

$$K_q = 0,866 \cdot 512 / 312 = 1,42 < 1,5.$$

Для второго варианта расчета чувствительность защиты трансформатора оказалась недостаточной: $K_q < 1,5$.

ВЫВОД

Повысить расчетный коэффициент чувствительности релейной защиты трансформатора с переключателем напряжения $\Delta U_{\text{РПН}} = \pm 16\%$ можно за счет применения уточненного метода расчета минимального и максимального токов короткого замыкания за трансформатором при промежуточных ответвлениях переключателя РПН, соответствующих реальному диапазону изменения напряжения в сетях 110 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. П р а в и л а устройства электроустановок. – 6-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1999.
2. Ш а б а д, М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М. А. Шабад. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Б е л я е в, А. В. Противоаварийное управление в узлах нагрузки с синхронными электродвигателями большой мощности / А. В. Беляев. – М.: НТФ «Энергопресс», 2004.
4. А в е р б у х, А. М. Релейная защита в задачах с решениями и примерами / А. М. Авербух. – Л.: Энергия, 1975.
5. Р у к о в о д я щ и е указания по релейной защите. Р85. Вып. 13Б. Релейная защита понижающих трансформаторов 110–500 кВ: расчеты. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 20.02.2009

УДК 621.311:658.012.011.56

РАСЧЕТ РЕСУРСА ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ В АСУ ТП ПОДСТАНЦИЙ

Инженеры БУРЛЮК В. В., ЖЕРКО С. Н.

УП «НИИ средств автоматизации»

Трансформаторы и автотрансформаторы являются основным электро-техническим оборудованием подстанций. По своему конструктивному исполнению они бывают трех- и однофазными с различными системами и средами охлаждения.

Ресурс данного оборудования определяется по состоянию изоляции обмотки и рассчитывается исходя из времени эксплуатации, величины загрузки и теплового состояния. Нормативный срок службы изоляции обмотки составляет 20–25 лет с учетом того, что температура наиболее нагретой части обмотки не превышает 98 °С. При нарушении нормального

режима работы нормативный срок службы изоляции обмотки может сильно изменяться.

Из-за отсутствия обоснованного представления об износе изоляции обмотки стремятся завышать мощность трансформаторов. Это приводит к тому, что большинство трансформаторов имеют неоправданно низкую нагрузку, редко превышающую $(0,3-0,6)S_{\text{ном}}$. В результате этого трансформаторный парк используется плохо, а капиталовложения – неэффективно.

Нагрузочный режим трансформаторов (автотрансформаторов) в настоящее время контролируется с помощью сигнализации перегрузки, а также осуществляется контроль температуры верхних слоев масла. При контроле температуры верхних слоев масла хотя и учитываются предшествующая нагрузка и условия охлаждения, однако нет возможности достоверно судить о главном факторе – температуре наиболее нагретой точки (ННТ) обмотки, что обуславливает актуальность задачи контроля теплового состояния обмотки и ресурса трансформаторов и автотрансформаторов [1].

В статье рассматривается алгоритм расчетного метода текущего контроля температуры ННТ обмотки и учета ресурса трансформаторов и автотрансформаторов, предлагаемый для реализации в составе комплекса задач АСУ ТП подстанции или в качестве отдельной автоматизированной функции.

Предлагаемый алгоритм на основе периодически выполняемых измерений тока нагрузки I_n и температуры верхних слоев масла Θ_m обеспечивает расчет температуры ННТ обмотки, износа и остаточного ресурса витковой изоляции обмотки.

Согласно [2] приняты следующие допущения:

- изменения температуры в переходных тепловых процессах, т. е. при учете тепловых постоянных времени, принимать протекающими по экспоненциальному закону, а допустимо установившиеся значения температуры при этом достигаются за промежуток времени, равный четырем тепловым постоянным времени;
- при расчете не учитывается изменение сопротивления обмоток, теплоемкости и вязкости масла с повышением температуры вследствие практически приемлемой компенсации их взаимного влияния на температуру обмоток;
- расчет температуры ННТ обмоток и износа витковой изоляции следует определять для прямоугольных двух- или многоступенчатых графиков нагрузки, в которые необходимо преобразовать реальные исходные графики нагрузки. Расчет проводится последовательно для каждой ступени с учетом того, что каждая предыдущая нагрузка является начальной для следующей ступени ступенчатого графика нагрузки;
- для трехобмоточных трансформаторов (автотрансформаторов) измерения тока нагрузки следует проводить для наиболее нагруженной обмотки;
- при неравномерной нагрузке трансформатора (автотрансформатора) измерения тока нагрузки следует проводить для наиболее нагруженной фазы обмотки.

Исходными данными для решения задачи по каждому трансформатору (автотрансформатору) являются:

1. Настраиваемые параметры задачи:

- Δt – интервал накопления и обобщения (усреднения) сигналов телеизмерений, мин;

- $\Delta K_{\text{ст}}$ – ширина коридора зоны нечувствительности, определяющая точность формирования ступенчатого графика нагрузки, %.

2. Настраиваемые параметры трансформатора (автотрансформатора):

- $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток нагрузки, А;

- $\tau_{\text{обм}}$ – тепловая постоянная обмотки, мин;

- $F_{\text{ном}}$ – нормированный износ витковой изоляции (срок службы трансформатора (автотрансформатора)), «нормальные сутки износа»;

- $F_{\text{пред}}$ – фактический предыдущий износ витковой изоляции до ввода в эксплуатацию задачи на данной подстанции, «нормальные сутки износа».

Согласно [2] температуру и износ витковой изоляции обмотки необходимо рассчитывать по каждому из m участков (ступеней) после преобразования расчетного исходного графика нагрузки в эквивалентный (в тепловом отношении) ступенчатый график с нагрузками $K_1, K_2, \dots, K_m$, и продолжительностью ступеней $\Delta T_1 = t_1, \Delta T_2 = t_2 - t_1, \dots, \Delta T_m = t_m - t_{m-1}$.

Формирование исходных суточных графиков нагрузки и температуры масла по каждому трансформатору (автотрансформатору) производится в интервалах Δt (параметр, настраиваемый в минутах) путем усреднения значений телеизмерений тока нагрузки I_n и температуры масла Θ_m . Их размерность определяется кратностью заданного интервала Δt к длительности суток, выраженных в минутах. Выбор точки измерения тока нагрузки определяется пользователем с учетом изложенных выше допущений.

В автоматическом режиме запуск задачи осуществляется в момент смены суток для определения износа витковой изоляции обмотки за истекшие сутки.

В полуавтоматическом режиме запуск задачи производят по команде оператора с указанием даты контролируемых суток, по которым необходимо произвести расчет износа витковой изоляции обмотки. Этот режим позволяет проводить выборочный контроль суточного износа витковой изоляции обмоток.

При каждом запуске функции на основании исходного суточного графика нагрузки осуществляют построение расчетного суточного графика относительной нагрузки согласно [2]:

$$K_1 = \frac{I_{n1}}{I_{\text{ном}}}; \quad K_2 = \frac{I_{n2}}{I_{\text{ном}}}; \quad \dots; \quad K_n = \frac{I_{nn}}{I_{\text{ном}}}, \quad (1)$$

где 1, 2, ..., n – подстрочные индексы, обозначающие порядковые номера усредненных значений телеизмерений тока нагрузки I_n и расчетных значений относительной нагрузки; $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток нагрузки (настраиваемый параметр).

Алгоритм преобразования расчетного исходного суточного графика относительной нагрузки контролируемых суток в ее эквивалентный прямоугольный график при заданном значении $\Delta K_{\text{ст}}$ и полном или частичном

отсутствии данных по телеизмерениям за первые предыдущие сутки относительно контролируемых суток предполагает выполнение следующих процедур:

- расчет значений нижней и верхней границ коридора зоны нечувствительности в соответствии с величиной первой относительной нагрузки ее исходного расчетного суточного графика:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{1н} = K_1 - \frac{\Delta K_{ст} K_1}{200}; \\ K_{1в} = K_1 + \frac{\Delta K_{ст} K_1}{200}; \end{array} \right\} \quad (2)$$

- проверку на вхождение в коридор зоны нечувствительности последующих значений относительной нагрузки исходного контролируемого суточного графика нагрузки:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{1н} \leq K_2 \leq K_{1в}; \\ K_{1н} \leq K_3 \leq K_{1в}; \\ \dots\dots\dots \\ K_{1н} \leq K_{l-1} \leq K_{1в}; \\ K_{1н} \leq K_l \leq K_{1в}; \end{array} \right\} \quad (3)$$

- фиксацию порядкового номера текущего значения относительной нагрузки K_l , которое вышло из коридора зоны нечувствительности;
- определение среднего значения относительной нагрузки для первой ступени по значениям относительных нагрузок $K_1, \dots, K_{l-1}$;
- формирование следующей ступени эквивалентного прямоугольного графика нагрузки путем расчета значений верхней и нижней границ коридора зоны нечувствительности относительно значения нагрузки K_l по (2) и выполнение процедуры по (3), начиная с относительной нагрузки K_{l+1} и далее расчет среднего значения относительной нагрузки для второй ступени. В итоге последовательное выполнение описанных выше процедур на протяжении всего исходного расчетного суточного графика относительной нагрузки обеспечивает построение эквивалентного прямоугольного графика относительной нагрузки с точностью, определяемой шириной зоны нечувствительности $\Delta K_{ст}$ (параметр настраиваемый).

Одновременно ведется подсчет длительности каждой ступени:

$$\Delta T_1 = S_1 \Delta t; \quad \Delta T_2 = S_2 \Delta t; \quad \dots; \quad \Delta T_m = S_m \Delta t, \quad (4)$$

где $S_1, S_2, \dots, S_m$ – количество относительных нагрузок исходного расчетного суточного графика нагрузки, значения которых соответствуют условиям выражения (3) по каждой ступени нагрузки; Δt – интервал накопления и обработки телеизмерений (параметр, настраиваемый в минутах); $1, 2, \dots, m$ – подстрочные индексы, обозначающие порядковые номера ступеней нагрузки.

Алгоритм преобразования исходного расчетного суточного графика относительной нагрузки контролируемых суток в эквивалентный прямоугольный график относительной нагрузки при наличии полной базы дан-

ных по телеизмерениям за первые предыдущие сутки относительно контролируемых суток предполагает выполнение описанных выше процедур, начиная с последнего значения относительной нагрузки за первые предыдущие сутки относительно контролируемых суток. Для первой ступени контролируемых суток фиксируется значение относительной нагрузки по последней ступени первых предыдущих суток относительно контролируемых суток при условии ее дальнейшего продолжения в контролируемых сутках.

Температура масла учитывает температуру окружающей охлаждающей среды, условия охлаждения и предыдущую нагрузку. Построение суточного расчетного графика теплового состояния ННТ обмотки производится на основе суточного эквивалентного прямоугольного графика относительной нагрузки, алгоритм построения которого описан выше. При этом текущие значения температуры ННТ обмотки $\Theta_{\text{ННТтр}}$ определяются согласно [2]

$$\Theta_{\text{ННТтр}} = \Theta_{\text{Мтр}} + \vartheta_{\text{ННТтр}}, \quad (5)$$

где $\Theta_{\text{Мтр}}$ – зарегистрированные по времени усредненные значения (график) телеизмерений температуры масла; $\vartheta_{\text{ННТтр}}$ – расчетные значения превышения температуры (перегрева) ННТ обмотки над маслом; тр – двоякий подстрочный индекс, обозначающий порядковые номера ступеней графика нагрузки ($t = 1, \dots, t$) и порядковые номера температуры масла и расчетных значений перегрева ННТ обмотки над маслом ($p = 1, \dots, p$) по каждой ступени относительной нагрузки.

Значения перегрева ННТ обмотки над маслом $\vartheta_{\text{ННТтр}}$ по текущей ступени относительной нагрузки определяются с учетом $\tau_{\text{обм}}$ согласно [3]

$$\vartheta_{\text{ННТтр}} = \vartheta'_{\text{ННТ}(m-1)} + (\vartheta_{\text{ННТуст}} - \vartheta'_{\text{ННТ}(m-1)})(1 - \exp(-P\Delta t / \tau_{\text{обм}})), \quad (6)$$

где $\vartheta'_{\text{ННТ}(m-1)}$ – расчетное значение перегрева ННТ обмотки над маслом по концу предыдущей ступени относительной нагрузки; тр – двоякий подстрочный индекс, обозначающий порядковые номера ступеней графика нагрузки ($t = 1, \dots, t$) и порядковые номера расчетных значений перегрева ННТ обмотки над маслом ($p = 1, \dots, p$) по каждой ступени относительной нагрузки; P – порядковые номера (1, 2, ..., P) расчетных значений перегрева ННТ обмотки над маслом в текущей ступени относительной нагрузки; Δt – интервал накопления и обработки телеизмерений (параметр, настраиваемый в минутах); $\tau_{\text{обм}}$ – тепловая постоянная времени обмотки трансформатора (автотрансформатора) (параметр, настраиваемый в минутах); $\vartheta_{\text{ННТуст}}$ – расчетное значение установившегося перегрева ННТ обмотки над температурой масла по текущей ступени относительной нагрузки, определяемое согласно [2]

$$\vartheta_{\text{ННТуст}} = \vartheta_{\text{ННТном}} K^y, \quad (7)$$

где $\vartheta_{\text{ННТном}}$ – превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой масла в верхних слоях при номинальной нагрузке, °С. Если данные отсутствуют, то следует принимать для систем охлаждения М и Д 23 °С и систем охлаждения Ц и ДЦ 38 °С [3]; K – среднее значение от-

носительной нагрузки для текущей ступени нагрузки; $y(\text{const})$ – для систем охлаждения М и Д – 1,6, для систем охлаждения Ц и ДЦ – 1,8, если не известны другие значения [3].

Первая ступень эквивалентного прямоугольного графика нагрузки контролируемых суток может иметь начало в момент смены суток. В этом случае в выражении (6) для расчета текущих значений перегрева ННТ обмотки над маслом по первой ступени эквивалентного прямоугольного графика нагрузки контролируемых суток в качестве $\vartheta'_{\text{ННТ}(m-1)}$ используется расчетное значение перегрева ННТ обмотки над маслом по концу последней ступени за первые истекшие сутки относительно контролируемых суток.

Первая ступень эквивалентного прямоугольного графика нагрузки контролируемых суток может являться продолжением последней ступени предыдущих суток относительно контролируемых суток.

В данном случае в (6) для расчета текущих значений перегрева ННТ обмотки над маслом для первой ступени эквивалентного прямоугольного графика нагрузки контролируемых суток используются: в качестве $\vartheta'_{\text{ННТ}(m-1)}$ значение перегрева ННТ обмотки над маслом по концу предпоследней ступени предыдущих суток относительно контролируемых суток, а в качестве P значение порядкового номера температуры масла по концу последней ступени за первые предыдущие сутки относительно контролируемых суток.

При полном или частичном отсутствии данных телеизмерений тока нагрузки и температуры масла за первые предыдущие сутки относительно контролируемых суток необходимо значение перегрева ННТ обмотки над маслом для первой ступени эквивалентного прямоугольного графика нагрузки контролируемых суток считать установившимся и определять по (7).

Далее на основании построенного расчетного суточного графика значений температуры обмотки производится определение износа изоляции и остаточного ресурса обмотки.

Фактический износ витковой изоляции обмотки по каждой ступени контролируемых суток ΔT_m ($m = 1, \dots, m$) в «нормальных сутках износа» (суточная гистограмма фактического износа) определяется согласно [2]

$$F_m = \frac{2[\Theta_{\text{ННТСР}m} - \Theta_{\text{ННТБ}m}]/\Delta}{24 \cdot 60} \Delta T_m, \quad (8)$$

где $\Theta_{\text{ННТСР}m}$ – среднее значение температуры ННТ обмотки по каждой ступени эквивалентного прямоугольного графика нагрузки согласно [3]; $\Theta_{\text{ННТБ}m}$ – базовая условно постоянная температура наиболее нагретой точки обмотки, при которой скорость расчетного износа витковой изоляции соответствует сроку службы изоляции, °С. Для витковой изоляции класса нагревостойкости А следует принимать 98 °С [2]; Δ – температурный интервал, при изменении на который температуры наиболее нагретой точки обмотки расчетный износ витковой изоляции изменяется в два раза; принимать $\Delta = 6$ °С, если нет других значений, определяемых из характеристик витковой изоляции «температура – срок службы» [2]; ΔT_m – длительность каждой ступени, определяемая по (4); m – подстрочный индекс, обозначающий порядковый номер ступени.

Фактический суммарный суточный износ витковой изоляции обмотки в «нормальных сутках износа» по эквивалентному ступенчатому графику нагрузки определяется согласно [2]

$$F_{\text{сут}} = \sum_1^m F_m, \quad (9)$$

где m (1, 2, ..., m) – текущий номер и количество суммируемых ступеней; F_m – фактический износ по каждой ступени нагрузки в «нормальных сутках износа», определяемый по (8).

Фактический суммарный износ витковой изоляции обмотки в «нормальных сутках износа», считая от даты ввода в эксплуатацию трансформатора (автотрансформатора) на данной подстанции, можно рассчитать

$$F = F_{\text{пред}} + F_{\text{сут}}, \quad (10)$$

где $F_{\text{пред}}$ – фактический предыдущий износ витковой изоляции обмотки в «нормальных сутках износа» до ввода в эксплуатацию задачи на данной подстанции (параметр настраиваемый).

Фактический остаточный ресурс витковой изоляции обмотки в «нормальных сутках износа» находим по формуле

$$F_{\text{ост}} = F_{\text{ном}} - F, \quad (11)$$

где $F_{\text{ном}}$ – нормативный износ витковой изоляции обмотки в «нормальных сутках износа» (параметр настраиваемый).

В результате решения задачи (по запросу) для каждого трансформатора (автотрансформатора) формируются и выводятся на печать:

- исходные суточные графики нагрузки и температуры масла;
- суточный исходный расчетный график относительной нагрузки;
- суточный эквивалентный прямоугольный график относительной нагрузки;
- суточный график теплового состояния ННТ обмотки;
- гистограмма суточного износа витковой изоляции обмоток.

ВЫВОДЫ

1. Задача текущего учета ресурса трансформаторов и автотрансформаторов позволяет формировать расчетные гистограммы посуточного износа витковой изоляции обмоток, что дает возможность оперативно следить за техническим состоянием и принимать решения об их дальнейшей работе либо проведении профилактических или восстановительных работ.

2. Расчетные суточные эквивалентные прямоугольные графики нагрузки и графики температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформаторов и автотрансформаторов обеспечивают текущий контроль их температурно-нагрузочных режимов работы, возможность оптимизации этих режимов, более эффективную эксплуатацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баркан, Я. Д. Эксплуатация электрических систем / Я. Д. Баркан. – М.: Высш. шк., 1990. – С. 39–53.
2. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки: ГОСТ 14209–85.
3. Электрическая часть станций и подстанций / под ред. А. А. Васильева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 44–45, 330–334.

Поступила 12.02.2009