ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
Том 76 ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА 1954 г.

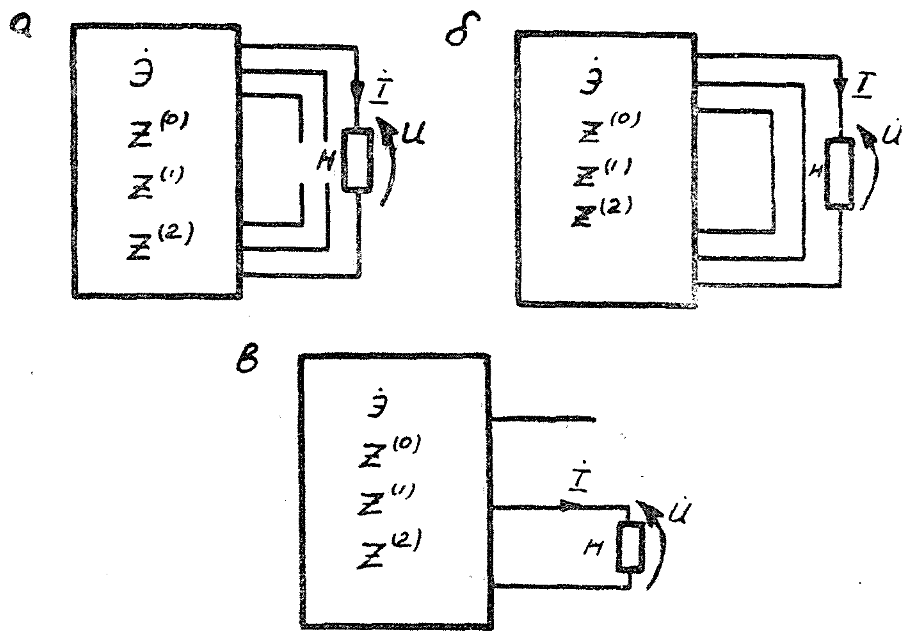
О РАСЧЕТЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С НЕЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

В. Н. СОСУНОВА

Рассмотрим представленные на фиг. 1 случаи расчета трехфазных цепей, содержащих инерционный нелинейный элемент, присутствие которого в цепи практически не нарушает синусоидальности режима.

Такими элементами приближенно могут считаться шунтирующие дроссели при малом влиянии в цепи емкостей. Фиг. 1 отвечает различным случаям коротких замыканий и обрывов фаз в месте включения дросселей.

Покажем, что все эти случаи расчета трехфазной цепи могут быть сведены к расчету однофазной цепи с одним нелинейным элементом.



Фиг. 1

Считаем, что показанный на фиг. 1 шестиполюсник—симметричная трехфазная цепь, а источник асимметрии, содержащий нелинейный элемент, вынесен.

Источник асимметрии рассматриваем, как несимметричную трехфазную систему напряжений, содержащую нелинейный элемент, тогда всю цепь можно рассматривать, как симметричную трехфазную цепь, к которой приложена несимметричная система напряжений. Для такой цепи справедлив принцип независимости действия симметричных составляющих.

Любую несимметричную трехфазную систему можно разложить на 3 симметричных трехфазных системы. Применяя формулы разложения, находим для каждого случая симметричные составляющие токов и напряжений несимметричного источника.

Получаем 3 нелинейных уравнения, связывающих токи и напряжения отдельных последовательностей, в этих уравнениях напряжения являются неизвестными функциями токов.

Затем, используя граничные условия в месте асимметрии, сводим задачу к одному нелинейному уравнению, в котором ток и напряжение связаны заданными вольт- и фазовоамперными характеристиками. Следовательно, задача сводится к расчету однофазной цепи с одним нелинейным элементом. Решение этой задачи известно [1; 2].

Рассмотрим вышесказанное на примере.

1. Схема фиг. 1а.

Граничные условия:

$$\dot{U}_A = \dot{U}, \quad \dot{I}_A = \dot{I}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_C = 0. \tag{1}$$

Устанавливаем зависимости между симметричными составляющими несимметричной трехфазной системы

$$\dot{I}^{(o)} = \dot{I}^{(1)} = \dot{I}^{(2)} = \frac{\dot{I}}{3}, \tag{2}$$

$$\dot{U}^{(o)} + \dot{U}^{(1)} + \dot{U}^{(2)} = \dot{U}.$$

Схему замещения каждой последовательности можно рассматривать со стороны зажимов источника асимметрии данной последовательности, как двухполюсник.

Запишем уравнения, связывающие токи и напряжение отдельных последовательностей:

$$\begin{aligned} \dot{U}^{(o)} &= -z^{(o)} \dot{I}^{(o)}, \\ \dot{U}^{(1)} &= -z^{(1)} \dot{I}^{(1)} + \dot{Э}, \\ \dot{U}^{(2)} &= -z^{(2)} \dot{I}^{(2)}, \end{aligned} \tag{3}$$

где $z^{(o)}$, $z^{(1)}$, $z^{(2)}$ — сопротивления двухполюсников схем замещения нулевой, прямой и обратной последовательностей; $\dot{Э}$ — напряжение холостого хода двухполюсника прямой последовательности.

Суммируя левые и правые части уравнений (3) и учитывая граничные условия, получаем одно нелинейное уравнение

$$\dot{U} = -(z^{(o)} + z^{(1)} + z^{(2)}) \frac{\dot{I}}{3} + \dot{Э}. \tag{4}$$

Обозначая

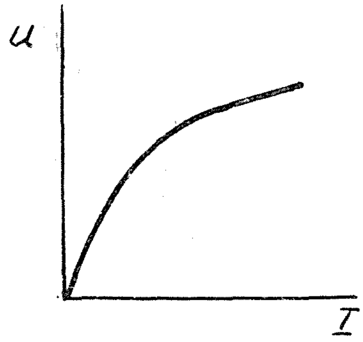
$$\frac{z^{(o)} + z^{(1)} + z^{(2)}}{3} = z,$$

получим

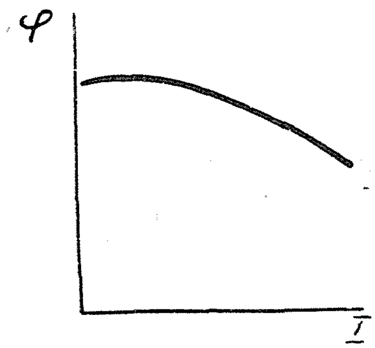
$$\dot{Э} = \dot{U} + z\dot{I}. \tag{5}$$

Используя уравнение (5) и заданные характеристики нелинейного элемента (фиг. 2, 3), можно построить кривые $Э = f_1(I)$ и $\varphi_Э = f_2(I)$.

Для этого задаемся током I и по кривой фиг. 2 находим модуль напряжения $\dot{U}$. По кривой фиг. 3 находим угол сдвига между действующими значениями тока и напряжения. Затем, суммируя величины $\dot{U}$ и $z\dot{I}$, получаем комплекс напряжения холостого хода $\dot{\text{Э}}$. Задаваясь достаточным количеством точек, получим зависимость $\dot{\text{Э}} = f_1(I)$ и $\varphi_{\text{э}} = f_2(I)$, по которым нетрудно найти значение тока, соответствующее подсчитанному



Фиг. 2



Фиг. 3

предварительно напряжению холостого хода Э, а также $\varphi_{\text{э}}$ —сдвиг фаз между током $\dot{I}$ и напряжением $\dot{\text{Э}}$.

2. Схема фиг. 1б.

Граничные условия в месте асимметрии:

$$\dot{U}_A = \dot{U}, \quad \dot{I}_A = \dot{I}, \quad \dot{U}_B = \dot{U}_C = 0.$$

Устанавливаем зависимости между симметричными составляющими несимметричной трехфазной системы

$$\dot{U}^{(0)} = \dot{U}^{(1)} = \dot{U}^{(2)} = \frac{\dot{U}}{3},$$

$$\dot{I}^{(0)} + \dot{I}^{(1)} + \dot{I}^{(2)} = \dot{I}. \tag{6}$$

Для данного случая асимметрии уравнения отдельных последовательностей удобно написать в форме (7):

$$\dot{I}^{(0)} = - Y^{(0)} \dot{U}^{(0)},$$

$$\dot{I}^{(1)} = - Y^{(1)} \dot{U}^{(1)} + \dot{I}_к,$$

$$\dot{I}^{(2)} = - Y^{(2)} \dot{U}^{(2)}, \tag{7}$$

где $Y^{(0)}$, $Y^{(1)}$, $Y^{(2)}$—проводимости двухполюсников схем замещения нулевой, прямой и обратной последовательности; $\dot{I}_к$ — ток короткого замыкания двухполюсника прямой последовательности.

Суммируя левые и правые части уравнения (7) и учитывая граничные условия (6), получаем:

$$\dot{I} = -(Y^{(0)} + Y^{(1)} + Y^{(2)}) \frac{\dot{U}}{3} + \dot{I}_к. \tag{8}$$

Обозначая $\dfrac{Y^{(0)} + Y^{(1)} + Y^{(2)}}{3} = Y$, получаем $\dot{I}_к = \dot{I} + Y\dot{U}$.

Решение полученного уравнения (8) соответствует расчету однофазной цепи с одним нелинейным элементом. Расчет может быть проведен аналогично описанному в схеме 1а.

3. Схема фиг. 1в

Очевидно, что схему фиг. 1в можно представить в виде фиг. 4, а затем в виде фиг. 5, где $\dot{U}_B = \dot{U}_C = 0$.

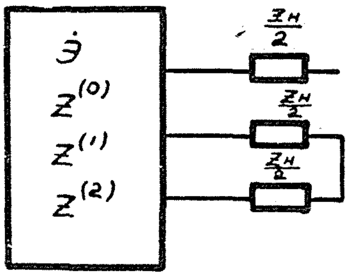
Зависимости между симметричными составляющими токов и напряжений: $\dot{U}^{(1)} = \dot{U}^{(2)}$,

$$\dot{I}^{(1)} = -\dot{I}^{(2)} = \frac{j\sqrt{3}}{3}\dot{I}. \tag{9}$$

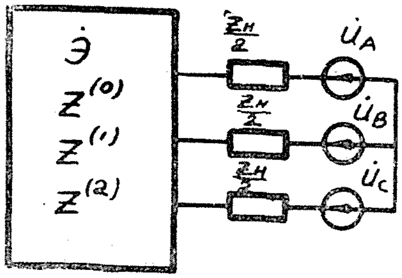
Запишем уравнение двухполюсников схем замещения прямой и обратной последовательности

$$\dot{U}^{(1)} + \frac{z_H}{2}\dot{I}^{(1)} = -z^{(1)}\dot{I}^{(1)} + \dot{Э}, \tag{10}$$

$$\dot{U}^{(2)} + \frac{z_H}{2}\dot{I}^{(2)} = -z^{(2)}\dot{I}^{(2)}. \tag{11}$$



Фиг. 4



Фиг. 5

Вычитая из уравнения (10) уравнение (11) и принимая во внимание зависимости между симметричными составляющими (9), получим:

$$z_H\,\dot{I}.\frac{j}{\sqrt{3}} = -\left(z^{(1)} + z^{(2)}\right)\frac{\dot{I}.j}{\sqrt{3}} + \dot{Э}. \tag{12}$$

Заменяя $z_H\,\dot{I} = \dot{U}$, снова получим уравнение, соответствующее расчету однофазной цепи с одним нелинейным элементом:

$$\dot{Э} = \frac{j}{\sqrt{3}}\dot{U} + \frac{j}{\sqrt{3}}\left(z^{(1)} + z^{(2)}\right)\dot{I}.$$

Расчеты трехфазной цепи с инерционным нелинейным элементом типа 1б и 1в были проверены в лаборатории. Результаты опытов удовлетворительные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронов Р. А. и Пономарева Г. Ф. Круговые диаграммы при исследовании нелинейных цепей. Электричество, № 12, 1951.

2. Пухов Г. Е. К вопросу расчета электрической цепи с одним нелинейным элементом при установившемся синусоидальном режиме. Известия ТПИ, том 72.