

ДИАГНОСТИКА ТРАНСФОРМАТОРА МЕТОДОМ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА

ОХЛЕН М., менеджер по маркетингу по оборудованию для диагностики трансформаторов Megger Sweden AB

Диагностика трансформатора посредством анализа частотных характеристик – один из инструментов для определения механической целостности трансформатора

Силовые трансформаторы должны выдерживать механические воздействия, возникающие как при транспортировке, так и при последующей эксплуатации, например, при КЗ и воздействиях тока молнии. Механические воздействия могут превосходить нормированные значения, в то время как твердая изоляция стареет со временем и ее стойкость снижается, таким образом, широко известно, что возникающие механические воздействия могут превосходить предел стойкости составившей конструкции.

На практике существует необходимость эффективного определения подобных повреждений. Визуальный осмотр при этом требует значительных затрат времени и не всегда дает определенные результаты. При осмотре в полевых условиях необходимо сливать масло из трансформатора. Часто для определения повреждения требуется полный слив масла. Альтернативным методом для определения повреждений является применение диагностической

техники. Диагностика трансформатора посредством анализа частотных характеристик – один из инструментов для определения механической целостности трансформатора.

Существует несколько случаев, когда может потребоваться оценка механической целостности трансформатора, например:

- оценка качества при производстве;
- оценка результатов испытаний опытом КЗ при производстве;
- после транспортировки, перемещения трансформатора;
- после протекания больших токов, близких к КЗ, вызывающих сильные механические воздействия;
- после природных воздействий, таких как землетрясение, удар молнии и т.п.;
- в качестве инструмента для диагностики, когда результаты анализа растворенных газов, вибрационные испытания или другие методики свидетельствуют об отклонениях от нормального состояния;
- до и после проведения технического обслуживания.

МЕТОД ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА

Рассмотрим методику, по которой производится анализ частотных характеристик трансформаторов.

Измерения

Анализ частотных характеристик трансформатора (FRA-анализ), или Анализ колебательных частотных характеристик трансформатора (SFRA-анализ) предполагает снятие и анализ частотных характеристик силового трансформатора, обычно в диапазоне частот 20 Гц – 2 МГц (рис. 1).

Анализ

FRA-анализ является методом, основанным на сравнении характеристик для определения состояния силового трансформатора. Для оценки результатов анализа действительные значения сравниваются с эталонными данными путем непосредственного визуального сравнения, либо с использованием обработанных числовых значений, т.е. корреляционный анализ.

Для сравнения снятых характеристик с эталонными данными может использоваться три подхода:

- сравнение новых данных измерений с рефлектограммой этого же оборудования (сравнение разновременных результатов);
- сравнение данных измерений для одинаковых трансформаторов (сравнение результатов для одной конструкции);
- сравнение данных измерений для симметричных обмоток (выводов, фаз) одного трансформатора (сравнение результатов для одной конструкции).

Когда возникают подозрения, что оборудование могло получить механическое повреждение (транспортировка, значительные механические усилия, например, от воздействия токов КЗ), эксплуатирующий персонал может опреде-

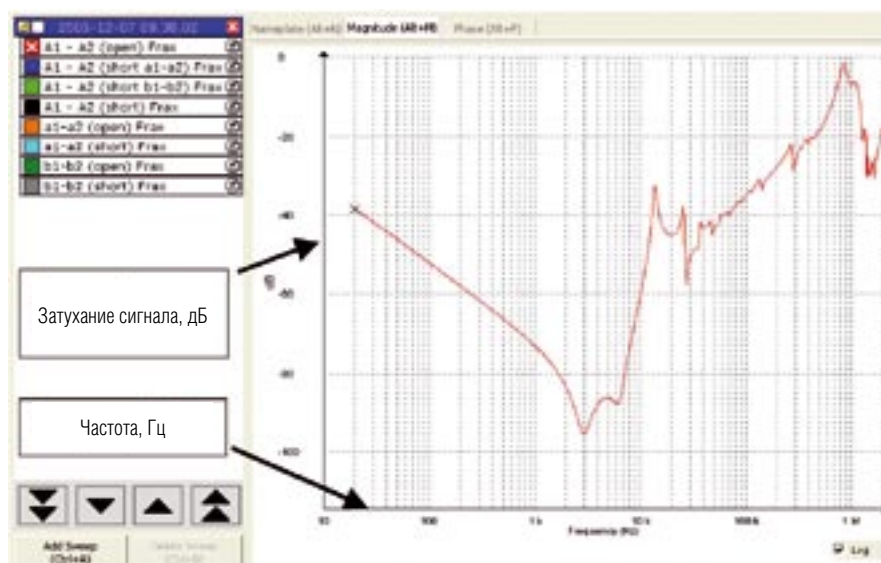


Рис. 1. Обычное представление SFRA-характеристики: зависимость амплитуды от частоты

лить наличие механических смещений в конструкции путем сравнения эталонной характеристики с характеристикой, снятой после соответствующего события. Если характеристики идентичны, то внутренних смещений не происходило и трансформатор может безопасно продолжать эксплуатироваться. Для определения, в какой части конструкции произошло механическое смещение, характеристики должны быть сняты для каждой обмотки в отдельности.

Для достижения лучших результатов и выполнения более качественного анализа эталонные передаточные характеристики спектрограммы должны быть сняты для каждой обмотки нового трансформатора. Наличие таких характеристик позволит в будущем использовать их для оценки состояния трансформатора методом сравнения разновременных результатов.

Если для нового (или неповрежденного) трансформатора характеристики сняты не были, для сравнения могут быть использованы характеристики, снятые для идентичного трансформатора, находящегося в эксплуатации и не подвергавшегося опасным воздействиям (сравнение результатов для одного типа), а также могут быть использованы для сравнения характеристики обмоток разных фаз (сравнение результатов для одной конструкции).

АНАЛИЗ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРА

Измерения могут производиться как в частотной области, так и во временной области. Если анализ частотных характеристик трансформатора производится в частотной области, то есть характеристики, снимаемые с трансформатора, строятся как функция затухания сигнала в зависимости от частоты.

Измерения в частотной области называют анализом колебательных частотных характеристик трансформатора (SFRA-анализ) для того, чтобы отделить их от характеристик, снятых во временной области (IFRA-анализ). Измерения, пример которых приведен в данной статье, производились по методике SFRA с приложением напряжения с амплитудным значением – 5 В во всем диапазоне частот. Обычно развертка от 20 Гц до 2 МГц занимает 60 секунд при установках для измерений

выбранных по умолчанию. Устройства, используемые в данном опыте, позволяют оптимизировать развертку для сокращения времени измерения, одновременно сохраняя необходимое разрешение в диапазоне частот, который представляет наибольший интерес.

Анализ во временной области (IFRA-анализ) производится путем приложения нескольких импульсов и последующего измерения отраженных сигналов как функции от времени. Такая методика часто называется импульсной. Обычно результаты измерений должны быть преобразованы в частотную область (как правило, с использованием быстрого преобразования Фурье) для дальнейшего анализа. Результат преобразования Фурье – (спектр частот) характеризуется слабым разрешением в области низких частот, что ограничивает возможности по анализу изменений магнитной системы трансформатора.

Методика снятия характеристик во временной области также обладает меньшей повторяемостью, то есть характеристики, снятые для одного обмоточного времени, могут отличаться. Поэтому частотная реализация FRA-анализа сейчас более широко распространена в мире, чем импульсная

СТАНДАРТЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО SFRA-АНАЛИЗУ

Существует несколько международных стандартов и рекомендаций по применению SFRA-анализа при испытаниях силовых трансформаторов:

- анализ частотных характеристик для выявления деформаций обмоток силовых трансформаторов, DL/T 911-2004, Стандарт Электроэнергетической промышленности Народной Республики Китай;
- оценка механического состояния обмоток силовых трансформаторов с использованием анализа частотных характеристик, отчет 342 CIGRE 2008;
- IEEE PC57.149TM/D4 Draft. Временная инструкция для применения и интерпретации результатов анализа частотных характеристик маслонаполненных трансформаторов, 2007 (черновик);
- международные стандарты производителей силовых трансформаторов.

Стандарты дают подробные рекомендации в части процедуры проведения и анализа результатов FRA-анализа (DL/T

Рубрика ДИАГНОСТИКА И РЕМОНТЫ

Ведущий рубрики



Назарычев Александр Николаевич

Заведующий кафедрой «Электрические станции, подстанции и диагностика электрооборудования» ГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет (ИГЭУ), доктор технических наук, профессор.

В 1983 году с отличием окончил электроэнергетический факультет ИГЭУ по специальности «Электрические станции». В 1991 году защитил кандидатскую, а в 2005 году докторскую диссертацию. Заслуженный работник ЕЭС РФ.

Задать вопрос ведущему рубрики

вы можете через редакцию по e-mail: vopros@energyexpert.ru или через форум Интернет-портала «Энергоэксперт-online»:

www.energyexpert.ru

Прямая ссылка:
<http://energyexpert.ru/forum/viewforum.php?f=13>

Рис. 2. Обычный диапазон частот для SFRA-анализа

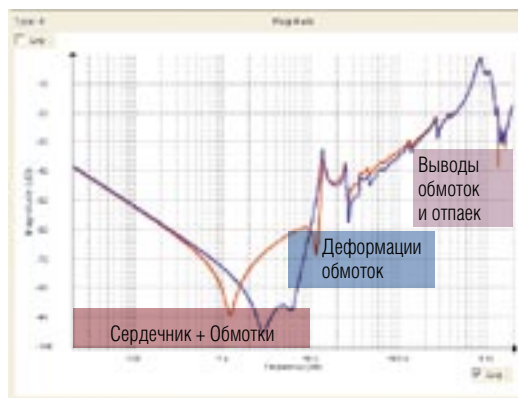
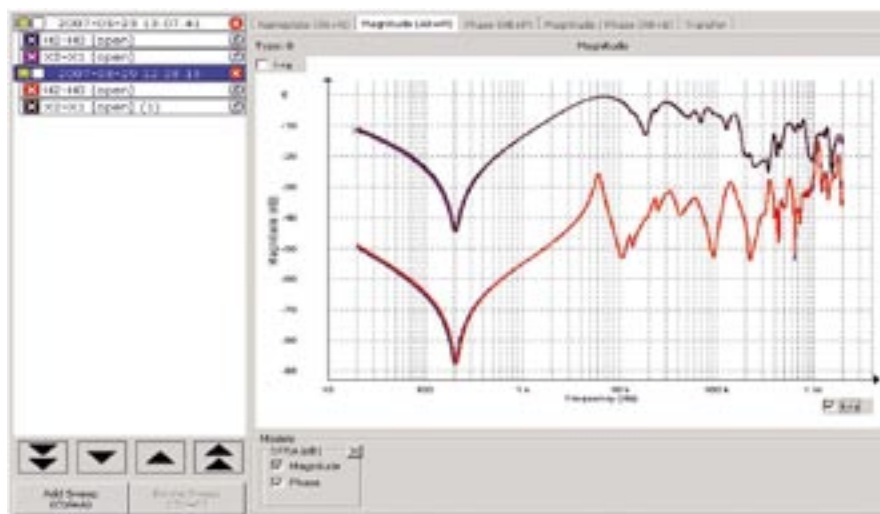


Рис. 3. SFRA-анализ для обмотки ВН и НН. Результаты измерения до и после протекания тока КЗ идентичны



911-2004). Ключевые факторы, обеспечивающие достижение достоверных результатов измерений, следующие:

- следование стандартам по проведению SFRA-анализа;
- выбор оборудования для испытаний, соответствующее требованиям стандартов;
- испытание силового трансформатора так, как это описано в стандартах.

Для достижения высокой точности и повторяемости измерений важно следовать приведенным ниже рекомендациям:

- использовать высококачественный и высокоточный измерительный прибор с входным и выходным сопротивлением, равным сопротивлению кабеля (50 Ом);
- во всех опытах прикладывать напряжение с одной и той же амплитудой;
- измерения для SFRA-анализа следует производить перед измерением сопротивления обмоток или необходимо убедиться в снятии остаточного намагничивания трансформатора перед проведением измерений;
- следует убедиться в надежности подключений и подключить экраны коакси-

альных кабелей к фланцам изоляторов с использованием коротких проводников;

- следует убедиться, что испытательная схема в точности повторяет соответствующую схему испытаний, по которой были сняты характеристики в предыдущий раз (положения отпаяк, внешние подключения и т.п.). Параметры схемы следует внимательно документировать.

Интерпретация результатов

Как показано на рис. 2, повреждение сердечника, обрыв обмотки или витковое замыкание в общем случае будут вызывать изменение (т.е. измеренная характеристика будет отличаться от эталонной) в диапазоне низких частот. Изменения могут свидетельствовать о короткозамкнутых витках обмотки, обрыве обмотки, остаточном намагничивании или смещении сердечника. В случае, показанном выше, изменение характеристики в области низких частот вызвано проблемами заземления сердечника.

Повреждения обмоток, за исключением витковых замыканий и обрывов (которые также отражаются в диапа-

зоне низких частот), будут влиять на характеристику в среднем диапазоне частот. Обычные повреждения такого типа – смещения обмоток относительно друг друга или деформация обмоток.

Изменения в области высоких частот обычно свидетельствуют о проблемах с соединениями внутри трансформатора.

Пример измерений

Сравнение разновременных результатов

Измерения производились на однофазном повышающем трансформаторе 105 МВА после КЗ. Для рассматриваемого трансформатора была снята эталонная характеристика для обмоток высшего и низшего напряжения.

Как видно из рис. 3, характеристики идентичны, что подтверждает, что трансформатор не получил никаких повреждений при протекании тока КЗ.

Характеристики были сняты для однофазного трехобмоточного повышающего трансформатора (403/16/16 кВ, 103 МВА) до и после ремонта. В ходе ремонта из трансформатора было слито масло, он был перемещен на 10 м, были заменены высоковольтные вводы, а также были проделаны другие операции обслуживания. В конце концов, трансформатор передвинули обратно на место и залили масло.

Результаты измерений, показанные на рис. 4, относятся к обмотке высшего напряжения (ввод А1 и ввод А2) с обеими разомкнутыми обмотками низшего напряжения перед проведением работ (синий) и после ремонта (красный). Как можно видеть, характеристики идентичны в диапазоне частот выше приблизительно 10 кГц, что является очень хорошим показателем.

В диапазоне низших частот, который относится к сердечнику, можно заметить различия. Этот вид смещения иллюстрирует типичное различие между характеристикой для нормального и намагниченного сердечника. Это не является повреждением, просто в данном случае измерение сопротивления обмотки, которое проводится с использованием источника постоянного тока, привело к появлению остаточной намагниченности сердечника.

Замечание: стандарты по SFRA-анализу рекомендуют производить измерение сопротивления обмоток после снятия характеристик для SFRA-анализа.

На рис. 6 для сравнения показаны результаты измерений на идентичном трансформаторе, рассмотренные в предыдущем случае. Зеленая характеристика показывает нормальное состояние, а красная демонстрирует результаты измерения после проведения планового обслуживания, в ходе которого по ошибке было отключено заземление сердечника.

Заметное различие начинается с частоты около 300 Гц и заметно до частоты приблизительно 100 кГц. В этом примере продемонстрирована серьезная проблема, а внешний вид характеристики при этом значительно отличается от случая намагниченого сердечника, рассмотренного в предыдущем случае.

Важность использования одного и того же напряжения при испытаниях проиллюстрирована на рис. 5. В этом случае характеристика для обмотки низшего напряжения трансформатора снимается при различных значениях напряжения. Влияние этого заметно по различию в амплитуде в диапазоне низших частот, а также в смещении в области первой резонансной частоты. Особенно при снятии характеристик разомкнутых обмоток низшего напряжения можно отметить значительные отклонения в нижнем диапазоне частот при приложении различных напряжений. Большинство устройств сегодня используют напряжение с удвоенной амплитудой 10 В (амплитудное значение – 5 В), которое уже сейчас рекомендуется международными стандартами.

Сравнение результатов для одной конструкции

На рис. 7 показаны характеристики SFRA-измерений разомкнутой обмотки ВН для трансформатора 40 МВА. Оборудование было выведено из эксплуатации, однако результаты тестов показали, что оно находится в хорошем состоянии и может использоваться в качестве резервного. Для проведения SFRA-анализа не были доступны исторические данные (снятые ранее характеристики).

Был произведен SFRA-анализ с использованием характеристик, снятых с симметричных фаз трансформатора по методике, описанной в DL/T 911-2004. При анализе не было отмечено никаких отклонений характеристик, что говорит об идентичных электромеханических параметрах рассмотренного оборудования.

Для рассмотренного трансформатора было сделано заключение, в соот-

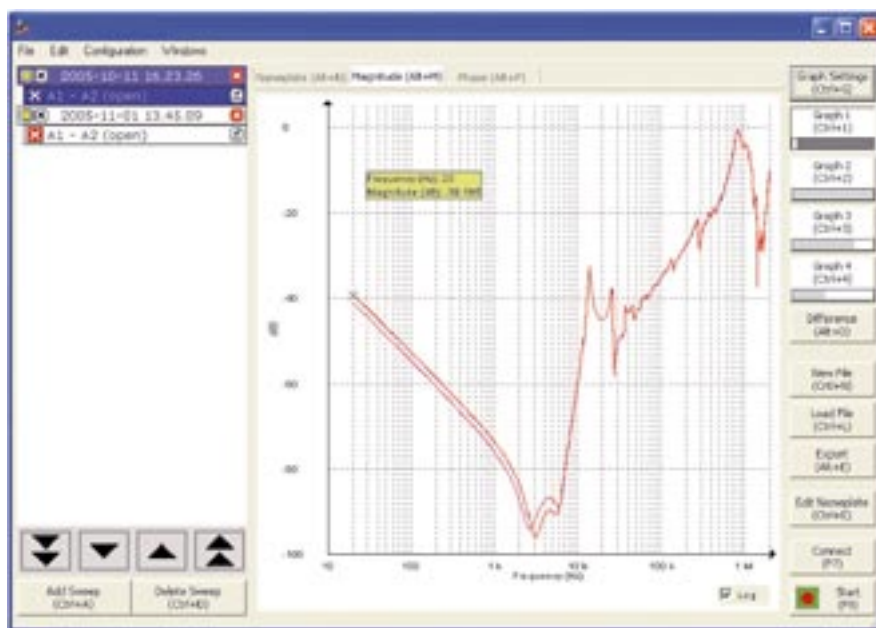


Рис. 4. Эффект от остаточного намагничивания

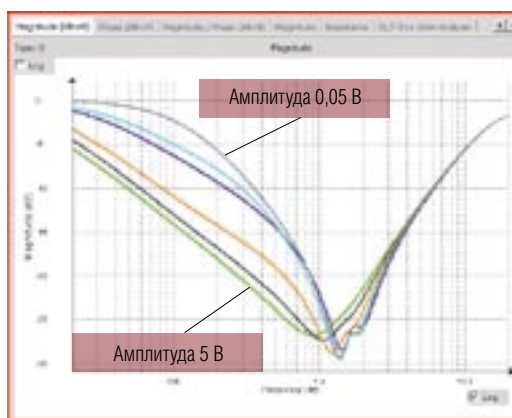


Рис. 5. Результат выполнения измерений при приложении различного напряжения (обмотка НН)

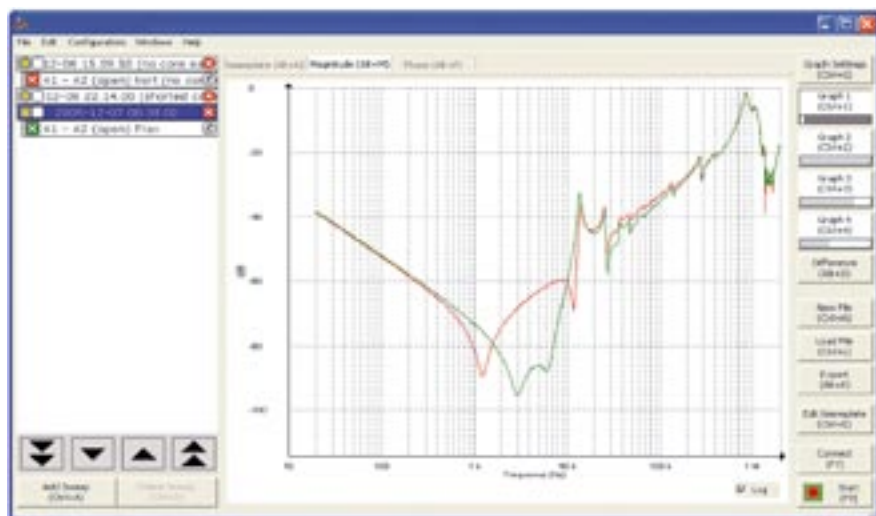


Рис. 6. SFRA-анализ обмотки ВН с заземленным и незаземленным сердечником.

ветствии с которым все фазы трансформатора не имеют механических повреждений, а SFRA-анализ может быть использован для проведения обследований в будущем.

Сравнение результатов для одной конструкции

Третьим возможным вариантом сравнения результатов SFRA-анализа является поиск еще одного транс-

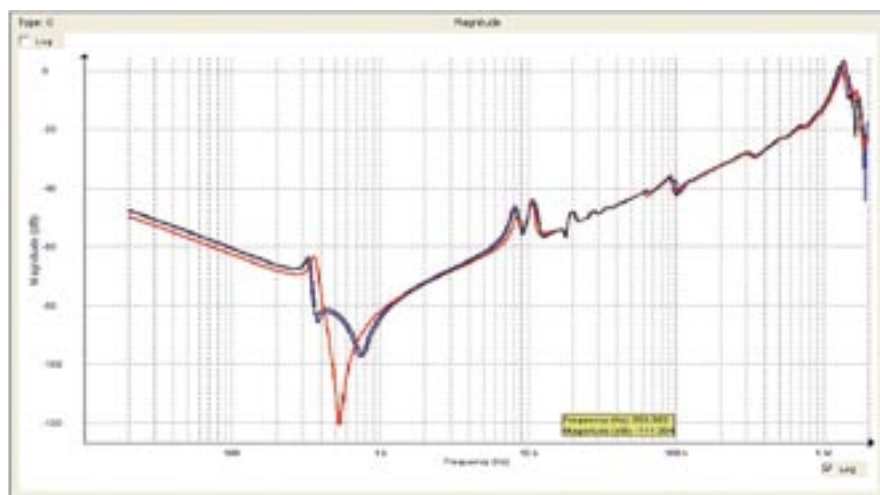


Рис. 7. Сравнение характеристик для разных фаз исправного трансформатора

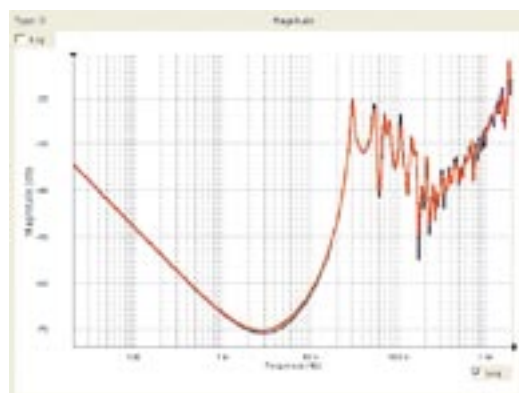


Рис. 8. SFRA-анализ для трех генераторных трансформаторов 160 МВА (обмотка ВН, разомкнутая)

форматора такого же типа. Однако крайне важно в таком случае убедиться, что два трансформатора при этом по-настоящему являются «братьями», а не просто «похожими». Обычно для того, чтобы в этом убедиться, необходимо проверить следующие пункты:

- наличие одного производителя;
- производство на одном заводе;
- идентичные спецификации на оборудование;
- отсутствие восстановления или ремонтов;
- один год изготовления или $\pm$ год для трансформаторов большой мощности;
- трансформатор является одним из большой линейки заказа для данного объекта;
- для проектов с большим количеством установленных трансформаторов в качестве опорной не следует применять характеристику, снятую с первого трансформатора из серии.

На рис. 8 показан пример «тройки». На изображении продемонстрированы характеристики для обмотки ВН (разомкнутой) трех однофазных генераторных трансформаторов (броневые типа). Видно, что характеристики практически совпадают, что свидетельствует об отсутствии проблем в какой-либо из обмоток.

КОММЕНТАРИЙ ЭКСПЕРТА

ДРОБЫШЕВСКИЙ А.А.,

член рабочей группы IEC 60076-18 «Измерение частотных характеристик трансформаторов», к.т.н.

Из известных в настоящее время методов диагностики механического состояния обмоток трансформаторов метод частотного анализа (FRA – Frequency Response Analysis) – наиболее чувствительный к большинству видов деформаций, смещений и распрессовке обмоток, возникающих как результат электродинамических воздействий при коротких замыканиях и бросках токов включения.

Метод частотного анализа является развитием известного метода низковольтных импульсов НВИ, который использовался (и используется до сих пор) для диагностики механических деформаций обмоток силовых трансформаторов и реак-

торов. В России метод низковольтных импульсов был внедрен в 70-х годах сначала на всех испытательных стендах страны – для контроля состояния обмоток при испытаниях трансформаторов на электродинамическую стойкость, а в дальнейшем стал применяться и в эксплуатации.

Благодаря более высокой воспроизводимости результатов измерений метод частотного анализа практически во всем мире вытеснил метод низковольтных импульсов (так, в России на смену диагностическим установкам типа «Импульс-8», основанным на методе НВИ, пришли установки «Импульс-9 и «Спектр-Т», основанные на методе частотного анализа).

В связи со старением силовых трансформаторов, увеличением их нагрузок в последние годы увеличилось количество повреждений трансформаторов, связанных с деформациями обмоток при коротких замыканиях. Поэтому тематика статьи, связанная с методами оценки механического состояния обмоток трансформаторов, весьма актуальна, а сама статья предлагает полезную информацию для инженеров-диагностов.

В развитие темы статьи считаю целесообразным предложить следующие дополнения и комментарии.

1. Воспроизводимость обоих методов может быть одинаково высока при обеспечении всех требований к

процедуре измерений, изложенной в брошюре СИГРЭ № 342. Несколько лет назад в СИГРЭ была создана рабочая группа, объединившая специалистов разных стран, задачей которой была разработка рекомендаций по повышению эффективности применения метода частотного анализа. В результате проведения совместных исследований было разработано Руководство по применению метода, в котором, как равнозначные, представлены два подхода: импульсный (iFRA) – с использованием импульсного генератора и частотный (sFRA) – с использованием свип-генератора – генератора изменяющихся синусоидальных сигналов. Каждый метод обладает своими достоинствами и недостатками.

Так, к достоинствам частотного подхода можно отнести его простоту, а также возможность контроля состояния магнитной системы. К недостаткам – гораздо более продол-

жительную, чем в импульсном подходе, процедуру измерений (сокращение времени сканирования чревато снижением чувствительности и, соответственно, потерей важной информации). А возможность анализа в области низких частот хотя и полезна и привлекательна, но интерпретация результатов измерений в этой области вызывает затруднения, так как на частотные характеристики обмоток в области низших частот оказывает влияние степень намагниченности магнитной системы, которую трудно оценить.

Достоинство импульсного метода – гораздо меньшая (в десятки раз) продолжительность процедуры диагностики (что особенно актуально при электродинамических испытаниях), а также несколько большая информативность за счет возможности анализа результатов измерений: возможность анализа как в частотной, так и во временной области.

К недостаткам можно отнести более сложную процедуру измерений, требующую более высокой квалификации персонала, а также слабую чувствительность к изменениям в области низких частот (до 2–5 кГц), характеризующих изменения в магнитной системе.

2. Анализ результатов измерений с использованием передаточных функций (отношений спектров входного и выходного сигнала) позволяет резко повысить воспроизводимость результатов измерений, абстрагируясь от возможных изменений параметров генератора, например, колебаний выходного напряжения генератора.

3. Изменения спектров в области высоких частот могут свидетельствовать не только о проблемах с внутренними соединениями в трансформаторе (смещением ошиновки, отводов), но и с локальными деформациями витков и катушек, с распрессовкой обмоток.

10-12 февраля

ЭКСПО-ВОЛГА
САМАРА-2010

16-я международная специализированная выставка

ЭНЕРГЕТИКА

- ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ
- ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ, ПРИБОРЫ И АППАРАТЫ
- УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОСНАБЖАЮЩИХ СИСТЕМ
- СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ, ГАЗООБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ
- ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ



Выставочная компания «ЭКСПО-ВОЛГА»
443110 г. Самара, ул. Мичурина, 23а
тел./факс: +7(846) 279-04-90, 270-34-11
E-mail: energy@expo-volga.ru
www.energysamara.ru





