СИГРЭ. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМИТЕТ SC A2 «ТРАНСФОРМАТОРЫ»

АВТОР:

ДРОБЫШЕВСКИЙ А.А.,
К.Т.Н.,
ЗАСЛУЖЕННЫЙ
ЧЛЕН CIGRE
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

В августе 2012 г. в столице Франции прошло знаковое для электроэнергетиков любой страны мероприятие – 44-я сессия Международного совета по большим электроэнергетическим системам CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electriques). Мы планируем подробно рассказать о деятельности этой организации (активным членом которой является ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС») и о результатах работы 44-й сессии. В одном из предыдущих номеров журнала «Энергия развития» [1] была приведена общая информация об этой организации, ее структуре, основных целях и задачах. В данном номере обсуждается исследовательский комитет (ИК) A2 «Трансформаторы», который изучает весь комплекс вопросов, связанных с проектированием и производством силовых трансформаторов и реакторов.

СИГРЭ создан в 1921 г. во Франции и на сегодняшний день является одной из наиболее авторитетных научно-технических ассоциаций, которая объединяет ученых и специалистов-энергетиков всего мира и оказывает сильное влияние на формирование стратегии развития отрасли многих стран

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМИТЕТ A2 «ТРАНСФОРМАТОРЫ» НА СЕССИИ СИГРЭ 2012

На прошедшей в августе 2012 г. в Париже сессии СИГРЭ на заседании ИК A2 «Трансформаторы» были вынесены важнейшие темы, которые двумя годами ранее были признаны приоритетными для обсуждения.

Возросшие требования к эксплуатационной надежности привели в последние годы к значительному развитию средств и методов диагностики для оценки состояния трансформаторов, находящихся в эксплуатации. В рамках темы 1 ***«Трансформаторы для сетей будущего»*** было представлено около полутора десятков докладов, освещающих следующие вопросы:

- интеллектуальные системы мониторинга, алгоритмы, доступ к новым данным;
- оптимальная эксплуатация с учетом информации о динамических режимах работы и перегрузках, данных, получаемых от систем мониторинга;
- применение трансформаторов с учетом новых технологий, воздействие гармоник.

1. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ

В настоящее время в ФСК ЕЭС используются сотни различных систем мониторинга (таких производителей, как GE, ABB, «Интеру», АСУ-ВЭИ, «Энергоавтоматизация» и другие). Этой теме посвящен доклад ***A2–102*** [2], представленный совместно ФСК ЕЭС, ФГУП ВЭИ, АСУ-ВЭИ, в котором приведен анализ восьмилетнего опыта развития и применения средств и методов диагностики и мониторинга трансформаторного оборудования в ФСК ЕЭС, показаны основные проблемы, возникающие в процессе применения систем мониторинга. Подчеркивается, что многие проблемы связаны с отсутствием типовых технических требований к системам мониторинга, четко прописанных правил и регламентов их внедрения и применения. В докладе отмечены основные технические проблемы, с которыми сталкиваются пользователи этих систем мониторинга. К ним относятся: неустойчивая работа первичных датчиков при работе в условиях низких температур; низкая чувствительность датчиков емкостного типа для определения влаги в масле; большие погрешности температурных индикаторов мембранного типа; ограничения при применении устройств контроля изоляции вводов; недостаточный объем информации, необходимый для точного конфигурирования аналитических моделей; недостаточно быстрая реакция поставщиков изделий на запросы потребителей; низкая квалификация шеф-инженеров, с одной стороны, и обслуживающего персонала подстанций, с другой. Приведены примеры этих проблем, даны конкретные рекомендации по их устранению.

Как известно, одним из критичных видов комплектующих, определяющих надежность трансформатора в целом, являются высоковольтные вводы. По разным данным на них приходится до четверти всех аварий, являющихся причиной выхода трансформаторов из строя. Доклад представителей Бразилии ***A2–114*** [3] посвящен проблеме обнаружения быстро развивающихся дефектов вводов с помощью устройства онлайн-мониторинга. Практика показала, что обычно эксплуатационные дефекты трансформато-

ИНФОРМАЦИЯ

СИГРЭ

Международный совет по большим электрическим системам высокого напряжения – СИГРЭ (Conseil International des Grands Réseaux Électriques – CIGRE) – крупнейшая международная неправительственная и некоммерческая организация в области электроэнергетики.

Основная цель СИГРЭ, в соответствии с уставом организации, – координация исследований, обмен опытом и научно-технической информацией по вопросам функционирования электроэнергетических систем. В центре внимания находятся вопросы разработки, создания и эксплуатации высоковольтного оборудования, задачи планирования и эксплуатации энергосистем, разработки и внедрения новых технологий сбора и обработки информации и систем управления.

Деятельность СИГРЭ формирует стратегическое видение развития энергосистемы, необходимое для выбора энергетической политики, и тесно связана с вектором научно-технического развития, определяющего ключевые направления в области интеграционных процессов.

Источник: сайт РНК СИГРЭ

ИНФОРМАЦИЯ

СТРУКТУРА СИГРЭ

Включает руководящие органы (Генеральная ассамблея, Административный совет, Управляющий комитет и Технический комитет) и 16 постоянно действующих исследовательских комитетов.

Исследовательские комитеты состоят из большого количества экспертных групп. Тематика их работы охватывает весь спектр проблем функционирования и развития энергосистем и электроэнергетических рынков. По результатам исследований публикуются аналитические отчеты и другие материалы, широко используемые при формировании стратегии развития отрасли в различных странах и регионах мира.

Членами СИГРЭ являются более 1000 организаций и свыше 6000 экспертов, занятых во всех областях электроэнергетики. Основным организационным принципом СИГРЭ является работа через национальные комитеты, объединяющие отраслевые компании и институты своей страны или географического региона. В настоящее время СИГРЭ представлен в 90 странах мира.

ров развиваются достаточно медленно, в течение нескольких месяцев и даже лет. Это позволяет отслеживать их традиционными методами диагностики. Однако некоторые дефекты (например локальные замыкания внутренней изоляции) могут развиваться очень быстро – в течение нескольких минут или часов. Авторами представлены результаты применения систем онлайн-мониторинга вводов, используемых бразильскими энергопредприятиями Shesf и Electrosul для обнаружения дефектов и основанных на известном методе измерения суммы емкостных токов утечки в рабочем режиме трансформатора. Подробно рассмотрены и проанализированы три примера применения мониторинга для разных сценариев развития дефекта ввода – медленного и быстрого. При медленном развитии дефекта мониторинг ввода 500 кВ был подтвержден результатами хроматографического анализа масла, взятого из ввода и показавшего повышенную концентрацию горючих газов (особенно ацетилена), что свидетельствовало о наличии внутренних дефектов ввода. В двух других примерах развитие дефекта происходило быстро. В одном случае время развития дефекта на вводе 230 кВ составило 7 минут (изменение емкости составило 40%), а в другом, на вводе 500 кВ – 13 часов (емкость изменилась на 19%, тангенс дельта – в 10 раз: с 0,27% до 2,88%). Подчеркивается, что обнаружить эти дефекты удалось только благодаря онлайн-мониторингу. Была подчеркнута, однако, целесообразность проверки результатов диагностики дополнительными измерениями токов утечки вводов разных фаз во избежание ложного срабатывания защиты, на которую выводится сигнал системы мониторинга.

Авторы доклада ***A2–101*** [4] представляют разработки в Hydro-Québec новых технологий онлайн-мониторинга вводов трансформаторов и устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). При этом отдается предпочтение нетрадиционному подходу к диагностике вводов под рабочим напряжением, использующему «относительные измерения» двух и более вводов одной и той же фазы, соединенных параллельно. При проведении измерений на трех фазах, соединенных параллельно, аварийный высоковольтный ввод может быть надежно идентифицирован. Несимметрия напряжения между фазами не влияет на интерпретацию результатов измерений, так как приложенное напряжение, по существу, одинаково для всего оборудования, связанного в параллель. Мониторинг осуществляется децентрализованным устройством, синхронизированным с GPS, что позволяет обойтись без прокладки кабелей. Для диагностики состояния двигателя РПН используются токоизмерительные клещи и виброакустический датчик на стенке бака РПН. Показано, что форма виброакустических колебаний при измерениях на устройствах РПН существенно зависит от температуры, а на результаты измерений tgδ вводов оказывает влияние дождь. Однако в последнем случае влияние можно значительно снизить с помощью специальных алгоритмов обработки сигналов.

Обязательной частью заводских приемо-сдаточных испытаний высоковольтных силовых трансформаторов является измерение частичных разрядов (ЧР), которые обычно проводятся в Европе в соответствии со стандартом МЭК 60270. Тем не менее в последнее время все большее распространение приобретает методика измерений ЧР на ультравысоких частотах – в диапазоне от 100 МГц до 2 ГГц, что позволяет исключить внешние помехи. Однако прямой корреляции между результатами измерений на ультравысоких частотах и стандартными измерениями по МЭК 60270 в настоящее время нет, что является одной из причин, почему УВЧ-измерения еще не столь широко распространены ни в процессе приемо-сдаточных испытаний, ни при диагностике трансформаторов в эксплуатации. Другая проблема заключается в том, что большие силовые трансформаторы разрабатываются для ограниченного числа трансформаторов данного типа. Кроме того, трансформатор действует как волновод в УВЧ-диапазоне, соответственно, отраженные и стоячие волны внутри бака трансформатора сильно зависят от его геометрии, обмоток, магнитопровода и т. д. По этой причине любое изменение геометрии бака трансформатора приводит к изменению импеданса, в результате чего передача сигналов в каждом частотном диапазоне имеет свои индивидуальные особенности. Последнее требует проведения повторной калибровки датчиков УВЧ для каждой конструкции трансформатора. В докладе ***A2–115*** [5] представлены результаты исследования чувствительности УВЧ-измерений, проведенных на новом фазосдвигающем трансформаторе 800 МВА 400/220 кВ (трехфазная группа), на котором, по требованию заказчика, были установлены современные высокочувствительные УВЧ-датчики частичных разрядов. Параллельно на заводе в рамках приемо-сдаточных испытаний были выполнены измерения ЧР по стандартной методике, чтобы, в случае возникновения повреждения, установить корреляцию между двумя этими методами для конкретного дефекта и установить место его локализации. На каждом из баков трансформаторов было установлено по восемь датчиков таким образом, чтобы наиболее ответственные части внутри бака (обмотки, устройство РПН) могли контролироваться как минимум тремя датчиками параллельно, обеспечивая возможность применения триангуляционных методов локации источников ЧР. В докладе большое внимание уделено методике калибровки и проверке чувствительности датчиков с целью сравнения и подтверждения возможности надежной корреляции измерений ЧР в УВЧ-диапазоне со стандартными измерениями.

В докладе ***A2–110*** [6] представлен метод оценки состояния трансформатора посредством контроля его основных параметров. Основное преимущество метода заключается в том, что состояние трансформатора определяется не косвенно – через вторичные признаки и параметры, такие как содержание в масле газов, влаги, температура, вибрации, частичные разряды, а непосредственно через изменение сопротивления короткого замыкания, потерь, коэффициента трансформации, относящихся к числу основных электромагнитных параметров, характеризующих трансформатор как преобразователь электрической энергии. Данный подход позволяет использовать простую модель, позволяющую, тем не менее, давать точную информацию о коэффициенте трансформации и импедансе в функции нагрузки: требуемая точность записи сигналов тока и напря-

Церемония открытия 44 сессии СИГРЭ

На сессии СИГРЭ помимо докладов можно посетить техническую выставку. В 2012 г. в ней приняло участие порядка 200 компаний-экспонентов

жения обеспечивается имеющимися на подстанции средствами, применяемыми для целей измерений и защиты. Внутренние потери определяются просто по разнице в поступающей и отдаваемой энергии от трансформатора. Утверждается, что точность может достигать 0,1%, что соизмеримо с точностью при стандартных измерениях на отключенном трансформаторе. При этом, в отличие от применяемых в настоящее время систем мониторинга, не требуется установка на трансформатор дорогостоящего диагностического оборудования, дополнительных датчиков. В докладе приводится анализ факторов, влияющих на точность определения контролируемых параметров, и даются рекомендации по снижению погрешности расчета. Представлены примеры оценки состояния двух трансформаторов – блочного трансформатора 320 МВА 235/11 кВ и автотрансформатора 315 МВА 220/142 кВ. Показано, что предлагаемый метод обеспечивает высокую чувствительность как к изменению коэффициента трансформации, достаточную для обнаружения замыканий соседних витков в обмотке, имеющей 1000 витков, так и к изменению импеданса при выявлении изменений геометрии обмоток и проблем с контактами.

Надежность оборудования может оцениваться по вероятности отказа, которая определяется по результатам контроля растворенных газов, уровню вибраций, частичных разрядов, частотным характеристикам обмоток, анализу нагрузок и перегрузок. Многое из этого требует специального оборудования, а также отключения трансформатора и его расшиновки. Поэтому предпринимаются попытки использовать более простые и дешевые способы определения состояния силовых масляных трансформаторов по вероятностной оценке степени старения бумажной изоляции, основанные на данных о температуре окружающей среды и профилях нагрузок. В докладе ***A2–105*** [7] представлен метод расчета профилей нагрузки и окружающей температуры. Эти данные необходимы для оценки степени старения бумажной изоляции из-за нагрева при недостатке информации о режимах нагрузки и перегрузки трансформатора. Такие профили обычно неизвестны. Авторами разработан подход, основанный на методологии нейронных сетей, определены критерии выбора моделей для определения температуры наиболее нагретой точки. Проверка метода проводилась на трансформаторе мощностью 30 МВА, база данных по измерениям которого была известна. На основе этой базы данных, с учетом долгосрочных измерений температуры внешней погодной станцией, была создана база данных температуры окружающей среды и сгенерированы 100 кривых температурного распределения. После этого с помощью нейронной сети были спрогнозированы кривые нагрузки для каждого возможного температурного распределения. Хотя результаты расчета эквивалентного старения показали, что исследуемый трансформатор, возможно, никогда не испытывал высоких температур, сам подход с использованием нейронных сетей показал свою эффективность при анализе степени старения силовых трансформаторов в условиях отсутствия полноценной базы данных с профилями нагрузок.

О другом использовании нейронных сетей, основанном на применении двух алгоритмов (метода опорных векторов (SVM) и метода самоорганизующихся карт Кохонена (SOM)), говорится в докладе ***A2–106*** [8]. Для совершенствования обучающих машинных алгоритмов в работе основное внимание уделено объему экспериментальных данных, полученных при анализе растворенных газов, а также по результатам измерений соответствующих параметров методами поляризации-деполяризации и частотной диэлектрической спектроскопии. Эффективность применения алгоритмов оценки состояния изоляции оборудования в условиях эксплуатации показана на ряде примеров. Результаты исследований подтверждают возможность корреляции степени полимеризации бумажной изоляции по содержанию фурфурола и метанола в трансформаторном масле.

В докладе ***A2–111*** [9] представлен эмпирический подход для определения коэффициента старения, позволяющего определить отказы оборудования по степени его старения. Подход разработан на основе анализа состояния большого количества силовых трансформаторов напряжением 500 кВ. В основу подхода заложены модель ухудшения состояния и модель прогнозирования срока службы. Модель ухудшения характеристик трансформатора обычно начинается с детерминированного описания изменения состояния, часто в виде системы дифференциальных уравнений. Одним из основных параметров является коэффициент старения. Оценка старения может быть получена при наличии доступа к наблюдению выбранных свойств, являющихся наиболее чувствительными к старению – индикаторов старения. К числу таковых авторы относят суммарную концентрацию горючих газов, растворенных в масле, концентрации всех углеводородов, двуокиси углерода, кислотность, поверхностное натяжение, влагосодержание, пробивное напряжение и тангенс дельта. Представлены временные графики изменения этих параметров, полученные в течение 20 лет для нескольких десятков силовых трансформаторов 500 кВ.

При вычислении степени надежности (т. е. количества отказов в день) как функция времени эксплуатации использовались данные измерений, учитывающие влияние температуры. Расчеты показали вполне очевидный результат – рост количества отказов с увеличением срока эксплуатации оборудования. Более важно, что расчет позволяет прогнозировать вероятный срок начала отказов трансформатора, а также предполагаемый конец срока его службы. Так, индикаторы старения по сумме горючих газов и углеводород одинаково прогнозируют начало возникновения дефекта через 15 лет с соответствующим увеличением вероятности отказа, который должен произойти через 30 лет. Оценка по CO_2 и тангенсу дельта отличается: по индикатору CO_2 дефект начнет развиваться через 15 лет, по индикатору тангенс дельта – через 20 лет, оба – с большим риском последующей аварии. Оценка по влагосодержанию и пробивному напряжению дает одинаковые результаты: индикаторы начинают расти по прошествии 13 лет, однако риск аварии выше при ухудшении пробивного напряжения.

Как показывает практика, защита трансформатора зачастую не в состоянии отреагировать на медленно развивающиеся начальные повреждения межвитковой изоляции, так как они не сопровождаются большими токами на выходе обмотки, притом что в контуре, образованном двумя соседними короткозамкнутыми витками, может протекать очень большой ток. Последний способен создать значительные электродинамические воздействия, приводящие к тяжелым повреждениям, которые могут замаскировать истинные причины возникновения начального дефекта. В докладе ***A2–108*** [10] описывается модель начальных внутренних замыканий (межвитковых и витков на землю) в трехфазных масляных силовых трансформаторах с использованием

ИНФОРМАЦИЯ

РНК СИГРЭ

Российский национальный комитет занимает одно из ведущих мест в СИГРЭ как по численности, так и благодаря высокому уровню исследований в области электроэнергетики и обеспечению надежности работы уникальной ЕЭС России.

СССР присоединился к СИГРЭ спустя два года после создания организации, когда делегаты СССР приняли участие во второй сессии СИГРЭ в 1923 г. В 1957 г. национальный комитет СССР был утвержден Административным советом СИГРЭ.

Российский национальный комитет СИГРЭ (РНК СИГРЭ) на текущий момент насчитывает в своем составе более 50 организаций и свыше 200 специалистов-энергетиков.

РАБОЧИЕ ГРУППЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМИТЕТА А2

Название группы	Цели и задачи
WG A2-33. Transformer fire safety practices / Методы обеспечения пожаробезопасности трансформаторов	- Разработки рекомендаций для снижения рисков возникновения пожаров - Предотвращение разрушения/разрыва бака
WG A2-36. Guide for transformer procurement process / Руководство по закупке трансформаторов	- Обновление существующей документации CIGRE по закупке электрооборудования с учетом состояния рынка - Разработка руководства для оценки изготовителей трансформаторов
WG A2-37. Transformer reliability survey / Проверка надежности трансформаторов	- Анализ национальных обзоров и методов, используемых при сборе данных, их компиляция и т.д. - Обобщения и рекомендации по улучшению состояния дел с надежностью трансформаторов
WG A2-38. Transformer thermal modelling / Моделирование тепловых процессов в трансформаторах	Совершенствование методов определения температуры наиболее нагретой точки в обмотках трансформаторов
JWG A2/C4-39. Transient electrical interaction between transformers and the power system / Влияние переходных процессов в энергосистемах на трансформаторы	Оценка и анализ различных типов переходных электрических процессов при взаимодействии между трансформаторами и другими компонентами энергосистемы
WG A2-40. Copper sulfide long-term mitigation and risk assessment / Предупреждение сульфида меди и оценка рисков	Анализ источников коррозионной серы вне масла, анализ эффективности методов очистки масла, включая новые технологии
JWG A2/D1-41. HVDC transformer insulation – Oil conductivity / Изоляция преобразовательных трансформаторов – проводимость масла	- Подготовка литературного обзора по механизмам проводимости в органических жидкостях - Подготовка обзора методов и стандартов измерения проводимости жидкостей, их репрезентативности для масляных промежутков - Разработка рекомендации по простой и репрезентативной оценке качества масла - Разработка рекомендации по измерению проводимости электрокартона, пропитанного маслом - Анализ корреляции между измерениями проводимости масла и надежностью трансформаторов
WG A2-42. Guide on transformer transportation / Руководство по транспортировке трансформаторов	- Анализ условий при транспортировке морем, ж/д и автомобильным транспортом - Рекомендации по снижению сил, действующих на трансформатор в процессе транспортировки
WG A2-43. Transformer bushings reliability / Надежность вводов	Изучение путей повышения надежности высоковольтных вводов ($U_m \geqslant 72{,}5$ кВ)

WG A2-44. Transformer intelligent condition monitoring / Интеллектуальные системы мониторинга	- Исследование проблем, связанных с обработкой результатов периодической или непрерывной диагностики и мониторинга трансформаторов, преобразованием данных, идентификацией наиболее приемлемых алгоритмов диагностики - Усовершенствование мониторинга трансформатора и диагноза состояния на основе выделения лучших методов
WG A2-45. Transformer failure investigation and post-mortem analysis / Расследование аварии и послеаварийный анализ	Разработка детальной процедуры анализа аварий, основанной на различных нормативных документах (IEEE C57.125-1991 и другие)
JWG A2/D1-46. Field experience with transformer solid insulating ageing markers / Исследование показателей старения твердой изоляции трансформаторов в эксплуатации	Сравнение эксплуатационных показателей старения твердой изоляции трансформаторов с результатами измерений степени полимеризации образцов изоляции, извлеченных из трансформаторов во время их ремонта или списания, сравнение с другими методами диагностики
WG A2-48. Technology and utilization of oil insulated high voltage shunt reactors / Технология и применение масляных высоковольтных шунтирующих реакторов	- Спецификация и анализ конструкции - Обоснование конструкции: трехфазное/однофазное исполнение, вторичные обмотки, регулировочные и т.д. - Типовые и приемо-сдаточные испытания и критерии: шум, потери, вибрация, перегрев и т.д. - Надежность в процессе эксплуатации, частота отказов, продолжительность эксплуатации - Механизмы развития аварии, расследование аварии - Опыт технического обслуживания, характерные особенности
WG A2-49. Condition assessment of power transformers / Оценка состояния силовых трансформаторов	- Подготовка обзора существующих документов (CIGRE, другие источники), связанных с тестированием и диагностикой силовых трансформаторов - Определение набора параметров, необходимых и достаточных для полной оценки состояния трансформатора. Анализ типичных недостатков конструкции - Определение весовых коэффициентов для каждого из параметров при оценке состояния трансформатора по индексу исправности с использованием детерминистических и вероятностных методов
WG A2-50. Effect of the distributed energy sources and consequent induced reverse power flow (step-up) on transmission and distribution transformers / Влияние распределенных источников энергии и последующего индуцированного обратного потока энергии на силовые и распределительные трансформаторы	- Исследование всех вопросов, связанных с влиянием распределенных источников энергии и последующего индуцированного обратного потока энергии на силовые и распределительные трансформаторы - Анализ влияния этих особенностей на плотность магнитного потока, превышения температуры, шум и другие параметры трансформаторов как стержневой, так и броневой конструкций - Учет возможных проблем с управлением устройств РПН

Таблица 1

вейвлетного преобразования, позволяющего разложить однородные полосы частот, что дало возможность точно выделить гармоники устройства дифференциальной защиты. Последнее позволяет своевременно отреагировать на начинающееся повреждение. Предложенный подход, по мнению авторов, может использоваться как дополнение к традиционной дифференциальной защите трансформаторов, позволяя увеличить ее чувствительность без каких-либо дополнительных аппаратных средств, а только за счет усовершенствования программного обеспечения и обнаружить дефект в ранней стадии его развития.

2. НАДЕЖНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В докладе ***A2–103*** [11] представлена стратегия обеспечения требуемого уровня надежности и безопасности мощных силовых трансформаторов, принятых в итальянских электрических сетях 400, 150 (132) и 230 кВ энергосетевой компании TERNA. Обсуждается новая техническая спецификация для автотрансформатора, разработанная в терминах увеличения уровней короткого замыкания и последних достижений в области возобновляемых источников энергии. Стратегия компании включает контроль внешних электрических воздействий с целью сокращения их числа. Особое внимание в докладе уделено вопросам безопасности, что нашло свое отражение в новой спецификации на автотрансформаторы. Основные изменения в требованиях спецификации касаются конструкции и установки некоторых устройств трансформатора (РПН, вводы), а также подхода к испытаниям на стойкость при КЗ, контролю механического состояния обмоток методом частотного анализа, измерениям температуры обмоток во время испытаний на нагрев с использованием волоконно-оптических датчиков, испытаниям на дугу вводов, комбинированным испытаниям полых изоляторов при воздействии различных внешних условий (соль, туман, солнечный свет, электрическое поле), применению хроматографии. Подчеркивается, что испытания на стойкость при КЗ являются наиболее надежным методом проверки электродинамической стойкости трансформаторов. Поэтому в новой спецификации требование испытаний на стойкость при КЗ для автотрансформаторов стало обязательным. Как следствие, в 2011 г. на стойкость при КЗ были испытаны семь автотрансформаторов разных производителей мощностью 250 МВА и выше на напряжение 400 кВ. Авторы отмечают, что обязательность испытаний заставила производителей более ответственно относиться и к расчетам электродинамических сил при проектировании трансформаторов. Для сравнения, в российском стандарте ГОСТ Р 52719 обязательность требования к испытаниям на стойкость при КЗ относится только к трансформаторам мощностью до 40 МВА (включительно), а для трансформаторов большей мощности допускается расчетное подтверждение.

В докладе ***A2–113*** [12] обсуждаются критические аспекты проектирования, изготовления и испытания первого индийского трансформатора на напряжение 1200/400/33 кВ мощностью 333 МВА. С учетом перспективных требований развития энергетики Индии на ближайшие два десятилетия передача электроэнергии от центров производства энергии до отдаленных потребителей по линии переменного напряжения 1200 кВ является наиболее оптимальным решением. В то же время мировой опыт проектирования и эксплуатации таких линий ставит много вопросов, связанных с обеспечением их надежности и эффективности. Одним из важнейших и дорогостоящих элементов линии является силовой ультравысоковольтный (УВВ) трансформатор. В докладе представлен сравнительный анализ (отличающий его от трансформаторов меньшего класса напряжения) спецификации и конструкции в части прочности изоляции, стойкости при коротком замыкании, нагрева и эффективности системы охлаждения, экранирования от короны. Проектирование изоляционной системы проводилось в два этапа: сначала выполнялись расчеты электрических напряжений во всех элементах обмоток и отводах. Затем, на основе анализа проделанных расчетов, проводились необходимые изменения в конструкции изоляции. При этом особое внимание было уделено изоляции отводов как критических элементов конструкции, подверженных наибольшему риску повреждений. Специфика конструкции обмоток трансформатора, заключающаяся в значительном объеме изоляционных материалов, увеличенных изоляционных расстояниях между витками, катушками и обмотками, создает дополнительные проблемы в обеспечении стойкости трансформатора к токам короткого замыкания. При этом повышенная магнитная несимметрия и неоднородность поля рассеяния вызывают увеличение электродинамических сил и механических напряжений в обмотках. Сложность точного обеспечения заданных при проектировании размеров обмоток вынуждает увеличивать коэффициенты запаса. Создание трансформатора на ультравысокое напряжение предъявляет повышенные требования к производству на всех этапах изготовления, включая намотку и сушку обмоток. Отмечено, что особое внимание было уделено испытаниям трансформатора, которые проводились в аккредитованной испытательной лаборатории завода. В программу приемочных испытаний входили приемо-сдаточные испытания и типовые испытания: испытания коммутационным импульсом, испытания полным грозовым импульсом, индуктированным напряжением с измерением ЧР, испытания на нагрев и ряд других.

Другой индийский доклад ***A2–113*** [13] описывает проблемы, которые авторам пришлось решать при создании самого крупного в Индии регулировочного трансформатора мощностью 188 МВА на напряжение 220/96/28 кВ. Трансформатор предназначен для использования на алюминиевом заводе последовательно с преобразовательным трансформатором. Трансформатор оснащен устройством РПН на 107 положений, позволяющим регулировать выходное напряжение от 96 до 1 кВ с шагом 1 кВ с помощью пяти обмоток грубого и одной обмотки тонкого регулирования. Для контроля наиболее нагретой точки трансформатор снабжен оптоволоконными датчиками, а также анализатором растворенных газов. Устройство РПН снабжено системой очистки масла.

В докладе анализируются особенности технической спецификации трансформатора, требования, характерные особенности конструкции, а также задачи, решаемые при изготовлении и испытаниях трансформатора. Особое внимание было уделено электрической прочности изоляции и стойкости обмоток к токам короткого замыкания.

РАБОЧИЕ ГРУППЫ ИК А2 «ТРАНСФОРМАТОРЫ»

Основная деятельность СИГРЭ сосредоточена в рабочих группах, создаваемых по инициативе конкретных исследовательских комитетов и утверждаемых Техническим комитетом СИГРЭ. В настоящее время в ИК А2 действуют 15 рабочих групп, а также пять групп советников. На стр. 64-65 представлена краткая информация о деятельности каждой из рабочих групп, позволяющая в целом представить весь круг задач, лежащих в области интересов исследовательского комитета А2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наша страна принимает активное участие в работе СИГРЭ еще со времен СССР, когда масштабные проекты в области высокого и сверхвысокого напряжения разрабатывались и воплощались в жизнь. Традиционно российские специалисты всегда входили в состав различных исследовательских комитетов и рабочих групп. К сожалению, в последние годы это участие резко сократилось и практически свелось к нулю. Так, российских специалистов нет ни в одной из перечисленных выше групп. А ведь непосредственное участие в работе различных групп дает доступ к той информации, которую часто очень трудно найти в открытом доступе и которая на данный момент является самой актуальной. Плюс – непосредственное общение с профессионалами мирового уровня, налаживание полезных партнерских отношений. Следует также отметить, что политика СИГРЭ, направленная на привлечение молодых специалистов, создает хорошие возможности для их профессионального роста.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев А. СИГРЭ-2012: встречаемся в Париже // Энергия развития, 2012, № 2.
2. Darian L., Valuyskikh A., Mordkovich A., Turkot V., Tsfasman G. The implementation and operational experience of transformers control, monitoring and diagnostic systems at the united national electric power system of Russia. – CIGRE, 2012, rep. A2–102.
3. Alves Marcos e. G., Medina Pena Miguel C., Severino Claudio. Bushing failures with rapid and very rapid evolution time detected by online monitoring. – CIGRE, 2012, rep. A2–114.
4. Picher P., Riendeau S., Gauvin M., Leonardo F., Dupont I., Goulet J., Rajotte C. New technologies for monitoring transformer tap-changers and bushings and their integration into a modern IT infrastructure. – CIGRE, 2012, rep. A2–101.
5. Gautschi D., Weiers T., Buchs G., Wiss S. Ultra high frequency (UHF) partial discharge detection for power transformers: Sensitivity check on 800 MVA power transformers and first field experience. – CIGRE, 2012, rep. A2–115.
6. Bengtsson T., Abeywickrama N. On-line monitoring of power transformer by fundamental frequency signals. – CIGRE, 2012, rep. A2–110.
7. Romero A., Harder F., Mombello E., Dib R., Ratta G. Dealing with the lack of loading and overloading data to determine the loss of life of the power transformer insulating paper. – CIGRE, 2012, rep. A2–105.
8. Ma H., Saha T. K., Ekanayake C., Allan D. Modern machine learning techniques for power transformer condition assessment. – CIGRE, 2012, rep. A2–106.
9. Gockenbach E., Zhang X., Liu Z., Chen H., Yang L. Life time prediction of power transformers with condition monitoring. – CIGRE, 2012, rep. A2–111.
10. Abu El-Zahab E., Helmi D., Salah M., Alokabi A. Enhanced modelling and early detection of power transformers internal incipient faults.– CIGRE, 2012, rep. A2–108.
11. Colla L., Di Giulio A., Iuliani V., Palone F., Rebolini M. Autotransformers evolution, reliability, safety and modelling in the Italian transmission grid. – CIGRE, 2012, rep. A2–103.
12. Tiwari R. K., Gupta S. K., Singh R. K., Lalwani G., Kuntia J. S. Critical technical aspects during design, manufacturing and testing of India´s first 1200 kV UHVAC transformer. – CIGRE, 2012, rep. A2–112.
13. Satyam Kumar Dewangan, Tanvi Srivastava, Vijayakumaran Moorkath. Salient design features of 188 MVA, 220/96/28 kV biggest rating regulating transformer. – CIGRE, 2012, rep. A2–113.