

Проблемы диагностики технического состояния мощных силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов

Соколов В.В.
Научно-инженерный центр «ЗТЗ-Сервис»

Состояние трансформаторов. Комплексное обследование. От мониторинга характеристик к мониторингу состояния. Эффективные методы диагностики. Влияние особенностей конструкции. Проблемы обнаружения и распознавания дефектов. Новые методы диагностики

Возможное состояние оборудования

Рабочая группа СИГРЭ 12.18 предлагает следующие виды возможного состояния оборудования: **Нормальное** - нет каких-либо четко определенных проблем, ремонтные работы не требуются. **Дефектное** - нет значительного влияния на снижение надежности в ближайшее время, однако возможно неблагоприятное влияние и снижение долговременной надежности, если не будут приняты меры по исправлению дефекта. **Поврежденное (Faulty)** - оборудование может продолжать работу, однако даже кратковременная надежность может быть снижена. **Отказ(Failed)** - не может продолжаться нормальная эксплуатация оборудования до устранения дефекта.

При этом понимается, что **Дефект** - это в основном обратимое изменение состояния (увлажнение, загрязнение, механическое ослабление и др.), а **Повреждение** - обычно необратимое изменение состояния (деформация, обгар, эрозия и др.).

Правильное понимание состояния позволяет не только планировать обслуживание по состоянию, но и продолжать эксплуатацию дефектного или даже поврежденного оборудования.

Комплексное обследование

Комплексное обследование трансформатора предполагает, прежде всего, оценку функциональной исправности отдельных его подсистем и оборудования в целом на базе специально разработанной модели вероятных дефектов. Последняя позволяет определить конкретные задачи диагностики и оптимизировать комплекс необходимых испытаний.

Комплексная программа оценки технического состояния трансформаторного оборудования осуществляемая НИЦ ЗТЗ-Сервис, концептуально представляет собой следующее:

- Определение модели вероятных дефектов или «чувствительных» зон в конкретном оборудовании (типе, типоразмере и др.) в конкретных условиях эксплуатации, на базе анализа конструкции, опыта эксплуатации аналогичного или подобного оборудования (комплекующих узлов, технических решений).
- Использование групп методов и методологии, характеризующих конкретный дефект, принимая во внимание взаимосвязь между применяемыми методами.
- Применение многоступенчатой диагностической программы по схеме:
 - => Выявление симптомов дефектного состояния (аномалий), преимущественно без отключения оборудования.
 - => Подтверждение дефектного состояния, оценка степени его опасности с помощью дополнительных испытаний до и после отключения от сети.

=> Предсказание возможного состояния, преимущественно с помощью функциональных испытаний (типичная программа для оценки продления срока службы).

=> Подтверждение наличия, вида и объема дефекта (типичная программа проверки после слива масла).

За последние годы более 150 крупных силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов обследовано с применением указанного подхода. Главные результаты могут быть определены следующим образом.

В оборудовании, в котором по результатам нормированных испытаний дефектов не предполагалось, были обнаружены существенные, в том числе многочисленные дефекты.

В ряде случаев была определена возможность продолжения эксплуатации оборудования в дефектном состоянии.

Диагностика состояния оборудования

Традиционная нормированная диагностическая система, в том числе и программа комплексного обследования, предложенная в РАО ЕЭС России, по существу продолжает подход, основанный на контроле изменения характеристик оборудования по сравнению с данными завода, полученными при монтаже или предыдущих испытаниях, то есть по существу - мониторинг характеристик, но не состояния оборудования.

Существенными недостатками традиционного подхода являются:

- Зачастую сомнительная корреляция между измеренным параметром и дефектом и особенно дефектным состоянием.
- Возможен ненадежный или даже ложный диагноз, особенно о благополучном состоянии оборудования.
- Зачастую проводятся ненужные испытания, которые по-существу не выявляют дефектное состояние.
- Типичным диагностическим выводом является рекомендация проведения многократных повторных испытаний, что является затратным, рискованным (например, многократный отбор проб из маломасляных вводов или трансформаторов тока) и малоэффективным в случае быстрого развития дефекта.

Система диагностики состояния трансформатора по существу должна следовать такому же процессу, как и диагностика состояния человеческого организма. Для этого требуется четкое знание болезней и их симптомов, а также понимание возможного развития болезней и характеристик опасного состояния. Соответственно требуются четкие ответы на вопросы: Что делать в случае.Х.?

Применительно к трансформаторному оборудованию необходимо:

- Определить характеристики дефекта (дефектной области).
- Определить взаимосвязь между характеристиками дефекта и доступными диагностическими характеристиками оборудования.
- Определить образ дефекта.
- Определить возможное развитие дефекта до отказа оборудования.

В практическом смысле оценка технического состояния трансформатора может быть представлена в виде ответов на вопросы о наличии факторов, снижающих функциональную работоспособность оборудования. Например, имеется ли повышенная влажность? Аномальное загрязнение масла? Загрязнение поверхности изоляции? Аномальный перегрев? Деформация обмоток? И т.д. В первую очередь естественны вопросы: можно ли ожидать проблемы, которые уже приводили к отказам аналогичного оборудования.

На некоторые вопросы могут быть даны надежные ответы. Например, повышение переходного сопротивления контактов РПН и рост характерных газов в масле указывают на повреждение контактов.

В некоторых случаях можно говорить лишь о симптомах явления. Например, имеется местный нагрев в масле (где - неизвестно). В некоторых случаях диагностический

инструмент практически отсутствует. Например, увлажнение, загрязнение (и вообще состояние) витковой изоляции обмотки.

Необходимым условием эффективной диагностики является глубокое понимание механизма возникновения и развития дефекта.

В последние годы рабочими группами СИГРЭ при активном участии специалистов НИЦ ЗТЗ-Сервис сделан существенный вклад в теоретическую и практическую интерпретацию процессов увлажнения и старения изоляции трансформаторов, старения масла и влияния продуктов старения на деградацию целлюлозы, проблемы частиц в масле, динамической устойчивости обмоток и др. Результаты этих работ позволяют более четко сформулировать актуальные задачи диагностики и предложить более эффективные и экономичные методы.

Обсуждение мировых достижений, включение специалистов энергосистем в работу по совершенствованию методов диагностики совместно с ведущими зарубежными специалистами является одной из задач «Информационной системы», предлагаемой НИЦ ЗТЗ-Сервис.

Эффективные методы диагностики

Опыт показывает, что более 60% дефектов детектируются по данным анализа проб масла.

НИЦ разделяет четыре задачи контроля масла:

- **Идентификация** вида, состава, основных физико-химических характеристик
- Оценка диэлектрического состояния оборудования
- **Предупреждение критического старения** масла с учетом влияния продуктов старения на деструкцию целлюлозы. Выбор методов регенерации
- **Определение продуктов деградации:** использование масла как диагностической среды

Оценка состояния всей диэлектрической системы с помощью анализа состояния масла

Решение этой задачи осуществляется на базе измерений **влагосодержания масла** в прогретом состоянии трансформатора, определение **концентрации частиц по размерам и идентификация** частиц по составу, пробивное напряжение и его вариация (проба из прогретого оборудования)

tgδ и проводимость масла (температурная зависимость)

поверхностное натяжение (оценка наличия поверхностно активных веществ и опасности выделения пузырьков пара из витковой изоляции при резком повышении температуры).

Выявление местных перегревов, разрядов и т.д. в масле через ХАРГ

ХАРГ, несомненно, наиболее эффективный метод. Однако опыт показывает, что необходимо учитывать различие в газовыделяющих свойствах различных масел, температурную миграцию газов (адсорбцию целлюлозой), зависимость количества выделяющегося газа от температуры, энергии ЧР. объема локальной дефектной области, а также иные, помимо дефекта, источники газовыделения.

Для выявления дефектов, характеризующихся температурами ниже температуры кипения масла, НИЦ применяет анализ газовых компонентов C₃-C₅, особенно бутена⁻¹ C₂H₈.

Water Heat Run test

Метод предназначен для оценки уровня увлажнения изоляции и предупреждения возможности опасного снижения электрической прочности масла с помощью искусственного прогрева трансформатора под нагрузкой до температуры, при которой относительная влажность масла ниже влажности изоляции, и выдержки при этой температуре в течение определенного времени, достаточного для выделения в масло ощутимого количества влаги.

Для оценки уровня увлажнения более 1% относительная влажность масла должна быть ниже 3%. Соответственно температура масла должна быть (например, для масла ТКп и исходного влагосодержания 10ppm при низкой температуре) выше 65°C.

В 1992 -1998 методами НИЦ было оценено состояние около 150 трансформаторов. В 53 случаях было обнаружено повышенное увлажнение изоляции или скопление воды в баке.

Оценка увлажнения и загрязнения изоляции через температурные зависимости характеристик изоляции

Метод предусматривает расчетную оценку среднего влагосодержания барьеров по величинам $Tg\delta$ и сопротивления изоляции участка между обмотками (при отсутствии препятствующих факторов: наличия бакелитового цилиндра, заземленного экрана), а также оценку загрязнения масла, поверхности изоляции и в некоторых случаях выявление следов разрядов на поверхности по данным температурного изменения характеристик изоляции.

Определение радиальных деформаций обмоток через относительные изменения значений реактансов рассеяния

Выявление радиальных деформаций внутренних обмоток с помощью расчетной оценки изменения реактансов обмоток по отношению к поврежденной оказалось весьма эффективным приемом, позволяющим надежно прогнозировать наличие повреждения. Только за последние 4 года выявлено 17 трансформаторов с деформированными обмотками.

Определение дефектов контактов РПН и присоединений отводов через относительное изменение переходных сопротивлений постоянному току.

Суть метода заключается в определении характеристик дефектного состояния контактов (обычно увеличение исходного переходного сопротивления в 5-10 раз) и выборе соответ