

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ТРЕХФАЗНЫХ И ТРЕХФАЗНО-ДУХФАЗНЫХ МНОГООБОМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

Рымар С.В., к.т.н.,
Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины
Украина, 03680, Киев-150, ул. Боженко, 11
тел. +38(044) 287-23-88, E-mail: magn@i.com.ua

Представлені основні підходи при розробці оптимізаційної моделі трифазного і трифазно-двофазного трансформатора і автотрансформатора пристроїв пригнічення вищих гармонік струму. Запропонована спрощена модель, що дозволяє розраховувати оптимальні по масі, об'єму й вартості багатообмоткові трансформатори і автотрансформатори.

Представлены основные подходы при разработке оптимизационной модели трехфазного и трехфазно-двухфазного трансформатора и автотрансформатора устройств подавления высших гармоник тока. Предложена упрощенная модель, позволяющая рассчитывать оптимальные по массе, объему и стоимости многообмоточные трансформаторы и автотрансформаторы.

ВВЕДЕНИЕ

Трехфазные и трехфазно-двухфазные многообмоточные трансформаторы и автотрансформаторы находят все более широкое применение в устройствах подавления высших гармоник тока (УПВГТ).

Известно, что за последнее десятилетие существенно ухудшилась форма тока в электросетях [1 – 5]. Причиной этого явились высшие гармоники тока, которые генерируются оборудованием с нелинейными нагрузками: выпрямителями, частотно управляемыми электроприводами, инверторами, компьютерами, дуговыми установками и др.

Высшие гармоники тока выводят из строя электрическое и электронное оборудование: перегреваются роторы и быстро изнашиваются подшипники электродвигателей и генераторов; происходят аварии в системах управления электроприводов; взрываются электролитические конденсаторы; выходит из строя микропроцессорная техника; происходят ложные отключения защиты электрооборудования; быстро стареет изоляция и перегорают электроосветительные приборы. К тому же повсеместно возникла проблема с перегрузкой нейтралей трехфазных сетей высшими гармониками тока, в результате чего токи в нейтралях стали превышать уровень фазных токов, а несимметричные помехи стали недопустимо высокими.

В Северной Америке действует стандарт [6], обязывающий потребителей электроэнергии принимать меры к подавлению высших гармоник тока. В последнее время во всех промышленно развитых странах этой проблеме стали уделять повышенное внимание.

Наряду с экономичными и надежными "пассивными" фильтрами подавления высших гармоник тока [7, 8], в последнее время получили широкое распространение УПВГТ трансформаторного и автотрансформаторного типа [9–19]. Эти устройства очень просты, надежны, экономичны и представляют собой многообмоточные трансформаторы и автотрансформаторы с комбинированным соединением обмоток фаз для компенсации высших гармоник тока. Такие УПВГТ успешно применяются при работе с 12-, 18- и 24-пульсными выпрямителями [20], а также в сетях

крупных административных зданий, промышленных объектов, на кораблях и т.п., где нагрузки в фазах распределены приблизительно одинаково. К тому же УПВГТ автотрансформаторного типа с нулевым проводом позволяют компенсировать токи нулевой последовательности. Поэтому, в связи с увеличением количества нелинейных нагрузок и использования для их подавления УПВГТ, вопрос оптимизации последних становится актуальным.

Целью работы является представление основных подходов при разработке оптимизационной модели сухих многообмоточных трансформаторов и автотрансформаторов УПВГТ.

Основными условиями при разработке оптимизационной модели трансформаторов и автотрансформаторов является разделение параметров, относящихся к магнитопроводу и обмоткам [21] и полное разделение зависимых и независимых переменных [22, 23].

Для трансформаторов и автотрансформаторов УПВГТ целесообразно задавать значения токов и напряжений для каждой конкретной обмотки фазы, поскольку количество обмоток и вид их соединений может быть самым разнообразным.

Для простоты изложения примем допущения и ограничения: в обмотках трансформатора (автотрансформатора) текут токи и прикладываются напряжения в виде эквивалентных синусоидальных токов и напряжений, учитывающих их гармонические составляющие; эффектом вытеснения тока к поверхности проводников обмоток пренебрежем; при оптимизации рассмотрим только активные материалы трансформатора (автотрансформатора) – электротехническую сталь магнитопровода, медь или алюминий проводников обмоток.

На рис. 1 приведена классическая конструкция трехфазного трансформатора (автотрансформатора) с тремя катушками на каждом стержне магнитопровода. На рисунке даны обозначения: A, B, C – фазы трансформатора; a, b – толщина и ширина стержня магнитопровода; $h_{ок}, l_{ок}$ – высота и ширина окна магнитопровода; h_k, C_k – высота и толщина катушки с обмотками; l_k – задаваемое расстояние между боковыми поверхностями катушек двух фаз в окне магнитопровода; Δh – за-

даваемая длина выступающих из катушек частей стержня магнитопровода; d_o – задаваемое расстояние между стержнем магнитопровода и катушкой.

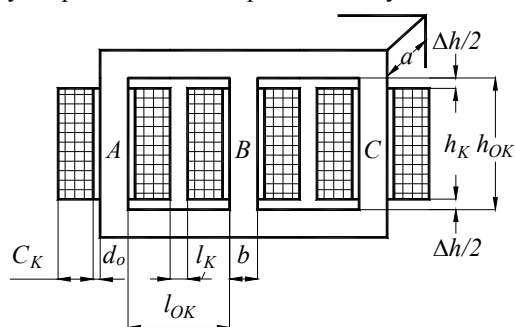


Рис. 1. Трехфазный трансформатор

На рис. 2 показана также классическая конструкция трехфазно-двухфазного трансформатора (автотрансформатора) с двумя катушками на двух крайних стержнях магнитопровода. Обозначения на рис. 1 совпадают с обозначениями на рис. 2, за исключением того, что величина l_k это задаваемое расстояние между боковыми поверхностями катушек и центральным стержнем в окне магнитопровода.

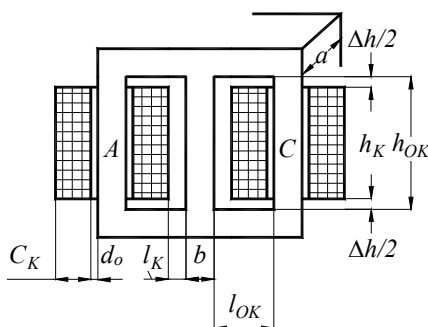


Рис. 2. Трехфазно-двухфазный трансформатор

Запишем уравнения, которые связывают электромагнитные и геометрические параметры трансформатора (автотрансформатора).

Активное поперечное сечение стержня и яра магнитопровода [24]:

$$S_c = \sqrt{2} \cdot U_1 / (\omega \cdot w_1 \cdot B_m), \quad (1)$$

где U_1 – заданное действующее значение напряжения на первой обмотке (первой обмоткой в многообмоточном трансформаторе является первичная обмотка, а в автотрансформаторе эта обмотка выбирается произвольно, но, желательно выбирать обмотку с большим напряжением); ω – угловая частота напряжения сети, рассчитываемая по заданному значению частоты сети f_c : $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_c$; w_1 – количество витков первой обмотки; B_m – задаваемое амплитудное значение магнитной индукции в магнитопроводе.

Толщина стержня и яра магнитопровода [24]:

$$a = S_c / (k_c \cdot b). \quad (2)$$

Здесь k_c – задаваемый коэффициент заполнения магнитопровода пластинами электротехнической стали.

Поперечное сечение активного материала обмоток в половине окна магнитопровода [25] для трехфазного трансформатора (автотрансформатора) и в окне магнитопровода для трехфазно-двухфазного

трансформатора (автотрансформатора):

$$S_o = \sum_i w_i \cdot I_{дл i} / (k_{тp i} \cdot J_{дл i}), \quad (3)$$

где $I_{дл i}$ и $J_{дл i}$ – соответственно длительные действующие значения токов и заданных плотностей токов в i -ых обмотках; $k_{тp i}$ – коэффициент трансформации для i -ых обмоток, $k_{тp i} \approx U_1 / U_i$, U_i – заданные действующие значения напряжений i -ых обмоток в режиме холостого хода.

Длительные действующие значения токов в i -ых обмотках равны:

$$I_{дл i} = I_i \cdot (ПВ/100\%)^{1/2}. \quad (4)$$

Здесь I_i – заданные действующие значения токов в i -ых обмотках; $ПВ$ – заданная продолжительность включения трансформатора (автотрансформатора), в процентах. Для трансформатора действующее значение тока в первичной (первой) обмотке I_1 с некоторым избытком определяется из выражения:

$$I_1 \approx \sum_{i=2}^n I_i / k_{тp i} + I_0;$$

n – количество обмоток; I_0 – действующее значение тока холостого хода трансформатора, уточняющееся на этапе оптимизации. Значение тока I_0 может быть рассчитано по методикам из работ [24, 26, 27], а для приближенных расчетов им можно пренебречь.

Высота катушки с обмотками равна:

$$h_k = S_o / (k_o \cdot C_k). \quad (5)$$

Здесь k_o – задаваемый коэффициент заполнения катушки с обмотками проводниковым материалом (значения лежат в диапазоне 0,5...0,9). В трансформаторах и автотрансформаторах УПВГТ этот коэффициент целесообразно задавать общим для всех обмоток, поскольку часть обмоток могут наматываться концентрически одна на другую, а часть – бифилярно друг с другом.

Высота окна магнитопровода:

$$h_{ок} = h_k + \Delta h. \quad (6)$$

Ширина окна магнитопровода трехфазного трансформатора (автотрансформатора):

$$l_{ок} = 2 \cdot (d_o + C_k) + l_k; \quad (7)$$

трехфазно-двухфазного трансформатора (автотрансформатора):

$$l_{ок} = d_o + C_k + l_k; \quad (8)$$

Средняя длина витка обмоток:

$$l_o = 2 \cdot (a + b) + 2 \cdot \pi \cdot (d_o + C_k/2). \quad (9)$$

Суммарная длина всех участков магнитопровода:

$$l_c = 3 \cdot h_{ок} + 4 \cdot l_{ок} + 6 \cdot b. \quad (10)$$

Объем, масса и стоимость активного материала магнитопровода:

$$V_c = l_c \cdot S_c; \quad M_c = \gamma_c \cdot V_c; \quad C_c = c_c \cdot M_c, \quad (11)$$

где γ_c – плотность активного материала магнитопровода; c_c – удельная стоимость активного материала магнитопровода, у.е./кг (у.е. – условная денежная единица).

Объем активного материала обмоток трехфазного трансформатора (автотрансформатора):

$$V_o = 3 \cdot l_o \cdot S_o; \quad (12)$$

трехфазно-двухфазного трансформатора (автотрансформатора):

$$V_0 = 2 \cdot l_0 \cdot S_0; \quad (13)$$

Масса и стоимость активного материала магнитопровода:

$$M_0 = \gamma_0 \cdot V_0; \quad C_0 = c_0 \cdot M_0. \quad (14)$$

Здесь γ_0 – плотность активного материала обмоток; c_0 – удельная стоимость активного материала обмоток, у.е./кг.

Объем, масса и стоимость активных материалов трансформатора (автотрансформатора):

$$V = V_c + V_0; \quad M = M_c + M_0; \quad C = C_c + C_0. \quad (15)$$

Оптимизационная функция трансформатора (автотрансформатора) имеет вид [25]:

$$F = M_c + k_g \cdot M_0, \quad (16)$$

где k_g – обобщенный весовой коэффициент, задающий соотношение между массами активного материала магнитопровода и обмоток. При коэффициенте $k_g = 1$ расчет ведется на минимум массы активных материалов, при $k_g = \gamma_c/\gamma_0$ – на минимум объема активных материалов, при $k_g = c_0/c_c$ – на минимум стоимости активных материалов. При двухкритериальной оптимизации коэффициент k_g лучше всего выбирать как среднегеометрическое значение для значений критериев при однокритериальной оптимизации. Например, для массы и стоимости $k_g = (1 \cdot c_0/c_c)^{1/2}$. В общем случае коэффициент k_g может принимать и любые другие значения [25].

Из анализа выражений (1) – (16), входящих в оптимизационную модель трансформатора (автотрансформатора) можно заключить, что из пяти переменных w_1, a, b, C_k, h_k независимыми переменными являются три величины, при этом из каждой пары величин a, b и C_k, h_k одна переменная может быть принята независимой, а вторая будет зависима, см. уравнения (2) и (5). Примем в качестве независимых переменных w_1, b и C_k . Остальные величины в оптимизационной модели будут заданными или зависимыми. Независимые переменные определяются в результате минимизации функции F . Минимальные значения оптимизационной функции (16) могут быть найдены аналитически из решения системы дифференциальных уравнений [25]:

$$dF/dw_1 = 0; \quad dF/db = 0; \quad dF/dC_k = 0, \quad (17)$$

или при помощи численных методов оптимизации, например, метода Гаусса-Зейделя (покоординатного спуска) [28] при заданных начальных значениях независимых переменных w_1, b и C_k . В результате минимизации функции F определяются оптимальные значения переменных w_1, b и C_k и остальные величины, входящие в оптимизационную модель:

ширина стержня и ярма магнитопровода:

$$b = S_c / (k_c \cdot a); \quad (18)$$

высота катушки с обмотками:

$$h_k = S_\phi / (k_\phi \cdot C_k); \quad (19)$$

количество витков i -ых обмоток:

$$w_i = w_1 / k_{\text{Тр}i}, \quad (20)$$

которые округляются до ближайшего целого числа.

Трехфазные типы трансформаторов и автотрансформаторов УПВГТ применяются наиболее широко, поскольку они обеспечивают симметрию фаз, как на входе, так и на выходе устройств, как без нулевого провода, так и с нулевым проводом.

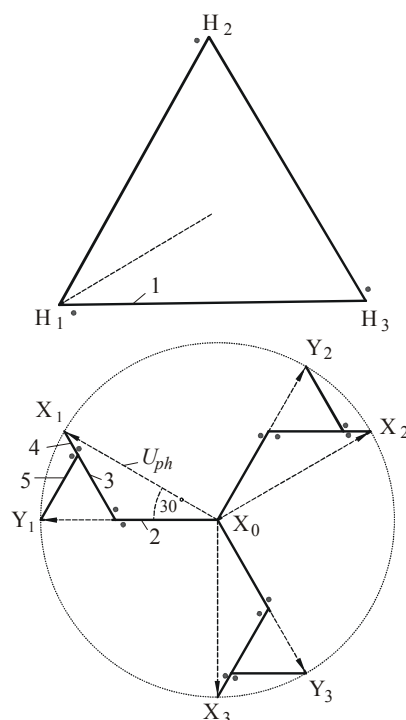


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений УПВГТ типа "треугольник"/"кривой двузуб"

На рис. 3 показана схема подключения обмоток, изображенных в виде векторных диаграмм напряжений УПВГТ трансформаторного типа "треугольник"/"кривой двузуб" [18]. Это одна из самых распространенных и эффективных схем УПВГТ, применяемая для подавления гармоник с номерами $6 \cdot (2k - 1) \pm 1$, где $k = 1, 2, 3, \dots$ и т.д. (номера гармоник 5, 7, 17, 19 и т.д.), а в автотрансформаторном исполнении – гармоник нулевой последовательности. Наряду с подавлением гармоник тока, снижая суммарный коэффициент гармоник тока ТНД₁ до 13%, устройство существенно уменьшает и гармоники напряжения на вторичной стороне трансформатора, а за счет соединения обмоток на первичной стороне в треугольник, не пропускает в сеть гармоники тока, кратные трем, которые на вторичной стороне снижаются до 7,42%.

На схеме: H_1, H_2, H_3 – клеммы входов фаз на первичной стороне; X_1, X_2, X_3 и Y_1, Y_2, Y_3 – клеммы выходов фаз на вторичной стороне; X_0 – клемма подключения нулевого провода на вторичной стороне. Обмотки, соответствующие параллельным векторам на рис. 3, располагаются на одном стержне магнитопровода и соединяются с обмотками, расположенными на других стержнях согласно схеме.

Напряжения на обмотках вторичной стороны УПВГТ на рис. 3 равны: $U_2 = 0,577U_{ph}$, $U_3 = U_5 = 0,423U_{ph}$, $U_4 = 0,154U_{ph}$. Токи в обмотках 2 и 3 равны 0,966 суммы фазных токов обмоток 4 и 5.

В ряде случаев целесообразно применение трехфазно-двухфазных трансформаторов и автотрансформаторов УПВГТ, хотя они и не обеспечивают симметрию токов в фазах. Несомненным достоинством трехфазно-двухфазных УПВГТ является их меньший объем, масса и стоимость, по сравнению аналогичными по мощности и спектру подавления гармоник тока трехфазными УПВГТ, из-за отсутствия катушки с

обмотками на центральном стержне и благодаря меньшей длине ярм магнитопровода. В их обмотках может быть увеличена плотность тока, в связи с улучшенными условиями охлаждения катушек, что позволяет так же уменьшить массу обмоток, за счет уменьшения площади поперечного сечения проводника. Отсутствие одной катушки существенно упрощает технологию изготовления трансформатора или автотрансформатора и экономически выгодно.

Отметим, что для простоты изложения здесь рассмотрена простейшая оптимизационная модель многообмоточного трансформатора (автотрансформатора) УПВГТ. При необходимости модель можно модифицировать, вводя в нее блоки расчета других параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены основные подходы при разработке оптимизационной модели многообмоточного трехфазного и трехфазно-двухфазного трансформатора и автотрансформатора устройств подавления высших гармоник тока, применение которых в промышленно развитых странах постоянно увеличивается. Разработанная упрощенная модель позволяет оптимизировать трансформатор и автотрансформатор на минимум массы, объема или стоимости их активных материалов. Изложенный материал будет полезен специалистам в области электромеханики, электрических сетей и преобразовательной техники.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий.– М.: Энергоатомиздат, 1994.– 266 с.
- [2] Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях.– К.: Наукова думка, 1985.– 268 с.
- [3] Волков И.В. Новая концепция построения силовых цепей частотно-регулируемых асинхронных электроприводов // Техническая электродинамика.– 1999.– № 4.– С. 21-26.
- [4] Barton T.H., Rectifiers, Cycloconverters and AC Controllers.– Oxford: Clarendon Press, 1994.– 670 p.
- [5] Blakey R.G. Power Electronics in Warships // Power Engineering Journal.– 1993.– April.– P. 65-70.
- [6] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems // IEEE Standard 519.– 1992.
- [7] Patent US 6,127,743. Universal Harmonic Mitigating System / M. Levin (CA), I. Volkov (UA).– 10.03.2000.
- [8] Улучшение качества электроэнергии в сетях промышленных предприятий посредством фильтров высших гармоник тока / И.В. Волков, М.Н. Курильчук, И.В. Пентегов, С.В. Рымар // Вісник Приазовського державного технічного університету. Зб. наук. праць. Ч. 2, Енергетика.– Маріуполь: ПДТУ, 2005.– Вип. № 15.– С. 15-19.
- [9] Paice D.A. Power Electronic Converter Harmonics. Multipulse methods for clean power.– NY: IEEE PRESS, 1995.– 202 p.
- [10] Patent US 5,406,437. Zero Phase Sequence Current Filter with Adjustable Impedance / M. Levin (CA).– 11.04.1995.
- [11] Patent US 5,416,688. Combined Phase – Shifting Directional Zero Phase Sequence Current Filter and Method for Using Thereof / M. Levin (CA).– 05.16.1985.
- [12] Patent US 5,543,771. Phase Shifting Transformer or Autotransformer / M. Levin (CA).– 08.06.1996.
- [13] Patent US 5,982,262. Phase Shifting Transformer with Low Zero Phase Sequence Impedance / M. Levin (CA).– 11.09.1999.
- [14] Patent US 6,127,743. Universal Harmonic Mitigating System / M. Levin (CA), I. Volkov (UA).– 10.03.2000.
- [15] Пентегов И.В., Волков И.В., Levin M. Схемы подавления высших гармоник тока с расщеплением фаз на три составляющие и методы их расчета // Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 1.– К.: ІЕД НАНУ, 2002.– С. 71-78.
- [16] Пентегов И.В., Волков И.В., Levin M. Устройства подавления высших гармоник тока // Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 1.– К.: ІЕД НАНУ, 2002.– С. 13-22.
- [17] Пути улучшения качества электроэнергии в корабельных и береговых электрических сетях и электроустановках / М. Levin, И.В. Волков, И.В. Пентегов, С.В. Рымар, Б.Б. Ларченко // Зб. наук. праць Національного університету кораблебудування.– Миколаїв: НУК, 2004.– № 3.– С. 60-70.
- [18] Улучшение качества электроэнергии в электросетях крупных административных зданий / М. Levin, И.В. Волков, И.В. Пентегов, С.В. Рымар // Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 1.– К.: ІЕД НАНУ, 2004.– С. 93-98.
- [19] Пентегов И.В., Ларченко Б.Б. Особенности расчета электромагнитных процессов в гексагональных автотрансформаторных устройствах подавления высших гармоник тока // Вісник Приазовського державного технічного університету. Зб. наук. праць. Ч. 2, Енергетика.– Маріуполь: ПДТУ, 2005.– Вип. № 15.– С. 30-35.
- [20] Размадзе Ш.М. Преобразовательные схемы и системы.– М.: Высшая школа, 1967.– 527 с.
- [21] Видмар М. Экономические законы проектирования электрических машин: Пер. с нем.– М.: ГНТИ, 1924.– 112 с.
- [22] Пентегов И.В. Определение оптимальных размеров трансформаторов // Изв. ВУЗов. Электромеханика.– 1960.– № 8.– С. 69-76.
- [23] Пентегов И.В. К расчету трансформаторов для контактной сварки // Автоматическая сварка.– 1962.– № 9.– С. 13-17.
- [24] Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
- [25] 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.
- [26] Пентегов И. В., Рымар С. В. Метод определения потерь в стали трансформатора, ориентированный на использование в САПР // Техническая электродинамика. – 1995. – № 6. – С. 35-40.
- [27] Пентегов И. В., Рымар С. В. Метод расчета тока холостого хода трансформатора, ориентированный на использование в САПР // Техническая электродинамика. – 1996. – № 1. – С. 39-45.
- [28] Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.

Поступила 23.08.2005