

УДК 621.315

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСТАВОК ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ С НИЗКООМНЫМ РЕЗИСТИВНЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ

к.т.н. Ширковец А.И.<sup>1</sup>, Зубов В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, ООО «Болид»,  
г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> ООО «Болид», г. Новосибирск, Россия

**Аннотация.** В данной статье представлена адаптированная под сети с низкоомным резистивным заземлением нейтрали методика расчета уставок ненаправленной токовой защиты от замыканий на землю. Показано, что такая методика расчета уставок позволяет устранить случаи неселективного срабатывания защит, а также описаны положительные эффекты такой методики, включающие в себя унификацию уставок срабатывания защит и удобство в наладке РЗА.

**Ключевые слова:** электрическая сеть, класс напряжения 6-35 кВ, режим заземления нейтрали, однофазное замыкание на землю, низкоомный резистор, резистивное заземление, защита от ОЗЗ, ненаправленная токовая защита нулевой последовательности.

### Введение

В сетях 6-35 кВ наиболее частым повреждением является однофазное замыкание на землю (ОЗЗ). Обязательным условием нормальной работы таких сетей является наличие защит от ОЗЗ, работающих как на сигнал, так и, в отдельных случаях, на отключение. Виды защит от ОЗЗ и их применимость напрямую связана с режимом заземления нейтрали (табл. 1).

*Таблица 1*

**Виды защит от ОЗЗ в сетях с различным заземлением нейтрали**

	Изолированная нейтраль	Заземление нейтрали через ДГР	Восокоомное заземление нейтрали	Комбинирован- ное заземление нейтрали	Низкоомное заземление нейтрали
1. Ненаправленная токовая защита	±	-	±	±	+
2. Направленная то- ковая защита, защи- та по актив. состав- ляющей	±	-	+	-	+

Окончание табл. 1

	Изолированная нейтраль	Заземление нейтрали через ДГР	Восокоомное заземление нейтрали	Комбинирован- ное заземление нейтрали	Низкоомное заземление нейтрали
3. ЦЗОЗЗ по высшему гармоническому составу тока	±	±	±	±	±
4. ЦЗОЗЗ по анализу составляющих переходного процесса	+	+	+	+	+
5. ЦЗОЗЗ по инжектируемому току не промышленной частоты	+	+	+	+	+
6. ЦЗОЗЗ по относительному сопоставлению уровней тока	±	-	+	-	+

В табл. 1 защиты, обозначенные как ЦЗОЗЗ – это централизованные защиты от однофазных замыканий на землю (системы ОПФ). Такие защиты в настоящее время находят широкое применение в сетях, где трудно реализовать простые токовые защиты, а также в сетях, где требуется организация нескольких видов защит от ОЗЗ, работающих на разных принципах. С первого взгляда может показаться, что такой широкий набор функций РЗА дает свободу действий в выборе принципа защиты от ОЗЗ, на котором будет построена релейная защита, но, с другой стороны, появляются трудности при выборе защиты для проектируемой сети. Для производителей РЗА данная ситуация осложняется тем, что при реализации терминалов защит требуется достичь некой универсальности, то есть обеспечить работоспособность ЗОЗЗ при разных режимах нейтрали, разных токах замыкания на землю, разных трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТП). «Прошить» новые функции в микропроцессорных УРЗА несложно, но возникают вопросы конкуренции, защиты интеллектуальной собственности, проверки на надежность алгоритмов. Для этого требуются хорошие расчетные модели.

Самой простой защитой от ОЗЗ, которую можно реализовать, используя простейшие токовые реле, является ненаправленная токовая защита нулевой последовательности. Для того, чтобы такая защита работала селективно, а также срабатывала при замыканиях на поврежденном присоединении, требуется достаточная величина тока замыкания на землю. В разветвленных сетях с большим количеством присоединений с режимом изолированной нейтрали можно добиться достаточной чувствительности такой

защиты, при условии, что в такой сети нет «аномально» длинного присоединения, при замыкании на котором емкостного тока остальной сети попросту не хватит, чтобы защита почувствовала это повреждение. В сетях с компенсацией емкостного тока применимость такого вида защиты нецелесообразна ввиду практически полной компенсации тока замыкания на землю, что приводит к минимальному значению тока в месте повреждения. Отличным вариантом для применения ненаправленной токовой защиты от ОЗЗ являются сети с низкоомным резистивным заземлением нейтрали. Главным эффектом от применения такого режима заземления нейтрали является быстрое и селективное отключение поврежденного присоединения. При замыкании на землю ток от резистора, величина которого превышает величину емкостного тока в несколько раз, протекает только по поврежденному присоединению, что является индикатором поврежденного присоединения. Таким образом, ориентируясь исключительно на величину активного тока от низкоомного резистора можно преобразовать устоявшуюся методику расчета уставок токовой ненаправленной защиты.

### **Классическая методика расчета уставок токовой ненаправленной защиты от ОЗЗ**

Согласно классической методике (М.А. Шабад, В.А. Андреев, СТО 56947007-29.120.70.305-2020 [2]) уставки токовой ненаправленной защиты определяются следующим образом:

1) *Несрабатывание защиты при внешнем ОЗЗ:*

Ток срабатывания защиты от ОЗЗ кабельной линии отстраивается от собственного емкостного тока линии при замыканиях на землю на других присоединениях (отстройка от внешнего ОЗЗ);

Ток срабатывания защиты для каждого отходящего присоединения определяется по выражению:

$$I_{CЗ} \geq K_H \cdot K_{бр} \cdot I_{C.отх}, \quad (1)$$

где  $K_H$  – коэффициент надежности;

$K_{бр}$  – коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока в момент возникновения ОЗЗ, а также способность реле реагировать на него. При использовании для защиты от ОЗЗ современных микропроцессорных терминалов защит можно принимать значения  $K_{бр} = 1,5$ ;

$I_{C.отх}$  – собственный емкостный ток отходящего присоединения.

Стоит отметить, что выражение (1) применимо только для присоединений с кабельными трансформаторами тока нулевой последовательности. Ток небаланса, возникающий в ТТНП, составляет доли ампер и им, как правило, пренебрегают.

При использовании трехтрансформаторных фильтров нулевой последовательности на базе фазных трансформаторов тока, ток небаланса влияет на расчет уставок, поэтому выражение (1) принимает вид:

$$I_{C3} \geq K_H \cdot (K_{6p} \cdot I_{C.отх} + I_{НБ}), \quad (2)$$

где  $I_{НБ}$  – ток небаланса, возникающий в трехтрансформаторном фильтре токов нулевой последовательности.

2) *Срабатывание (чувствительность) защиты при ОЗЗ на защищаемом присоединении:*

$$K_{ч} = \frac{I_{ЗАЩ}}{I_{C3}}, \quad (3)$$

где  $I_{ЗАЩ} = \sqrt{(I_{C\Sigma} - I_{C.отх})^2 + I_R^2}$  – полный ток ОЗЗ в сети промышленной частоты, протекающий через трансформатор тока нулевой последовательности защищаемого присоединения;

$I_{C\Sigma}$  – суммарный емкостный ток секции сети;

$I_{C.отх}$  – собственный емкостный ток защищаемого фидера;

$I_R$  – ток резистора.

В качестве  $I_R$  следует принимать значение тока резистора, ограниченный сопротивлением нейтралеобразующего трансформатора.

Коэффициент чувствительности, согласно п. 23 приказа Министерства энергетики РФ от 10 июля 2020 г. № 546, должен превышать значение 1,5.

Расчет тока замыкания на землю производится в условиях нормальной работы сети, но во время эксплуатации конфигурация сети может существенно изменяться из-за аварийных отключений и оперативных переключений в прилегающей сети. В связи с этим ток замыкания на землю отдельной секции шин может превышать расчетные значения (из-за переключений в прилегающей сети), что может привести к неселективному срабатыванию защиты присоединения, питающей эту прилегающую сеть, при внешнем ОЗЗ. Этот факт предполагает «загрубление» уставок, чтобы избежать неселективного срабатывания защит.

В сетях с низкоомным резистором ток замыкания преимущественно состоит из активной составляющей, поэтому формулу для расчета коэффициента чувствительности можно упростить, как показано ниже:

$$K_{ч} = \frac{I_R}{I_{C3}}. \quad (4)$$

Данный метод расчета уставок предполагает «минимальные» значения токов срабатывания, что обеспечивает «максимальный» коэффициент чувствительности. Такие

значения токов срабатывания не всегда могут обеспечить селективность защит, что приводит к ложной работе релейной защиты от ОЗЗ, поэтому данный метод расчета уставок следует принять устаревшим и требующим корректировок.

### **Адаптированная методика расчета уставок токовой ненаправленной защиты от ОЗЗ для сетей с низкоомным заземлением нейтрали**

Как сказано ранее, в сетях с низкоомным резистором расчет тока срабатывания защит следует проводить основываясь на величину тока резистора. Адаптированная методика расчета уставок токовой ненаправленной защиты от ОЗЗ для сети с низкоомным резистором приведена ниже.

Суть методики заключается в том, чтобы получить диапазон токов срабатывания защиты, при которой будет обеспечен требуемый коэффициент чувствительности 1,5.

Расчет нижней границы диапазона уставок, где будет обеспечен требуемые коэффициент чувствительности проводится исходя из условия (1). При расчете уставки по условию отстройки от собственного емкостного тока присоединения можно получить, как сказано выше, «минимальные» значения токов срабатывания при «максимальных» значениях коэффициента чувствительности.

Ориентируясь на величину тока резистора, а также опираясь на условие, что ток замыкания на землю в сети с низкоомным резистором состоит в основном из активной составляющей, можно рассчитать верхнюю границу диапазона токов срабатывания, при которой будет обеспечен «минимальный» коэффициент чувствительности, равный 1,5.

$$I_{CЗ} = \frac{I_R}{K_{\text{ч}}}. \quad (5)$$

Исходя из условия (1) и (5) можно рассчитать диапазон значений токов срабатывания ненаправленной токовой защиты от ОЗЗ, внутри которого будет обеспечен требуемый коэффициент чувствительности. Предлагается выбирать такие значения токов срабатывания защиты, при которых  $K_{\text{ч}} \geq 2 \dots 3$ , чтобы обеспечить селективность действия защит и избежать ложных срабатываний. Такой подход к расчету токов срабатывания защиты позволяет добиться унификации уставок защит, а также облегчить наладку РЗА от ОЗЗ.

### **Пример расчета ненаправленной токовой защиты от ОЗЗ в сетях с низкоомным заземлением нейтрали**

В качестве примера для расчета ненаправленной токовой защиты будем использовать двухсекционную ПС «А» 110/10 кВ. На этой подстанции на каждой секции шин установлен низкоомный резистор номиналом 30 Ом с активным током 192,45 А. Резисторы присоединены к сети через нейтралеобразующие трансформаторы, которые

ограничивают ток резистора до 184,2 А. В табл. 2 приведены расчеты полного тока ОЗЗ в сети 10 кВ ПС «А».

Таблица 2

Расчет полного тока ОЗЗ в сети 10 кВ ПС «А»

Секция шин	Емкостный ток секции $I_{CЭ}$ , А	Ток резистора $I_R$ , А	Суммарный ток замыкания на землю $I_{ЗАЩ}$ , А
1СШ	60,3	184,2	193,82
2СШ	42,98	184,2	189,15

Верхняя граница тока срабатывания будет рассчитываться по условию (5). Очевидно, что при едином токе резистора, верхняя граница тока срабатывания для всех присоединений будет одинаковой.

$$I_{CЗ} = \frac{I_R}{Kч} = \frac{184,2}{1,5} = 122,8 \text{ А}.$$

Ниже в табл. 3 приведен расчет ненаправленной токовой защиты для присоединений 10 кВ ПС «А». В столбце 3 ( $I_{CЗ}$ ) приведен расчет тока срабатывания по условию (1), что является «минимальным» значением тока срабатывания для отходящих присоединений; в столбце 4 ( $Kч$ ) приведен расчет коэффициента чувствительности по условию (4) для тока срабатывания из столбца 3. Далее представлен рекомендуемый ток срабатывания защит для присоединений, равный 80 А. При таком токе коэффициент чувствительности составляет 2,3.

Таблица 3

Уставки по току для присоединений 10 кВ ПС «А»

Ячейка	$I_C$ , А	$I_{CЗ}$ , А	$Kч$	$I_{CЗ.РЕК}$ , А	$I_R$ , А	$Kч.рек$	$t_{CЗ}$ , с
1СШ							
яч. 1	12,57	22,63	8,14	80	184,2	2,3	0,8
яч. 3	22,54	40,57	4,54	80	184,2	2,3	0,8
яч. 5	1,81	3,26	56,5	80	184,2	2,3	0,8
яч. 7	4,43	7,97	23,1	80	184,2	2,3	0,8
яч. 9	14,54	26,17	7,04	80	184,2	2,3	0,8
яч. 11	4,41	7,94	23,2	80	184,2	2,3	0,8

Ячейка	$I_C, A$	$I_{C3}, A$	Кч	$I_{C3.РЕК}, A$	$I_R, A$	Кч.рек	tcз, с
2СШ							
яч. 2	1,81	3,26	56,5	80	184,2	2,3	0,5
яч. 4	6,70	12,06	15,27	80	184,2	2,3	0,8
яч. 6	6,77	12,19	15,1	80	184,2	2,3	0,8
яч. 8	11,05	19,89	9,26	80	184,2	2,3	0,8
яч. 10	12,94	23,29	7,91	80	184,2	2,3	0,8
яч. 12	3,71	6,68	27,6	80	184,2	2,3	0,5

Для прилегающей сети тоже стоит унифицировать токи срабатывания защит. При таком подходе ток срабатывания на прилегающих РП требуется брать меньше, чем на отходящих присоединениях питающей ПС. Если на ПС «А» принята уставка 80 А, то на прилегающих РП стоит принять уставку по току равную 60 А. Селективность работы релейной защиты также обеспечивается выбором временных уставок. Если на ПС уставка по времени принимается равной 0,8 с, то на РП принимается уставка по времени равная 0,5 с.

Таким образом, уставки защит от замыканий на землю отстроены от собственного емкостного тока, а также «загрублены» с учетом активного тока резистора с целью устранения ложных срабатываний защит, при этом соблюдая условия чувствительности ( $Kч = 2,3$ ). Данный метод расчета ненаправленной токовой защиты от ОЗЗ позволяет избавиться от неселективных срабатываний защит (ток от резистора протекает только по поврежденному присоединению), а унификация уставок позволяет облегчить наладку РЗА от ОЗЗ.

### Выводы

1. В качестве простейшей защиты от замыканий на землю можно использовать ненаправленную токовую защиту нулевой последовательности. Сети, в которых предпочтительнее было бы использовать ненаправленную токовую защиту – это сети с низкоомным заземлением нейтрали. Ток от резистора кратно больше емкостного тока сети, что благоприятно сказывается на чувствительности защит от ОЗЗ.

2. При сохранении устоявшейся методики расчета уставок ненаправленной токовой защиты от ОЗЗ возможны неселективные срабатывания защиты присоединения при внешнем замыкании, когда объединяются секции шин прилегающих РП. В таком случае требуется «загрубление» уставок, что позволяет выполнять при низкоомном резистивном заземлении нейтрали.

3. Адаптированная методика расчета уставок ненаправленной токовой защиты при низкоомном резистивном заземлении нейтрали предполагает «загрубление» уставок, что позволяет исключить неселективное срабатывание защит. Также, расчет уставок на основе тока резистора позволяет унифицировать уставки всех присоединений питающей ПС и прилегающих РП, что облегчает наладку РЗА.

### **Литература**

1. Приказа Министерства энергетики РФ от 10 июля 2020 г. № 546.
2. СТО 56947007-29.120.70.305-2020. Методические указания для выбора параметров настройки и срабатывания МП устройств РЗА оборудования 6 - 35 кВ объектов ЕНЭС. Дата введения: 15.05.2020.