

УДК 621.311

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ БАКА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В ПРИСУТСТВИИ КВАЗИПОСТОЯННОГО ТОКА

Вахнина В.В., Кузнецов В.Н., Кретов Д.А.

ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», Тольятти, e-mail: d.kretov@tltso.ru

Рассмотрено влияние возмущений космической погоды на тепловое состояние бака силового трансформатора системы электроснабжения. Появление в системе электроснабжения квазипостоянных токов вызывает многократное увеличение тока намагничивания силового трансформатора, насыщение его магнитной системы и как следствие изменение теплового состояния бака силового трансформатора. Основное влияние на тепловое состояние бака силового трансформатора оказывают дополнительные потери активной мощности, вызванные протеканием квазипостоянных токов. Разработана методика расчета дополнительных потерь активной мощности в баке силового трансформатора, в соответствии с которой проведены расчеты дополнительных потерь активной мощности в баке силового трансформатора марки ТДЦ 400000/220. Проведенные расчеты показывают влияние квазипостоянных токов на тепловое состояние бака силового трансформатора.

Ключевые слова: силовой трансформатор, квазипостоянный ток, дополнительные потери активной мощности, бак силового трансформатора

THE WAY TO ASSESS THE INFLUENCE OF A QUASI-DIRECT CURRENT AT THE THERMAL STATE OF TANK OF POWER TRANSFORMER

Vakhnina V.V., Kuznetsov V.N., Kretov D.A.

Togliatti State University, Togliatti, e-mail: d.kretov@tltso.ru

In the article takes into account the influence of space weather disturbances on the thermal state of the tank of power transformer in electric power supply system. The appearance in the electric power supply system the quasi-direct currents, causes a multiple increase of magnetizing current of power transformer, saturation of its magnetic system and as a consequence thermal state of tank of power transformer is changed. The main influence on the thermal state of the tank of power transformer has additional active power losses caused by the occurrence of quasi-direct currents. The method of calculation of additional active power losses in the tank of power transformer was developed, according to which were made the calculations of additional active power losses in the tank of power transformer brand TDC 400000/220. The calculations shows the effect of quasi-direct currents on the thermal state of the tank of power transformer.

Keywords: power transformer, quasi-direct current, additional active power losses, the tank of power transformer

Система электроснабжения (СЭС) оказывает значительное влияние на жизнь современного общества. Поэтому даже незначительные перерывы в электроснабжении и тем более долговременные отключения, вызванные аварийными ситуациями в СЭС, являются недопустимыми. Аварийные ситуации в СЭС могут возникать по разным причинам: отказ оборудования, неправильные и несогласованные действия обслуживающего персонала, а также различные природные воздействия, к которым относятся возмущения космической погоды, которые приводят к геомагнитным бурям (ГМБ). Во время протекания ГМБ вариации геомагнитного поля индуцируют на поверхности Земли медленно меняющееся электрическое поле. В связи с этим между заземленными элементами СЭС появляется квазипостоянная ЭДС (рис. 1).

Заземленными элементами СЭС являются глухозаземленные нейтрали силовых трансформаторов (СТ) напряжением 110 кВ и выше. Таким образом, под действием квазипостоянной ЭДС в линии электропередачи (ЛЭП) и в обмотках силового трансформатора появляется ток. Частота изменения гео-

электрического поля достаточно низкая, поэтому ток, возникающий в воздушной линии электропередачи под действием ЭДС, будет иметь тоже низкую частоту. Так как частота питающей сети (50 Гц) превышает во много раз частоту возникающих токов, то эти токи можно считать квазипостоянными (КПТ).

Воздействие квазипостоянного тока на силовой трансформатор

Присутствие КПТ в обмотках СТ приводит к насыщению магнитной системы, многократному увеличению тока намагничивания, увеличению потоков рассеяния. Увеличение потоков рассеяния вызывает дополнительные потери активной мощности от вихревых токов в обмотках СТ и в массивных металлических конструкциях (бак, ярмовые балки, прессующие кольца, стяжные шпильки). Электрическая энергия, идущая на увеличение дополнительных потерь активной мощности, полностью преобразуется в тепловую энергию [2]. Дополнительно выделившееся тепло в обмотках и массивных металлических конструкциях увеличивает их температуру, которая при определенных условиях может превы-

шать предельно – допустимую. В стандартах МЭК 354-91 [3] и ГОСТ 14209-97 [4] указаны предельные значения температуры при перегрузках силовых трансформаторов: предельная температура обмоток силовых трансформаторов большой мощности при продолжительных аварийных перегрузках – 130 °С, средней мощности – 140 °С, при кратковременных аварийных перегрузках – 160 °С, масла в верхних слоях – 115 °С.

Главным риском во время кратковременной (менее 30 минут) аварийной перегрузки является снижение электрической прочности вследствие образования пузырьков газа, которые могут возникать в бумажной изоляции, когда температура наиболее нагретой точки обмотки силового трансформатора достигает 140–160 °С при нормальном содержании влаги в изоляции.

Методика оценки теплового состояния бака силового трансформатора

Для оценки теплового состояния бака СТ в присутствии КПП разработана методика расчета дополнительных потерь активной мощности, согласно которой проведен расчет дополнительных потерь в баке силового трансформатора для модели реального СТ. В качестве реального силового трансформатора выбран силовой трансформатор марки ТДЦ 400000/220. Модель трансформатора представлена на рисунке 2. В расчетах бак СТ представлен в виде прямоугольного параллелепипеда с закругленными стенками, толщина стенок бака превышает глубину проник-

новения магнитного поля. При значительном насыщении магнитной системы расчёт магнитного поля вблизи стенок бака выполнен без учета магнитной системы трансформатора. Обмотки каждой фазы (высокого и низкого напряжения) заменены одной бесконечно тонкой обмоткой, по которой течёт ток намагничивания, приведённый к обмотке высокого напряжения. При расчёте учитывалось взаимное влияние всех трёх фаз А, В, С [5].

Для оценки потерь активной мощности в баке силового трансформатора токи в обмотках, полученные в расчетах, раскладывались на гармонические составляющие. Дополнительные потери активной мощности рассчитывались для каждой отдельной n -й гармонической составляющей тока намагничивания, затем полученные в результате расчетов значения дополнительных потерь суммировались. Такой подход к оценке дополнительных потерь активной мощности в баке силового трансформатора является приближённым, т.к. не учитывает намагничивание стали бака.

Расчёт удельных потерь p_{Π} активной мощности проводился по формуле:

$$p_{\Pi} = k_{\phi} r_{\Pi} H_{\Pi, д}^2, \quad (1)$$

где $H_{\Pi, д} = H_{\Pi, м} / \sqrt{2}$ – действующее значение тангенциальной составляющей напряжённости магнитного поля у поверхности бака; r_{Π} – поверхностное сопротивление; k_{ϕ} – коэффициент, равный 1,1–1,2 для конструкционной стали (в расчётах полагали $k_{\phi} = 1,15$) [2].

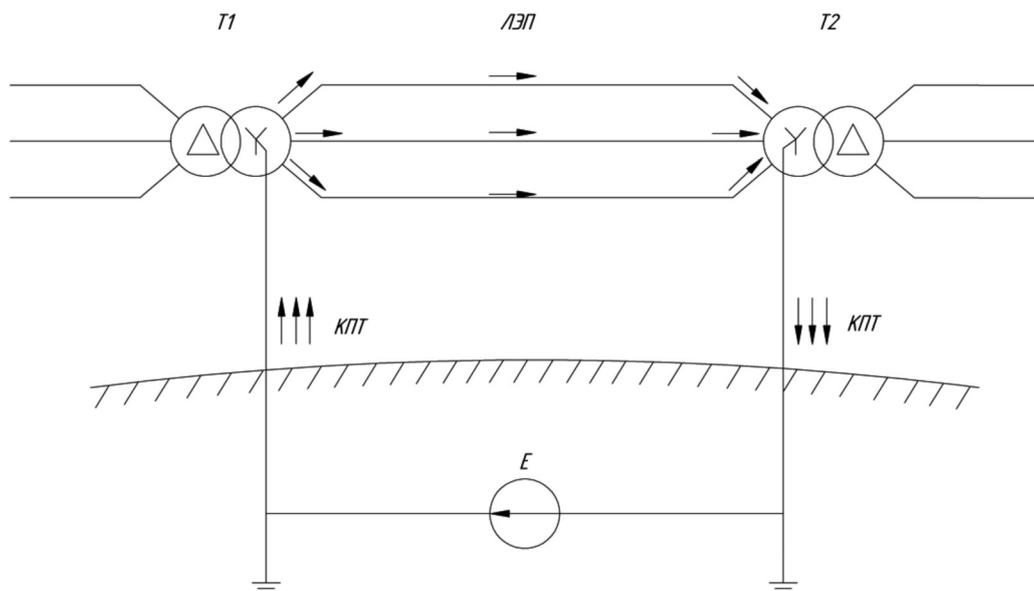


Рис. 1. Схема проникновения квазипостоянных токов в СЭС

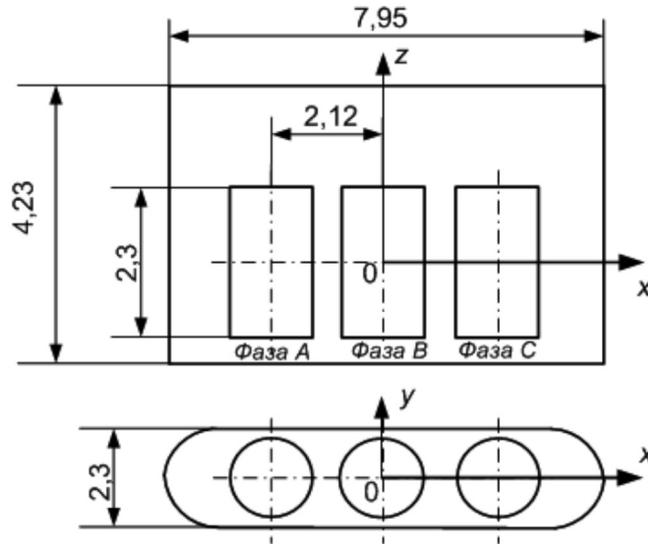


Рис. 2. Модель трехфазного трансформатора стержневого типа ТДЦ – 400000/220

Поверхностное сопротивление r_n определено как проводимость скин-слоя:

$$r_n = \frac{\rho}{\delta}, \quad (2)$$

где $\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu_{\text{ЭК}}}}$ – толщина скин-слоя, ρ – удельное электрическое сопротивление конструкционной стали, ω – частота переменного электромагнитного поля; $\mu_{\text{ЭК}}$ – эквивалентная магнитная проницаемость. В [2] показано, что при частоте 50 Гц для конструкционных сталей толщина скин-слоя δ лежит в диапазоне $\delta = 0,7 - 1,5$ мм и зависит от напряженности магнитного поля у поверхности. В расчетах полагали $\rho = 0,144 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, $\delta = 1,1$ мм, что соответствует эквивалентной магнитной проницаемости $\mu_{\text{ЭК}} = 603$.

Таким образом, на частоте $f_0 = 50$ Гц поверхностное сопротивление составляет $r_{n,50} = 1,31 \cdot 10^{-4}$ Ом. На частотах высших гармоник $f_n = n \cdot f_0$, кратных частоте f_0 , поверхностное сопротивление рассчитывается по формуле:

$$r_{n,n} = r_{n,50} \sqrt{n}. \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) формула (1) для удельных потерь была переписана в виде:

$$P_{n,n} = \frac{1}{2} k_\phi r_{n,50} \sqrt{n} H_{n,m}^2 = \frac{1}{2} k_\phi r_{n,50} \sqrt{n} k_H^2 H_{0,m}^2, \quad (4)$$

где $H_{0,m}$ – амплитудное значение напряженности магнитного поля на заданной площадке, совпадающей с поверхностью бака.

Учитывая, что по своему влиянию на магнитное поле, стенка бака силового трансформатора являются электромагнит-

ным экраном, коэффициент k_H принят равным 2 [2].

Для каждой поверхности N_x, N_y, N_z результирующие удельные потери равны сумме удельных потерь от каждой гармоники:

$$P_{\text{П}\Sigma} = \sum_{n=2}^{\infty} P_{\text{П},n}. \quad (5)$$

Полные потери в баке рассчитывались по выражению:

$$P_{\text{П}} = (P_{\text{П}\Sigma}^{(x)} \cdot S_x + P_{\text{П}\Sigma}^{(y)} \cdot S_y + P_{\text{П}\Sigma}^{(z)} \cdot S_z) \cdot 2. \quad (6)$$

Изменение температуры $\Delta\Theta$ поверхностей бака силового трансформатора за счет дополнительных потерь активной мощности P от полей рассеяния определялось по формуле:

$$P_{\text{П}} \cdot \Delta t = c \cdot m \cdot \Delta\Theta, \quad (7)$$

где m – масса стали; t – время; c – удельная теплоемкость конструкционной стали.

Из выражения (7) скорость изменения температуры $\Delta\Theta / \Delta t$:

$$\frac{\Delta\Theta}{\Delta t} = \frac{P}{c \cdot m}, \quad (8)$$

где $m = \rho_{\text{ст}} \cdot S \cdot \delta$ – масса стали; $\rho_{\text{ст}}$ – удельный вес стали; S – площадь поверхности бака.

Зная скорость изменения температуры $\Delta\Theta / \Delta t$ и время присутствия квазипостоянного тока в системе электроснабжения $t_{\text{П}}$ определяется изменение температуры поверхности бака из-за дополнительных потерь активной мощности:

$$\Delta\Theta = \frac{\Delta\Theta}{\Delta t} t_{\text{П}}. \quad (9)$$

Расчет дополнительных потерь активной мощности в баке силового трансформатора

Расчеты выполнены для СТ марки ТДЦ 400000/220. Потери активной мощности в стенках бака при $\delta = 0,7$ мм, составили 351,8 кВт (табл. 1).

Таблица 1

Потери в стенках бака силового трансформатора при $\delta = 0,7$ мм

| Поверхность | Площадь, м ² | Потери, кВт |
|-----------------|-------------------------|-------------|
| Одиночная n_x | 9,7 | 5,3 |
| Одиночная n_y | 33,6 | 129,9 |
| Одиночная n_z | 18,2 | 40,7 |
| Всего бака | 123,0 | 351,8 |

Для окончательной оценки теплового состояния бака СТ в присутствии КПП рассчитаны скорости изменения температуры на отдельных стенках бака (табл. 3).

Заключение

Аварийные ситуации в СЭС могут быть вызваны присутствием квазипостоянного тока при возмущениях космической погоды, что приводит к многократному возрастанию тока намагничивания, насыщению магнитной системы СТ и изменению теплового состояния бака СТ. Для оценки теплового состояния бака СТ при протекании КПП в СЭС разработана методика расчета дополнительных потерь активной мощности в баке силового трансформатора. Расчеты, выполненные на

Таблица 2

Максимальные удельные дополнительные потери активной мощности на отдельных стенках бака при $\delta = 0,7$ мм

| Поверхность | N_x | N_y | N_z |
|---|-------|-------|-------|
| Максимальные удельные потери, Вт / м ² | 1575 | 8712 | 4445 |
| Средние удельные потери, Вт / м ² | 546 | 3862 | 2229 |
| Отношение максимальных потерь к средним | 2,9 | 2,3 | 2,0 |

Таблица 3

Скорости изменения температуры на отдельных стенках бака при $\delta = 0,7$ мм

| Поверхность | N_x | N_y | N_z |
|--|-------|-------|-------|
| Средние значения $\Delta\Theta / \Delta t$, °C / с | 0,21 | 1,48 | 0,85 |
| Отношение максимальных к средним | 2,9 | 2,3 | 2,0 |
| Максимальные значения $\Delta\Theta / \Delta t$, °C / с | 0,6 | 3,4 | 1,7 |

Усредненные по отдельным поверхностям бака СТ удельные дополнительные потери активной мощности не дают представления о распределении потерь в пределах отдельной стенки бака, а, следовательно, и о тепловом состоянии бака СТ в присутствии КПП. Поэтому для оценки теплового состояния в условиях быстротечности процесса нагрева был проведен расчет зависимости удельных дополнительных потерь активной мощности от координат на стенках бака, а затем найдены значения максимальных удельных потерь активной мощности на отдельных стенках бака (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что наибольшее максимальное значение удельных дополнительных потерь на фронтальных стенках бака СТ (N_y) в 2,3 раза превышает среднее значение удельных потерь, что обусловлено конструкцией рассматриваемого трансформатора и расположением на этой стенке наиболее нагретой точки (ННТ) бака. Самая большая величина максимальных значений скорости изменения температуры также получена на фронтальных стенках бака.

примере силового трансформатора марки ТДЦ 400000/220 показали влияние КПП на тепловое состояние бака СТ. Получено, что ННТ стенки бака СТ располагается на фронтальной стенке, что обуславливает повышенный нагрев и быстрое возрастание ее температуры. Разработанная методика оценки теплового состояния бака СТ в присутствии КПП позволит оценивать степень влияния ГМБ на отдельные типы СТ и разрабатывать мероприятия для снижения негативного влияния КПП на силовые трансформаторы СЭС.

Список литературы

1. Вахнина В.В., Черненко А.Н., Кузнецов В.А. Влияние геоиндуцированных токов на насыщение магнитной системы силовых трансформаторов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2012. – № 3(21). – С. 65–66.
2. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчёты трансформаторов и реакторов. – М: Энергия, 1981. – 392 с.
3. МЭК 354 – 91. Loading guide for oil immersed power transformers.
4. ГОСТ 14209 – 97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов.
5. Вахнина В.В., Кузнецов В.Н., Шаповалов В.А., Кретов Д.А. Тепловая нагрузка бака силового трансформатора при глубоком насыщении магнитной системы // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2011. – № 4(18). – С. 74–79.