УДК 621.314.6. 024

А.Ф. Жаркин, И.В. Мостовяк, А.В. Самков

ДВУХЭЛЕМЕНТНАЯ СХЕМА КОМПЕНСАЦИИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА В НУЛЕВОМ ПРОВОДЕ

Визначено аналітичні вирази для параметрів нестаціонарних індуктивного і ємнісного елементів, при яких їх струми компенсують гармонічні складові струму в нульовому проводі.

В настоящее время нагрузка распределительных сетей низкого напряжения является в значительной степени несимметричной и нелинейной, а ее реактивная составляющая имеет достаточно большое значение*. Наличие в составе нагрузки нелинейных элементов существенно влияет на загруженность нулевого провода сети. В частности, в распределительных сетях низкого напряжения действующее значение тока, протекающего в нулевом проводе за счет нелинейных искажений, может увеличиться в 1,5 раза, а напряжение нулевой последовательности – в 1,5…1,7 раза. Нормально допустимое и предельно допустимое значения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности в точках общего присоединения к четырехпроводным электрическим сетям с номинальным напряжением 0,38 кВ равны 2,0 и 4,0 % соответственно. Для компенсации тока нулевой последовательности достаточно включить на фазные напряжения два дополнительных элемента, имеющих реактивный характер. При изменении параметров нагрузки должны изменяться соответствующим образом и параметры реактивных элементов. Определим законы изменения параметров реактивных элементов в зависимости от параметров нагрузки.

Пусть ток однофазной нагрузки, которая подключена на фазное напряжение $u_A(t) = U_m \sin \omega t$, определяется выражением

$$i_H(t) = A_{H1} \cos \omega t + B_{H1} \sin \omega t, \tag{1}$$

где A_{H1}, B_{H1} – постоянные коэффициенты; ω – частота; t – время.

Если допустить, что на фазное напряжение $u_B(t) = U_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$ подключен индуктивный элемент с индуктивностью L, то для тока в нем имеем

$$i_L(t) = -\frac{U_m}{\omega L} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}). \tag{2}$$

При подключении на фазное напряжение $u_C(t) = U_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$ конденсатора с емкостью C для тока в нем получим

$$i_C(t) = \omega C U_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}). \tag{3}$$

Условием равенства нулю тока в нулевом проводе является соотношение

$$i_H(t) + i_L(t) + i_C(t) = 0, \tag{4}$$

которое с учетом выражений (1)–(3) принимает вид

$$A_{H1} \cos \omega t + B_{H1} \sin \omega t - \frac{U_m}{\omega L} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \omega C U_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) = 0. \tag{5}$$

Приравняв к нулю коэффициенты при $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$, из равенства (5) получим систему уравнений

© Жаркин А.Ф., Мостовяк И.В., Самков А.В., 2010

* *Шидловский А.К., Жаркин А.Ф.* Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. – К.: Наук. думка, 2005. – 210 с.

$$A_{H1} + \frac{U_m}{2\omega} L_0 - \frac{\omega C U_m}{2} = 0\,;$$

$$B_{H1} - \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{U_m}{\omega} L_0 - \frac{\sqrt{3}}{2}\omega C U_m = 0, \text{ где } L_0 = \frac{1}{L}, \tag{6}$$

решением которой являются формулы

$$L_0 = \frac{\omega\left(-A_{H1}\sqrt{3} + B_{H1}\right)}{\sqrt{3}U_m};$$

$$C = \frac{A_{H1}\sqrt{3} + B_{H1}}{\sqrt{3}\omega U_m}. \tag{7}$$

Для случая активной нагрузки, т. е. когда коэффициенты $A_{H1} = 0$, $B_{H1} = 1$, имеем из (7)

$$L_0 = \frac{\omega}{\sqrt{3}U_m};$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{3}\omega U_m}. \tag{8}$$

При значениях параметров $\omega = 314$, $U_m = 310$ из выражений (8) получаем $L_0 = 0{,}58481$; $C = 0{,}000059$.

Для этих значений представлены графики изменения тока нагрузки $i_H(t)$ (рис. 1), индуктивного тока $i_L(t)$ (рис. 2) и тока емкости $i_C(t)$ (рис. 3). Суммарный ток – ток в нулевом проводе $i_H(t) + i_L(t) + i_C(t)$ равен нулю.

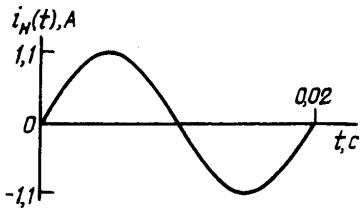

Рис. 1

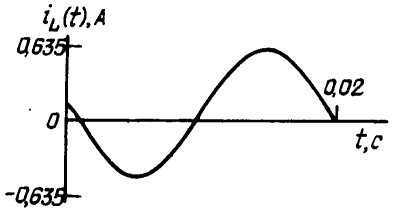

Рис. 2

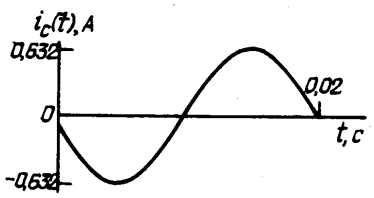

Рис. 3

Рассмотрим случай, когда ток нагрузки содержит кроме основной составляющей еще и третью составляющую, т. е. имеет вид

$$i_H(t) = A_{H1}\cos\omega t + B_{H1}\sin\omega t + A_{H3}\cos 3\omega t + B_{H3}\sin 3\omega t\,, \tag{9}$$

где A_{H3} и B_{H3} – постоянные коэффициенты.

Индуктивный элемент, подключенный на фазное напряжение $u_B(t)$, должен характеризоваться индуктивностью

$$L(t) = \frac{1}{L_0 + A_{L2}\cos 2\omega t}. \tag{10}$$

Ток в нем будет

$$i_L(t) = -\frac{U_m}{\omega L(t)}\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \tag{11}$$

или с учетом (10)

$$i_L(t)=\frac{U_m}{\omega}\left[\cos\omega t\left(\frac{L_0}{2}+\frac{A_{L2}}{2}\right)+\sin\omega t\left(-\frac{L_0\sqrt{3}}{2}+\frac{A_{L2}\sqrt{3}}{2}\right)+\cos 3\omega t\left(\frac{A_{L2}}{4}\right)+\sin 3\omega t\left(-\frac{A_{L2}\sqrt{3}}{4}\right)\right]. \quad (12)$$

Для переменной емкости конденсатора, подключенного на фазное напряжение $u_C(t)$, возьмем следующий закон изменения:

$$C(t)=C_0+A_{C2}\cos 2\omega t; \qquad C^{'}(t)=A_{C2}(-2\omega)\sin 2\omega t, \quad (13)$$

где $C^{'}(t)$ – производная функции $C(t)$ по переменной t.

Ток в емкостном элементе будет определяться формулой

$$i_L(t)=U_m\left[C^{'}(t)\sin\left(\omega t+\frac{2\pi}{3}\right)+C(t)\omega\cos\left(\omega t+\frac{2\pi}{3}\right)\right] \quad (14)$$

или с учетом (13)

$$\begin{aligned} i_C(t)=U_m\Bigg[&\cos\omega t\left(-\frac{1}{2}\omega C_0+\frac{1}{4}\omega A_{C2}\right)+\sin\omega t\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\omega C_0-\frac{\sqrt{3}}{4}\omega A_{C2}\right)+\\ &+\cos 3\omega t\left(-\frac{3\omega A_{C2}}{4}\right)+\sin 3\omega t\left(-\frac{3\sqrt{3}\omega A_{C2}}{4}\right)\Bigg]. \end{aligned} \quad (15)$$

Условие (4) равенства нулю тока в нулевом проводе с учетом (9), (12) и (15) принимает вид

$$\begin{aligned} &A_{H1}\cos\omega t+B_{H1}\sin\omega t+A_{H3}\cos 3\omega t+B_{H3}\sin 3\omega t+\frac{U_m}{\omega}\Bigg[\cos\omega t\left(\frac{L_0}{2}+\frac{A_{L2}}{2}\right)+\\ &+\sin\omega t\left(-\frac{L_0\sqrt{3}}{2}+\frac{A_{L2}\sqrt{3}}{4}\right)+\cos 3\omega t\left(\frac{A_{L2}}{4}\right)+\sin 3\omega t\left(-\frac{A_{L2}\sqrt{3}}{4}\right)\Bigg]+\\ &+U_m\Bigg[\cos\omega t\left(-\frac{1}{2}\omega C_0+\frac{1}{4}\omega A_{C2}\right)+\sin\omega t\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\omega C_0-\frac{\sqrt{3}}{4}\omega A_{C2}\right)+\\ &+\cos 3\omega t\left(-\frac{3\omega A_{C2}}{4}\right)+\sin 3\omega t\left(-\frac{3\sqrt{3}A_{C2}}{4}\right)\Bigg]=0. \end{aligned} \quad (16)$$

Из равенства следует

$$\begin{aligned} &A_{H1}+\frac{U_m}{\omega}\left(\frac{L_0}{2}+\frac{A_{L2}}{4}\right)+U_m\left(-\frac{1}{2}\omega C_0+\frac{1}{4}\omega A_{C2}\right)=0;\\ &B_{H1}+\frac{U_m}{\omega}\left(-\frac{L_0\sqrt{3}}{2}+\frac{A_{L2}\sqrt{3}}{2}\right)+U_m\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\omega C_0-\frac{\sqrt{3}}{4}\omega A_{C2}\right)=0; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} &A_{H3}+U_m\left(-\frac{3\omega A_{C2}}{4}\right)+\frac{U_m}{\omega}\left(\frac{A_{L2}}{4}\right)=0;\\ &B_{H3}+U_m\left(-\frac{3\sqrt{3}\omega A_{C2}}{4}\right)+\frac{U_m}{\omega}\left(-\frac{\sqrt{3}}{4}A_{L2}\right)=0. \end{aligned} \quad (18)$$

Решением уравнений (18) будет

$$A_{L2}=2\frac{3\sqrt{3}\omega U_m A_{3H}-3\omega U_m B_{3H}}{-3\sqrt{3}U_m^2}; \qquad A_{C2}=2\frac{-U_m B_{3H}-\sqrt{3}\omega U_m A_{H3}}{-3\sqrt{3}\omega U_m^2}. \quad (19)$$

Из системы уравнений (17) получаем

$$L_0 = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}\omega U_m y_1 + \frac{\omega U_m}{2} y_2}{-\frac{\sqrt{3}}{2}U_m^2}; \qquad C_0 = \frac{\frac{U_m}{2\omega} y_2 + \frac{\sqrt{3}}{2\omega} U_m y_1}{-\frac{\sqrt{3}}{2}U_m^2}, \tag{20}$$

где

$$y_1 = -A_{H1} - \frac{U_m}{\omega}\left(\frac{A_{L2}}{4}\right) - U_m\left(\frac{1}{4}\omega A_{C2}\right);$$

$$y_2 - B_{H1} - \frac{U_m}{\omega}\left(\frac{A_{L2}\sqrt{3}}{2}\right) + U_m\left(\frac{\sqrt{3}}{4}\omega A_{C2}\right).$$

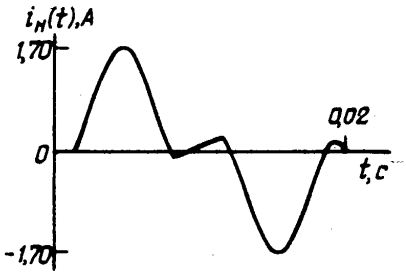

Рис. 4

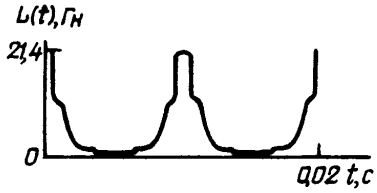

Рис. 5

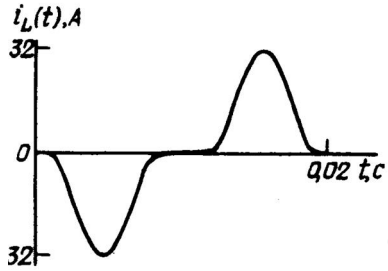

Рис. 6

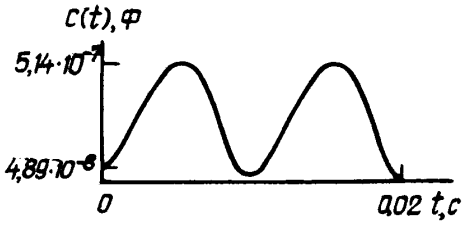

Рис. 7

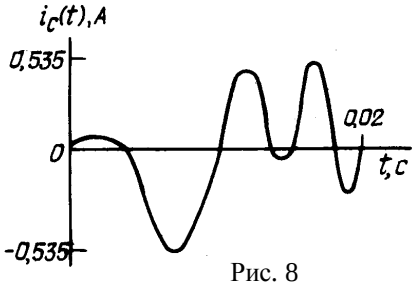

Рис. 8

Соотношения (19) и (20) позволяют по параметрам тока нагрузки определить параметры реактивных элементов L_0, C_0, A_{L2} и A_{C2}, при которых осуществляется минимизация тока в нулевом проводе. Так, при $A_{H1} = 0$, $A_{H3} = 0$, $B_{H1} = 1$, $B_{H3} = -0{,}55$ эти параметры имеют значения

$A_{C2} = -0{,}0000022$; $A_{L2} = -0{,}643$; $C_0 = 0{,}0000027$; $L_0 = 0{,}692$

Для этих значений приведены кривые изменения тока нагрузки $i_H(t)$ (рис. 4) переменной индуктивности $L(t)$ (рис. 5), тока переменной индуктивности $i_L(t)$ (рис. 6), переменной емкости $C(t)$ (рис. 7), тока переменной емкости $i_C(t)$ (рис. 8). При таком изменении указанных выше переменных ток в нулевом проводе равен нулю.

Если необходимо обеспечить компенсацию лишь третьей гармоники тока в нулевом проводе, то значения параметров будут иметь вид $A_{C2} = -0{,}0000022$; $A_{L2} = -0{,}643$; $C_0 = 0{,}0000079$; $L_0 = 0{,}707$.

Для этого случая представлены графики изменения индуктивности (рис. 9), тока переменной индуктивности (рис. 10), переменной емкости (рис. 11), тока переменной емкости

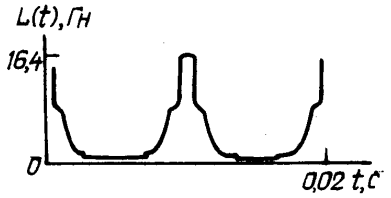

Рис. 9

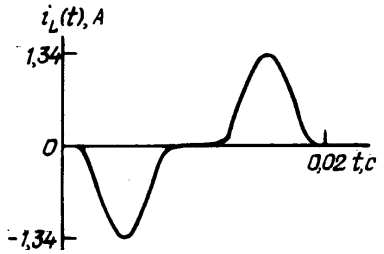

Рис. 10

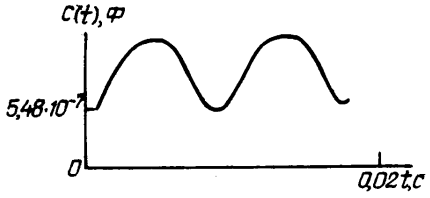

Рис. 11

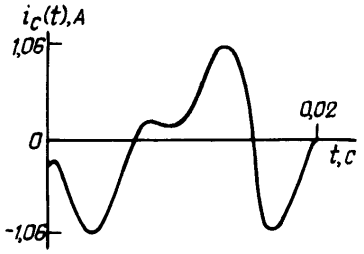

Рис. 12

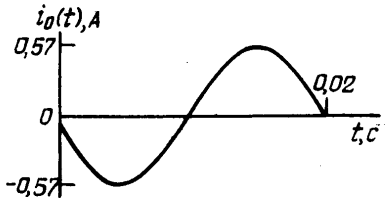

Рис. 13

(рис. 12), тока в нулевом проводе (рис. 13). Постоянные величины C_0 и L_0 выбираются из условия физической реализуемости, т. е. $C(t) > 0$ $L(t) > 0$.

Определены аналитические выражения для параметров нестационарных индуктивного и емкостного элементов, при которых их токи компенсируют гармонические составляющие тока в нулевом проводе.

Parameters of nestazionary inductive and capacity elements for the purpose of compensation harmonic current were determined.

Надійшла 1.09.2009