

В первом интервале  $n < n_1$  и в (13) следует положить

$$l = l_1, \quad l_y = -p_y l_1 / \omega, \quad a = l_1 - \lambda. \quad (18)$$

Во втором интервале  $n_1 < n < n_2$  и в (13), (14)  $l, l_y, a$  принимаются значения (18) при  $k = 1, 2, \dots, \bar{n}_1$ , а при  $k = n_1 + 1; n_1 + 2, \dots, n$

$$\text{имеем } l = l_2, \quad l_y = -p_y l_2 / \omega, \quad a = l_2 - \lambda. \quad (19)$$

В третьем интервале  $n > n_1 + n_2$  и в (13), (14) величины  $l, l_y, a$  принимают значения (18) при  $k = 1, 2, \dots, n_1$  и значения (19) при  $k = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, n_1 + n_2$ ; а при  $k = n_1 + n_2 + 1, \dots$  равны

$$l = \lambda, \quad l_y = -p_y \lambda / \omega, \quad a = 0.$$

На рис. 3 приведены графики (кривые 1) переходных процессов в электроприводе  $e = f_1(t)$  и  $i = f_2(t)$ , рассчитанные по приведенным формулам. Размах пульсаций тока в начале переходного процесса больше размаха пульсаций в установившемся режиме в пять раз. На рис. 2 приведены кривые 2 переходного процесса, вычисленные при средних значениях переменных.

#### Л и т е р а т у р а

1. Анхимюк В.Л., Караульная Л.Ф., Новицкая В. А. Исследование переходных процессов вентильного электропривода с фазовым управлением методом обобщенных функций. - "Изв. вузов. Энергетика", 1973, № 12.

Б.И. Фираго

### СОПОСТАВЛЕНИЕ СИЛОВЫХ СХЕМ ТИРИСТОРНЫХ ЦИКЛОКОНВЕРТОРОВ С НУЛЕВЫМ И БЕЗ НУЛЕВОГО ПРОВОДА ДЛЯ РЕЖИМА НЕПРЕРЫВНОГО ТОКА НАГРУЗКИ

На практике находят применение разнообразные силовые схемы тиристорных циклоконверторов [1]. Представляет интерес сравнить основные показатели качества преобразования электроэнергии циклоконверторами с нулевым и без нулевого провода для получения одинаковой мощности первой гармоники в нагруз-

ке при питании от источников с синусоидальным напряжением и различным числом фаз  $m_1$ . В данной статье такое сравнение производится для тиристорных циклоконверторов, работающих без уравнивающих токов при непрерывном токе трехфазной нагрузки и системе управления, обеспечивающей прямоугольную модуляцию угла открывания вентилей  $\alpha$ .

Схемы с нулевым проводом. Действующие значения выходного напряжения и его первой гармоники равны [1]

$$U_2 = U_{m1} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{m_1}{\pi} \sin \frac{2\pi}{m_1} \cos 2\alpha}, \quad (1)$$

$$U_{2(1)} = \frac{2\sqrt{2} m_1 U_{m1}}{\pi^2} \sin \frac{\pi}{m_1} \cos \alpha, \quad (2)$$

где  $U_{m1}$  — амплитудное значение фазного напряжения источника питания;  $\alpha$  — угол открывания тиристоров.

При работе циклоконвертора на нагрузку, состоящую из активного сопротивления  $r$  и индуктивности  $L$ , в режиме непрерывного тока действующее значение тока нагрузки можно определить по формуле [2]

$$I_2 = I_d \sqrt{1 - \frac{2\delta}{\pi} \operatorname{tg} \varphi_2}, \quad (3)$$

где

$$I_d = \frac{U_d}{r} = \frac{U_{m1}}{r} \frac{m_1}{\pi} \sin \frac{\pi}{m_1} \cos \alpha, \quad (4)$$

$$\delta = \frac{1 - \exp(-\pi \operatorname{ctg} \varphi_2)}{1 + \exp(-\pi \operatorname{ctg} \varphi_2)}, \quad (5)$$

$$\operatorname{ctg} \varphi_2 = \frac{r}{\omega_2 L} = \nu \frac{r}{\omega_1 L} = \nu \operatorname{ctg} \varphi_1, \quad (6)$$

$\nu = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{f_1}{f_2}$  — отношение частоты источника к выходной частоте циклоконвертора

С учетом (2) находим действующее значение первой гармоники тока нагрузки

$$I_{2(1)} = \frac{U_{2(1)}}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{\omega L}{s}\right)^2}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d \cos \varphi_2. \quad (7)$$

Активная мощность первой гармоники одной фазы нагрузки равна

$$P_{2(1)} = U_{2(1)} I_{2(1)} \cos \varphi_2 = \frac{8}{\pi^2} U_{m_1} I_{m_1} a^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \varphi_2, \quad (8)$$

где

$$I_{m_1} = \frac{U_{m_1}}{r}, \quad (9)$$

$$a = \frac{m_1}{\pi} \sin \frac{\pi}{m_1}. \quad (10)$$

Суммарная активная мощность одной фазы нагрузки

$$P_2 = I_2^2 r = U_{m1} I_{m1} a^2 \cos^2 \alpha \left(1 - \frac{2\delta}{\pi} \operatorname{tg} \varphi_2\right). \quad (11)$$

Определив полную мощность одной нагрузки

$$S_2 = U_2 I_2, \quad (12)$$

можно найти коэффициент мощности нагрузки

$$\chi_n = \frac{P_2}{S_2} = a \cos \alpha \sqrt{\frac{1 - \frac{2\delta}{\pi} \operatorname{tg} \varphi_2}{\frac{1}{2} + \frac{m_1}{4\pi} \sin \frac{2\pi}{m_1} \cos 2\alpha}} = \frac{k_U}{k_i} \cos \varphi_2. \quad (13)$$

Если пренебречь потерями в циклоконверторе, то активная мощность одной фазы источника питания будет равна

$$P_1 = \frac{3P_2}{m_1}. \quad (14)$$

Действующее значение тока фазы источника определится как

$$I_1 = \sqrt{\frac{5}{m_1}} I_2. \quad (15)$$

Находя полную мощность фазы источника

$$S_1 = U_1 I_1 = \sqrt{\frac{5}{2m_1}} U_{m_1} I_2 \quad (16)$$

и принимая во внимание (14), получим коэффициент мощности входной цепи циклоконвертора

$$\chi = \frac{P_1}{S_1} = 3 \alpha \cos \alpha \sqrt{\frac{2}{5m_1} \left(1 - \frac{2\delta}{\pi} \operatorname{tg} \varphi_2\right)}. \quad (17)$$

Эффективность преобразования электроэнергии циклоконвертором оценим коэффициентом использования по мощности

$$k_{\text{ир}} = \frac{P_{2(1)}}{P_2} = \frac{8}{\pi^2} \frac{\cos^2 \varphi_2}{1 - \frac{2\delta}{\pi} \operatorname{tg} \varphi_2} = k_i^2. \quad (18)$$

Для сравнения силовых схем циклоконвертора запишем полученные выражения по отношению к первым гармоникам выходных величин:

$$U_{2(1)}, I_{2(1)}, P_{2(1)}.$$

Учитывая (1), (2), (3), (7), (8), (11), найдем

$$u_2 = \frac{U_2}{U_{2(1)}} = \frac{1}{k_U}, \quad (19)$$

$$i_2 = \frac{I_2}{I_{2(1)}} = \frac{1}{k_i}, \quad (20)$$

$$p_2 = \frac{P_2}{P_{2(1)}} = i_2^2 = \frac{1}{k_i^2} = \frac{1}{k_{\text{ир}}}, \quad (21)$$

$$s_2 = \frac{S_2}{U_{2(1)} I_{2(1)}} = u_2 i_2 = \frac{1}{k_u k_i}, \quad (22)$$

$$S_1 = \frac{S_1}{P_{2(1)}} = \frac{U_1 I_1}{P_{2(1)}} = \frac{1}{k_{up} \chi}, \quad (21)$$

где  $k_U, k_i$  — коэффициенты искажения по напряжению и току соответственно.

Схемы без нулевого провода. Находим действующие значения выходного напряжения и его первой гармоники [1]:

$$U_2' = \frac{\sqrt{8}}{3} U_{m1}' \sin \frac{\pi}{m_1} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{m_1}{2\pi} \sin \frac{\pi}{m_1} \cos 2\alpha}, \quad (24)$$

$$U_{2(1)}' = \frac{4\sqrt{2} m_1}{\pi^2} U_{m1}' \sin \frac{\pi}{m_1} \sin \frac{\pi}{2m_1} \cos \alpha. \quad (25)$$

Для активно-индуктивной нагрузки действующие значения тока нагрузки и его первой гармоники определяются соотношениями [1]:

$$I_2' = \frac{4\sqrt{2}}{3} I_{m1}' b \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{3\beta}{2\pi} \operatorname{tg} \varphi_2}, \quad (26)$$

$$I_{2(1)}' = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} I_{m1}' b \cos \alpha \cos \varphi_2, \quad (27)$$

$$\text{где } b = \frac{m_1}{\pi} \sin \frac{\pi}{m_1} \sin \frac{\pi}{2m_1}, \quad (28)$$

$$\beta = \frac{1 - \left[ \exp\left(-\frac{\pi}{3} \operatorname{ctg} \varphi_2\right) \right]^2}{1 - \exp\left(-\frac{\pi}{3} \operatorname{ctg} \varphi_2\right) + \left[ \exp\left(-\frac{\pi}{3} \operatorname{ctg} \varphi_2\right) \right]^2} \quad (29)$$

Активная мощность одной фазы нагрузки и ее первая гармоника соответственно равны

$$P_2' = I_2'^2 r = \frac{32}{9} U_{m1}' I_{m1}' b^2 \cos^2 \alpha \left(1 - \frac{3\beta}{2\pi} \operatorname{tg} \varphi_2\right), \quad (30)$$

$$P'_{2(1)} = U'_{2(1)} I'_{2(1)} \cos \varphi_2 = \frac{32}{\pi^2} U'_{m_1} I'_{m_1} b^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \varphi_2. \quad (31)$$

Если не учитывать потери в циклоконверторе, получим такие выражения для коэффициента мощности входной цепи, соответственно:

$$\text{для } m_1 = 2: \quad \chi' = \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{3\beta}{2\pi} \operatorname{tg} \varphi_2}, \quad (32)$$

$$\text{и для } m_1 > 2: \quad \chi' = \frac{4}{\sqrt{m_1}} b \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{3\beta}{2\pi} \operatorname{tg} \varphi_2}. \quad (33)$$

Коэффициент мощности нагрузки определяется как

$$\chi'_H = \frac{P'_2}{S'_2} = \frac{P'_2}{U'_2 I'_2} = \frac{k'_U}{k'_i} \cos \varphi_2. \quad (34)$$

Относительные значения этих электрических величин будут

$$u'_2 = \frac{U'_2}{U_{2(1)}} = \frac{1}{k'_U}, \quad (35)$$

$$i'_2 = \frac{I'_2}{I'_{2(1)}} = \frac{1}{k'_i}, \quad (36)$$

$$p_2 = \frac{P'_2}{P'_{2(1)}} = \frac{i'^2_2}{2} = \frac{1}{k'^2_i}, \quad (37)$$

$$s_2 = \frac{S'_2}{U'_{2(1)} I'_{2(1)}} = u'_2 i'_2 = \frac{1}{k'_U k'_i}, \quad (38)$$

$$s_1 = \frac{S'_1}{P'_{2(1)}} = \frac{1}{k_{up} \chi}, \quad (39)$$

причем в сравниваемых вариантах принимаем

$$I'_{2(1)} = I'_{2(1)}, \quad U'_{2(1)} = U'_{2(1)}, \quad P'_{2(1)} = P'_{2(1)}.$$

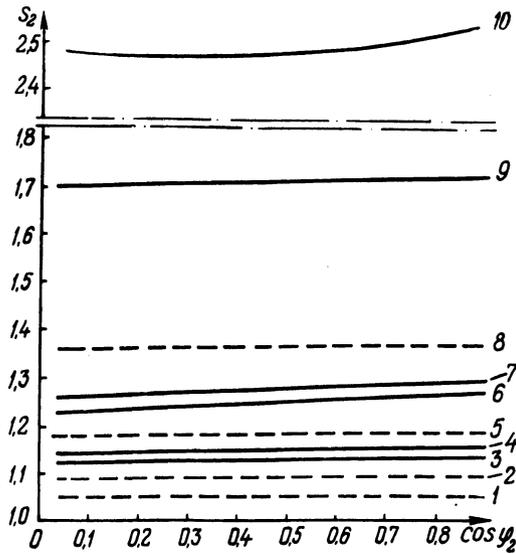


Рис. 1. Зависимость полной выходной мощности циклоконвертора от параметра нагрузки ( $\cos \varphi_2$ ) с нулевым (сплошные линии) и без нулевого провода (штриховые):

- 1-- $m_1=2, 3, 6, \alpha=0$ ; 2-- $m_1=6, \alpha=60^\circ$ ; 3-- $m_1=6, \alpha=0$ ; 4-- $m_1=3, \alpha=0$ ; 5-- $m_1=3, \alpha=0$ ; 6-- $m_1=2, \alpha=0$ ; 7-- $m_1=6, \alpha=60^\circ$ ; 8-- $m_1=2, \alpha=60^\circ$ ; 9-- $m_1=3, \alpha=60^\circ$ ; 10-- $m_1=2, \alpha=60^\circ$ .

Из анализа приведенных соотношений видно, что увеличение числа фаз  $m_1$  источника питания способствует улучшению качества преобразований циклоконвертором энергии (рис. 1,2).

Вместе с тем с увеличением числа фаз источника питания ухудшаются входные показатели циклоконвертора: коэффициент мощности входной цепи  $\chi$  (рис. 2,б) и полная (габаритная) мощность источника.

Сопоставим теперь эти схемы по первым гармоникам при одинаковом источнике питания, т.е. при  $U_{m_1} = U'_{m_1}$ .

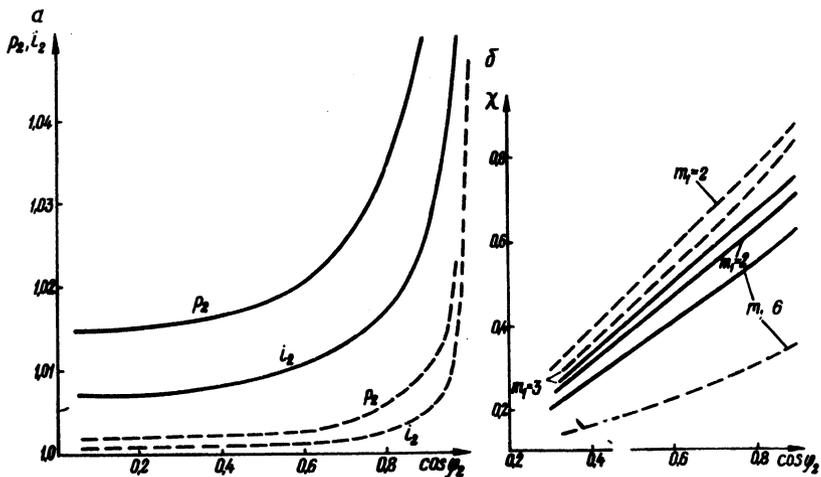


Рис. 2. Зависимость активной выходной мощности и тока циклоконвертора (а) и коэффициента мощности входной цепи циклоконвертора (б) от параметра нагрузки ( $\cos \varphi_2$ ) с нулевым проводом (сплошные линии) и без нулевого провода (пунктирные).

Сравнивая (2) и (25), (7) и (26), (8) и (31), найдем, что

$$\frac{U_{2(1)}}{U'_{2(1)}} = \frac{I_{2(1)}}{I'_{2(1)}} = \frac{1}{2 \sin \frac{\pi}{2m_1}}, \quad (40)$$

$$\frac{P_{2(1)}}{P'_{2(1)}} = \frac{1}{4 \sin^2 \frac{\pi}{2m_1}}. \quad (41)$$

Таким образом, при трехфазном выходе и  $m_1 \leq 3$  выгоднее использовать циклоконверторы без нулевого провода.

Если же источник питания имеет число фаз  $m_1 > 3$ , то целесообразно применять схемы с нулевым проводом.

### Л и т е р а т у р а

1. Фираго Б.И., Готовский Б.С., Лисс З.А. Тиристорные циклоконверторы. Минск, 1973.
2. Фираго Б.И. Электрические величины системы НПЧ-АД при непрерывном токе. — В сб.: Электроэнергетика и автоматика. Вып. 17. Кишинев, 1973.