

# ВЛИЯНИЕ РАСТУЩИХ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ОБОРУДОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

АВТОР:

РЕНЕ ПИТЕР ПОЛЬ  
СМИТС (RENÉ PETER  
PAUL SMEETS),  
PROF., DR.  
ЛАБОРАТОРИЯ  
БОЛЬШИХ ТОКОВ DNV  
KEMA (KEMA TESTING,  
INSPECTIONS &  
CERTIFICATION)

**В** настоящее время рост токов короткого замыкания (КЗ) в электроэнергетических системах является общемировой тенденцией. Эти токи оказывают сильнейшее влияние на всю энергосистему. Испытания оборудования являются ключевым этапом в цепи процедур по обеспечению качества и безопасности, призванной предотвращать отказы систем при коротких замыканиях. В статье на основе собственных

(и иных) лабораторных исследований приводится обзор эффектов воздействия токов КЗ на оборудование передачи и распределения электроэнергии, которым снабжены эти системы. Исследования проводились при эксплуатационных нагрузках и в режимах экстремальных нагрузок при КЗ. Обсуждаемые результаты проиллюстрированы стоп-кадрами скоростной видеосъемки, полученной во время испытаний.



Испытательный центр KEMA  
в г. Арнем (Нидерланды)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Существует ряд факторов, обуславливающих рост токов короткого замыкания в современных энергосистемах:

- концентрация электростанций (тепловых, атомных, ветряных) на сравнительно небольших территориях;
- увеличение доли местной генерации энергии (которая оказывает влияние на оборудование распределения электроэнергии, но в случае возобновляемых источников энергии с электронным управлением приводит к некоторому снижению токов КЗ в сети электропередачи, т. к. снижает потребность в крупных традиционных источниках электроэнергии);
- повышение взаимосвязанности энергосистем между собой и одновременное усложнение их структуры.

Рассматривая в качестве примера ситуацию в Нидерландах (рис. 1), мы видим явный рост тока КЗ в сети электропередачи напряжением 400 кВ [1]. На графике видно, что для всей сети медиана (50-й процентиль) значений тока КЗ возросла с 31 кА (2003 г.) до 38 кА (2013 г.) и возрастет до 43 кА к 2020 г. На некоторых участках ток КЗ превысит 63 кА, и, следовательно, необходимо как-то снизить этот ток [1]. Менеджеры предприятий должны принимать адекватные меры для ограничения тока КЗ до предельных значений, при которых обеспечивается механическая и термическая устойчивость оборудования. Есть два пути решения этой проблемы. За счет модернизации системы в целях приведения токов КЗ к уровням, которые может выдержать установ-

ленное оборудование. Это требует изменения схемы станций и/или адаптации работы подстанций. Ограничение токов КЗ, как правило, осуществляется токоограничивающими реакторами, в то время как технические решения, основанные на сверхпроводимости, пока недоступны (за исключением нескольких испытательных образцов, работающих при высоких напряжениях линий электропередачи, и небольшого числа продуктов для распределительных устройств). Изменение же конфигурации станции (например, разветвление или секционирование шины) обходится очень дорого. Второй путь решения проблемы – модернизация существующих станций таким образом, чтобы они могли выдерживать большие токи КЗ.

Рабочая группа СИГРЭ В3.22 «Методы модернизации линий и подстанций» исследует именно этот вопрос [2]. В данной статье описаны типичные воздействия очень больших токов КЗ (63 кА и выше), преимущественно на высоковольтное оборудование. В основе всех приводимых ниже рассмотрений лежат результаты испытаний при больших мощностях.

### 2.1. АСИММЕТРИЧНЫЙ ТОК КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Воздействие токов КЗ на оборудование энергосистем имеет два аспекта:

- сильное электродинамическое воздействие (механические силы) на все проводники. Важным параметром здесь является максимальное мгновенное значение силы тока КЗ, т. е. ударного тока;
- термические воздействия, связанные с нагревом проводников, а в случае

ИНФОРМАЦИЯ

## ЛАБОРАТОРИЯ БОЛЬШИХ ТОКОВ КЕМА

Годом основания компании КЕМА считается 1927 г., когда в голландском городе Арнеме в ответ на запросы электротехнической промышленности была открыта испытательная станция.

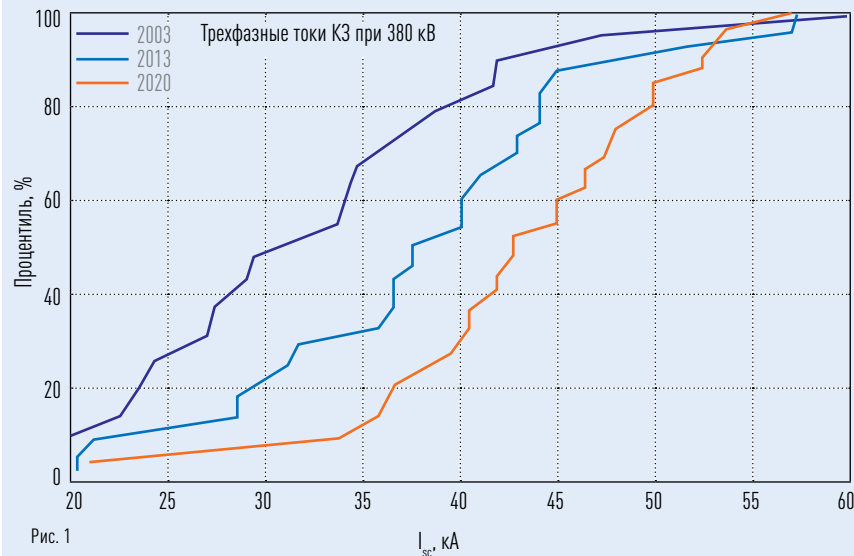
В 1930 г. создается Лаборатория больших токов (токов КЗ) для проведения силовых испытаний при высоких напряжениях.

Испытательный центр КЕМА как испытательный комплекс был открыт принцем Бернхардом Нидерландским в 1938 г.

В настоящее время в штате DNV KEMA насчитывается более 2300 экспертов, работающих в 30 странах мира. В КЕМА проводят испытания практически всех высоковольтных компонентов, используемых в системах передачи и распределения электроэнергии.

Лаборатория больших токов оборудована всеми источниками напряжения, необходимыми для испытаний промышленными частотами, испытаний напряжением грозового импульса, импульса напряжения переключения, а также испытаний на нагрев.

## РОСТ ТОКОВ КЗ В СЕТИ 400 КВ В НИДЕРЛАНДАХ [1]



дуги КЗ – также с нагревом окружающего воздуха (и резким ростом давления при возникновении дуги в замкнутых объемах). При воздействиях такого типа, помимо эффективного значения величины переменного тока (RMS), важна также длительность замыкания.

Форма волны тока КЗ сразу после возникновения в значительной степени определяется коэффициентом отношения реактивного сопротивления к активному ( $X/R$ ) в той части цепи, где произошло замыкание. Это значение связано с постоянной времени затухания апериодической компоненты тока ( $\tau$ ) и коэффициентом электрической мощности ( $\cos \varphi$ ) следующим образом:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f} \frac{X}{R};$$

$$\cos \varphi = \cos \left[ \arctan \left( \frac{X}{R} \right) \right],$$

где  $f$  – частота сети,  $X$  – реактивное сопротивление и  $R$  – активное сопротивление.

Апериодическая составляющая тока с постоянной времени затухания  $\tau$  накладывается на сигнал симметричного переменного тока. В результате сумма двух этих компонентов приобретает асимметричную форму, при этом величина максимального значения может быть значительно (до 80%) выше, чем без учета апериодической составляющей тока  $\tau$ . Это хорошо видно на рис. 2 (красной линией обозначен асимметричный ток), где показана временная диаграмма трехфазного асимметричного тока КЗ. Максимальное ударное значение асимметричного тока достигается, когда ток КЗ начинается с нулевого уровня (рис. 2). Ударный ток КЗ оказывает сильнейшее электродинамическое воздействие на все элементы электрической сети, через которые протекает асимметричный ток. Коэффициент амплитуды асимметричного тока (Asymmetrical Current Peak Factor, APF) является важным параметром, он определяется следующим образом:

$$APF = \frac{\hat{i}}{I_{rms}}$$

где  $\hat{i}$  – это ударное значение асимметричного тока, а  $I_{rms}$  – среднеквадратичное значение переменного тока. В таблице 1 приведены значения этого коэффициента для токов с промышленной частотой 60 Гц и 50 Гц, а также ряд соответствующих значений постоянной времени затухания апериодической составляющей тока.

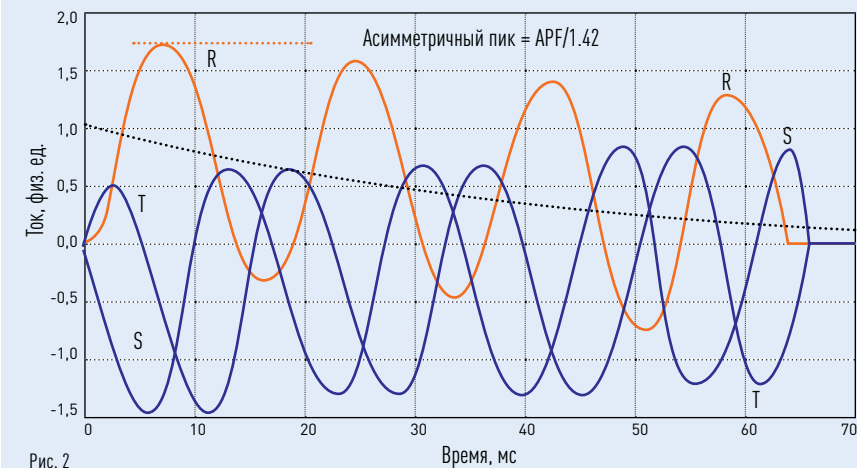
И электродинамическое, и термическое воздействия пропорциональны квадрату мгновенного значения тока

## ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА АМПЛИТУДЫ АСИММЕТРИЧНОГО ТОКА ДЛЯ ВЫБРАННЫХ ЗНАЧЕНИЙ $X/R$ ИЛИ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ЗАТУХАНИЯ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

Частота	$\tau$ [мс] →	45	60	90	120	133
50 Гц	$X/R$	14,1	18,8	28,3	37,7	41,8
	APF	2,55	2,61	2,68	2,72	2,73
60 Гц	$X/R$	16,9	22,6	33,9	45,2	50,1
	APF	2,59	2,65	2,70	2,73	2,74

Таблица 1

## АСИММЕТРИЧНЫЙ ТРЕХФАЗНЫЙ ТОК КЗ (МАКСИМАЛЬНАЯ АСИММЕТРИЯ В ФАЗЕ R) И ПОСТОЯННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ (ВЫДЕЛЕНО ШТРИХОМ) ДЛЯ НЕЗАЗЕМЛЕННОЙ ЦЕПИ ПРИ 60 ГЦ И $\tau = 45$ МС



КЗ. Следовательно, при проектировании оборудования и формировании схемы его размещения на подстанции необходимо учитывать максимальные значения коэффициента амплитуды этого тока. Испытания оборудования должны осуществляться с учетом асимметричности тока. Как описано в ряде стандартов, испытания оборудования должны осуществляться с учетом асимметричности тока.

## 2.2. ИЗМЕНЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ЗАТУХАНИЯ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

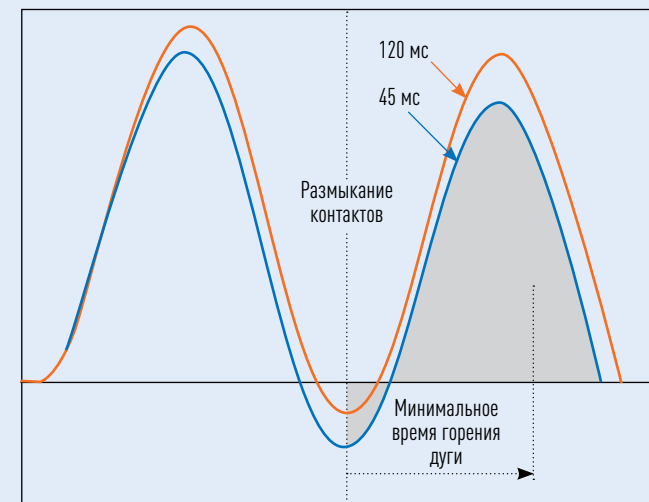
Величина постоянной времени апериодической составляющей  $\tau$  за последние годы заметно возросла [3, 4]. Основные причины этого роста следующие:

- появление локальных источников распределенной генерации внутри существующих сетей. В результате этого переходные процессы генераторов, обладающих большими постоянными времени, оказывают все большее влияние на состояние всей сети;
- использование трансформаторов с низкими потерями (меньшие потери в обмотке приводят к снижению сопротивления и, таким образом, к более высоким значениям  $\tau$ );
- использование силовых трансформаторов с повышенным реактивным сопротивлением КЗ для ограничения уровня токов КЗ в системах (повышение реактивного сопротивления КЗ приводит

к повышению  $\tau$ );  
переход на линии электропередачи с большим сечением и большим количеством проводников

расщепленных фаз, для того чтобы увеличить пропускную способность существующих линий (у линий электропередачи

## ПРЕРЫВАНИЕ АСИММЕТРИЧНОГО ТОКА (С МАКСИМАЛЬНОЙ АСИММЕТРИЕЙ) ДЛЯ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ЗАТУХАНИЯ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ $\tau = 45$ МС И 120 МС



## КОНТАКТЫ РАЗЪЕДИНИТЕЛЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ТОКА КЗ



Слабое дугообразование при действующем значении тока 80 кА и кратковременном 130 кА в течение 1 с (испытания кратковременным током)

Рис. 4



Разрушение контактов при действующем значении тока 80 кА и ударном 210 кА в течение 0,2 с (испытания пиковым током)

с ультравысоким уровнем УВН > 800 кВ постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока  $\tau > 100$  мс); более широкое использование реактивных компо-

нентов для ограничения КЗ (например, реакторов).

Все это привело к увеличению ударного значения асимметричного тока в сети. В результате анализа сложившейся ситуации в соответствующ-

щий стандарт МЭК для выключателей (IEC 62271-100) были включены следующие значения постоянной времени (помимо традиционной  $\tau = 45$  мс):

- 120 мс для номинальных напряжений  $\leq 52$  кВ (как правило, для сетей с преобладанием трансформаторов);
- 60 мс для номинальных напряжений от 72,5 кВ до 420 кВ включительно;
- 75 мс для номинальных напряжений 550-800 кВ;
- 120 мс для номинальных напряжений > 800 кВ (предложено внести в будущие ревизии стандарта МЭК (IEC 62271-100)).

В стандарте IEEE C37.09 заявлена  $\tau$ , равная 45 мс, как предпочтительное значение, однако любое другое значение, указанное производителем оборудования, также приемлемо.

Ранее значение  $\tau$ , равное 45 мс, считалось приемлемым для всех случаев, однако сейчас это уже не так: в настоящее время эксплуатационные значения  $\tau$  часто превышают те, при которых оборудование было испытано.

### 2.3. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Дуга в выключателях возникает в момент разъединения контактов и длится до первого прохождения тока через ноль. Последнее происходит после окончания минимального времени горения дуги (время, в течение которого выключатель не может прервать ток). Энергия дуги обычно выражается как интеграл по времени от момента замыкания контактов ( $cs$ ) до момента восстановления коммутации ( $csz$ ) (в предположении, что напряжение

дуги  $U_a$  есть величина постоянная):

$$E_a = U_a \int_{cs}^{csz} i dt.$$

Этот интеграл определяется в основном  $\tau$  (рис. 3, для  $\tau = 45$  мс и 120 мс, энергия дуги на 25% выше при  $\tau = 120$  мс).

Поскольку стандартные выключатели испытываются при  $\tau = 45$  мс, возникает вопрос оценки качества коммутации этих выключателей в условиях реальных эксплуатационных нагрузок при более высоких значениях  $\tau$ . Наиболее простой подход был сформулирован в [3] и раскрыт в [5]: «Если применяется выключатель для прерывания тока на 1 шаг (по шкале предпочтительных чисел, определяющих номенклатуру изделий) ниже своего номинала, он будет приемлемо работать и при значении отношения  $X/R$  или постоянной времени на один шаг выше стандартного тестового значения  $\tau$ , равного 45 мс».

Более точный метод, описанный в [5, глава 9], основан на сравнении последнего действующего значения асимметричного тока (в случае повышенного значения  $\tau$ ) с результатами испытаний при стандартных значениях  $\tau$ . Похожий метод вычислений, основанный на занижении значений переменного тока в ответ на повышение значений  $\tau$ , описан в [6].

### 3. ВОЗДЕЙСТВИЕ СВЕРХВЫСОКИХ ТОКОВ КЗ НА ОБОРУДОВАНИЕ

В связи с ростом токов короткого замыкания возникает вопрос о реакции существующего оборудования на такие нагрузки. Чрезвычайно высокие уровни токов КЗ приводят к серьезным последствиям. Было реализовано несколько проек-

## ДУГА 50 КА В ГИРЛЯНДЕ ИЗОЛЯТОРОВ, ИНИЦИИРОВАННАЯ ПРИ ПОМОЩИ ПЛАВКОГО ПРОВОДА



Дуга горит между роговыми разрядниками



Уход дуги на линию электропередачи

Рис. 6

## СЖАТИЕ И ОТТАЛКИВАНИЕ РАСПОРОК ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ТОКИ КЗ (50 КА, 0,3 С)



Рис. 7

## ДУГООБРАЗОВАНИЕ НА СЖАТЫХ РАС- ЩЕПЛЕННЫХ ФАЗАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ



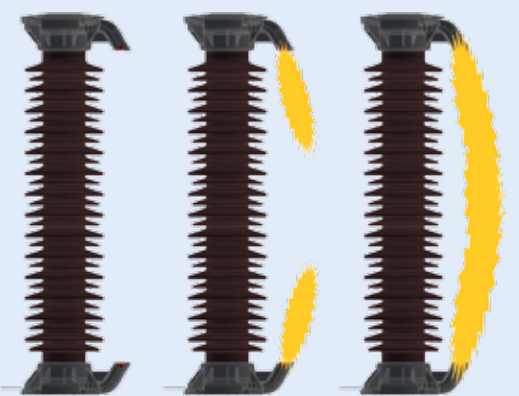
Рис. 8

### ИНФОРМАЦИЯ

#### УДАРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ DNV KEMA

- 4 генератора суммарной мощностью 10 000 МВА (Арнем, Нидерланды);
- 2 генератора суммарной мощностью 3 250 МВА (Чалфонт, США);
- 2 генератора суммарной мощностью 5 000 МВА (Прага, Чешская Республика).

## ИСПЫТАНИЯ ОГРАНИЧИТЕЛЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ



Принцип работы сброса давления в ОПН. Слева: ОПН находится в нормальном состоянии. В центре: внутренняя дуга в отказавшем ОПН, клапаны сброса давления открыты, и газ начинает выпускаться через каналы сброса давления. Справа: два газовых потока пересекаются, и внутренняя дуга безопасно переходит наружу. Это должно происходить в пределах 5-10 мс до первого пикового тока

Рис. 5



Развитие внутренней дуги при испытаниях ОПН при 80 кА

## СЖАТИЕ СБОРНОЙ ШИНЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СИЛ ПРИ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ НА 80 КА ПРОТОТИПА ПОДСТАНЦИИ



Рис. 9

тов, в рамках которых при помощи полномасштабных лабораторных испытаний проводилась оценка последствий роста тока КЗ выше определенной величины (как правило, исследовалось повышение тока с 63 до 80 кА, а в одном случае – даже до 100 кА). Спрос на испытания при экстремально высоких токах КЗ стал особенно заметен в последние несколько лет.

### 3.1. ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

В КЕМА были испытаны несколько высоковольтных выключателей для тока 80 кА (до 550 кВ), в том числе проводились и полные синтетические испытания при максимальном напряжении. Эти выключатели спроектированы для экстремальных токов КЗ, и, если они сертифицированы, крайне высокие токи КЗ не должны вызывать беспокойства. Как известно, основной способ увеличить отключающую способность – установить конденсаторы (за исключением выравнивающих)

## ДУГООБРАЗОВАНИЕ ИНДУЦИРОВАННЫМИ (НАВЕДЕННЫМИ) ТОКАМИ ВОКРУГ ГЕНЕРАТОРНОГО ТОКОПРОВОДА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА УДАРНЫЕ ТОКИ 850 КА (ПИКОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ)



Рис. 10

между вводом и землей. Цель такой процедуры – замедлить стремительный рост переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН), который связан с током КЗ на линии [7]. Первоначальная скорость роста ПВН пропорциональна току КЗ на линии, в то время как конечные значения ПВН от него не зависят. Если конденсаторы (иногда крупные) размещаются непосредственно на дугогасящем промежутке (самое оптимальное решение), разъединители должны отключать оставшийся емкостный ток.

В любых ситуациях контакты выключателя должны оставаться в замкнутом состоянии при прохождении большого тока КЗ. В ряде случаев (в зависимости от геометрии контактов) для предотвращения размыкания контактов может потребоваться значительное физическое воздействие для поддержания их в контактном состоянии. Особенно это важно для торцевых контактов, используемых в вакуумных выключателях. При пиковом значении асимметричного

тока 200 кА требуемое усилие – 10 кН [8]. Однако, по имеющимся данным, вакуумные выключатели способны длительно проводить ток 10 кА и прерывать ток величиной 100 кА [9]. Для данного оборудования необходимо использовать стандарт МЭК (IEC) 62271-100.

Самый высокий ток отключения имеют генераторные выключатели, которые показали способность надежно прерывать ток, значительно превышающий 200 кА [10]. Поскольку их эксплуатация (и, соответственно, условия возникновения КЗ) значительно отличается от эксплуатации стандартных выключателей, для них существует отдельный стандарт IEEE C37-013.

### 3.2. РАЗЪЕДИНИТЕЛИ

Контакты разъединителей должны оставаться в замкнутом состоянии даже при прохождении максимального тока КЗ. Это проверяется (как указано в МЭК (IEC) 62271-102) в ис-

## МОЩНОЕ ДУГООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ГИБКОГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ РАЗДВИЖНОГО РАЗЪЕДИНИТЕЛЯ НА 80 КА С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПОВРЕЖДЕНИЕМ ПРОВОДНИКА (СПРАВА)



Рис. 11

пытаниях на выдерживание ударных токов (полный пиковый асимметричный ток; длительность испытания, как правило, 0,2 с) и в испытаниях кратковременным током (без апериодической составляющей тока, стандартная длительность – 1 с). Возникающие большие электродинамические силы расталкивают контакты. Можно использовать специальное оборудование, которое, напротив, с помощью этих электродинамических сил прочно прижимает контакты друг к другу. Однако это оборудование должно быть таким, чтобы сжатие не приводило к необратимым деформациям (особенно в случае пантографных разъединителей). Поскольку электродинамическая сила пропорциональна квадрату мгновенного значения тока (в случае однофазного тока), в испытаниях максимальным током необходимо точное моделирование ударного тока.

Необходимо избегать замыканий, поскольку это влечет сильный рост сопротивления контактов и может приводить к образованию контакт-

ных сварок. Тепловая стойкость проверяется в испытании кратковременным током. На рис. 4 показаны системы контактов при протекании значительного тока КЗ. Заметим, что вследствие наличия дополнительной (паразитной) индуктивности при прохождении тока по правой стороне основной ток проходит через левую часть контакта.

Испытания могут проводиться на однофазных разъединителях, однако сеть должна обязательно быть трехфазной, для того чтобы создать электродинамические условия, схожие с условиями подстанции.

### 3.3. ОГРАНИЧИТЕЛИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

В случае отказа ограничителя перенапряжений (ОПН) образовавшаяся дуга не должна приводить к взрыву оболочки и корпуса. Был проведен ряд испытаний на способность сбрасывать давление,

## ДЕФОРМАЦИЯ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ТОКОВ КЗ



Рис. 12

когда внутри разрядника инициируется КЗ с помощью плавкого провода или поданного перенапряжения. Испытания были организованы так, что для предотвращения взрыва дуга моментально, еще на начальных фазах, должна «выноситься» за пределы корпуса разрядника [11]. Этот процесс схематично показан на рис. 5, там же представлены снимки реальных испытаний при формировании дуги на полимерном ОПН при 80 кА. Последовательность процедур испытания изложена в МЭК 60099-4. Еще более значительные нагрузки возникают, когда с помощью батареи конденсаторов импульсы тока накладываются на токи короткого замыкания промышленной частоты. Недавно в лабораториях КЕМА прошли полномасштабные синтетические испытания разрядников при протекании тока КЗ силой 31,5 кА при 245 кВ, наложенного на ударный выброс тока силой 447 кА и частотой 3 кГц из батареи добавочных конденсаторов [12].

## ДУГООБРАЗОВАНИЕ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПОЛНЫМ РАЗРУШЕНИЕМ РЕАКТОРА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ КРАТКОВРЕМЕННЫМ ТОКОМ



Рис. 13

### 3.4. ИЗОЛЯТОРЫ

При возникновении дуги КЗ между роговыми разрядниками гирлянды изоляторов должны оставаться неповрежденными [13]. Испытания на воздействие электрической дуги подтверждают, что гирлянды изоляторов остаются структурно невредимыми даже при очень сильных термических воздействиях со стороны находящейся рядом дуги. В испытании должны имитироваться механические (вес проводов) и электромагнитные воздействия (правильный выбор пути прохождения тока КЗ). По рис. 6 можно составить представление о том, как проходят испытания на воздействие дуги при 50 кА на очень длинной гирлянде изоляторов.

Стоит отметить сжатие четырехпроводной высоковольтной линии (ВЛ) с расщепленными фазами, по которой проходит ток. В ряде случаев (рис. 6) дуга покидает роговой разрядник и коммутирует в ВЛ, что приводит к повреждению проводника. Движение открытой дуги по направлению от ее источника является естественным и общеизвестным явлением.

Испытания электрической дугой 100 кА [14] показали значительный рост числа сломанных юбок изоляторов при повышении силы тока. Поэтому следует конструировать контакты рогового разрядника таким образом, чтобы предотвращать эрозию за счет удерживания дуги в приемлемых пределах. Было обнаружено также, что разрушения, связанные с дугowymi струями, прямо пропорциональны увеличению ампер-секунд при горении дуги.

### 3.5. КОМПОНЕНТЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

При прохождении тока КЗ в проводах возникают значительные электродинамические силы, которые стремятся сблизить расщепленные фазы. Это приводит к значительным механическим воздействиям на распорки-гасители. В случае неправильной конструкции или при повышении расчетного тока КЗ существует риск утраты внутрифазных распорок, как показано на рис. 7. Помимо этого, из-за столкновения

проводов между собой происходит деформация внутренних структур проводов, особенно в так называемых квадрупольных проводниках (четыре провода на фазу). Было выявлено в испытаниях, что 7-процентные деформации сталеалюминиевых проводов возникают начиная с токов 100 кА (пиковое значение – 270 кА; 0,34 с; длина образца 190 м). Вследствие соприкосновения проводов, их оплавления и коммутации несимметричного тока возможно образование дуги между проводами (рис. 8, пиковый ток 130 кА). Вместе с появлением надрезов и пластичной деформацией это снижает прочность на разрыв и усталостные параметры проводов. Кроме того, как показали испытания током КЗ 100 кА, наблюдалось провисание провода (2 м на каждые 500–800 м длины линии) [14].

Необходимо также принимать во внимание деформацию перемычек и внутрифазных распорок. Перемычки (на линии 500 кВ) могут существенно сдвигаться – были зафиксированы их столкновения с гирляндами проводников.

### 3.6. ШИНОПРОВОДЫ И ТОКОПРОВОДЫ

Шины и их опорные конструкции могут вести себя непредсказуемым образом, если силы, порождаемые токами КЗ, превысят расчетные значения. Количественный анализ таких сил представлен в [15]. Испытания проводились на прототипах подстанций, ключевые элементы (шины, опоры, выключатели) были подвергнуты воздействию тока 80 кА. В одном из случаев в результате недостатка механической прочности опоры произошло сжатие шинпровода (рис. 9).

Поскольку при экстремальных токах КЗ производные  $di/dt$  достигают очень

## ИСПЫТАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ЩИТА



Локализационные испытания с успешным отводом продуктов горения за пределы зоны, покрытой индикаторами

Рис. 14



Отсутствие успешного отвода продуктов горения за пределы зоны, покрытой индикаторами: возгорание индикаторов

высоких значений, то возникают условия для индуцирования неконтролируемых вихревых токов в любой неожиданной части подстанции. Например, на рис. 10 показан генераторный токопровод, который испытывался трехфазным током 275 кА при пике (асимметричного тока) 850 кА. Кадры скоростной съемки показывают наличие дуги (вследствие больших индуцированных токов), в данном случае – преимущественно внутри и между металлическими сегментами пола лаборатории.

Гибкие петли (позволяющие осуществлять подвижные соединения различных частей оборудования) также могут стать объектом воздействия токов КЗ либо под влиянием механических воздействий, либо в результате возгорания от индуцированного тока. В обоих случаях последствия замыканий крайне разрушительны. Пример такого сценария показан на рис. 11. В испытаниях ЛЭП при силе тока 100 кА наблюдалось, как участки линии, лежащие на частично металлизированной поверхности и проходящие на 6 м ниже и параллельно линии, находящейся под напряжением, были необратимо повреждены

наведенным током в результате возникновения дуги.

### 3.7. СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И РЕАКТОРЫ

Токи КЗ, проходящие через трансформатор, определяются значением полного сопротивления КЗ трансформатора. Таким образом, эти токи существенно ниже величин, обсуждаемых выше в 3.1–3.6. Несмотря на это, токи КЗ оказывают крайне негативное воздействие на обмотки трансформатора, т. к. на них оказывают одновременно и радиальные, и осевые воздействия. Детальный анализ этих эффектов можно найти в [16]. Было испытано 174 крупных (25 МВА и выше) трансформатора на стойкость при КЗ. Испытания показали, что почти 25% из них не прошли испытание на токи КЗ при первой же попытке тестирования в испытательном центре [15]. Чаще всего наблюдались такие последствия отказа, как смещение и выпучивание обмотки в результате воздействия радиальных сил.

## КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ

**Короткое замыкание (КЗ)** — электрическое соединение двух точек электрической цепи с различными значениями потенциала, не предусмотренное конструкцией устройства.

Короткое замыкание может возникать в результате нарушения изоляции токоведущих элементов или механического соприкосновения неизолированных элементов. Также коротким замыканием называют состояние, когда сопротивление нагрузки меньше внутреннего сопротивления источника питания.

В случае повреждения проводов воздушных линий электропередачи и замыкания их на землю в окружающем пространстве возникает сильнейшее электромагнитное поле, которое индуцирует в близко расположенном оборудовании ЭДС, опасную для аппаратуры и работающих с ней людей.

В момент короткого замыкания по воздушной линии проходит ток короткого замыкания большой величины, поэтому возрастает падение напряжения на всех элементах электрической сети.

## ПРОГОРАНИЕ КОРПУСА КРУЭ ПРИ ЛОКАЛИЗАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЯХ НА ВНУТРЕНнюю ДУГУ (ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ) [19]



Рис. 15

Пример такого случая показан на рис. 12. Методика испытаний описана в МЭК (IEC) 60075–5.

ВЧ-заградители, токоограничивающие реакторы, шунтирующие реакторы также испытывают значительные нагрузки во время прохождения токов КЗ из-за их кольцеобразной формы и компактности. Испытание максимальным асимметричным пиковым током, а также испытание током КЗ максимальной длительности должны определить способность оборудования выдерживать такие токи [17]. На рис. 13 показаны два кадра из видеозаписи испытания током КЗ оборудования, которое не прошло тестирование.

### 3.8. РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Распределительные щиты (шкафы) среднего напряжения часто испытываются на устойчивость к воздействиям внутренней дуги. В таких тестах внутренняя дуга (до 80 кА) инициируется при помощи тонкого проводника. В результате последующего роста давления из поврежденного отсека вы-

брасывается значительный объем газа-изолятора (воздух, элегаз SF<sub>6</sub>), который попадает в атмосферу или в смежные отсеки. Цель испытаний электротехнического оборудования среднего напряжения на внутреннюю дугу, как это описано в МЭК (IEC) 62271–200, – убедиться в том, что в случае аварии горячие газы и пламя выпускаются контролируемым образом через сборные шины и вентиляционные каналы или процесс вообще прекращается без повреждения оболочки. Для того чтобы показать, что персонал, находящийся в непосредственной близости от поврежденного устройства, не будет травмирован в результате выбросов продуктов сгорания, во время испытаний рядом с достигаемыми зонами РУ помещаются хлопковые (хлопчатобумажные) индикаторы. Отсутствие возгорания индикатора является подтверждением успешного прохождения испытания. Вместе с ростом силы тока КЗ увеличиваются и значения тока внутренней дуги. Испытания при 63 кА не предел – испытания проводятся также и для 80 кА. На рис. 14 показаны примеры успешного и неуспешного прохождения испытания на воздействие внутренней дуги.

Процедуры испытаний КРУЭ на внутреннюю дугу описаны в МЭК (IEC) 62271–203. При возникновении внутренней дуги в испытаниях КРУЭ дуга КЗ «отбрасывается» электромагнитными силами на конечную точку (опорно-направляющий разделитель), где и находится до тех пор, пока не будет задействован выключатель [18]. Основной вид поломки в такой ситуации – прогорание корпуса КРУЭ. Пример дан на рис. 15. Также были зафиксированы бурные экзотермические реакции горячей в элегазе дуги с алюминиевыми конструкциями. Поскольку дуга горит в среде элегаза (что подразумевает выделение большого числа побочных продуктов горения), подобные испытания являются довольно сложной процедурой. Такие испытания должны проводиться в герметически изолированных и устойчивых к высокому давлению защитных боксах или изолированных зданиях. Изучением проблемы роста давления под воздействием внутренней дуги, а также его моделированием занимается исследовательская группа СИГРЭ WG A3.24 [19].

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С ростом токов короткого замыкания, как в системах распределения, так и в системах передачи электроэнергии, существенно увеличиваются нагрузки на сетевое оборудование. Эти нагрузки проявляются в виде электромеханических сил, действующих на шины, линии электропередачи, внутрифазные распорки, контакты выключателей и разъединителей. Кроме того, серьезную роль играет термическое воздействие токов и дуг КЗ. Дуги КЗ в оболочках распределительных устройств (внутренние дуги) приводят к повышению давления и резким выбросам горячего газа и пламени.

Обмотки трансформаторов особенно подвержены воздействию КЗ, а тот

факт, что испытание на устойчивость не проходят 25% всех систем, указывает на необходимость создания надежной системы крепления. Протестировано поведение различного оборудования при токах максимальной силы (80 кА и даже 100 кА).

Испытания оборудования, отвечающие существующей детально разработанной системе стандартов, являются ключевым этапом в цепи процедур по обеспечению качества, призванных предотвращать непредвиденные повреждения и отказы систем при коротких замыканиях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. A. L. J. Janssen, M. v. Riet, R. P. P. Smeets, J. Kanters, W. F. v. d. Akker, G. L. P. Aanhaanen, Prospective single and multi-phase short-circuit current levels, in the Dutch transmission, sub-transmission and distribution grids, paper A3–103, CIGRE Conference, 2012.
2. G. Tremouille, A. Parisot, H. Imagawa, Short circuit uprating, methodology throughout the diversity of required skills. On behalf of B 3–23, paper B3–209, CIGRE Conference, 2012.
3. CIGRE WG 13.04: Specified time constants for testing asymmetric current capability of switchgear, *Electra*, 173, 1997. – pp. 19–31.
4. W. M. C. van den Heuvel, A. L. J. Janssen, G. C. Damstra. Interruption of short circuit currents in MV networks with extremely long time constant, *IEE Proc.*, vol. 136, Pt. C., No. 2, 1989. – pp. 115–119.
5. CIGRE Technical Brochure 304: Guide for application of IEC 62271–100 and IEC 62271–1, Working Group A3.11, 2006.
6. T. Fairly, M. Waldron, Short-circuit currents with high DC time constants: calculation methodology and impact on switchgear specification and rating, CIGRE A3/B3 colloquium, paper nr. 104, Tokyo, 2005.
7. H. Urai, Y. Ooshita, M. Koizumi, N. Yaginuma, M. Tsukushi,
8. R. P. P. Smeets, Estimation of 80 kA short-line fault interrupting capability in an SF<sub>6</sub> circuit breaker based on arc model calculations, *Int. Conf. on Gas Disch. And their Appl.*, 2008.
9. P. Barkan, A New formulation of the electromagnetic repulsion phenomenon in electrical contacts at very high current, *Proc. 11th Int. Conf. on Elec. Cont.*, 1985. – pp. 185–188.
10. S. Yanabu, T. Tsutsumi, K. Yokokura, E. Kaneko, Recent developments in high-power vacuum circuit breakers, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 17 No. 5, 1989. – pp. 717–723.
11. R. P. P. Smeets, H. D. Barts, L. Zehnder, Extreme stresses of generator circuit breakers, CIGRE Conference 2006, paper A3–306.
12. R. P. P. Smeets, H. Barts, W. van der Linden, L. Stenström, Modern ZnO surge arresters under short-circuit current stresses: test experiences and critical review of the IEC Standard, CIGRE Conference 2004, paper A3–105.
13. J.-F. Dubé, R. Goehler, T. Hanninen, R. P. McLaughlin, P. Riffon, M. Schubert, K. Stracevic, New achievements in pressure relief tests for polymeric-housed varistors used on series compensated capacitor banks (submitted for publication, *IEEE Trans. On Pow. Del.*).
14. CIGRE WG B2.21: On the use of power arc protection devices for composite insulators on transmission lines, CIGRE Technical Brochure 365, 2008.
15. T. Yamada, K. Saito, S. Ito, Y. Nagata, R. P. P. Smeets, P. Knol, Short-circuit testing of overhead line components up to 100 kA, CEPSI Conference, 1998, paper 42–11.
16. CIGRE WG 23–03, Brochure 214: The mechanical effects of short circuit currents in open air substations – Part II, a companion book for the CIGRE Brochure 105, 2002.
17. CIGRE WG23–11, Brochure 105: The mechanical effects of short-circuit currents in open air substation, 1996.
18. R. P. P. Smeets, L. H. te Paske, Sixteen years of test experiences with short-

### ИНФОРМАЦИЯ

## ТОК КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Ток КЗ в электрических сетях является одним из определяющих параметров при выборе оборудования подстанций и линий электропередачи. Чем больше значение этого тока, тем более высокую отключающую способность должны иметь выключатели, тяжелее конструкция ошиновки, опорных изоляторов и разъединителей, тем жестче требования по термической устойчивости кабельных линий.

Для ограничения токов КЗ на электростанциях и в сетях энергосистем используются схемные решения, стационарное или автоматическое деление сети, токоограничивающие устройства, оптимизация режима заземления нейтралей электрических сетей.

circuit withstand capability of large power transformers, CEPSI Conference, paper 229, Bali, 2012.

17. R. P. P. Smeets, A. B. Hofstee, L.-R. Jänicke, M. Pungner, Current switching protective equipment in capacitor banks for series compensation of very long overhead lines, paper A3–304, CIGRE Conference, Paris, 2006.
18. W. Boeck, K. Krüger, Arc motion and burn through in GIS, *IEEE Trans. on Pow. Del.*, vol. 7 No. 1, 1992. – pp. 254–261.
19. CIGRE WG A3.24: Tools for the simulation of pressure rise due to internal arc in MV and HV switchgear, Technical Brochure to be issued, 2013.