

АЛГОРИТМ ПРОЦЕДУРЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРЕХФАЗНЫХ СУХИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ АБП

Кутарёв А.М., канд. техн. наук, доцент,
Падеев А.С., канд. техн. наук, доцент, Овчинников М.Е.
Оренбургский государственный университет

В общем случае задача оптимального проектирования трёхфазных сухих трансформаторов может быть сформулирована следующим образом: найти экстремум функции (минимум или максимум)

$$F(\bar{x}) = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1)$$

при условии, что

$$\varphi_i(\bar{x}) \leq 0,$$

$$\varphi_j(\bar{x}) \geq 0, \quad (2)$$

$$\varphi_{kmin} \leq \varphi_k(\bar{x}) \leq \varphi_{kmax},$$

где $F(\bar{x})$ - целевая функция;

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ - переменные величины, сочетание которых определяет исполнение трансформатора;

$\varphi_i(\bar{x}), \varphi_j(\bar{x}), \varphi_k(\bar{x})$ - неравенства, определяющие условия работоспособности проектируемого трансформатора.

При проектировании трёхфазных сухих трансформаторов первого и второго габаритов для агрегатов бесперебойного питания (АБП) переменными величинами являются диаметр стержня d_c , магнитная индукция в стержне B_c , плотность тока в обмотках трансформатора J_1 и J_2 , размеры обмоточного провода, размеры каналов и т.д. Ряд переменных величин изменяется не непрерывно, а дискретно, например, диаметр стержня, размеры обмоточных проводов, размеры осевых и радиальных каналов. В этом плане задача оптимального проектирования трансформаторов относится к задачам дискретного математического программирования. Для решения подобных задач используют специальные методы [1].

К числу ограничений на проект трансформатора, определяющих условия работоспособности, относятся ограничения на значение напряжения короткого замыкания ($U_{kmin} \leq U_k \leq U_{kmax}$), потери и ток холостого хода ($P_{xx} \leq P_{xxдоп}$ и $I_{xx} \leq I_{xxдоп}$), потери короткого замыкания ($P_{кз} \leq P_{кздоп}$),

перегрев магнитопровода ($\theta_m \leq \theta_{\text{доп}}$) и обмоток трансформатора ($\theta_1 \leq \theta_{\text{доп}}$ и $\theta_2 \leq \theta_{\text{доп}}$).

В задании на проектирование трансформатора для АБП оговаривается реактивная составляющая напряжения короткого замыкания ($U_{\text{кр}}$).

Для реализации программного обеспечения для проектирования трёхфазных сухих трансформаторов для АБП использован метод рационализированного перебора. Метод реализован по многоэтапной структурной схеме.

На первом этапе в качестве переменных выбраны непрерывно изменяющийся коэффициент k_1 , равный отношению среднего диаметра канала потока рассеяния, средняя плотность тока в обмотках трансформатора ($J_{\text{ср}}$) и магнитная индукция в стержне (B_c).

Относительное значение коэффициента k_1 определяется выражением

$$k_1 = 1 + (2 \cdot a_{01} + 2 \cdot a_{11} + a_1 + a_{12} + a_2) / d_c, \quad (3)$$

где a_{01} – ширина канала между стержнем и внутренней поверхностью внутренней (расположенной ближе к стержню) обмотки;

a_{11} – ширина осевого канала, подразделяющего внутреннюю обмотку трансформатора на два концентрических;

a_{12} – ширина осевого канала, между внутренней и внешней обмотками;

a_1 и a_2 – радиальный размер внутренней и, соответственно, внешней обмоток;

d_c – диаметр стержня.

Начальное значение коэффициента k_1 определяют по минимальному значению размеров a_1 и a_2 . Максимальное значение коэффициента определяют, например, по значению ширины шкафа, в котором размещается трансформатор.

Минимальное и максимальное значение средней плотности тока в обмотках и магнитной индукции в стержне определяют заданием на проектирование трансформатора.

Плотность тока в обмотках определяют по расчётному значению средней плотности тока:

$$J_1 = k_{j1} \cdot J_{\text{ср}} \text{ и } J_2 = k_{j2} \cdot J_{\text{ср}}, \quad (4)$$

где $k_{j1(2)}$ – отношение плотности тока в обмотке к среднему значению $J_{\text{ср}}$.

Для обмоток трансформатора, расположенных ближе к стержню, условия отдачи тепла хуже, поэтому можно принять $k_{j1} = 0,9$. Для внешней обмотки трансформатора, условия отдачи тепла лучше (по крайней мере, внешняя поверхность охлаждения обмотки свободна) и можно принять $k_{j2} = 1,1$.

Расчётное значение магнитной индукции в стержне позволяет определить, предварительно, напряжение витка

$$U_{\text{в}} = 4,44 \cdot f \cdot F_{\text{ст}} \cdot B_c \quad (5)$$

и число витков каждой из обмоток трансформатора

$$W_{p1} = U_1 / U_{\text{в}}, \quad (6)$$

$$W_{p2} = U_2 / U_{\text{в}},$$

где $U_{1(2)}$ – номинальные напряжения внутренней и, соответственно, внешней обмотки трансформатора.

Расчётное значение коэффициента k_1 позволяет определить, предварительно, радиальный размер внутренней обмотки a_{p1}

$$D_0 = d_c \cdot (k_1 - 1) - a_{12} - 2 \cdot a_{01} - 2 \cdot a_{11}, \quad (7)$$

$$a_{p1} = D_0 \cdot 0,5.$$

Для вычисления расчётной ширины канала потока рассеяния вычисляют сумму $a_1 + a_2$

$$a_1 + a_2 = a_1 a_2 = a_{p1} \cdot (1 - k_{bn} \cdot k_{j1} / (k_{nn} \cdot k_{j2})), \quad (8)$$

где k_{bn} и k_{nn} – коэффициенты, определяющие отношение радиального размера обмотки (без каналов) к радиальному размеру обмотки без каналов и изоляции для внешней и внутренней обмотки соответственно.

Основной параметр трансформатора

$$\beta = m \cdot \pi \cdot k_1 \cdot d_c \cdot U_{\text{в}} \cdot J_{\text{ср}} \cdot k_{j1} \cdot a_{p1} / S_1 / k_{\text{нн}}. \quad (9)$$

Расчётное значение высоты внутренней обмотки

$$h_1 = \pi \cdot k_1 \cdot d_c / \beta. \quad (10)$$

Предварительное значение реактивной составляющей напряжения короткого замыкания

$$U_{кр} = (a_1 a_2 / 3 + a_{11} / 4 + a_{21} / 4 + a_{12}) \cdot \beta \cdot S_1 / (U_B^2 \cdot 80). \quad (11)$$

По расчётному значению напряжения короткого замыкания отсеивают не перспективные варианты проекта трансформатора, соответствующие текущим расчётным значениям переменных k_1 , $I_{ср}$ и B_c . Оценку варианта проекта производят по условию

$$C_{min} \cdot U_{крдоп} \leq U_{кр} \leq C_{max} \cdot U_{крдоп}, \quad (12)$$

где C_{min} и C_{max} — коэффициенты, определяющие, предварительно, диапазон возможных перспективных вариантов проекта.

Если вариант проекта является перспективным, то выполняется следующий этап проектирования.

На втором этапе проектирования трансформатора проектируются обмотки трансформатора и магнитная система. Исходными данными к проектированию внутренней обмотки являются расчётные значения радиального размера обмоток a_{p1} и $a_1 a_2$, расчётная высота обмотки h_1 , расчётное число витков обмоток W_{p1} и W_{p2} .

Проектирование обмоток (раскладка обмоток) выполняется методом полного перебора. Просматриваются все возможные варианты исполнения внутренней обмотки по числу слоёв, по числу витков в слое, по числу параллелей. По расчётным значениям размеров обмоточного провода просматриваются все возможные варианты стандартных обмоточных проводов. Уточняются размеры обмотки a_1 и h_1 . Для каждого варианта проекта на втором этапе уточняется число витков внутренней обмотки и магнитная индукция в стержне. Аналогичным образом проектируется внешняя обмотка трансформатора.

После проектирования обмоток трансформатора определяются размеры магнитопровода и производится анализ очередного варианта проекта. По результатам оптимального проектирования трансформатора генерируется таблица с пятью лучшими вариантами проекта.

С целью возможного улучшения варианта проекта следует выполнить оптимальное проектирование со следующими диаметрами окружности d_c , в которую вписана ступенчатая фигура стержня и (или) изменить размеры каналов в обмотках.

Список литературы

1. Бородулин, Ю.Б. Автоматизированное проектирование силовых трансформаторов [Текст] / Ю.Б. Бородулин, В.А. Гусев, Г.В. Попов. – М.: Энергоатомиздат. 1987. – 264 с.: ил.