

ИСПЫТАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ НА СТОЙКОСТЬ ПРИ КЗ*

В работе приводится обобщение результатов испытаний токами КЗ силовых трансформаторов в лаборатории КЕМА за последние 13 лет. Всего испытано 102 трансформатора мощностью свыше 25 МВА. Исследования КЕМА показали, что в ходе испытаний на соответствие стандарту МЭК в части требований электродинамической стойкости при первоначальных опытах были повреждены 28 % трансформаторов различных мощностей (25–440 МВА, 20–500 кВ). Выделить одну общую причину повреждения силовых трансформаторов не представляется возможным; напротив, обнаруживались различные дефекты, в основном вызванные электродинамическими воздействиями от протекающих токов КЗ. В статье приведено мнение авторов по поводу часто встречающихся предложений о замене натурных испытаний моделированием и рассмотрением проектной документации, вызванных, как правило, соображениями экономии. Авторы делают заключение, что обзор проектной документации как единственный метод оценки качества силового трансформатора является недостаточным, так как треть повредившихся при эксплуатации трансформаторов прошла контроль проектной документации. Дан краткий обзор испытательной установки и различных методик испытаний.

СМИТС Р. П. П., испытательная лаборатория КЕМА Передача и распределение

ТЭ ПАСКЕ Л. Х., испытательная лаборатория КЕМА Передача и распределение

Влияние воздействия токов короткого замыкания (КЗ) в сетях передачи и распределения электроэнергии велико и для оборудования, и для устойчивости системы. Поскольку короткие замыкания возникают достаточно часто, электродинамическая стойкость при воздействии сквозных токов КЗ – одна из основных характеристик установленного оборудования. Силовые трансформаторы, как и токоограничивающие реакторы, позволяют ограничивать токи КЗ до значений, определяемых сопротивлением трансформатора. Таким образом, разработка силового трансформатора с целью обеспечения его нормальной работы при коротких замыканиях направлена на ограничение тока КЗ. Кроме того, анализ сил и воздействий, оказываемых протеканием тех же токов КЗ сквозь трансформатор, должен быть одной из составляющих процесса разработки [1].

С годами мощность КЗ в системе увеличивается, поэтому наихудшие условия в части протекания сквозных токов КЗ в трансформаторе будут наблюдаться в конце его срока службы. В таких условиях трансформатор должен выдерживать воздействия сквозных токов КЗ без ухудшения его характеристик. Электродинамическая стой-

кость также должна предусматривать возможность трансформатора выдерживать несколько несимметричных коротких замыканий в каждой из фаз и при каждом из положений РПН без ухудшения его характеристик при нормальной работе.

Опыт эксплуатации силовых трансформаторов и испытания токами КЗ в лабораториях вынудили эксплуатацию и производителей уделить большое внимание характеристикам силовых трансформаторов по электродинамической стойкости.

Один из способов определения электродинамической стойкости трансформатора – проведение исследования его проектной и конструкторской документации. CIRGE выпустило инструкцию, которая содержит методику таких исследований [2]. Здесь будут объяснены некоторые ограничения этой методики, а также показаны возможности по достижению высокого уровня надежности в части электродинамической стойкости при проведении полного комплекса испытаний в соответствии с международными стандартами [3], [4], [5], [6]. Показан опыт Лаборатории больших токов КЕМА – мирового лидера по проведению независимых испытаний высоковольтного оборудования.

*Перевод Аношина А.О.
под ред. Панибратца А.Н.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТОКОВ КЗ НА ОБМОТКИ

Имея расчетные данные по значениям токов КЗ для различных режимов работы системы, принципиально могут быть определены электродинамические воздействия. Сила электродинамического воздействия пропорциональна векторному произведению тока в проводнике и магнитной индукции в месте приложения вектора. Магнитная индукция катушек и взаимоиנדукция катушек обмотки изменяется в радиальном направлении и в осевом направлении обмотки.

Также в направлении от середины до торцов обмоток направление магнитной индукции меняется от практически продольного (аксиального) до практически радиального, что, в свою очередь, влияет на продольные и радиальные механические воздействия. Амплитуда магнитной индукции потока рассеяния зависит от амплитуды и направления токов в обмотках. Такие обмотки – это, например, одна или две обмотки низшего напряжения, обмотки высшего напряжения, регулировочные обмотки и компенсирующие обмотки (если таковые предусмотрены).

Пульсирующие во времени электродинамические силы действуют в радиальном направлении (сжимая к сердечнику внутреннюю обмотку или растягивая внешнюю обмотку) и в продольном направлении. В проводниках обмоток и элементах конструкции электродинамические силы вызывают механические напряжения растяжения, сжатия или изгиба. Напряжения затем сравниваются с допустимыми величинами, заданными для проводников и опорных конструкций, они не должны превышать этих значений.

Электродинамические напряжения изменяются во времени и различны в разных точках трансформатора. Путем упрощения расчетной модели можно определить приближенные значения наибольших возникающих напряжений. Эти упрощения обычно таковы: не рассматривается влияние других фаз на магнитные поля в рассматриваемой обмотке, расчет сил и напряжений ведется только для наибольшего амплитудного и действующего значения, обмотка рассматривается абсолютно упругой (то есть без учета эффекта остаточных деформаций), обмотка считается симметричной кольцевой и т.д. При таких расчетах может быть выбран только самый тяжелый случай.

Переходные механические процессы обмоток (собственные колебания, демпфирование торцов) и производственные допуски (допуски в материалах, при обработке, сборке и т.п.) делают точное моделирование обмотки практически невозможным. На этапе разработки для того, чтобы исключить влияние этих факторов, закладываются дополнительные запасы.

Расчет напряжений и запасов с учетом допустимых значений напряжений – это задача

производителя. Опыт такого рода расчетов и опыт проведения натурных испытаний с протеканием сквозного тока КЗ помогут производителю по разработке силовых трансформаторов с точно определенной электродинамической стойкостью [1].

ТРЕБОВАНИЯ СТАНДАРТОВ

Важная составляющая определения состояния трансформатора – проведение контрольных измерений до и после проведения испытаний на стойкость при КЗ, измерение реактивного сопротивления трансформатора после каждого успешно проведенного испытания, контроль поведения газового реле, определение отклонений в значениях тока (включая ток, текущий по баку трансформатора) и напряжения во время опытов.

Опыт КЕМА в части измерения вибраций, анализа частотных характеристик, измерения токов возбуждения и т.п. показывает, что эти методики не дают четкого ответа на вопрос, прошел ли трансформатор успешно испытания током КЗ. В то же время упрощенная методика измерения реактивного сопротивления трансформатора после каждого опыта КЗ – более точный индикатор поведения трансформатора в ходе испытаний и зачастую является основой для решения о продолжении испытаний или завершения их.

Еще один критерий – визуальный осмотр активных частей трансформатора после испытаний током КЗ. Чтобы осуществить это, активная часть должна быть извлечена из бака. В зависимости от значения отклонения реактивного сопротивления трансформатора (например, более 1 % или в случае, когда наблюдается устойчивая тенденция изменения), результатов измерений и визуального осмотра после извлечения активной части, может потребоваться дальнейшая разборка и детальный осмотр активной части.

Такие осмотры наилучшим образом могут быть произведены на заводе производителя, где доступно все необходимое оборудование и к работе могут быть привлечены соответствующие эксперты. Контрольные испытания также обычно проводятся в испытательной лаборатории производителя. Эксперты КЕМА, как правило, присутствуют при проведении всех контрольных испытаний и обследований. Как указано в стандартах IEEE [4], [5], а также в стандарте МЭК 60076-5 [3], контрольные испытания повышенным напряжением должны быть проведены повторно в полном объеме.

ИСПЫТАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ КЗ И РАСЧЕТНАЯ МЕТОДИКА

Споры о достоинствах и недостатках испытаний трансформаторов током КЗ в части аргументации недостатков можно изложить в следующих четырех положениях:

- нет необходимости в испытаниях, поскольку расчетные методики позволяют получить достаточно точные результаты;
- нет необходимости в испытаниях, поскольку имеется положительный опыт эксплуатации;
- затраты на испытания стали слишком высокими и занимают большое количество времени;
- испытания токами КЗ могут негативно сказываться на испытуемом трансформаторе.

Мнения авторов на этот счет выглядят следующим образом:

1. «Расчеты могут подтвердить стойкость при КЗ»

Совершенно очевидно, методы расчета являются крайне необходимым инструментом на этапе проектирования оборудования. Тем не менее, «процедура испытаний считается лучшим средством выяснения реальных характеристик функционирования оборудования при КЗ, поскольку такое испытание демонстрирует, что как разработка, так и изготовление трансформатора, были проведены правильно» (цитата из [10]). Недавно в поправке к МЭК 60076-5 Приложение В отмечено (для трансформаторов мощностью более 2,5 МВА), что «для оценки рассматриваемой единицы можно провести одновременное сравнение с ограниченным числом трансформаторов, которые успешно прошли испытания током КЗ и которые по своим характеристикам, приведенным в приложении А, во многом – но не всем – аналогичны рассматриваемому» (цитата из [11]).

В настоящее время сложные, трехмерные, изменяющиеся во времени поля и силы, воздействующие на различные неоднородные и нелинейные структуры и материалы, не могут быть достаточно точно описаны расчетной моделью. Кроме того, естественный разброс в свойствах материалов, обеспечение качества, навыки работников и т.д., особенно в менее опытных компаниях, не могут быть полностью приняты во внимание, а также любой осмотр конструкции не может указать на дефекты, вызванные данными факторами.

Сложные «вторичные» физические явления, такие как ударная волна в масле и вибрации (часто ведущие к излишнему срабатыванию газового реле или повреждению вспомогательного оборудования – проходных изоляторов, РПН и т.п.), обычно не принимаются во внимание в расчетных методах. Расчеты, однако, могут быть использованы и широко используются производителями для определения критических условий при испытаниях.

Опыт КЕМА свидетельствует, что даже при использовании сложных средств моделирования могут быть зафиксированы отклонения до

5 % от проектного (номинального) и измеренного значений сопротивления КЗ. Это значение напрямую связано с магнитным потоком и током КЗ, двумя главными параметрами, произведение которых используется при расчете сил и напряжений.

Большой шаг вперед в методах расчета, достигнутый в последние десятилетия, вместе с повышением внимания к сокращению издержек, может привести к практике проектирования с меньшим запасом, тогда как в прошлом – из-за большей неопределенности в расчетах и меньшего «ценового давления» – закладывались большие запасы. Все сказанное свидетельствует о том, что даже передовые методы проектирования не гарантируют более надежного трансформатора.

2. «По причине протекания сквозных токов КЗ выходит из строя лишь небольшое количество трансформаторов»

В 1983 году рабочая группа 12.05 CIGRE провела масштабное международное исследование повреждений оборудования в эксплуатации [12]. В отчете отмечается, что повреждения трансформаторов составляют 2 %, причем основная причина повреждения – ненадлежащее качество изготовления. На втором месте причин повреждения стоят проблемы разработки и проектирования. Конечно, этот опыт нельзя экстраполировать на текущую ситуацию, так же как нельзя говорить о корреляции этих значений с выходами из строя по причине протекания токов КЗ.

Недавно РГ 12.19 CIGRE опубликовала новый отчет [13] по повреждаемости оборудования вследствие недостаточной стойкости к токам КЗ. В отчете указывается, что количество повреждений, вызванных воздействием сквозных токов КЗ, составляет 1,2 повреждения на 10 000 трансформатор-лет. Весьма показательно, что треть из повредившихся трансформаторов успешно прошла проверку конструкторской документации, тогда как ни один из поврежденных трансформаторов не был подвергнут испытаниям токами КЗ [1].

Если не предполагать, что требования к испытаниям токами КЗ и критерии оценки, закрепленные в МЭК 60076-5 [3], выходят далеко за рамки реальных ситуаций, то следует сделать вывод, что результаты исследования показывают необходимость производителям доказывать надежность своих разработок и качество их выполнения посредством реальных испытаний. Этот пункт дополнительно рассматривается в разделе «Споры вокруг результатов испытаний», где обсуждаются несоответствия между повреждениями при эксплуатации и при испытаниях.

3. «Испытания током КЗ слишком дороги и требуют больших затрат времени»

Безусловно верно, что для испытаний трансформаторов большой мощности требуются значительные расходы. Вместе с тем эти расходы следует соотнести с важностью надежного функционирования трансформатора в сети и временем, необходимым для его ремонта или замены. Затраты на испытания состоят главным образом из затрат на транспортировку, сборку, обработку, повторение диэлектрических испытаний, инспекции и т.д., а не расходов на сами испытания. Кроме того, важнейший фактор, составляющий затраты – опасность проведения повторных испытаний после неудачных, – находится под прямым контролем завода-изготовителя. Эти расходы должны оцениваться в отношении к риску утраты трансформатора при эксплуатации.

Хотя здесь сложно четко сформулировать руководство к действию, при такой оценке должны быть учтены следующие факторы:

- важность трансформатора в сети, когда надежность является основным фактором (блочные трансформаторы, система собственных нужд на электрических станциях, питание ответственных потребителей и т.п.);
- гарантия системного оператора поставок электроэнергии (в случае неисполнения применяются штрафные санкции);
- внутренние факторы, такие как уровень токов КЗ до трансформатора и за трансформатором, частота случаев короткого замыкания (в том числе молнии, применение для железных дорог);
- если планируется приобретение нескольких единиц оборудования новой конструкции, рекомендуется вложить средства в их испытание, при этом возросшую надежность можно считать косвенной прибылью;
- некоторые исполнения трансформаторов сильнее подвержены действию токов КЗ, чем другие, например, трансформаторы с расщепленной обмоткой сильнее подвержены влиянию токов КЗ;
- выбор методик испытаний (быстрое действие защиты и быстрое отключение тока КЗ, обеспечение надлежащего заземления трансформатора и т.п. [7]) таким образом, чтобы максимально избежать повреждения испытываемого объекта.

Различные крупные энергетические компании разработали процедуры, в соответствии с которыми каждый тип закупаемого трансформатора должен быть испытан на стойкость к токам КЗ. EDF (Франция) в отчете сообщает [14] о значительном положительном влиянии испытаний трансформаторов при КЗ на снижение повреждения обмоток трансформаторов во всей Франции за несколько десятилетий. Аналогичный опыт также отмечается в Индии [15], [16]. Другие компании (среди которых NTPC – Индия,

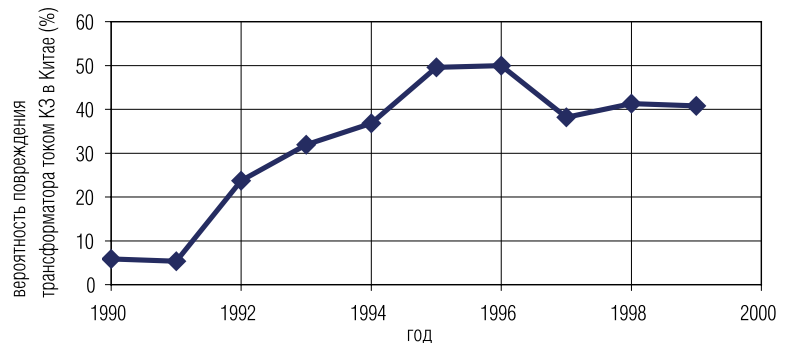


Рис. 1. Поток отказов трансформаторов

EGAT – Таиланд, TNB – Малайзия) побуждают производителей к проведению испытаний на стойкость при КЗ с целью получения опыта и совершенствования конструкции трансформаторов, что в конечном счете является инструментом по повышению качества оборудования.

В Китае все компании, производящие силовые трансформаторы, осознают значимость испытаний на стойкость при КЗ как составляющей, подтверждающей качество оборудования. Большинство эксплуатирующих организаций также разделяют это мнение. Поток отказов трансформаторов по причине недостаточной стойкости к токам КЗ значительно снизился после того, как в Китае в середине 90-х были введены испытания на стойкость к токам КЗ. Это показано на рис. 1 [17] (Аналогичная ситуация была в СССР в 70–80-х годах, когда волну крупных аварий по причине недостаточной стойкости трансформаторов при КЗ удалось остановить организацией массовых испытаний и теоретических и экспериментальных исследований. – Прим. ред.).

4. «Испытания током КЗ снижают срок службы трансформатора»

Известные производители сходятся во мнении, что в правильно спроектированном трансформаторе с заложенными достаточными запасами после проведения испытаний на стойкость к токам КЗ обмотки несколько «уплотняются», «стабилизируются» [8], [16]. В результате «уплотнения» возрастает жесткость обмотки, и это отражается в небольшом (если вообще заметно) изменении реактивного сопротивления по сравнению с результатами измерения между первыми опытами. В последующих опытах изменения незначительны или незаметны вовсе. Такой трансформатор после испытаний на стойкость к КЗ оказывается еще более надежным, чем до испытаний, и может уверенно эксплуатироваться. В ходе испытаний на стойкость к токам КЗ могут возникать случаи, когда наблюдается стабильное увеличение индуктивности обмоток в течение всех опытов, в связи с этим можно сделать заключение (путем экстраполяции), что трансформатор подвергается

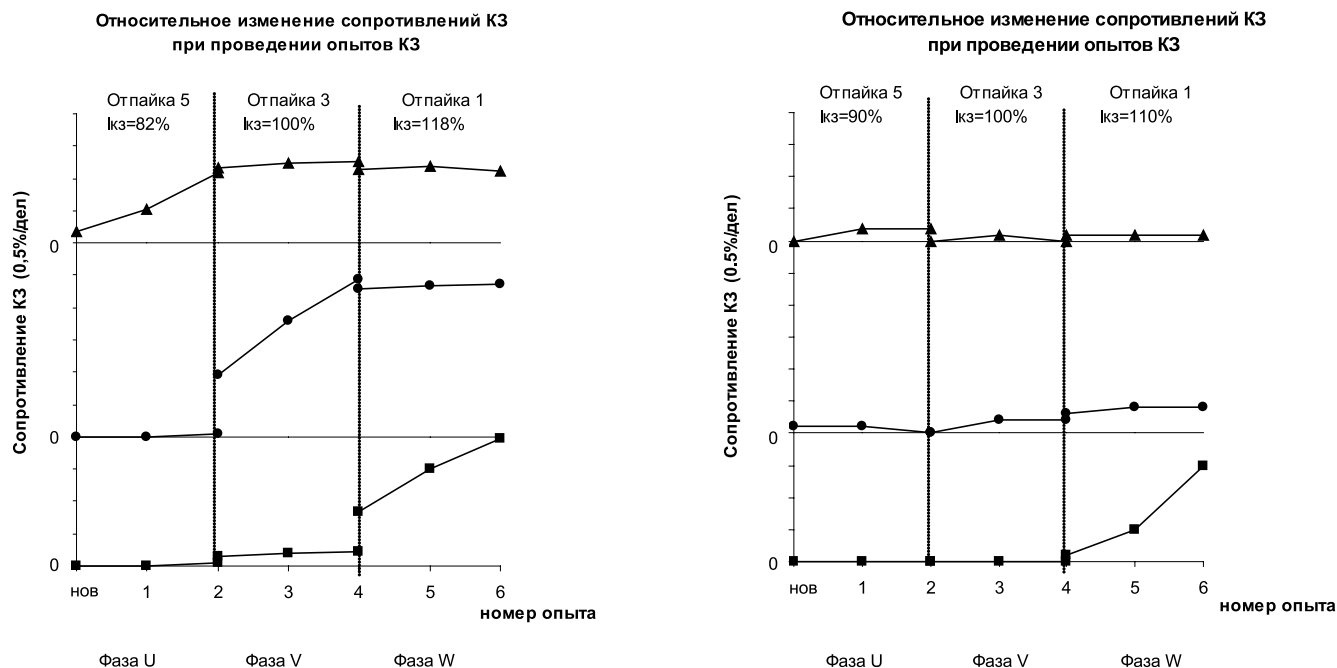


Рис. 2а. Трансформатор с общим повреждением во всех фазах Рис. 2б. Трансформатор с повреждением в фазе W

ется ускоренному старению из-за опытов КЗ. На рис. 2 приведен подобный пример. Здесь можно заметить изменение индуктивности после нескольких последовательных опытов КЗ. Рисунок слева (рис. 2а) указывает на общее повреждение во всех трех фазах (в ходе осмотра была обнаружена деформация винтовых обмоток), в то время как на правом рисунке (рис. 2б) показано повреждение только фазы W (при осмотре было обнаружено повреждение осевой прессующей системы). Остальные фазы (U, V) под воздействием тока КЗ не повредились.

Китайский опыт [18] свидетельствует о том, что 40 трансформаторов (номинальным напряжением 110–220 кВ), установленных в эксплуа-

тацию после проведения испытаний на стойкость к токам КЗ, функционируют без сбоев в течение всего периода наблюдений от нескольких месяцев до 5 и более лет.

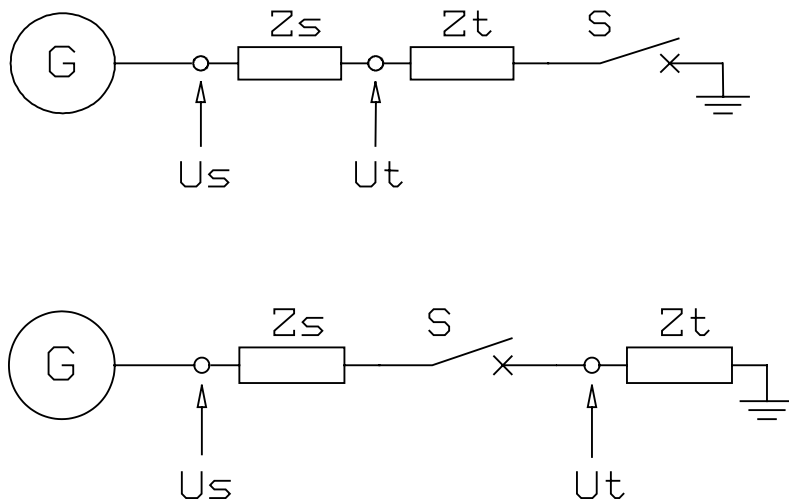
ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

В стандартах определены два метода испытаний: включение на КЗ перед возбуждением (pre-set) и включение на КЗ после возбуждения (post-set).

Включение на КЗ после возбуждения (post-set)

При этом методе (рис. 3, сверху) на трансформатор подается питание с одной стороны (в то время как с другой стороны он остается на холостом ходу), а затем, после того как перестанет течь ток намагничивания, вторичные выводы трансформатора замыкаются накоротко. Перед коротким замыканием напряжение источника U_s появляется на вводах трансформатора, таким образом, напряжение источника должно быть ограничено в соответствии с номинальным напряжением трансформатора U_t . В стандарте IEEE [5] при испытаниях максимальное напряжение источника ограничено 110 % номинального напряжения трансформатора, в стандарте МЭК [3] – 115 %. При такой методике требуется источник очень большой мощности, поэтому на практике этот метод может быть использован только в сетевых испытательных лабораториях (питающихся непосредственно от сети).

Рис. 3. Накладываемое КЗ (вверху) и предварительно наложенное КЗ (внизу)



К достоинствам такого метода относятся:

- возможность моделирования реальной ситуации в сети;
- точная установка апериодической составляющей тока, особенно если испытуемый трансформатор подключен к системе через промежуточный трансформатор, а коммутационный аппарат установлен за промежуточным трансформатором.

Включение на КЗ перед возбуждением (pre-set)

При такой методике (рис. 3, внизу) выводы трансформатора закорочены еще до подачи напряжения. Напряжение источника U_s может изменяться в достаточно больших пределах по отношению к номинальному напряжению трансформатора для того, чтобы достичь необходимого значения протекающего тока КЗ. При этом методе на ток КЗ накладывается также ток намагничивания силового трансформатора. При подаче напряжения на внешнюю обмотку и закорачивании внутренней, ближайшей к стержню обмотки, значение тока намагничивания оказывается несравнимо меньше, чем в случае обыкновенного броска тока намагничивания или тока намагничивания при первом способе. Чтобы минимизировать значение тока намагничивания в этом случае и в случае, когда напряжение подается на внутреннюю, ближайшую к стержню обмотку, в программе испытаний КЕМА предусмотрены опыты с предварительным 80%-ным намагничиванием (с обратной полярностью по отношению к предыдущему опыту) – для того чтобы обеспечить остаточную намагниченность в нужном направлении. Таким образом, полный опыт происходит со значительным запасом до насыщения в данной полярности [8, 9]. В опытах с предварительно закороченным трансформатором мощность генератора используется более эффективно, в связи с этим испытательные лаборатории, в которых питание производится от генератора (как в КЕМА), предпочитают именно этот подход.

Однофазные методики испытаний

Трехфазные трансформаторы предпочтительнее испытывать в трехфазном режиме. В случае недостаточного диапазона напряжений или недостаточной мощности источника испытательные центры могут использовать однофазную схему. Как и в случае трехфазных испытаний, в каждом опыте одна из фаз подвергается воздействию тока КЗ. В последующих опытах воздействию тока КЗ подвергаются поочередно другие фазы.

Применяется и наиболее приближенный к реальной ситуации «полуторафазный метод», который учитывает динамическое взаимодействие

между фазами (в отличие от чисто однофазного метода). В такой методике испытуемая фазная обмотка подключается последовательно с двумя оставшимися обмотками, соединенными в параллель.

Токи, текущие в параллельных обмотках, составляют 50 % от испытательного трехфазного значения. В момент наибольшего значения тока в испытуемой фазе ток в двух других фазах имеет такое же значение по амплитуде (1,28 о.е.) и такое же направление, как и при трехфазном опыте. При этом требуемая мощность испытательной установки вдвое меньше, чем в случае испытаний в трехфазной схеме.

ОПЫТ КЕМА 1996–2008 ГОДОВ

Лаборатория КЕМА имеет в своем распоряжении испытательную установку с мощностью КЗ 8400 МВА (самая мощная в мире) и имеет возможность проводить испытания трансформаторов с наибольшими значениями номинальной мощности и номинального напряжения. Благодаря использованию генераторов в качестве источника напряжение источника точно совпадает с испытательным напряжением, достигается необходимое одно и то же время опыта КЗ, а также постоянная готовность источника испытательного напряжения (что не всегда достижимо в случаях, когда испытательная лаборатория питается непосредственно от сети [7]).

Сделана оценка результатов испытаний на стойкость при КЗ на протяжении 13 лет, в период с 1996 по 2008 год. Испытания проводились в соответствии со стандартом МЭК [3] или стандартами IEEE [4], [5], [6] на трансформаторах с номинальной мощностью 25–440 МВА и напряжением 20–500 кВ.

Среди испытанных трансформаторов есть однофазные и трехфазные трансформаторы, автотрансформаторы, повышающие трансформаторы, трансформаторы для тяговых подстанций железных дорог, трансформаторы собственных нужд и трехобмоточные трансформаторы, с номинальной частотой 16 2/3, 50 и 60 Гц, со схемой соединения обмоток «звезда–треугольник» и «треугольник–звезда». Максимальная мощность испытуемых трансформаторов составила 250 МВА для однофазного трансформатора и 440 МВА для трехфазного трансформатора.

В течение этих 13 лет трансформаторы мощностью свыше 25 МВА испытывались 114 раз (102 трансформатора, испытания 12 из них проводились повторно):

- 73 трансформатора прошли первичные испытания без замечаний. Окончательный результат испытаний не всегда известен, поскольку не во всех случаях проводились немедленные контрольные испытания и обследование. В 4 случаях контрольные испытания и/или визуальный

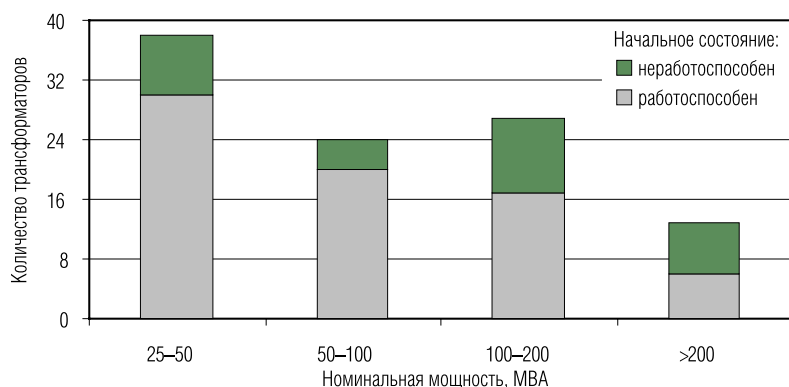


Рис. 4. Начальная вероятность повреждения для различных значений номинальной мощности

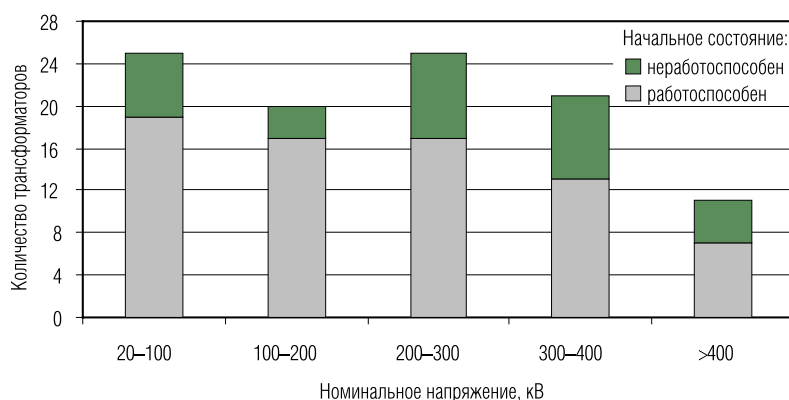


Рис. 5. Начальная вероятность повреждения для различных значений номинального напряжения (первичного)

осмотр на заводе-изготовителе обнаружили недопустимые повреждения, которые не были выявлены в ходе первичного осмотра. Всего на заводах-изготовителях прошли проверку 57 трансформаторов;

■ 29 трансформаторов не выдержали испытаний токами КЗ, и повреждения стали очевидны непосредственно на испытательной площадке. В основном повреждения проявились в виде недопустимого увеличения сопротивления КЗ, вызванного электродинамическими воздействиями тока КЗ, однако в ряде случаев имели место и другие повреждения.

■ 12 трансформаторов из последней группы были повторно подвергнуты испытаниям после внесенных производителями доработок и успешно прошли испытания.

Из представленных результатов начальная вероятность отказа определяется как отношение испытанных объектов, которые не прошли испытания с первого раза (29 трансформаторов), к общему числу испытываемых трансформаторов (102). Таким образом, начальная вероятность отказа составляет 28 %.

Порядок этой величины аналогичен значению, полученным в ходе исследований другой известной лабораторией, в отчете которой заявляется о вероятности отказа на уровне 20–25 % из 20 единиц с номинальной мощностью более

100 МВА [21]. В других источниках [13] указывается значение вероятности 23 % при общем количестве испытаний 3934.

На рис. 4 и 5 представлены результаты, разделенные по мощности и классу напряжения. Из представленных диаграмм не видна четкая зависимость вероятности повреждения от класса напряжения и номинальной мощности за рассматриваемый период.

Типичным показателем неудовлетворительных результатов испытаний на стойкость к токам КЗ является изменение реактивного сопротивления вне заданных стандартами пределов. Обычно этот результат подтверждает визуальный осмотр, в ходе которого обнаруживаются различные дефекты, в том числе:

- осевая прессующая система: потеря осевой фиксации и силы прессовки, повреждение прессующих колец, прокладок, шпилек, верхней и нижней опорной изоляции;
- обмотки: продольное смещение обмоток, потеря радиальной устойчивости (buckling), поворот и скручивание винтовых или слоевых обмоток;
- отводы обмоток и внутренняя ошиновка: механическое смещение, например, отводов от обмоток РПН до регулировочных обмоток; деформация или повреждение отводов других обмоток, продольное смещение или деформация отводов от внутренних обмоток;
- разрушение или повреждение изоляции проводников; смещение изоляционных барьеров; перекрытие по поверхности диэлектрика обмотки ВН или пробой диэлектрика между обмоткой и баком; смещение электрокартонной изоляции; возникновение тока, текущего через бак трансформатора, вследствие повреждения изоляции проводников;
- разрушение или повреждение проходных изоляторов на стороне НН.

В то же время, когда реактивное сопротивление меняется незначительно и в рамках допустимых стандартами пределов, визуальное обследование в редких случаях (по опыту КЕМА, около 5 % всех случаев) все же ведет к заключению о неудовлетворительном результате испытаний.

Тем не менее, визуальный осмотр необходим, поскольку деформации и смещения в опорных конструкциях, прессующей системе, изоляционных материалах, отводах обмоток, внешних подключениях обмоток к РПН и в самом РПН не могут быть определены только измерением реактивного сопротивления.

Таким образом, авторы делают заключение о том, что измерение реактивного сопротивления является очень хорошим способом оценки состояния оборудования после проведения испытаний на стойкость при КЗ.

Опыт КЕМА по измерению индуктивного сопротивления показывает, что для транс-

форматоров изменение значения более чем на 1,0 % свидетельствует о значительной деформации одной или более катушек обмоток. Также постоянное увеличение изменения по ходу испытаний, хотя и в пределах не более 0,5–1,0 %, свидетельствует о нарастающем смещении проводников обмотки. Значительные случайные изменения реактивного сопротивления в результате проведения нескольких опытов свидетельствуют о слишком высокой гибкости обмоток.

Отдельно следует отметить поведение реле Бухгольца (газового реле). Достаточно часто (по опыту КЕМА – более чем в 50 %) реле Бухгольца срабатывает излишне из-за вибраций, возникающих по ходу испытаний на стойкость при КЗ [19]. Таким образом, поведение этих реле должно тщательно фиксироваться в ходе испытаний, а затем, по итогам, должен предоставляться отчет.

СПОРЫ ВОКРУГ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Вызывает некоторое удивление, почему повреждаемость силовых трансформаторов при испытаниях в испытательных центрах оказываются намного хуже, чем в эксплуатации (см. Испытания трансформатора при КЗ и расчетная методика). Одна из главных причин – то, что испытания проводятся в более жестких условиях по сравнению с реальными условиями эксплуатации. Из исследования РГ13.08 CIGRE [20] следует, что, по статистике, трансформаторы большой мощности в течение срока службы испытывают несколько КЗ с полным током и множество КЗ малой мощности, если более точно, то за 25 лет 90 % трансформаторов испытывали прохождение полного тока КЗ.

Кроме того, необходимо отметить, что действительный (полный) ток КЗ в эксплуатации, как правило, меньше (или намного меньше), чем нормируемый ток КЗ, на который спроектирован трансформатор.

По причине ожидаемого роста токов КЗ, особенно в развивающихся странах, эта ситуация может измениться, и могут возникнуть такие условия, что стойкость при КЗ трансформатора, достаточно долго находящегося в эксплуатации, окажется на грани допустимой.

Такие же противоречия (разница статистики повреждаемости оборудования при испытаниях и в эксплуатации) существуют и с силовыми выключателями, трансформаторами малой мощности, где типовые испытания и сертификация проводятся при условиях, максимально приближенных к эксплуатационным, и такой подход является неоспоримым и весьма ценным (не в последнюю очередь благодаря ценности сертификатов с точки зрения маркетин-

га), даже с учетом того, что такие условия возникают при эксплуатации крайне редко.

Тем не менее, следует критически подходить к серьезности требований испытаний. Один из примеров этого – проведение испытаний током КЗ в максимальном положении РПН, которое соответствует наименьшему сопротивлению КЗ сети и трансформатора (см. пример на рис. 2). Ни при максимальном, ни при минимальном положении отпайки РПН, вероятнее всего, не возникнут условия максимального тока КЗ в системе. В положении отпайки, соответствующей максимальному напряжению, при испытаниях требуется очень большое значение тока КЗ. Этим обстоятельством можно объяснить повреждение фазы W на рис. 2б (ток 110 %!). Очень сильное воздействие от такого значения тока на практике может встречаться крайне редко, поскольку повышенное напряжение в системе не происходит одновременно с максимальной мощностью КЗ сети. Вероятно, проведение испытаний в крайнем положении отпайки РПН со сниженным напряжением – более приближено к реальным условиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы представили статистику повреждаемости силовых трансформаторов большой мощности при проведении испытаний на стойкость к токам КЗ по МЭК 60076-5. Опыт КЕМА показывает, что за 13 лет испытаний трансформаторов (всего было испытано 102 шт. мощностью 25–440 МВА, номинальным напряжением 20–500 кВ) 28 % трансформаторов повреждались при первичных испытаниях, при этом, как правило, наблюдалось недопустимое увеличение реактивного сопротивления. Изменение реактивного сопротивления обмоток – хороший индикатор повреждения в ходе испытаний на стойкость к токам КЗ.

Результаты визуального осмотра подтверждают результаты измерений сопротивления в абсолютном большинстве случаев. Однако приблизительно в 5 % случаев недопустимые повреждения, возникшие в результате испытаний, удалось обнаружить только при визуальном осмотре.

Испытания на стойкость к токам КЗ – важная часть процесса проектирования и неотъемлемый инструмент, позволяющий подтвердить правильность расчета в конце разработки. Высокая повреждаемость при испытаниях – лучшее подтверждение того, что использование только расчетных методов недостаточно для подтверждения характеристик трансформатора в части стойкости к токам КЗ при наихудших условиях.

Экспертиза конструкции и расчетов не может являться единственной частью процесса приемки: из всех трансформаторов, вышед-

ших из строя при эксплуатации, треть прошла процедуру обзора проектной документации (но без подтверждения этих результатов испытаниями), в то же время ни один из вышедших из строя трансформаторов не был испытан [1].

Опыт авторов по работе с трансформаторами, которые не прошли испытания с первого раза, но успешно прошли их после доработок, демонстрирует, что путь к успешной разработке надежного оборудования состоит из использования расчетных методов и последующего подтверждения опытным путем.

Разница между вероятностью повреждения трансформатора при испытаниях и в эксплуатации (в развитых странах – 0,5 % за срок эксплуатации в 40 лет [1]), которая составляет десятки процентов, поражает. Объяснить данный феномен можно значительным различием нормированных испытательных значений токов и реальными токами при эксплуатации. Со временем эта разница будет уменьшаться.

Большая доля трансформаторов, находящихся в эксплуатации, не способна выдерживать максимальные значения тока КЗ, на которые они были спроектированы.

Испытания на стойкость к токам КЗ трансформаторов не снижают срока службы хорошо спроектированных трансформаторов, а напротив, можно ожидать некоторого роста их характеристик.

В большинстве случаев потери, связанные с перебоем электроснабжения, вызванного повреждением трансформатора, а также затраты на его ремонт или замену, намного превосходят затраты на проведение испытаний на стойкость к токам КЗ (выводы заключения полностью совпадают с мнением отечественных специалистов по стойкости трансформаторов при КЗ, однако это не нашло отражения в новой редакции основного стандарта на трансформаторы ГОСТ Р 52719-2007 Трансформаторы силовые. Общие технические условия [22]. – Прим. ред.).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] CIGRE WG 12.19: «The Short-Circuit Performance of Power Transformers», CIGRE Technical Brochure 209, August 2002
- [2] CIGRE WG 12.22: «Guidelines for Consulting Design Reviews for Transformers 100 MVA and 123 kV and above», CIGRE Technical Brochure 204, August 2002.
- [3] IEC standard 60076-5: Power Transformers – Part 5: «Ability to withstand short-circuit», 2000
- [4] IEEE Std C57.12.00-1993: «IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers»
- [5] IEEE Std C57.12.90-1993, Part I: «IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution Power, and Regulating Transformers»

[6] IEEE Std C57.12.90-1993, Part II: «IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers».

[7] A. J. L. Janssen and L. H. te Paske: «Short-Circuit testing experience with large power transformers», CIGRE SC12 Session 2000, report 12–105.

[8] A. L. J. Janssen, L. H. te Paske, R. P. P. Smeets, «Short-circuit Tests on Large Transformers: Destructive or not?», TrafoTech 2002, Mumbai, India, pp. 126-33, January 2002.

[9] A. L. J. Janssen, L. H. te Paske, W. A. van der Linden, R. P. P. Smeets, «Magnetic Saturation at Short-Circuit Tests on Power Transformers», IEEE PES Summer Meeting, paper 72.03, July 2001.

[10] G. Bertagnolli: «Short-circuit Duty of Power Transformers», Book printed on behalf of ABB Trasformatori Legnano (Milano), ISBN Italy, 1996.

[11] IEC Committee Draft 14/465/CD Annex B, «Theoretical Evaluation of the Ability to Withstand the Dynamic Effects of Short Circuit», 2003

[12] CIGRE WG12.05: «An International Survey on Failures in Large Power Transformers in Service», Electra 88, pp.21–37, 1983.

[13] G. Bertagnolli: «Results of short-circuit performance of transformers», CIGRE Transformer Colloquium, Budapest, Short-circuit performance; Tests and Failures, report 2, CIGRE TC 12, 1999.

[14] Macor, G. Robert, D. Girardot, J. C. Riboud, T. Ngegueu, J. P. Arthaud, E. Chemin, «The Short-Circuit Resistance of Transformers: The Feedback in France Based on Tests, Service and Calculation Approaches», CIGRE Conference, paper 12–102, 2000.

[15] N. V. C. Sastry, H. Gupta, «Short-Circuit Test on EHV Transformers», 9th Int. Conf. on Short-Circuit Currents in Power Systems, Cracow 2000

[16] H. Gupta, N. N. Misra, «Concerns about Short-Circuit Tests», TrafoTech 2002, pp. 121–25, Mumbai, India, January 2002

[17] Mengyun Wang, «1995-1999 Fault Statistics & Analysis All Transformer Type in China», Electrical Equipment 2(1), 2001

[18] Y. He, M. Wang, «The Transformer Short-Circuit Test and the High-Power Laboratory in China – the Past, Present and Future», IEEE Electrical Insulation Magazine, Jan/Feb. 2004, vol.20 no.1, pp 15–19.

[19] P. Boss, J.-L. Hermin, J.-P. Uehlinger, G. Biasiutti, P. Muller, «Study on inappropriate transformer trippings by Buchholz relays».

[20] CIGRE WG 13.08: «Life Management of Circuit Breakers», CIGRE Technical Brochure 165, August 2000.

[21] M. de Nigris, «Checking the Short-Circuit Withstand of Power Transformers: CESI perspective», KEMA Int. Symp. on High Power Testing, Nov. 2004

[22] Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях. Составитель и научный редактор А.И. Лурье. – М.: «Знак». 2005. (Добавлено редактором)

КОММЕНТАРИЙ ЭКСПЕРТА

ГОРШУНОВ В.Ю., заведующий лабораторией электромагнитных процессов Испытательного центра ОАО «НТЦ электроэнергетики»

Опубликование этой статьи в российской печати считаю очень своевременным, поскольку те же проблемы стоят перед отечественной электротехникой гораздо более остро: если в Советском Союзе проведение испытаний на стойкость при КЗ типопредставителей всех серий трансформаторов предписывалось стандартом, а в условиях централизованного руководства, при наличии единого изготовителя – Минэлектротехпрома и ограниченного числа заказчиков – Минэнерго, МПС, Минхимпрома, проблемы финансирования испытаний решались сравнительно безболезненно, то при выделении энергосистем в самостоятельные предприятия, финансовые проблемы стали главным препятствием в проведении испытаний и восстановительного ремонта. Если до 1992 года на стендах ВЭИ им. Ленина, НИЦ ВВА и МИС Тольятти было испытано 129 трансформаторов мощностью 6,3–400 МВА, то после 1992 года – только 5, при этом самый мощный испытательный центр – МИС Тольятти прекратил свое существование. В то же время появились новые материалы и технологии, в полной мере не прошедшие экспериментальной проверки (транспонированный провод, алюминиевая фольга, эпоксидные компаунды, древесно-слоистый пластик и т.д.). Действующие в настоящее время методики расчета – полумпирические, основанные на большом количестве опытных данных. Отсутствие информации о поведении новых материалов не дает возможности правильно учесть роль новых материалов и технологий.

В новом стандарте «Трансформаторы силовые. Общие технические условия» (ГОСТ Р 52719-2007 п. 9.3.2.4.) допускается приемка мощных трансформаторов (в части стойкости при КЗ) по расчету, выполненному по методике изготовителя. Такой подход требует проверки методики испытаниями. Таким образом, полностью поддерживаю мнение авторов статьи о том, что «...использование только расчетных методов недостаточно для подтверждения характеристик трансформатора в части стойкости к токам КЗ в максимальном случае».

В части методики испытаний и диагностики повреждений позиция авторов статьи во многом совпадает с российским опытом испытаний, в частности, основным методом контроля состояния трансформаторов после каждого КЗ и у них, и у нас служит измерение сопротивления КЗ на пониженном напряжении. Браковочные нормы разработаны на основании опытных данных с учетом конструкции и материалов обмоток и внесены в соответствующие стандарты. И за рубежом, и на отечественных стендах проводятся вспомогательные измерения (вибрации, силы, шумы), которые дополняют объем информации об испытаниях, но вытеснить измерение сопротивления КЗ на пониженном напряжении не могут. Как зарубежные, так и российские стандарты допускают проведение испытаний как предварительно возбужденного, так и предварительно закороченного трансформатора. Предпочтение в России отдается второму методу, поскольку при этом отпадает необходимость перевозозбуждать испытуемый трансформатор на холостом ходу, чтобы при КЗ обеспечить расчетные токи. При этом, если напряжение подается на внутреннюю обмотку, а внешняя закорочена, принимаются меры по отстройке магнитной системы от насыщения, поскольку экспериментально и теоретически доказано, что насыщение магнитной системы, возникающее при подаче напряжения на внутреннюю обмотку предварительно закороченного со стороны внешней обмотки трансформатора, приводит к снижению электромагнитных сил по сравнению с силами, возникающими при КЗ предварительно возбужденного трансформатора.

Разница в подходах к испытаниям в следующем. Поскольку такие испытания дорогостоящие, в нашей стране отдается предпочтение пофазным испытаниям. (Сравнительные испытания, с регистрацией сил в однофазном и трехфазном режимах, проведенные в нашей стране в семидесятые годы, показали, что разница в силах пренебрежимо мала.) При этом каждая фаза может быть изготовлена с различными

техническими решениями. В процессе испытаний, после подтверждения соответствия трансформатора требованиям стандарта, испытания продолжаются с постепенным увеличением токов от опыта к опыту до начала повреждения обмоток. После испытаний трансформатор обязательно разбирается с последующей заменой обмоток.

Программа испытаний трансформатора по ГОСТ 20243-74 более жесткая, чем по МЭК 60076-5 (пять опытов, из которых четыре – в положении переключателя, соответствующем наиболее тяжелому расчетному режиму, а один – при включении всех витков против трех опытов в номинальном и крайних положениях переключателя). Такой подход оправдан тем, что вынуждает отечественных конструкторов закладывать в изделие коэффициенты запаса большие, чем у зарубежных трансформаторов. В развитых зарубежных странах срок службы трансформатора оговаривается при поставке. По истечении срока службы трансформатор, независимо от его состояния, заменяется новым. В нашей стране трансформатор вынуждены эксплуатировать до тех пор, пока позволяет техническое состояние. Повышенные коэффициенты запаса позволяют продлить этот ресурс.

Следует обратить внимание на зарубежный опыт испытаний трансформатора, укомплектованного газовым реле. В нашей стране реле во время испытаний обычно не ставится, из опасения повредить его. Поэтому мы не располагаем информацией о ложных срабатываниях его при сквозных КЗ.

Наконец, следует отметить, что статистика повреждений трансформаторов при КЗ в нашей стране недовольно надежна: в ряде случаев изготовители и эксплуатация пытаются скрыть истинную причину аварии. Первые – чтобы не признавать факт выпуска продукции, не соответствующей стандарту, вторые – чтобы скрыть ошибки оперативного персонала, приведшие к авариям. Поэтому не следует пренебрегать проблемой стойкости силовых трансформаторов при КЗ, считая короткие замыкания с предельными токами маловероятными.

КОММЕНТАРИЙ ЭКСПЕРТА

ЛУРЬЕ А. И., к.т.н., ФГУП ВЭИ
ПАНИБРАТЕЦ А. Н., к.т.н., ФГУП ВЭИ

Статья, посвященная актуальной проблеме обеспечения надежности трансформаторного оборудования, представляет интерес для широкого круга специалистов как в производстве, так и в эксплуатации трансформаторов.

Статья написана очень профессионально. Авторы дают краткую характеристику проблемы и подробно останавливаются на накопленном опыте испытаний мощных (более 25 МВА) трансформаторов на электродинамическую стойкость трансформаторов при коротких замыканиях (КЗ) на стенде КЕМА в Голландии. Эти сведения очень ценны, так как стенд КЕМА – крупнейший генераторный стенд в мире, на этом стенде испытываются трансформаторы многих мировых производителей. Сертификат КЕМА – полная гарантия надежности. В статье отражен объем испытаний, их основные результаты, основные положения методики испытаний и рекомендации по оценке результатов испытаний. Статья заканчивается четкими выводами.

Особенно важно отношение авторов к испытаниям при токах КЗ как к основному способу подтверждения необходимой надежности трансформаторов в эксплуатации. Авторы указывают, например, что

около трети трансформаторов не выдерживают испытаний на стойкость при КЗ и что ни один из трансформаторов, повредившихся в эксплуатации, не подвергался испытаниям на стойкость при КЗ, зато большинство из них прошли процедуру «теоретического обоснования» по МЭК.

Это особенно актуально, важно и своевременно для России, так как в последние годы у нас практически прекратились испытания на стойкость при КЗ мощных трансформаторов, и все чаще раздаются «околонаучные» предложения о замене типовых испытаний просто расчетом (даже не теоретическим обоснованием по МЭК, а просто – расчетом!). Хотя любому специалисту известно (и это аргументированно подтверждают и авторы из КЕМА), что полной методики расчетного подтверждения стойкости при КЗ нет и не может быть «по определению», также как, например, и полной методики подтверждения электрической прочности изоляции. Ситуация усугубляется тем, что недавно чиновники, вопреки мнению специалистов, в интересах бизнеса и в ущерб надежности добились введения в новую редакцию стандарта ГОСТ Р 52719-2007 «Трансформаторы силовые. Общие техни-

ческие условия» ряда облегчающих положений, в том числе равноправности расчетов и испытаний токами КЗ, что может привести к полной замене типовых испытаний мощных трансформаторов некими «расчетами». Как итог, это приведет к снижению надежности оборудования. При этом авторы нового стандарта оперировали именно теми аргументами, которые авторы из КЕМА анализируют и критикуют в рецензируемой статье и приходят к выводу о невозможности подмены испытаний расчетами.

Выводы авторов статьи о важности испытаний для обеспечения безаварийной работы трансформаторов и о том, что испытания не могут быть заменены теоретическим обоснованием, расчетом и расчетным сопоставлением с аналогичными испытанными трансформаторами, на удивление полностью совпадают с мнением отечественных специалистов, проводивших в 70–80-е годы аналогичные исследования на отечественных испытательных стендах. Есть надежда, что данная публикация заставит отечественных производителей и энергетиков «повернуться лицом» к испытаниям на стойкость при КЗ, как одному из основных способов обеспечения надежности энергоснабжения.

www.energyexpert.ru

Интернет-портал для специалистов электроэнергетической отрасли

- Оперативные новости электроэнергетики и электротехники
- График предстоящих выставок и семинаров
- Форум профессионального общения
- Нормативные документы
- Книги по специальности
- Подписка на журналы «Энергоэксперт» и «Релейщик»
- Информация для рекламодателей

