

О нормировании концентрации растворенных газов и мутности масла для выявления дефектов высоковольтных вводов

Ванин Б. В., канд. техн. наук, Львов М. Ю., инж., Львов Ю. Н., доктор техн. наук, Кассихин С. Д., Кокуркин Б. П., Радковский С. Г., инженеры, Славинский А. З., доктор техн. наук

АО ВНИИЭ – Московский завод “Изолятор” им. А. Баркова

Как отечественный, так и зарубежный опыт эксплуатации трансформаторов указывает на относительно высокую их повреждаемость вследствие повреждений герметичных высоковольтных вводов [1 – 3]. При этом аварийные нарушения имеют место, как отмечалось в [4], в области нормируемых значений показателей, характеризующих состояние изоляции вводов в соответствии с [5]. В связи с этим стратегия эксплуатации такого оборудования связана с необходимостью учета фактора риска его повреждения в указанной области [6].

Стремление снизить фактор риска повреждения оборудования побуждает вести поиск дополнительных показателей помимо нормируемых в [5], характеризующих состояние изоляции герметичных высоковольтных вводов. К таким показателям следует отнести хроматографический анализ растворенных в масле газов [7] и оптическую мутность масла [8]. Их появление имело целью в первую очередь уточнить состояние масляного канала герметичных высоковольтных вводов между внутренней изоляцией и фарфоровой крышкой, так как развитие процессов в масляном канале вводов в настоящее время остается одной из главных причин повреждений трансформаторов 110 кВ и выше.

В решении электротехнической секции НТС РАО “ЕЭС России” “Опыт эксплуатации, ремонт, диагностика и пути повышения надежности высоковольтных вводов” от 25.02.98 отмечалось, что традиционно сложившаяся система профилакти-

ческого контроля состояния высоковольтных вводов, закрепленная в действующих директивных документах, как правило, не позволяет решать задачи раннего обнаружения дефектов в масляном канале. Рекомендованная в противоаварийном циркуляре [7] методика интерпретации результатов хроматографического анализа для выявления развивающегося повреждения в масляном канале вводов оказалась недостаточно эффективной, как показал опыт ее применения. Не воспроизводят условий развития дефекта в масляном канале кратковременные воздействия испытательных напряжений.

В свою очередь исследованиями ВНИИЭ [3, 4, 8, 9] показана взаимосвязь ухудшения состояния изоляции масляного канала с образованием в масле металлосодержащих коллоидных частиц, причем этот фактор не учитывается существующей системой профилактического контроля. Для оценки уровня содержания коллоидных частиц и их размеров в масле вводов АО ВНИИЭ в соответствии с программой обследования технического состояния трансформаторного оборудования, утвержденной приказом РАО “ЕЭС России” № 304 от 07.07.95, контролирует мутность трансформаторного масла.

Целью статьи является обоснование нормативов показателей содержания растворенных в масле газов, а также значения мутности трансформаторного масла высоковольтных герметичных вводов.

Численные значения данных показателей основываются на анализе:

физико-химических процессов, происходящих в изоляции;

опыта эксплуатации и результатов вскрытий вводов;

диагностической ценности признаков и фактора риска повреждения оборудования, основанного на экономическом эквиваленте возможного ущерба с учетом вероятностных характеристик его возникновения.

В табл. 1 приведены основные дефекты герметичных высоковольтных вводов трансформаторов, последствия при развитии этих дефектов и хроматографические признаки их проявления. Как следует из табл. 1, хроматографические признаки отсутствуют при наличии во вводах таких дефектов,

как коллоидное старение масла и отложение осадка (продуктов окисления масла или вымывания из конструктивных материалов) на внутренней поверхности фарфора и на внутренней изоляции. Между тем, именно эти дефекты ведут к развитию таких процессов в масляном канале, которые в настоящее время являются одной из главных причин повреждений высоковольтных герметичных вводов трансформаторов 110 кВ и выше [3, 4, 6]. Данные табл. 1 согласуются с результатами обследований и разборки вводов на заводе Мосизолятор, а также данными эксплуатации.

Метод хроматографического анализа растворенных в масле газов как контрольный для вводов был предложен в 1986 г. и предназначался главным образом для выявления повреждения в масляном канале вводов, залитых маслом марки Т-750.

Т а б л и ц а 1

| Дефект | Характер и последствия развития дефекта | Основные хроматографические признаки дефекта |
|--|--|--|
| Механические примеси | Механические примеси изначально в процессе эксплуатации появляются в результате нарушения технологии отмывки деталей, трения внутренних деталей ввода, вымывания ворсинок целлюлозы, разрушения лакокрасочных покрытий, образования углеродсодержащих частиц вследствие разрядов, вымывания технического углерода из полупроводящей бумаги. Ведет к образованию зон повышенной концентрации механических примесей, появлению незавершенных искровых разрядов, снижению электрической прочности масляного канала и его пробоя | Образование углеродсодержащих частиц вследствие разрядов – ацетилен. Появление незавершенных искровых разрядов – водород. Возможно отложение загрязнений по поверхностям и прорастания по ним разряда – водород и ацетилен |
| Острые края деталей в масле | Проявляется в виде незавершенного искрового разряда в масле. Ведет также к кумулятивному накоплению продуктов деструкции масла и снижению электрической прочности масла. Возможно отложение продуктов деструкции масла по поверхностям и прорастания по ним разрядов | Появление незавершенных искровых разрядов – водород. Накопление продуктов деструкции масла – накопление водорода. Отложение продуктов деструкции масла по поверхностям и прорастание по ним разряда – водород и ацетилен |
| Нарушение контактных соединений | Проявляется в виде искрового разряда в масле. Ведет к кумулятивному накоплению продуктов деструкции масла по поверхностям и прорастанию по ним разряда. При нарушении контактного соединения между центральной трубой и нулевой обкладкой, между секциями внутренней изоляции, между последней обкладкой и соединительной втулкой или измерительным выводом приводит к недопустимому перераспределению напряжения с возможным пробоем внутренней изоляции | Появление искрового разряда в масле – водород и ацетилен. Отложение продуктов деструкции масла по поверхностям и прорастание по ним разряда – водород и ацетилен. Накопление продуктов деструкции масла – водород и ацетилен |
| Отложение осадка (продуктов окисления масла или вымывания из конструктивных материалов) на внутренней поверхности фарфора и на внутренней изоляции | Ведет к отложению осадка на внутренней поверхности фарфора и на внутренней изоляции, способного адсорбировать влагу и загрязнение, в том числе металлосодержащие. Это способствует возникновению и развитию разряда | Хроматографических признаков нет |
| Коллоидное старение масла | В результате окислительных процессов и взаимодействия масла с конструкционными материалами, в первую очередь с медесодержащими и железосодержащими, происходит образование и рост размеров коллоидных частиц. Ведет к снижению электрической прочности масляного канала и насыщению отложений, особенно на внутренней поверхности нижней фарфоровой крышки. Это способствует развитию пробоя масляного канала | То же |
| Ослабление контактных соединений верхней контактной шпильки | Ведет к проникновению влаги в трансформатор, повышенному нагреву контактного соединения вплоть до выплавления отвода обмотки трансформатора и возникновению силовой дуги. Ведет к термической деструкции масла | Термическая деструкция масла (осмоление) – метан, этан |
| Локальные дефекты внутренней изоляции | Смещение конденсаторных обкладок, “жмотины” бумаги, наличие посторонних включений, надрывы слоев конденсаторной бумаги ведут к микроразрядам во внутренней изоляции с возможностью развития ионизационного пробоя | Микроразряды в остовах – ацетилен и водород |

С 1988 г. интерпретация результатов хроматографического анализа газов и отбраковка вводов регламентируются в соответствии с противоаварийным циркуляром [7].

Однако попытка снизить повреждаемость вводов, используя анализ растворенных в масле газов, не привела к существенному снижению их отказов, но резко увеличила трудоемкость обслуживания и вызвала риск дополнительного снижения надежности вследствие частых отборов масла и соответственно подкачки масла [10]. В частности, в [11] отмечается, что по данным СКБ завода Мосизолятор повреждения вводов 500 кВ в Чехословакии не были обнаружены по проведенному хроматографическому анализу, аналогичные данные приведены в Пермэнерго. По тем же данным повреждения двух вводов 110 кВ произошли при нормальных показателях по измерениям изоляции и хроматографическому анализу в Челябинэнерго.

На основе опыта комплексной диагностики вводов в Свердловэнерго делается заключение, что данные хроматографического анализа свидетельствуют о естественном старении изоляции вводов, а не о наличии опасных быстроразвивающихся дефектов [12]. При этом в результате статистической обработки данных о концентрации растворенных в масле газов для исправных герметичных вводов 110, 220 и 500 кВ отмечается, что зависимость суммы углеводородных газов (ΣC_xH_x) от времени эксплуатации подчиняется распределению Вейбулла и делается вывод, что соответствующие рекомендации [7] являются чрезмерно жесткими.

В информационном письме № 1/95 от 01.06.95 завода Мосизолятор о практике применения методических указаний "Диагностика состояния изоляции высоковольтных вводов 110 – 750 кВ" указано, что анализ информации энергосистем и проводимые на заводе исследования показали, что применительно к маслу ГК, заливаемому во вводы с января 1985 г., водород нельзя рассматривать как индикаторный газ, появление которого указывает на неудовлетворительное состояние ввода. Разборка высоковольтных вводов с высоким содержанием водорода вплоть до появления последнего в виде свободного газа не выявила никаких признаков повреждения изоляции. Следует отметить, что

приведенные в табл. 1 дефекты с хроматографическими признаками при их развитии в достаточно опасной стадии имеют обязательно водород и ацетилен одновременно. При этом наличие ацетилена в масле ввода выше пороговой чувствительности анализа данного газа является достаточно надежным признаком недопустимости дальнейшей эксплуатации ввода.

Вскрытие и разборка герметичных вводов со сроком эксплуатации порядка 20 лет, имеющих высокое значение CO_2 (объемная доля более 2%), не обнаружили наличия дефектов. При этом измеряемые значения степени полимеризации бумажно-масляной изоляции свидетельствуют о ее достаточно высоком остаточном ресурсе.

За период 1996 – 1998 гг. АО ВНИИЭ были обследованы 614 герметичных вводов, установленных на трансформаторах напряжением 110 – 750 кВ. По результатам хроматографического анализа газов с учетом соответствующих граничных концентраций циркуляра [7], а также диэлектрических параметров изоляции вводов, результатов физико-химического анализа масла (содержание ионола, фурановых соединений, влажности масла и оптической мутности масла) оценивалось отсутствие или наличие дефектов во вводах.

Далее по группам вводов класса напряжения 110 – 220 кВ и 330 – 750 кВ строились кривые распределения для вводов, залитых маслом марки Т-750 и ГК (отдельно для каждой марки масла). В группу напряжением 110 – 220 кВ вошли 132 ввода с маслом Т-750 и 113 вводов с маслом ГК. В группу напряжением 330 – 750 кВ вошли 182 ввода с маслом Т-750 и 158 вводов с маслом ГК. По соответствующим кривым распределения определялись граничные значения суммы концентрации углеводородных газов для бездефектных вводов при условии, что 90 или 95% обследованных вводов имеют значения ΣC_xH_x ниже граничных. Полученные значения граничных концентраций ΣC_xH_x сравнивались с рекомендованными в [7]. Результаты приведены в табл. 2.

Поиск характеристик контроля состояния изоляции для обнаружения дефектов на ранней стадии развития требует вести разработку методов и средств, основанных на глубоком изучении физи-

Таблица 2

| Масло | Класс напряжения, кВ | Число вводов | Граничная концентрация, объемная доля, % | | |
|-------|----------------------|--------------|--|-------|-------------------------|
| | | | расчетная | | по циркуляру Ц-06-88(э) |
| | | | 90% | 95% | |
| Т-750 | 110 – 220 | 132 | 0,015 | 0,021 | 0,01 |
| | 330 – 750 | 182 | 0,013 | 0,015 | 0,005 |
| ГК | 110 – 220 | 113 | 0,012 | 0,015 | 0,01 |
| | 330 – 750 | 158 | 0,011 | 0,014 | 0,005 |

ко-химических процессов, происходящих в изоляции вводов под действием эксплуатационных факторов. При этом предпосылкой того, что развитие того или иного процесса во вводе приведет к опасному развитию дефекта, является не столько появление показателей предпробивного состояния, сколько обнаружение тенденций эволюции его развития. Главное, важно знать, что обнаруживаемые процессы в конце концов приведут к развитию опасного дефекта, и оценивать фактор риска повреждения трансформаторного оборудования.

Из рассмотренного ранее можно сделать следующие выводы:

с помощью анализа растворенных в масле газов в высоковольтных герметичных вводах можно обнаружить нарушение контактных соединений, проявление острых краев деталей, ослабление контактного соединения верхней контактной шпильки и локальные дефекты остова;

основными газами, свидетельствующими о наличии дефектов, являются ацетилен (C_2H_2) и сумма концентрации углеводородных газов: метан (CH_4), этан (C_2H_6), этилен (C_2H_4) и ацетилен (C_2H_2);

вводы подлежат отбраковке при достижении объемной доли ацетилена 0,0005% и более либо при достижении суммарной объемной доли углеводородных газов 0,03% и более для вводов 110 – 220 кВ и 0,015% и более для вводов 330 – 750 кВ;

в процессе эксплуатации рекомендуется следующая периодичность измерения растворенных в масле газов: 1 раз в 4 года для вводов 110 – 220 кВ; 1 раз в 2 года для вводов 330 – 750 кВ и через 2 года после начала эксплуатации для всех вновь вводимых в работу высоковольтных герметичных вводов;

измерения значений оптической мутности трансформаторного масла позволяют получать количественную информацию о развитии коллоидно-дисперсных процессов в масляном канале в процессе эксплуатации высоковольтных герметичных вводов [8]. Значение мутности трансформаторного масла более 40 м^{-1} указывает на ускоренное развитие процесса коллоидного старения масла, которое ведет к снижению электрической прочности масляного канала. При этом, для принятия решения о браковке ввода следует также оценить значение поверхностного натяжения масла, свидетельствующее о глубине старения масла и кинетике процесса. Указанные измерения целесообразно выполнять при проведении комплексной оценки состояния оборудования.

Выводы

1. С помощью анализа растворенных в масле газов в высоковольтных герметичных вводах

трансформаторов можно обнаружить нарушение контактных соединений, проявление острых краев деталей, ослабление контактных соединений верхней контактной шпильки и локальные дефекты остова. Вводы подлежат отбраковке при достижении объемной доли ацетилена 0,0005% и более либо при достижении суммарной объемной доли углеводородных газов для вводов 110 – 220 кВ – 0,03% и более, для вводов 330 – 750 кВ – 0,015% и более.

2. Процесс ухудшения состояния изоляции в масляном канале связан с развитием коллоидно-дисперсных процессов в трансформаторном масле, образованием металлосодержащих коллоидных частиц, в первую очередь, нафтенов меди и железа. Значение мутности масла герметичных вводов более 40 м^{-1} указывает на ускоренное развитие процесса коллоидного старения масла, которое ведет к снижению электрической прочности масляного канала.

Список литературы

1. Соколов В. В. Актуальные задачи развития методов и средств диагностики трансформаторного оборудования под напряжением. – Изв. Академии наук, Энергетика, 1997, № 1.
2. Опыт ремонта вводов 110 – 750 кВ / Рыженко В. И., Соколов В. В., Славинский А. З., Черноготский В. Н. – Электрические станции, 1998, № 9.
3. Мамиконянц Л. Г. О повреждаемости герметичных вводов трансформаторов. – Энергетик, 1996, № 12.
4. Мамиконянц Л. Г. О работах по повышению надежности высоковольтных вводов. – Энергетик, 1998, № 11.
5. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. М.: Энас, 1998.
6. Львов М. Ю. Фактор риска при эксплуатации высоковольтных вводов трансформаторов. – Электрические станции, 1999, № 2.
7. Противоаварийный циркуляр Ц-06-88(э) “О мерах по повышению надежности герметичных вводов 110 – 750 кВ”.
8. Львов М. Ю. Применение оптической мутности масла для оценки состояния высоковольтных герметичных вводов трансформаторов. – Электрические станции, 1999, № 6.
9. Изменение свойств трансформаторного масла Т-750 в высоковольтных герметичных вводах в процессе эксплуатации / Ванин Б. В., Львов Ю. Н., Писарева Н. А и др. – Электрические станции, 1995, № 3.
10. Работы завода Мосизолятор по повышению надежности работы высоковольтных вводов / Славинский А. З., Некрасов В. Г., Кокуркин Б. П. и др. – В сб.: Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Санкт-Петербург: ПЭИПК, 1997, вып. 5.
11. Поляков В. С. Опыт эксплуатации вводов 110 кВ и выше. Эффективная система диагностики маслonaполненных вводов. – В сб.: Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Санкт-Петербург: ПЭИПК, 1997, вып. 5.
12. Константинов А. Г., Осотов В. Н., Комаров В. И. О контроле состояния высоковольтных маслonaполненных вводов под рабочим напряжением. – Электрические станции, 1998, № 7.