

Требования к чувствительности защит от однофазных замыканий на землю на основе высших гармоник

В.А. ШУИН, Е.С. ШАГУРИНА, Т.Ю. ВИНОКУРОВА
Ивановский государственный энергетический университет (ИГЭУ)
Россия
shuin@rza.ispu.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Компенсированные электрические сети 6-10 кВ, защита от однофазных замыканий на землю, высшие гармоники.

1 ВВЕДЕНИЕ

В кабельных электрических сетях 6-10 кВ промышленного и городского электроснабжения, работающих с резонансным заземлением нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР), в качестве защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) основное применение получили устройства, основанные на использовании высших гармоник (ВГ) в токах нулевой последовательности присоединений защищаемого объекта, работающие, как правило, в диапазоне частот ВГ от 150 до ~650 Гц [1, 2 и др.]. К ним относятся устройства защиты абсолютного замера УСЗ-2/2 и относительного замера УСЗ-3М, разработанные во ВНИИЭ и выпускаемые ЧЭАЗ, а также их аналоги, реализованные в виде соответствующих функций защиты от ОЗЗ в некоторых исполнениях микропроцессорных терминалов РЗА для линий 6-35 кВ.

При разработке и проектировании защит от ОЗЗ на основе ВГ для определения требований к чувствительности и области возможного применения необходима оценка минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ для сетей с различными значениями суммарного емкостного тока $I_{\Sigma C}$. Оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных сетей 6-10 кВ ранее были даны в работах Кискачи В.М. и Жежеленко И.В. [3, 4, 5]. Указанные оценки минимального уровня ВГ в токах ОЗЗ проводились в конце 60-х годов на основе упрощенных аналитических методов и моделей электрических сетей 6–10 кВ и их элементов, ограничивающих возможности исследователей и разработчиков. Опыт эксплуатации защит на основе ВГ не всегда подтверждает сделанные на основе указанных исследований оценки в части чувствительности и селективности, а также области возможного применения защит, основанных на использовании высших гармоник [например, 6].

Появление современных систем моделирования ЭЭС и электроэнергетических объектов (ЭЭО), например, Matlab и др., обеспечивает возможность применения более точных моделей сетей 6-10 кВ и их элементов и получения уточненных оценок минимального уровня ВГ в токах ОЗЗ и чувствительности защит на их основе.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Сравнительный анализ расчетных схем замещения для оценки минимального уровня ВГ в токах ОЗЗ и чувствительности защит на их основе.

Гармонический состав тока в месте ОЗЗ и токов нулевой последовательности $3I_0$ поврежденного и неповрежденных присоединений с достаточной точностью определяется гармоническим составом напряжения поврежденной фазы в месте замыкания на землю [3, 5]. При определении минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ в [3, 4] принимается, что ЭДС источника питания имеет синусоидальную форму (коэффициент несинусоидальности $K_{нс} = 0$) и основным источником высших гармоник является нелинейность кривой намагничивания трансформаторов нагрузки 6-10/0,4 кВ, установленных на приемных подстанциях (ТП, РТП) сетей 6-10 кВ промышленного или городского электроснабжения. При наличии в сети других источников ВГ минимальный уровень их в токах $3I_0$ и чувствительность защит, основанных на использовании высших гармоник увеличивается.

В целях упрощения расчетной схемы замещения в [3] принимается, что гармонический состав напряжения поврежденной фазы практически не зависит от места возникновения ОЗЗ (близко к шинам или на удалении от шин центра питания – ЦП), а также наличия или отсутствия ДГР, имеющей в основном диапазоне регулирования тока компенсации практически линейную характеристику. С учетом этих допущений в [3] для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ используется схема замещения сети, приведенная на рис. 1, а.

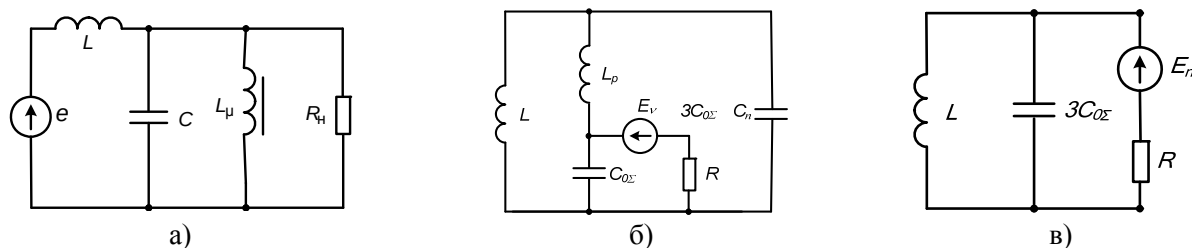


Рис. 1: Расчетные схемы замещения сети 6-10 кВ для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ: а – по [3]; б, в – по [4]

В схеме замещения по рис. 1, а $C = 3C_{0\Sigma}$ – суммарная емкость трех фаз сети на землю, L – суммарная индуктивность питающих трансформаторов ЦП, L_{μ} – суммарная индуктивность ветвей намагничивания подключенных трансформаторов нагрузки всех присоединений, $R_{\text{н}}$ – суммарное сопротивление нагрузки трансформаторов. Из рис. 1, а можно видеть, что в расчетной схеме замещения не учитывается влияние на уровень ВГ в месте ОЗЗ ряда факторов: сопротивления линий, связывающих ЦП с ТП, сопротивления питающей системы, сопротивлений обмоток трансформаторов нагрузки, междуфазных емкостей сети, комплексного характера сопротивления нагрузки, различия токов намагничивания для трансформаторов нагрузки различной мощности и др. При учете нелинейности кривых намагничивания трансформаторов нагрузки в [3] принято, что функция $i_{\mu} = f(\psi)$ с достаточной точностью может быть аппроксимирована полиномом 5-й степени, т.е. $i_{\mu} \approx a\psi^5$.

На минимальный уровень ВГ, определенный по схеме замещения рис. 1, а, наиболее существенное влияние оказывает соотношение мощности питающих и приемных трансформаторов $S = \frac{S_{\text{nut}\Sigma}}{S_{\text{пр}\Sigma}}$, которое в [3] принималось равным 1,5 ... 3. Полученное в [3] на основе расчетной схемы замещения по рис. 1, а минимальное значение уровня для одной из наиболее резко выраженных гармоник – 5-й, в основном определяющей чувствительность в рассматриваемых условиях защит на основе ВГ, при значении параметра $S = 1,5$ составляет ~2,6% от $I_{\text{с}\Sigma}$. Соответствующие указанной доле значения тока 5-й гармоники для сетей с различными значениями $I_{\text{с}\Sigma}$ приведены в таблице 1.

Табл. 1: Расчетные значения тока 5-й гармоники $I_5 = 0,26I_{\text{с}\Sigma}$, соответствующие данным [3]

	Значение тока I_5 , А			
	$I_{\text{с}\Sigma} = 25$ А	$I_{\text{с}\Sigma} = 50$ А	$I_{\text{с}\Sigma} = 100$ А	$I_{\text{с}\Sigma} = 250$ А
В месте ОЗЗ	0,65	1,3	2,6	6,5
В токе $3I_0$ поврежденно-го присоединении	0,585	1,17	2,34	5,85
Ток срабатывания УСЗ-2/2 при $f = 250$ Гц [1]	0,95	1,4	2,5	4,85

В [5] показано, что условия селективности и чувствительности токовых защит абсолютного замера ВГ могут быть обеспечены только на присоединениях с относительно небольшими значениями собственного емкостного тока $I_{\text{Cсобс}^*} = \frac{I_{\text{Cсобс}}}{I_{\text{с}\Sigma}} \leq 0,1$. При значениях $I_{\text{Cсобс}^*} = 0,1$ ток I_5 в поврежденном присоединении будет равен 0,9 от значения I_5 в месте ОЗЗ (табл. 1). Для сравнения с током 5-й гармоники в поврежденном присоединении с $I_{\text{Cсобс}^*} = 0,1$ в табл. 1 приведены значения

тока срабатывания устройства токовой защиты абсолютного замера типа УСЗ-2/2 [1]. Из данных табл. 1 можно видеть, что при указанном минимальном уровне 5-й гармоники требуемая чувствительность ($K_{ч.мин} \geq 1,5$ [5]) защиты типа УСЗ-2/2 не обеспечивается.

В работе [4] дан расчетный метод определения ВГ тока ОЗЗ в кабельных сетях 6-10 кВ систем промышленного электроснабжения. Для расчета ν -й гармоники в токе ОЗЗ используется схема замещения по рис. 1, б, в которой учтено наличие реактора на линии, а также переходное сопротивление в месте повреждения. При отсутствии линейного реактора расчетная схема будет иметь вид, показанный на рис. 1, в. Из рис. 1, б, в можно видеть, что в расчетных схемах замещения по [4], как и в схеме замещения по [3], не учитывается ряд факторов, оказывающих влияние на уровень ВГ в токе ОЗЗ: сопротивление линий, связывающих ЦП с приемными подстанциями, междофазные емкости, соотношения между емкостями сети по концам линий, сопротивления обмоток и нагрузка трансформаторов и др. Для определения эквивалентной ЭДС ν -й гармоники E_ν в [4] используются данные по гармоникам токов намагничивания трансформаторов, полученные в 30-е годы [7]. Расчеты, выполненные в [4] по усредненным значениям E_ν силовых трансформаторов и параметров других элементов расчетной схемы замещения по рис. 1, б, дали для сети 6 кВ с $I_{с\Sigma} = 40$ А при $S = 0,75$ следующие значения 3, 5 и 7 гармоник в токе ОЗЗ: $I_3 \approx 0,1$ А, $I_5 \approx 0,75$ А, $I_7 \approx 0,62$ А. Если принять, что при изменении суммарного емкостного тока сети $I_{с\Sigma}$ процентное соотношение 1-й и высших гармоник не изменяется, то для сети с $I_{с\Sigma} = 25$ А расчетное значение $I_5 \approx 0,47$ А, т.е. заметно меньше, чем полученное в [3] (табл. 1). Приведенные расчетные данные показывают, что уровень ВГ в токах ОЗЗ может быть небольшим, и погрешности в моделях сети и составляющих ее элементов могут привести к неточным выводам при оценке минимального уровня ВГ, требований к чувствительности защит от ОЗЗ на основе высших гармоник и условий их применимости. Применение современных систем моделирования, например, Matlab, позволяет уточнить указанные оценки.

О влиянии аппроксимации кривой намагничивания на точность оценки спектра высших гармоник, генерируемых трансформаторами.

Как уже отмечалось выше, в работах Кискачи В.М. [3] при оценке минимального уровня ВГ в токах ОЗЗ используется аппроксимация кривых намагничивания электротехнических сталей, используемых при изготовлении силовых трансформаторов (например, горячекатаных марок Э42, Э45, Э47 или холоднокатаных марок Э330, Э370, Э380) в виде полинома 5-й степени, предложенная Либкиндом М.С. [8]. На рис. 2 для сравнения приведены характеристика намагничивания стали Э330 и ее аппроксимация полиномом 5-й степени.

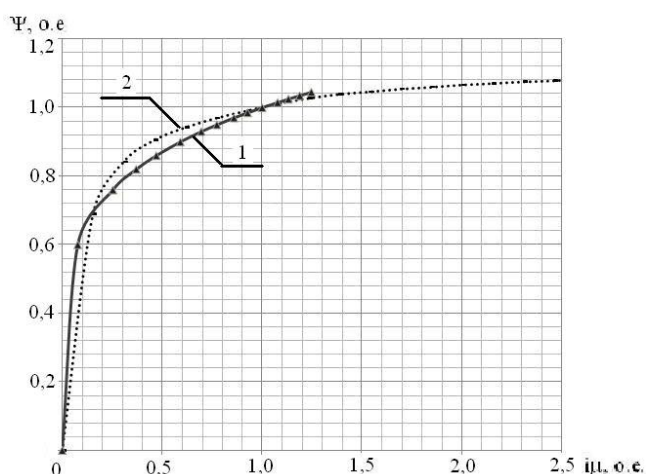


Рис. 2: Кривые намагничивания стали Э330 (в о.е.):
1 – исходная кривая; 2 – аппроксимация полиномом 5-й степени

Из рис. 2 можно видеть, что используемая в [3] аппроксимация кривой намагничивания электротехнических сталей может приводить к заметным погрешностям по сравнению с действительной кривой и, соответственно, к погрешностям в оценке ВГ тока намагничивания. Оценка погрешностей в определении значений ВГ в спектре тока намагничивания, возникающих при ап-

проксимации кривой намагничивания полиномом 5-й степени, была выполнена с использованием моделей трансформаторов с нелинейным магнитопроводом библиотеки Simulink программного комплекса MATLAB (рис. 3, а), в 1-й из которых использовалась реальная кривая намагничивания стали Э330, а во 2-й – ее аппроксимация полиномом 5-й степени.

Сравнение результатов моделирования показало (например, рис. 3, б), что замена реальной характеристики намагничивания ее аппроксимацией полиномом 5-й степени дает погрешность в оценке уровня 5-й гармоники до 10 и более процентов, для 7-й гармоники – до 40 и более процентов. Исследования на моделях трансформаторов 6-10/0,4 кВ с реальной характеристикой намагничивания для электротехнических сталей Э42 и Э330 показали также, что в среднем отношения среднеквадратичных значений 5 и 7 гармоник к току намагничивания находятся в пределах:

$$I_{5*} = \frac{I_5}{I_\mu} = 0,086 - 0,154, \quad I_{7*} = \frac{I_7}{I_\mu} = 0,024 - 0,053. \quad \text{Для сравнения можно отметить, что при}$$

оценке минимального уровня ВГ, генерируемых трансформаторами, в [4] указанные соотношения принимались равными: $I_{5*} = 0,22$, $I_{7*} = 0,1$.

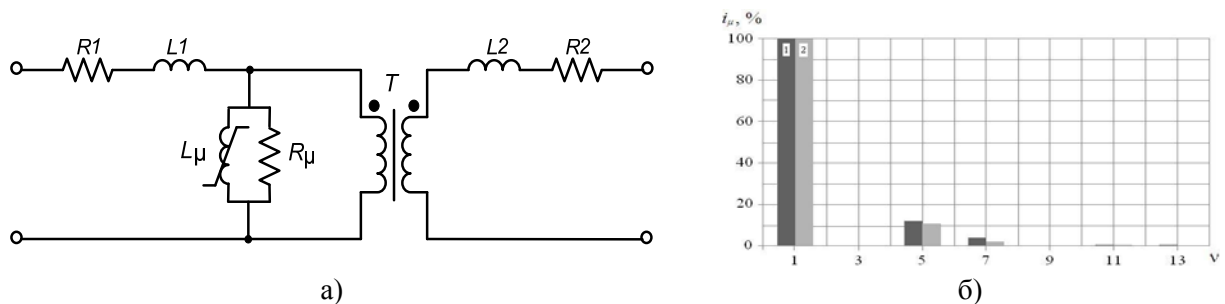


Рис. 3: Схема замещения трансформатора с нелинейным магнитопроводом в системе моделирования MATLAB (а) и спектр тока намагничивания при $U = U_{\text{ном}}$ (б): 1 – сталь Э330; 2 – аппроксимация

Анализ показал также, что наибольшую точность обеспечивает аппроксимация кривой намагничивания функцией арктангенса. С учетом полученных результатов в системе моделирования Matlab были разработаны математические модели всей линейки трансформаторов 6-10/0,4 кВ приемных подстанций мощностью от 630 до 10000 кВА со схемами соединения обмоток Y/Δ-11 и Y/Y-0, а также трансформаторов 110-220/6-10 кВ мощностью от 25 до 100 МВА, устанавливаемых на ГПП, питающих компенсированные сети 6-10 кВ.

Модель электрической сети 6-10 кВ для оценки минимального уровня ВГ в токах ОЗЗ.

Большие значения суммарного емкостного тока $I_{c\Sigma}$, при которых применяется резонансное заземление нейтрали через ДГР, характерны для кабельных сетей 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения. Воздушные сети 6–10 кВ сельскохозяйственного и промышленного назначения, как правило, имеют емкостные токи $I_{c\Sigma}$, не превышающие значений 5-10 А, и поэтому работают, как правило, с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали через резистор. Поэтому в воздушных сетях 6–10 кВ защиты от ОЗЗ на основе ВГ, как правило, не применяются.

Расчетную модель кабельной сети 6-10 кВ системы промышленного электроснабжения (например, рис. 4,а), учитывающую основные факторы, влияющие на уровень ВГ в токе ОЗЗ: мощность КЗ на шинах системы, мощность и параметры питающего трансформатора, установленного на ЦП, различное число трансформаторов разной мощности, установленных на приемных подстанциях (ТП, РТП), имеющих в общем случае различные параметры (ток намагничивания I_μ в о.е., напряжение короткого замыкания u_k и др.), различие сопротивлений связи ТП и РТП с ЦП (длин и суммарного сечения кабельных линий), нагрузки приемных трансформаторов и других параметров можно представить в виде, показанном на рис. 4,б.

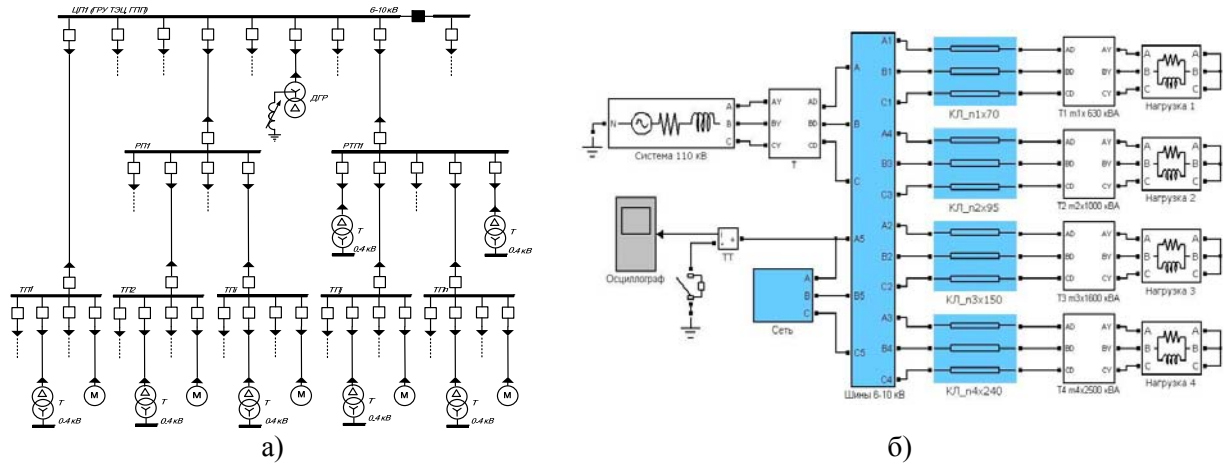


Рис. 4: Характерная схема (а) и расчетная модель в системе моделирования Matlab (б) кабельной сети 6-10 кВ системы промышленного электроснабжения для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ

На основе анализа данных по реальным компенсированным кабельным сетям 6-10 кВ с различными значениями суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$ систем промышленного электроснабжения предприятий металлургической, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности для сетей были определены соотношение мощности питающих трансформаторов и трансформаторов нагрузки (параметр S в [3]), доли трансформаторов нагрузки различной мощности в общем числе приемных трансформаторов 6-10/0,4 кВ, средние значения и диапазоны изменения мощности (тока) КЗ на шинах ЦП, определяющей сопротивление источника питания, длин и эквивалентных сечений кабельных линий, соединяющих ЦП с трансформаторными подстанциями (ТП, РТП). Значения основных параметров расчетной схемы компенсированной кабельной сети 6-10 кВ, замещения, учитываемых при моделировании, приведены в табл. 2.

Табл. 2: Основные параметры расчетной схемы замещения для оценки уровня ВГ, генерируемых трансформаторами нагрузки, в токе ОЗЗ

$I_{c\Sigma}, A$	$I_k^{(3)}, kA$	$S_{num. mp}, MVA$	$l_{KL}, км$	$S = \frac{S_{num\Sigma}}{S_{np\Sigma}}$	Доля в общей мощности трансформаторов с S_n			
					630 кВА	1000 кВА	1600 кВА	2500 кВА
20 ... 100	5 ... 20	25 ... 100	0,3 ... 2,5	0,7 ... 1,5	25%	65%	6%	4%

Результаты расчетов на модели и их оценка.

В табл. 3 и 4 приведены результаты расчетов уровней 5 и 7 гармоник для сети напряжением 6 кВ, выполненных на модели по рис. 4, б, при соотношении мощности приемных и питающего трансформаторов $S = \frac{S_{num\Sigma}}{S_{np\Sigma}} = 0,7$ и 1,5 и коэффициенте загрузки приемных трансформаторов, равном 70% от их номинальной мощности.

Табл. 3: Расчетные значения уровней 5 и 7 гармоник в сети 6 кВ при $S = 1,5$

	Уровень ВГ в токе ОЗЗ при различных значениях и мощности приемных трансформаторов $S_{np\Sigma}, A$			
	$I_{c\Sigma} = 25A$	$I_{c\Sigma} = 50A$	$I_{c\Sigma} = 100A$	$I_{c\Sigma} = 250A$
	$S_{num\Sigma} = 20 ... 25 MVA$	$S_{num\Sigma} = 31,5 ... 40 MVA$	$S_{num\Sigma} = 50 ... 63 MVA$	$S_{num\Sigma} = 80 ... 100 MVA$
I_5, A	0,33 ... 0,38	0,88 ... 0,98	2,43 ... 2,67	6,46 ... 7,11
I_7, A	0,17 ... 0,19	0,4 ... 0,43	1,04 ... 1,15	2,56 ... 2,82
$\alpha_5 = \frac{I_5}{I_{c\Sigma}}, \%$	0,92 ... 1,07	1,25 ... 1,38	1,72 ... 1,89	1,83 ... 2,01
$\alpha_7 = \frac{I_7}{I_{c\Sigma}}, \%$	0,48 ... 0,53	0,57 ... 0,61	0,73 ... 0,81	0,69 ... 0,8

Табл. 4: Расчетные значения уровней 5 и 7 гармоник в сети 6 кВ при $S = 0,7$

	Уровень ВГ в токе ОЗЗ при различных значениях и мощности приемных трансформаторов $S_{np\Sigma}$, А			
	$I_{c\Sigma} = 25\text{А}$	$I_{c\Sigma} = 50\text{А}$	$I_{c\Sigma} = 100\text{А}$	$I_{c\Sigma} = 250\text{А}$
	$S_{num\Sigma} = 20 \dots 25 \text{ МВА}$	$S_{num\Sigma} = 31,5 \dots 40 \text{ МВА}$	$S_{num\Sigma} = 50 \dots 63 \text{ МВА}$	$S_{num\Sigma} = 80 \dots 100 \text{ МВА}$
I_5 , А	0,2 ... 0,23	0,56 ... 0,65	1,55 ... 1,78	4,73 ... 5,44
I_7 , А	0,11 ... 0,13	0,32 ... 0,35	0,78 ... 0,9	1,85 ... 2,13
$\alpha_5 = \frac{I_5}{I_{c\Sigma}}$, %	0,56 ... 0,64	0,8 ... 0,92	1,09 ... 1,26	1,34 ... 1,54
$\alpha_7 = \frac{I_7}{I_{c\Sigma}}$, %	0,32 ... 0,36	0,45 ... 0,49	0,55 ... 0,64	0,52 ... 0,6

Расчеты показали, что учет гармоник, генерируемых питающим трансформатором и ДГР, увеличивает их общий уровень в токе ОЗЗ не более, чем на 5-10%. Из данных табл. 3 и 4 можно видеть, что при минимальных значениях $I_{c\Sigma}$, мощности питающего трансформатора и значении параметра S уровень ВГ в токе ОЗЗ в компенсированных сетях 6-10 кВ может быть существенно меньше минимального тока срабатывания существующих устройств защиты, основанных на использовании высших гармоник. В [9] показано, что область применения резонансного заземления нейтрали через ДГР, как наиболее эффективного средства борьбы с перенапряжениями при дуговых ОЗЗ и ограничения тока в месте повреждения, в различных странах мира постоянно расширяется. В ряде европейских стран данный вид заземления нейтрали применяется при значениях $I_{c\Sigma} = 5-10$ А. Расширение области применения заземления нейтрали через ДГР в кабельных сетях 6-10 кВ и уменьшение предельных значений $I_{c\Sigma}$, при которых допустима их работа с изолированной нейтралью, до 5-10 А предлагались также рядом специалистов и в СССР (Сирота И.М. и др.). При уменьшении предельных значений тока $I_{c\Sigma}$, начиная с которых применяется компенсация емкостных токов, до 5-10 А уровень ВГ в токе ОЗЗ уменьшится в несколько раз по сравнению со значениями, приведенными в табл. 3 и 4. Поэтому при разработке новых перспективных исполнений устройств защиты от ОЗЗ на основе ВГ требования к их чувствительности должны быть, на наш взгляд, существенно ужесточены.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение современных систем моделирования ЭЭС и электроэнергетических объектов (ЭЭО), например, Matlab, обеспечивает возможность применения более точных моделей сетей 6-10 кВ и их элементов и получения уточненных оценок минимального уровня ВГ в токах ОЗЗ и требований к чувствительности защит на их основе.

2. Минимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ имеет место в сетях, в которых основным источником высших гармоник являются трансформаторы 6-10/0,4 кВ, установленные на ТП (РТП) сетей 6-10 кВ.

3. Точность оценки минимального уровня ВГ в токах ОЗЗ сетей 6-10 кВ существенно зависит от точности аппроксимации кривой намагничивания силовых трансформаторов. Наилучшее приближение к реальной кривой намагничивания дает аппроксимация функцией арктангенса.

4. Расчеты на моделях сетей 6-10 кВ, учитывающих реальную конфигурацию и основные факторы, влияющие на уровень ВГ, показали, что минимальный уровень высших гармоник в токе ОЗЗ может быть в несколько раз меньше, чем в аналитических оценках, выполненных Кискачи В.М. и Жежеленко И.В. в конце 60-х годов на основе упрощенных моделей сети и трансформаторов.

5. С учетом п. 4 требования в части чувствительности при разработке новых перспективных исполнений устройств защиты от ОЗЗ на основе ВГ, на наш взгляд, должны быть повышены.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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.

- [2] Устройства сигнализации замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ / В.М. Кискачи, С.Е. Сурцева, Н.М. Горшенина и др.// Электрические станции. 1972. № 4. С. 69 – 72.
- [3] Кискачи В.М. Расчет минимального уровня высших гармоник при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью. Труды ВНИИЭ. Вып. 26. М.: Энергия. 1966. С. 89-105.
- [4] 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.
- [5] Кискачи В.М. Селективность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник // Электричество, 1967, № 9. – С. 24 – 29.
- [6] 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.
- [7] Рихтер Р. Электрические машины, т. III. Трансформаторы. – ОНТИ, 1936.
- [8] Либкинд М.С. Высшие гармоники, генерируемые трансформаторами. – М.: Энергоатомиздат, 1962.
- [9] Прохазка М. Применения системы компенсации емкостных токов // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем: Сборник докладов РЕЛАВЭКСПО-2012 (Чебоксары, 17 – 20 апреля 2012). – С.121.