

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ПЕРЕХОДА К РЕМОНТАМ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ ПО ЕГО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

*Потребич А.А., канд. техн. наук, Кузнецов В.П., Ткачев В.И., Фоменко П.И., Жданов В.С.
ДонОРГРЭС, Кубаньэнерго
slysik@chat.ru*

Considered problems of power networks electric equipment condition assessment for planning its repair when necessary.

В настоящее время из-за отсутствия средств у энергосистем выполнение ремонтов их основного электрооборудования в определенные сроки очень затруднено и поэтому назрела необходимость в разработке критериев и методологических принципов, нормативной документации и программного обеспечения для перехода к ремонтам основного оборудования электрических сетей по его техническому состоянию. Для остальных стран СНГ в виду их тяжелого материального положения рациональное решение данной проблемы еще более актуально. С учетом сказанного для нескольких энергосистем России была начата работа по разработке критериев и методологических принципов для перехода к ремонтам электрооборудования электрических сетей энергосистем по его техническому состоянию. При этом для распределительных электрических сетей 0.38-6-10 кВ [1,2], воздушных линий электропередач напряжением 35-750 кВ [3,4] такие критерии и нормативные документы были уже разработаны. В то же время для остального наиболее сложного коммутационного и маслонаполненного оборудования электрических сетей напряжением 35-750 кВ исчерпывающих и взаимосвязанных критериев пока не разработано, хотя и исследования в этом направлении сейчас ведутся достаточно интенсивно.

На первом этапе выполнения данной работы был выполнен подробный анализ решения данной проблемы в развитых странах, а затем в странах СНГ. В результате этого анализа были получены достаточно интересные результаты, которые должны быть учтены при разработке критериев и методологических принципов для перехода к ремонтам основного оборудования электрических сетей по необходимости. При этом особенно хотелось бы отметить эффективность применения различных методов хроматографического анализа газов, растворенных в масле, с учетом динамики их изменения и автоматического определения развивающихся дефектов в маслонаполненном электрооборудовании; контроля старения бумажной изоляции обмоток трансформатора по содержанию фурановых соединений в масле; индентификации и контроля частичных разрядов; тепловизионного контроля основного оборудования с автоматическим контролем его критических точек; акустической дефектоскопии; оценки износа изоляции и остаточного ресурса силового трансформатора при его перегрузке по максимальной температуре масла; оценки деформации обмоток трансформатора различными методами и т.д.

Существующие методы диагностики электрооборудования можно разделить на традиционные и нетрадиционные. В России уже вышли новые «Объемы и нормы испытаний электрооборудования», на Украине, разработанные с участием ДонОРГРЭС, они также уже утверждены. Все традиционные методы диагностики, а в России и некоторые нетрадиционные из них, вошли в эти новые нормы [5].

Рассмотрим возможность применения некоторых традиционных и нетрадиционных методов диагностики маслонаполненного оборудования электрических сетей, активно применяемых за рубежом. На наш взгляд, наиболее перспективным для индентификации начавшихся процессов и развивающихся дефектов среди них является хроматографический анализ газов, растворенных в масле, с анализом динамики их изменения и автоматическим определением развивающихся дефектов в маслонаполненном электрооборудовании в соответствии с [6]. При этом за рубежом предлагаются различные критерии для оценки вида и места повреждения [7, 8]. Достаточно наглядным среди них является графический метод индентификации дефектов с помощью стандартных для каждого вида дефекта номограмм [7], который вошел в новую редакцию соответствующей инструкции [6] и в какой-то мере реализован в различных экспертных системах [9, 10]. На наш взгляд актуальным является разработка и внедрение датчиков для непрерывного контроля водорода в масле [11], с последующим при его появлении выполнением хроматографического анализа газов растворенных в масле.

В развитие сказанного хотелось бы отметить, что измерение частичных разрядов (ЧР) позволяет получить одну из важнейших характеристик изоляционных систем трансформаторов. При этом эффект ЧР характеризуется тремя показателями: химическим, проявляющимся в появлении растворенных газов, электромагнитным [12] и акустическим [13]. Чувствительность метода растворенных газов, представленном нами ранее, зависит от времени ЧР, которое для контрольных измерений обычно велико, и чувствительность метода при этом высока. Однако при возникновении ЧР в первое время (часы) чувствительность мала, если ЧР не очень велики. Для случаев, когда чувствительность этого метода недостаточна, должны применяться другие

методы.

С помощью измерений в высокочастотном диапазоне определяются частичные разряды в зазорах и на поверхности изоляционных конструкций, коронный разряд с острых кромок и углов, искровой и дуговой разряды между элементами конструкции трансформатора и т.д. Так, только данным методом можно определить ЧР во внутренних замкнутых полостях трансформатора. При этом диагностика методом измерения и локации ЧР является эффективным средством выявления не только ЧР в изоляционной конструкции трансформатора, но и любых других его процессов, вызывающих искрение (образование короткозамкнутых контуров, нарушение в схеме заземления, плохие контакты и др.) [14]. В то же время идентификация ЧР в оборудовании сопровождается по меньшей мере двумя проблемами: отстройкой от внешних помех и распознаванием источников внутренних шумов. При этом наметился прогресс и в решении данной задачи.

Затруднения при измерениях ЧР, вызванные наличием значительных внутренних и внешних помех одного уровня с полезным сигналом, трудности с интерпретацией результатов измерений и определения места ЧР в значительной мере снижаются при использовании акустических методов контроля ЧР [12, 13]. Дефектами, выявляемыми акустическими датчиками, обычно являются: обрыв шинки заземления активной части или электростатических экранов; нарушения крепления экранов ввода; нарушение изоляции прессующих обмотку винтов, замыкание активной части на бак; повреждения контактов РПН, а также нарушение соединений между частями избирателя и др. Поэтому на наш взгляд разработка и внедрение акустических датчиков является и сейчас задачей достаточно актуальной. В то же время следует подчеркнуть, что наибольшей проблемой применения методов ЧР является то, что после идентификации места и вида ЧР не обязательно именно в предполагаемом месте происходит частичный пробой изоляции.

В настоящее время достаточно эффективным, как и хроматографический анализ газов, растворенных в масле, является физико-химический анализ масла в маслonaполненном электрооборудовании с автоматической идентификацией возможных повреждений. На наш взгляд в виду большой стоимости мощных силовых трансформаторов данный анализ для них стоит выполнять чаще чем рекомендуется в "объемах и нормах испытаний электрооборудования", так как повреждения этих трансформаторов могут принести непоправимые убытки для областных энергокомпаний.

В настоящее время за рубежом в соответствии с МЭК 354 достаточно эффективно используется оценка износа изоляции и остаточного ресурса при перегрузке трансформаторов по температуре масла в наиболее нагретой точке [15, 16, 17]. Знание температуры этой точки очень существенно при определении допустимости режимов сверх номинальных. Исследования направлены на разработку методов прямого измерения температуры, чтобы лучше оценить старение изоляции при перегрузках [15]. У нас же применение этого метода в электрических сетях в настоящее время существенно ограничено, как правило, из-за отсутствия этого перегруза в виду снижения промышленного производства. Однако иногда все же возникают соответствующие режимы работы силовых трансформаторов на ТЭЦ, ТЭС и, следовательно, предпосылки для его использования. При этом следует также учитывать и тенденцию к росту производства в ближайшие годы и, как следствие, необходимость в использовании данного метода.

Наиболее опасные дефекты при деформации обмоток трансформаторов, возникающей из-за КЗ в сети, являются осевые смещения отдельных катушек и радиальные их деформации. При этом существенные изменения частотной характеристики связаны, как правило, с осевыми деформациями, а изменение сопротивления короткого замыкания (Z_k) существенно при радиальных смещениях обмотки. Метод частотных характеристик позволяет выявить изменение параметров обмотки более точно, чем метод импульсов [18] и пригоден для определения как емкости, так и индуктивности обмоток. В то же время следует подчеркнуть, что более 80% повреждений мощных трансформаторов при КЗ связано с потерей радиальной устойчивости обмоток. Наиболее распространенным способом определения изменения Z_k является метод короткого замыкания. Достаточно перспективно для этих целей определение электромагнитных характеристик трансформатора под нагрузкой по результатам измерений комплексных или мгновенных значений токов и напряжений обмоток [19]. Однако при его реализации возникают некоторые проблемы теоретического и практического характера, например, решение данной задачи при плохой обусловленности матрицы узловых проводимостей, повышение точности снятия показаний и т.д. При этом следует подчеркнуть, что измерение Z_k следует проводить после воздействия на трансформатор тока КЗ, превышающего 70 % его расчетного значения [5], а токи КЗ такой величины происходят в электрических сетях областных энергокомпаний достаточно редко. Это несколько ограничивает возможность применения данных методов.

В настоящее время старение твердой изоляции контролируется в основном :

- определением содержания фурановых соединений;
- определением соотношения содержания СО/СО₂;
- определением степени полимеризации целлюлозной изоляции.

С середины 80-х годов в мировую практику мониторинга маслonaполненного электротехнического обо-

рудования активно внедряется контроль содержания фурановых соединений. С ростом объемов анализа фурановых, количества организаций, которые ввели его в перечень методов планового контроля, появились работы, направленные на совершенствование методов их определения. В зависимости от целей, которые ставили перед собой авторы новых подходов развитие идет или по пути упрощения, повышения скорости определения фурановых соединений, снижения стоимости специального оборудования для их получения, требований к квалификации персонала, или к повышению точности и снижению порога чувствительности методов. Среди основных методов определения фурановых соединений следует выделить методы газовой, тонкослойной [20] и жидкостной хроматографии [21]. При этом, на наш взгляд наиболее точным является метод жидкостной хроматографии, который стандартизован согласно МЭК 1198, а наиболее экономичный – тонкослойной. В то же время из-за наличия во многих областных энергокомпаниях газовых хроматографов заслуживает внимания и определение фурановых соединений методом газовой хроматографии. Однако следует подчеркнуть, что определение фурановых соединений следует применять для силовых трансформаторов прослуживших длительное время и имеющих максимальную загрузку не менее 80 % максимальной, что несколько уменьшает возможности применения данных методов. При этом, как показывает опыт, не стоит надеяться на их быструю эффективность. Так, при контроле фурановых соединений с помощью газового хроматографа в донбасской энергосистеме на протяжении восьми лет было обнаружено лишь два случая их нахождения (один из них при приемке трансформатора из ремонта). Достоверно установлено, что разрушение твердой изоляции сопровождается увеличением концентраций в масле СО и СО₂. Однако трудность в отбраковке трансформаторов по указанным газам заключается в том, что при сравнительно низкотемпературных перегревах твердой изоляции их образуется мало и кроме этого они образуются при общем окислении масла, и поглощение СО сорбентами искажает картину динамики изменения его концентрации в масле, что существенно затрудняет возможность применения данного метода.

Детальный анализ деградационной целлюлозной изоляции [22], с использованием степени полимеризации (СП) показал, что СП является отличным критерием для оценки фактического старения целлюлозных материалов и по ней можно определить участки с наибольшим износом. В то же время степень полимеризации не является методом "on-line" и, как следствие ее нельзя использовать для обнаружения развивающихся повреждений. На наш взгляд именно степень полимеризации изоляции с учетом анализа аварийности и особенности работы силового трансформатора, находящегося в эксплуатации длительное время, должна служить основным критерием для оценки его состояния. Решение данной проблемы особенно актуально в настоящее время при наличии большого количества трансформаторов, находящихся в эксплуатации длительное время, для общей оценки их состояния в энергосистеме.

В настоящее время, как уже говорилось ранее, некоторые методы диагностики из-за резкого снижения нагрузки электрических сетей могут быть востребованы не полностью. В то же время из-за существенного увеличения телеизмерений «просматривается» практически вся питающая сеть энергосистемы и, как следствие, по ее основному коммутационному и маслonaполненному оборудованию имеется достаточно подробная режимная информация (напряжение, ток, мощность и т.д.), которую можно использовать для контроля за техническим состоянием данного оборудования.

Для решения задач оценки технического состояния электрооборудования энергосистем была разработана интегрированная система, состоящая из ряда информационно-справочных (ИСС), информационно-технологических систем и экспертных подсистем (рис.1).

В первой ИСС данной интегрированной системы находится нормативно-справочная информация по испытаниям. Это объем и нормы испытаний, нормы времени на их проведение и т.д., а также информация по паспортам оборудования и его элементам, которая используется при анализе испытаний. Журнал дефектов применяется не только при анализе, но и при планировании графиков испытаний, расчете показателей надежности электрооборудования и т.д. Кроме этого аналогично ремонтным формулярам для теплового и электромеханического оборудования ТЭС, АЭС были разработаны ремонтные паспорта, в которых хранится вся информация по ремонтам и ТО электрооборудования подстанций, в том числе по всем его испытаниям во время ремонтов и ТО. По этой информации можно в какой-то мере оценить техническое состояние этого оборудования после ремонта.

Блок режимной информации позволяет ее накапливать и анализировать. При этом, так как практически вся сеть 220 кВ и выше и часть сети 110 кВ «просматривается» по телеизмерениям, то можно с большой точностью получать максимальные, минимальные, средние значения нагрузки, перетоков мощности, уровней напряжений в узлах электрической сети, количество переключений в ней и т.д., а при наличии соответствующих регистраторов информацию о произошедших коротких замыканиях. Эта информация будет затем использоваться для проведения некоторых видов испытаний, а с учетом журнала дефектов, соответствующих программ для расчета показателей надежности электрооборудования.

Основная информационно-технологическая система по испытаниям позволяет:

- накапливать информацию о заводских, пусконаладочных и межремонтных испытаниях, а также ее же при капитальных, средних и текущих ремонтах ;
- формировать сводные протоколы для всех видов испытаний;
- автоматически сравнивать результаты испытаний с нормами;
- анализировать динамику изменения результатов испытаний во времени по соответствующим нормированным графикам ;
- автоматически формировать графики испытаний, проверок и измерений.

Экспертная система частичной оценки технического состояния электрооборудования энергосистем позволяет реализовать следующие алгоритмы :

- хроматографического анализа газов, растворенных в масле, с анализом динамики их изменения и автоматического определения развивающихся дефектов маслonaполненного электрооборудования графическим методом с помощью стандартных для каждого вида дефекта номограмм [7] ;
- физико-химического анализа масла в маслonaполненном электрооборудовании с автоматической идентификацией возможных повреждений ;
- контроля старения бумажной изоляции обмоток трансформатора по содержанию фурановых соединений в масле, степени ее полимеризации;
- оценка состояния силовых трансформаторов, находящихся в эксплуатации длительное время.
- оценка износа изоляции и остаточного ресурса при перегрузке трансформаторов по максимальной температуре масла;
- оценка деформации обмоток трансформатора на основе опыта КЗ.
- динамического анализа термограмм тепловизионного контроля основного оборудования ;

На основе полученных рекомендаций планируется выполнение ремонтов и ТО электрооборудования, его испытания и т.д. При необходимости выполняются учащенные и более полные испытания электрооборудования. При этом, как показывает опыт, не следует рассчитывать на быстрый эффект от внедрения нетрадиционных и дорогих испытаний оборудования электрических сетей (от определения фурановых соединений, частичных разрядов и т.д.) при его безаварийной эксплуатации.

Для распределительных электрических сетей 0.4-6-10 кВ [2], воздушных линий электропередач напряжением 35-750 кВ [4] были разработаны соответствующие интегрированные системы в которых определяется их количественная и качественная оценка технического состояния, на основе которой и планируются ремонты и ТО электрооборудования. Многослойный специализированный редактор электрических схем, привязанный к базам данных по оборудованию и совместимый с существующими графическими системами (AutoCAD, VISIO и т.д.), позволяет ускорить доступ к информации по техническому состоянию конкретного электрооборудования ПЭС, энергосистемы.

Данная интегрированная система реализована на СУБД VISUAL, FOXPRO 6.0, Basic 6.0, DELPHI 5.0, а специализированный графический редактор и ряд экспертных систем на С 6.0 под WINDOWS.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические указания по комплексной качественной оценке технического состояния распределительных сетей напряжением 0.38-20 кВ с воздушными линиями электропередачи М.: СПО Союзтехэнерго, 1993, 87 с.
2. Потребич А.А., Алексанов А.А, Ткачев В.И., Шевцов В.И., Овчинникова Н.С, Мейерс С.И, Девятко О.Г. Интегрированная система для решения технологических и рас-четных задач в распределительных сетях РЭС. Электрические станции, 1998, № 4, с.37-42.
3. Методические указания по оценке технического состояния воздушных линий электропередачи напряжением 35-750 кВ и их элементов. М.: СПО Союзтехэнерго, 1996.36с.
4. Яковлев Л.В. Оценка технического состояния воздушных линий электропередачи напряжением 35-750 кВ.- Электрические станции, 1998, № 6, с. 25-33.
5. РД 34.45-51.300-97 Объем и нормы испытаний электрооборудования. Издание шестое. Москва ЭНАС 1998, 255 с .
6. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов. М.: СПО Союзтехэнерго, 1989, 28 с.
7. Тосиба Ф. Контроль и уход за маслonaполненным оборудованием на основе газового анализа.- Материалы объединенного научно-исследовательского общества, Токио, 1980, т. 36, № 1, с 103-109.
8. Анализ растворенных в масле газов и его использование при обслуживании трансформаторов / Кавамура, Кавакада, Андо и др. // Трансформаторы: Переводы докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-86) / Под ред. С.Д. Лизунова, М.: Энергоатомиздат, 1988, с. 112-127.

transformers and other apparatus // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979. Vol. PAS-98, N2. P. 449-457.

14. Гурин В.В., Соколов В.В., Кучера Б., Валента Л. Диагностика автотрансформатора в эксплуатации методом измерения и локации частичных разрядов // Электрические станции. 1993. N10. с. 60-62

15. Pratt F.C. Diagnostic methods for transformers in service. Доклад 12-06 на сессии СИГРЭ 1986г.

16. IEC - Loading guide for oil-immersed transformers. Publication N354-Draft revision-Document 14 (Secretariat) 155, 1985, June.

17. IEEE - Trial-use guide for loading mineral-oil-immersed power transformers rated in excess of 100 MV*A. (Standard N756, to be published shortly).

18. Dick E.P., Erven C.C. Transformer diagnostic testing by frequency response analysis // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978. Vol. PAS-97. P.2144-2153.

19. Бутырин П.А., Алпатов М.Е. Диагностика силовых трансформаторов под нагрузкой. // Изв.РАН Энергетика, 1996. N1, с.74-81.

20. РД 34.51.304-94 Методические указания по применению в энергосистемах тонкослойной хроматографии для оценки остаточного ресурса твердой изоляции по наличию фурановых соединений в трансформаторном масле. Москва ЭНАС 1995, 19 с.

21. РД 34.43.206-94 Методика количественного химического анализа. Определение содержания производных фурана в электроизоляционных маслах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. М., ОРГРЭС, 1995, 25 с.

22. Doble Engineering Co (USA), Test results from laboratory and in-service aging of cellulosic insulation. - В сб. докладов симпозиума "Диагностика и обслуживание трансформаторного оборудования после длительной эксплуатации". Запорожье, 1994, ч.2, с. 143-171.