

С.В. ОБЧАРОВ, канд. техн. наук, ас., Таврический государственный агротехнологический университет

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

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

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

Введение. 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 [1]. Но отсутствует исследование в целом режима преобразования энергии.

Цель работы – анализ потерь активной мощности в силовых трансформаторах.

Характеристика теплового переходного процесса силового трансформатора. 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

$$\tau_0 = \tau_{II}. \quad (1)$$

Для расчета теплового переходного процесса необходимо определить превышение температуры в начале цикла τ_0 , равное превыше-

нию температуры в конце цикла $\tau_{\text{п}}$. Принимаем $t_1 = t_2 = t_3 = t_i$. Тогда можем записать систему уравнений

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

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

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

где T – эквивалентная постоянная времени нагрева силового трансформатора, с; $\tau_{1y}, \tau_{2y}, \tau_{3y}$ – установившиеся превышения температуры для каждого участка, °С.

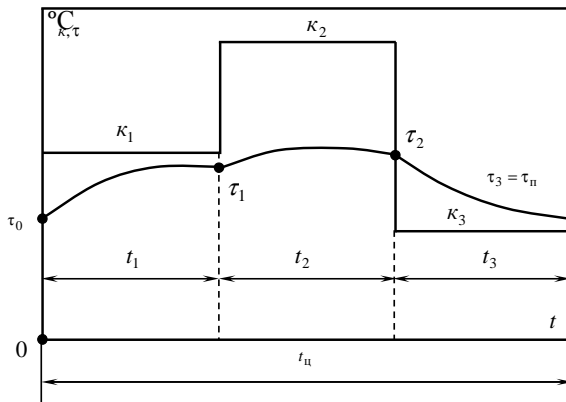


Рис. 1.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Таким образом, можем записать:

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

где $i=1,2,3,\dots,n$. (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:

$$\Delta P_{\text{м.ср.}} = \frac{\sum_1^n k_i}{n} \Delta P_{\text{м.н.}} (1 + \alpha (\tau_{\text{ср}} + \vartheta_{\text{о.ср.}} - 75)), \quad (17)$$

где k_i – кратность силы тока в обмотках силового трансформатора на i -ом участке; n – число равных участков циклического графика нагруз-

ки; $\Delta P_{\text{м.н.}}$ – номинальные потери активной мощности в обмотках силового трансформатора (потери короткого замыкания), Вт; α – температурный коэффициент сопротивления материала проводников обмоток силового трансформатора, $1/^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{ср}}$ – среднее значение превышения температуры обмоток над температурой окружающей среды, $^\circ\text{C}$; $\vartheta_{\text{о.ср.}}$ – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$; 75 – расчетная температура обмоток силового трансформатора, $^\circ\text{C}$.

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

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

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, $^\circ\text{C}$; a – коэффициент потерь силового трансформатора (отношение потерь в стали к потерям в меди при номинальном режиме).

Тогда окончательно запишем:

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

Введем понятие коэффициента потерь за цикл работы силового трансформатора:

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

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

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

$$\varepsilon_i = \varepsilon_n \cdot e^{\left(\frac{1}{\theta} \frac{1}{\theta_i} \right)}; \quad (22)$$

где ε_n – номинальная скорость теплового износа изоляции, бч/ч;
 θ_n – номинальная абсолютная температура изоляции, К; θ_i – абсолютная температура изоляции в конце i -ого участка, К,

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

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.

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

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

Введем понятие коэффициента преобразования энергии за цикл работы силового трансформатора:

$$k_{\text{пз}} = k_{\text{п}} \cdot k_{\text{р.п}}. \quad (26)$$

Проведем расчет коэффициента преобразования энергии в силовом трансформаторе, задавшись графиком нагрузки силового трансформатора типа ТМ-250/10 и приняв $\tau_{\text{о.ср.}} = 30^\circ\text{C}$. Результаты расчета заносим в табл. 1.

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

$$\Delta P_{\text{м.ср}} = 2.89 \text{ кВт}.$$

Номинальные потери в стали равны:

$$\Delta P_{\text{с.н}} = 0,79 \text{ кВт}.$$

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

$$k_{\text{п}} = 0,78.$$

Таблица 1.

t_i , ч	k_i	$\tau_{н2}$, °С	τ_i , °С	ε_i , бч/ч	t_i , ч	k_i	$\tau_{н2}$, °С	τ_i , °С	ε_i , бч/ч
0-1	0,425	17,51	41,82	0,058	12-13	0,625	28,26	55,61	0,18
1-2	0,425	17,51	34,93	0,029	13-14	0,925	55,45	55,57	0,12
2-3	0,425	17,51	29,99	0,017	14-15	1,125	84,24	63,69	0,17
3-4	0,425	17,51	26,45	0,012	15-16	1,125	84,24	69,52	0,28
4-5	0,425	17,51	23,92	0,009	16-17	0,875	49,78	63,92	0,277
5-6	0,425	17,51	22,1	0,007	17-18	1,0	65	64,23	0,23
6-7	0,425	17,51	20,8	0,006	18-19	1,0	65	64,45	0,234
7-8	0,875	49,78	29,01	0,004	19-20	1,0	65	64,6	0,237
8-9	1,25	109	51,6	0,04	20-21	1,0	65	64,72	0,24
9-10	1,25	109	67,8	0,18	21-22	1,0	65	64,8	0,241
10-11	1,0	65	67,0	0,29	22-23	1,0	65	64,85	0,243
11-12	1,0	65	66,44	0,28	23-24	0,425	17,51	51,43	0,148

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):

$$k_{пэ} = 0,12$$

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

$$k_{п} = 0,8$$

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

$$k_{пэ} = 0,29$$

Вывод. Таким образом, в обоих случаях $k_{пэ}$ 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.

Поступила в редколлегию 01.12.2009