

0,001 с показывает, что вид полученного переходного процесса практически идентичен виду переходного процесса при непрерывном управляющем воздействии [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ч е т и, П. Проектирование ключевых источников электропитания / П. Чети; пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.
2. М и р о н о в и ч, А. В. Синтез системы автоматического управления повышающим преобразователем постоянного напряжения при работе на активную нагрузку / А. В. Миронович, П. П. Примшиц // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2005. – № 6. – С. 29–36.
3. М и р о н о в и ч, А. В. Синтез системы автоматического управления повышающим преобразователем постоянного напряжения, работающим в режиме гранично-непрерывного тока / А. В. Миронович, П. П. Примшиц // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2007. – № 3. – С. 32–38.
4. А н х и м ю к, В. Л. Теория автоматического управления / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Опейко, Н. Н. Михеев. – Минск: Дизайн ПРО, 2000. – 352 с.

Представлена кафедрой
электропривода и автоматизации
промышленных установок
и технологических комплексов

Поступила 21.11.2007

УДК 621.316.925

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЕ МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Кандидаты техн. наук ШИРОКОВ О. Г., КУРГАНОВ В. В., ЗАЛИЗНЫЙ Д. И.

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

Масляные трансформаторы мощностью 1000 кВ·А и выше в обязательном порядке оснащаются термометром с электроконтактным выходом для реализации тепловой защиты, действующей в большинстве случаев на сигнал. Термометр, как правило, устанавливают в верхней части бака трансформатора, где температура масла максимальна. В качестве уставки принимают максимально допустимую температуру масла для систематических нагрузок трансформатора в соответствии с ГОСТ 14209–85, равную 95 °С. Такая защита является простейшей и не требует расчетов уставок и согласований с другими защитами. В связи с этим в литературе практически отсутствуют какие-либо теоретические сведения по тепловой защите силовых трансформаторов, за исключением сведений по ее технической реализации. В классических учебных пособиях по релейной защите термин «тепловая защита трансформатора» вовсе не упоминается [1, 2].

В последние годы в электроэнергетике все большее распространение получают многофункциональные микропроцессорные устройства релейной защиты (МППЗ). Один блок МППЗ позволяет реализовать десятки различных функций защит и видов измерений. В программное обеспечение МППЗ можно включать алгоритмы высокой сложности, анализируя защищаемый объект по множеству параметров. Это относится и к тепловой защите трансформатора.

Современные системы МППЗ трансформаторов типа SEPAM, SPACOM и т. д. позволяют осуществлять контроль значений температуры масла в верхних и нижних слоях бака трансформатора, а также контроль температуры обмотки трансформатора. Эти значения могут как контролироваться непосредственно с помощью термодатчиков, так и прогнозироваться косвенно на основе математических моделей [3, 4]. В программном обеспечении современных МППЗ заложены алгоритмы выявления перегрева трансформатора, но алгоритмы выявления аномального нагрева (в том смысле, как это рассматривается в статье) отсутствуют.

Таким образом, задача тепловой защиты трансформатора на сегодняшний день является достаточно наукоемкой и требует серьезной теоретической базы. Цель данной статьи – сформулировать основные теоретические положения по тепловой защите силового трансформатора в соответствии с классической теорией релейной защиты и теорией диагностики с целью унификации терминологической и аналитической информации, имеющейся на сегодняшний день по этой проблеме.

Вначале проанализируем факторы, обуславливающие аномальные тепловые процессы в силовых трансформаторах. Одна или более частей трансформатора могут быть перегреты по трем основным причинам:

- 1) перегрузка трансформатора;
- 2) высокая загрузка трансформатора и высокой температуры воздуха;
- 3) неисправность системы охлаждения или внутренних повреждений трансформатора.

Первые два фактора относятся к полностью исправному трансформатору. В этих случаях трансформатор перегрет по естественным причинам. Третий фактор свидетельствует о том, что трансформатор перегрет неестественно, т. е. аномально. Если температуры частей поврежденного или имеющего неисправности трансформатора не превышают критических значений, но выше аналогичных значений в полностью исправном трансформаторе, то имеет место аномальный (неестественный) нагрев трансформатора.

Можно выделить следующие основные причины аномального нагрева или аномального перегрева одной или более частей масляного трансформатора [5]:

- 1) нарушение условий охлаждения из-за перекрытия охлаждающих каналов циркулирующего масла разбухшей изоляцией или накопившимся шламом;
- 2) межвитковые короткие замыкания или короткозамкнутые контуры в шихтованном магнитопроводе;
- 3) повышенные диэлектрические потери твердой изоляции и трансформаторного масла;

4) разуплотнение конструктивных элементов трансформатора и, как следствие, повышенное влияние магнитного потока рассеяния, нагревающего эти элементы.

Аномально могут быть нагреты отдельные участки трансформатора или же весь трансформатор в целом. Следовательно, необходимо различать локальный и общий аномальный нагрев трансформатора. Таким образом, можно сформулировать следующие термины для аномальных тепловых режимов силовых трансформаторов.

Естественный перегрев – это превышение температуры одной или более частей полностью исправного силового трансформатора по сравнению с предельно допустимой температурой этих частей.

Аномальный перегрев – это превышение температуры одной или более частей неисправного силового трансформатора по сравнению с предельно допустимой температурой этих частей.

Аномальный нагрев – это более высокое значение температуры одной или более частей неисправного силового трансформатора по сравнению с температурой, которая имела бы место в полностью исправном трансформаторе при прочих равных условиях. Частным случаем аномального нагрева является аномальный перегрев трансформатора.

Классификация аномальных тепловых режимов силовых трансформаторов проиллюстрирована на рис. 1. Предложенная классификация аномальных тепловых режимов силовых трансформаторов дается впервые. На сегодняшний день в литературе подобная классификация отсутствует.

Рассмотрим принципы выявления каждого из этих режимов.



Рис. 1. Классификация аномальных тепловых режимов силовых трансформаторов

Пусть $\theta_{м.вс}$, $\theta_{м.нс}$ и $\theta_{нтс}$ – соответственно температуры верхних, нижних слоев масла и температура обмотки, т. е. температура наиболее нагретой точки трансформатора (ННТ). Тогда алгоритм выявления перегрева трансформатора можно записать следующим образом:

$$R_0 = (\theta_{м.вс} \geq \theta_{м.вс.макс}) \vee (\theta_{м.нс} \geq \theta_{м.нс.макс}) \vee (\theta_{нтс} \geq \theta_{нтс.макс}), \quad (1)$$

где R_0 – булева функция [6]; \vee – знак дизъюнкции; $\theta_{м.вс.макс}$, $\theta_{м.нс.макс}$, $\theta_{нтс.макс}$ – максимально допустимые значения соответствующих температур.

Булева функция R_0 введена в качестве ситуационного индикатора. Если $R_0 = 1$, то трансформатор перегрет, в противном случае $R_0 = 0$.

В соответствии с алгоритмом (1) работают практически все существующие системы тепловой защиты трансформатора, в том числе и МПРЗ. Однако такой алгоритм не позволяет выявить тип перегрева трансформатора (естественный или аномальный) и тем более аномальный нагрев трансформатора. Эту проблему можно решить, расширив программное обеспечение МПРЗ путем введения алгоритмов, функционирующих на основе математических моделей тепловых процессов масляных трансформаторов. Такие модели должны учитывать значения температуры окружающей среды, токов нагрузки трансформатора, количество задействованных охлаждающих устройств, паспортные данные трансформатора и быть достаточно точными для полностью исправного трансформатора [4, 7].

Пусть $\hat{\theta}_{м.вс}$, $\hat{\theta}_{м.нс}$ и $\hat{\theta}_{нтт}$ – соответствующие температуры, рассчитанные по достаточно точной математической модели, имеющей максимальную абсолютную погрешность $\Delta\hat{\theta}_{max}$. Исследования, проведенные авторами, показывают, что для большинства масляных трансформаторов достаточно точной является точность модели, когда $\Delta\hat{\theta}_{max} = 2,2 \text{ }^\circ\text{C}$ [7]. Такой точности можно достичь, используя параметрически адаптивную математическую модель [7]. Разность между непосредственно измеренной и рассчитанной по математической модели температурами будем называть характеристической разностью. Для каждой из рассматриваемых температур характеристическая разность запишется в виде:

$$\Delta\theta_{м.вс} = \theta_{м.вс} - \hat{\theta}_{м.вс}; \quad \Delta\theta_{м.нс} = \theta_{м.нс} - \hat{\theta}_{м.нс}; \quad \Delta\theta_{нтт} = \theta_{нтт} - \hat{\theta}_{нтт}.$$

Характеристическая разность позволяет выявлять аномальный нагрев и перегрев трансформатора. Для этого ее необходимо сравнить со значением величины $\Delta\hat{\theta}_{max}$. Алгоритмы выявления различных аномальных тепловых режимов масляных трансформаторов сведены в табл. 1. При этом по аналогии с алгоритмом (1) использованы булевы функции R_1 – R_4 , а также знаки дизъюнкции « \vee », конъюнкции « \wedge » и инверсии « \bar{X} ».

Таблица 1

Алгоритмы выявления аномальных тепловых режимов силового масляного трансформатора

Тип теплового режима	Алгоритм
Общий аномальный перегрев	$R_1 = \left((\Delta\theta_{м.вс} \geq \Delta\hat{\theta}_{max}) \wedge (\Delta\theta_{м.нс} \geq \Delta\hat{\theta}_{max}) \wedge (\Delta\theta_{нтт} \geq \Delta\hat{\theta}_{max}) \right) \wedge R_0$
Локальный аномальный перегрев	$R_2 = \left((\Delta\theta_{м.вс} \geq \Delta\hat{\theta}_{max}) \vee (\Delta\theta_{м.нс} \geq \Delta\hat{\theta}_{max}) \vee (\Delta\theta_{нтт} \geq \Delta\hat{\theta}_{max}) \right) \wedge R_0 \wedge \bar{R}_1$
Общий аномальный нагрев	$R_3 = (\Delta\theta_{м.вс} \geq \Delta\hat{\theta}_{max}) \wedge (\Delta\theta_{м.нс} \geq \Delta\hat{\theta}_{max}) \wedge (\Delta\theta_{нтт} \geq \Delta\hat{\theta}_{max})$
Локальный аномальный нагрев	$R_4 = \left((\Delta\theta_{м.вс} \geq \Delta\hat{\theta}_{max}) \vee (\Delta\theta_{м.нс} \geq \Delta\hat{\theta}_{max}) \vee (\Delta\theta_{нтт} \geq \Delta\hat{\theta}_{max}) \right) \wedge \bar{R}_3$

Очевидно, что понятие «уставки» для тепловой защиты трансформатора необходимо расширить. Можно различать фиксированные уставки, равные максимально допустимым температурам, т. е. в рассматриваемом слу-

чае значениям $\theta_{\text{м.вс.мах}}$, $\theta_{\text{м.нс.мах}}$, $\theta_{\text{ннс.мах}}$, а также переменные уставки, получаемые расчетным путем на основе математических моделей, т. е. равные значениям $\hat{\theta}_{\text{м.вс}}$, $\hat{\theta}_{\text{м.нс}}$ и $\hat{\theta}_{\text{ннт}}$.

Аномальный нагрев однозначно указывает на наличие неисправности в трансформаторе, и факт ее обнаружения тепловой защитой позволяет судить в той или иной мере о техническом состоянии трансформатора. Следовательно, такая защита обладает функциями диагностирования. В связи с этим тепловую защиту трансформатора, функционирующую в соответствии с изложенными выше алгоритмами, следует называть диагностической тепловой защитой.

В теории диагностики при формулировке технического диагноза используют ранжирование типа «плохо», «удовлетворительно», «хорошо» и так далее. Аналогичные характеристики можно предусмотреть и для диагностической тепловой защиты. Назовем их уровнями опасности аномального нагрева трансформатора. Будем различать низкий, средний, высокий и очень высокий уровни опасности.

При низком уровне опасности вероятность возникновения аварии на трансформаторе из-за наличия режима аномального нагрева пренебрежимо мала. Поэтому в данном случае действие защиты должно быть на визуальный сигнал (зажигание сигнальной лампы или выдача соответствующего сообщения на экране ПЭВМ), а дежурный персонал должен записать дату и время обнаружения режима аномального нагрева.

Средний уровень опасности показывает, что имеется некоторая вероятность возникновения аварии на трансформаторе. В данном случае действие защиты должно быть и на визуальный, и на звуковой сигнал. Дежурный персонал обязан поставить в известность вышестоящее лицо. При среднем уровне опасности необходимо принять решение о внеочередном осмотре и испытании изоляции трансформатора [8, с. 46].

При высоком уровне опасности возникновение аварийной ситуации на трансформаторе можно считать достаточно вероятным. Здесь, как и при среднем уровне, действие защиты должно быть и на визуальный, и на звуковой сигнал. В данном случае оперативному персоналу необходимо принять решение о выводе трансформатора из эксплуатации в соответствии с ПТЭ [8, с. 47]. При отсутствии дежурного персонала диагностическая тепловая защита должна действовать на устройство автоматической разгрузки трансформатора, параллельно существующей защите от перегрузки, реагирующей на аварийное значение тока. Телеметрический сигнал высокого уровня опасности должен быть передан на диспетчерский пункт.

Очень высокий уровень опасности свидетельствует о высокой вероятности возникновения аварии на трансформаторе. В данном случае защита должна действовать вначале на разгрузку, а затем – на отключение трансформатора. При этом следует отметить, что сама по себе разгрузка трансформатора не устраняет выявленную неисправность, например, в системе охлаждения, а лишь отодвигает срок вывода трансформатора в ремонт.

Рассмотрим методику выявления уровня опасности аномального нагрева трансформатора. Пусть $\Delta\theta_{\text{y.o}}$ – максимальное изменение характеристической разности, соответствующее переходу между соседними уровнями

ми опасности режима аномального нагрева трансформатора. Очевидно, что достоверное значение величины $\Delta\theta_{y.o}$ может быть получено при наличии многолетнего опыта эксплуатации диагностической тепловой защиты силового трансформатора. На сегодняшний день в мировой энергетике такой опыт отсутствует. Однако теоретически можно предположить, что значение $\Delta\theta_{y.o}$ соответствует потере трансформатором одной ступени охлаждения, т. е. температуре 5 °С [9]. Таким образом, при наличии развивающейся неисправности в трансформаторе увеличение характеристической разности на каждые 5 °С будет эквивалентно ухудшению условий охлаждения трансформатора, как в случае отключения одной ступени охлаждения.

Алгоритм выявления уровня опасности аномального нагрева трансформатора можно записать в виде

$$L_i = \left(\left(\Delta\theta_{m.вс} \geq \Delta\hat{\theta}_{max} + i\Delta\theta_{y.o} \right) \vee \left(\Delta\theta_{m.нс} \geq \Delta\hat{\theta}_{max} + i\Delta\theta_{y.o} \right) \vee \left(\Delta\theta_{нтт} \geq \Delta\hat{\theta}_{max} + i\Delta\theta_{y.o} \right) \right) \wedge (R_1 \vee R_2 \vee R_3 \vee R_4), \quad (2)$$

где $i = \{0; 1; 2; 3\}$ – номер уровня опасности (0 – низкий; 1 – средний; 2 – высокий; 3 – очень высокий); L_i – набор булевых функций, указывающих на наличие или отсутствие какого-либо из уровней опасности (наличие среднего уровня опасности и выше автоматически предполагает наличие более низких уровней, что учтено в алгоритме).

Характеристика действия диагностической тепловой защиты трансформатора показана на рис. 2, при этом характеристическая разность условно обозначена $\Delta\theta$.

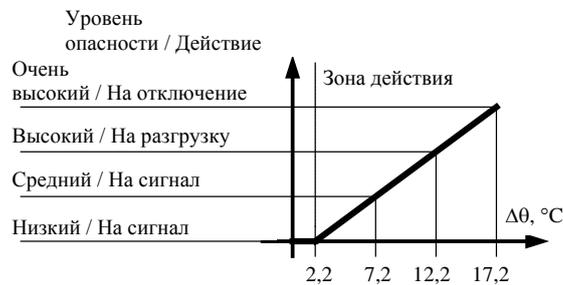


Рис. 2. Характеристика действия диагностической тепловой защиты силового масляного трансформатора

В теории релейной защиты основными требованиями, предъявляемыми к защите, являются ее селективность и чувствительность [1, 2]. Под селективностью диагностической тепловой защиты, действующей на сигнал, будем понимать свойство данной защиты однозначно указывать на тип и уровень опасности режима аномального нагрева трансформатора. Очевидно, что при такой формулировке абсолютная селективность защиты обеспечивается правильным выполнением алгоритмов (1), (2), (табл. 1).

Чувствительность диагностической тепловой защиты трансформатора будет определяться точностью математической модели, по которой рассчитывались переменные уставки. Защита не будет чувствительна к аномальному нагреву трансформатора, если характеристическая разность не

превысит значение абсолютной погрешности $\Delta\hat{\theta}_{\max}$ (рис. 2). Поэтому коэффициент чувствительности будем определять для каждого уровня опасности аномального нагрева трансформатора как отношение характеристической разности к величине $\Delta\hat{\theta}_{\max}$

$$K_{\text{чи}} = \frac{i\Delta\theta_{\text{y.o}} + \Delta\hat{\theta}_{\max}}{\Delta\hat{\theta}_{\max}} = 1 + \frac{i\Delta\theta_{\text{y.o}}}{\Delta\hat{\theta}_{\max}},$$

где $i = \{0; 1; 2; 3\}$ – номер уровня опасности.

Таким образом, чем выше уровень опасности, тем выше чувствительность защиты ($K_{\text{ч0}} = 1$).

Широкие функциональные возможности современных МПРЗ позволяют отнести к классу диагностических защит не только тепловую защиту силового масляного трансформатора, но и другие виды защит, позволяющие косвенно реагировать на техническое состояние объекта защиты и соответственно повышающие надежность эксплуатации этого объекта.

ВЫВОД

Используя предложенную классификацию аномальных тепловых режимов силовых трансформаторов, а также алгоритмы для их выявления, можно реализовывать новые системы раннего диагностирования трансформаторов либо соответственно расширять возможности существующих систем диагностирования. Можно также МПРЗ придать диагностические функции по раннему обнаружению неисправностей, обусловивших аномальный нагрев трансформатора, что, в свою очередь, будет способствовать повышению надежности эксплуатации электроэнергетического оборудования. При этом аппаратная часть существующих систем диагностирования или МПРЗ существенных изменений не претерпит, а в программном обеспечении потребуются дополнительные модули.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / В. А. Андреев. – М.: Высш. шк., 1991. – 496 с.
2. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем: учеб. пособие для техникумов / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
3. Pat. 6424266 U. S., Int. CI G08B17/00. Apparatus for preventing thermal damage to an electrical power transformer / Mark Antony Weekes [et al.]. Filed 17.07.2000; Granted 23.07.2002; www.patft.uspto.gov
4. Учет температуры внешней охлаждающей среды при моделировании тепловых процессов в силовых масляных трансформаторах / Ю. А. Рунов [и др.] // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2004. – № 5. – С. 42–48.
5. Цирель, Я. А. Эксплуатация силовых трансформаторов на электростанциях и в электросетях / Я. А. Цирель, В. С. Поляков. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 264 с.
6. Плотников, А. Д. Дискретная математика / А. Д. Плотников. – М.: ООО «Новое знание», 2006. – 304 с.
7. Широков, О. Г. Параметрическая идентификация математической модели тепловых процессов силового трансформатора / О. Г. Широков, Д. И. Зализный, Д. М. Лось // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2005. – № 1. – С. 35–42.

8. П р а в и л а технической эксплуатации электроустановок потребителей и Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. – Вильнюс: ЗАО «Ксения», 2006. – 671 с.

9. О б о п т и м и з а ц и и работы систем охлаждения трансформаторов и автотрансформаторов 110–330 кВ / Эксплуатационный циркуляр № Ц-01-2000(Э): Белорусский государственный энергетический концерн (Белэнерго), 2000.

10. У с т р о й с т в о для диагностирования трехфазного силового масляного трансформатора на аномальный нагрев: пат. и20070079 Респ. Беларусь, МПК7 Н02Н6/00 / О. Г. Широков, Д. И. Зализный, Л. К. Ивинский, Д. М. Лось; заявл. 02.02.2007; опубл. 30.08.2007 // Изобретения, полезные модели, промышленные образцы: Официальный бюл. – 2007. – № 4. – С. 242.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 8.08.2007

УДК 621.311

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА В УСЛОВИЯХ РОСТА ЦЕН НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

Канд. техн. наук, доц. КОЛЕСНИК Ю. Н., асп. ИВАНЕЙЧИК А. В.

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

Одним из основных способов снижения электропотребления является внедрение энергосберегающих источников света. Однако такие мероприятия отличаются как по техническим, так и экономическим показателям. Например, современные источники света отличаются электропотреблением до 20 крат, стоимостью и сроком службы – до 100 крат [1]. Благодаря появлению светодиодных источников света срок службы которых составляет более 10 лет непрерывной работы, мероприятия по энергосбережению в электроосвещении перешли в разряд долгосрочных. Поэтому возникает важная задача комплексной оценки эффективности, учитывающей не только энергетические показатели и стоимость источников света, но также сроки их службы и динамику роста цен на электроэнергию. Последнее весьма актуально не только в настоящее время, но и в перспективе, когда ежегодный рост цен на энергоресурсы планируется на уровне не менее 30 % [2].

Уточнение оценки эффективности источников света позволит выявить степень влияния роста цен на электроэнергию непосредственно на показатели экономической оценки, установить условия внедрения ламп накаливания (ЛН), люминесцентных (ЛН) и светодиодных (СД) источников света.

В целях оценки экономической и энергетической эффективности использования светодиодов в качестве источников света на кафедре «Элек-