

Преобразование на месте

Система TrafoSiteRepair™ – это сочетание новых и старых технологий, позволяющее повысить коэффициент готовности силовых трансформаторов.

Ларс Эклунд, Пиер Лорен, Пауль Кёстингер, Петер Верле, Бьёрн Хольмгрэн



Надежность электроснабжения имеет огромное значение, а отказ любого элемента системы обходится дорого не только энергетическим компаниям, но и производственным предприятиям. Энергоснабжающая компания рискует потерей выручки и штрафами за непредоставление мощности, тогда как отказ трансформатора, например, на промышленном предприятии может привести к длительному и, следовательно, дорогостоящему простоям. С помощью специализированных решений компания АББ на протяжении многих лет помогала предприятиям энергетики и энергоемких отраслей промышленности повысить эффект от использования оборудования и эффективность производства, а также надежность установок за счет снижения числа отказов и сокращения сроков восстановления оборудования.

Тем не менее благодаря разработанному АББ новому комплексу процессов, позволяющему проводить ремонт, восстановление или модернизацию трансформаторов на месте их установки, продолжительность простоев может быть значительно сокращена. Комплекс, представленный на мировом рынке под общим названием TrafoSiteRepair™, является комбинацией многолетнего опыта и современных технологий, а 200 силовых аппаратов, эксплуатируемых в 25 странах, служат доказательством его успешной работы.

Представим, что на алюминиевом заводе отказывается трансформатор. Непосредственно на производственном процессе это не сказывается, потому что владелец предприятия предусмотрительно заложил в системе избыточность. Однако ему известно, что потеря еще одного ключевого компонента обойдется очень дорого из-за простоя и падения объемов выработки, а значит, трансформатор необходимо отремонтировать или заменить как можно скорее.

Обычно силовой трансформатор проходит обслуживание и модернизацию на месте установки. Однако крупный ремонт, такой как замена или ремонт обмоток, подразумевает необходимость транспортировки трансформатора на завод, где для этого есть необходимые площади и оборудование. При больших габаритах трансформатора и на большом удалении от завода сроки транспортировки, не говоря уже о стоимости и рисках, в значительной мере определяют, как скоро трансформатор можно будет вернуть в работу. К сожалению, до возобновления нормальной работы может пройти от 2 до 24 месяцев. Чтобы преодолеть данную проблему, несколько лет назад в АББ началась работа по созданию процессов, позволяющих выполнить крупный ремонт на месте.

Результатом этой работы стал инновационный процесс, сочетающий в себе элементы нового и старого. С его помощью АББ теперь может не только ремонтировать и возвращать трансформатор в работу в среднем менее чем за семь месяцев, но также повысить и качество ремонтных работ. Система, получившая название TrafoSiteRepair™, – это комплексное решение

Инновации в технологиях

по ремонту, восстановлению и модернизации трансформаторов на месте их установки. В состав решения входят процессы, обеспечивающие то же качество работ и соблюдение тех же требований, что и в заводских условиях. На данный момент отремонтировано или восстановлено около 200 аппаратов – трансформаторов и реакторов – на предприятиях энергетики, промышленности и на линиях ППП, при этом в ряде случаев применялись новейшие технологии, позволившие одновременно повысить рабочие параметры оборудования.

Процесс TrafoSiteRepair™

Типичный цех по изготовлению и ремонту высоковольтного оборудования характеризуется порядком, чистотой и атмосферой с тщательно регулируемыми параметрами. Также он снабжен мощным грузоподъемным оборудованием, специальным инструментом и оснасткой, высоковольтными испытательными лабораториями, а на каждом этапе процесса заняты квалифицированные операторы. Для успешного выполнения необходимых ремонтных работ на трансформаторе на площадке необходимо иметь тот же комплекс оборудования. Если на объекте заказчика нет готовой ремонтной площадки, будет возведена временная ремонтная мастерская, оборудованная и укомплектованная так же, как и на заводе. Если необходимо, будет предоставлено и грузоподъемное оборудование. Это необходимо для выемки и установки на место основных элементов крупнейших трансформаторов массой до 400 тонн.

Хотя привезти завод к трансформатору, а не наоборот, представляется возможным, для этого требуется преодолеть ряд трудностей. Первая из них сопряжена с необходимостью надежного тестирования трансформатора на различных стадиях ремонта, восстановления или модернизации. Однако по-настоящему трудной задачей стало проведение высоковольтных испытаний – окончательных испытаний, проводимых перед монтажом и приемкой. Ранее для высоковольтных испытаний на месте

применялись генераторы с приводом от двигателя. Такие генераторы достаточно тяжелы, что осложняет их транспортировку. Кроме того, они не обладают достаточной свободой выбора частоты, на которой производится испытание различных трансформаторов, из-за чего их номинальная мощность должна быть значительно выше мощности, требуемой для испытаний. Кроме того, необходимо учесть и вопросы обслуживания оборудования на месте. Для обеспечения транспортабельности и универсальности компанией АББ в сотрудничестве с поставщиками испытательных систем и силовых электронных преобразователей была разработана новая мобильная система высоковольтных испытаний.

TrafoSiteRepair™ – это решение, позволяющее ремонтировать, восстанавливать и модернизировать трансформаторы на месте их установки.

Вторая сложность была связана с системой сушки. Влага – враг органических изоляционных материалов (например, изоляционной бумаги) в силовых трансформаторах, поскольку она ускоряет процесс деградации, что в свою очередь отражается на надежности трансформатора и сокращает срок его службы. Поэтому крайне важно просушивать изоляционную бумагу в трансформаторе во всех случаях, когда она оказывается на воздухе. Для этого в АББ была разработана инновационная система сушки трансформаторов на месте, работа которой основана на использовании низкочастотных токов. Система, получившая название Low Frequency Heating (система сушки нагревом током низкой частоты), применяется в сочетании с методом разбрызгивания нагретого масла, и в сравнении с другими методами сушки значительно сокращает продолжительность операции до дости-

жения более чем удовлетворительного уровня влажности – ниже 1%.

Обе новинки более подробно рассмотрены ниже.

Мобильная система высоковольтных испытаний

Мобильная система высоковольтных испытаний разработки АББ позволяет испытывать даже наиболее крупные из используемых трансформаторов. Испытательная лаборатория полностью помещается в 40-футовом контейнере, который допускает перевозку морским, наземным и воздушным транспортом (рис. 1а-1в). Ядром системы является мощный статический преобразователь частоты, который может выдавать необходимую для испытаний мощность при частоте тока от 40 до 200 Гц. Это позволяет производить испытания на самой благоприятной частоте, определяемой международными стандартами, и снижать тем самым мощность, необходимую для испытаний. Мобильная испытательная система выполняет испытания приложенным и наведенным напряжением, которые можно сочетать с определением частичного разряда для оценки состояния оборудования. Кроме того, могут быть выполнены проверки потерь на холостом ходу и импеданса.

Схема испытания наведенным напряжением показана на рис. 2. В данном случае преобразователь частоты может быть настроен на частоту самокомпенсации испытательной установки, которая, в случае силового трансформатора, обычно находится в диапазоне от 70 до 120 Гц. При выполнении данного испытания на такой частоте потребляется только активная мощность. Трансформатор сопряжения разработан с учетом нормального диапазона напряжений, прилагаемых к третичной обмотке силовых трансформаторов.

При испытании приложенным напряжением формируется резонансный контур из емкости объекта испытаний и резонансного реактора испытательной установки (рис. 3). Два этих компо-

1а Мобильная установка высоковольтных испытаний, помещенная в 40-футовый контейнер, прибывает на площадку.



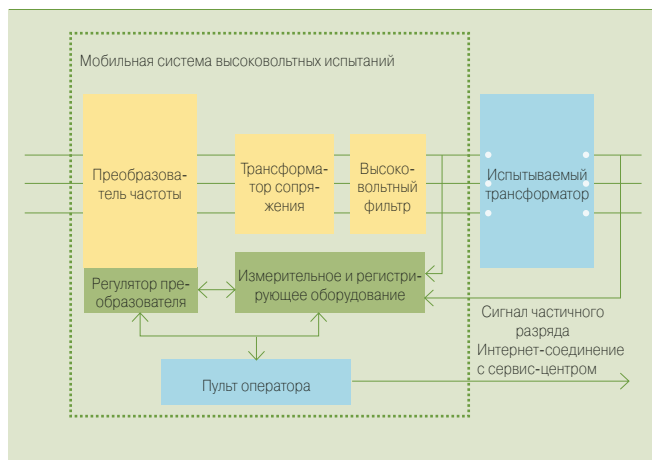
1б Типовая установка испытания трансформатора на атомной электростанции.



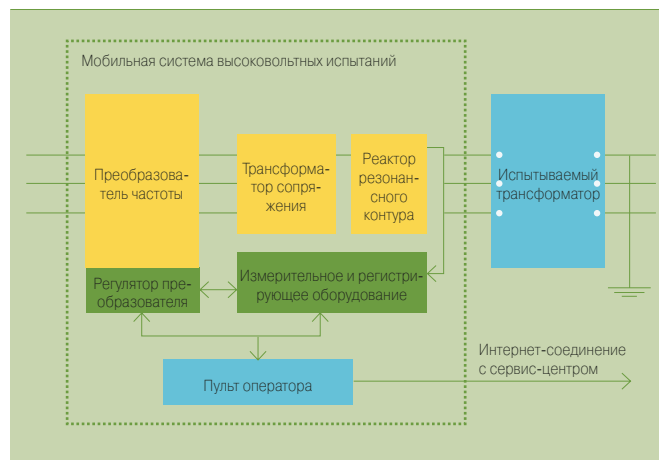
1в Операторная мобильной испытательной системы.



2 Установка испытания наведенным напряжением.



3 Установка испытания приложенным напряжением.



нента задают определенную частоту резонанса, которая автоматически определяется системой управления статического преобразователя.

Сушка силовых трансформаторов на месте установки

Поддержание низкого влагосодержания изоляции – задача первостепенной важности. Обмотки и изоляционные элементы производятся на одном из трансформаторных заводов АББ и затем обрабатываются парофазными методами и методами пропитки. Перед отгрузкой и сборкой узлы тщательно упаковывают для поддержания заданной степени сухости. Однако при сборочных операциях в ходе ремонта изоляционная бумага и ее целлюлозные компоненты подвергаются воздействию атмосферы и требуют затем тщательной просушки. Влага не только ускоряет процесс деградации, но может оказывать и непосредственное влияние на надежность трансформатора, поскольку капли воды могут привести к внутреннему короткому замыканию.

Типовой процесс сушки силовых трансформаторов основан на применении вакуума и нагрева, в идеале – одновременно. Однако вакуум приводит к тепловой изоляции внутренних областей трансформатора (аналогично принципу работы термоса), что делает подвод тепла к обмоткам практически невозможным при наружном нагреве. Вместо этого типовые процессы сушки на месте обычно включают в себя цикл нагрева, за которым следует цикл вакуумирования. Эти процессы могут затягиваться на несколько недель до достижения требуемого уровня влагосодержания. Среди прочих недостатков таких процессов:

- ограниченная температура сушки, поскольку теплопередающим агентом является масло;

- существенное падение температуры в вакуумном цикле в связи с затратами энергии на испарение влаги;
- потребность в нескольких циклах нагрева, в ходе которых изоляция подвергается воздействию тепла и кислорода, что неблагоприятно влияет на ее свойства;
- при разбрызгивании масла внутренние части обмоток не обрабатываются, поскольку этому мешает защитный кожух.

Для устранения этих недостатков компания АББ разработала новую систему сушки трансформаторов на месте, получившую официальное название LFH (Low Frequency Heating – нагрев токами низкой частоты). Эта система, в сочетании с методом разбрызгивания горячего масла (рис. 4 и 5), обеспечивает равномерный нагрев низко- и высоковольтных обмоток трансформатора в вакууме с использованием низкочастотного тока (частота составляет около 1 Гц). Система LFH прогревает обмотки изнутри, тогда как струи горячего масла нагревают наружные части изоляции. Основным преимуществом этого процесса является скорость сушки. По сравнению с эффективными системами

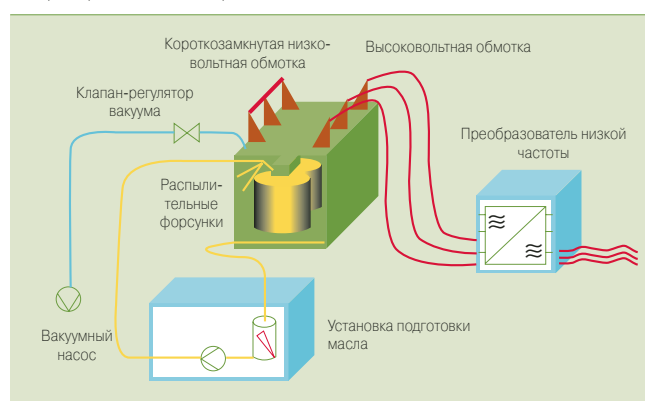
сушки, такими как системы циркуляции масла или разбрызгивания масла, система LFH обеспечивает ускорение сушки в 2–4 раза. Процессы обработки горячим маслом и вакуумной сушки, либо разбрызгивания горячего масла также применяются в рамках системы TrafoSiteRepair™ и позволяют повысить качество ремонтных работ, но если сроки ремонта очень важны, наиболее эффективным решением считается применение LFH.

Метод ЧХД

После завершения сушки необходимо определить остаточный уровень влагосодержания в целлюлозной изоляции трансформатора. Это обычно делается с помощью образцов и испытательных блоков, извлекаемых из трансформатора, с использованием метода Карла Фишера (КФ). Компанией АББ был разработан альтернативный метод с применением созданного недавно диагностического средства – испытателя частотной характеристики диэлектрика (ЧХД – Dielectric Frequency Response, DFR) – для проверки изоляции трансформаторов. В новом методе сопоставляется коэффициент мощности в широком диапазоне частот, обеспечиваемых испытательной установкой ЧХД, с моделью трансформатора, построенной на основе диэлектрических свойств промасленной целлюлозы в различных условиях. Подробная информация, необходимая для построения модели, получается из технологических чертежей системы изоляции трансформатора.

Поскольку влияние влаги и ионогенных примесей на диэлектрические свойства изоляции более выражено в диапазоне низких частот, предпочтительный диапазон измерения составляет от 1 МГц до 1 кГц. Диэлектрические свойства, оцениваемые

4 Схема установки мобильного процесса сушки токами низкой частоты с разбрызгиванием горячего масла.



Инновации в технологиях

5 Сушка автотрансформатора стержневого типа 750 МВА, 500 кВ путем нагрева низкочастотным током и разбрызгивания горячего масла.



испытателем ЧХД – это действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости и тангенс угла диэлектрических потерь. На рис. 6 показан пример замера ЧХД в трансформаторе с влажностью 0,5 и 3%.

Полученная ЧХД затем сопоставляется с моделью, в которой отражены материалы и конструкция изоляции трансформатора. В процедуре моделирования сведения о конструкции и результаты описанного выше замера ЧХД являются исходными данными. Алгоритм рассчитывает характеристику составной модели системы, а затем производится подбор значений влагосодержания целлюлозы и проводимости масла, дающих наилучшую аппроксимацию результатов измерения расчетной характеристикой.

У этого метода два основных преимущества по сравнению с методом КФ:

- состояние изоляции можно оценить без вскрытия трансформатора;
- измерения, проведенные на различных частотах, дают больше информации, что позволяет разделить показатели целлюлозы и масла.

Кроме того, метод ЧХД – это неразрушающий метод, обеспечивающий полную оценку влагосодержания во всем объеме изоляции точнее, чем тесты по методу КФ, проводимые на отдельных образцах бумаги. Полученные значения влагосодержания ближе к реальности, чем результаты измерения точки росы, которые скорее отражают влажность поверхности, чем влажность в объеме изоляции. Метод испытания ЧХД по сравнению с замерами коэффициента мощности позволяет точнее разделить влияние

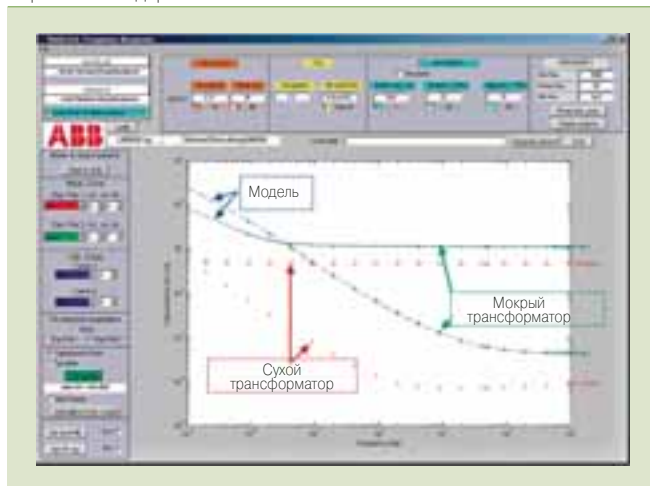
влаги и загрязнений, а также влажности бумаги и высокой проводимости масла. Наконец, оценка влагосодержания на установке после ремонта перед запуском в эксплуатацию с использованием проб масла затруднена, поскольку точность оценки при низких температурах невысока.

Метод ЧХД также оказался полезным для выявления иных дефектов изоляции трансформатора, например, некачественного заземления сердечника или поверхностных отложений углерода вследствие пробоя. По этим причинам метод ЧХД нашел применение в АББ в качестве метода послеремонтного контроля качества.

Преимущество ремонта на месте

Ремонт, восстановление или модернизация силовых трансформаторов на месте установки, будь то трансформаторы передающих или распределительных подстанций, генераторов или потребителей, считается наилучшим методом возвращения оборудования в работу в кратчайшие сроки. Система TrafoSiteRepair™ позволяет завершить работы быстрее, чем это было возможно ранее, что ведет к сокращению времени простоя трансформатора, перерыва электроснабжения и, что наиболее важно, убытков владельца. Таков результат инноваций, внедряемых специалистами прогрессивной компании.

6 Графическое представление результатов испытания частотной характеристики диэлектрика (ЧХД) для трансформаторов с влагосодержанием изоляции 0,5% и 3%. Модель аппроксимирует параметры трансформатора с влагосодержанием 3%.



Ларс Эклунд

ABB Power Products
Людвика, Швеция
lars.i.eklund@se.abb.com

Пьер Лорен

ABB Power Products
Женева, Швейцария
pierre.lorin@ch.abb.com

Пауль Кёстингер

ABB Power Products
Баден, Швейцария
paul.koestinger@ch.abb.com

Петер Верле

ABB Power Products
Галле, Германия
peter.werle@de.abb.com

Бьёрн Хольмгрен

ABB Corporate Research
Вестерос, Швеция
bjorn.holmgren@se.abb.com