УДК 621.311

Методика выбора параметров срабатывания максимальных токовых защит от замыканий на землю на основе высших гармоник в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ

Т.Ю. Винокурова, Е.С. Шагурина, В.А. Шуин ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Российская Федерация E-mail: shuin@rza.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ систем промышленного и городского электроснабжения, работающих с резонансным заземлением нейтрали через дугогасящий реактор, для защиты и селективной сигнализации однофазных замыканий на землю наиболее широкое применение получили максимальные токовые защиты, основанные на использовании высших гармоник токов нулевой последовательности. Многолетний опыт эксплуатации показал, что устройства защиты данного типа обладают низкой селективностью при внешних замыканиях на землю и не всегда достаточной чувствительностью при повреждениях на защищаемой линии. Одной из основных причин низкой эффективности функционирования максимальных токовых защит на основе высших гармоник являются нестабильность спектра гармоник в токе замыкания на землю компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ и обусловленное ей несовершенство методики выбора параметров срабатывания и оценки чувствительности защиты. В связи с этим актуальной задачей является разработка такой методики.

Материалы и методы: Обоснование методики выбора параметров срабатывания максимальных токовых защит, основанных на использовании высших гармоник, произведено на основе оценок предельных максимального и минимального уровней гармоник в токе замыкания на землю компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ. Данные оценки получены аналитическим путем и с использованием моделирования на ЭВМ в программе Simulink, а также расчетных и экспериментальных данных, опубликованных в различных источниках.

Результаты: Разработана методика выбора параметров срабатывания и оценки чувствительности максимальных токовых защит, реагирующих на общий уровень высших гармоник в токе нулевой последовательности защищаемого присоединения, на основе оценок предельных максимального и минимального уровней гармоник в токе замыкания на землю компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ. Уточнены требования к чувствительности устройств защиты данного типа по первичному току высших гармоник. Даны оценка и рекомендации по области применения устройств защит, основанных на данном принципе, на различных объектах компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

Выводы: Предложенная методика позволяет повысить селективность при внешних замыканиях на землю и более точно оценить чувствительность при внутренних повреждениях. Показано, что область применения максимальных токовых защит на основе высших гармоник ограничена присоединениями, собственный емкостный ток которых не превышает 5 % от суммарного емкостного тока сети. На объектах кабельных сетей 6–10 кВ, для присоединений которых данное условие не выполняется, должны применяться направленные защиты, основанные на контроле фазных соотношений высших гармоник тока и напряжения нулевой последовательности.

Ключевые слова: компенсированные кабельные сети 6–10 кВ, однофазные замыкания на землю, высшие гармоники, защита от однофазных замыканий на землю, методика выбора параметров срабатывания.

A technique of choosing tripping values of overcurrent protection against earth faults based on higher harmonics in 6–10 kV resonant neutral grounding cable networks

T.Yu. Vinokurova, E.S. Shagurina, V.A. Shuin Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation E-mail: shuin@rza.ispu.ru

Abstract

Background: Overcurrent protection based on the use of higher harmonics in zero sequence currents is widely used for selective protection and signalling of single phase earth faults in 6–10 kV distribution cable networks of industrial and urban electricity systems, working with resonant neutral grounding through an arc-suppressing coil. Many years of operating experience have shown that protection devices of this type have low selectivity to external earth faults and are not always sensitive enough to the faults in the line they protect. One of the main reasons for the low operation efficiency of overcurrent protection based on higher harmonics is the instability of the harmonic spectrum of the earth fault current in 6–10 kV cable networks with resonant neutral grounding and, as a consequence, the defficiency of the techniques of choosing tripping values and evaluation of protection sensitivity. All these factors make it quite urgent to develop such a technique.

Materials and methods: Substantiation of the technique of tripping values selection of higher harmonics overcurrent protection was based on the estimation of the limiting maximum and minimum harmonics levels in the earth fault cur-

rent in 6–10 kV cable networks with resonant neutral grounding. The data was obtained analytically and through computer simulation in Simulink as well as by using calculated and experimental data published in various sources. **Results:** We have developed a technique of choosing the tripping values and evaluating the protection sensitivity of overcurrent protection reacting to the overall level of higher harmonics in zero sequence current of the protected connection, based on the estimation of the limiting minimum and maximum harmonics levels in the earth fault current in 6–10 kV cable networks with resonant neutral grounding. We have also specified the sensitivity requirements for the protection devices of this type by the primary harmonics current and evaluated such devices and made recommendations on their application at various objects of 6–10 kV cable networks with resonant neutral grounding.

Conclusions: The proposed method makes it possible to increase the selectivity to external earth faults and more accurately assess the sensitivity to internal faults. It is shown that the overcurrent protection based on higher harmonics can only be applied to connections, in which their own capacitive current does not exceed 5 % of the total capacitive network current. 6–10 kV cable networks, in which this requirement is not fulfilled, should be equipped with directional protection based on the control of phase relationships of higher harmonics and zero sequence current and voltage.

Key words: 6–10 kV cable networks with resonant neutral grounding, single-phase earth faults, higher harmonics, protection against single-phase earth faults, techniques of tripping values selection.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.3.020-028

Введение. Резонансное заземление нейтрали распределительных кабельных сетей напряжением 6–10 кВ через дугогасящий реактор (компенсация емкостных токов) является наиболее эффективным способом исключения возможности возникновения опасных для сети дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) и ограничения сопровождающих их перенапряжений [1–9]. Основной проблемой, снижающей эффективность компенсации емкостных токов ОЗЗ, является недостаточное техническое совершенство (селективность и устойчивость функционирования [10]) применяемых в указанных сетях устройств защиты от ОЗЗ.

В компенсированных кабельных сетях напряжением 6-10 кВ систем промышленного и городского электроснабжения для защиты и селективной сигнализации ОЗЗ основное применение получили устройства, основанные на способе абсолютного замера уровня высших гармоник (ВГ) в токе нулевой последовательности защищаемого присоединения (например, устройства защиты типа УСЗ-2/2 [11-13], а также его цифровые аналоги в микропроцессорных терминалах релейной защиты и автоматики ряда фирм-изготовителей). Анализ многолетнего опыта эксплуатации существующих исполнений максимальных токовых защит абсолютного замера ВГ (МТЗВГ), выполненный ОРГРЭС, выявил их низкую селективность при внешних ОЗЗ и не всегда достаточную чувствительность при внутренних повреждениях [14].

В МТЗВГ, как правило, используются гармоники порядка v = 5, 7, 11 и 13 (f = 250 – 650 Гц), что определяется составом основных источников ВГ в кабельных сетях 6–10 кВ и спектром генерируемых ими гармоник (силовые трансформаторы, нелинейные преобразователи, электротермические установки и др. [15]). Одной из основных причин низкой эффективности функционирования МТЗВГ является нестабильность спектра гармоник в указанном диапазоне частот в токе ОЗЗ и обусловленные ей проблемы обоснованного выбора уставок по току срабатывания и оценки чувствительности устройств защиты данного типа.

Методика выбора уставок МТЗВГ по току срабатывания. Уставка по первичному току срабатывания МТЗВГ должна выбираться из условия обеспечения несрабатываний при внешних ОЗЗ в режиме работы сети, соответствующем максимальному уровню ВГ в токе 3/₀ защищаемого присоединения. Так как распределение ВГ в токах 3/₀ присоединений, подключенных к шинам защищаемого объекта, в диапазоне частот до 650 Гц определяется только емкостными сопротивлениями фаз на землю [16], то расчетное выражение для выбора уставки МТЗВГ по току срабатывания можно представить в следующей форме:

$$I_{c.3.i} \ge K_{\text{otc}} \Im I_{0i \text{ BF make}} = K_{\text{otc}} \alpha_{\text{make}} I_{Ci}, \qquad (1)$$

где *К*отс – коэффициент отстройки; 3*I*₀ _{I БГ макс} – максимальный уровень ВГ в токе 3*I*₀ *i*-го присоединения; $\alpha_{\text{макс}}$ – максимальный общий уровень ВГ рабочего диапазона частот МТЗВГ (v = 5, 7, 11 и 13) в токе ОЗЗ при устойчивых повреждениях в контролируемой сети; *I*_{C i} – собственный емкостный ток *i*-го присоединения, определяемый по выражению

$$I_{C i} = 3\omega C_{0i} U_{\text{tb.HOM}}, \qquad (2)$$

где C_{0i} – емкость фазы защищаемого присоединения на землю; $\omega = 2\pi \cdot 50$; $U_{\phi.HOM}$ – номинальное фазное напряжение сети.

Коэффициент отстройки К_{отс} в (1), учитывающий влияние погрешностей функционирования (погрешностей расчета уровня ВГ, кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП), измерительного органа тока защиты и др.) на устойчивость несрабатываний при внешних ОЗЗ, для токовых защит на основе ВГ рекомендуется принимать равным не менее 1,5 [16].

Вычисленное по (1) значение *I*_{с.з.*i*} должно удовлетворять также условию

$$I_{c.3.i} \ge I_{c.3. MHH},$$
 (3)

© ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

где *I*_{с.з.мин} – минимальный ток срабатывания МТЗВГ, определяемый техническими характеристиками устройства защиты и кабельного ТТНП, к которому подключается по цепям тока *31*₀ устройство защиты.

Условие (3) может быть расчетным для выбора уставки по первичному току срабатывания на кабельных линиях небольшой длины, что характерно, например, для таких объектов, как трансформаторные подстанции (ТП) 6–10/0,4 кВ систем промышленного электроснабжения.

Основную проблему при выборе уставок по току срабатывания по (1) представляет оценка максимально возможного уровня ВГ в токе ОЗЗ контролируемой сети амакс. В условиях отсутствия достоверных данных по значениям $\alpha_{\text{макс}}$ для контролируемой сети в применяемой в настоящее время методике уставку по току срабатывания для устройств защиты типа УСЗ-2/2 и его аналогов предлагается приближенно выбирать по значениям суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$ и относительному значению собственного емкостного тока защищаемого присоединения $I_{Ci^*} = I_{Ci}/I_{C\Sigma}$ [17]. В табл. 1 приведены значения первичного тока срабатывания устройства УСЗ-2/2 в диапазоне частот 250-650 Гц при подключении его к ТТНП типа ТЗ, ТЗЛ, ТЗЛМ, имеющих близкие технические характеристики, для присоединений с Ісі* = 0,1 для различных значений І_{СΣ}, приведенных в [18].

При $I_{Ccofc^*} > 0,1$ уставка по $I_{C\Sigma}$ пропорционально увеличивается, при $I_{Ccofc^*} < 0,1 - уменьшается.$

В табл. 1 приведены также значения $\alpha_{v \text{ макс}}$ для 5, 7, 11 и 13-й гармоник, рассчитанные при рекомендуемых уставках по выражению

$$\alpha_{v \text{ MAKC}} = I_{v \text{ C.3}} / K_{\text{otc}} I_{C i} = I_{v \text{ C.3}} / K_{\text{otc}} 0, 1 I_{C\Sigma i}$$
(4)

при *К*_{отс} =1,5.

Согласно данным табл. 1, фактически принимаемые значения $\alpha_{\text{макс}}$ в зависимости от частоты и значения $I_{C\Sigma}$ находятся в пределах 0,07–0,25, при этом с увеличением $I_{C\Sigma}$ значения $\alpha_{\text{макс}}$ без каких-либо обоснований уменьшаются.

Предельные максимальные уровни ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ. Для высших гармонических составляющих в диапазоне частот до 650 Гц, содержащихся в спектре токов З*i*₀ неповрежденного *i*-го присоединения при внешних устойчивых ОЗЗ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, справедливо следующее соотношение [16]:

$$3i_{0 B\Gamma i} = 3C_{0i} \frac{d}{dt} u_{0 B\Gamma}.$$
 (5)

Так как напряжение U_0 при ОЗЗ равно напряжению поврежденной фазы в режиме, предшествующем ОЗЗ, взятому с обратным знаком, то спектр I_0 полностью определяется спектром последнего. Поэтому предельный максимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ α _{пред. макс} можно оценить по предельно допустимым ГОСТ 13109-97 для сетей 6–10 кВ значениям коэффициента несинусоидальности напряжения $K_{\rm Hc \ пред}$ = 0,08 (в нормальном режиме $K_{\rm Hc \ макс} \leq 0,05$) и предельно допустимым коэффициентам $K_{\rm Uv \ пред}$ содержания в напряжениях сети отдельных гармонических составляющих v = 5, 7, 11, 13 (табл. 2).

Таблица 1. Значения первичного тока срабатывания устройства защиты типа УСЗ-2/2 при различных частотах и значениях /_{СΣ} по методике [18]

	Первичный ток срабатывания УСЗ-2/2 $I_{ m v.c.3}$ и соответствующий ему относительный уровень ВГ $lpha_{ m v,vcr.makc}$							
$I_{yct} = I_{C\Sigma},$ A	при частоте f, Гц							
	250		350		550		650	
	<i>I</i> _{5 с.3} , А	$\alpha_{5 \text{ Makc}} =$ = $I_{c.3.5}/K_{orc} 0, 1I_{C\Sigma}$	<i>I</i> _{7 с.з} , А	α _{7 макс} = = <i>I</i> _{c.3.7} / <i>K</i> _{отс} 0,1 <i>I</i> _{CΣ}	<i>I</i> _{11 с.3} , А	$\alpha_{11 \text{ Marc}} = I_{c.3.11} / K_{otc} 0, 1 I_{C\Sigma}$	<i>I</i> _{13 с.3} , А	$\alpha_{13 \text{ Marc}} = I_{c.3.13} / K_{orc} 0, 1 I_{C\Sigma}$
25	0,95	0,25	0,61	0,16	0,48	0,13	0,57	0,15
50	1,4	0,19	0,85	0,11	0,73	0,10	0,98	0,13
100	2,5	0,17	1,35	0,09	1,47	0,10	2,05	0,14
250	4,85	0,13	2,44	0,07	3,40	0,09	4,95	0,13

Таблица 2. Значения нормально и предельно допустимых по ГОСТ 13109-97 коэффициентов несинусоидальности напряжения для гармоник рабочего диапазона частот МТЗВГ

ν	5	7	11	13
<i>К</i> _{Uv норм*} , о.е	0,04	0,03	0,02	0,02
$K_{U_{V} \text{ nped}^{*}} =$ = 1,5* $K_{U_{V} \text{ HODM}^{*}}$, 0.e	0,06	0,045	0,03	0,03

С учетом (5) предельный максимальный уровень отдельных гармонических составляющих в токе ОЗЗ определяется из соотношения

$$\alpha_{\nu \text{ пред. макс}} = K_{I\nu \text{ пред}} = \frac{I_{\nu}}{I_{Ci}} = \nu K_{U\nu \text{ пред}}.$$
 (6)

В табл. 3 приведены предельные максимальные значения $\alpha_{v \text{ пред. макс}}$ для установивше-

гося режима ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, рассчитанные по выражению (6) для гармоник v = 5, 7, 11 и 13.

Таблица 3. Предельные максимальные значения уровня гармонических составляющих в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ

ν	5	7	11	13
$\alpha_{v \text{ пред. макс}^*}$, 0.е	0,3	0,315	0,33	0,39

Сравнительный анализ данных табл. 2 и табл. 3 показывает, что значения $\alpha_{v, \text{макс}}$, фактически используемые при расчете уставок по току срабатывания по существующей методике, как правило, значительно (в разы) меньше предельно возможных относительных значе-

© ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

ний уровней соответствующих гармонических составляющих в токе O33 компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ $\alpha_{v \text{ пред. макс}}$, что, возможно, и является основной причиной частых излишних срабатываний (неселективности) применяемых в настоящее время исполнений МТЗВГ (например, УСЗ-2/2 [14]).

Как правило, в качестве воздействующей величины в измерительных органах тока МТЗВГ используется среднеквадратичное значение всех гармоник рабочего диапазона:

$$I_{\Sigma B \Gamma} \approx \sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2} \,. \tag{7}$$

С учетом (5) и (7) может быть определено предельное относительное значение уровня суммы ВГ рабочего диапазона частот

$$\alpha_{\text{пред. макс}} \approx \sqrt{\sum_{\nu=5}^{13} (\nu K_{U\nu \text{ пред}})^2}.$$
(8)

При расчетах по (8) должно соблюдаться условие $K_{\rm Hc \ nped} \leq 0,08$, что обеспечивается при $K_{U5 \ nped} \approx 0,05 < 0,06$ и значениях $K_{Uv \ nped}$ для остальных гармоник рабочего диапазона частот МТЗВГ, соответствующих данным табл. 2. Для данных, практически маловероятных, но наихудших с точки зрения селективности МТЗВГ условий, из (7) получим

 $\alpha_{\text{пред. макс}} \approx 0,65.$

Измерения уровня ВГ в токах ОЗЗ действующих кабельных сетей 6–10 кВ показывают, что приведенная оценка $\alpha_{пред. макс}$, скорее всего, является завышенной, так как при оценке коэффициента несинусоидальности напряжения $K_{\rm Hc \ пред}$ учитываются гармоники и более высокого порядка, чем v = 13. Так, в [18] на основе измерений в действующих кабельных сетях 6–10 кВ показано, что максимальный общий уровень ВГ в токе ОЗЗ может достигать значений ~40 % от $I_{C\Sigma}$, причем в данной экспериментальной оценке также учтены гармоники более высокого, чем 13-й, порядка.

Максимальный общий уровень ВГ в токе ОЗЗ амакс для защищаемой компенсированной кабельной сети 6-10 кВ зависит не только от состава, но и от режимов работы основных источников ВГ в момент возникновения ОЗЗ и может определяться как одной, так и несколькими гармониками рабочего диапазона частот МТЗВГ. Например, в кабельных сетях 6-10 кВ, в которых основными источниками ВГ являются силовые трансформаторы, в токе ОЗЗ преобладают 5 и 7-я гармоники, а их общий уровень в токе ОЗЗ амакс зависит от напряжения в сети, коэффициента загрузки трансформаторов и, в определенной степени, места возникновения повреждения. В кабельных сетях 6-10 кВ систем промышленного электроснабжения основными источниками ВГ являются, как правило, различного типа нелинейные преобразователи, электротермические (например, установки электрические дуговые печи), электросварочные установки и др. При таком составе источников ВГ в токах ОЗЗ, кроме 5 и 7-й гармоник, значительную долю составляют, а часто и преобладают 11 и 13-я гармоники. В таких сетях общий максимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ амакс зависит от состава комплексной нагрузки центра питания (ЦП) и режимов работы отдельных источников и может изменяться в очень широких пределах. Поэтому с достаточной точностью рассчитать или каким-либо другим способом оценить значение $\alpha_{\text{макс}}$ для конкретной кабельной сети 6-10 кВ в общем случае не представляется возможным. Учитывая это, при выборе уставок по току срабатывания в выражении (1), на наш взгляд, необходимо принимать $\alpha_{\text{макс}} = \alpha_{\text{пред. макс}}$. Как уже отмечалось выше, более достоверной следует считать оценку предельного уровня ВГ в токе ОЗЗ, полученную на основе реальных измерений в действующих кабельных сетях 6–10 кВ: апред. макс = 0,4.

При таком подходе к выбору $\alpha_{\text{макс}}$ в (1) в коэффициенте отстройки $K_{\text{отс}}$ не требуется учитывать погрешности оценки максимального уровня ВГ в токе ОЗЗ контролируемой сети и его значение можно уменьшить (например, как для большинства максимальных токовых защит, принять $K_{\text{отс}}$ = 1,2–1,3).

Оценка чувствительности МТЗВГ. Чувствительность МТЗ ВГ при внутренних ОЗЗ оценивается по выражению

$$K_{\rm q,i} = \frac{3I_{0\,i\,\rm BF\,MH}}{I_{\rm C.3.i}} \le \frac{\alpha_{\rm MH}(I_{\rm C\Sigma} - I_{\rm C\,i})}{I_{\rm C.3.i}} \ge K_{\rm q.MH}, \qquad (9)$$

где 3*I*_{0 і ВГ мин} – минимальный уровень ВГ в токе 3*I*₀ защищаемого *i*-го присоединения при внутренних устойчивых ОЗЗ; $\alpha_{\text{мин}}$ – минимальный относительный уровень ВГ в токе устойчивого ОЗЗ в контролируемой сети; *K*_{ч.мин} = 1,5 – минимально допустимое значение коэффициента чувствительности для токовых защит на основе ВГ¹.

Как и $\alpha_{\text{макс}}$ в (1), относительный минимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ $\alpha_{\text{мин}}$ зависит от множества факторов, прежде всего, от состава источников ВГ и режимов их работы, и оценить его с достаточной точностью для конкретной сети невозможно. Поэтому, как и при выборе уставки по току срабатывания в соответствии с (1), при оценке чувствительности МТЗВГ по (9) следует использовать предельные оценки минимально возможного уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ $\alpha_{пред.мин}$.

Расчетные оценки минимально возможного уровня ВГ в токе ОЗЗ апредмин компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, выполненные в ряде работ [19–21], приведены в табл. 4.

¹ Правила устройства электроустановок. Издание 7-е. Утверждены приказом Минэнерго Российской Федерации от 08.07.2002, № 204.

Таблица 4. Расчетные оценки предельного минимального уровня ВГ	⁻ α _{пред. мин} в токе ОЗЗ в компенсированных кабель-
ных сетях 6–10 кВ по данным различных источников [19–21]	

$I_{C\Sigma}$, A	$lpha_{ m пред.мин}$ при разных значениях суммарного емкостного тока кабельной сети 6–10 кВ сети $I_{C\Sigma}$, о.е					
	25	50	100	250		
По данным [19]	0,027	0,027	0,027	0,027		
По данным [20]	0,019	0,019	0,019	0,019		
По данным [21]	0,015	0,019	0,026	0,028		

Согласно данным табл. 4, для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ $\alpha_{\rm пред.мин} \approx 0,02-0,03$. Расчетные оценки $\alpha_{\rm пред.мин}$ достаточно хорошо коррелируются с экспериментальными данными, полученными при измерениях в действующих компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ (по данным [22], минимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ, как правило, не менее 4 % от $I_{\rm C\Sigma}$).

Так как при расчетах предельного минимального уровня ВГ $\alpha_{пред.мин}$ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ учитываются только 5 и 7-я гармоники, генерируемые силовыми трансформаторами [19–21], а другие источники ВГ (нелинейные преобразователи, электротермические установки и др.) отсутствуют или в момент возникновения ОЗЗ отключены, расчетные оценки практически являются, скорее всего, заниженными. Учитывая это, с некоторым запасом при оценке чувствительности МТЗВГ в (8) можно принять $\alpha_{\text{мин}} = \alpha_{\text{пред.мин}} = 0,04.$

Требования к минимальному значению тока срабатывания МТЗВГ I_{с.з. мин}. Приведенные выше оценки $\alpha_{пред.мин}$ позволяют сформулировать требования к чувствительности МТЗВГ по первичному току.

Из (9) при
$$I_{c.3} = I_{c.3. мин}$$
 получим
 $I_{c.3. мин} \leq \frac{\alpha_{пред. мин} I_{C\Sigma мин}}{K_{ч. мин}},$ (10)

откуда при $I_{C\Sigma \text{ мин}}$ = 20 А (кабельные сети с $U_{\text{ном}}$ = 10 кВ²), $\alpha_{\text{пред. мин}}$ = 0,04 и $K_{\text{ч. мин}}$ =1,5

$$I_{\text{C.3.MuH}} \le \frac{0.04 \cdot 20}{1.5} \approx 0.53 \,\text{A.}$$

Таким образом, устройства защиты на принципе абсолютного замера ВГ, предназначенные для применения в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, должны обеспечивать минимальный первичный ток срабатывания не более ~0,5 А во всем рабочем диапазоне частот. Согласно данным табл. 1, применяемые в настоящее время исполнения МТЗВГ, в частности устройства типа УСЗ-2/2, не обеспечивают выполнение данного требования.

Области применения МТЗВГ. В [16] рекомендуется применять устройства защиты

от ОЗЗ рассматриваемого типа в основном на присоединениях, собственный емкостный ток которых Іссобс не превышает 10 % от суммарного емкостного тока сети Ісх. К объектам компенсированных кабельных сетей, для которых выполняется данное условие, относятся, по данным [16], и центры питания (ЦП) кабельных сетей – шины 6–10 кВ главных понизительных подстанций (ГПП) и ГРУ ТЭЦ (рис. 1). Отметим также, что применяемой в настоящее время методикой выбора первичного тока срабатывания допускается применение МТЗВГ и на присоединениях, имеющих $I_{C cobc} > 0, 1I_{C\Sigma}$, при увеличении уставки по Ісх по сравнению с рекомендуемыми значениями, приведенными в табл. 1.

Из (1) и (9) получим условия, при которых обеспечивается селективность несрабатываний МТЗВГ при внешних и чувствительность при внутренних устойчивых ОЗЗ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ:

$$I_{C \text{ cobc}^{*}} \leq \frac{1}{1 + \frac{\alpha_{\text{Makc}}}{\alpha_{\text{MUH}}}} = \frac{1}{1 + Z_{\text{Makc}} K_{\text{OTC}} K_{\text{Ч. МИH}}}, \qquad (11)$$
$$= \frac{1}{1 + Z_{\text{Makc}} K_{\text{OTC}} K_{\text{Ч. МИH}}}, \qquad (11)$$

где Z – параметр, характеризующий степень нестабильности общего уровня ВГ в токе O33.

Из (11) при $K_{\text{отс}} = 1,2, K_{\text{ч. мин}} = 1,5,$ $\alpha_{\text{макс}} = 0,4$ и $\alpha_{\text{мин}} = 0,04$ получим

$$I_{C \text{ co6c}^*} \le \frac{1}{1 + \frac{0.4}{0.04} 1, 2 \cdot 1, 5} \approx 0,05,$$

т.е. обеспечение условий селективности несрабатываний при внешних ОЗЗ и минимально требуемой чувствительности при внутренних ОЗЗ возможно только на присоединениях, собственный емкостный ток *I*_{C собс} которых не превышает ~5 % от суммарного емкостного тока сети *I*_{CE}.

На рис. 1 приведена характерная структура кабельных сетей 6–10 кВ систем промышленного электроснабжения, где зона 1 – зона питающих линий, связывающих ЦП с распределительными подстанциями (РП) и распределительно-трансформаторными подстанциями (РТП) или непосредственно с трансформаторными подстанциями (ТП). Для питающих линий этой зоны характерны большие относительные значения собственных емкостных токов *I*_{С собс} и, соответственно, наиболее тяжелые условия

² Правила устройства электроустановок. Издание 7-е. Утверждены приказом Минэнерго Российской Федерации от 08.07.2002, № 204.

[©] ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

с точки зрения применимости МТЗВГ. Зона 2 – зона питающих линий, связывающих РП и РТП с ТП, и распределительных линий на РТП. Зона 3 содержит распределительные линии, связывающие потребителей с шинами источника питания – ТП. Для распределительных линий зон 2 и 3, соединяющих электроприемники с шинами источника (ТП или РТП) характерны небольшие длины и, соответственно, небольшие значения I_{C собс*}, облегчающие условия применимости максимальных токовых защит на основе ВГ.



Рис. 1. Структурная схема кабельной сети 6–10 кВ системы промышленного электроснабжения

Схемы кабельных сетей 6–10 кВ городского электроснабжения отличаются от схем сетей промышленного электроснабжения, прежде всего, тем, что на ТП устанавливаются только трансформаторы 6–10/0,4, на которых установка стационарных устройств защиты от ОЗЗ не требуется [11].

Анализ статистических данных по кабельным сетям 6–10 кВ систем электроснабжения ряда отраслей промышленности (черной металлургии, целлюлозно-бумажной, нефтеперерабатывающей и др.) показал, что доля присоединений с $I_{C \ co6c^*} \le 0,05$ на понизительных подстанциях, являющихся ЦП компенсированных кабельных сетей, не превышает ~60 % от общего числа присоединений, подключенных к шинам 6–10 кВ (рис. 2,а), несколько выше она на ГРУ 6–10 кВ ТЭЦ. На РП (РТП) доля присоединений с $I_{C \ co6c^*} \le 0,05$ составляет около 90 %, на ТП кабельных сетей промышленного электроснабжения – практически 100 % (рис. 2, б, в).

Таким образом, в качестве основной области применения МТЗ ВГ следует рассматривать только РП (РТП) и ТП компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ систем промышленного электроснабжения. На присоединениях с $I_{C \, {\rm coбc^*}} > 0,05$ должны применяться направленные защиты на основе ВГ (например, устройства защиты типа «Спектр» [23]), условия применимости которых не зависят от величины $I_{C \, {\rm coбc^*}}$. Применение направленных защит на основе ВГ возможно только при наличии на шинах защищаемого объекта трансформатора напряжения нулевой последовательности (ТННП), установка которого всегда предусматривается на ЦП и в некоторых случаях на РП (РТП). На объектах типа ТП систем промышленного электроснабжения, где ТННП, как правило, отсутствуют, могут применяться только токовые защиты.



Рис. 2. Относительная частота значений $I_{C \text{ собс}^*}$ для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения: а – ГПП; б – РП (РТП); в – ТП

Заключение

Существующая методика выбора параметров срабатывания максимальных токовых защит от замыканий на землю, основанная на использовании высших гармоник, не позволяет обоснованно выбрать первичный ток срабатывания, что приводит к снижению селективности защиты при внешних и не всегда достаточной чувствительности при внутренних повреждениях.

Предложенная методика выбора уставок по току срабатывания и оценки чувствительности максимальных токовых защит абсолютного замера высших гармоник, основанная на использовании предельно возможных максимального и минимального уровней гармоник в токе замыкания на землю компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, позволяет повысить селективность при внешних замыканиях на землю и более точно оценить чувствительность при внутренних повреждениях, однако приводит к некоторому ограничению области применения устройств защиты данного типа.

Показано, что область применения максимальных токовых защит на основе высших гармоник ограничена присоединениями, собственный емкостный ток которых не превышает 5 % от суммарного емкостного тока сети, что обеспечивается практически на всех присоединениях ТП 6–10/0,4 кВ систем промышленного, а также более чем на 90 % присоединений распределительных подстанций.

На объектах кабельных сетей 6–10 кВ, для присоединений которых данное условие не выполняется, прежде всего, на ЦП (ГПП, ГРУ ТЭЦ), должны применяться направленные защиты, основанные на контроле фазных соотношений высших гармоник тока и напряжения нулевой последовательности.

Список литературы

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971.

2. **Сирота И.М.** О режимах нейтрали сетей 6–35 кВ // Электрические станции. – 1988. – № 6. – С. 69–73.

3. Обабков В.К., Осипов Э.Р. Сравнительный анализ способов заземления нейтрали в задаче подавления дуговых замыканий на землю // Известия вузов. Горный журнал. – 1988. – № 3. – С. 94–97.

4. Евдокунин Г.А., Гудилин С.В., Корепанов А.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6–10 кВ // Электричество. – 1998. – № 12. – С. 8–22.

5. Евдокунин Г.А. Основные характеристики различных способов заземления нейтрали сетей 6–35 кВ. Защита от однофазных замыканий на землю в электроустановках 6–35 кВ: сб. статей. – СПб., 1999. 6. Долгополов А.Г. О режимах заземления ней-

6. Долгополов А.Г. О режимах заземления нейтрали и защите от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ // Энергетик. – 2000. – № 2. – С. 20–24.

7. Лисицын Н.В. К обоснованию выбора режима заземления нейтрали // Энергетик. – 2000. – № 1. – С. 22–25.

8. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений /
 Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др.; под ред.
 Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокунина, А.И. Таджибаева. – СПб.:
 Энергоатомиздат, 2002.

9. Шуин В.А. Расчет перенапряжений при дуговых прерывистых замыканиях на землю. Зависимость от режима заземления нейтрали // Новости ЭлектроТехники. – 2009. – № 4 (58).

10. **Федосеев А.М.** Релейная защита электроэнергетических систем. Защита электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. 11. Кискачи В.М., Назаров Ю.Г. Устройства сигнализации замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ // Сигнализация замыканий на землю в компенсированных сетях / под ред. В.И. Иоэльсона. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – С. 39–66.

12. Кискачи В.М., Назаров Ю.Г. Сигнализация однофазных замыканий на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ // Труды ВНИИЭ. Вып. 16. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – С. 219–251.

13. Устройства сигнализации замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ / Н.М. Кискачи, С.Е. Сурцева, Н.М. Горшенина и др. // Электрические станции. – 1972. – № 4. – С. 69–72.

14. Борухман В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию // Энергетик. – 2000. – № 1. – С. 20–22.

15. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М: Энергоатомиздат, 2000.

16. Кискачи В.М. Селективность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник // Электричество. – 1967. – № 9. – С. 24–29.

17. **http:**//www.cheaz.ru/ru/production/ustroystvareleynoy-zashchity/ustroystvo-signalizatsii-odnofaznykhzamykaniy-na-zemlyu-usz-2-2.

18. Вайнштейн В.Л. Исследование высших гармоник тока замыкания на землю // Промышленная энергетика. – № 1. – 1986. – С. 39–40.

19. Кискачи В.М. Расчет минимального уровня высших гармоник при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью // Работы в области релейной защиты и автоматики: Тр. ВНИИЭ. Вып. 26. – М.: Энергия, 1966. – С. 89–105.

20. Жежеленко И.В., Толпыго О.Б. Чувствительность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник в сетях промышленных предприятий // Электричество. – 1969. – № 10. – С. 32–39.

21. Винокурова Т.Ю., Шагурина Е.С., Шуин В.А. Математическая модель для оценки минимального уровня высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 6. – С. 35–41.

22. Алексеев В.Г. Токовая защита ЗГНП-4.2 от замыканий на землю в обмотке статора генератора, работающего на сборные шины // Электрические станции. – 2006. – № 2. – С. 51–56.

23. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001.

References

1. Likhachev, F.A. Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiey emkostnykh tokov [Earth faults in networks with isolated neutral and compensated capacitive currents]. Moscow, Energiya, 1971.

2. Sirota, I.M. O rezhimakh neytrali setey 6–35 kV [On neutral grounding modes of 6–35 kV networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1988, no. 6, pp. 69–73.

3. Obabkov, V.K., Osipov, E.R. Sravnitel'nyy analiz sposobov zazemleniya neytrali v zadache podavleniya dugovykh zamykaniy na zemlyu [A comparative analysis of the neutral grounding methods in the problem of arcing earth faults suppression]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 1988, no. 3, pp. 94–97.

4. Evdokunin, G.A., Gudilin, S.V., Korepanov, A.A. Vybor sposoba zazemleniya neytrali v setyakh 6–10 kV [The choice of neutral grounding in 6–10 kV networks]. *Elektrichestvo*, 1998, no. 12, pp. 8–22.

5. Evdokunin, G.A. Osnovnye kharakteristiki razlichnykh sposobov zazemleniya neytrali setey 6–35 kV. Zashchita ot odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v elektroustanovkakh 6– 35 kV [The main characteristics of different ways of 6–35 kV networks neutral grounding. Protection against single phase earth faults in 6–35 kV electrical installations]. *Sbornik statey* [Collection of papers]. Saint-Petersburg, 1999. 6. Dolgopolov, A.G. O rezhimakh zazemleniya neytrali i zashchite ot zamykaniy na zemlyu v setyakh 6–35 kV [On neutral grounding modes and protection against earth faults in 6–35 kV networks]. *Energetik*, 2000, no. 2, pp. 20–24.

7. Lisitsyn, N.V. K obosnovaniyu vybora rezhima zazemleniya neytrali [A justification of the selection of neutral grounding mode]. *Energetik*, 2000, no. 1, pp. 22–25.

8. Khalilov, F.Kh., Evdokunin, G.A., Polyakov, V.S. Tadzhibaev, A.I. *Zashchita setey* 6–35 *kV ot perenapryazheniy* [Protection of 6–35 kV networks against overvoltages]. Saint-Petersburg, Energoatomizdat, 2002.

9. Shuin, V.A. Raschet perenapryazheniy pri dugovykh preryvistykh zamykaniyakh na zemlyu. Zavisimosť ot rezhima zazemleniya neytrali [Overvoltage calculation during arcing intermittent earth faults. Dependence on the neutral grounding mode]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2009, no. 4 (58).

10. Fedoseev, A.M. *Releynaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem. Zashchita elektricheskikh setey* [Relay protection of electric power systems. Power network protection]. Moscow, Energoatomizdat, 1984.

11. Kiskachi, V.M., Nazarov, Yu.G. Ustroystva signalizatsii zamykaniy na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV [Earth faults signaling devices in 6–10 kV cable networks]. *Signalizatsiya zamykaniy na zemlyu v kompensirovannykh setyakh* [Earth fault signaling in 6–10 kV cable networks with resonant grounding]. Moscow, Gosenergoatomizdat, 1962, pp. 39–66.

12. Kiskachi, V.M., Nazarov, Yu.G. Signalizatsiya odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v kompensirovannykh kabel'nykh setyakh 6–10 kV [Signaling of single phase earth faults in 6–10 kV cable networks with resonant grounding]. *Trudy VNIIE.* Moscow, Gosenergoizdat, 1963, issue 16, pp. 219–251.

13. Kiskachi, V.M., Surtseva, S.E., Gorshenina, N.M. Ustroystva signalizatsii zamykaniy na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV [Earth fault signaling devices in 6–10 kV cable networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1972, no. 4, pp. 69–72.

14. Borukhman, V.A. Ob ekspluatatsii selektivnykh zashchit ot zamykaniy na zemlyu v setyakh 6–10 kV i meropriyatiyakh po ikh sovershenstvovaniyu [On operation of selective protection against earth faults in 6–10 kV networks and measures for their improvement]. *Energetik*, 2000, no. 1, pp. 20–22. 15. Zhezhelenko, I.V. Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy [Higher harmonics in industrial supply systems]. Moscow, Energoatomizdat, 2000.

16. Kiskachi, V.M. Selektivnosť signalizatsii zamykaniy na zemlyu s ispol'zovaniem vysshikh garmonik [Selectivity of earth fault signaling using higher harmonics]. *Elektrichestvo*, 1967, no. 9, pp. 24–29.

17. http://www.cheaz.ru/ru/production/ustroystvareleynoy-zashchity/ustroystvo-signalizatsii-odnofaznykhzamykaniy-na-zemlyu-usz-2-2.

18. Vaynshteyn, V.L. Issledovanie vysshikh garmonik toka zamykaniya na zemlyu [Investigation into higher harmonics of earth current]. *Promyshlennaya energetika*, 1986, no. 1, pp. 39–40.

19. Kiskachi, V.M. Raschet minimal'nogo urovnya vysshikh garmonik pri odnofaznykh zamykaniyakh na zemlyu v setyakh s izolirovannoy i kompensirovannoy neytral'yu [Calculation of the minimum level of higher harmonics under single phase earth fault in ungrounded networks and networks with resonant grounding]. *Trudy VNIIE.* Moscow, Energiya, 1966, issue 26, pp. 89–105.

20. Zhezhelenko, I.V., Tolpygo, O.B. Chuvstvitel'nost' signalizatsii zamykaniy na zemlyu s ispol'zovaniem vysshikh garmonik v setyakh promyshlennykh predpriyatiy [Sensitivity of earth fault signaling devices using higher harmonics in the networks of industrial enterprises]. *Elektrichestvo*, 1969, no. 10, pp. 32–39.

21. Vinokurova, T.Yu., Shagurina, E.S., Shuin, V.A. Matematicheskaya model' dlya otsenki minimal'nogo urovnya vysshikh garmonik v toke odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v kompensirovannykh setyakh 6–10 kV [Mathematical model for evaluating the minimum level of higher harmonics in the current single-phase earth fault in 6–10 kV compensated networks]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 6, pp. 35–41.

22. Alekseev, V.G. Tokovaya zashchita ZGNP-4.2 ot zamykaniy na zemlyu v obmotke statora generatora, rabotayushchego na sbornye shiny [Earth fault current protection ZGNP-4.2 in the stator winding of the generator operating on busbars]. *Elektricheskie stantsii*, 2006, issue 2, pp. 51–56.

23. Shuin, V.A., Gusenkov, A.V. Zashchity ot zamykaniy na zemlyu kabel'nykh setey 6–10 kV [Protection against earth faults in 6–10 kV cable networks]. Moscow, Energoprogress, Energetik, 2001.

Шуин Владимир Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, телефон (4932) 26-99-05, e-mail: shuin@rza.ispu.ru

Винокурова Татьяна Юрьевна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, телефон (4932) 26-99-05, e-mail: tanya-vinokurova@mail.ru

Шагурина Елена Сергеевна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, телефон (4932) 26-99-05, e-mail: e chugrova@mail.ru