

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Вдовико В. П., Сибирский НИИ энергетики, г. Новосибирск, Бабкин В. В., Эткинд Л. Л., Свердловский завод трансформаторов тока, г. Екатеринбург

Качество изоляции высоковольтного оборудования контролируется при приемо-сдаточных испытаниях повышенным напряжением в объеме и нормах по [1, 2]. Однако, такие испытания относятся к разряду разрушающих методов контроля и позволяют ответить лишь на один вопрос - соответствует или нет изоляция установленным требованиям к кратковременной электрической прочности.

Опыт эксплуатации оборудования показывает, что надежность его определяют различного вида дефекты в изоляции, которые недостаточно эффективно выявляются и при изготовлении оборудования, и эксплуатации.

Наиболее эффективным методом выявления характерных для изоляции дефектов (в сочетании с другими методами, определенными в вышеуказанных стандартах) является метод измерения ЧР. Более 25 лет качество изоляции выпускаемых заводами силовых и измерительных трансформаторов 330 кВ и выше определяется с помощью характеристики ЧР - кажущегося заряда ЧР [3]. При разработке новых видов конструкций электро-изоляционных систем и совершенствовании технологии изготовления изоляции метод измерения ЧР может явиться основным инструментом оценки состояния изоляции. Эффективность применения метода подтверждается и тем, что в ряде нормативно-технических документах различного уровня [1, 2, 3, 4, 5, 6 и др.] введены требования по применению этого метода для контроля качества изоляции во вновь разрабатываемых трансформаторах.

Высокая эффективность применения метода регистрации ЧР достигнута на Свердловском заводе трансформаторов тока. Применение этого метода позволяет не только определять качество изоляции выпускаемого оборудования, но и решать задачи по совершенствованию конструкций и технологии изготовления.

На рис. 1 и 2 иллюстрируются результаты измерения ЧР в трансформаторах, подвергавшихся модернизации.

Рис. 1. Эффект снижения уровня ЧР в трансформаторе ЗНОЛ35 от наложения полупроводящей ленты на буферные участки изоляции

Рис. 2. Эффект снижения уровня ЧР в трансформаторе ТОЛЗ5 от выведения границы раздела компаундов заливок из зоны действия сильного электрического поля

На рис. 1 и 2 показаны фазовые характеристики q , то есть распределение максимальных значений кажущегося заряда q по фазе периода воздействующего на изоляцию объекта напряжения, зарегистрированные при трехкратном приложении максимального значения рабочего напряжения 22,5 кВ. Эффективность экспериментального определения состояния изоляции является очевидной. Известно [7, 8 и др.], что процесс ЧР описывается комплексом характеристик, к которому относятся: максимальное значение кажущегося заряда q , средний ток I , квадратичный параметр D , распределение числа разрядов N в единицу времени по их заряду q , $N(q)$, распределение максимального значения кажущихся зарядов q по фазе воздействующего на изоляцию переменного напряжения, $N(\varphi)$, и др. В то же время в различных национальных и международных стандартах в качестве характеристики ЧР для оценки качества изоляции принята только одна характеристика - максимальное значение кажущегося заряда q . Начало применения характеристики кажущегося заряда q в качестве критерия качества изоляции при изготовлении высоковольтных маслонаполненных трансформаторов относится к периоду 30 летней давности, когда была показана связь между стадиями разрушения бумажно-масляной и маслобарьерной изоляции частичными разрядами, описываемыми только одной характеристикой q . Рассматривая ГОСТ 1516.3-96 и Стандарты МЭК в части требований по измерению ЧР в изоляции высоковольтного оборудования, следует отметить, что эти нормативные документы устанавливают в качестве критерия отбраковки характеристику q . Насколько некорректно это требование следует из того факта, что можно зарегистрировать как единичный импульс ЧР максимального значения q , так и такого же значения q множество повторяющихся ЧР за время измерения. В первом случае это может быть ложным сигналом (сигнал помехи) или рецидивом нормализации контролируемого объекта. Во втором случае регистрация повторяющихся ЧР максимального значения заряда за время измерения ЧР может привести к занижению значения q . Такая формулировка требований приводит к неопределенности в оценке состояния изоляции и произвольной трактовке норм.

Следует отметить, что в последней редакции Стандарта МЭК ICE 60270 [7], упоминается о необходимости регистрации наибольших значений кажущихся зарядов, которые имеют некоторую повторяемость.

Можно предположить о достаточности использования характеристики q при оценке состояния вновь изготовленной изоляции, если ставится задача изготовления оборудования, в изоляции которого практически отсутствуют ЧР при напряжениях испытания или имеют очень низкий уровень ЧР, около единиц пКл. Применение в качестве критерия браковки значений кажущегося заряда q в диапазоне от 25 до 300 пКл требует более критического анализа обоснования достаточности использования одной характеристики ЧР.

По нашему мнению совершенно иной подход должен быть в использовании характеристик ЧР при оценки степени опасности их в изоляции оборудования, находящегося в эксплуатации. Здесь особенно представляется ошибочным использование только одной характеристики q и требуется более корректное применение q в сочетании с другими параметрами процесса ЧР. Рассмотрим это на простом примере двух вариантов процесса ЧР в объектах контроля, рис. 3.

Рис. 3. Гистограммы зарегистрированных импульсов q ЧР в двух объектах.

В двух объектах зарегистрированы ЧР и представлены фрагменты регистрации в течение 1 секунды. В объекте а) и б) ЧР имеют одно и то же значение q , но число ЧР в объекте а) значительно больше, чем в объекте б). Если учитывать, что каждый ЧР приводит к разрушению изоляции (и чем выше кажущийся заряд, при всех прочих равных условиях, тем более интенсивное разрушение), то нетрудно прийти к выводу о повышенной опасности ЧР в объекте а).

Очевидным является необходимость учета числа ЧР, особенно больших значений, близких к максимальному значению q . Здесь может быть наряду с q применен одновременно учет среднего тока ЧР I или учет числа ЧР больших значений q (разновидность метода амплитудной селекции). На рис. 2 представлены гистограммы для иллюстрации такого метода учета числа ЧР больших значений q .

Измерение в каждом периоде напряжения n своих максимальных значений q_{\max} и установка уровня регистрации qR , обеспечивающего регистрацию кажущегося заряда в интервале от qR до q_{\max} , позволяют произвести амплитудную селекцию и определить регулярность R процесса ЧР кажущегося заряда qR . Регулярность $R = 1/n$ соответствует регистрации ЧР наибольшего заряда в одном периоде (из n) напряжения за время измерения; регулярность $R = 0,5$ соответствует регистрации ЧР наибольшего заряда в половине периодов напряжения за время измерения и регулярность $R = 1$ соответствует регистрации ЧР наибольшего заряда в каждом периоде напряжения. Таким образом возможна регистрация ЧР максимального значения кажущегося заряда при различных значениях R . Применение такой методики позволяет регистрировать ЧР, повторяющихся с различной степенью частоты в каждом периоде воздействующего на изоляцию переменного напряжения, и получить более объективную оценку опасности ЧР для контролируемого объекта. Нетрудно представить, что ЧР, имеющие определенное значение заряда при $R = 0,5$ или $1,0$, более интенсивно разрушают изоляцию, чем ЧР того же заряда при $R = 0,01$ (при всех прочих равных условиях).

Рис. 4. Гистограммы максимальных значений кажущихся зарядов q_{\max} ЧР, зарегистрированных в каждом периоде воздействующего переменного напряжения.

Указанная методика нашла применение в разработках средств регистрации ЧР Сибирского НИИ энергетики и при измерении ЧР в трансформаторном оборудовании 110-500 кВ различных энергопредприятий [9, 10 и др.]. Методика была реализована в устройствах контроля первого поколения аппаратным путем и в последний период, в связи с разработкой компьютерных устройств контроля, программным путем.

В последний период времени исследователи ЧР начали использовать характеристику ЧР - мощность P . Мощность P [7 и 8] выражается в виде $P = (q_1 U_1 + q_2 U_2 + \dots + q_m U_m) / T$, где q_1, q_2, q_m - измеренные кажущиеся заряды; U_1, U_2, U_m - мгновенные значения напряжения в моменты образования

соответствующих ЧР; T - продолжительность измерения ЧР. По существу мощность P представляет собой сумму энергий единичных ЧР W . Если рассматривать энергию единичного разряда во включении, то она должна сохраняться равной независимо от толщины изоляции при условии идентичности геометрии включений, свойств диэлектриков и равенства средней напряженности электрического поля изоляции. В то же время согласно приведенной формуле мощность возрастает линейно в зависимости от роста напряжения на изоляционном промежутке и, следовательно, мощность ЧР в одном и том же включении при напряжении 300 кВ оценивается в 50 раз более, чем при напряжении 6 кВ. Можно было бы предположить, что значения регистрируемых q в первом случае будут в 50 раз меньше из-за возрастания толщины изоляции и сохранения средней напряженности поля, чем во втором случае; тогда формула расчета P соответствовала бы физическому смыслу процесса ЧР. Однако, анализ распределения разрядного тока в схеме замещения изоляционного промежутка с ЧР, рис. 3, показывает, что из-за влияния краевой емкости C_k не наблюдается уменьшения емкости C_d пропорционально увеличению расстояния d . Расчеты показывают, что при увеличении расстояния d в 20 раз емкость C_d уменьшается всего в 2,5 раза. Следовательно, производить сравнение мощности ЧР даже в объектах с однотипной изоляции разного уровня напряжения (и соответственно разной толщины изоляции) не является корректным.

СДВ - емкость изоляции ближней зоны включения; C_{D1} , C_{D2} - емкости изоляции между включением и электродом; C_{K1} , C_{K2} - краевая емкость включения; $C_d = C_{D1}(C_{D2}) + C_{K1}(C_{K2})$, $C_И$ - емкость основной части изоляции промежутка; D - толщина изоляционного промежутка.

Рис. 5. Схема замещения изоляционного промежутка с ЧР во включении СВ

Анализ информативности характеристики ЧР q , результатов выполненных исследований ЧР в литой изоляции реальных конструкций трансформаторов и процессов разрушения изоляции, показывает, что принятие в ГОСТ 1516.3-96 и Стандартах МЭК только одной характеристики ЧР - кажущегося заряда единичного ЧР в качестве браковочного критерия изоляции, приводит к возможности неоднозначной интерпретации процесса ЧР и, как следствие, к возможности ошибочной оценки качества изоляции.

Принятые нормативы в ГОСТ 1516.3-96 и Стандартах МЭК являются, на наш взгляд, недостаточно аргументированными и не отражают существующих представлений о разрушении изоляции частичными разрядами. Существует настоятельная необходимость пересмотра и уточнения нормативов по характеристикам ЧР.

Литература

1. Электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. - Межгосударственный стандарт ГОСТ 1516.3 - 96,
2. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции - Межгосударственный стандарт ГОСТ 1516.2 - 97,
3. Трансформаторы силовые. Методы измерения характеристик частичных разрядов при испытаниях напряжением промышленной частоты - ГОСТ 21023-75,
4. Измерительные трансформаторы. Часть 1: Трансформаторы тока - Международный стандарт МЭК 44-1, 1 издание 1996-12,

5. Измерительные трансформаторы. Часть 2: Индуктивные трансформаторы напряжения - Международный стандарт МЭК 60044 - 2, 1 издание 1997-02,
6. Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V - International standard IEC 137, 4 edition 1995-12,
7. High-voltage test techniques - Partial discharge measurements - International standard IEC 60270, 3 edition 2000-12,
8. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов - ГОСТ 20074 - 83,
9. Вдовико В. П., Овсянников А. Г. Контроль изоляции трансформаторного оборудования 110-500 кВ под рабочим напряжением по характеристикам частичных разрядов - в сб.: "Повышение надежности и эффективности контроля трансформаторов в эксплуатации", материалы Международного Семинара, 31.05.96 г., Запорожье, Украина,
10. Вдовико В. П. и др. Диагностика электрической изоляции трансформаторов тока 220-500 кВ под рабочим напряжением с использованием характеристик частичных разрядов - в сб.: "Состояние, основные направления развития производства, повышение технического уровня и надежности обслуживания трансформаторного оборудования", материалы Международного Симпозиума, 28-30.09.98 г., Запорожье, Украина.