

УДК 621.314

АНАЛИЗ ТИПОВЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И СПОСОБЫ ИХ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ

Латыпов И.И., студент гр. ЭП-1-22, IV курс

Научный руководитель: Мифтахова Н.К., старший преподаватель

Казанский государственный энергетический университет

г. Казань

latypov_iln@mail.ru

Силовые трансформаторы являются основой любой системы электроснабжения, обеспечивая передачу и распределение электроэнергии. От их надежной работы зависит бесперебойность функционирования промышленных предприятий, городских сетей и инфраструктурных объектов. Несмотря на высокую надежность современного трансформаторостроения, статистика показывает, что значительная часть отказов происходит из-за развивающихся дефектов, которые не были своевременно обнаружены [1].

Актуальность темы обусловлена высокой стоимостью как самого оборудования, так и аварийного простоя. Восстановление вышедшего из строя трансформатора требует значительных финансовых и временных затрат. Целью данной работы является систематизация типовых повреждений силовых трансформаторов и анализ эффективных методов их предотвращения на основе современных средств диагностики и защиты.

1. Классификация и анализ типовых повреждений

Анализ эксплуатационных данных позволяет выделить несколько наиболее характерных групп повреждений силовых трансформаторов, различающихся по локализации и физической природе.

Витковые замыкания в обмотках. Это один из самых распространенных и опасных видов повреждений. Первоначально возникает замыкание между витками одной фазы (витковое замыкание). Ток в замкнутом контуре, ограниченный лишь сопротивлением короткозамкнутых витков, достигает огромных значений, вызывая локальный перегрев обмотки.

Причинами являются внутренние перенапряжения, старение и увлажнение изоляции, а также динамические усилия при сквозных коротких замыканиях, которые деформируют обмотку [2].

Повреждения вводов. Вводы являются «слабым звеном» трансформатора, так как работают под воздействием высокого напряжения и перепадов температур. Нарушение герметичности ввода приводит к увлажнению масла или выходу газа (для герметичных вводов), что резко снижает электрическую прочность изоляции и заканчивается пробоем.

Разрушение ввода часто носит взрывоподобный характер с выбросом масла и пожаром.

Дефекты магнитопровода. Повреждения магнитопровода возникают реже, но также приводят к тяжелым последствиям. Основная причина – нарушение изоляции между листами электротехнической стали, что ведет к возникновению токов Фуко, локальному перегреву («пожару стали») и повреждению изоляции соседних обмоток.

Старение и увлажнение изоляции. Это естественный процесс, протекающий в течение всего срока службы трансформатора. Термическое старение делает бумажную изоляцию хрупкой и теряющей механическую прочность. Увлажнение происходит как из-за нарушения герметичности, так и вследствие «дыхания» трансформатора. Влага резко снижает пробивное напряжение и ускоряет старение.

2. Физико-химические процессы при развитии дефектов

Любой внутренний дефект в трансформаторе вызывает характерные изменения в состоянии изоляционных материалов, прежде всего трансформаторного масла. Эти изменения лежат в основе методов ранней диагностики.

В зависимости от вида дефекта в масле возникают различные процессы:

□ перегревы (низкотемпературные и среднетемпературные): разложение масла и твердой изоляции с выделением характерных газов (метан, этан, этилен). При перегреве конструкционной стали выделяется значительное количество водорода;

□ частичные разряды: ионизационные процессы в газовых включениях изоляции сопровождаются выделением водорода и небольших количеств ацетилена;

□ мощный дуговой разряд: мгновенное разложение масла с образованием больших количеств ацетилена и водорода, сопровождающееся резким повышением давления [3].

3. Традиционные методы защиты и их недостатки

Штатная защита силовых трансформаторов (газовая защита, дифференциальная, токовая отсечка) предназначена для отключения уже возникшего повреждения. Газовая защита реагирует на бурное газовыделение при серьезных внутренних повреждениях, но часто не чувствительна к медленно развивающимся дефектам на ранней стадии. Дифференциальная защита надежно работает при междуфазных КЗ и замыканиях на землю, но может не реагировать на начальные витковые замыкания в одной фазе, где изменение токов незначительно. Таким образом, традиционные защиты не предотвращают повреждение, а лишь минимизируют его последствия [4].

4. Современные методы диагностики и предотвращения аварий

Для перехода от стратегии ликвидации аварий к стратегии их предупреждения необходимо внедрение систем раннего обнаружения дефектов.

Хроматографический анализ растворенных газов (ХАРГ). Это наиболее информативный метод оценки состояния трансформатора без вывода его из эксплуатации. Регулярный отбор проб масла и анализ состава газов позволяет идентифицировать вид развивающегося дефекта (перегрев, разряды) на самой ранней стадии и оценить степень его опасности [5].

Тепловизионный контроль. Позволяет дистанционно выявлять локальные перегревы в узлах трансформатора: контактные соединения вводов, токоведущие части, местные дефекты магнитопровода, проблемы в системе охлаждения. Регулярные тепловизионные обследования под нагрузкой дают наглядную картину температурного поля.

Мониторинг увлажнения изоляции. Датчики влажности, встраиваемые в бак трансформатора, позволяют в режиме реального времени контролировать содержание влаги в масле и косвенно оценивать увлажнение твердой изоляции.

5. Комплексный подход к обеспечению надежности

Эффективное предотвращение повреждений возможно только при комплексном подходе, сочетающем различные методы.

На смену системе планово-предупредительных ремонтов (ППР), где ремонт производится через строго определенные интервалы времени, приходит система обслуживания по фактическому состоянию. Решение о выводе трансформатора в ремонт принимается на основе анализа всей совокупности диагностических данных (тренды ХАРГ, данные тепловизионного контроля, вибрации и т.д.).

Ключевым элементом современной эксплуатации является внедрение стационарных систем непрерывного мониторинга. Такие системы в реальном времени отслеживают параметры трансформатора и сигнализируют о приближении параметров к критическим значениям задолго до того, как защита отключит трансформатор.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Основными видами повреждений силовых трансформаторов являются витковые замыкания, отказы вводов и РПН, а также деградация изоляции, вызванная старением и перегрузками.

2. Традиционные системы релейной защиты эффективно отключают аварии, но не способны их предотвратить, что влечет за собой дорогостоящий ремонт и простой.

3. Наиболее перспективным направлением повышения надежности является внедрение систем ранней диагностики, прежде всего хроматографического анализа газов и тепловизионного контроля.

4. Переход к обслуживанию электрооборудования по фактическому состоянию на основе данных непрерывного мониторинга позволяет не только предотвратить аварийные отказы, но и продлить срок службы трансформаторов, оптимизировать затраты на ремонты и обеспечить бесперебойность технологических процессов.

Внедрение современных диагностических комплексов на подстанциях и промышленных объектах является экономически оправданным мероприятием,

позволяющим перейти на качественно новый уровень эксплуатации силовых трансформаторов.

Список использованных источников

1. Иванов, С. Н. Повышение энергоэффективности и надежности силовых трансформаторов / С. Н. Иванов, Д. К. Шестоपालко // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи : материалы IV российской молодежной научной школы-конференции: в 2 томах, Томск, 01–03 ноября 2016 года / Томский политехнический университет. Том 1. – Томск: ООО «ЦПУ», 2016. – С. 153-157. – EDN UXYZER.
2. Вильданов, Р. Г. Анализ отказов крупных силовых трансформаторов в системе электроснабжения и методы их диагностики / Р. Г. Вильданов, Д. Н. Кутырев, А. Р. Вахитова // Успехи современной науки. – 2017. – Т. 5, № 4. – С. 62-65. – EDN YROQNF.
3. Львов, М. Ю. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше / М. Ю. Львов // Электричество. – 2010. – № 2. – С. 27а-31. – EDN KYKDGL.
4. Табаков, О. В. Актуальность применения цифровых защит на трансформаторных подстанциях / О. В. Табаков, Т. В. Харитоновна // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 11. – С. 379-382. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-11-379-380. – EDN QEMPQS.
5. Вазетдинов, Б. И. Контроль и диагностика частичных разрядов трансформаторов / Б. И. Вазетдинов, Н. К. Мифтахова // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике, Казань, 26–28 ноября 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. – С. 413-415. – EDN SKRVKV.