

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Н. В. ЛИСЕЦКИЙ, В. К. СКРИПКО, А. Н. БУРНАШЕВ

(Представлена научным семинаром кафедры электрических станций)

В [1] был дан анализ работы ферромагнитного преобразователя напряжения при симметричных режимах, когда линейные напряжения образуют симметричную трехфазную систему.

При несимметричных повреждениях и неполнофазных режимах треугольник линейных напряжений не является равносторонним, вследствие этого насыщение стали трансформаторов различных фаз преобразователя будет неодинаковым. В этом случае в напряжении на выходе ФПН будут присутствовать все нечетные гармоники [2].

Анализ периодических процессов в ферромагнитном преобразователе при несимметричных режимах производим комплексным методом [3] при тех же допущениях, что и при симметричных режимах. С помощью комплексного коэффициента связи μ_v , применяя законы Кирхгофа для схемы Спинелли, составляем комплексные уравнения преобразователя в режиме холостого хода (х. х.):

$$\begin{cases} Z_{v1} \dot{I}_{mva} + jv\omega W_1 S_{\mu_{va}}^- \dot{H}_{mva} - Z_{v1} \dot{I}_{mvb} - jv\omega W_1 S_{\mu_{vb}}^- \dot{H}_{mvb} = \dot{U}_{mvab}, \\ Z_{v1} \dot{I}_{mvb} + jv\omega W_1 S_{\mu_{vb}}^- \dot{H}_{mvb} - Z_{v1} \dot{I}_{mvc} - jv\omega W_1 S_{\mu_{vc}}^- \dot{H}_{mvc} = \dot{U}_{mvbc}, \\ \dot{I}_{mva} + \dot{I}_{mvb} + \dot{I}_{mvc} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где

$\dot{I}_{mva}, \dot{I}_{mvb}, \dot{I}_{mvc}$ — комплексные амплитуды v -тых гармоник токов в первичных обмотках фаз a, b, c ,

$\dot{H}_{mva}, \dot{H}_{mvb}, \dot{H}_{mvc}$ — комплексные амплитуды v -тых гармоник напряженностей в сердечниках фаз a, b, c ,

Z_{v1} — комплексное сопротивление v -того порядка первичной обмотки одной фазы,

S — активная площадь сечения сердечника,

W_1 — число витков первичной обмотки одного трансформатора.

Применяя закон полного тока и, принимая $v=1$, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{Z_{11}l}{W_1} \dot{H}_{m1a} + j\omega W_1 S \bar{\mu}_{1a} \dot{H}_{m1a} - \frac{Z_{11}l}{W_1} \dot{H}_{m1b} - j\omega W_1 S \bar{\mu}_{1b} \dot{H}_{m1b} = \dot{U}_{мав}, \\ \frac{Z_{11}l}{W_1} \dot{H}_{m1b} + j\omega W_1 S \bar{\mu}_{1b} \dot{H}_{m1b} - \frac{Z_{11}l}{W_1} \dot{H}_{m1c} - j\omega W_1 S \bar{\mu}_{1c} \dot{H}_{m1c} = \dot{U}_{мвс}, \\ \frac{l}{W_1} \dot{H}_{m1a} + \frac{l}{W_1} \dot{H}_{m1b} + \frac{l}{W_1} \dot{H}_{m1c} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

где

l — средняя длина магнитной силовой линии в сердечнике.

Приближенное решение системы нелинейных уравнения (2) производим методом Ньютона [4]. Система уравнений содержит три нелинейных алгебраических уравнения с тремя неизвестными H_{m1a} , H_{m1b} , H_{m1c} , которые можно рассматривать как трехмерный вектор

$$H = \begin{bmatrix} H_{m1a} \\ H_{m1b} \\ H_{m1c} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

При решении системы нелинейных уравнений методом Ньютона матрица Якоби должна быть квадратной, так как в противном случае невозможно составить обратную ей матрицу. Поэтому уравнения системы (2) умножаем на недостающие неизвестные и, обозначая

$$A = \frac{Z_{11}e}{W_1} \text{ и } C = \omega W_1 S,$$

получим

$$\begin{cases} (A H_{m1a} \cdot e^{j\alpha_a} + j C \bar{\mu}_{1a} \cdot H_{m1a} \cdot e^{j\alpha_a} - A H_{m1b} \cdot e^{j\alpha_b} - \\ - j C \bar{\mu}_{1b} \cdot H_{m1b} \cdot e^{j\alpha_b} - \dot{U}_{мав}) H_{m1c} = 0, \\ (A H_{m1b} \cdot e^{j\alpha_b} + j C \bar{\mu}_{1b} H_{m1b} \cdot e^{j\alpha_b} - A H_{m1c} \cdot e^{j\alpha_c} - \\ - j C \bar{\mu}_{1c} \cdot H_{m1c} \cdot e^{j\alpha_c} - \dot{U}_{мвс}) H_{m1a} = 0, \\ \frac{l}{W_1} H_{m1a} \cdot e^{j\alpha_a} + \frac{l}{W_1} H_{m1b} \cdot e^{j\alpha_b} + \frac{l}{W_1} H_{m1c} \cdot e^{j\alpha_c} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где

α — аргумент комплексного числа, определяется из векторной диаграммы токов и напряжений при условии, что ток отстает от фазного напряжения на 90° .

Так как степень насыщения стали трансформаторов ФПН в силу несимметрии цепи неодинакова, то $\bar{\mu}_{1a}$, $\bar{\mu}_{1b}$, $\bar{\mu}_{1c}$ в уравнениях (4) не равны друг другу по величине:

$$\bar{\mu}_{1a} = \frac{2}{H_{m1a}} \sum_{n=1}^n \delta_{2n-1} \cdot J_1 \frac{(2n-1)H_{m1a}}{H_0}, \quad (5)$$

$$\bar{\mu}_{1b} = \frac{2}{H_{m1b}} \sum_{n=1}^n \delta_{2n-1} \cdot J_1 \frac{(2n-1)H_{m1b}}{H_0}, \quad (6)$$

$$\bar{\mu}_{1c} = \frac{2}{H_{m1c}} \sum_{n=1}^n \delta_{2n-1} \cdot J_1 \frac{(2n-1)H_{m1c}}{H_0}, \quad (7)$$

где

n — индекс разложения основной кривой индукции в ряд Фурье,

θ_{2n-1} — коэффициенты ряда Фурье,

$J_1 \frac{(2n-1)H_{m1}}{H_0}$ — бесселева функция первого рода первого порядка от действительного аргумента.

Систему уравнений (4) можно представить как вектор-функцию:

$$f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Для системы функций f_1, f_2, f_3 составим матрицу Якоби относительно переменных $H_{m1a}, H_{m1b}, H_{m1c}$.

$$f'(H) = W(H) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial H_{m1a}} & \frac{\partial f_1}{\partial H_{m1b}} & \frac{\partial f_1}{\partial H_{m1c}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial H_{m1a}} & \frac{\partial f_2}{\partial H_{m1b}} & \frac{\partial f_2}{\partial H_{m1c}} \\ \frac{\partial f_3}{\partial H_{m1a}} & \frac{\partial f_3}{\partial H_{m1b}} & \frac{\partial f_3}{\partial H_{m1c}} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Если матрица (9) неособенная, то можно составить обратную ей матрицу $W^{-1}(H)$.

Для нахождения вектор-корня (3) уравнения (4) используем метод итерации:

$$\begin{bmatrix} \dot{H}_{m1a}^{(p+1)} \\ \dot{H}_{m1b}^{(p+1)} \\ \dot{H}_{m1c}^{(p+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{H}_{m1a}^{(p)} \\ \dot{H}_{m1b}^{(p)} \\ \dot{H}_{m1c}^{(p)} \end{bmatrix} - W^{-1}(\dot{H}^{(p)}) \begin{bmatrix} f_1(\dot{H}_{m1a}^{(p)}) \\ f_2(\dot{H}_{m1b}^{(p)}) \\ f_3(\dot{H}_{m1c}^{(p)}) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где индекс p указывает номер итерации. Комплекс действующего значения тока в первичной цепи каждой фазы определяется на основании закона полного тока:

$$\dot{I}_{1a} = \frac{lH_{m1a}}{\sqrt{2}W_1} e^{j\alpha_a}, \quad \dot{I}_{1b} = \frac{lH_{m1b}}{\sqrt{2}W_1} e^{j\alpha_b}, \quad \dot{I}_{1c} = \frac{lH_{m1c}}{\sqrt{2}W_1} e^{j\alpha_c}, \quad (11)$$

где

$\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$ — начальные фазы токов.

При аппроксимации основной кривой индукции тригонометрическим полиномом [1] комплексное изображение амплитуды для ν -й гармоники индукции имеет вид

$$\dot{B}_{m\nu} = 2e^{j\alpha} \sum_{n=1}^{\nu} \theta_{2n-1} \cdot I_{\nu} \frac{(2n-1)H_{m1}}{H_0}. \quad (12)$$

Тогда комплекс действующего значения напряжения на выходе преобразователя для ν -й гармоники равен геометрической сумме ν -х гармоник фазных напряжений

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\nu II} = & j \frac{2}{\sqrt{2}} \nu \omega W_{II} S \sum_{n=1}^{\nu} \theta_{2n-1} \left(e^{j\nu\alpha_a} \cdot I_{\nu} \frac{(2n-1)H_{m1a}}{H_0} + \right. \\ & \left. + e^{j\nu\alpha_b} \cdot I_{\nu} \frac{(2n-1)H_{m1b}}{H_0} + e^{j\nu\alpha_c} \cdot I_{\nu} \frac{(2n-1)H_{m1c}}{H_0} \right), \quad (13) \end{aligned}$$

где

W_{II} — число витков вторичной обмотки одного трансформатора.

Экспериментальное определение гармонического состава тока и напряжения ферромагнитного преобразователя напряжения производилось ваттметровым способом [1].

К преобразователю напряжения подводилась несимметричная система напряжений с помощью схемы, которая изображена на рис. 1, а. Уровень напряжения устанавливался трехфазным автотрансформатором 1. Автотрансформаторы 2 и 3 включались параллельно на одно из линейных напряжений. Перемещая движки автотрансформаторов по обмоткам, можно получить любую конфигурацию треугольника линейных напряжений (рис. 1, б).

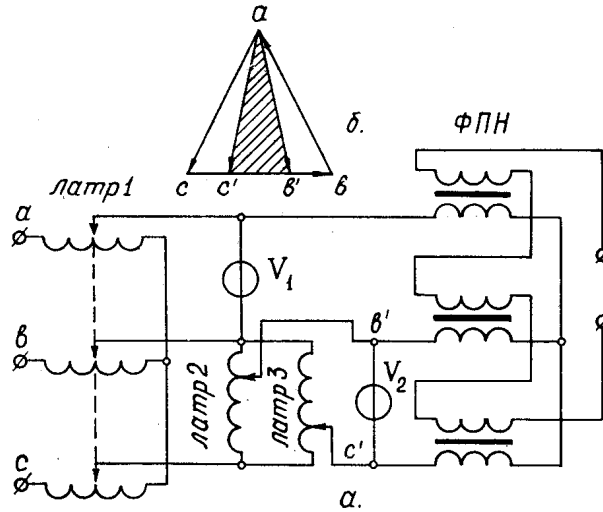


Рис. 1

Определение гармоник тока в первичной цепи и напряжения на выходе ФПН производилось для случая, когда треугольник линейных напряжений был равнобедренным, то есть имитировалось двухфазное к. з. при равенстве углов линии электропередачи и системы [5].

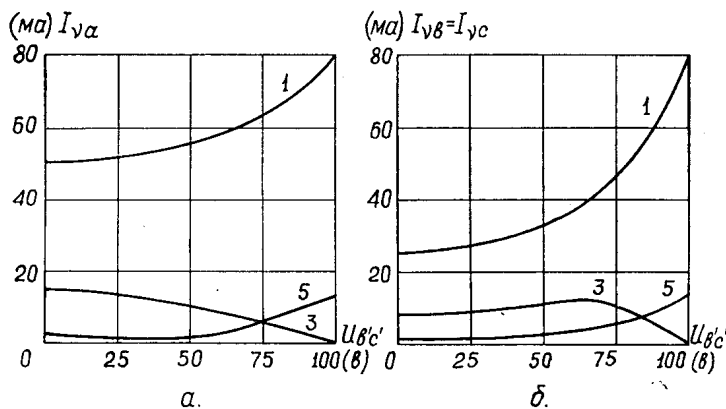


Рис. 2

На рис. 2 построены кривые изменения 1-й, 3-й и 5-й гармоник тока в первичной цепи от величины линейного напряжения $U_{в'с'}$. На рис. 3 даны кривые изменения гармоник напряжения на выходе преобразова-

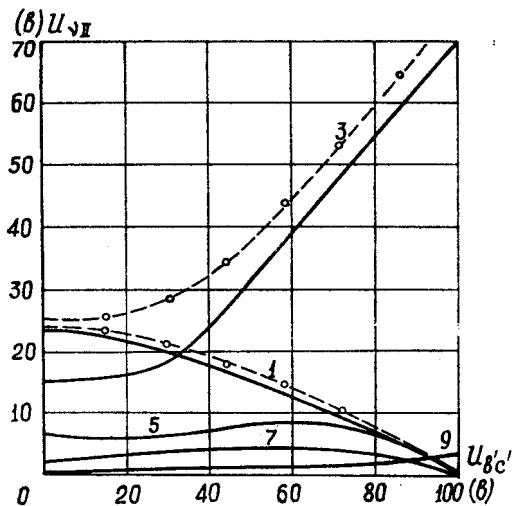


Рис. 3

теля, полученные экспериментально. Пунктиром показаны кривые изменения 1-й и 3-й гармоник напряжения, вычисленные по формуле (13). При расчетах в аппроксимирующем выражении учитывались лишь первые шесть гармоник индукции.

Выводы

1. При несимметричных режимах в напряжении на выходе ферромагнитного преобразователя напряжения присутствуют все нечетные гармоники.

2. Методика расчета, изложенная в статье, позволяет с достаточной для практики точностью определять гармоники напряжения на выходе преобразователя при несимметричных режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Лисецкий, В. К. Скрипко, А. Н. Бурнашев. Определение гармонического состава тока и напряжения при симметричных режимах. Изв. ТПИ. Настоящий сборник.
2. Н. В. Лисецкий, А. В. Шмойлов. Электромагнитное реле, реагирующее на изменение площади треугольника линейных напряжений. Изв. ТПИ, том 191, 1969.
3. Г. Е. Пухов. Комплексное исчисление. Изд. АН СССР, Киев, 1961.
4. Б. П. Демидович, И. А. Марон. Основы вычислительной математики. Изд. «Наука», М., 1966.
5. А. М. Федосеев. Основы релейной защиты, ГЭИ, 1961.