

- За свою более чем двадцатилетнюю историю существования ограничителей перенапряжений (ОПН) получили достаточно широкое распространение в энергосистемах и проявили себя в эксплуатации с наилучшей стороны. Известные случаи негативного опыта применения ОПН связаны, в основном, с непониманием того, что ОПН, выполняющий ту же функцию, что и разрядник, отличается от последнего по условиям применения существенным образом. В результате этого непонимания появлялись и появляются проекты, в которых указываются характеристики ОПН, неадекватные условиям эксплуатации, вследствие чего аппараты повреждаются из-за превышения допустимых для выбранного аппарата воздействий в процессе эксплуатации.

Состоянию нормативной документации, регламентирующей выбор характеристик ОПН, соответствующих конкретным условиям эксплуатации, посвящено достаточно много публикаций. Заметно меньше литературы имеется по вопросам диагностики ОПН в эксплуатации. Некоторые пробелы в этом восполняет Виктор Львович Дмитриев.



ДОСТОВЕРНОСТЬ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОПН

Влияние загрязнений на поверхности внешней изоляции

Виктор Дмитриев, ЗАО «Завод энергозащитных устройств», г. Санкт-Петербург

ДИАГНОСТИКА ОПН

Смысл диагностики оборудования вообще, и ОПН в частности, состоит в том, чтобы выявить на ранних стадиях возникшие дефекты, развитие которых может привести к аварии.

Как известно, ОПН представляет собой колонку последовательно включенных нелинейных сопротивлений – варисторов (или несколько таких колонок, включенных параллельно для увеличения допустимых нагрузок ОПН по току, называемых пропускной способностью). Колонка варисторов размещается в герметичном корпусе, предотвращающем воздействие неблагоприятных атмосферных факторов на варисторы. В качестве материала для изготовления корпуса используется как фарфор, так и композитные полимерные материалы. Основные размеры корпуса ОПН выбирают исходя из необходимой электрической прочности и длины пути утечки внешней изоляции.

При приложении к ОПН напряжения через него протекает ток проводимости, имеющий активную (АС) и емкостную (ЕС) составляющие. ЕС является главной составляющей, а АС по амплитуде обычно не превосходит 10–15% величины полного тока проводимости. Наличие АС тока проводимости приводит к выделению в ОПН тепла, которое через корпус ОПН отдается в окружающее пространство. Увеличение АС тока сверх нормальной величины приводит к дополнительному разогреву колонки варисторов и, как следствие, корпуса. При достаточно большом увеличении АС тока, когда корпус оказывается неспособным отводить все тепло в окружающее пространство, варисторы ОПН разогреваются, вследствие чего может возникнуть тепловая пробой варисторов, т.е. повреждение аппарата.

Очевидно, что основной задачей диагностики ОПН является определение того, возросла ли величина АС тока и не достигла ли она в конкретном обследуемом ОПН значения, превышение которого чревато возникновением аварийной ситуации. На практике это решается либо непосредственным измерением токов проводимости, либо косвенно – контролем температуры поверхности корпуса ОПН путем тепловизионного обследования, либо путем последовательного использования обоих методов. В этом случае измерение тока проводимости проводится только на аппаратах, у которых при тепловизионном обследовании выявлена аномальная температура поверхности корпуса.

В нормативной документации [1] указано на необходимость проводить в процессе эксплуатации перед началом грозового сезона перио-

дическое обследование состояния ОПН (в сетях 110 кВ и выше) путем измерения тока проводимости. Помимо измерения тока проводимости, допускается проводить тепловизионное обследование, причем в случае его удовлетворительных результатов, согласно [1], иное испытание не требуется. Помимо этих двух основных методов предписано не реже чем 1 раз в 6 лет проводить измерение сопротивления при проведении плановых работ на защищаемом оборудовании.

В процессе решения задачи диагностики состояния ОПН необходимо сделать четыре шага:

- выбрать адекватный метод контроля;
- корректно выполнить измерения в соответствии с выбранным методом контроля и занести все необходимые данные в протокол;
- провести анализ полученных результатов, в том числе, оценить достоверность полученных результатов;
- сделать на основе результатов анализа вывод о состоянии обследуемого аппарата или необходимости проведения дополнительных испытаний.

При кажущейся очевидной последовательности действий в проведении диагностики, в полном объеме эти четыре шага прорабатываются далеко не всегда, и, как следствие, выводы в протоколах не подтверждаются приведенными в протоколах результатами измерений.

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Самым простым из предусмотренных [1] испытаний является измерение сопротивления и обычно здесь недоразумений не бывает. Единственной неувязкой является требование этого документа проводить измерение «на разрядниках и ОПН с номинальным напряжением менее 3 кВ — мегаомметром на напряжение 1000 В» (п. 21.1).

В соответствии с принятой терминологией, «номинальное напряжение ОПН» – это напряжение, которое ОПН должен выдерживать в течение не менее 10 с при проведении испытаний в рабочем режиме. Как правило, для ОПН отечественных изготовителей номинальное напряжение приблизительно в 1,25 раза больше наибольшего допустимого напряжения аппарата (желающие могут проверить это соотношение в каталогах любых компаний). Таким образом, требование [1] распространяется на аппараты с наибольшим рабочим напряжением не более 2,4 кВ, а фактически – на аппараты для сетей 220/380/600 В. Однако приложение к ОПН для сетей 220/380/600 В в течение 1 мин напряжения 1000 В (согласно методике измерения

сопротивлений мегаомметром) неминуемо приведет к повреждению варисторов ОПН, что легко проверить по приводимым изготовителями зависимостям «напряжение-время» для этих аппаратов.

Единственным выходом из ситуации, учитывая обязательность требований [1], является корректировка этого пункта.

ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА ПРОВОДИМОСТИ

Заметно более сложным, чем предыдущее, является измерение тока проводимости ОПН. Обычно эти измерения выполняют на месте эксплуатации при воздействии на ОПН фактического напряжения сети (без отключения оборудования). Для измерения величины тока в цепь заземления ОПН включают измерительное устройство. Используемые при этом средства измерений тока проводимости можно условно разделить на три основных группы:

1. Миллиамперметры, измеряющие амплитудное или действующее значение полного тока проводимости.
2. Устройства, позволяющие регистрировать, помимо полного тока, токи 1-й и высших гармоник (обычно – 3-й, 5-й, 7-й).
3. Устройства, обеспечивающие измерение не только характеристик 2-й группы, но и АС полного тока проводимости.

Группа 1

Широкое применение при обследованиях измерительных устройств 1-й группы обусловлено их существенно меньшей стоимостью по сравнению с приборами остальных групп.

По сути, в 1-й группе речь идет об обычных микроамперметрах (миллиамперметрах) с пределами измерений 1–5 мА (в зависимости от характеристик обследуемого аппарата). С помощью микроамперметра выявить изменения характеристик варисторов практически невозможно, поскольку даже значительное (в разы) изменение величины АС (в силу ее относительной малости) не приводит к сколько-нибудь заметным изменениям полного тока. Увеличение полного тока вследствие увеличения АС (возникшего, например, из-за изменения характеристик варисторов ОПН) могло бы быть замеченным лишь при значительном росте АС. Однако при столь большой величине АС тока вследствие теплового пробоя ОПН неминуемо в течение часов (или даже минут) будет поврежден. Как видно, периодический контроль полного тока в ОПН не позволяет прогнозировать повреждение ОПН.

Регистрируемые при обследовании изменения полного тока проводимости в ОПН следует связывать:

- с изменениями условий измерений (величина и синусоидальность приложенного к аппарату напряжения, температура окружающей среды);
- с изменениями в состоянии изоляции ОПН;
- с изменением рабочей высоты колонки варисторов в аппарате (например, вследствие пробоя части варисторов, или потери электрического контакта в колонке).

Группа 2

Появление у разных изготовителей нескольких типов измерительных устройств 2-й группы было обусловлено низкой информативностью результатов измерений с помощью устройств 1-й группы, не позволяющих выявить начавшийся процесс деградации варисторов.

Устройства 2-й группы – это приборы, уже способные выделить из тока гармонические составляющие и измерить их величины. В основе диагностики ОПН с помощью таких приборов лежит два основных фактора. Во-первых, наличие в электрической цепи нелинейного элемента приводит к появлению в ней сигналов с более широким спектром частот, чем исходный синусоидальный. Во-вторых, нелинейность ОПН неодинакова в разных областях вольтамперной характеристики, причем в области рабочих напряжений нелинейность мала, а по мере роста приложенного напряжения она возрастает. Таким образом, рост токов высших гармоник в цепи заземления ОПН при неизменном полном токе свидетельствует об изменении характеристик нелинейного элемента. При использовании устройств 2-й группы следует иметь в виду:

- как будет показано ниже, нелинейными свойствами в ОПН обладают не только варисторы;
- появление высших гармонических составляющих в сетевом напряжении (т.е. приложенном к ОПН) в значительно большей степени сказывается на величинах токов соответствующих гармоник, чем на величине полного тока.

Группа 3

Измерение величин токов высших гармоник, в конечном счете, позволяет выявить наличие изменений в вольтамперной характеристике ОПН, но не дает возможности измерить собственно АС тока проводимости, которая и определяет состояние варисторов. Следовательно, по-прежнему остается открытым вопрос, что явилось причиной роста тока высших гармонических составляющих (деградация варисторов, появление высших гармоник в сети и т.п.).

Устройства, относящиеся к 3-й группе, т.е. измеряющие непосредственно АС тока проводимости, только начали появляться на отечественном рынке измерительной техники. Но опыт применения опытных образцов таких устройств весьма успешный.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Следует обратить внимание на то, что измерительное устройство, к какой из трех перечисленных групп оно бы не относилось, включается в цепь заземления всего ОПН, а не только колонки варисторов. Иными словами, через измерительное устройство будет проходить суммарный ток, протекающий как по колонке варисторов, так и по корпусу, в том числе по его наружной поверхности.

Суммарный ток через ОПН при приемочных испытаниях на заводе измеряется на аппарате с чистой поверхностью, когда величина тока утечки по поверхности корпуса несоизмеримо меньше, чем ток через колонку варисторов. Иное дело – величина тока по поверхности с увлажненным слоем загрязнений на аппарате, отстоявшем в условиях эксплуатации год и более. Публикаций, посвященных исследованиям токов утечки по поверхности изоляции, находящейся под рабочим напряжением мало, так как исследователей больше интересовали вопросы разрядных характеристик.

Из [2] видно, что при приложении синусоидального напряжения к загрязненному изолятору, по его поверхности начинает протекать заметно несинусоидальный ток. Специалистами ОАО «НИИПТ» экспериментально указывался возможный диапазон величин токов утечки по поверхности 0,4–1,0 мА.

Рис. 1.

Изолирующий вывод и его предназначение.

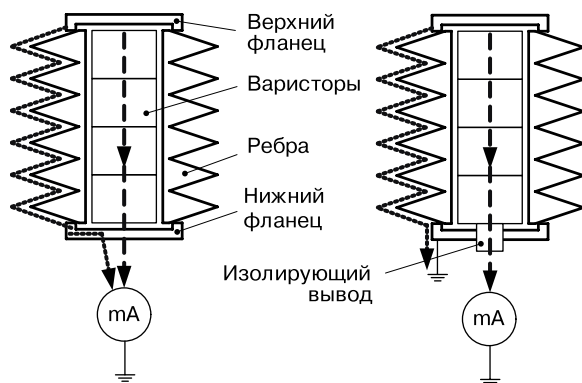


Рис. 2.

Возможность наблюдения тела у ОПС разных изготовителей при различных вылетах и углах наклона ребер.



В лаборатории ЗАО «Завод энергозащитных устройств» была проведена серия экспериментов с ОПС 110 кВ после его годичной эксплуатации на одной из подстанций ОАО «Вологдаэнерго».

По возможности предохраняя от поврежденной поверхности корпуса, аппарат был помещен на 1 час в ванну с водой, после чего перенесен на испытательный стенд, где измерен суммарный ток со стороны заземляемого фланца при воздействии рабочего напряжения. Действующее значение тока составило 1,5 мА, что заметно превышает браковочное значение для ОПС испытывавшегося типа. После выдержки в течение суток в сухом помещении, суммарный ток через аппарат составил уже 0,4 мА, что соответствовало результатам измерений при приемо-сдаточных испытаниях, приведенных в паспорте на ОПС. После повторного увлажнения водопроводной водой поверхности корпуса (с помощью бытового опрыскивателя) регистрируемая величина тока снова выросла, но уже до 1,1 мА. Затем поверхность ОПС была вымыта с помощью мягкой щетки с применением обычного моющего средства и последующим ополаскиванием водопроводной водой. После обмыва, вне зависимости от того, применялось ли увлажнение поверхности корпуса, суммарный ток через ОПС составлял 0,4 мА.

Полученный результат подтверждает давно известные факты – загрязненная поверхность изолятора, если она увлажнена, является проводником, причем нелинейным, а ток утечки по ней может составлять миллиамперы, т.е. применительно к ОПС будет сравним или даже превосходить ток проводимости через колонку варисторов.

В настоящее время в конструкциях ОПС практически всех изготовителей отсутствует специальный изолированный от нижнего заземляемого фланца ОПС вывод, подсоединенный к колонке варисторов (рис. 1). Такой вывод (небольшой проходной изолятор), изолирующий колонку варисторов от нижнего фланца ОПС, имелся лишь в аппаратах производства Корниловского завода. Из-за отсутствия этого вывода у большинства современных ОПС, токи через колонку варисторов и токи по поверхности корпуса ОПС замыкаются на фланцы аппаратов, т.е. одновременно протекают в измерительных приборах. Поэтому выделить при измерениях только ток через колонку варисторов не представляется возможным.

Следовательно, перед измерением тока через ОПС для оценки состояния варисторов необходимо свести к минимуму ток утечки по поверхности аппарата, т.е. проводить измерения при сухом слое загрязнений на поверхности ОПС или после тщательного предварительного обмыва поверхности.

В лабораторных условиях для определения доли тока утечки в суммарном токе в цепи заземления ОПС можно провести несложные измерения. На ОПС необходимо одеть металлическое кольцо, разместив его вблизи от нижнего фланца (например, между первым и вторым ребрами, считая от нижнего фланца). Между кольцом и нижним фланцем необходимо приложить напряжение, величина которого должна быть во столько раз меньше нормально воздействующего на весь ОПС, во сколько раз длина пути утечки от кольца до нижнего фланца меньше длины пути утечки изоляции целого ОПС.

Если зарегистрированная в этих условиях величина тока утечки существенно меньше ожидаемого тока проводимости варисторов ОПС, можно считать, что при измерениях на полном ОПС ток утечки по поверхности аппарата заметного влияния не окажет.

ТЕПЛОВИЗИОННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ

Появление дефектных областей в аппарате приводит, как правило, к изменению (обычно повышению) температуры в зоне дефекта, что в свою очередь соответственно изменяет температуру внешней оболочки аппарата. Рост температуры может быть зафиксирован в процесс тепловизионного обследования, которое в последнее время получает все более широкое распространение.

При обследовании ОПС интерес представляет температура варисторов, т.е. температура поверхности тела ОПС (его цилиндрической части), а не ребер. Дело в том, что температура ребер ОПС, тем более полимерных, мало зависит от температуры тела аппарата, что следует из многочисленных опубликованных работ В.В. Титкова, посвященных тепловым процессам в ОПС. Поскольку тепловизор – это оптический прибор, с его помощью можно измерить температуру только тех поверхностей, которые видны. Однако имеющиеся на ОПС ребра частично закрывают собой тело аппарата, причем в разной степени для разных по высоте частей аппарата (см. рис. 2). Создаваемые ребрами помехи таковы, что в ряде случаев тела ОПС не видно вовсе (как правило – в части примыкающей к нижнему фланцу). В каждом конкретном случае помехи от ребер зависят от:

- положения наблюдателя;
- угла наклона и вылета ребер (а эти параметры у каждого изготовителя свои).

Во время тепловизионного обследования нередко не принимают во внимание то, что получаемая «фотография» не имеет четких контуров объектов (см. рис. 3). Вместе с тем, отсутствие четкости изображения свидетельствует о том, что измерению подверглась не конкретная точка на объекте, а несколько, по которым оператор может определить лишь усредненную температуру. Неточная настройка тепловизора, его недостаточная разрешающая способность приводят к тому, что зачастую измеряется не температура тела ОПС, а что-то усредненное между температурами тела и ребер (и окружающих предметов), тогда как информативной является лишь температура тела.

Термограмма рис. 3 принципиально не может быть использована для оценки состояния ОПС, однако нередко именно по таким термограммам проводится диагностика состояния ОПС эксплуатирующими организациями.

На термограмме рис. 4, в отличие от рис. 3, видны контуры аппарата, и можно легко отличить фрагменты тела ОПС и ребер его корпуса, а, следовательно, и их температуры.

В протоколе обследования указана максимальная температура на поверхности ОПС, но не отмечено, что эта температура относится к поверхности ребер, а не тела аппарата. Но если более внимательно рассмотреть термограмму рис. 4, то видно, что самые нагретые области находятся на ребрах ОПС, а совсем не на теле аппарата. Следовательно, главным источником тепла, которое в данном случае регистрирует тепловизор, является не нагрев варисторов ОПС, а ток утечки по поверхности загрязненной увлажненной изоляции.

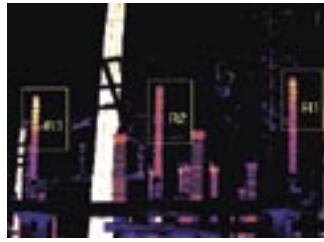
Поскольку нагрев поверхности токами утечки никто во внимание не принимает, а верхняя часть ОПС, «как всем известно, является более перегретой», то верхние варисторы «состарились» и ОПС необходимо выводить из эксплуатации. Однако нагрев ОПС то-

Рис. 3.

Термограмма ОПН с размытыми контурами обследуемого объекта.

**Рис. 4.**

Термограмма ОПН с четкими контурами обследуемого объекта (слева в увеличенном масштабе показана зона R3 аппарата).



ком утечки по поверхности загрязненной изоляции не является браковочным показателем. Это нормальный расчетный режим ограничителя перенапряжений, т.е. оснований для вывода ОПН из эксплуатации нет.

Более того, вследствие неравномерной проводимости слоя загрязнений на поверхности корпуса (разная загрязненность, увлажнение, проводимости) и различной плотности тока (на теле аппарата и ребрах) нагрев различных частей аппарата током утечки может существенным образом отличаться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обследование ОПН, находящихся в эксплуатации, согласно [1] должно проводиться ежегодно перед началом грозосезона (в марте-апреле). Это время характеризуется резкими сменами температуры и повышенной влажностью загрязненной поверхности изоляции. В подобных условиях оценка состояния ОПН должна производиться только после тщательного анализа достоверности полученных результатов:

- следует помнить, что наличие тока утечки сказывается как на результатах измерения тока через ОПН при рабочем напряжении, так и на тепловую картину аппарата, получаемую с помощью тепловизора. Объективная оценка состояния варисторов ОПН может быть произведена только тогда, когда величина тока утечки не превосходит 10–15% полного тока через аппарат (т.е., сравнима с активной составляющей тока проводимости варисторов).
- браковочным критерием является повышенный ток в варисторах, а не ток утечки по поверхности загрязненного корпуса;
- при тепловизионном обследовании необходимо убедиться в том, что измеряется температура тела ОПН (а не ребер) и что регистрируемый нагрев обусловлен, в основном, нагревом варисторов, а не сторонними причинами (например, током по поверхности ОПН).

Эксплуатирующим организациям рекомендуется обратить внимание на следующее:

- ОПН достаточно чувствителен к приложенному напряжению, поэтому для корректной оценки состояния ОПН, в том числе по результатам тепловизионного обследования, необходимо знать величину напряжения на аппарате во время измерений, и указывать ее в протоколе;
- воздействующие на ОПН в эксплуатации фазные напряжения, как правило, определяются не прямыми измерениями, а делением на величины фиксируемого линейного напряжения. Точное определение фазного напряжения через линейное напряжение невозможно, так как всегда имеет место несимметрия по фазам параметров сети и режима.

ЛИТЕРАТУРА

1. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования.
2. Мерхалев С.Д., Соломоник Е.А. Механизм развития разряда по проводящей увлажненной поверхности изоляторов при длительном воздействии напряжения // Известия НИИ Постоянного тока. Передача энергии постоянным и переменным током. Сборник № 11. М. – Л.: «Энергия». – 1965.