

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С РАЗВИТЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОТОКАМИ РАССЕЯНИЯ

Рымар С.В., к.т.н., с.н.с.

Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины
Украина, 03680, Киев-150, ул. Боженко, 11
тел. +38(044) 261-54-38, e-mail: magn@i.com.ua

Розроблена оптимізаційна модель трифазного трансформатора з розвинутими поперечними магнітними потоками розсіювання, що проходять від стержня до стержня магнітопровода. Модель дозволяє розраховувати оптимальні по масі, об'єму й вартості трансформатори, як з рухомими, так і з нерухомими обмотками, при забезпеченні заданого значення індуктивності розсіювання.

Разработана оптимизационная модель трехфазного трансформатора с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния, проходящими от стержня к стержню магнитопровода. Модель позволяет рассчитывать оптимальные по массе, объему и стоимости трансформаторы, как с подвижными, так и с неподвижными обмотками, при обеспечении заданного значения индуктивности рассеяния.

ВВЕДЕНИЕ

Трехфазные трансформаторы с развитыми поперечными магнитными потоками (далее потоками) рассеяния, проходящими от стержней к стержням магнитопровода применяются в трехфазных сварочных выпрямителях для сварки штучными электродами, а в последнее время и в источниках питания, совмещенных с фильтрами высших гармоник тока. Теория их расчета была разработана в Институте электросварки им. Е.О. Патона [1, 2]. Модернизированная, с целью повышения точности расчета, методика расчета индуктивностей рассеяния трансформатора описана в работе [3]. Однако методика оптимизации такого трансформатора не публиковалась.

Существуют работы посвященные оптимизации трехфазных трансформаторов с жесткой внешней характеристикой, в частности работа [4], в которой в оптимизационной модели осуществлено полное разделение зависимых и независимых переменных, позволяющее однозначно находить оптимальный вариант трансформатора. Но приведенная там методика, применительно к рассматриваемому трансформатору, не гарантируют получения оптимального варианта с необходимым уровнем индуктивности рассеяния. Аналитически эта задача так и не была решена из-за наличия жестко закрепленного параметра – заданного значения индуктивности рассеяния, учет которого явился существенной проблемой при дифференцировании оптимизационной функции. Задачу удалось решить с помощью оптимизационной модели, предназначенной для численных методов оптимизации, приведенной ниже.

Целью статьи является описание разработанной оптимизационной модели трехфазного трансформатора с развитыми поперечными потоками рассеяния, как с подвижными, так и с неподвижными обмотками, с жестким ограничением по заданному уровню индуктивности рассеяния и полным разделением зависимых и независимых переменных. Модель позволяет однозначно оптимизировать трансформатор на минимум массы, объема или стоимости его активных материалов и будет полезна разработчикам новых свароч-

ных источников питания и источников питания, совмещенных с фильтрами высших гармоник тока.

Развитые поперечные потоки рассеяния в рассматриваемом трансформаторе обеспечиваются разнесением первичных и вторичных обмоток по длине стержней магнитопровода (рис. 1), благодаря чему потоки проходят от стержней к стержням. Индуктивность рассеяния может плавно изменяться за счет раздвижения обмоток по высоте стержней. При сдвиге обмоток индуктивность рассеяния уменьшается, при разведении – увеличивается (соответственно увеличивается и уменьшается ток в нагрузке). Индуктивности рассеяния фаз, обмотки которых находятся на крайних стержнях магнитопровода $L_{к,к}$, не равны индуктивности рассеяния фазы, обмотки которой расположены на центральном стержне магнитопровода $L_{к,ц}$ [1 – 3]. Выравнивание уровня индуктивностей можно осуществить за счет увеличения расстояния между первичной и вторичной обмотками на крайних стержнях, однако это приводит к существенному увеличению массы трансформатора. Для расчета общей усредненной индуктивности рассеяния (индуктивности короткого замыкания) трехфазного трансформатора $L_{к}$, можно использовать формулы (47) работы [3].

На рис. 1 даны обозначения: A, B, C – фазы трансформатора; a, b – толщина и ширина стержня магнитопровода; $h_{ок}, l_{ок}$ – высота и ширина окна магнитопровода; $h_{к1}$ и $h_{к2}$, $C_{к1}$ и $C_{к2}$, $C_{к01}$ и $C_{к02}$ – соответственно высоты, толщины и общие толщины катушек с первичной и вторичной обмотками; $l_{к1}, l_{к2}$ – заданные расстояния между боковыми поверхностями катушек с первичными и вторичными обмотками в окне магнитопровода; $\Delta h_1, \Delta h_2$ – заданные длины выступающих из катушек с первичной и вторичной обмоткой частей стержня магнитопровода; Δh_{12} – расстояние между торцами катушек с первичной и вторичной обмотками; d_{01}, d_{02} – заданные расстояния между стержнями магнитопровода и первичной и вторичной обмотками.

Для простоты изложения рассмотрим трансформатор, питающийся от промышленной сети с синусоидальным напряжением. Эффектом вытеснения

тока к поверхности проводников обмоток пренебрежем. При оптимизации будем рассматривать только активные материалы трансформатора – электротехническую сталь магнитопровода, медь или алюминий проводников его обмоток.

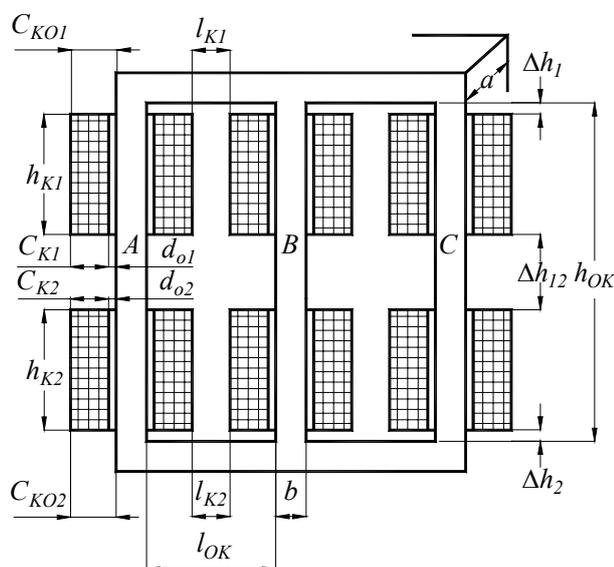


Рис. 1. Трехфазный трансформатор с поперечными магнитными потоками рассеяния

Оптимизационная модель трансформатора представляет собой процедуру глобального цикла, которая начинается с присвоения промежуточной переменной F' стартового значения оптимизационной функции F , а при последующих обращениях – присвоение значения оптимизационной функции, вычисленной на предыдущем шаге прохождения цикла:

$$F' = F. \quad (1)$$

Задается также начальное значение величины шага по виткам первичной обмотки трансформатора (при начальном значении количества витков первичной обмотки трансформатора w_1) $\Delta w = 0,1w_1$, после чего следуют выражения первого локального цикла, начинающегося с вычисления активного поперечного сечения стержня и яра магнитопровода [5]:

$$S_c = \sqrt{2} U_1 / (\omega \cdot w_1 \cdot B_m), \quad (2)$$

где U_1 – заданное действующее значение фазного напряжения на первичной обмотке трансформатора; ω – угловая частота напряжения питающей сети, рассчитываемая по заданному значению частоты сети f_c : $\omega = 2\pi f_c$; B_m – заданное амплитудное значение магнитной индукции в магнитопроводе.

Толщина стержня и яра магнитопровода [5]:

$$a = S_c / (k_c \cdot b). \quad (3)$$

Здесь k_c – заданный коэффициент заполнения магнитопровода пластинами электротехнической стали.

Поперечные сечения активного материала первичной и вторичной обмотки в половине окне магнитопровода [4]:

$$S_{o1} = w_1 I_{1дл} / J_{1дл}; \quad S_{o2} = w_1 I_{2дл} / (k_{тр} J_{2дл}), \quad (4)$$

где $I_{1дл}$, $I_{2дл}$ и $J_{1дл}$, $J_{2дл}$ – соответственно длительные действующие фазные значения токов (см. работу [4]) и заданных плотностей токов в первичной и вторич-

ной обмотках трансформатора; $k_{тр}$ – коэффициент трансформации, $k_{тр} \approx U_1 / U_2$; U_2 – заданное действующее значение фазного напряжения на вторичной обмотке в режиме холостого хода.

Высота катушки с первичной обмоткой равна:

$$h_{k1} = S_{o1} / (k_{o1} \cdot C_{K1}), \quad (6)$$

где k_{o1} – коэффициент заполнения первичной обмотки проводниковым материалом (значения лежат в диапазоне 0,5...0,95).

Общая толщина катушки с первичной обмоткой:

$$C_{K01} = d_{o1} + C_{K1}; \quad (7)$$

ширина окна магнитопровода определяется из выражения:

$$l_{ок} = 2C_{K01} + l_{K1}; \quad (8)$$

толщина катушки со вторичной обмоткой равна:

$$C_{K2} = (l_{ок} - l_{K2}) / 2 - d_{o2}; \quad (9)$$

общая толщина катушки со вторичной обмоткой:

$$C_{K02} = d_{o2} + C_{K2}; \quad (10)$$

высота катушки со вторичной обмоткой:

$$h_{k2} = S_{o2} / (k_{o2} C_{K2}). \quad (11)$$

Здесь k_{o2} – коэффициент заполнения вторичной обмотки проводниковым материалом.

Средние длины витков первичной и вторичной обмотки:

$$l_{ср.в1} = 2(a + b) + 2\pi(d_{o1} + C_{K1}/2); \quad (12)$$

$$l_{ср.в2} = 2(a + b) + 2\pi(d_{o2} + C_{K2}/2); \quad (13)$$

По формулам работы [3]: (47) – (52) и (10), (6), (7), (21), (12), (13), вычисляются наименьшее значения индуктивности трансформатора $L_{к}^{\min}$, при заданном минимальном расстоянии между обмотками $\Delta h_{12} = \Delta h_{12}^{\min}$ и уточняется количество витков первичной обмотки трансформатора:

$$w_1 = \begin{cases} w_1 + \Delta w, & \text{если } L_{к}^{\min} < L_{к.3}^{\min}; \\ w_1 - \Delta w, & \text{если } L_{к}^{\min} > L_{к.3}^{\min}, \end{cases} \quad (14)$$

где $L_{к.3}^{\min}$ – минимальное заданное значение индуктивности рассеяния.

Выражение (14) образует подцикл, при входе в который нужно использовать только одно из его текущих условий с неизменным значением Δw , с пересчетом величины $L_{к}^{\min}$ на каждом шаге. Подцикл необходимо выполнять до тех пор, пока текущее условие истинно. После этого уменьшается значение шага по виткам первичной обмотки $\Delta w = 0,5\Delta w$.

Условие по выходу из первого локального цикла имеет вид:

$$|L_{к.3}^{\min} - L_{к}^{\min}| < \epsilon_1, \quad (15)$$

где ϵ_1 – задаваемая точность вычислений в первом локальном цикле.

Выражения (2) – (15), образуют тело первого локального цикла, который выполняется до тех пор, пока не будет удовлетворено условие (15).

Для обеспечения наибольшего заданного значения индуктивности рассеяния $L_{к.3}^{\max}$ необходимо определить максимальное расстояние между торцами катушек с первичной и вторичной обмотками $\Delta h_{12} = \Delta h_{12}^{\max}$.

Начальная величина шага по определению расстояния между торцами катушек с первичной и вторичной обмотками Δh_{12}^{\max} равна $\Delta h_{12} = 0,25\Delta h_{12}^{\min}$.

Для нахождения значения Δh_{12}^{\max} используется второй локальный цикл, начинающийся с вычисления наибольшего значения индуктивности рассеяния трансформатора L_k^{\max} по формулам работы [3], при подстановке в них значения $\Delta h_{12} = \Delta h_{12}^{\max}$:

$$\Delta h_{12}^{\max} = \begin{cases} \Delta h_{12}^{\max} + \Delta_{12}, & \text{если } L_k^{\max} < L_{k,3}^{\max}, \\ \Delta h_{12}^{\max} - \Delta_{12}, & \text{если } L_k^{\max} > L_{k,3}^{\max}, \end{cases} \quad (16)$$

Выражение (16) образует подцикл, при входе в который, нужно использовать только одно из его текущих условий при неизменном значении Δ_{12} , с пересчетом величины Δh_{12}^{\max} на каждом шаге. Подцикл выполняется до тех пор, пока истинно текущее условие подцикла. После этого уменьшается величина шага $\Delta_{12} = 0,2\Delta_{12}$ и проверяется выполнение условия по выходу из второго локального цикла:

$$|L_{k,3}^{\max} - L_k^{\max}| < \varepsilon_2, \quad (17)$$

где ε_2 – задаваемая точность вычислений во втором локальном цикле.

Выражения (16) и (17), образуют тело второго локального цикла, который выполняется до тех пор, пока не будет удовлетворено условие (17).

После этого определяется высота окна магнитопровода:

$$h_{\text{ок}} = \Delta h_1 + h_{k1} + \Delta h_{12}^{\max} + h_{k2} + \Delta h_2, \quad (18)$$

средняя длина магнитной силовой линии в магнитопроводе:

$$l_c = 3h_{\text{ок}} + 4l_{\text{ок}} + 6b, \quad (19)$$

объем, масса и стоимость активных материалов магнитопровода и обмоток:

$$V_c = l_c \cdot S_c; \quad M_c = \gamma_c \cdot V_c; \quad C_c = c_c \cdot M_c; \quad (20)$$

$V_o = 3(l_{\text{ср.в1}} S_{o1} + l_{\text{ср.в2}} S_{o2}); \quad M_o = \gamma_o \cdot V_o; \quad C_o = c_o \cdot M_o,$ (21)
где γ_c, γ_o – плотность активных материалов магнитопровода и обмоток; c_c, c_o – удельная стоимость активных материалов магнитопровода и обмоток, у.е./кг (у.е. – удельная денежная единица).

Объем, масса и стоимость активных материалов трансформатора:

$$V = V_c + V_o; \quad M = M_c + M_o; \quad C = C_c + C_o. \quad (22)$$

Оптимизационная функция трансформатора имеет вид [4]:

$$F = M_c + k_g \cdot M_o. \quad (23)$$

Здесь k_g – обобщенный весовой коэффициент, задающий соотношение между массами активного материала магнитопровода и обмоток.

Условие по выходу из глобального цикла:

$$|F - F'| / F < \varepsilon, \quad (24)$$

где ε – задаваемая точность вычислений в глобальном цикле.

Из анализа оптимизационной модели трансформатора (1) – (24) можно заключить, что независимыми переменными в ней являются две величины: b и C_{k1} , все остальные величины являются заданными или зависимыми. Независимые переменные определяются в результате оптимизации функции F . Оптимальные (минимальные) значения оптимизационной функции могут быть найдены при помощи численных методов оптимизации, например, метода Гаусса-Зейделя (покоординатного спуска) [6] при заданных начальных значениях независимых переменных b и C_{k1} . В результате оптимизации функции F определяются оп-

тимальные значения переменных b, C_{k1} и остальные величины, входящих в оптимизационную модель.

При коэффициенте $k_g = 1$ расчет трансформатора ведется на минимум массы активных материалов, при $k_g = \gamma_c / \gamma_o$ – на минимум объема активных материалов, при $k_g = c_o / c_c$ – на минимум стоимости активных материалов. В общем случае коэффициент k_g может принимать и любые другие значения [4, 7].

При оптимизации трансформатора с неподвижными обмотками можно использовать полученную оптимизационную модель, но исключить из нее выражения (16) и (17), вычисляющие максимальное расстояние между торцами катушек с первичной и вторичной обмотками Δh_{12}^{\max} для обеспечения наибольшего значения индуктивности рассеяния L_k^{\max} и убрать индексы \min и \max в выражениях (14), (15) и (18).

Отметим, что для простоты изложения в настоящей работе рассмотрена простейшая оптимизационная модель трансформатора. При необходимости модель можно модифицировать, вводя в нее блоки расчета и других параметров.

Разработанная оптимизационная модель применялась для расчета трансформаторов, совмещенных с фильтрами высших гармоник тока. Изготовленные трансформаторы хорошо зарекомендовали себя в работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана оптимизационная модель трехфазного трансформатора с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния, с полным разделением зависимых и независимых переменных. Модель позволяет однозначно оптимизировать трансформатор на минимум массы, объема или стоимости его активных материалов при обеспечении заданных значений индуктивности рассеяния.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Патон Б.Е., Лебедев В.К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. – М.: Машиностроение, 1966. – 360 с.
- [2] Лебедев В.К., Андреев В.В. Расчет тока короткого замыкания выпрямителя с несимметричным трансформатором // Автоматическая сварка. - 1972. - № 8. - С. 16-18.
- [3] Пентегов И.В., Рымар С.В. Особенности расчета индуктивностей рассеяния трансформаторов с развитыми магнитными потоками рассеяния // Электротехника і електромеханіка. – 2004. – № 2. – С. 38-45.
- [4] Пентегов И.В., Рымар С.В., Стемковский Е.П. Оптимизационная математическая модель трехфазного трансформатора и выбор его расчетного варианта при многокритериальной оптимизации // Технічна електродинаміка. – 2002. – № 1. – С. 22-28.
- [5] Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
- [6] Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
- [7] Пентегов И.В., Рымар С.В. Выбор гармоничного варианта трансформатора при его многокритериальной оптимизации // Электротехника і електромеханіка. – 2004. – № 4. – С. 60-66.

Поступила 15.03.2005