиям срабатывания [2] необходимо определить коэффициент чувствительности защиты при замыкании на грунт, не связанный специальным проводником с контуром заземления питающей ПС (рис. 11).

Вблизи точки ОЗЗ формируется зона растекания тока (считается, что ее радиус составляет, примерно, 20 м). В этой зоне ток растекается в земле во всех направлениях по радиусам от точки замыкания фазного проводника на землю. Ток замыкания на землю растекается как бы по проводнику с переменным сечением, увеличивающимся по мере удаления от места замыкания. Наибольшая плотность тока наблюдается вблизи места замыкания (здесь наименьшее сечение проводника - земли). По мере удаления от места замыкания сечение проводника - земли возрастает, и поэтому плотность тока постепенно уменьшается до бесконечно малого значения. Следовательно, потенциалы электрического поля в зоне растекания тока изменяются от максимального значения в месте замыкания на землю до практически нулевого значения на расстоянии более 20 м от места замыкания. Такая закономерность характерна для любых вариантов замыканий на землю,

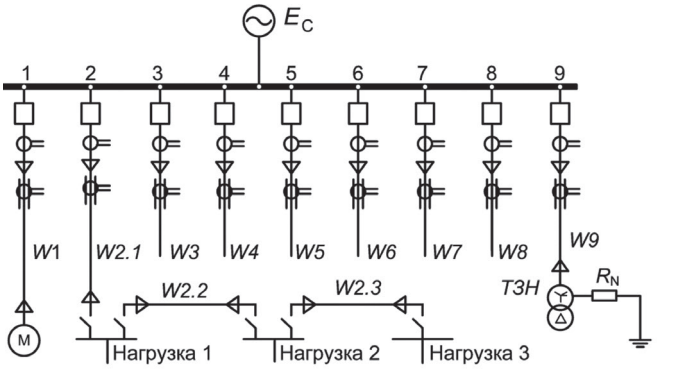


Рис. 10. Схема сети с резистивным заземлением нейтрали

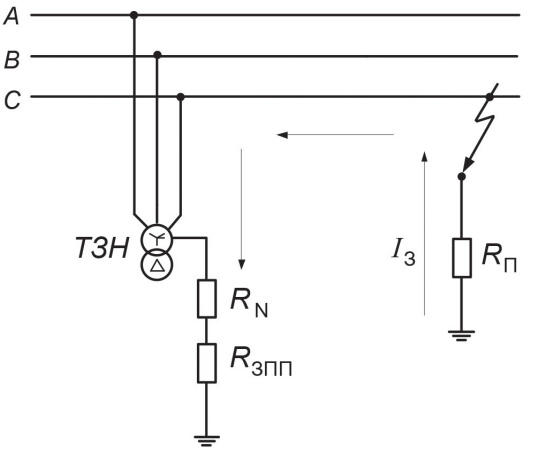


Рис. 11. Схема сети с ОЗЗ без связи контура заземления питающей ПС с точкой повреждения специальным проводником

например, на поверхности земли, в траншее, на опоре воздушной линии электропередачи (ВЛ), на поверхности, покрытой растительностью.

Эквивалентное сопротивление зоны растекания тока в месте повреждения РП зависит от вида грунта. Считают, что при замыкании на щебень, уложенный в кабельной траншее или на поверхности земли, сопротивление зоны растекания тока равно 10 кОм; на сухой грунт и асфальт - 1 кОм; на сырой грунт - 100 Ом [6].

Применительно к этим условиям коэффициент чувствительности определяют так:

$$k_{\text{ЧW1}} = I_{\text{RWMIN}}/I_{\text{СЗW1}} = 0{,}57\ /1{,}05 \approx 0{,}54 < 1{,}25\,.$$

Здесь

$$I_{\text{RWMIN}} = E_{\text{Ф}}/(R_{\text{N}} + R_{\text{ЗПП}} + R_{\text{П}}) =$$
$$= 5{,}78\cdot 10^3/(100+0{,}5+10000) \approx 0{,}57\,\text{А}\,;$$

$R_{\text{ЗПП}} = 0{,}5$ Ом – сопротивление контура заземления питающей ПС. Требования по чувствительности при ОЗЗ в общем, в наиболее неблагоприятных для защиты условиях не выполняются.

Учитывая, что нагрузкой линий класса напряжения 6-10 кВ, как правило, являются трансформаторные подстанции (ТП) с низшим напряжением 0,4 кВ необходимо рассмотреть еще один принципиально важный вариант ОЗЗ на вводе ТП (рис. 12).

Контур заземления ТП, в соответствии с ПУЭ, является общим для цепей высокого и низкого напряжения. Поэтому при ОЗЗ на вводе ТП путь тока ОЗЗ проходит через контур заземления ТП. С этим же контуром заземления соединена нейтральная точка обмотки 0,4 кВ трансформатора ТП, и, следовательно, нулевой провод сети 0,4 кВ. В этих условиях при ОЗЗ в сети 6-10 кВ ток ОЗЗ создает падение напряжения на сопротивлении контура заземления ТП $R_{\text{ЗТП}}$. Таким образом, на нулевом проводе (N) сети 0,4 кВ потребителей возможно появление недопустимо высокого напряжения относительно земли [7]. При токе ОЗЗ (I_{RW}) более 100 А

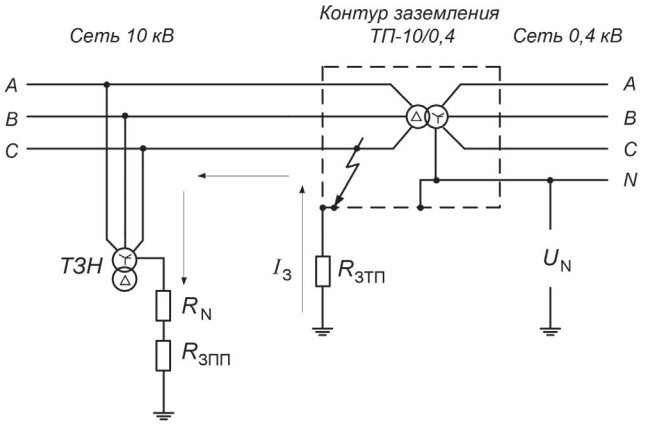


Рис. 12. Схема сети с резистивным заземлением нейтрали и ОЗЗ на вводе ТП 10/0,4 кВ

это напряжение может превысить допустимое по ГОСТ 450–500 В:

$$U_{\text{N}} = I_{\text{RW}} \cdot R_{\text{ЗТП}} = 125 \cdot 4 = 500\ \text{В}\,.$$

Здесь $R_{\text{ЗТП}}$ – сопротивление контура заземления ТП.

Необходимо отметить, что в современных условиях глобального использования электрической энергии во всех сферах жизни и деятельности людей обеспечение электрической безопасности сетей является важной и актуальной задачей. При использовании резистивного заземления нейтрали это необходимо учитывать и принимать меры по повышению электрической безопасности сетей. В частности, стандартом предусматривается раздельное заземление цепей высокого и низкого напряжения ТП с соответствующими классу напряжения параметрами контуров заземления. Это позволит реализовать так называемый способ распределенного заземления нейтрали сети [6] и, тем самым, повысить электрическую безопасность сетей с резистивным заземлением нейтрали и чувствительность защит в этих сетях.

Выводы

1. В сетях с изолированной нейтралью с небольшими токами ОЗЗ не более 30 А можно получить приемлемую селективность и чувствительность защит, действующих по принципу контроля тока нулевой последовательности. Для повышения чувствительности при необходимости можно отстроить защиту от бросков емкостного тока в переходных режимах за счет выдержки времени срабатывания 0,5-2 с.

2. В сетях с резистивным заземлением нейтрали можно получить достаточно высокую чувствительность защит от ОЗЗ только при условии хорошей электрической связи между заземляющим устройством питающей ПС, где установлен резистор, с точкой возможного ОЗЗ.

3. В сетях с резистивным заземлением нейтрали, где нет специально выполненной электрической связи заземляющего устройства питающей ПС и области возможных точек ОЗЗ вдоль трасс КЛ и ВЛ приемлемая чувствительность защит от ОЗЗ не обеспечивается.

Литература:

1. Сирота И.М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. – Киев: Наукова Думка, 1983. – 268 с.
2. Правила устройства электроустановок / М-во энергетики РФ. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 640 с.
3. Булычев А.В., Наволочный А.А. Релейная защита в распределительных электрических сетях: Пособие для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2011. - 208 с.
4. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – СПб.: ПЭИПК, 2008. - 350 с.
5. Евдокунин Г.А., Титенков С.С. Внутренние перенапряжения в сетях 6-35 кВ. – СПб.: Издательство Терция, 2004. – 188 с.
6. Фадеева Г.А. Проектирование распределительных электрических сетей/ Г.А.Фадеева, В.Г.Федин; под общ. Ред. В.Г.Федина. - Минск: Выш. Шк., 2009.- 365 с.
7. ГОСТ Р 50571.18-2000 (МЭК 60364-4-442-93). Защита электроустановок до 1 кВ от перенапряжений, вызванных замыканиями на землю в электроустановках выше 1 кВ.