

УДК 621.311.42

С. В. ГРИДИН, канд. тех. наук, доцент

А. Ф. ПЕТРЕНКО, магистр

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика», Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СПОСОБОВ УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННОГО ТЕПЛА СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В работе произведен анализ использования тепла силовых трансформаторов для теплоснабжения электрических подстанций.

У роботі проведений аналіз використання тепла силових трансформаторів для теплопостачання електричних підстанцій.

Введение

В настоящее время вопросам энергосбережения уделяется все более пристальное внимание, все активнее изыскиваются различные варианты снижения энергозатрат, рассматриваются и реализуются, в том числе и с привлечением значительных средств, разнообразные схемы, призванные сократить потребление энергии. В то же время все еще остается скорее исключением, чем правилом отбор тепла от разного рода охлаждающих жидкостей с целью его последующего использования.

Задача снижения расхода электрической энергии на собственные нужды подстанций (ПС) является одним из аспектов общей проблемы по снижению уровня потерь и повышению эффективности работы электроэнергетических систем, которая приобретает в настоящее время все большее значение. Это связано как с увеличением трансформаторной мощности ПС, так и с появлением на ПС сверхвысокого напряжения крупных потребителей электрической и тепловой энергии.

Современные трансформаторы имеют достаточно высокий коэффициент полезного действия, который в зависимости от мощности может достигать 99% и более. Однако при работе трансформатора часть трансформируемой электромагнитной энергии теряется и выделяется в виде тепла, которое рассеивается в окружающую среду.

Тепловые потери в трансформаторах большой мощности составляют сотни киловатт. Для снижения этих потерь осуществляется целый ряд мероприятий проводимых как на стадии конструирования и изготовления трансформаторов, так и в процессе их эксплуатации в энергосистемах. Однако тепловые потери трансформаторов и автотрансформаторов можно не только снижать, но и полезно использовать, для целей теплоснабжения.

Статья посвящена актуальной научной задаче – задаче снижения расхода электрической энергии на собственные нужды ПС. Она является одним из аспектов общей проблемы по снижению уровня потерь и повышению эффективности работы электроэнергетических систем, которая приобретает в настоящее время все большее значение. Это связано как с увеличением трансформаторной мощности ПС, так и с появлением на ПС сверхвысокого напряжения крупных потребителей электрической и тепловой энергии.

Основные задачи исследования: представить один из способов использования тепла выделяемого силовыми масляными трансформаторами для целей теплоснабжения электрических подстанций; показать целесообразность утилизации тепловых потерь трансформаторов для отопления электрических ПС.

Основная часть

Чтобы проанализировать технологию использования тепла для целей теплоснабжения ПС, рассмотрим характеристику трансформаторного масла в электросетях по стандартам Украины и европейских стран.

Физические характеристики

Вязкость масла является параметром, влияющим на передачу тепла как при естественной циркуляции масла в небольших трансформаторах, так и при принудительной циркуляции с помощью насосов в больших трансформаторах.

Динамическая вязкость определяется сопротивлением жидкости в потоке и равна отношению удельного давления к удельному ускорению. Кинематическая вязкость, нормируемая для масла, есть отношение динамической вязкости жидкости к ее удельному весу. Обычно вязкость увеличивается с увеличением размеров молекул и молекулярного веса. С ростом температуры вязкость уменьшается. За единицу кинематической вязкости принимают $1 \text{ м}^2/\text{с}$.

В стандартах приведены значения кинематической вязкости при разных температурах. Это позволяет правильно рассчитывать циркуляцию масла в трансформаторе и разработать правила выбора места и размеров охлаждающих каналов, например в обмотках, а также барьеров, радиаторов и насосов. Температура застывания — температура при которой жидкость перестает перемещаться. Этот показатель является мерой текучести при низкой температуре при изменяющихся условиях. Геометрия сосуда, в котором производится охлаждение, и способ охлаждения для определения этого показателя, стандартизированы.

При испытаниях отклонения от стандартной методики может привести к ошибке до 15°C . Температурные вспышки в закрытом тигле — температура при которой пары над поверхностью нагретой жидкости при наличии воздуха могут быть воспламенены. Температура вспышки зависит от давления наиболее летучих горючих составляющих смеси газов. Геометрия сосуда (тигля) — объем пространства с газом, процесс нагревания и воспламенения регламентированы стандартами.

Температура вспышки для обычных товарных масел колеблется в пределах $130\text{--}170^\circ\text{C}$. Для арктического масла — в пределах от 90 до 115°C и зависит от фракционного состава, наличия относительно низкокипящих фракций и в меньшей степени от химического состава. Минимальная температура вспышки масел регламентируется не столько по противопожарным соображениям, сколько с точки зрения возможности глубокой их дегазации.

В отношении пожарной безопасности большую роль играет температура самовоспламенения; это температура, при которой масло при наличии воздуха загорается самопроизвольно без подведения пламени. У трансформаторных масел эта температура около $350\text{--}400^\circ\text{C}$.

Цвет свежего масла обычно свидетельствует о чистоте очистки. Для масла в эксплуатации высокий или увеличивающийся цветовой показатель свидетельствует о загрязнении или о старении масла, либо о том и другом.

Химические характеристики

Химический состав трансформаторного масла, полученного из разных источников, может сильно отличаться. Поскольку состав углеводородов масел весьма сложен, принято условно считать молекулу: нафтеновой, если она содержит хотя бы одно нафтеновое кольцо независимо от алкановых (парафиновых) цепей при отсутствии ароматических циклов и непредельных связей; парафиновой, если она не содержит ни ароматических, ни нафтеновых колец, и непредельных связей.

Ароматические углеводороды подразделяются на чисто ароматические с алкановыми цепями, не содержащими нафтеновых циклов, и на нафтеново-ароматические, содержащие кроме ароматических и нафтеновые циклы с алкановыми цепями при ароматических и (или) нафтеновых циклах.

Строение молекул углеводородов трансформаторного масла:

а) парафины (алканы) — насыщенные углеводороды с линейной (нормальные или α -парафины-I), или разветвленной (изопарафины, или β -парафины) цепью без кольцевых структуре II).

б) нафтены (или циклопарафины)-насыщенные углеводороды, содержащие одно или несколько колец, (пяти или шестичленных), каждое из которых может иметь одну или

несколько линейных или разветвленных парафиновых (алкановых) боковых цепей. В зависимости от числа колец различают моноциклические – (I), бициклические – (II), трициклические – (III) нафтены и т. д.

с) ароматические углеводороды, содержащие одно (I) или несколько ароматических ядер, которые могут быть соединены с нафтеновыми кольцами и боковыми парафиновыми цепями. Ароматические ядра могут быть конденсированными (II) или изолированными (III). Смешанные нафтено-ароматические углеводороды представлены структурой (IV). Пределы для концентрации отдельных углеводородов стандартами не регламентируются. Однако многие характеристики масла определяются поведением широких классов углеводородов, содержащихся в данном масле. Так, например, предельные значения, установленные для вязкости и температуры вспышки зависят от соотношения парафиновых и нафтеновых углеводородов в масле и их взаимодействия [6].

Газостойкость

Под воздействием высокой напряженности электрического поля и возникающих частичных разрядов трансформаторное масло может выделять или поглощать газ. Количество выделяющегося (поглощаемого) газа зависит от углеводородного состава масла и является характеристикой данного масла. Эту характеристику масла называют газостойкостью.

Газостойкость масла зависит также от величины напряженности электрического поля, интенсивности частичных разрядов, состава газа, соприкасающегося с маслом и насыщающего данное масло, от температуры масла и некоторых других факторов.

Большинство исследователей применяют метод определения газостойкости в среде водорода. Это объясняется несколькими причинами: газ, образующийся при воздействии частичных разрядов, состоит в основном из водорода; в случае газовой среды, состоящей из азота, возможна реакция ионизированного азота с углеводородами масла с образованием аминов; в среде воздуха происходит окисление углеводородов и образование аминов.

Поэтому значения газостойкости, определенные в среде азота или воздуха, менее однозначны во времени и в зависимости от различных составов масла и других условий.

Метод определения газостойкости трансформаторного масла в среде водорода также установлен стандартом МЭК-60628; стандартом ASTM D-2300 и ГОСТ-13003-67. Испытуемое масло помещается в стеклянный сосуд, содержащий два концентрических электрода. Насыщенное водородом масло, находящееся в испытательном сосуде, соприкасается с водородом над маслом; нижняя часть соединяется с измерительной бюреткой. Переменное напряжение выше начального напряжения частичных разрядов прикладывается к электродам. Возникает пена на границе раздела масла и водорода. Разряды поддерживаются в течение 2 часов (метод А МЭК 60628) или 18 часов (метод В) при постоянной температуре 80 °С [4].

Изменение объема газа измеряется газовой бюреткой в методе В и вычисляется скорость изменения объема газа мл/мин в методе А. Газостойкость считают положительной, когда масло под воздействием частичных разрядов выделяет газ, и отрицательной, когда поглощает его.

Масла, содержащие ароматические углеводороды в малом количестве, выделяют газ, а содержащие их в необходимом количестве поглощают газ. Однако не все фракции ароматических углеводородов поглощают водород в электрическом поле. Поэтому можно говорить только о качественной зависимости газостойкости от количественного содержания суммы ароматических углеводородов.

При полном отсутствии в масле ароматических углеводородов (в так называемом белом масле) скорость газовыделения составляет около 50 мкл/мин. (метод ASTM D2300 В). Под воздействием частичных разрядов происходит выделение главным образом водорода. Растворимость водорода в масле невелика. Поэтому весьма вероятна возможность образования газовых пузырьков, которые могут привести к усилению частичных разрядов и

пробую изоляции. В изоляции трансформатора могут возникать частичные разряды, имеющие различные характеристики, которые также влияют на газостойкость.

С ростом напряженности электрического поля, интенсивности частичных разрядов, а также с ростом температуры масла образование газа или его поглощение увеличиваются.

При повышении температуры для любого масла существует критическое значение температуры, когда оно из газопоглощающего становится газовыделяющим.

То же самое можно сказать о влиянии величины напряженности. Для любого нефтяного масла существует критическая напряженность, выше которой масло выделяет газ.

Кроме того, метод определения газостойкости образцов масла имеет определенные погрешности. Поэтому нет прямой связи показателя газостойкости и возможности выделения газа. Однако масло, определенное по результатам анализа как газо-выделяющее, создает большую опасность повреждения изоляции трансформатора в случае возникновения частичных разрядов, чем масло, определенное как газопоглощающее.

Электрическая прочность масла при импульсном напряжении

Некоторые изготовители масла в числе прочих характеристик дают импульсную прочность масла. Метод определения импульсной прочности образцов масла в сильно неравномерном поле изложен в американском стандарте ASTM D330. Стандартный грозовой импульс напряжения с фронтом 1,2 мкс и длительностью до половины амплитуды 50 мкс прикладывается к изоляционному промежутку, равному одному дюйму (25,4 мм), между стержнем и заземленной сферой диаметром 1,5 дюйма. Импульсное напряжение повышается ступенями до пробоя промежутка. Пробивное импульсное напряжение определяется как среднее из пяти опытов. Полярность импульса может быть как отрицательной, так и положительной. Однако в спецификации в стандарте ASTM D3487 указывается минимальное значение только для отрицательной полярности для нового трансформаторного масла. Подобно зависимости газовой выделенности (согласно D-2300), пробивное напряжение отрицательной полярности для свежего масла уменьшается с увеличением содержания в масле ароматических углеводородов. Так, например, оно равно примерно 145 кВ при содержании ароматических углеводородов 25–30 % и примерно 180 кВ при содержании ароматических углеводородов 15–20 % и превышает 300 кВ для масла, не содержащего ароматических углеводородов (для так называемого белого масла). Загрязнение масла твердыми частицами, а также влагосодержание, практически не оказывают влияние на пробивное напряжение при обеих полярностях. Разряды в промежутке начинаются у острия иглы, где коэффициент импульса составляет более 200 [2]. Пробой происходит, когда стример, возникший у острия иглы, распространится на весь промежуток. Сообщалось об опыте, при котором в ограниченном количестве опытов на образцах масла, взятого из трансформаторов в эксплуатации, импульсное пробивное напряжение отрицательной полярности было равным примерно 120 кВ. Низкое значение пробивного напряжения, по-видимому, было вызвано продуктами старения. Пробивное напряжение при положительной полярности на образцах нового масла из трансформаторов в эксплуатации также в большинстве случаев оказалось равным 120 кВ. Пробивное напряжение при положительной полярности, по-видимому, не зависит от содержания ароматических углеводородов, а так же наличия растворимых продуктов старения, твердых частиц и воды. Тенденция газообразования и импульсное пробивное напряжение определяются содержанием ароматических углеводородов. Проводились опыты на белом масле, в которое были добавлены моно- или полиароматические углеводороды. Опыты показали, что поли-, особенно диароматические углеводороды могут быть более эффективны чем моноароматические в увеличении абсорбции газа маслом и, в то же время, в снижении пробивного импульсного напряжения. Однако, относительная роль многих ароматических компонентов, фактически присутствующих в масле, недостаточно ясна.

В зависимости от типа, количества и мощности, установленных трансформаторов, их нагрузки, требуемой тепловой производительности, вида используемого теплоносителя в системе отопления (трансформаторное масло, вода, воздух) и удаленности потребителей

могут применяться различные схемы отбора тепла [1, 2]: с непосредственной подачей нагретого масла в систему отопления; с нагревом воды в масловодяном теплообменнике; с нагревом воды посредством теплового насоса; с нагревом воздуха в масловоздушном теплообменнике; с непосредственным отводом нагретого воздуха от охлаждающих радиаторов; с нагревом воздуха в водовоздушном теплообменнике.

Схема непосредственного использования трансформаторного масла в системе отопления. Нагретое трансформаторное масло забирается масляным насосом из верхней части бака трансформатора и подается по маслопроводам в масляные радиаторы отапливаемого помещения. Отдав свое тепло масло возвращается в трансформатор. Эта система отличается максимальной простотой конструкции и повышенной энергетической эффективностью (ввиду отсутствия промежуточных теплообменников). Однако данная система имеет и существенный недостаток, связанный с возможностью утечки масла из контура отопления, что недопустимо как с точки зрения надежности работы трансформатора и системы отопления, так и пожаробезопасности и санитарно-гигиенических норм. Поэтому из-за низкой надежности широкого распространения данная схема отбора не получила.

Схема нагрева воды в теплообменнике «масло – вода». Нагретое масло из верхней части бака трансформатора при помощи масляного насоса подается в теплообменник «масло – вода», установленный рядом с трансформатором. В теплообменнике масло отдает теплоту воде, которая подается в помещение котельной, а затем в существующую систему отопления. При допустимой температуре масла 60–65 °С температура воды в теплообменнике достигает 52–58 °С. Наиболее широко, таким образом, тепло потерь используется на подстанциях 110–400 кВ [3, 4]. На сегодняшний день данная система получила наиболее широкое распространение, в основном это обусловлено тем, что она позволяет использовать уже существующие радиаторы водяного отопления и передавать тепло на расстояния до 1 километра. Все остальные системы, за исключением теплонасосной, могут передать тепло только потребителям расположенным в непосредственной близости от трансформатора.

Схема нагрева воды посредством парокompрессионного теплового насоса и подача ее потребителям. Применение в схеме теплового насоса (ТН) позволяет [5]: повысить надежность трансформатора за счет разделения масляного контура и контура теплоносителя и, кроме того, не допустить перегрева изоляции трансформаторов; расширить диапазон использования теплоты трансформатора, увеличить температуру нагреваемой воды и дальность транспорта тепла; использовать систему отбора не только для отопления, но и для кондиционирования воздуха.

Нагретое масло из верхней части бака трансформатора масляным насосом подается в теплообменник «масло – вода», где отдает теплоту воде, циркулирующей в промежуточном контуре. В испарителе ТН вода отдает теплоту промежуточному теплоносителю. После сжатия компрессором и конденсации в конденсаторе ТН температура промежуточного теплоносителя повышается, и его теплота передается воде, подаваемой потребителям. При температуре масла 20–30 °С температура воды достигает значений 60–70 °С. Такую схему также применяют на подстанциях 110–400 кВ [3, 5, 6]. К недостаткам данной системы следует отнести сложность и повышенные капитальные затраты, а также снижение экономии электроэнергии связанные с использованием ТН.

Схемы отбора тепла для системы воздушного отопления основаны на использовании теплоты вентиляционных выбросов системы охлаждения трансформаторов и являются перспективными для ПС без обслуживающего персонала, а также закрытых ПС. Они сочетают в себе простоту конструкции и надежность, не требуют регулировки и какого-либо надзора [4, 8].

Схема подачи нагретого масла в теплообменник «масло – воздух», расположенный рядом с обогреваемым помещением. Нагретое масло из верхней части бака трансформатора при помощи масляного насоса подается в теплообменник «масло – воздух», установленный рядом с обогреваемым помещением. В теплообменнике масло отдает теплоту воздуху, который с помощью вентилятора подается в помещение.

Мощность отбора теплоты составляет 15–20 кВт. Температура воздуха в помещении зависит от температуры масла и температуры наружного воздуха. При отрицательных температурах наружного воздуха она находится в пределах от +5 до +9 °С. Установки могут использоваться на ПС 110 кВ на трансформаторах мощностью 16 и 25 МВА.

Схема отбора нагретого воздуха от радиаторов и подача его в обогреваемое помещение. Радиаторы трансформаторов мощностью 16–40 МВА оборудуются камерами и воздухопроводами из изоляционных материалов. В нижней части камеры установлен вентилятор, нагнетающий воздух. Воздух при движении снизу вверх вдоль радиаторов нагревается и при помощи вентилятора подается по воздухопроводу в помещение.

Мощность отбора теплоты составляет 15–20 кВт. Температура воздуха в помещении зависит от наружной температуры воздуха и нагрузки трансформатора.

Схема отбора нагретого воздуха от маслоохладителя и подача его в обогреваемое помещение. Типовые охладители крупных трансформаторов с системой охлаждения ДЦ оборудуются камерами и воздухопроводами из изоляционных материалов. Нагретый воздух с помощью вентиляторов по воздухопроводу подается в помещение. Система отопления может быть совмещена с вентиляцией. В теплое время года камеры демонтируются.

Данная схема аналогична схеме приведенной выше, но мощность отбора значительно больше и составляет 60–160 кВт. Температура воздуха в помещении 18–20 °С. Такой вариант может применяться на ПС 220 кВ на трансформаторах 160 МВА.

Схема подачи нагретой воды в теплообменник «вода – воздух», расположенный рядом с обогреваемым помещением. Если трансформаторы расположены далеко от здания ПС, то применение маслопроводов большой длины недопустимо вследствие малой надежности, а применение воздухопроводов неэкономично. В этих случаях возле трансформатора устанавливаются теплообменник «масло – вода». Вода, нагретая в таком теплообменнике, с помощью насоса подается по изолированным трубопроводам в теплообменник «вода – воздух», установленный непосредственно возле обогреваемого помещения. Нагретый в этом теплообменнике воздух подается по воздухопроводу в помещение. Такой вариант может применяться на ПС 400 кВ на трансформаторах 250 МВА.

Преимущества и недостатки перечисленных схем отбора тепла приведем в таблице.

Таблица

Преимущества и недостатки схем отбора тепла

Преимущества	Недостатки
СХЕМА ОТБОРА ТЕПЛА ДЛЯ СИСТЕМЫ МАСЛЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ	
Максимальная простота конструкции и повышенная энергетическая эффективность (ввиду отсутствия промежуточных теплообменников).	Возможность утечки масла из контура отопления, что недопустимо как с точки зрения надежности работы трансформатора и системы отопления, так и пожаробезопасности и санитарно-гигиенических норм. Поэтому из-за низкой надежности широкого распространения данная схема отбора не получила.
СХЕМЫ ОТБОРА ТЕПЛА ДЛЯ СИСТЕМЫ ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ	

<p>Позволяет использовать уже существующие радиаторы водяного отопления и передавать тепло на расстояния до 1 километра. Все остальные системы, за исключением теплонасосной, могут передать тепло только потребителям расположенным в непосредственной близости от трансформатора.</p>	<p>Сложность и повышенные капитальные затраты, а также снижение экономии электроэнергии связанные с использованием ТН.</p>
<p>СХЕМЫ ОТБОРА ТЕПЛА ДЛЯ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО ОТОПЛЕНИЯ</p>	
<p>Простота конструкции и надежность, не требуют регулировки и какого-либо надзора.</p>	<p>Если трансформаторы расположены далеко от здания ПС, то применение маслопроводов большой длины недопустимо вследствие малой надежности, а применение воздухопроводов неэкономично. В этих случаях возле трансформатора устанавливают теплообменник «масло-вода».</p>

Выводы

Таким образом, отводимое от силовых трансформаторов в окружающую среду тепло можно рентабельно использовать для целей отопления и кондиционирования на трансформаторных подстанциях, но лишь в тех случаях, когда для этого предусмотрено оптимальное для каждого конкретного случая техническое решение с учетом внутренних и внешних факторов (например, потребность в нагрузках по отоплению и охлаждению, типа и коэффициента нагрузки трансформатора, удаленность потребителей тепла, стоимость электроэнергии, климатические условия и т. д.). Также был проанализирован общий потенциал трансформаторного масла Украины и других европейских стран с учетом всех стандартов. Прямое использование трансформаторного масла в качестве теплоносителя для системы отопления нецелесообразно из-за возможной его утечки из контура отопления, опасности возгорания или загрязнения. Кроме того, требуется большое количество масла из-за его относительно низкой теплоемкости.

Рациональное использование тепла, обусловленного потерями силовых трансформаторов, для покрытия тепловых нагрузок, является одним из возможных путей экономии электроэнергии на собственные нужды подстанций. Экономический эффект при этом достигается за счет снижения доли электроэнергии используемой на покрытие тепловых нагрузок (а в ряде случаев также на охлаждение и обдув трансформаторов) в общем объеме электроэнергии расходуемой на собственные нужды подстанции.

Для решения вопроса о технико-экономической целесообразности снижения потерь и возможных размерах такого снижения необходимо принимать во внимание такие факторы как удаленность подстанции от источников централизованного теплоснабжения, соизмеримость потерь тепла трансформаторов с его потребностью и т. д., а также на конкретные условия производства и передачи электроэнергии, сложившиеся в рассматриваемом регионе.

Список литературы

1. Гусар Ф. Г. Шляхи використання скидного тепла силових трансформаторів // Энергетика и электрификация, 1999. № 9. С. 38–40.
2. Schwarz H.-D., Bell G. Nutzung der Transformatorenverlustwaerme (TVW) in 110-kV-Umspannwerken // Energietechnik, 1987. № 2. S 68-72.
3. Воротницкий В. Э., Люблин А. С. Использование потерь силовых трансформаторов. – М.: ЭНАС, 1995. – 172 с.
4. Eickenhorst H., Siefen H. Transformatoren heizen ein Buerogebaeude // ETA: Elektrowaerme techn. Ausbau, 1989. № 4. S 140-145.
5. Швед П. и др. Утилизация тепловых потерь силовых трансформаторов с помощью тепловых насосов // Техническая электродинамика, 1993. № 5. С 47-49.
6. Dittmann A. Trafoverlustwaermenutzung fuer die Waermeversorgung // Energietechnik, 1984. № 8. S 305-309.

ENERGY EFFICIENCY OF THE WAYS OF WASTE HEAT DISPOSAL IN POWER TRANSFORMERS COOLING SYSTEMS

S. V. GRIDIN, Candidate of Engineering, Associate Professor
A. F. PETRENKO, The master

The paper analyses utilization of heat from power transformers for supply of heat to electric substations.

Поступила в редакцию