ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПАРМА ТЕНЗОР-2 ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕГЛАМЕНТНЫХ РАБОТ НА ВЫСОКОВОЛЬТНОМ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ

В настоящее время парк силовых трансформаторов, автотрансформаторов, шунтирующих реакторов и высоковольтных электродвигателей, эксплуатируемых в энергосистемах России, достаточно старый. В последние годы не имелось возможности своевременного обновления оборудования, отработавшего свой нормативный срок службы. В ближайшем будущем изменения ситуации не предвидится. В связи с вышеизложенным возникает необходимость принятия правильного решения о дальнейшей судьбе оборудования, что невозможно без достоверной информации о его состоянии.

Проведение капитальных ремонтов без предварительного обследования себя не оправдывает, поскольку приводит к неоправданным материальным затратам и зачастую, вследствие разгерметизации оборудования, к ухудшению состояния изоляции. В настоящее время для электротехнического оборудования, установленного на ПС ЕНЭС, организуется система периодического технического освидетельствования, позволяющая оценить состояние оборудования на основании результатов диагностических измерений. Один из важнейших оценочных показателей – измерение емкости изоляции и тангенса угла диэлектрических потерь (tgδ).

Для чего это нужно?

Если бы электротехнической промышленности удалось создать идеальную изоляцию, то при приложении к ней переменного напряжения происходили бы поочередно повторяющиеся заряд и разряд, и в изоляции появлялся бы переменный емкостный ток. При этом вся энергия, полученная изоляцией за время заряда, возвращалась бы в сеть во время разряда.

Произведение емкостного тока на напряжение дает величину реактивной или емкостной мощности; она

пропорциональна емкости изоляции (кроме того, частоте и квадрату приложенного напряжения). Таким образом, изоляция из идеальных диэлектриков потребляла бы из сети только реактивную (емкостную) мощность.

Однако практически идеальных диэлектриков не существует. В реальной изоляции всегда имеется потеря энергии, поэтому при приложении к ней напряжения из сети потребляется не только реактивная, но и активная мощность, обусловленная потреблением энергии изоляцией. Отношение активной мощности, потребляемой изоляцией, к реактивной мощности и называется тангенсом угла диэлектрических потерь. Так как активная мощность, потребляемая изоляцией, значительно меньше реактивной и отношение их обычно измеряется сотыми долями, то удобнее тангенс угла диэлектрических потерь выражать в процентах.

Потребление энергии изоляцией обусловлено различными причинами. Например, во многих твердых диэлектриках под воздействием приложенного переменного напряжения происходят колебания частиц, имеющих электрические заряды (атомов, молекул), что сопровождается затратой энергии. Кроме того, все диэлектрики в какой-то степени проводят ток не только путем заряда и разряда, а непосредственно, и протекание этого тока (тока проводимости), так же как в проводниках, сопряжено с потерями. Особенно большие потери возникают в неоднородных изолирующих материалах, в которых наряду с хорошими диэлектриками имеются вещества с пониженными диэлектрическими свойствами. Емкостные токи, протекая через вкрапления этих веществ, создают значительные потери; достаточно сравнительно небольших примесей таких веществ, распределенных по всему объему материала, чтобы потери в таком материале существенно возросли. Особенно заметно действие

вкраплений такого сравнительно хорошо проводящего вещества, как вода, которая, проникая в поры волокнистых материалов, существенно увеличивает диэлектрические потери.

Таким образом, тангенс угла диэлектрических потерь является чувствительным показателем увлажнения изоляции, особенно если она состоит из волокнистых материалов или увлажняется во всем объеме (как, например, в трансформаторах). При этом существенно, что величина тангенса угла диэлектрических потерь не зависит от размеров изоляции: если вся изоляция однородна по своим свойствам, то активная и реактивная мощности будут зависеть от них в одинаковой степени.

Кроме увлажнения изоляции, tgδ в известной степени показатель наличия воздушных включений в ней. Так, если тангенс угла диэлектрических потерь растет с ростом приложенного напряжения, то это означает, что в изоляции имеются воздушные включения. Объясняется это тем, что с ростом напряжения воздух во все большей степени начинает проводить ток, в связи, с чем возрастают потери.

Увеличение тангенса угла диэлектрических потерь у электрооборудования может быть также вызвано наличием воздуха во вводах (концевых выводах), применением масла с большим тангенсом угла диэлектрических потерь и другими причинами. Поэтому измерению tgδ на электротехническом оборудовании должно сопутствовать определение других диэлектрических характеристик изоляции (сопротивления изоляции, коэффициента абсорбции, емкости и т.д.). Только сопоставив все эти характеристики, можно вынести правильное суждение о состоянии изоляции.

Необходимость измерений параметров изоляции

Система технического обслуживания и ремонта по текущему состоянию электрооборудования (ЭО) является наиболее эффективной, однако требует детальной проработки и совершенствования организации технического обслуживания и ремонтов ЭО.

Объем и нормы испытаний электрооборудования регламентируют нам при разных видах контроля (П, К, С, Т, М) среди прочих испытаний, проводить у разного ЭО например, силовых трансформаторов (автотрансформаторов), реакторов, трансформаторов тока, генераторов, высоковольтных вводов (ВВ), концевых выводов (КВ) электродвигателей и проходных изоляторов (ПИ), проверку тангенса угла диэлектрических потерь (tgδ).

П – при вводе в эксплуатацию нового электрооборудования и электрооборудования, прошедшего восстановительный или капитальный ремонт и реконструкцию на специализированном ремонтном предприятии; **К** – при капитальном ремонте на энергетическом предприятии; **С** – при среднем ремонте; **Т** – при текущем ремонте электрооборудования; **М** – между ремонтами. Категория «К» включает контроль при капитальном ремонте, как данного вида электрооборудования, так и оборудования данного присоединения.

Статистика аварийности силовых трансформаторов за последние годы показала, что около 60 % повреждений трансформаторов связано с высоковольтными вводами. Задача определения причин выхода из строя вводов с целью повышения их надежности весьма актуальная, так как снижение повреждаемости вводов может дать заметный экономический эффект особенно с ростом единичных мощностей электрооборудования.

Периодичность межремонтного контроля электрооборудования, если она не указана в ПТЭ или в соответствующих разделах Норм, устанавливается техническим руководителем энергетического предприятия с учетом условий и опыта эксплуатации, технического состояния и срока службы электрооборудования. РД 34.45-51.300-97 рекомендовано производить измерение емкости и тангенса угла диэлектрических потерь (tgδ) для вводов:

- 110–220 кВ – 1 раз в 4 года;
- 330–750 кВ – 1 раз в 2 года.

Контроль изоляции вводов под рабочим напряжением рекомендуется производить у вводов 110–750 кВ с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа на автотрансформаторах с номинальным напряжением 330 кВ и выше и трансформаторах с номинальным напряжением 110 кВ и выше, установленных на электростанциях и узловых подстанциях.

Техническим руководителям энергетических предприятий рекомендуется обеспечивать внедрение предусмотренного Нормами контроля состояния ЭО, позволяющего выявлять дефекты на ранних стадиях их развития, привлекая при необходимости организации, аккредитованные на право проведения соответствующих испытаний. По мере накопления опыта проведения контроля решением технического руководителя энергетического предприятия возможны переход к установлению очередных сроков ремонта ЭО по результатам диагностики его состояния.

Однако, как показывают статистические данные [7], повреждения ЭО связаны с нарушением в эксплуатации – невыполнение или несвоевременное выполнение регламентных работ при и так большом периоде между испытаниями и, как следствие, недопустимые отклонения характеристик изоляции от нормативных значений.

Одна из причин неполных испытаний ЭО – отсутствие на энергетических предприятиях современных приборов и методической базы. Среди таких приборов особо выделяется **измеритель параметров изоляции, разработанный компанией «ПАРМА» – ТЕНЗОР-2.**

Отличительные особенности ПАРМА ТЕНЗОР-2:

- повышенная безопасность работы за счет **удаленного дистанционного управления прибором – 10 метров и более;**
- снижение времени на подготовку рабочего места за счет **малых габаритов и веса испытательной установки;**
- возможность использования как **в лабораторных (заводских)** условиях, так и **полевых (энергообъект)** условиях;
- **многообразие режимов** использования прибора:
  - в режиме **«ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ»** измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь (tgδ) высоковольтных вводов (концевых выводов электродвигателей, проходных изоляторов) с любым типом изоляции под рабочим и испытательным напряжением. Кроме того, измерение параметров изоляции, при необходимости, может быть выполнено с компенсацией токов влияния,

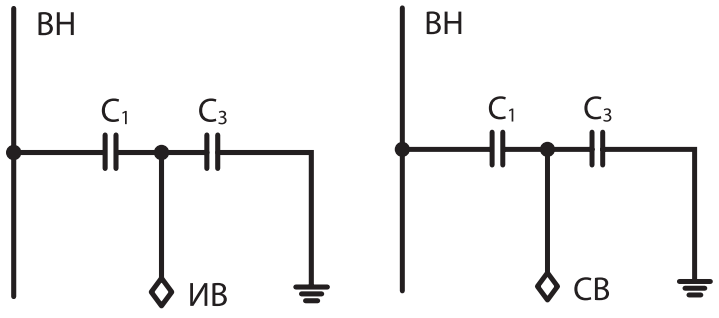

Рис. 1. Упрощенная схема замещения изоляционной конструкции высоковольтного ввода. ВН – вывод высокого напряжения; СВ – специальный вывод (potential tap); ИВ – измерительный вывод (test tap)

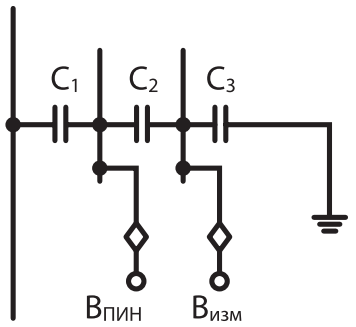

Рис. 2. Схема замещения ввода с двумя выводами. $В_{пин}$ – специальный вывод (potential tap); $В_{изм}$ – измерительный вывод (test tap)

- в режиме **«КОЭФФИЦИЕНТ ТРАНСФОРМАЦИИ»** определение коэффициента трансформации однофазных и трехфазных силовых и измерительных трансформаторов,
- в режиме **«ИМПЕНДАНС»** вычисление импеданса (полного сопротивления) и сопротивления короткого замыкания трансформаторов,
- в режиме **«МОЩНОСТЬ»** вычисление активной, реактивной и полной мощности и потерь холостого хода (cos(φ)) трансформаторов,
- в режиме **«ВЕКТОРЫ»** изменение тока, напряжения и угла их фазового сдвига.

ТЕНЗОР-2 позволяет в удобном формате регистрировать и хранить данные измерений и расчетов на SD-карте.

Рассмотрим основной режим работы ПАРМА ТЕНЗОР-2 **«ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ»**.

Объект испытания

Упрощенная схема замещения изоляционной конструкции высоковольтного ввода может быть представлена в виде нескольких последовательно соединенных конденсаторов (рис. 1). Емкость, tg δ и сопротивление этих конденсаторов эквивалентны характеристикам соответствующих зон изоляции ввода. Емкость C_1 соответствует основной изоляции остова ввода; емкость C_2 определяет характеристики зоны изоляции, используемой для устройства ПИН (конденсатор ПИН); емкость C_3 эквивалентна емкости последней обкладки остова относительно соединительной втулки (емкость наружных слоев изоляции).

Полная схема замещения ввода с двумя выводами представлена на рис. 2, она состоит из трех емкостей C_1, C_2 и C_3. В подавляющем большинстве конструкций вводов отбор мощности не предусматривается, поэтому специальный вывод в них отсутствует. В этом случае в схеме замещения ввода емкости C_1 и C_2 объединяются в одну (рис. 1б). В отечественных стандартах емкость C_3 сохраняет свое обозначение, а в стандартах МЭК она переименовывается в C_2.

Таблица 1. Основные характеристики ПАРМА ТЕНЗОР-2

Характеристика		Значение
Время установления рабочего режима с момента включения		не более 20 с
Гарантированная дальность управления ИБ от пульта ДУ с использованием Bluetooth		не менее 10 м
Время измерения с усреднением		5 с или 1 мин
Диапазон измерений электрической емкости в режиме «диэлектрические параметры», пФ		от 2 до 9 900 000
Диапазон допускаемых значений силы переменного тока промышленной частоты в цепи объекта измерений, А		от $2\cdot10^{-5}$ до 5
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения электрической емкости, %		±(0,5(1+ tgδx))
Диапазон измерений тангенса угла потерь tg$x$		от $2\cdot10^{-4}$ до 1
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения тангенса угла потерь		±($2\cdot10^{-4}$+0,0075 tgδx)
Диапазон отображения электрической емкости в режиме «импеданс», мкФ		от 9,9 до 16 000
Диапазон отображения полного электрического сопротивления, кОм		от $2\cdot10^{-4}$ до 5
Диапазон отображения индуктивности, Гн		от $1\cdot10^{-6}$ до 16
Диапазон отображения коэффициентов масштабного преобразования трансформаторов напряжения		от 1 до 500
Диапазон отображения полной мощности, кВ·А		от 0,0001 до 2,5
Пределы допускаемой дополнительной погрешности изменений напряжения и силы переменного тока промышленной частоты от изменения температуры окружающей среды в диапазоне рабочих температур на каждый градус, в долях от пределов допускаемой основной погрешности		±0,01
Габаритные размеры кейса (в закрытом виде)		365×295×170 мм
Масса		не более 13 кг
Нормальные условия применения:	температура окружающей среды, °С	от 15 до 25
	относительная влажность, %	от 30 до 80
	атмосферное давление, кПа	от 84 до 106

Процедура измерений

При проведении измерений используется источник напряжения не менее 10 кВ для основной изоляции вводов и 5 кВ (3 кВ для вводов, изготовленных по ГОСТ10693-64) для изоляции измерительного конденсатора ПИН (C_2) или(и) последних слоев изоляции (C_3) и эталонный конденсатор (C_0).

Для примера проведем измерения параметров изоляции двухобмоточного трансформатора. Подобная измерительная схема пригодна и для другого высоковольтного ЭО.

Для обеспечения безопасности и снижению влияния наводок все об-

мотки испытуемого трансформатора должны быть закорочены. Обмотки, не присоединенные к испытуемому вводу, должны быть заземлены. Измерительный вывод должен быть чистым и сухим (рис. 3).

Клемму заземления прибора ТЕНЗОР-2 и эталонного конденсатора требуется присоединить к клемме заземления на испытуемом трансформаторе. При измерении на не установленном на трансформатор вводе его фланец должен быть заземлен. В зависимости от того, какая изоляция испытывается – C_1 или C_3 испытательное напряжение подается соответственно к контактной клемме ввода или измерительному выводу.

Измерения следует выполнять в соответствии с руководством по эксплуатации ПАРМА ТЕНЗОР-2.

Измерения C_3 и $tg\delta_3$ производят, как правило, в заводских или лабораторных условиях, так как результат измерения в «полевых» условиях в сильной степени зависит от загрязненности и влажности окружающей среды. Кроме того, в процессе эксплуатации внешняя обкладка ввода заземлена, поэтому в изоляции между внешней обкладкой и фланцем (C_3) отсутствует электрическое поле, а значит, отсутствуют электрические потери, вызывающие ее нагрев и старение.

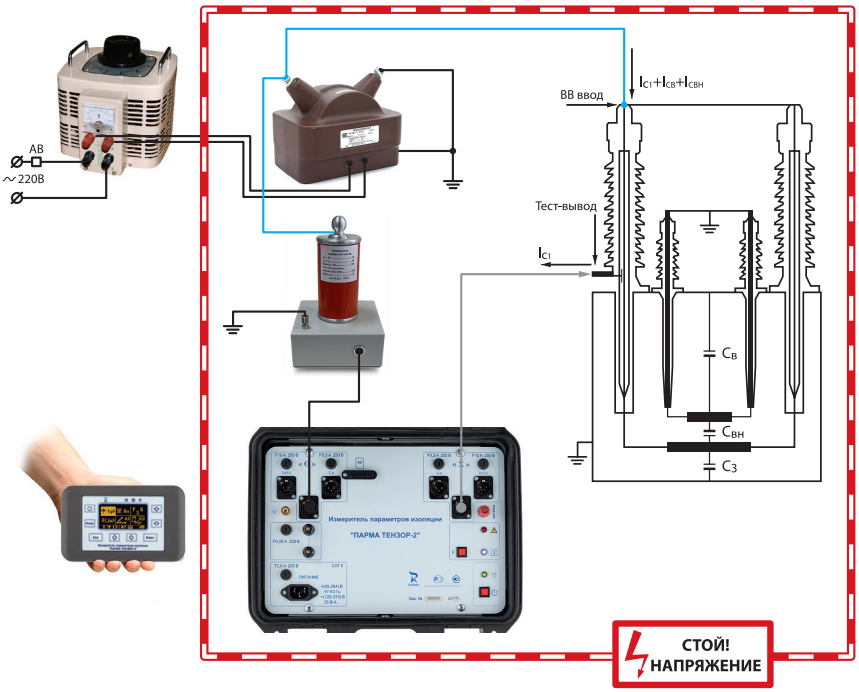

Рис. 3. Схема измерений. I_{c1} – ток утечки основной изоляции ВВ, $I_{cв}$ – ток утечки изоляции верхней обмотки трансформатора, $I_{свн}$ – ток утечки изоляции между верхней и нижней обмотками трансформатора

Результаты измерений

С помощью измерителя параметров изоляции ПАРМА ТЕНЗОР-2 в процессе эксплуатации ЭО можно получить:

- документально подтвержденная возможность дальнейшей эксплуатации ЭО;
- рекомендации по дальнейшей эксплуатации ЭО с перечнем ограничений режимного, температурного или иного характера;
- документально подтвержденный перечень дефектов ЭО с рекомендациями по их устранению и по проведению необходимых ремонтных работ;
- с помощью многообразия режимов выполнить техническое обслуживание ЭО на соответствие РД 153-34.3-46.304-00.

Комплект поставки и область применения

На рис. 3 помимо измерителя параметров изоляции ПАРМА ТЕНЗОР-2 и пульта дистанционного управления (ДУ) можно увидеть дополнительное оборудование, которое необходимо при проведении большинства измерений и которое по желанию заказчика может быть включено в комплект поставки:

- эталонный конденсатор (ПАРМА КГИ-10, КГИ-20);
- испытательный трансформатор (типа ОЛ1/10 УЗ);
- однофазный автотрансформатор (типа ЛАТР).

Получить подробную информацию о технических и конструктивных характеристиках, параметрах эксплуатации измерителя параметров изоляции ПАРМА ТЕНЗОР-2, скачать документацию, включая руководство по эксплуатации, ознакомиться с другим оборудованием компании и условиями сотрудничества, можно на сайте компании «ПАРМА»: **www.parma.spb.ru** (см. раздел Оборудование -> Измерители параметров изоляции -> ПАРМА ТЕНЗОР-2).

В настоящее время измеритель параметров изоляции ПАРМА ТЕНЗОР-2 внесен в Государственные Реестры утвержденных средств измерений России, Казахстана и Белоруссии.

ПАРМА ТЕНЗОР-2 успешно эксплуатируется заводами-производителями высоковольтного ЭО, энергетическими предприятиями ПАО «Россети», ПАО «Газпром», ПАО «Роснефть» и в высоковольтной лаборатории ПЭИПК для учебно-практических занятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования.
2. ПУЭ. 6-е и 7-е издание. Правила устройства электроустановок.
3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ. Утверждены приказом Минэнерго России от 19.06.2003 № 229.
4. РД 153-34.3-46.304-00. Положение об экспертной системе контроля, оценки состояния и условий эксплуатации силовых трансформаторов, шунтирующих реакторов, измерительных трансформаторов тока и напряжения.
5. СТО 56947007-29.240.10.030-2009. Методические указания по проведению периодического технического освидетельствования электротехнического оборудования ПС ЕНЭС.
6. Руководство по эксплуатации РА1.016.001 РЭ. Измеритель параметров изоляции ПАРМА ТЕНЗОР-2.
7. «О надежности высоковольтных вводов 330–500 кВ с твердой полимерной изоляцией». Электрические станции № 3, 2013.