

РАСЧЕТ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ФЕРРОМАГНИТНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ТОКА КОМПЛЕКСНЫМ МЕТОДОМ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА В ЗВЕЗДУ

В. К. СКРИПКО

(Представлена научным семинаром кафедры электрических станций)

Ферромагнитный преобразователь тока (ФПТ), служащий для преобразования трехфазной системы токов в однофазную систему напряжений, состоит из трех однофазных трансформаторов с насыщенными сердечниками, обмотки которых соединены аналогично утрон-телю частоты системы Спинелли [1]. Преобразование частоты и числа фаз в ФПТ происходит благодаря эффекту насыщения стали сердечников однофазных трансформаторов. Возможны два равнозначных варианта включения преобразователей тока в схемах релейной защиты.

1. Вторичные обмотки трансформаторов тока (ТТ) соединены в треугольник, а первичные обмотки ФПТ соединены в звезду.

2. Вторичные обмотки трансформаторов тока соединены в звезду, а первичные обмотки преобразователя — в равноплечий загзаг.

В настоящей работе излагается методика расчета периодических процессов в преобразователе тока при трехфазных и двухфазных замыканиях в питающей сети на примере варианта 2. Аналитическое определение гармоник напряжения на выходе ФПТ в режиме холостого хода производят комплексным методом [2] при следующих допущениях.

1. Потоками рассеяния, потерями на гистерезис и вихревые токи пренебрегаем.

2. Перемагничивание сердечника происходит не по петле гистерезиса, а по основной кривой индукции.

Основную кривую индукции аппроксимируем тригонометрическим полиномом [3]

$$B = \sum_{n=1}^n b_{2n-1} \sin (2n-1) \frac{H}{H_0}, \quad (1)$$

где n — индекс разложения основной кривой индукции в ряд Фурье.

H_0 — произвольно выбранное значение напряженности поля, соответствующее одному радиану, при этом H может меняться

от $-\frac{\pi H_0}{2}$ до $+\frac{\pi H_0}{2}$.

Коэффициенты b_{2n-1} определяются методом тригонометрической интерполяции [4].

Форма токов в первичной цепи преобразователя остается синусоидальной при большом диапазоне их изменения, поэтому при расчете исходим из условия синусоидальности намагничивающей силы:

$$B = \sum_{n=1}^n b_{2n-1} \sin \frac{(2n-1) H_m \sin(\omega t + \alpha)}{H_0}, \quad (2)$$

где α — начальная фаза тока.

Разлагая это выражение в ряд по бесселевым функциям возрастающего порядка [5], получим

$$B = \sum_{n=1}^n \sum_{\kappa=1}^{\infty} 2b_{2n-1} J_{2\kappa-1} \frac{(2n-1) H_m}{H_0} \sin(2\kappa-1)(\omega t + \alpha), \quad (3)$$

где $J_{2\kappa-1} \frac{(2n-1) H_m}{H_0}$ — бесселева функция первого рода $(2\kappa-1)$ -го порядка от действительного аргумента.

Переходя от (3) к комплексному изображению индукции, получаем:

$$K_v[B] = \dot{B}_v = \frac{j2}{T} \int_0^T e^{-jv\omega t} \left[\sum_{n=1}^n \sum_{\kappa=1}^{\infty} 2b_{2n-1} \cdot J_{2\kappa-1} \frac{(2n-1) H_m}{H_0} \times \right. \\ \left. \times \sin(2\kappa-1)(\omega t + \alpha) \right] dt, \quad (4)$$

где v указывает порядковый номер гармоники.

Меняя в (4) порядок интегрирования и суммирования и используя свойство определенного интеграла, приходим к следующему соотношению

$$\dot{B}_v = \sum_{n=1}^n \sum_{\kappa=1}^{\infty} 2b_{2n-1} \cdot J_{2\kappa-1} \frac{(2n-1) H_m}{H_0} \int_0^T \frac{j2}{T} e^{-jv\omega t} \times \\ \times \sin(2\kappa-1)(\omega t + \alpha) dt. \quad (5)$$

Интеграл в выражении (5) является комплексным изображением тригонометрической функции $\sin(2\kappa-1)(\omega t + \alpha)$.

В комплексном исчислении доказывается, что

$$K_v[\sin(2\kappa-1)(\omega t + \alpha)] = \begin{cases} 0, & \text{если } v \neq 2\kappa-1 \\ e^{jv\alpha}, & \text{если } v = 2\kappa-1. \end{cases}$$

Следовательно, выражение для комплексной магнитной индукции будет иметь следующий вид

$$\dot{B}_v = 2e^{jv\alpha} \sum_{n=1}^n b_{2n-1} \cdot J_v \frac{(2n-1) H_m}{H_0}. \quad (6)$$

Комплексная амплитуда v -той гармоники напряжения на вторичной обмотке одного трансформатора ФПТ будет равна

$$\dot{U}_{mv} = j2v\omega W_{II} S e^{jv\alpha} \sum_{n=1}^n b_{2n-1} \cdot J_v \frac{(2n-1) H_m}{H_0}. \quad (7)$$

где S — активная площадь сечения сердечника;

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

На рис. 1, а показано токораспределение в первичной цепи преобразователя тока при симметричных режимах.

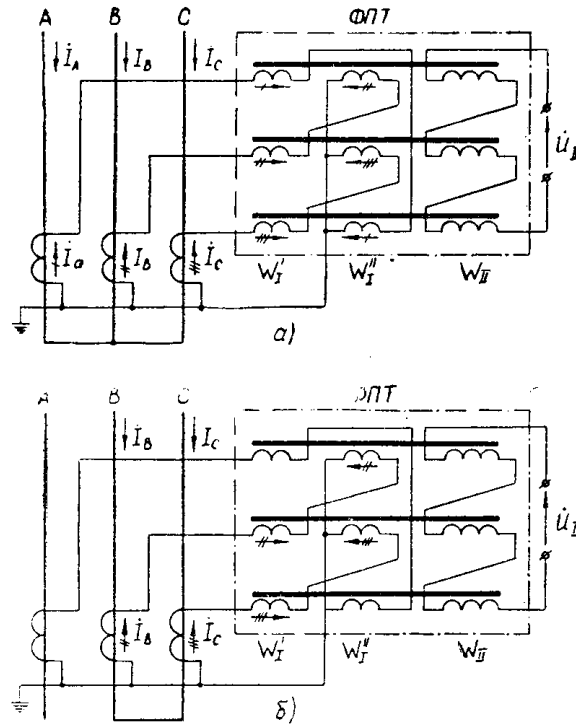


Рис. 1

Токи во вторичных обмотках трансформаторов тока будут равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на 120°

$$\left. \begin{aligned} i_a &= \sqrt{2} I \sin(\omega t + \alpha) \\ i_b &= \sqrt{2} I \sin\left(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_c &= \sqrt{2} I \sin\left(\omega t + \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где I — действующее значение тока во вторичной обмотке ТТ,
 α — начальная фаза тока.

Каждому току будет соответствовать своя напряженность магнитного поля в сердечнике, причем суммарная напряженность поля в сердечнике трансформатора фазы «а» будет равна

$$H_a = \frac{\sqrt{2} \sqrt{3} W_1}{l} I \sin\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{6}\right), \quad (9)$$

где W_1 — число витков первичной обмотки трансформатора,
 l — средняя длина магнитной силовой линии в сердечнике.

Согласно уравнению (7) комплекс действующего значения γ -той гармоники напряжения на вторичной обмотке трансформатора фазы «а» будет равен

$$\dot{U}_{\gamma a} = j \frac{2}{1 - \gamma^2} \gamma \omega W_{II} \operatorname{Se}^{j\gamma\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right)} \sum_{n=1}^n b_{2n-1} \cdot J_\gamma \frac{2,45(2n-1) W_1}{H_0 l} I. \quad (10)$$

При симметричных режимах периодические процессы в фазах будут сдвинуты относительно друг друга на $1/3$ периода основной частоты. Эти фазовые сдвиги можно учесть в расчете с помощью фазового оператора поворота для ν -той гармоники

$$a_\nu = e^{j\frac{2\pi}{3}\nu}.$$

Комплекс действующего значения напряжения на выходе преобразователя тока для ν -той гармоники равен геометрической сумме ν -тых гармоник фазных напряжений

$$\dot{U}_{\nu\Pi} = j \frac{2}{\sqrt{2}} \nu \omega W_{\Pi} S e^{j\nu(\alpha + \frac{\pi}{6})} \sum_{n=1}^n b_{2n-1} \cdot J_\nu \frac{2,45(2n-1) W_1 I}{H_0 l} (1 + a_\nu^2 + a_\nu). \quad (11)$$

$$\text{А так как } \Pi_\nu = \frac{1}{3} (1 + a_\nu^2 + a_\nu) = \begin{cases} 0, & \text{если } \nu \neq 3p, \\ 1, & \text{если } \nu = 3p, \end{cases} \quad (p - \text{целое число})$$

то на выходе преобразователя будут присутствовать лишь гармоники напряжения, кратные трем.

Комплекс действующего значение напряжения третьей гармоники на выходе ФПТ будет равен

$$\dot{U}_{3\Pi} = j \frac{18}{\sqrt{2}} \omega W_{\Pi} S e^{j3(\alpha + \frac{\pi}{6})} \sum_{n=1}^n b_{2n-1} \cdot J_3 \frac{2,45(2n-1) W_1 I}{H_0 l}. \quad (12)$$

На рис. 1,б показано токораспределение в первичной цепи преобразователя тока при двухфазном коротком замыкании между фазами В и С без учета токов нагрузки.

При принятых положительных направлениях токов $I_a = -I$ мгновенные значения напряженностей в сердечниках фаз преобразователя соответственно будут равны:

$$\left. \begin{aligned} H_a &= -\frac{\sqrt{2} W_1}{l} I \sin(\omega t + \alpha) \\ H_b &= \frac{2\sqrt{2} W_1}{l} I \sin(\omega t + \alpha) \\ H_c &= -\frac{\sqrt{2} W_1}{l} I \sin(\omega t + \alpha) \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Тогда комплекс действующего значения напряжения на выходе преобразователя для ν -той гармоники при двухфазном коротком замыкании будет равен геометрической сумме ν -тых гармоник фазных напряжений

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\nu\Pi} = j \frac{2}{\sqrt{2}} \nu \omega W_{\Pi} S e^{j\nu\alpha} & \left(\sum_{n=1}^n b_{2n-1} \cdot J_\nu \frac{2\sqrt{2}(2n-1) W_1 I}{H_0 l} - \right. \\ & \left. - 2 \sum_{n=1}^n b_{2n-1} \cdot J_\nu \frac{\sqrt{2}(2n-1) W_1 I}{H_0 l} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

При учете в аппроксимирующем выражении первых шести гармоник погрешность расчета не превышает 10%.

Выводы

1. Напряжение на выходе ферромагнитного преобразователя тока имеет гармонический состав, зависящий от вида повреждения.
2. Методика расчета, изложенная в статье, позволяет с достаточной для практики точностью определять гармоники напряжения на выходе преобразователя в различных режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Лисецкий, В. И. Худугуев, Ю. А. Кулага, В. К. Скрипко, А. Н. Бурнашев. Односистемные схемы релейных защит. — В сб.: «Электрификация металлургических предприятий Сибири». Изд. ТГУ, Томск, 1971.
 2. Г. Е. Пухов. Комплексное исчисление и его применение. Изд. АН СССР, Киев, 1961.
 3. Л. С. Гольдфарб, Г. Р. Герценберг. Определение гармоник тока и напряжения в электрических цепях, содержащих железо. — «Электричество», 1939, № 1.
 4. Э. Уитткер, Г. Робинсон. Математическая обработка результатов наблюдений. ОНТИ, 1935.
 5. Е. Филиппов. Нелинейная электротехника. М., «Энергия», 1968.
-