

УДК 621.313.333.004.58

С. В. ОВЧАРОВ, канд. техн. наук

Таврический государственный агротехнологический университет, г. Мелитополь

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И РАСХОДА РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В КВАЗИУСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

В статье предложена методика определения потерь активной мощности и расхода ресурса изоляции в силовом трансформаторе в квазиустановившемся режиме.

У статті запропонована методика визначення витрат активної потужності і витрати ресурсу ізоляції в силовому трансформаторі в квазісталому режимі.

Постановка проблемы

Проблема энергоресурсосбережения сегодня стала одной из главных в эксплуатации силового электрооборудования. Поэтому исследование потерь активной мощности и расхода ресурса изоляции силовых трансформаторов под влиянием эксплуатационных воздействий является необходимым, в частности для анализа режима их работы.

Анализ существующих исследований

Вопросы потерь активной мощности в силовых трансформаторах исследованы достаточно глубоко [1]. Но отсутствует исследование в целом режима преобразования энергии, чему и посвящена данная статья.

Основная часть

Как правило, нагрузка силовых трансформаторов не является постоянной и определяется технологическими режимами. Чаще всего она носит циклический характер. Поэтому представляет интерес исследование теплового переходного процесса силового трансформатора при циклической нагрузке в квазиустановившемся состоянии.

Нагрузку силового трансформатора будем задавать в виде графика, которому будет соответствовать график тепловой нагрузки, например, приведенный на рис. 1. При работе силового трансформатора с циклической нагрузкой через определенное количество циклов практически наступит квазиустановившийся режим, при котором:

$$\tau_0 = \tau_n. \tag{1}$$

Для расчета теплового переходного процесса необходимо определить превышение температуры в начале цикла τ_0 , равное превышению температуры в конце цикла τ_n . Принимаем $t_1 = t_2 = t_3 = t_i$. Тогда можем записать систему уравнений:

$$\tau_1 = \tau_{1y} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T}} \right) + \tau_3 e^{-\frac{t_i}{T}}; \tag{2}$$

$$\tau_2 = \tau_{2y} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T}} \right) + \tau_1 e^{-\frac{t_i}{T}}; \tag{3}$$

$$\tau_3 = \tau_{3y} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T}} \right) + \tau_2 e^{-\frac{t_i}{T}}, \tag{4}$$

где T – эквивалентная постоянная времени нагрева силового трансформатора, с;

$\tau_{1y}, \tau_{2y}, \tau_{3y}$ – установившиеся превышения температуры для каждого участка, °C.

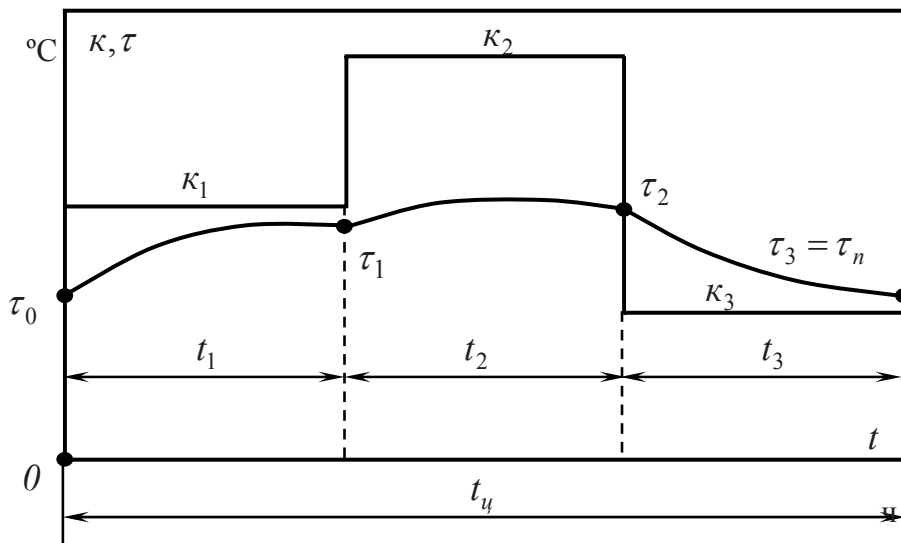


Рис. 1. Графики токовой и тепловой нагрузок обмоток силового трансформатора при циклическом режиме работы в квазиустановившемся состоянии.

Введем обозначение $b = e^{-\frac{t_i}{T}}$ и перепишем уравнения в виде:

$$\tau_1 - b\tau_3 = (1 - b)\tau_{1y}; \tag{5}$$

$$-b\tau_1 + \tau_2 = (1 - b)\tau_{2y}; \tag{6}$$

$$-b\tau_2 + \tau_3 = (1 - b)\tau_{3y}. \tag{7}$$

Решив эту систему уравнений относительно τ_1, τ_2, τ_3 , получим

$$\tau_1 = \frac{1 - b}{1 - b^3} (\tau_{1y} + b^2\tau_{2y} + b\tau_{3y}); \tag{8}$$

$$\tau_2 = \frac{1 - b}{1 - b^3} (\tau_{2y} + b^2\tau_{3y} + b\tau_{1y}); \tag{9}$$

$$\tau_3 = \frac{1 - b}{1 - b^3} (\tau_{3y} + b^2\tau_{1y} + b\tau_{2y}). \tag{10}$$

Аналогично (10) можно записать выражение для расчета превышения температуры в конце цикла при n равных участков графика:

$$\tau_n = \frac{1 - b}{1 - b^n} (b^{n-1}\tau_{1y} + b^{n-2}\tau_{2y} + b^{n-3}\tau_{3y} + \dots + b^{n-n}\tau_{ny}). \tag{11}$$

Таким образом, можем записать:

$$\tau_0 = \frac{1-b}{1-b^n} \sum_1^n b^{n-i} \tau_{iy}, \quad (12)$$

где

$$i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (13)$$

Найдем еще одну связь, просуммировав уравнения (8), (9) и (10)

$$\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = \frac{1-b}{1-b^3} (\tau_{1y} + \tau_{2y} + \tau_{3y}) (1+b+b^2). \quad (14)$$

После преобразования получаем:

$$\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = \tau_{1y} + \tau_{2y} + \tau_{3y}. \quad (15)$$

Очевидно, что если график имеет n равных участков, справедливо выражение

$$\sum_1^n \tau_i = \sum_1^n \tau_{iy}. \quad (16)$$

Определим активной мощности в обмотках силового трансформатора за цикл нагрузки.

Средние потери активной мощности в обмотках силового трансформатора за цикл нагрузки равны:

$$\Delta P_{м.ср.} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{n} \Delta P_{м.н.} (1 + \alpha (\tau_{ср} + \vartheta_{о.ср} - 75)), \quad (17)$$

где k_i – кратность силы тока в обмотках силового трансформатора на i -ом участке;

n – число равных участков циклического графика нагрузки;

$\Delta P_{м.н.}$ – номинальные потери активной мощности в обмотках силового трансформатора (потери короткого замыкания), Вт;

α – температурный коэффициент сопротивления материала проводников обмоток силового трансформатора, $1/^\circ\text{C}$;

$\tau_{ср}$ – среднее значение превышения температуры обмоток над температурой окружающей среды, $^\circ\text{C}$;

$\vartheta_{о.ср.}$ – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$;

75 – расчётная температура обмоток силового трансформатора, $^\circ\text{C}$.

Среднее значение превышения температуры обмоток над температурой окружающей среды за цикл нагрузки:

$$\tau_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{iy}}{n}, \quad (18)$$

где τ_i – превышение температуры обмоток над температурой окружающей среды в конце i -ого участка цикла, $^\circ\text{C}$;

τ_{iy} – установившееся превышение температуры обмоток на i -ом участке цикла, $^\circ\text{C}$.

В свою очередь установившееся превышение температуры обмоток силового трансформатора на i -ом участке цикла:

$$\tau_{iy} = \tau_n \frac{a + k_i^2}{a + 1}, \quad (19)$$

где τ_n – номинальное превышение температуры обмоток силового трансформатора, °С;

a – коэффициент потерь силового трансформатора (отношение потерь в стали к потерям в меди при номинальном режиме).

Тогда окончательно запишем:

$$\begin{aligned} \Delta P_{м.ср} &= \frac{\sum_{i=1}^n \kappa_i^2}{n} \cdot \Delta P_{м.н} \left(1 + \alpha \left(\frac{\sum_{i=1}^n \tau_{iy}}{n} + \vartheta_{о.ср} - 75 \right) \right) = \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n \kappa_i^2}{n} \cdot \Delta P_{м.н} \left(1 + \alpha \left(\frac{\tau_n \sum_{i=1}^n \frac{a + \kappa_i^2}{a + 1}}{n} + \vartheta_{о.ср} - 75 \right) \right) \end{aligned} \quad (20)$$

Введём понятие коэффициента потерь за цикл работы силового трансформатора:

$$k_n = \frac{\Delta P_{м.ср} + \Delta P_{с.н.}}{\Delta P_{м.н.} + \Delta P_{с.н.}}, \quad (21)$$

где $\Delta P_{с.н.}$ – номинальные потери активной мощности в стали, Вт;

$\Delta P_{м.н.}$ – номинальные потери активной мощности в меди, Вт.

Скорость теплового износа изоляции обмотки силового трансформатора в конце i -ого участка графика нагрузки:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_n \cdot e^{B \left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta_i} \right)}, \quad (22)$$

$$\theta_i = \tau_i + \vartheta_{о.ср} + 273, \quad (23)$$

где ε_n – номинальная скорость теплового износа изоляции, $\frac{\dot{a}}{\dot{a}}$;

θ_n – номинальная абсолютная температура изоляции, К;

θ_i – абсолютная температура изоляции в конце i -ого участка, К.

Суммарный расход ресурса изоляции за цикл нагрузки:

$$E = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \cdot t_i, \quad (24)$$

где t_i – длительность i -го участка графика нагрузки, ч.

Введём понятие коэффициента расхода ресурса изоляции за цикл работы силового трансформатора:

$$k_{р.р.} = \frac{E}{n \varepsilon_n \times t_i}. \quad (25)$$

Введём понятие коэффициента преобразования энергии за цикл работы силового трансформатора:

$$k_{нэ} = k_n \cdot k_{p.p}. \quad (26)$$

Проведём расчёт коэффициента преобразования энергии в силовом трансформаторе, задавшись графиком нагрузки силового трансформатора типа ТМ-250/10 и приняв $\tau_{o.c.p.} = 30^\circ\text{C}$. Результаты расчёта заносим в таблицу 1.

Таблица 1

$t_i, \text{ч}$	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
κ_i	0,425	0,425	0,425	0,425	0,425	0,425	0,425	0,875	1,25	1,25	1,0	1,0
$\tau_{iy}, \text{ }^\circ\text{C}$	17,51	17,51	17,51	17,51	17,51	17,51	17,51	49,78	109	109	65	65
$\tau_i, \text{ }^\circ\text{C}$	41,82	34,93	29,99	26,45	23,92	22,1	20,8	29,01	51,6	67,8	67,0	66,44
$\varepsilon_i, \frac{\dot{a} \div}{\div}$	0,058	0,029	0,017	0,012	0,009	0,007	0,006	0,004	0,04	0,18	0,29	0,28
$t_i, \text{ч}$	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
κ_i	0,625	0,925	1,125	1,125	0,875	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,425
$\tau_{iy}, \text{ }^\circ\text{C}$	28,26	55,45	84,24	84,24	49,78	65	65	65	65	65	65	17,51
$\tau_i, \text{ }^\circ\text{C}$	55,61	55,57	63,69	69,52	63,92	64,23	64,45	64,6	64,72	64,8	64,85	51,43
$\varepsilon_i, \frac{\dot{a} \div}{\div}$	0,18	0,12	0,17	0,28	0,277	0,23	0,234	0,237	0,24	0,241	0,243	0,148

Находим средние потери активной мощности в меди силового трансформатора в квазиустановившемся режиме по выражению (20):

$$\Delta P_{m.c.p.} = 2,89 \text{ кВт}.$$

Номинальные потери в стали равны:

$$\Delta P_{c.n.} = 0,79 \text{ кВт}.$$

Определяем коэффициент потерь за цикл работы силового трансформатора в квазиустановившемся режиме по выражению (21):

$$k_n = 0,78.$$

Определяем коэффициент расхода ресурса изоляции за цикл работы силового трансформатора по выражению (25):

$$k_{p.p.} = 0,147.$$

Определяем коэффициент преобразования энергии за цикл работы силового трансформатора по выражению (26):

$$k_{нэ} = 0,12.$$

При температуре окружающей среды, равной 30°C, указанные выше коэффициенты равны:

$$k_n = 0,8 .$$

$$k_{p.p} = 0,37 .$$

$$k_{нэ} = 0,29 .$$

Вывод

Таким образом, в обоих случаях $k_{нэ}$ меньше единицы, что говорит о том, что режим работы трансформатора удовлетворительный.

Список литературы

1. Овчаров В. В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / В. В. Овчаров. – К. : УСХА, 1990. – 168 с.

RESEARCH OF ACTIVE POWER LOSSES AND EXPENSE OF RESOURCE OF ISOLATION OF POWER TRANSFORMER IN QUASI-STEADY STATE

S. OVCHAROV, Cand. Tech. Siens

The technique of determination of active power losses and expense of resource of isolation of power transformer in quasi-steady state is introduced.

Поступила в редакцию 14.11.09