

В системе производства, передачи и распределения электроэнергии, ключевыми компонентами которой являются тепловые, атомные, гидравлические и другие электростанции, вырабатывающие электроэнергию, высоковольтные линии электропередачи (ЛЭП) и распределительные сети, передающие электроэнергию от электроподстанций к конечным потребителям, всегда существуют потери электроэнергии. В целом величина этих потерь приблизительно оценивается в системах передачи в 3,5% и в системах распределения в 4,5% от всей выработанной электроэнергии.

Распределительные трансформаторы и их роль в снижении потерь энергии в распределительных сетях

Константин Гура, НТУУ «КПИ»

По оценкам американских экспертов в одних лишь США суммарные потери систем передачи и распределения электроэнергии в 2005 году составили в денежном выражении более чем 21 млрд. USD. Поэтому (наряду с оптимизацией выработки электроэнергии) исключительно важной является проблема минимизации потерь при подаче электроэнергии потребителям, осуществляемая с помощью силовых распределительных трансформаторов. Решение этой проблемы, как будет показано в этой статье, в значительной мере может быть достигнуто путем существенного улучшения технических характеристик распределительных трансформаторов, в которых выделяется значительная часть общих потерь энергии в системах передачи и распределения электроэнергии.

Характеристика конструкций и технические характеристики распределительных трансформаторов, производимых в СНГ

Распределительные трансформаторы предназначены для работы в электрических сетях, осуществляющих непосредственное снабжение потребителей электроэнергией. Подавляющее большинство таких трансформаторов являются масляными (маслонаполненными). Кроме того, к распределительным трансформаторам относят также и другие типы трансформаторов, в том числе сухие с теми же пределами мощности и напряжения, а также трансформаторы с негорючим жидким диэлектриком. Количество этих типов трансформаторов в распределительных сетях непрерывно возрастает по мере совершенствования технологии их изготовления.

Системы охлаждения трансформаторов общего назначения (в том числе и распределительных) определяются требованиями

ми ГОСТ 11677-85. Соответствие условных обозначений видов систем охлаждения трансформаторов, принятых по ГОСТ и МЭК, приведены в [табл.1](#).

Масляные силовые распределительные трансформаторы (трансформаторы, у которых основной изолирующей и охлаждающей средой является трансформаторное масло). Мощности таких распределительных трансформаторов, выпускаемых рядом трансформаторных заводов СНГ, находятся в основном в диапазоне до 2500 кВ·А, а напряжение стороны обмотки высшего напряжения (ВН) обычно не превышает 33 (35) кВ. Такие трансформаторы, устанавливаемые на распределительных подстанциях, в специальных помещениях, непосредственно примыкающих к производственным цехам промышленных предприятий, а также в открытых распределительных устройствах (ОРУ), осуществляют электроснабжение промышленных предприятий и установок, жилых зданий и помещений, сельскохозяйственных предприятий и т.п. Напряжение электрических сетей цехов предприятий и жилых помещений (сторона низшего напряжения (НН) трансформаторов) может быть 380, 220, 127 В, а во взрывоопасных, сырых и других помещениях с повышенной опасностью – 36, 24 и 12 В.

По виду защиты масла от воздействий окружающей среды масляные распределительные трансформаторы, предназначенные для работы на открытых площадках, под навесом, в закрытых проветриваемых помещениях и в условиях повышенной влажности, могут выполняться:

- с проветриванием через устройства, заполненные силикагелем (типа ТМ), т.е. могут быть негерметичными;
- герметичными с гофрированным баком (типа ТМГ).



Рис. 1



Рис. 2

Общий вид двух типов масляных распределительных трансформаторов мощностью 630 кВ·А и напряжением 10 кВ – негерметичного и герметичного исполнения – показан на **рис.1** (тип ТМ-630/10) и на **рис.2** (тип ТМГ-630/10) соответственно.

Как видно из **рис.2**, герметичные трансформаторы типа ТМГ (в отличие от негерметичных типа ТМ) имеют гофрированные баки, полностью исключая контакт трансформаторного масла с окружающей средой. Это значительно улучшает условия эксплуатации масла, исключает его увлажнение, окисление и шлакообразование и, как следствие, позволяет полностью отказаться от ухода за маслом в процессе эксплуатации. Трансформаторы типа ТМГ полностью заливаются маслом под глубоким вакуумом, что увеличивает надежность работы их изоляции ввиду отсутствия непосредственного соприкосновения трансформаторного масла с кислородом воздуха. У трансформаторов типа ТМГ отсутствует расширитель, поскольку температурные изменения объема масла компенсируются упругой деформацией гофрированных стенок бака. Перед заливкой трансформаторное масло дегазируется, и поскольку в течение всего срока службы оно практически не меняет своих свойств, то тем самым отсутствует необходимость отбирать пробы масла для последующего анализа. Ресурс работы таких трансформаторов в течение 25 лет подтверждается специальными механическими испытаниями на износостойкость, включающими в себя 10000 циклов воздействия максимального и минимального давлений.

Маслонаполненные распределительные трансформаторы имеют ряд конструктивно-технологических особенностей. Так, их магнитопроводы имеют стержневую конструкцию, и для снижения потерь ХХ используется косой стык пластин в мес-

те соединения стержней и ярем, причем применение ступенчатого расположения стыков пластин (так называемое соединение «степ-лэп») в стержнях и ярях позволяет достичь дополнительного снижения этих потерь. Основными изоляционными материалами в таких трансформаторах являются кабельная бумага, электрокартон, бумажно-бакелитовые цилиндры и трубки, а также гетинакс. Регулирование напряжения в распределительных трансформаторах напряжением 6–10 кВ осуществляется (после отключения трансформатора от сети) в пределах $\pm 2,5\%$ с помощью устройств ПБВ (переключение без возбуждения), обеспечивающих изменение числа включенных витков обмотки ВН трансформатора.

Сухие силовые распределительные трансформаторы (трансформаторы, у которых основной изолирующей и охлаждающей средой является атмосферный воздух). Так как воздух является менее совершенной изолирующей и охлаждающей средой по сравнению с трансформаторным маслом, поэтому в сухих трансформаторах все изоляционные промежутки и вентиляционные каналы делают большими, чем в масляных.

Сухие трансформаторы изготавливают с обмотками со стеклоизоляцией класса нагревостойкости В (типа ТСЗ), а также с изоляцией на кремнийорганических лаках класса Н (типа ТСЗК), причем для уменьшения гигроскопичности обмотки пропитывают специальными лаками. Применение в качестве изоляции обмоток стекловолна или асбеста позволяет значительно повысить рабочую температуру



Рис.3

Таблица 1

Условное обозначение вида охлаждения		Вид системы охлаждения трансформатора
ГОСТ	МЭК	
Сухие трансформаторы		
С	AN	Естественное воздушное при открытом исполнении
СЗ	ANAN	Естественное воздушное при защищенном исполнении
СГ		Естественное воздушное при герметичном исполнении
СД	ANAF	Воздушное с принудительной циркуляцией воздуха
Масляные трансформаторы		
М	ONAN	Естественная циркуляция воздуха и масла
Д	ONAF	Принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла
МЦ	OFAN	Естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с ненаправленным потоком масла
НМЦ	ODAN	Естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с направленным потоком масла
ДЦ	OFAF	Принудительная циркуляция воздуха и масла с ненаправленным потоком масла
НДЦ	ODAF	Принудительная циркуляция воздуха и масла с направленным потоком масла
Ц	OFWF	Принудительная циркуляция воды и масла с ненаправленным потоком масла
НЦ	ODWF	Принудительная циркуляция воды и масла с направленным потоком масла
Трансформаторы с негорючим жидким диэлектриком		
Н	LNAF	Естественное охлаждение негорючим жидким диэлектриком
НД	LNAF	Охлаждение негорючим жидким диэлектриком с принудительной циркуляцией воздуха
ННД	LFAF	Охлаждение негорючим жидким диэлектриком с принудительной циркуляцией воздуха и с направленным потоком жидкого диэлектрика

Таблица 2

Мощность, кВ·А	Потери, Вт		Напряжение КЗ, %	Корректированный уровень звуковой мощности, дБ(А)
	ХХ	КЗ		
100	480	1850	4	58
160	670	1850	4	60
250	750	1850	4	65
400	820	1850	6	68
630	1750	1850	6	70
1000	2300	1850	6	73
1600	3100	1850	6	76
2500	4300	1850	6	81

обмоток и получить практически пожаробезопасную установку, что позволяет применять такие трансформаторы для установки внутри сухих помещений в тех случаях, когда обеспечение пожарной безопасности установки является решающим фактором.

Сухие трансформаторы имеют несколько большие габаритные размеры и массу (типа ТСЗ) и меньшую перегрузочную способность, чем масляные и используются для работы в закрытых помещениях с относительной влажностью не более 80%. Основные преимущества сухих трансформаторов: их пожаробезопасность (отсутствие масла), сравнительная простота конструкции и относительно малые затраты на эксплуатацию.

В настоящее время трансформаторные заводы СНГ освоили производство и серийно выпускают ряд серий таких трансформаторов, краткое описание и основные технические характеристики которых приведены ниже.

1. Трансформаторы силовые сухие серии ТС(З)ГЛ, комплектуемые обмотками с литой изоляцией типа «Геофоль» фирмы SIEMENS. Это силовые понижающие трехфазные двухобмоточные трансформаторы мощностью от 100 до 2500 кВ·А с номинальным напряжением первичной обмотки (обмотки ВН) до 10 кВ включительно и вторичной обмоткой (обмоткой НН) 0,4 кВ. Основные схемы и группы соединения обмоток (ВН/НН) – Д/Ун-11, У/Ун-0.



Рис.4

Технические характеристики трансформаторов серии ТС(З)ГЛ приведены в табл.2, а общий вид трансформатора этой серии показан на рис.3.

2. Трансформаторы силовые сухие серии ТСГЛ с обмотками с литой изоляцией типа «Геофоль» фирмы «SIEMENS». Эти трансформаторы, как и трансформаторы серии ТС(З)ГЛ, являются силовыми понижающими трехфазными двухобмоточными трансформаторами, однако они имеют другой ряд номинальных мощностей – от 630 до 2500 кВ·А и более высокий класс напряжения обмотки ВН, составляющий 20 кВ. Общий вид сухого распределительного трансформатора серии ТСГЛ показан на рис.4.

3. Трансформаторы силовые сухие серии ТС(З)Н с обмотками, изготовленными из проводов с изоляцией «NOMEX» класса нагревостойкости Н (180°С), двухобмоточные, общего назначения мощностью от 25 до 1600 кВ·А напряжением обмотки ВН до 10 кВ и обмотки НН 0,4 кВ. Магнитопроводы трансформаторов этой серии изготавливаются из высококачественной электротехнической стали. Специальная порезка на линии «Георг» и методы сборки с применением бандажей, стяжных шпилек и специальных клеев обеспечивают низкие потери ХХ и уровень шума. Трансформаторы изготавливаются со степенью защиты IP00 и IP20 (с кожухом).

Отметим, что при соблюдении определенных условий трансформаторы серии ТС(З)Н могут кратковременно работать при перегрузке без уменьшения срока службы (перегрузка ограничивается только перегревом обмоток). Максимальная избыточная температура в 125°С для класса изоляции Н достигается только тогда, когда температура окружающей среды

Таблица 3

Мощность, кВ·А	Потери, Вт		Напряжение КЗ, %	Корректированный уровень звуковой мощности, дБ(А)
	ХХ	КЗ		
25	150	1600	4	50
40	220	880	4	54
63	290	1280	4	54
100	390	1720	4	58
160	570	2300	4	60
250	750	2900	4	65
400	820	4300	6	68
630	1300	5500	6	70
1000	1900	8250	6	73
1600	2500	12350	6	76

Таблица 4

Наименование характеристики	Значение характеристики						
	ТСЗ - 6,3/0,38	ТСЗ- 10/0,38	ТСЗ- 16/0,38	ТСЗ- 20/0,38	ТСЗ- 25/0,38	ТСЗ- 40/0,38	ТСЗВ- 63/0,38
Номинальное напряжение обмотки ВН, В	6,3	10	16	20	25	40	63
Ток ХХ, не более, %	7,5					4,5	3,6
Потери ХХ, не более, кВт	0,195	0,25		0,195		0,25	0,4
Напряжение КЗ, не более, %	3,5			4,5		3,5	3,6
Потери КЗ, не более, кВт	0,62	0,65					1,2
Степень защиты	JP22						
Габаритные размеры, мм, длина x ширина x высота	500x400x 250	600x470x480		600x600x480		725x755x340	
Масса, кг	55	95	125	155	175	325	365

составляет 40°C и трансформатор работает длительное время при номинальной нагрузке. Если же температура окружающей среды ниже 10°C и/или предыдущая нагрузка меньше 100% от номинальной, то температуры обмоток будут ниже допустимого максимума.



Рис.5

Технические характеристики трансформаторов серии ТС(З)Н приведены в [табл.3](#), а общий вид трансформатора этой серии показан на [рис.5](#).

Отметим, что все из указанных выше серий сухих трансформаторов используются во многих отраслях народного хозяйства; их устанавливают в промышленных помещениях и общественных зданиях, к которым предъявляются повышенные требования в части пожаробезопасности, взрывозащищенности и экологической чистоты.

4. Трансформаторы силовые сухие серии ТСЗ – 6,3/0,38 УХЛ 2 мощностью 6,3 кВ·А ([рис.6](#)), а также трансформаторы серий ТЗС мощностью от 10 до 25 кВ·А. Такие трансформаторы предназначены для электроснабжения трехфазным переменным током частотой 50 Гц токоприемников различного напряжения.

Основные преимущества трансформаторов указанных выше серий:

- нагревостойкость изоляции класса В, позволяющая эксплуатировать трансформаторы этой серии в широком диапазоне изменения температур окружающей среды – от -45 до +50°C;
- электрическая прочность изоляции между обмотками ВН и НН составляет 3 кВ, что позволяет не заземлять сухие силовые трансформаторы;
- возможность подключения силового трансформатора на нужное напряжение сети (380 или 220 В). Изменение группы соединения обмотки ВН осуществляется на панели переключателями;
- подключение силового трансформатора осуществляется на панели с помощью латунных шпилек, что обеспечивает надежный контакт в процессе эксплуатации;

- активная часть силового трансформатора этой серии защищена корпусом, имеющим специальные отверстия (жалюзи) для вентиляции, причем на корпусе со стороны ВН и НН предусмотрены специальные устройства (сальники) для фиксации подводимого и отводимого кабелей – с целью избежать их выдергивание в процессе эксплуатации.

Основные технические характеристики трансформаторов серий ТСЗ - 6,3/0,38; ТСЗ-10/0,38; ТСЗ16/0,38; ТСЗ 20/0,38; ТСЗ-25/0,38; ТСЗ-40/0,38 и ТСЗВ-63/0,38 приведены в [табл.4](#).

5. Распределительные трансформаторы с негорючим жидким диэлектриком, обычно относящиеся к трансформаторам I–III габаритов, устанавливаются в непосредственной близости от потребителя – с целью обеспечения пожаро- и взрывобезопасности, а в последнее время также и с целью санитарной и экологической безвредности.

Трансформаторы, заполненные негорючим жидким диэлектриком, в основном, имеют конструкцию, близкую к традиционной, причем в связи с повышенным влагопоглощением, интенсивным выделением паров, жидкости и т.д., требуется герметизированное исполнение таких трансформаторов.



Рис.6

Отметим, что после запрета использования в 1979 г. в США, Японии и некоторых европейских странах в трансформаторах в качестве охлаждающей и изолирующей жидкости негорючих полихлордифенилов (сокращенно - ПХД) в связи с их высокой токсичностью и устойчивостью к процессам биоразложения ведущие мировые трансформаторные компании включились в интенсивный поиск жидких диэлектриков-заменителей ПХД.

В результате этих поисков было установлено, что для этих целей наиболее приемлемыми, совместимыми с материалами, обычно используемыми в масляных трансформаторах, является негорючий жидкий диэлектрик, который должен быть самогасящимся, нетоксичным, биоразлагаемым, иметь низкий коэффициент объемного расширения при нагреве.

(Продолжение следует)