



Автор:

Ширковец А.И.

ООО «Болид»,
г. Новосибирск, Россия

Shirkovets A.I.,
LLC Bolid, Novosibirsk,
Russia.

Abstract:

Based on methods of digital oscilloscopy of signals at single phase-to-ground faults tested in operational networks [1], main parameters of the ground fault current are analyzed for a typical large CHP (Combined Heat and Power) network. It was shown that experimental measurements of ground fault currents by digital oscilloscopy allow determining actual active and reactive current components at power frequency or in the definite frequency range up to 3-4 kHz.

Ключевые слова: высшие гармоники, ток замыкания на землю, гармонический анализ, гашение дуги однофазного замыкания, напряжение пробоя кабельной изоляции.

Based on the results of investigations, the hypothesis of the influence of higher harmonics in ground-fault currents on the breakdown voltage of power cable insulation has been proposed. This hypothesis confirms the possibility of electric strength decrease for insulation of networks containing a great amount of higher current harmonics in the current in zero-sequence circuit, and also in phase voltages.

Keywords: higher harmonics, ground fault current, harmonic analysis, quenching of single phase-to-ground arc, breakdown voltage of power cable insulation

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ТОКЕ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ И ОЦЕНКА ИХ ВЛИЯНИЯ НА ГАШЕНИЕ ОДНОФАЗНОЙ ДУГИ

INVESTIGATIONS ON THE PARAMETERS OF HIGHER HARMONICS IN GROUND FAULT CURRENT AND EVALUATION OF THEIR INFLUENCE ON THE QUENCHING OF SINGLE PHASE-TO-GROUND ARC

Аннотация: на основе апробированной в действующих электрических сетях среднего напряжения методики цифровой регистрации сигналов при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) [1] в приложении к типовой схеме выдачи мощности крупной ТЭЦ проанализированы основные параметры тока замыкания на землю. Показано, что экспериментальные измерения тока замыкания на землю путем его осциллографирования позволяют предельно точно определить текущие значения активной и реактивной составляющих этого тока на промышленной частоте и в частотном спектре до 3-4 кГц. По результатам исследований предложена гипотеза влияния высших гармоник в токе замыкания на землю на напряжение пробоя изоляции силовых кабелей, подтверждающая возможность снижения электрической прочности изоляции в сети с повышенным уровнем высших гармоник в контуре нулевой последовательности (КНП) и фазных напряжениях.

Постановка задачи

В сетях классов напряжения 6-35 кВ, независимо от режима нейтрали, серьезную опасность представляют двойные и многоместные повреждения с отключением оборудования при развитии замыканий на землю. Первой пробивается фаза с наиболее ослабленной изоляцией, для которой напряжение пробоя в текущий момент, как показали результаты длительной (от 1-го года до 3-х лет) регистрации переходных процессов при замыканиях на землю в кабельных сетях, может варьироваться в широком диапазоне и составляет обычно (0,5-1,1) $U_{\text{фmax}}$. Исходом такого пробоя может быть самоустранение замыкания или его развитие, и этот «сценарий» зависит от множества факторов, таких как место возникновения замыкания; тип сети (воздушная, кабельная, смешанная); тип изоляции и степень ее старения (бумажно-пропитанная или из сшитого полиэтилена для кабелей); исходные условия пробоя (текущий уровень электрической прочности, температурный режим электрооборудования); конфигурация сети, режим нейтрали и состав нагрузки, в том числе нелинейной. Существует тесная связь между характером однофазного пробоя

в различном оборудовании, например, в твердой статорной изоляции электрических машин и полимерной изоляции силовых кабелей. Кроме того, пробой изоляции кабеля за счет сопровождающих переходный процесс перенапряжений может спровоцировать длительное замыкание на землю в обмотке статора электродвигателя, не отключенного соответствующей защитой.

Поэтому развитие теории пробоя твердой и комбинированной изоляции кабелей позволяет не только проанализировать параметры процесса развития дугового замыкания во времени, но и экспериментально оценить эффективность специализированных релейных защит, устанавливаемых на присоединениях сети 6-10 кВ с двигательной и трансформаторной нагрузкой.

Данные мониторинга перенапряжений в кабельных сетях 6-10 кВ с неэффективно заземленной нейтралью свидетельствуют о том, что при дуговом ОЗЗ в бумажно-пропитанной изоляции (БПИ) кабеля зачастую инициируется неустойчивое замыкание фазы на землю, характеризующееся частыми (как правило, каждые 1-2 периода промышленной частоты) неуспешными попытками выхода на восстановление электрической прочности изоляции и повторными пробоями, что приводит к переходу однофазного замыкания в короткое замыкание. Длительность существования такого режима замыкания на землю в сети



с остаточным током замыкания до 10-15 А может составлять от 0,04-0,06 с до единиц и десятков минут и не привести в итоге к прогоранию фазной изоляции и образования проводящего мостика «фаза-земля» на определенной стадии дугового ОЗЗ.

Исследования Ф.А. Лихачева еще в 1970-х гг. показали, что при емкостных токах сети 30-150 А время перехода перемежающегося дугового ОЗЗ в «металлическое» в сетях на основе кабелей с БПИ условно пропорционально току замыкания и составляет всего 0,3-1,5 с. Таким образом, при дуговом ОЗЗ в кабельной сети именно исход второго и каждого из последующих пробоев (число которых, как можно показать, может исчисляться сотнями и тысячами), в зависимости от энерговыделения в канале дуги в каждый момент времени, определяет степень локального разрушения изоляции и соответствующую вероятность повреждения междуфазной изоляции.

Как показали результаты мониторинга и натурных испытаний, а также исследования [2], решающее влияние на этот процесс оказывают:

- параметры дугового промежутка (нелинейное сопротивление дугового промежутка/дуги и его восстанавливающаяся электрическая прочность);
- гармонический состав и значение токов, протекающих в цепи замыкания на землю в месте повреждения и первичные параметры КНП.

Следует подчеркнуть, что при рассмотрении указанных вопросов никогда не принималось в расчет наличие в КНП высших гармоник, которые, как правило, тем выше, чем больше емкостный ток ОЗЗ и которые в пределе могут превышать его. При этом высшие гармоники, а также активные составляющие тока замыкания не компенсируются дугогасящими реакторами (ДГР). Степень их влияния на снижение электрической прочности и ресурса изоляции практически не изучена, однако полагается, что такое влияние крайне негативно. Между тем, еще в 1950-1960-х гг. были разработаны мероприятия по компенсации токов высших гармоник в

КНП с использованием специальных высоковольтных фильтров [3], которые, однако, никогда не применялись в отечественных сетях.

Помимо нескомпенсированного емкостного тока сети в остаточном токе замыкания на землю всегда присутствует активная составляющая, значение которой зависит от активных утечек по изоляции сети. Для нормальной изоляции кабелей принимается такое значение активного тока утечек IG, при котором активная проводимость сети составляет 5% от емкостной. Однако для состаренной изоляции КЛ, что характерно, например, для городских сетей, активная проводимость достигает 10-15 % от емкостной. Фактические значения утечек по изоляции могут быть использованы как косвенный диагностический признак при определении степени старения изоляции.

Для оценки уровней высших гармоник в КНП, активных и реактивных составляющих в токе ОЗЗ, определения реакции сети на замыкания на землю необходимо выполнение опытов искусственных металлических (а при необходимости – и дуговых) ОЗЗ с осциллографированием сигналов тока замыкания, фазных напряжений, тока ДГР и т.д.

Целью настоящего исследования является анализ содержания высших гармоник в осциллографированном токе замыкания на землю, а также оценка влияния гармонических составляющих на надежность дугогашения в точке однофазного пробоя, а также на

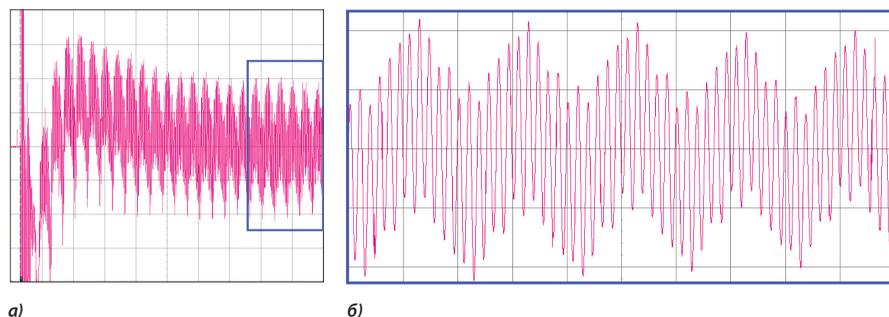
электрическую прочность кабельной изоляции.

Анализ экспериментальных данных

В качестве исходных данных используем результаты экспериментальных измерений токов однофазного замыкания в сети ГРУ-6 кВ мощной ТЭЦ, питающей несколько районов города с населением более 500 тыс. человек, а также ряд цехов крупного химического предприятия с большим количеством приводных высоковольтных электродвигателей. Обобщенная схема измерений представлена в [1]. При осциллографировании емкостного тока сети методом искусственного замыкания фазы сети на землю в связи с недопустимостью отключения потребителей было принято решение провести определение тока ОЗЗ для полной схемы ГРУ-6 кВ с точной настройкой компенсации.

Анализ характерных осциллограмм тока через место замыкания (рис. 1) показал, что в его составе содержатся высшие гармонические составляющие большой амплитуды, наиболее сильно выражена одиннадцатая гармоника, вызывающая биения тока ОЗЗ.

Обработка полученных осциллограмм токов однофазного замыкания для определения гармонического состава и амплитуд и фаз гармоник тока ОЗЗ была произведена на основе преобразования Фурье для установившегося режима замыкания. Были выделены активная и реактивная составляющие остаточного тока, значе-



а) б)
Рис. 1. Осциллограммы тока установившегося однофазного замыкания на землю на шинах ГРУ-6 кВ городской ТЭЦ с разверткой по току 80 А/дел: а) исходная – 50 мс/дел; б) растянутая – 10 мс/дел



ние основной гармоники составило 30,6 А, в том числе: реактивная составляющая от дугогасящего реактора – 27,5 А; активная составляющая от утечек по всей изоляции электрически связанной сети 6 кВ – 14,3 А. Измеренный косвенно ток ДГР в опыте оказался равен 301 А, а полный емкостный ток ОЗЗ – 273,5 А. Видно, что при уровне перекомпенсации емкостной составляющей частоты 50 Гц немногим более 10% значение остаточного тока ОЗЗ определяется в основном высшими гармониками, а также активной составляющей, характеризующей интегральную степень старения изоляции сети.

Гармонический анализ осциллограмм тока «металлического» замыкания на землю показал, что в составе тока ОЗЗ содержится очень высокий уровень высших гармонических составляющих, причем величина тока 11 гармоники в сигнале тока ОЗЗ достигает 78,9 А и в 2,5 раза превышает остаточный ток промышленной частоты (30,6 А). Результаты гармонического анализа тока однофазного замыкания на землю в исследуемой сети 6 кВ представлены в табл. 1. Отметим, что все гармоники четного ряда выражены относительно слабо: их доля в сигнале промышленной частоты не превышает 4-5%.

Для интегральной оценки уровня

токов высших гармоник удобно использовать понятие действующего «тока искажения», вычисляемого как среднеквадратическое значение составляющих спектра тока замыкания с известными амплитудами:

$$I_{\text{горм}} = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2} \quad (1)$$

где n – номер гармоники, начиная со 2-й. Рассчитанный по формуле (1) «ток искажения» для полного ряда четных и нечетных гармоник №№2 – 13 из табл.1 составил 79,59 А или 2,57I₁. Можно показать, что вклад четных гармоник в искажение сигнала тока замыкания здесь незначителен, что также справедливо и подтверждено экспериментально для подавляющего большинства сетей 6-35 кВ. Следует отметить, что фаза каждой гармоники произвольна в текущий момент времени и не может служить в качестве объективного параметра при математическом моделировании источников высших гармоник.

Как видно из табл. 1, вклад указанных нечетных гармоник (3, 5, 7, 9, 11) в величину результирующего сигнала можно считать определяющим. Влияние составляющих частотой свыше 700 Гц (15-й и последующих гармоник) на амплитуду тока замыкания оказалось несущественно. Гистограмма рис. 2 отражает процентное содержание в токе ОЗЗ высших гармонических составляю-

щих, имеющих заметную долю в общем сигнале.

Сравнение гармонического состава фазных напряжений в нормальном режиме и гармонического состава напряжений здоровых фаз во время ОЗЗ показывает, что в ряде случаев можно наблюдать увеличение процентного содержания отдельных гармоник. В рассматриваемой сети ГРУ-6 кВ ТЭЦ происходило увеличение процентного содержания составляющих напряжения высших частот в области 11-й гармоники более чем в 1,4 раза относительно напряжения той же гармоники в нормальном режиме (0,65% от сигнала 50 Гц).

В отдельных случаях, как показали эксперименты в сети 10 кВ электроснабжения металлургического предприятия, значения ряда гармоник фазных напряжений увеличиваются при ОЗЗ (по сравнению с их содержанием в напряжениях в нормальном режиме) в 3-9 раз, а в наиболее «тяжелых» режимах такое повышение может достигать 17-20 раз. Это свидетельствует о возможности роста амплитуд гармоник фазных напряжений с течением времени замыкания, что может привести к возникновению уровней перенапряжений, достаточных для развития аварийной ситуации. Кроме того, в резонансных режимах, иногда возникаю-

Табл. 1. Результаты амплитудно-фазового анализа наиболее выраженных гармонических составляющих тока однофазного замыкания на землю в сети ГРУ-6 кВ ТЭЦ

№ гармоники	ω, рад/с	Начальная фаза, рад	Амплитуда сигнала, А	Действующее значение, А	Доля от I _{ОЗЗ} 50 Гц, %
1	314	2,492	43,78	30,96	100,0
2	628	0,428	0,252	0,178	0,60
3	942	-3,071	4,570	3,230	10,4
4	1256	1,243	0,392	0,277	0,90
5	1570	-3,005	9,680	6,850	22,1
6	1884	0,605	0,181	0,128	0,40
7	2198	-0,066	8,420	5,950	19,2
8	2512	2,793	0,408	0,288	0,90
9	2826	-0,288	3,440	2,430	7,90
10	3140	0,420	1,260	0,891	2,90
11	3454	2,929	111,6	78,91	255
12	3768	-2,449	0,632	0,447	1,40
13	4082	-2,368	4,070	2,880	9,30

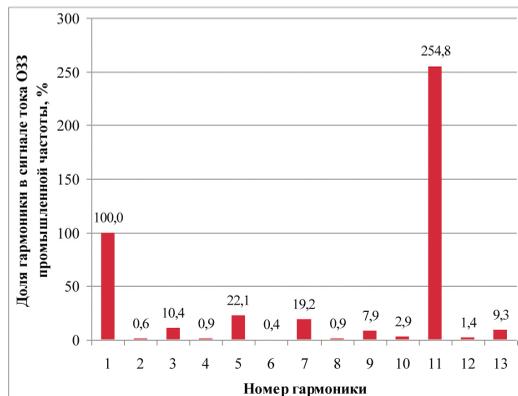


Рис. 2. Гистограмма относительного гармонического состава тока ОЗЗ в сети ГРУ-6 кВ ТЭЦ

щих при ОЗЗ (сюда относятся и биения тока замыкания при нестационарном резонансе на высших гармониках), до 10-15% возрастает коэффициент искажения синусоидальности напряжения, в то время как допустимый уровень согласно ГОСТ [4] составляет 5%. Исследования процессов, сопровождающих ОЗЗ, также показывают, что при увеличении емкостного тока сети более 50-100 А резонансный диапазон смещается в область более низких частот (до 500-1000 Гц).

Надежность гашения дуги однофазного замыкания

Очевидно, для каждого КНП сети (а этих контуров может быть несколько, в зависимости от текущего режима работы) существуют свои резонансные частоты. Процессы, происходящие в фазах и нейтрали сети при замыканиях на землю – как «металлических», так и дуговых – могут быть следствием таких резонансов на промышленной частоте. Резонансные частоты в контуре тока ОЗЗ определяются, вероятно, не только параметрами КНП и текущим составом нагрузки, но и физическим расположением точки замыкания. Например, большое переходное сопротивление в месте замыкания способствует демпфированию резонансных процессов (по крайней мере, в напряжениях сети) независимо от их частотного спектра. Указанные факторы обуславливают нестабильность проявления отдельных гармонических составляющих в токе ОЗЗ, а также возможное изменение их величины при замыканиях на землю в сети в разных исходных условиях.

В целом можно утверждать, что степень выраженности отдельных гармоник в токе ОЗЗ для широкого класса сетей 6-35 кВ в зна-

чительной мере определяется параметрами включенных в КНП устройств и выражается следующими факторами:

- состояние контура заземления энергообъекта (целостность контура и соответствие значений сопротивления заземления нормируемым на промышленной частоте и импульсных воздействиях);
- наличие в сети «специфических» нелинейных энергоустановок (сталеплавильные, рафинировочные и рудовосстановительные печи, фильтрокомпенсирующие устройства и пр.);
- наличие в нейтрали дугогасящих устройств (реакторов, трансформаторов), линейность их ВАХ и принцип регулирования тока компенсации, в частности возможность введения дополнительных сигналов промышленной частоты в нейтраль сети;
- количество и мощность электрических машин, применение устройств частотного регулирования и плавного пуска электродвигателей, в том числе приводов технологических агрегатов.

Представляется логичным следующее утверждение: при наличии в сигнале тока ОЗЗ значительной доли высших гармоник вероятность повторных пробоев изоляции, а следовательно, и область ее разрушения, при дуговом замыкании повышается. Это связано с тем, что положительный или отрицательный исход процесса дугогашения зависит от состава тока ОЗЗ и определяется в значительной степени «поведением» суммарного тока в точке замыкания при его переходах через ноль. При значениях этого тока более 10-15 А дуга с вероятностью, превышающей 0,5, будет гаснуть не в первый, а в любой из последующих переходов тока через ноль, или вообще гореть длительно. Перенапряжения, превышающие (2,5-2,8) $U_{ф, max}$ для таких режимов нехарактерны, однако проблема заключается именно в большой длительности процесса замыкания и отражается в неизбежном снижении пробивного напряжения изоляции неповрежденных фаз. Этот эффект, прочем, может проявиться позже, будучи (в отсутствие систем регистрации перенапряжений в сети 6-10 кВ) неотличим от иных факторов старения электрической изоляции.

Анализ большого количества экспериментально зарегистрированных осциллограмм (более пятисот) показывает, что в целом пробой изоляции на землю происходят случайно, с интервалом, который может составлять от 5 мс (перемежающаяся дуга) до десятков периодов



50 Гц и даже единиц секунд и минут (прерывистая дуга). При этом первое условие в большей степени характерно для воздушных промежутков, а второе – для кабельной изоляции. Амплитуда перенапряжений в сети, независимо от типа изоляции, определяется амплитудой напряжения пробоя дугового промежутка, которое зависит от типа изоляции и состава тока замыкания и в ряде случаев может оставаться постоянным в течение долгого времени, вызывая длительное (до 40 минут) горение прерывистой дуги [5].

Поэтому в некоторых электрических сетях типовых устройств компенсации емкостного тока – ДГР, в ряде случаев может оказаться недостаточно для обеспечения надежной работы изоляции сети при ОЗЗ. Наибольшую опасность некомпенсируемые высшие гармоники представляют для разветвленных кабельных сетей 6-10 кВ с токами замыкания свыше 50-100 А, где относительно высока вероятность развития суб- и ультрагармонических резонансных процессов, и, вместе с тем, сильно выражен эффект снижения качества электроэнергии в части гармонических составляющих напряжения. Универсальным решением задачи защиты оборудования в режимах ОЗЗ можно признать отключение фидеров с замыканием, но в условиях электроснабжения ответственных объектов городской инфраструктуры или цехов промышленных предприятий с непрерывным циклом производства, в отсутствие быстродействующего АВР такое решение вряд ли применимо.

Гипотеза влияния высших гармоник на напряжение пробоя кабельной изоляции

Исследование высших гармоник в токе замыкания на землю представляет интерес в плане объяснения влияния их на надежность работы высоковольтной изоляции сети. Эта задача до настоящего времени не нашла адекватного решения.

Согласно нашим исследованиям, сочетание определенных условий (срок службы изоляции; периодичность и уровень постоянного напряжения профилактических высоковольтных испытаний; значение тока ОЗЗ и наличие в нем высших гармоник; уровень перенапряжений в режиме перемежающегося замыкания на землю и т.д.) кардинально влияет на скорость расширения канала пробоя, т.е. степень электрической прочности изоляции. Снижение происходит по экспоненциальному закону в зависимости от количественного содержания высших гармоник в токе ОЗЗ. Это справедливо в

первую очередь для статорной изоляции электрических машин и кабельной высоковольтной изоляции.

Вероятно, существует прямая зависимость между уровнем искажения тока замыкания на землю высшими гармониками $\sum I_{garm}$, временем горения дуги при ОЗЗ T_{dug} и скоростью восстановления электрической прочности изоляционного промежутка $V_{ВЭП}$, где происходит зажигание и погасание дуги:

$$V_{ВЭП} = f(\exp)(I_{garm}, T_{dug}, \dots) \tag{2}$$

Поясним зависимость (2), для простоты пренебрегая влиянием фазы гармоник на напряжение, приложенное к изоляционному промежутку, который пробивается.

Поскольку каждая гармоника в токе ОЗЗ вызывает некоторое падение напряжения на сопротивлении дуги, пропорциональное току этой гармоники, происходит «дополнительное» повышение воздействующего на изоляционный промежуток результирующего напряжения. Это должно приводить к снижению скорости восстановления электрической прочности в канале горения дуги и повышению вероятности повторных пробоев. Логично предположить, что чем выше содержание высших гармоник в токе ОЗЗ, тем быстрее достигается напряжение пробоя, которое, что следует подчеркнуть, после каждого пробоя снижается за счет развития дугового канала. Однако эта гипотеза «начинает работать» при относительно высоком эквивалентном сопротивлении дуги и всей цепи, включенной в КНП, что может обеспечиваться, например, при больших переходных сопротивлениях в точке ОЗЗ.

Это связано вот с чем. Усредненное сопротивление самой дуги при ОЗЗ оценивается диапазоном 0,5-10 Ом, с возможным ограничением диапазона для кабельных сетей 6-10 кВ до 2,8-6,5 Ом [6]. Динамическое сопротивление дуги вообще определяется стадией ее горения и лежит в диапазоне $10^{-1} \dots 10^{-4}$ Ом. Следовательно, даже при наличии гармонических составляющих с абсолютными значениями в десятки ампер (скажем, до 100 А) падение напряжения от них на дуге составит не более 0,1-1,0 кВ. При электрической прочности изоляции на уровне критической ионизации, принятом равным 30 кВ/мм для бумажно-пропитанной изоляции и 40 кВ/мм для изоляции СПЭ такой вклад от высших гармоник в напряжение пробоя оценивается относительной величиной до 4,3% для БПИ и до 7,5% для СПЭ. Приведенная гипотеза



Ширковец Андрей Игоревич.

Дата рождения: 06.09.1983 г., В 2006 г. окончил Новосибирский государственный технический университет, кафедру «Техника и электрофизика высоких напряжений». Ведущий инженер научно-исследовательского отдела ООО «Болид».

справедлива для кабелей напряжением 6-10 кВ при толщине изоляции на радиальном направлении «фаза-заземленная оболочка» до 1,3 мм для бумажно-пропитанной и до 3,0 мм для СПЭ изоляции.

Вероятно, следующим шагом должна быть оценка целесообразности численного учета снижения ресурса основной изоляции сети (в том числе кабельных линий и электрических машин) при наличии в токе ОЗЗ высших гармоник с амплитудой, сравнимой со значением реактивной составляющей тока замыкания промышленной частоты. Это связано с тем, что, во-первых, о существенном снижении пробивного напряжения по рассматриваемой причине пока говорить не приходится, а во-вторых, доля устойчивых и длительных ОЗЗ в кабельных сетях относительно невелика (большая часть ОЗЗ – дуговые и прерывистые, с генерацией гармоник низких амплитуд практически в непрерывном спектре). К тому же в подавляющем большинстве случаев релейная защита от замыканий на землю для присоединений с электрическими машинами, в первую очередь технологическими электроприводами, выполняется с действием на отключение.

Поэтому процесс снижения электрической прочности изоляции, с учетом его зависимости от параметров напряжений промышленной частоты, может быть весьма «растянут» во времени и малозаметен на фоне остальных факторов старения изоляции. Тем не менее, с определенной долей вероятности можно утверждать, что в сети, насыщенной высшими гармониками, проявляющимися в том числе в токе ОЗЗ, ресурс изоляции электрооборудования расходуется быстрее, чем в сети с малым их содержанием.

Выводы

1. В силу естественного наличия в токе замыкания на землю гармонических составляющих в широком спектре частот вплоть до 3-4 кГц ток ОЗЗ никогда не является чисто емкостным, что обычно не учитывается в расчетах и при выборе устройств компенсации. Амплитудные и частотные характеристики гармонических составляющих в токе замыкания на землю определяются в основном параметрами нелинейных шунтов намагничивания силовых и измерительных трансформаторов и параметрами реактивной нагрузки.

2. Высшие гармоники в токе ОЗЗ, которые в ряде случаев превышают составляющую про-

мышленной частоты, могут приводить к неоднократному и длительному искажению формы питающего напряжения и ухудшению качества электроэнергии.

3. Существенным условием ускоренной деградации изоляции силовых кабелей, а также витковой и статорной изоляции обмоток электрических машин является не только воздействие высокочастотных и импульсных перенапряжений, но и возникающие в процессе ОЗЗ резонансные процессы на промышленной частоте, что подтверждается экспериментальными и расчетными исследованиями, например [7].

4. С целью оценки опасности ускоренного снижения электрической прочности изоляции при наличии в токе ОЗЗ и фазных напряжениях сети гармоник в спектре частот 50-4000 Гц необходима проверка предложенной гипотезы влияния высших гармоник на напряжение пробоя кабельной изоляции.

5. Для снижения негативного влияния высших гармоник в КНП на надежность работы высоковольтной изоляции следует рассмотреть возможность применения в сетях с высокими уровнями гармонических составляющих в токе ОЗЗ специальных гармонических фильтров, включаемых в нейтральную точку сети. Целесообразность этого мероприятия должна быть обоснована экспериментальными измерениями переходных процессов при замыканиях на землю.

Литература:

1. Ширковец А.И., Ильиных М.В. Методические подходы к осциллографированию процессов при однофазных замыканиях на землю в электрических сетях 6-35 кВ// Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – спец. вып. №1. – с. 44-51.
2. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
3. Вильгельм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах/ Пер. с англ. под ред. Д.В. Разевига. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 415 с.
4. ГОСТ 13109-97 (2002). Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
5. Сарин Л.И., Ильиных М.В., Ширковец А.И., Буянов Э.В., Шамко В.Н. Анализ результатов мониторинга процессов при однофазных замыканиях на землю в сети 6 кВ с дугогасящими реакторами и резисторами в нейтрали// Энергоэксперт. – 2008. – № 1. – с.56-64.
6. Солдатов В.Ф., Кобазев В.П., Чупайленко А.А. Оценка сопротивления дуги при однофазном замыкании на землю// Электрические станции. – 1996. - №8. – с. 47-48.
7. Иванов А.М., Шишкина О.Г., Ильиных М.В., Дрожжина И.Л., Сарин Л.И. Замыкания на землю в электрической сети 10 кВ с источниками высших гармоник// Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ: Труды Третьей Всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск, 2004. – с. 44-49.