

К РАСЧЕТУ МОЩНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С РУЛОННОЙ ОБМОТКОЙ НИЗШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

И. Д. КУТЯВИН, С. А. СТЕПАНОВ

В статье рассматривается вопрос оптимизации размеров и параметров силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторов на минимум расчетных затрат при условии минимума добавочных потерь в меди от вихревых токов, вызванных осевой составляющей поля рассеяния. Вопрос решается применительно к трансформаторам V габарита с рулонной обмоткой низшего (НН) и многослойной обмоткой высшего напряжений (ВН). Обмотка НН выполняется из рулонной меди или алюминия, причем ширина ленты равна высоте обмотки h . Витковая изоляция обмотки НН может выполняться путем нанесения полиимидного слоя на боковые поверхности ленты или с помощью сплошной прокладки между витками из полимерной пленки.

В качестве оптимизируемой переменной величины принято число слоев обмотки НН m_1 .

Основные соотношения, необходимые для решения задачи.

Номинальные токи в обмотках

$$I_{н1} = z_1 h \Delta_1, \quad I_{н2} = n_2 z_2 y_2 \Delta_2, \quad (1)$$

где z_1, z_2 — радиальные толщины меди элементарных проводников обмоток;

Δ_1, Δ_2 — плотности тока в обмотках;

n_2 — число элементарных параллельных проводников в обмотке ВН;

y_2 — осевая высота элементарного проводника обмотки ВН.

Намагничивающие силы на единицу высоты обмоток

$$\varphi_1 = p_1 z_1 m_1 \Delta_1, \quad \varphi_2 = p_2 z_2 m_2 \Delta_2 \frac{y_2}{y_2 + i_2}, \quad (2)$$

где p_1 — число витков в слое обмотки НН;

p_2 — число рядов элементарного проводника в обмотке ВН;

m_2 — число слоев обмотки ВН;

i_2 — толщина изоляции на две стороны проводника обмотки ВН.

$\varphi_1 = \varphi_2$ для равновысоких обмоток.

Числа витков обмоток

$$N_1 = p_1 m_1, \quad N_2 = \frac{h m_2}{n_2 (y_2 + i_2)}. \quad (3)$$

Уравнения теплового баланса слоя обмоток на один сантиметр среднего витка:

$$2 k_{п1} q_1 h = \rho k_{\partial 1} \Delta_1^2 z_1 p_1 h; \quad 2 k_{п2} q_2 y_2 = \rho k_{\partial 2} \Delta_2^2 z_2 y_2 p_2, \quad (4)$$

где $k_{п1}$, $k_{п2}$ — коэффициенты закрытия поверхностей обмоток изолирующими конструкциями;

q_1 , q_2 — удельные теплоотдачи поверхностей обмоток;

ρ — расчетное удельное сопротивление материала обмоток;

$k_{\partial 1}$, $k_{\partial 2}$ — коэффициенты, учитывающие добавочные потери в меди обмоток от вихревых токов.

Из уравнений (4) можно найти плотности тока в обмотках:

$$\Delta_1 = \sqrt{\frac{\alpha_1}{k_{\partial 1} p_1 z_1}}; \quad \alpha_1 = \frac{2 k_{п1} q_1}{\rho}; \quad \Delta_2 = \sqrt{\frac{\alpha_2}{k_{\partial 2} p_2 z_2}}; \quad \alpha_2 = \frac{2 k_{п2} q_2}{\rho}. \quad (5)$$

Оптимальные толщины меди слоев обмоток [2]:

$$x_{10} = p_1 z_1 = \sqrt{\frac{1,73}{c_1 m_1}}; \quad x_{20} = p_2 z_2 = \sqrt{\frac{1,73(y_2 + i_2)}{c_1 m_2 y_2}}; \quad c_1 = \frac{\pi f \mu_0}{\rho}, \quad (6)$$

где f — частота тока, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$ гн/см.

В [1] получена оптимальная зависимость

$$i_3 = \frac{(z_2 + i_3)^2 (2z_2 - i_3)}{3(x_2 + i_3)^2}, \quad (7)$$

которая дает связь между переменными p_2 и z_2 . После некоторых преобразований получим

$$3 p_2^2 = 3 \frac{(x_2 + i_3)^2}{(z_2 + i_3)^2} = \frac{2z_2 - i_3}{i_3}; \quad k_{\partial 2} = 1 + \frac{1}{3 p_2^2} = \frac{2z_2}{2z_2 - i_3}, \quad (8)$$

где i_3 — изоляция на две стороны элементарного проводника обмотки ВН.

Из выражений (2) и (6) с учетом (5) и (8) определим отношение

$$\frac{m_2 y_2}{y_2 + i_2} = \varphi \sqrt[4]{\frac{12 i_3}{\alpha_2^2 (2z_2 - i_3)^2}} = \frac{3\sqrt{3} \cdot i_3}{c z_2^2 (2z_2 - i_3)}. \quad (9)$$

После некоторого упрощения (9) и замены $v_2 = \frac{z_2}{i_3}$ получим

$$\sqrt[4]{v_2^4 (v_2 - 1)^{0,5}} = u_2 = \sqrt[4]{\frac{2z\alpha_2}{2\sqrt{3}\varphi^2 c_1^2 i_3^3}}. \quad (10)$$

Выражение (10) можно заменить расчетной кривой $u_2 = f(v_2)$, показанной на рис. 1. Тогда, определяя u_2 из правой части (10), по расчетной кривой найдем v_2 и вычислим $z_2 = v_2 i_3$. Для того чтобы спрямить расчетную кривую, из правой и левой частей (10) извлечем корень четвертой степени.

В качестве примера приведен расчет силового трехфазного трансформатора мощностью 250 МВА с напряжениями 15, 75/115 кВ с рунной обмоткой НН и многослойной обмоткой ВН.

Расчетное выражение	4	5	6	7
m_1				
$x_1(с.м)$	0,695	0,621	0,567	0,526
$\Delta_1 \left(\frac{A}{с.м^2} \right)$	459	484	506	526
$z_2(с.м)$	0,193	0,181	0,169	0,161
$x_2(с.м)$	0,58	0,543	0,507	0,483
$\Delta_2 \left(\frac{A}{с.м^2} \right)$	492	506	525	540
$y_2(с.м)$	4,4	4,59	4,8	4,84
m_2	5	6	7	8
$m_1 x_1 + (m_1 - 1) \delta_1 = a_1(с.м)$	5,18	6,3	7,4	8,48
$m_2 x_2 + (m_2 - 1) \delta_2 = a_2(с.м)$	12,5	15,3	18	20,7
$\frac{\varphi a_p'}{2p} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4pa_p'}{\varphi a_p}} \right) = d(с.м)$	80	100	125	150
$k_c \frac{\pi d^2}{4} = Q_c(\partial.м^2)$	42,6	66,7	104	150
$\frac{U_{H1} \cdot 10^4}{222 B_c Q_c} = N_1(\text{ВИТК.})$	100	65	42	28
$\frac{U_{H2} \cdot 10^4}{222 \sqrt{3} B_c Q_c} = N_2(\text{ВИТК.})$	476	274	177	121
$\frac{I_{H1} N_1}{\sqrt{3} \varphi_1} = h(с.м)$	470	232	128	83,3
$\frac{N_1}{m_1} = p_1$	25	13	7	4
$\frac{x_1}{p_1} = z_1(с.м)$	0,028	0,048	0,081	0,132
$p_1 m_1 z_1 h = Q_{M1}(с.м^2)$	1310	717	436	306
$\frac{m_2 x_2 y_2}{y_2 + i_2} = Q_{M2}(с.м^2)$	1300	717	441	309
$3 \cdot \gamma_M \pi d_2 Q_{M2} 10^{-3} = G_{M2}(м)$	10	6,76	5,05	4,22
$3 \cdot \gamma_M \pi d_1 Q_{M1} 10^{-3} = G_{M1}(м)$	12,8	8,7	6,25	5,25
$G_{M2} + G_{M1} = G_M(м)$	22,8	15,5	11,3	9,47
$\gamma_c Q_c l_c 10^{-3} = G_c(м)$	72	83,5	119	177
$G_M + G_c = G_a(м)$	94,8	99	130	187
$c + \beta G_M = G_n(м)$	152	138	158	212
$4,9 \gamma_c Q_c d 10^{-3} = G_{cy}(м)$	13	25,5	49,6	86
$k_{\partial c} \alpha_c (G_c + 0,93 G_{cy}) = P_c(\kappa Bm)$	135	171	264	410
$\frac{\rho}{\gamma_M} (k_{\partial 1} \Delta_1^2 G_{M1} + k_{\partial 2} \Delta_2^2 G_{M2}) = P_M(\kappa Bm)$	1320	960	756	682
$t \cdot p_c + \tau \cdot p_M S_*^2 = W \cdot 10^3(\kappa Bm \cdot час)$	6,47	5,35	5,33	6,3
$3_{Ta} + 3_c + 3_{II} = 3(\text{тыс. руб.})$	104	87,9	91,2	113

$\gamma_m = 8,9 \frac{г}{см^3}$, $\gamma_c = 7,8 \frac{г}{см^3}$ — удельные веса меди и стали;
 $\beta = 3,5$, $k_T = 1,3 \frac{руб}{кг}$, $\rho_H = 0,125$, $\rho_a = 0,06$, $Z_{шк} = 212 \frac{руб}{кВт}$,
 $k_M = 0,9$, $Z'_{уэ} = Z''_{уэ} = 6 \frac{руб \cdot 10^{-3}}{кВт \cdot час}$, $S_*^2 = 0,8$ — технико-экономические коэффициенты;
 $k_{дс} = 1,093$ — коэффициент добавочных потерь в стали;
 $\alpha_c = 1,46 \frac{Вт}{кг}$ — удельные потери в стали;
 $t = 8760$ час, $\tau = 500$ час — число часов использования трансформатора и число часов потерь в год;
 $\rho_2 = 3$ — число рядов элементарного проводника в обмотке ВН;
 $k_1 = 1$, $k_{д2} = 1,037$ — коэффициенты добавочных потерь.
 В приведенном расчете не учитывалась дискретность размеров проводникового материала.

Выводы

1. Вариация числа слоев обмотки НН m_1 в широком диапазоне нецелесообразна. При $8 < m_1 < 5$ высота трансформатора и диаметр сердечника достигают нетехнологических размеров.
2. Минимум расчетных затрат соответствует $m_1 = 5$.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Д. Кутявин. Проектирование обмоток трансформаторов с минимальными потерями в меди. «Электротехника», 1969, № 7.
2. Dietrich W., Auslegung von Transformatorenwicklungen mit kleinsten Wirkwiderstand, Elektrotechn, 1965, № 6.