

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ВЕНТИЛЬНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В. Н. МИШИН, А. В. САВЧЕНКО

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ)

В данной статье проведен гармонический анализ линейных тока и напряжения вентильного компенсатора реактивной мощности (рис. 1), состоящего из батареи конденсаторов и линейных реакторов, включенных через встречно-параллельные тиристоры [1]. Достоинством компенсатора является простота силовой схемы. Реактивная мощность такой установки меняется за счет переменной слагающей реактивной мощности индуктивностей, которая вычитается из неизменной составляющей реактивной мощности конденсаторов

$$Q = Q_C - Q_L \quad (1)$$

Расчеты проводились при следующих допущениях: напряжение сети синусоидально; амплитуда напряжения сети неизменна; активные потери в элементах схемы отсутствуют.

Если начало отсчета вести от момента включения вентиля в цепи индуктивности, то формула для фазного тока ($i_{a\phi}$, i_c) примет вид

$$i_\phi = \frac{\sqrt{2} U_L}{x_i} [\sin(\alpha + \vartheta) - \sin \alpha] = I_m [\sin(\alpha + \vartheta) - \sin \alpha], \quad (2)$$

где $\vartheta = \omega t$, α — угол управления.

Для удобства разложения линейного тока (i_L) в ряд Фурье отсчет времени будем вести от момента начала положительной полуволны фазного напряжения, т. е. начало отсчета пройдет через центр положительной полуволны линейного тока регулирующего звена (рис. 2). В об-

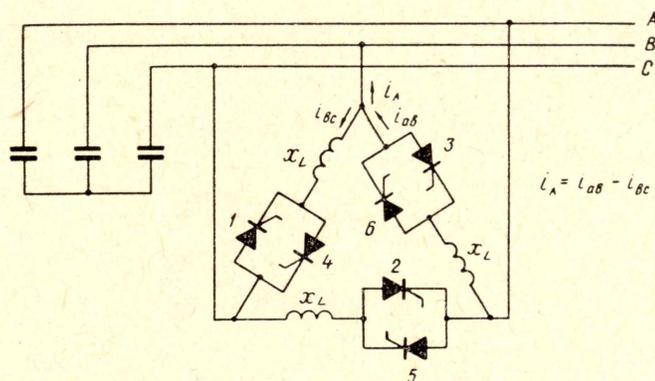


Рис. 1

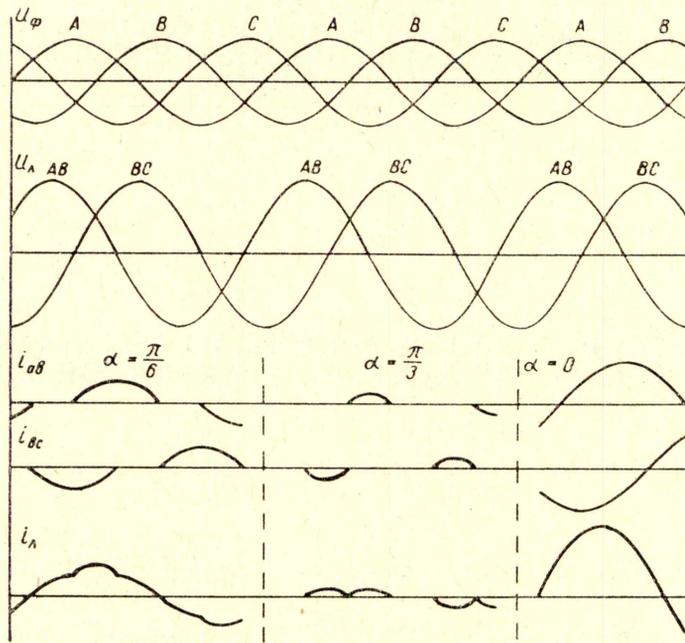


Рис. 2.

щем случае выражение мгновенного значения линейного тока регулирующего звена запишется тремя уравнениями, справедливыми на своих интервалах

$$\text{при } 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{6}$$

$$i_{\text{л}} = I_{\text{м}} (\sqrt{3} \cos \vartheta - 2 \sin \alpha), \quad 0 \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{3} - \alpha; \quad (3)$$

$$i_{\text{л}} = I_{\text{м}} \left[\sin \left(\frac{\pi}{3} + \vartheta \right) - \sin \alpha \right], \quad \frac{\pi}{3} - \alpha \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{3} + \alpha; \quad (4)$$

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{м}} \cos \vartheta, \quad \frac{\pi}{3} + \alpha \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{2}; \quad (5)$$

$$\text{при } \frac{\pi}{6} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}$$

$$i_{\text{л}} = I_{\text{м}} (\sqrt{3} \cos \vartheta - 2 \sin \alpha), \quad 0 \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{3} - \alpha; \quad (6)$$

$$i_{\text{л}} = I_{\text{м}} \left[\sin \left(\frac{\pi}{3} + \vartheta \right) - \sin \alpha \right], \quad \frac{\pi}{3} - \alpha \leq \vartheta \leq \frac{2\pi}{3} - \alpha \quad (7)$$

$$i_{\text{л}} = 0, \quad \frac{2\pi}{3} - \alpha \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{2}; \quad (8)$$

$$\text{при } \frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$$

$$i_{\text{л}} = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq \alpha - \frac{\pi}{3}; \quad (9)$$

$$i_{\text{л}} = I_{\text{м}} \left[\sin \left(\frac{\pi}{3} + \vartheta \right) - \sin \alpha \right], \quad \alpha - \frac{\pi}{3} \leq \vartheta \leq \frac{2\pi}{3} - \alpha; \quad (10)$$

$$i_L = 0, \quad \frac{2\pi}{3} - \alpha \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{2}. \quad (11)$$

Гармонический ряд для кривой линейного тока имеет вид

$$i_L = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n \vartheta, \quad (12)$$

где

$$a_1 = \frac{\sqrt{3} I_m}{\pi} (\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha), \quad 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}. \quad (13)$$

Для определения коэффициента нелинейных искажений ($K_{\text{нли}}$) линейного тока необходимо знать выражение для квадрата действующего значения этого тока (I_D^2).

$$I_D^2 = \frac{2}{\pi} I_m^2 \left[\frac{17\pi}{12} - 3\alpha - 2\sin 2\alpha + \left(\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \cos 2\alpha \right], \quad 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{6}; \quad (14)$$

$$I_D^2 = \frac{2}{\pi} I_m^2 \left[\frac{3\pi}{2} - \frac{7}{2} \alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} + \left(2\alpha - \frac{\sqrt{3}}{4} - \frac{5\pi}{6} \right) \cos 2\alpha - \right. \\ \left. - \frac{11}{4} \sin 2\alpha \right], \quad \frac{\pi}{6} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}, \quad (15)$$

$$I_D^2 = \frac{2}{\pi} I_m^2 \left[\pi - 2\alpha + \left(\alpha - \frac{\pi}{3} \right) \cos 2\alpha - \frac{3}{2} \sin 2\alpha \right], \quad \frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}. \quad (16)$$

Действующее значение первой гармоники линейного тока регулирующего звена

$$I_{(1)L} = \frac{a_1}{\sqrt{2}}. \quad (17)$$

Действующее значение первой гармоники линейного тока всего компенсатора

$$I_{(1)} = I_{(1)c} - I_{(1)L}, \quad (18)$$

где

$I_{(1)c}$ — действующее значение первой гармоники линейного тока батареи конденсаторов.

Как показано в [1] при увеличении номинального угла управления (α_n) уменьшается установленная мощность линейных реакторов. Но при этом ухудшается гармонический состав линейного тока компенсатора.

Если $Q_c = Q_L$ при α_n , то

$$I_{(1)c} = \frac{a_{1n}}{\sqrt{2}}, \quad (19)$$

где

a_{1n} — значение a_1 при α_n .

Коэффициент нелинейных искажений линейного тока компенсатора определяется по формуле

$$K_{\text{нли}} = \frac{\sqrt{I_D^2 - I_{(1)L}^2}}{I_{(1)c} - I_{(1)L}}. \quad (20)$$

Все значения в формуле (20) находятся с точностью до девятого знака, так как значения I_D^2 и $I_{(1)L}^2$ при некоторых значениях α очень мало отличаются друг от друга.

На рис. 3 представлены зависимости $K_{\text{ннц}} = f(I_{(1)}^*)$ при $\alpha_{\text{н}} = 0, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{4}$,

где
$$I_{(1)}^* = 1 - \frac{I_{(1)L}}{I_{(1)c}}$$

Эта зависимость удобнее для рассмотрения. Ее легко связать с диапазоном регулирования. Из графика видно, что компенсатор, имеющий $\alpha_{\text{н}} = 0$, обладает лучшим гармоническим составом линейного тока.

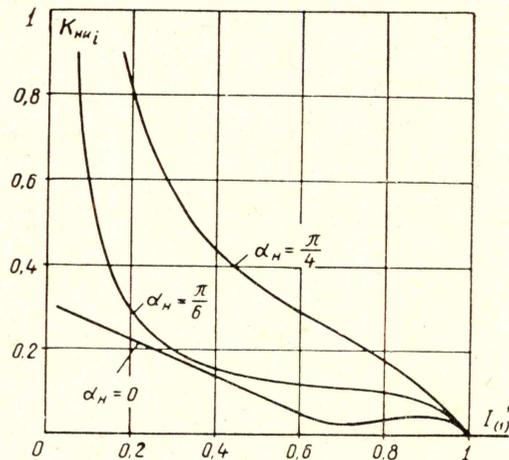


Рис. 3.

Высшие гармоники напряжения на шинах переменного тока компенсатора обусловлены падением напряжения от высших гармоник переменного тока на индуктивном сопротивлении сети. Если принять допущение, что после компенсации $\cos \varphi = 1$ и падение напряжения от первой гармоники тока на эквивалентном приведенном индуктивном сопротивлении сети (x_s) равно нулю, то коэффициент нелинейных искажений напряжения сети ($K_{\text{ннц}}$) в месте установки компенсатора может быть представлен в виде

$$K_{\text{ннц}} = \sqrt{6} \frac{x_s}{x_L} \sqrt{f_1 - f_2}, \quad (21)$$

где

x_s и x_L — индуктивные сопротивления для первой гармоники тока,

$$f_{(1)} = \frac{2}{\pi I_m^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{di_L}{d\theta} \right)^2 d\theta, \quad (22)$$

$$f_2 = \frac{I_{(1)L}^2}{I_m^2}. \quad (23)$$

$$f_1 = \frac{2}{\pi} \left(\frac{3\pi}{4} - 2\alpha - \sin 2\alpha \right), \quad 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{6}; \quad (24)$$

$$f_1 = \frac{2}{\pi} \left(\frac{2\pi}{3} - \frac{3\alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha - \frac{3}{4} \sin 2\alpha \right), \quad \frac{\pi}{6} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}; \quad (25)$$

$$f_1 = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right), \quad \frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}. \quad (26)$$

На рис. 4 представлены зависимости относительного коэффициента нелинейных искажений напряжения ($K_{\text{ннц}}^*$) от относительного тока первой гармоники компенсатора ($I_{(1)}^*$) при $\alpha_{\text{н}}=0; \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{4}$.

$$K^* = \frac{K_{\text{ннц}}}{\frac{x_S}{x_L}} = \frac{\sqrt{6}}{N} \cdot \sqrt{f_1 - f_2}, \quad (27)$$

где

N — коэффициент, учитывающий зависимость $x_L = f(\alpha_{\text{н}})$.

$N = 0$ при $\alpha_{\text{н}} = 0$; $N = 0,391$ при $\alpha_{\text{н}} = \frac{\pi}{6}$; $N = 0,181$ при $\alpha_{\text{н}} = \frac{\pi}{4}$.

Из графика видно, что гармонический состав напряжения сети также лучше для компенсатора, имеющего меньший номинальный угол управления.

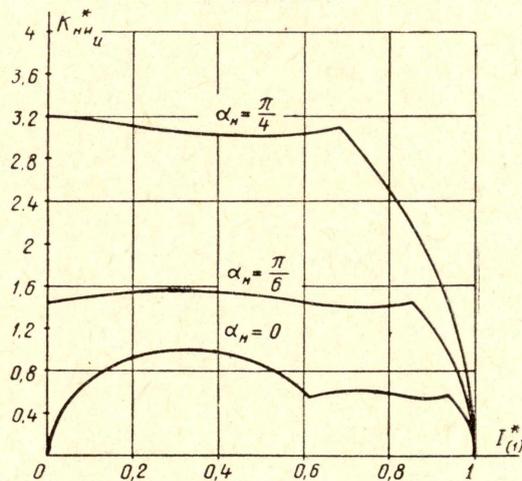


Рис. 4.

Для практического использования удобен график зависимости $\alpha_{\text{н}} = \hat{i}(\cos \varphi)$, где $\cos \varphi$ — коэффициент мощности до компенсации (рис. 5). В заштрихованной области $K_{\text{ннц}} \leq 0,05$ во всем диапазоне регулирования ($D = \infty$).

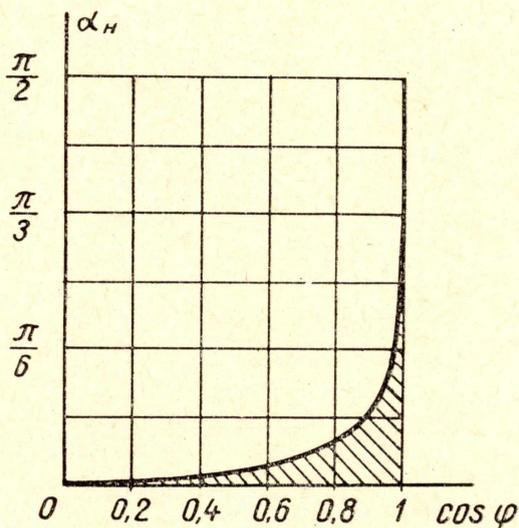


Рис. 5.

Зная $\cos \varphi$ до компенсации, по данному графику можно определить номинальный угол управления компенсатора, при котором коэффициент нелинейных искажений напряжения не превышает 5%, что удовлетворяет ГОСТ на качество напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Худяков, В. А. Чванов. Управляемый статический источник реактивной мощности. «Электричество», 1969, № 1.
-