

СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТРАНСФОРМАТОРАХ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Запропоновано визначити втрати електроенергії у трансформаторах тягових підстанцій змінного струму статистичними методами.

Предложено определять потери электроэнергии в трансформаторах тяговых подстанций переменного тока статистическими методами.

It is proposed to determine losses of electric power in transformers of a.c. tractive substations by statistical methods.

Формулы, применяемые для расчета потерь активной, реактивной и полной мощности в тяговых трансформаторах переменного тока, содержат углы сдвига фаз токов по плечам питания либо требуют разложения этих токов на активную и реактивную составляющие. Для упрощения вычислений в эксплуатационной и проектной практике зачастую принимают углы сдвига токов равными, учет же этих углов сильно затрудняет процесс измерения потерь мощности.

Для соединенных в звезду первичной и районной обмоток расчет потерь мощности в них не вызывает затруднений, так как:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_1 &= r_1 (I_{1A}^2 + I_{1B}^2 + I_{1C}^2), \\ \Delta P_p &= r_p (I_{pA}^2 + I_{pB}^2 + I_{pC}^2), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где ΔP – потери мощности в первичной обмотке; активное сопротивление одной фазы первичной обмотки трансформатора, приведенное к первичному напряжению

$$r_1 = 0,5 U_{1н}^2 P_{кз} / S_n^2;$$

активное сопротивление фазы районной обмотки (коэффициент γ принимается равным 0,5 или 0,75 в зависимости от конструктивного исполнения районной обмотки)

$$r_p = \gamma U_{p.н}^2 P_{кз} / S_n^2;$$

$I_{1A}^2, I_{1B}^2, I_{1C}^2, I_{pA}^2, I_{pB}^2, I_{pC}^2$ – фазные токи первичной и районной обмоток соответственно; S_n – номинальная мощность тягового трансформатора; $U_{1н}$ и $U_{p.н}$ – линейные напряжения

первичной и районной обмоток соответственно; $P_{кз}$ – мощность короткого замыкания.

Для тяговой обмотки трансформатора затруднения связаны с необходимостью определения фазных токов, которые являются парными геометрическими суммами линейных токов, взятых с определенными весовыми коэффициентами. При возведении в квадрат указанных сумм неизбежно появляются углы сдвига фаз токов левого и правого плеч питания.

Чтобы избавиться от учета углов сдвига фаз при определении потерь мощности, в тяговой обмотке можно использовать, например, метод предложенный в [1]. По данной методике токи в фазах тягового трансформатора при известных токах левого и правого плеч питания определяются следующим способом:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= \frac{1}{3} \sqrt{2I_l^2 + 2I_p^2 - I_n^2}, \\ I_B &= \frac{1}{3} \sqrt{2I_l^2 + 2I_n^2 - I_p^2}, \\ I_C &= \frac{1}{3} \sqrt{2I_p^2 + 2I_n^2 - I_l^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Потери мощности в тяговой обмотке будут определяться формулой

$$\Delta P_T(t) = r_{Tф} [I_l^2(t) + I_n^2(t) + I_p^2(t)], \quad (3)$$

где $r_{Tф}$ – сопротивление тяговой обмотки, приведенное к фазному напряжению.

С учетом формул (1) и (3) потери мощности в тяговых трансформаторах могут быть определены по формуле:

$$\Delta P(t, k) = kP_{xx} + \frac{1}{k} \left\{ r_1 \left[I_{1A}^2(t) + I_{1B}^2(t) + I_{1C}^2(t) \right] + \right. \\ \left. + r_p \left[I_{pA}^2(t) + I_{pB}^2(t) + I_{pC}^2(t) \right] + \right. \\ \left. + r_{T\phi} \left[I_n^2(t) + I_n^2(t) + I_p^2(t) \right] \right\}, \quad (4)$$

где запись $\Delta P(t, k)$ означает, что берутся потери активной мощности в момент времени t при условии, что включены на параллельную работу k тяговых трансформаторов; P_{xx} – постоянные потери.

Для потерь реактивной мощности можно составить аналогичное уравнение:

$$\Delta Q(t, k) = 10^{-2} k I_0 S_n + \frac{1}{k} \left\{ x_1 \left[I_{1A}^2(t) + \right. \right. \\ \left. \left. + I_{1B}^2(t) + I_{1C}^2(t) \right] + x_p \left[I_{pA}^2(t) + I_{pB}^2(t) + I_{pC}^2(t) \right] + \right. \\ \left. + x_T \left[I_n^2(t) + I_n^2(t) + I_p^2(t) \right] \right\}, \quad (5)$$

где I_0 – ток холостого хода трансформатора; x_1 , x_p , x_T – индуктивные сопротивления первичной, районной и тяговой обмоток трансформатора, выраженные через соответствующие напряжения короткого замыкания.

Интегрирование выражений (4), (5) позволяет перейти от потерь мощности к потерям активной энергии. Воспользуемся статистическими методами оценки потерь мощности и энергии в тяговых трансформаторах. Для этого представим процесс изменения тока нагрузки в виде следующей математической модели:

$$I(t) = m(t) + \varepsilon(t), \quad (6)$$

где $m(t)$ – математическое ожидание тока нагрузки, в общем случае зависящее от времени; $\varepsilon(t)$ – центрированная случайная составляющая.

Тогда математическое ожидание квадрата тока нагрузки будет иметь вид

$$M \left[I^2(t) \right] = M \left\{ \left[m(t) + \varepsilon(t) \right]^2 \right\} = m^2(t) + \sigma^2. \quad (7)$$

Средние потери активной и реактивной мощности с учетом выражений (4), (5) можно определить по формулам:

$$M \left[\Delta P(t, k) \right] = kP_{xx} + \frac{1}{k} \left\{ r_1 \left[m_{1A}^2(t) + m_{1B}^2(t) + \right. \right. \\ \left. \left. + m_{1C}^2(t) \right] + 3r_p m_p^2(t) + r_{T\phi} \left[m_n^2(t) + m_n^2(t) + \right. \right. \\ \left. \left. + m_p^2(t) \right] + r_1 \left(\sigma_{1A}^2 + \sigma_{1B}^2 + \sigma_{1C}^2 \right) + 3r_p \sigma_p^2 + r_{T\phi} \left[\sigma_n^2(t) + \right. \right. \\ \left. \left. + \sigma_n^2(t) + \sigma_p^2(t) \right] \right\} = kP_{xx} + \frac{1}{k} \left[M_a^2(t) + \sigma_a^2 \right]. \quad (8)$$

$$M \left[\Delta Q(t, k) \right] = 10^{-2} k I_0 S_n + \frac{1}{k} \left[M_p^2(t) + \sigma_p^2 \right], \quad (9)$$

где M_a , M_p , σ_a^2 , σ_p^2 – математические ожидания и дисперсии сумм случайных процессов, стоящих в правых частях равенств (8) и (9). Если с помощью статистического исследования определить числовые характеристики процессов изменения токов тяговой нагрузки, то последующее интегрирование позволит рассчитать среднесуточные потери энергии в тяговых трансформаторах, что важно знать как для учета потерь в системе электроснабжения, так и для оценки эффективности управления устройствами системы.

Для оценки потерь реактивной мощности важно знать их величину в период минимума и максимума нагрузки. Колебания реактивных потерь в тяговом трансформаторе следует учитывать при выборе мощности компенсирующих устройств, при решении вопроса рационального перехода на параллельную работу тяговых трансформаторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог, – М.: Транспорт, 1982. – 582 с.
2. Карякин Р. Н. Тяговые сети переменного тока. – М.: Транспорт, 1987. – 279 с.

Поступила в редколлегию 27.09.2004.