

А.А. ЗАГАЙНОВА, ассистент, НТУ «ХПИ»

МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

У статті проведено аналіз методів і засобів контролю електричних параметрів внутрішньої ізоляції високовольтних введень та вимірювальних трансформаторів під робочою напругою. Розглянуті схеми вимірювань під робочою напругою, їх принципиальні можливості та недоліки.

В статье проведен анализ методов и средств контроля электрических параметров внутренней изоляции высоковольтных вводов и измерительных трансформаторов под рабочим напряжением. Рассмотрены схемы измерений под рабочим напряжением, их принципиальные возможности и недостатки.

The article analyzes the methods and means of monitoring the electrical parameters of the internal insulation of high-voltage bushings and measuring transformers under operating voltage. A scheme for measuring the working voltage of the fundamental capabilities and limitations.

Постановка проблемы. В настоящее время энергосистемы Украины внедряют различные системы непрерывного контроля внутренней изоляции высоковольтных вводов и измерительных трансформаторов. Резко активизировалась деятельность большого числа организаций и специалистов в этом направлении. Однако большинство предлагаемых схем не позволяет измерить реальные электрические характеристики вводов или трансформаторов тока. И уже есть случаи, когда отбраковывалось исправное оборудование из-за погрешностей схемы измерений, а после замены его происходило повреждение вновь установленного оборудования.

Поэтому сейчас достаточно актуально сравнить методы и схемы измерений непрерывного контроля внутренней изоляции высоковольтных вводов и измерительных трансформаторов и рассмотреть их диагностические возможности, достоинства, их недостатки, соответствие нормативным документам. Такое сравнение позволит эксплуатационному персоналу энергосистем ориентироваться при выборе схем измерений под рабочим напряжением при их внедрении или оценить уже внедрённые схемы.

Самым главным при оценке методов и схем измерений внутренней изоляции высоковольтных вводов и измерительных трансформаторов должны быть их возможности выявления дефектов, которые характерны для изоляции конденсаторного типа маслонаполненного высоковольтного оборудования и развитие которых действительно приводит к повреждению оборудования.

Анализ последних исследований и публикаций. Высоковольтные вводы и трансформаторы тока (ТТ) – наиболее часто повреждаемые элементы в энергосистемах. Подвергаемые значительным температурным и электрическим нагрузкам, вводы и ТТ являются одними из основных элементов в отказах электротехнического оборудования [1].

Для создания эффективной системы диагностики необходимо точно знать действительную причину повреждений оборудования, то есть определить тот дефект, который привел к повреждению. Как правило, это достаточно сложная задача, однако без её решения невозможно исключить повторение повреждений. Легко убедиться в том, что все повреждения происходят по одной единственной причине – из-за нерасчетных эксплуатационных воздействий на оборудование.

Появление типичных дефектов, возникающих в маслонаполненных вводах 110-500 кВ, и их последующее развитие обусловлено следующими факторами: нарушениями технологической дисциплины в процессе изготовления; нарушениями требований нормативно-технической документации по хранению, монтажу и эксплуатации вводов или оборудования, на котором они установлены; снижением диэлектрических свойств изоляции в результате ускоренного старения, вызванного взаимодействием конструкционных материалов или ионизационными процессами.

В герметичных маслонаполненных вводах наиболее часто встречаются следующие виды дефектов: перегрев внутренних контактов; пробой остова; наличие частичных разрядов в изоляционном остова; увлажнение и старение внутренней изоляции ввода; течь масла; образование в масле желтого проводящего осадка и отложение его на внутренней поверхности нижней фарфоровой крышки при повышенной напряженности электрического поля и(или) повышенной температуре масла. Этот процесс может привести к перекрытию ввода по внутренней поверхности фарфоровой крышки [2].

Отложение осадка повышает тангенс угла диэлектрических потерь масла ($\text{tg}\delta$) во вводе до 20-40 % и более. О степени ухудшения изоляции можно судить по увеличению $\text{tg}\delta$ наружных слоев изоляции, $\text{tg}\delta$, возможно увеличение концентрации горючих газов. Большинство отказов негерметичных вводов 110-220 кВ связано с пробоем или перекрытием внутренней изоляции, а также механическими повреждениями фарфоровых крышек (характерно для вводов масляных выключателей).

Для трансформаторных негерметичных вводов преобладающими видами дефектов внутренней изоляции являются окисление масла, рост $\text{tg}\delta$ основной изоляции, ухудшенное состояние наружных слоев изоляции. Для негерметичных вводов масляных выключателей характерными являются увлажнение масла и ухудшение состояния наружных слоев изоляции.

Для «холодных» негерметичных вводов масляных выключателей,

заполненных маслом ГК, самым распространенным дефектом является воскообразование вследствие развития ионизационных процессов в бумажно-масляной изоляции ввода. Во вводах, залитых маслом ГК, наблюдается повышенное газовыделение, что может способствовать быстрому развитию дефекта.

Для оценки эксплуатационного состояния высоковольтных вводов применяются разные методы и средства диагностики, связанные как с отключением оборудования от сети, так и с проведением измерений под рабочим напряжением без отключения оборудования [3].

Наиболее известны следующие виды испытаний высоковольтных маслонаполненных вводов: измерение электрических характеристик различных слоев изоляции вводов (сопротивление, $\text{tg}\delta$ и емкость изоляции), наблюдение за давлением в герметичных вводах, ХАРГ масла из вводов, определение $\text{tg}\delta$ из вводов (особенно заполненных маслом Т-750), определение характеристик частичных разрядов, тепловизионный контроль.

Итак, повреждения оборудования чаще всего происходят из-за местных дефектов. В тоже время Нормы ориентированы на выявление распределенных дефектов, поэтому и происходят повреждения оборудования, которое испытывалось в соответствии с Нормами.

Цель, задачи исследования. В настоящее время возросли требования к эффективности, оперативности управления и организации процесса эксплуатации электрооборудования.

Актуальность данного исследования обусловлена тем, что совершенствование критериев диагностики и методов анализа диагностической информации повышает объективность оценки технического состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования, и, следовательно, позволяет планировать и своевременно проводить необходимые операции технического обслуживания и ремонта, что делает надежнее эксплуатацию электрооборудования, продлевает ресурс его работы, экономит средства, снижает риски ущерба.

Таким образом, создание информационных аналитических систем, осуществляющих достоверную, многоаспектную оценку технико-экономического состояния оборудования с использованием новых методов и критериев оценки, которые повышают оперативность и качество организации технического обслуживания оборудования и способствуют обучению персонала, является актуальной задачей.

Основной материал исследований. В основе методики контроля изоляции, в частности, емкости ввода и тангенса диэлектрических потерь, лежат два явления:

- ток через изоляцию ввода практически пропорционален емкости. Изменение емкости C_1 вызывает пропорциональное изменение тока;

- изменение тангенса угла диэлектрических потерь изменяет активную составляющую тока через изоляцию ввода и также отражается в токе небаланса [3]:

$$\gamma = \frac{\Delta Y}{Y} \approx \sqrt{(\Delta \text{tg}\delta)^2 + (\Delta C / C_0)^2}. \quad (1)$$

Наиболее распространенным методом контроля изоляционных характеристик высоковольтных вводов и трансформаторов тока под рабочим напряжением является неравновесно-компенсационный метод. Метод основан на измерении суммы трехфазной системы токов, протекающих через изоляцию трех однотипных объектов или трех фаз одного объекта. При равенстве токов исправных объектов и симметрии фазных напряжений сумма токов равна нулю. Кроме того, принцип метода суммы токов основан и на том факте, что в трехфазной системе напряжения на шинах равны и параметры вводов (или трансформаторов тока) идентичны, при этом векторная сумма токов через измерительные выводы вводов будет равна нулю. Ток ввода представляет собой токи утечки из-за емкостного тока или тангенса угла потерь.

В действительности вводы всегда различаются, также как и напряжения на шинах. Как следствие, будет присутствовать малая начальная сумма токов, уникальная для каждой тройки вводов. Когда изоляция одного из вводов начинает ухудшаться, его емкость и/или тангенс будут изменяться и, соответственно, сумма токов будет отличаться от начального значения. Таким образом, состояние изоляции ввода среди тройки может быть определено оценкой изменения суммы токов. Однако режимы работы энергосистемы существенно влияют на взаимные углы между векторами фазных напряжений. Используемая в приборах схема определения «относительных тангенсов» углов потерь вводов, имеет высокую точность только в том случае, когда взаимные углы между векторами фазных напряжений системы стабильны, и равны 120 градусам. Все изменения этих углов автоматически приводит к погрешностям в расчетах и, что очень вероятно, к необоснованным диагностическим заключениям.

К наиболее значимым причинам, влияющих на величины взаимных углов векторов фазных напряжений, можно отнести следующие причины.

1. Подключение контролируемого трансформатора к энергосистеме при помощи сравнительно длинной линии. При изменении нагрузки, в трехфазной системе напряжений, происходит изменение углов между векторами фазных напряжений. Причина этого достаточно проста – неравенство реактивных сопротивлений линии по фазам. Углы между векторами напряжения фаз энергосистемы могут в некоторых случаях составлять не ровно 120 градусов, а $120 \pm 0,8$ угловых градуса. Это может привести к погрешности измерения тока небаланса до 1 – 2%, а в расчетные тангенсы внести погрешность до 30% от базового значения. Основной причиной таких изменений служит неравенство параметров фаз длинной

линии. При протекании по линии тока нагрузки падения напряжения по фазам будет различным, что и приведет к угловым перекосам векторов фазных напряжений. Аналогичная картина может наблюдаться при несимметрии токов нагрузки по фазам.

2. Связь вектора небаланса с нагрузкой трансформатора будет иметь место в случае, если контролируются вводы стороны НН (СН) трансформатора. Причиной этого будет то, что перекося фазных напряжений может происходить за счет неравенства параметров схемы замещения трансформатора, определяемых комплексным сопротивлением Z_k фаз. Такое неравенство может возникнуть при изготовлении трансформатора (в средней фазе трансформатора на одном сердечнике), при переключении РПН, а также за счет изменения формы обмоток после воздействия токов короткого замыкания.

3. Изменение взаимных углов векторов фаз питающей сети может возникнуть при изменении схемы включения трансформатора в энергосистему. Например, если к узлу энергосистемы, в котором расположен контролируемый трансформатор, подключить дополнительную линию, то, чаще всего, вектор небаланса токов проводимости вводов изменит свое значение. Причина этого вполне очевидна – изменятся сопротивления фаз энергосистемы, изменятся падения напряжения в фазах в различных режимах работы.

4. Связь между расчетными параметрами состояния вводов и нагрузкой трансформатора может возникнуть при наличии в узлах энергосистемы регулируемых компенсаторов реактивной мощности. При изменении объема реактивной мощности, протекающей по линиям, возможно изменение падения напряжения на фазах этих линий.

5. При изменении направления движения энергии через контролируемый трансформатор также может произойти изменение углов между фазными векторами питающей сети. Такой режим возможен, например, в трансформаторах, обслуживающих ГАЭС. При переходе гидроаккумулирующей установки, из режима генератора в режим электродвигателя, угол между векторами фазных напряжений в сети, чаще всего, изменяется.

6. При сезонных изменениях параметров энергосистемы тоже могут происходить изменения углов между векторами фазных напряжений. Причин этому может быть несколько. Это изменение энергопотребления по сезонам, изменение структуры генерирующих мощностей в энергосистеме, влияние погодных условий на линии электропередачи.

Как видно из приведенного перечня причин, влияющих на взаимные углы векторов фазных напряжений в энергосистеме, учет таких явлений является очень сложным.

Самой распространённой схемой измерения, использующей неравновесно-компенсационный метод, следует считать устройство контроля

изоляции вводов КИВ-500. Уже многие годы отмечается, что это устройство срабатывает только при взрыве ввода, и его назначение сводится к включению системы пожаротушения трансформатора.

КИВ не способен заметить дефект ввода даже в опасной стадии развития, так как его сигнальный элемент согласно инструкции по эксплуатации КИВ [4] должен быть настроен на 5-7% номинального тока ввода. Поэтому, если во вводе появится дефект, то он повредится задолго до того как сработает КИВ. На основании этого можно сделать вывод, что использование таких устройств для вводов 110-750 целесообразно только при повышении чувствительности и расширении возможностей.

Неравновесно-компенсационный метод используется и в появившихся позднее микропроцессорных системах мониторинга параметров изоляции вводов под рабочим напряжением IDD («Doble Engineering Co.», США) и R1500 (фирма «Вибро-Центр», Россия).

Нормы ГКД 34.20.302-2002 [5] и СОУ-Н МПЕ 40.1.46.-301-2006 диагностики вводов и ТТ под рабочим напряжением разрешают выполнять двумя методами: измерением комплексной проводимости Y или измерением $tg\delta$ и емкости.

При измерении комплексной проводимости необходима очень высокая чувствительность схемы измерения, при которой невозможно отстроиться от влияний изменения характеристик элементов самой измерительной схемы. Эти изменения приводят к частым ложным срабатываниям схемы из-за появления тока небаланса. Опыт эксплуатации этой схемы в ряде энергосистем только отрицательный и по результатам его эти схемы выведены из эксплуатации.

Характерными дефектами для ТТ являются местные дефекты, развитие которых приводит либо к тепловому пробою, либо к появлению частичных разрядов и электрическому пробое основной изоляции. Такие дефекты на ранней стадии развития могут быть обнаружены измерениями тангенса угла диэлектрических потерь под рабочим напряжением и тепловизионными измерениями.

Эти измерения выполняются мостовыми схемами [6], которые обеспечивают контроль каждой фазы отдельно. В мостовых схемах производится сравнение параметров контролируемых объектов и объектов, принятых в качестве образцовых. Схемы измерений различаются способами построения ветви сравнения. Применяются схемы с образцовым конденсатором, питаемый от ТН той системы шин, к которой подключен контролируемый объект. Другие схемы обеспечивают сравнение параметров двух объектов, один из которых принимается в качестве образцового. К недостаткам мостовых схем относится большое время для уравнивания моста, а к преимуществам – высокая точность измерений.

Известен ваттметровый метод [3], который дает совпадение результатов измерений $tg\delta$ изоляции вводов и трансформаторов тока на 330 кВ

с данными измерений мостовой схемой при напряжении 10 кВ. Метод основан на измерении мощности потерь. Цепи напряжения схемы питаются от вторичной обмотки трансформатора напряжения подстанции, а токовые цепи – через согласующий трансформатор тока. Согласующий трансформатор тока необходим также для развязки цепей заземления объекта и трансформатора напряжения. Погрешности измерения по этому методу вызываются током влияния и угловыми погрешностями измерительных трансформаторов тока и напряжения. Случайная составляющая погрешности измерения рассматриваемым методом практически совпадает с соответствующей составляющей погрешности измерения под рабочим напряжением мостовым методом.

Для определения параметров изоляции вводов наибольшее применение в настоящее время получили векторные измерители. Эти переносные, современные приборы, позволяют измерять амплитуды и взаимные углы двух векторов. Однако применение стандартных приборов этого типа для измерения параметров вводов в режиме «on-line» затруднено, так они позволяют сравнивать между собой только два вектора. В трехфазной системе, применяя сравнительную схему измерений, удобнее использовать многофазные векторные измерители, которые сравнивают между собой сразу все контролируемые вектора.

Первым прибором, предназначенным для одновременного измерения параметров трех вводов, является 4-х канальный векторный измеритель марки «VV-Tester», производства фирмы «Вибро-Центр». К трем входам этого прибора, одновременно, подключаются кабельные линии от трех датчиков «DB-1,2». К четвертому каналу прибора может быть подключен один сигнал от измерительного трансформатора напряжения. Прибор имеет аккумуляторное питание, небольшие габариты и небольшой, не более 2 кг, вес. Дополнительной функцией прибора «VV-Tester» является возможность измерения частичных разрядов в контролируемых вводах.

Прибор подключается при помощи трех коаксиальных кабелей к плате «УП-500» и, в автоматическом режиме, проводит комплексное измерение токов проводимости и частичных разрядов одновременно в трех вводах одной трехфазной группы.

Для наиболее ответственного оборудования следует использовать стационарные приборы контроля параметров вводов. У фирмы «Вибро-Центр» имеется несколько таких приборов.

- Прибор «R1500» предназначен для контроля состояния трех вводов. Позволяет контролировать тангенс угла потерь и величину емкости С1.

- Прибор «R1500/6» предназначен для контроля состояния шести вводов. Позволяет контролировать тангенс угла потерь и величину емкости С1, величину Zk обмоток.

- Прибор «R1600» предназначен для контроля состояния шести вводов. Позволяет контролировать тангенс угла потерь и величину емкости С1, уровень частичных разрядов, величину Zk обмоток.

- Прибор «ТТ-Monitor» предназначен для контроля состояния трех измерительных трансформаторов тока. Позволяет контролировать тангенс угла потерь и величину емкости С1, уровень частичных разрядов.

Все эти приборы работают с комплексными датчиками тока проводимости и частичных разрядов вводов «DB-1,2». Для наиболее сложных приборов применяются дополнительные датчики частичных разрядов, которые так же производит фирма «Вибро-Центр».

Выводы. Накоплен достаточный опыт диагностики под рабочим напряжением, позволяющий отказаться от диагностики с отключением при переходе на измерения под рабочим напряжением. Эффективно выявлять местные дефекты на ранней стадии развития можно только используя диагностику под рабочим напряжением.

Оценка фактического состояния силового электрооборудования по результатам диагностических измерений является на сегодняшний день очень сложной и актуальной задачей.

Повышение достоверности контроля идет по пути совершенствования как методов измерения, например, использования одновременно двух методов измерений – мостового и неравновесно-компенсационного, так и устройств контроля. Однако, необходимо тщательно анализировать возможности методов и внедрять только действительно эффективные.

Список литературы: 1. Чичинский М.И. Повреждаемость маслонаполненного оборудования электрических сетей и качество контроля его состояния / М.И. Чичинский // Энергетика. – 2000. – №11. – С. 29-31. 2. Евсеев Ю.А. О причинах повреждаемости высоковольтных герметичных вводов с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа / Ю.А. Евсеев, С.Д. Кассихин, И.П. Куликов и др. // Электрические станции, 1989. – № 1. 3. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П.М Сви. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 239 с. 4. МУ 34-70-39-83. Методические указания по техническому обслуживанию устройства КИВ.-М.: СПО Союзтехэнерго. 1983 – 32 с. 5. ГКД 34.20.302-2002. Нормы випробування електрообладнання. Затверджені Наказом № 503 від 28.08.02 Мінпаливенерго України. – К. : ГРИФРЭ, 2002. 6. Сви П.М. Совершенствование устройств контроля трансформаторного оборудования с учетом опыта эксплуатации / П.М.Сви, В.Смекалов // Повышение надежности и эффективности контроля трансформаторов в эксплуатации. – Запорожье, 1996.

Поступила в редколлегию 20.01.11