

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

УДК 314.212:620.111.3

Гун. И.Г., Салганик В.М., Евдокимов С.А., Сарлыбаев А.А.

ОСНОВНЫЕ НЕИСПРАВНОСТИ И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Дана характеристика основных неисправностей силовых трансформаторов 35-110 кВ и причин их возникновения. Рассмотрены методы диагностирования без снятия напряжения в условиях эксплуатации. Выполнено разделение методов на пять характерных групп. Дана характеристика диагностической ценности применяемых методов.

Ключевые слова: силовой трансформатор, повреждения, диагностирование, методы, классификация, диагностическая ценность.

The characteristic of the basic derangements of mains transformers 35-110 kV and the reasons of their origination are given. Methods of diagnosing without stress relief under operating conditions are observed. Separation of methods into five characteristic groups is fulfilled. The characteristic of diagnostic importance of applied methods is given.

Key words: the mains transformer, faults, diagnosing, methods, classification, diagnostic importance.

Опыт эксплуатации силовых маслонаполненных трансформаторов показывает, что при соблюдении номинальных нагрузочных режимов, своевременном проведении ремонтов и качественном их выполнении срок службы трансформатора может значительно превышать нормативный (25 лет). При решении вопросов дальнейшей эксплуатации трансформаторов возникает необходимость оценки их действительного состояния, которое определяется целым рядом параметров, характеризующих состояние активной части, изоляции, устройства переключения ответвлений, вводов высокого напряжения, системы охлаждения и т.д.

Основные причины возникновения неисправностей в силовых трансформаторах

На основе эксплуатационных данных можно выделить следующие причины, приводящие к снижению и потере работоспособности трансформаторов [1, 2]:

- повышенный нагрев элементов активной части, вызванный нагревом металлических деталей, вихревыми токами, перегрузками и перенасыщением магнитопровода, а также их старением;
- нарушение изоляции между элементами конструкции и образование контура для циркулирующих токов из-за нарушения изоляции стяжных шпилек остова, замыкания ярмовых балок на бак трансформатора;
- увлажнение изоляции;
- наличие газа в масле из-за газовыделения в местах повышенного нагрева или повышенной напряженности электрического поля (характерным признаком являются частичные разряды);
- старение изоляции под воздействием катализаторов, кислорода и электрического поля;
- частичные деформации обмоток при прохождении сквозных токов КЗ;
- повреждение обмоток (витковые замыкания) из-за грозовых перенапряжений;
- износ, нагрев контактов переключающих устройств;
- отказ защиты трансформатора;

- частичные разряды в изоляции.

Для трансформаторов класса напряжений 35–110 кВ характерными дефектами являются увлажнение изоляции и повреждение токоведущих соединений. Дефектами трансформаторов 220 кВ и выше могут стать развивающиеся повреждения из-за повышенного нагрева токоведущих соединений, элементов конструкций, увлажнение и сопутствующие им частичные разряды. Поэтому преимущественным направлением диагностирования для трансформаторов 35–120 кВ является оценивание увлажнения, старения изоляции, межвитковых замыканий и интенсивности частичных разрядов.

Условия ухудшения состояния изоляции трансформаторов условно можно разделить на три группы.

Первая группа характеризуется разложением углеводородов трансформаторного масла под действием температуры, электрического поля и катализаторов, а также молекул кислорода. В результате образуются молекулы воды и активные радикалы (молекулярное растворение воды в материале изоляции). К этой группе относится увлажнение изоляции непосредственным путем миграции влаги из атмосферы через прокладку бака и других элементов трансформатора.

Вторая группа сопровождается образованием активных химических соединений, т.к. при наличии молекул воды и активных радикалов образуются полярные соединения (свежее трансформаторное масло является неполярным веществом). Процесс поляризации происходит вследствие гидролиза молекул материала изоляции. Интенсивность окисления увеличивается под воздействием электрического поля, катализаторов и концентрации влаги. Контроль состояния изоляции в этом случае существующими средствами затруднен и малоэффективен.

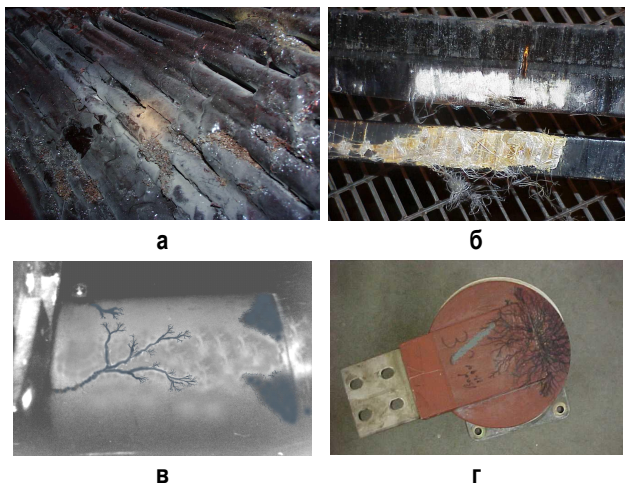
Третья группа вызывает изменения физических свойств и химического состава изоляции, в результате чего образуются шламы, изменяются цвет, температура вспышки масла, ускоряются процессы газообразования и др. Анализ существующих методов, способов и средств испытаний показал, что контроль состояния

Таблица 1

Основные повреждения силовых трансформаторов

изоляции основан на выявлении образовавшихся продуктов, концентрация которых значительна. При этом появляются побочные признаки, обнаруживающие ухудшение характеристик изоляции, например частичные разряды. Аварии и отбраковки происходят из-за превышения предельных параметров.

На рисунке показаны последствия аварий трансформаторного оборудования (по материалам доклада компании Culter-Hammer Predictiwe Diagnostics [3]). Основные повреждения силовых трансформаторов (без учета высоковольтных вводов) с указанием причин их возникновения, характером и последствиями их развития приведены в табл. 1 [4].



Повреждения: а – обмотки; б – шин; в – бака; г – треки

Методы диагностирования силовых трансформаторов в эксплуатации

Все измерения и анализы при диагностике трансформаторов можно условно разделить на пять групп [5].

Первая группа – традиционные измерения на отключенном трансформаторе тангенса угла диэлектрических потерь ($tg \delta$) и сопротивления изоляции обмоток и вводов, сопротивления обмоток постоянному току, потерь холостого хода и сопротивления (напряжения) КЗ. Все эти измерения, как правило, регулярно выполняются эксплуатационным персоналом.

Вторая группа – измерения на трансформаторах при рабочем напряжении в режимах наибольших нагрузок и холостого хода. Здесь можно выделить следующие работы: *измерения частичных* и других электрических разрядов; *акустическое обследование* бака трансформатора с целью определения источников электрических разрядов. Для этого используются система записи акустических сигналов с помощью осциллографа, а также локация акустических сигналов, позволяющая оперативно определять звуковую частоту источников механического характера, частичных, искровых или дуговых разрядов; *вибрационное обследование трансформатора* (основанное на анализе спектра колебаний поверхности бака) для определения уровня прессовки обмоток и магнитопровода, а также исследование системы охлаждения; *термографическое обследование* бака трансформатора, вводов расширителя теплообменников (радиаторов), термосифонных фильтров, электрических двигателей и маслонасосов системы охлаждения, контактных соединений.

Узел	Повреждение	Причина возникновения повреждения	Характер и последствия развития повреждения
Обмотка	Выгорание витковой изоляции и витков обмотки	Длительное неотключение сквозного тока КЗ на стороне низшего напряжения трансформатора	Выгорание витковой изоляции и витков, разложение масла, расплавление и разбрызгивание меди и разрушение изоляции
	Деформации обмотки	Недостаточная электрическая стойкость обмоток	Повреждение изоляции вследствие деформации обмоток с возможным повреждением трансформатора
	Увлажнение и загрязнение изоляции обмоток	Нарушение герметичности трансформатора к токам КЗ	Снижение электрической прочности маслобарьерной изоляции и пробой первого масляного канала, что может вызвать: - развитие «ползущего разряда»; - ионизационный пробой витковой изоляции за счет вытеснения масла водяным паром из капилляров изоляции; - повреждение трансформатора
	Износ изоляции обмоток	Снижение механической стойкости изоляции обмоток	Разрушение изоляции обмоток с последующим возникновением виткового замыкания или замыкания на другую обмотку при умеренном сквозном токе КЗ с внутренним повреждением трансформатора
	Дефект изготовления грозозупорной обмотки	Касание петель грозозупорных обмоток разделяющей перегородки	В условиях вибрации трансформатора ведет к истиранию изоляции петлей и развитию пробоя
Магнитопровод	Перегрев магнитопровода	Образование короткозамкнутого контура в магнитопроводе	Оплавление стали магнито-провода, пожар в железе, разложение масла
Система охлаждения	Нарушение охлаждения трансформатора	Повреждение маслонасосов	Нарушение охлаждения трансформатора и загрязнение механическими примесями
		Засорение труб охладителей	Перегрев трансформатора
Переключатели ответвлений РПН	Нарушение контактов в РПН	Искрение, перегрев, оплавление и выгорание контактов. Подгар токоограничивающих сопротивлений	Неработоспособность РПН
	Нарушение перегородки, изолирующей бак расширителя МЧН от бака трансформатора	Дефект изготовления	Загрязнение масла трансформатора, снижение его электрической прочности, усложнение диагностики трансформатора
	Механическая неисправность ГОН	Износ элементов кинематической схемы	Обгорание контактов переключателей
	Нарушение герметичности бака контактора	Увлажнение бакепитового цилиндра контактора	Внутреннее дуговое КЗ по увлажненным расщеплениям бакелитовой изоляции бака РПН

Третья группа – физико-химические анализы масла из бака, маслонеполненных вводов, устройств РПН, в том числе большая группа традиционных, широко применяемых в эксплуатации измерений пробного напряжения, кислотного числа и т.д. Кроме того, проводится *хроматографический анализ* характерных газов. Инфракрасная спектроскопия позволяет определять содержание антиокислительной присадки, выявлять различные шламы и осадки, растворенные в масле трансформатора.

Четвертая группа объединяет измерения систем непрерывного контроля (мониторинга) изоляции вводов и ежедневные измерения основных показателей работы трансформатора, которые осуществляются эксплуатационным персоналом.

Пятая группа – анализы, проводимые для трансформаторов с запланированным капитальным ремонтом по результатам первых четырех групп измерений. К этой группе относятся: определение степени полимеризации бумажной изоляции, прямые измерения ее влагосодержания, прочности и др.

Один из наиболее объективных показателей, позволяющих оценить информативность используемого метода, – диагностическая ценность. При наличии

статистических данных этот показатель представляет собой численную оценку информации о состоянии оборудования, которой обладает интервал значений измеряемого параметра. В табл. 2 приведена оценка вида диагностической ценности методов контроля процессов, приводящих к повреждениям трансформатора [1].

Необходимо подчеркнуть, что признаки со случайной диагностической ценностью, определяемой отсутствием монотонности изменения значений при развитии контролируемого процесса, не могут быть использованы для принятия решений о состоянии оборудования, а лишь в некоторых случаях могут свидетельствовать о необходимости более полного обследования.

Как следует из проведенного анализа, ни один из известных методов не может дать исчерпывающей картины состояния трансформаторов. Целесообразно применение комбинированных методов контроля без снятия напряжения (в режиме on-line). Для этого должны применяться как стационарные, так и переносные системы диагностирования, с целью наиболее полной оценки состояния, локализации неисправностей и выявления причин их возникновения.

Таблица 2

Диагностическая ценность методов контроля

Метод контроля	Анализируемый процесс	Вид диагностической ценности
Хроматографический анализ газов, растворенных в масле	Перегрев токоведущих соединений и элементов конструкции внутренней изоляции, электрический разряд в масле	Сопутствующий показатель физико-химического разрушения изоляции. Монотонность изменения во времени при развитии процесса. Детерминированная диагностическая ценность
Измерение степени полимеризации бумажной изоляции	Износ бумажной изоляции	Функция физико-химического разрушения изоляции. Монотонность изменения во времени при развитии процесса. Детерминированная диагностическая ценность
Измерение содержания фурановых соединений в масле	Старение бумажной изоляции	Сопутствующий показатель физико-химического разрушения изоляции. Отсутствие монотонности и значимых различий изменения содержания от срока эксплуатации и степени износа изоляции. Случайная диагностическая ценность
Измерение мутности масла	Коллоидно-дисперсные процессы в высоковольтных герметичных вводах	Функция физико-химического состояния. Монотонность изменения во времени при развитии процесса. Детерминированная диагностическая ценность
Измерение поверхностного натяжения	Старение масла	Функция полярности жидкости. Монотонность изменения во времени при развитии процесса. Детерминированная диагностическая ценность
ИК-спектрометрия	Старение масла	Сопутствующий показатель наличия продуктов старения масла. Монотонность изменения во времени при развитии процесса. Детерминированная диагностическая ценность
Тепловизионный контроль	Локальные зоны перегрева	Сопутствующий показатель теплового состояния трансформатора и токоведущих частей. Монотонность изменения во времени. Детерминированная диагностическая ценность
Измерение частичных разрядов	Ионизационные процессы в изоляции	Сопутствующий показатель физико-химического разрушения изоляции. Отсутствие монотонности изменения во времени при развитии процесса. Случайная диагностическая ценность
Измерение сопротивления короткого замыкания	Деформация обмоток	Сопутствующий показатель изменения геометрии обмоток. Монотонность изменения во времени. Детерминированная диагностическая ценность
Метод низковольтных импульсов	Деформация обмоток	Сопутствующий показатель изменения геометрии обмоток. Монотонность изменения во времени при развитии процесса. Детерминированная диагностическая ценность
Определение усилий прессовки обмоток трансформатора по частоте собственных колебаний системы прессовки при внешнем импульсном механическом воздействии	Распрессовка обмоток	Сопутствующий показатель степени прессовки обмоток. Монотонность изменения во времени при развитии процесса. Детерминированная диагностическая ценность

Список литературы

1. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в эксплуатации / Б.В. Ванин, Ю. Н. Львов, М. Ю. Львов и др. // Электр. станции. 2001. № 9. С. 53–58.
2. Диагностирование технического состояния силовых трансформаторов энергоблоков центральной электростанции ОАО «ММК» / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, С.Е. Мостовой и др. // Сб. докл. I междунар. науч.-практ. конф. «ИНТЕХМЕТ-2008». Санкт-Петербург, 2008. С. 113–117.
3. International Standard «High-voltage test techniques – Partial discharge measurements» – IEC 60270, Third edition, 2000-12.
4. Применение технологии ЧР в диагностике изоляции / Claude Kane, Alexander Golubev. <http://www.partial-discharge.com>
5. Повреждаемость, оценка состояния и ремонт силовых трансформаторов / А.П. Долин, В.К. Крайнов, В. В. Сmealov и др. // Энергетик. 2001, № 7. С. 30–34.

Bibliography

1. About faults of mains transformers voltage 110-500 kV in maintenance / B.V. Vanin, J.N.Lvov, M.J.Lvov, etc. // Elektr. Servers. 2001. № 9. with. 53–58.
2. Diagnosing of availability index of product of mains transformers of generating sets of the central power station of open joint-stock company «ММК» / A.S.Karandaev, S.A.Evdokimov, S.E. Mostovoy, etc. // a Sat. report I international. Scientifically-prakt. conference. «ИНТЕХМЕТ-2008». St. Petersburg, 2008. With. 113–117.
3. International Standard «High-voltage test techniques Partial discharge measurements» - IEC 60270, Third edition, 2000-12.
4. Application of production engineering ЧР in isolation diagnostic / Claude Kane, Alexander Golubev. <http://www.partial-discharge.com>
5. Damageability, a state estimation and reconditioning of mains transformers / A.P. Dolin, V.K.Krajnov, V.V. Smekalov, etc. // Power engineering. 2001, № 7. with. 30–34.

УДК 314.212:620.111.3

Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Девятов Д.Х., Парсункин Б.Н., Сарлыбаев А.А.

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Выполнены эксперименты по измерению разрядной активности силовых трансформаторов центральной электростанции ОАО «ММК». Представлены графики распределения количества частичных разрядов в зависимости от величины их зарядов. Выполнена оценка технического состояния трансформаторов.

Ключевые слова: электростанция, трансформаторы, частичные разряды, замеры, разрядная активность, техническое состояние, критерии, оценка.

Experiments on gauging of discharge activity of mains transformers of the central power station of open joint-stock company «ММК» Are fulfilled. Graphics of allocation of quantity of partial bits depending on magnitude of their charges are presented. The estimation of availability index of product of transformers is fulfilled.

Key words: power station, transformers, partial bits, indications, discharge activity, availability index of product, criteria, an estimation.

Задачами исследований, результаты которых приводятся ниже, являются акустическая локация и обработка информации о частичных разрядах (ЧР) в объемных зонах (баках) трансформаторов энергоблоков центральной электростанции (ЦЭС) ОАО «ММК». Экспериментальные исследования выполнялись на шести трансформаторах, перечень которых представлен в табл. 1.

Измерение разрядной активности

Замеры проводились с помощью переносного прибора анализа частичных разрядов и локации зон дефектов в изоляции высоковольтного оборудования AR-700. С этой целью на внешних сторонах бака устанавливались акустические датчики. Выбор места их расположения осуществлялся согласно методике, рекомендованной фирмой-разработчиком прибора – ПФВ «Вибро-Центр» [1].

1. Датчики устанавливались на южной либо северной сторонах бака на расстоянии 50 см друг от друга.

2. Порог сигнала для всех трансформаторов задавался на уровне 50% максимального значения. При обработке результатов принимались во внимание сигналы, превышающие этот порог.

3. Настройки шума варьировались в зависимости от конкретного трансформатора и находились в пределах 45–50 мВ.

4. Замеры производились в течение 60-ти с.

Пример расположения датчиков на баке трансформатора № 5 и подключение прибора AR-700 показаны на рис. 1. Датчики устанавливались как на стороне низкого, так и на стороне высокого напряжений. Рассматривались варианты установки вблизи высоковольтных вводов, однако это вызвало определенные технические трудности.

Таблица 1

Силовые трансформаторы ЦЭС

Расположение и назначение	Станционный номер	Тип и завод изготовитель	Заводской номер	Год выпуска / срок эксплуатации (лет)
П/ст-110кВ энергоблок	Тр-р №1	ТРДН - 40000 / 110-76У1, г.Тольятти	9835	1978 / 30
П/ст-110кВ система	Тр-р №2	ТРДЦН - 63000 / 110-76У1, г.Тольятти	13580	1983 / 25
П/ст-110кВ система	Тр-р №3	ТРДЦН - 63000 / 110-76У1, г.Тольятти	11964	1981 / 27
П/ст-110кВ энергоблок	Тр-р №4	ТДЦНГУ-80000, г.Москва	927673	1968 / 40
П/ст-110кВ система	Тр-р №5	ТРДН - 63000 / 110- У1, г.Москва	1482839	2000 / 8
П/ст-110кВ система	Тр-р №6	ТРДН - 63000 / 110- У1, г.Москва	1573104	1998 / 10