

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТИРИСТОРНЫХ КОММУТАТОРОВ

А. М. АЗАРОВ, В. Н. БАЗАРОВ, Б. П. СОУСТИН

В выпрямительных устройствах, кроме регулирования напряжения, иногда требуется осуществить мгновенное переключение потребителя с одной сети на другую. В данном случае целесообразно применение тиристорных коммутаторов (ТК), в которых переключение с одной сети на другую и регулирование выходного напряжения осуществляется с помощью тиристоров на первичной стороне трансформатора. На вторичной стороне устанавливается неуправляемый выпрямитель. Ниже рассматриваются сравнительные энергетические показатели ТК и управляемых выпрямителей (УВ) с равным количеством управляемых вентиляей.

На рис. 1 а показана схема однофазного ТК. При анализе данной схемы вентили считаются идеальными, коммутация мгновенной, выход-

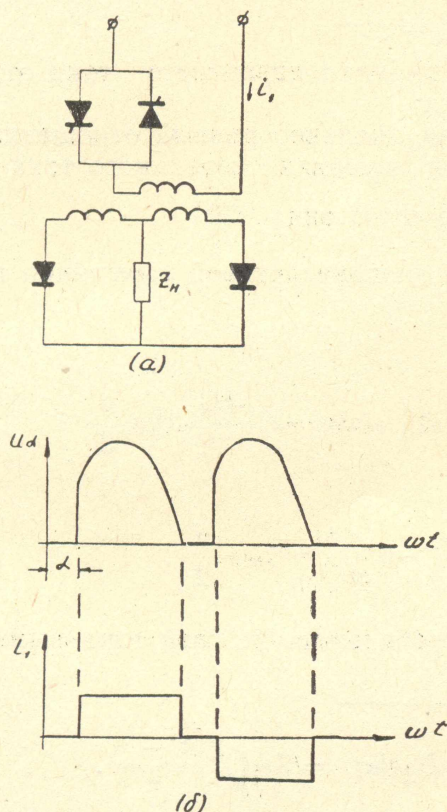


Рис. 1.

ной ток полностью сглажен, индуктивность рассеяния и активные сопротивления обмоток трансформатора равны нулю, коэффициент трансформации равен единице.

Отличительной чертой работы ТК является то, что первичный ток и выпрямленное напряжение (рис. 1 б) прерывисты независимо от характера нагрузки. Это вытекает из работы ТК, так как тиристор в первичной цепи отключается в момент, когда линейное напряжение равно нулю. Такое обстоятельство прерывистости первичного тока существенно улучшает коэффициент мощности устройства.

Выпрямленное напряжение равно:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_{2\phi} \sin \omega t d\omega t = \frac{U_{d0}}{2} (1 + \cos \alpha),$$

где $U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}U_{2\phi}}{\pi}$ — выпрямленное напряжение при $\alpha=0$.

В выпрямителе без потерь, при полностью сглаженном токе активная мощность равна выпрямленной

$$P = U_d I_d = \frac{U_{d0} I_d}{2} (1 + \cos \alpha).$$

Потребляемая реактивная мощность определится:

$$Q = -\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_{2\phi} I_d \cos \omega t d\omega t = \frac{U_{d0} I_d}{2} \sin \alpha.$$

Основным энергетическим показателем выпрямительного устройства является коэффициент мощности

$$\chi = v \cos \varphi,$$

где φ — угол сдвига первой гармоники первичного тока относительно питающего напряжения;

v — коэффициент искажения, численно равный отношению действующего значения первой гармоники первичного тока к действующему значению первичного тока $\frac{I_{1(1)}}{I_1}$

Амплитуда и действующее значение первой гармоники первичного тока

$$i_{1(1)m} = \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\alpha}{2}}^{\frac{\pi-\alpha}{2}} I_d \sin \omega t d\omega t = \frac{4I_d}{\pi} \cos \frac{\alpha}{2}$$

$$I_{1(1)} = \frac{i_{1(1)m}}{\sqrt{2}} = \frac{4I_d}{\sqrt{2}\pi} \cos \frac{\alpha}{2}.$$

Действующее значение потребляемого из сети тока выразится следующим образом:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_d^2 d\omega t} = I_d \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}.$$

Коэффициент сдвига при этом равен:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \cos \frac{\alpha}{2}, \text{ т. е. } \varphi = \frac{\alpha}{2}.$$

Коэффициент искажений можно определить по выражению

$$v = \frac{I_{1(1)}}{I_1} = \frac{4I_d \cos \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{2} \pi I_d \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}} = \frac{2\sqrt{2} \cos \frac{\alpha}{2}}{\pi \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}}.$$

Тогда коэффициент мощности определится:

$$x = \frac{2\sqrt{2}}{\pi \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}} \cos^2 \frac{\alpha}{2}.$$

Введем относительные единицы

$$U'_d = \frac{U_d}{U_{d0}} = \frac{1 + \cos \alpha}{2}; \quad P' = \frac{P}{U_{d0} I_d} = \frac{1 + \cos \alpha}{2};$$

$$Q' = \frac{Q}{U_{d0} I_d} = \frac{\sin \alpha}{2}; \quad x' = \frac{x}{2\sqrt{2}} = \frac{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}}; \quad v' = \frac{v}{2\sqrt{2}} = \frac{\cos \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}}.$$

В табл. 1 приведены выражения основных энергетических характеристик ТК и УВ, а по данным из таблицы построены сравнительные характеристики ТК и УВ (рис. 2).

Таблица 1

УВ	ТК	
$\cos \alpha$	$\cos^2 \frac{\alpha}{2}$	U'_d
$\cos \alpha$	$\cos^2 \frac{\alpha}{2}$	P'
$\sin \alpha$	$\sin \frac{\alpha}{2}$	Q'
$\cos \alpha$	$\cos \frac{\alpha}{2}$	$\cos \varphi$
$\cos \alpha$	$\frac{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}}}$	x'
$\frac{2\sqrt{2}}{\pi}$	$\frac{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}}}$	v'

Из рис. 2 видно, что при угле регулирования $\alpha = 90^\circ$ выпрямленное напряжение и активная мощность УВ равны нулю, так как $\cos \varphi = 0$ и

выпрямитель потребляет из сети только реактивную энергию. Реактивная мощность, потребляемая ТК, достигает максимума при $\alpha=90^\circ$ и в два раза меньше, чем для УВ при этом же угле регулирования.

Коэффициент мощности ТК возрастает при малых углах регулирования, что обусловливается улучшением гармонического состава первичного тока.

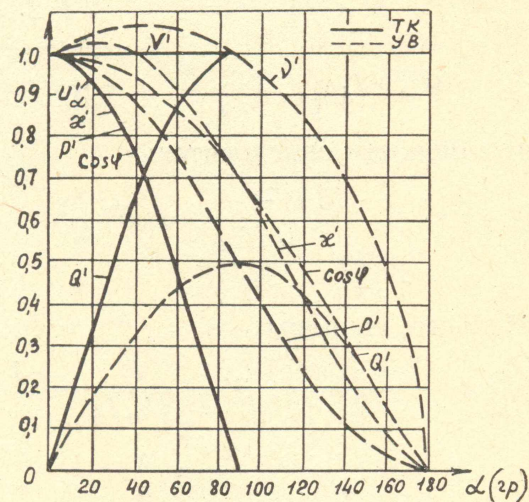


Рис. 2.

Угол α_m , при котором коэффициент искажения принимает максимальное значение, находится из условия

$$\frac{\partial v'}{\partial \alpha} = 0.$$

после преобразования получим

$$\pi \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} \right) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = 1,$$

откуда

$$\alpha_m = 46^\circ.$$

Граница диапазона улучшения v' за счет регулирования определяется из равенства

$$v' = \frac{\cos \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{\frac{\alpha - \pi}{\pi}}} = 1,$$

откуда $\alpha_{\text{гр}} = 90^\circ$.

Аналогично для χ' имеет

$$\begin{aligned} \alpha_m &= 20^\circ \\ \alpha_{\text{гр}} &= 40^\circ. \end{aligned}$$

При анализе работы схемы трехфазного ТК (рис. 3, а) примем прежние допущения и сравним характеристики ТК и 3-фазного мостового УВ.

При углах регулирования $\alpha \leq 60^\circ$ работа ТК ничем не отличается от работы УВ.

Выпрямленное напряжение при $\alpha > 60^\circ$

$$d_\alpha = -\frac{3\sqrt{6}}{\pi} \int_{\alpha}^{\frac{2\pi}{3}} U_{2\phi} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{3} \right) d\omega t = U_{d0} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{3} + \alpha \right) \right],$$

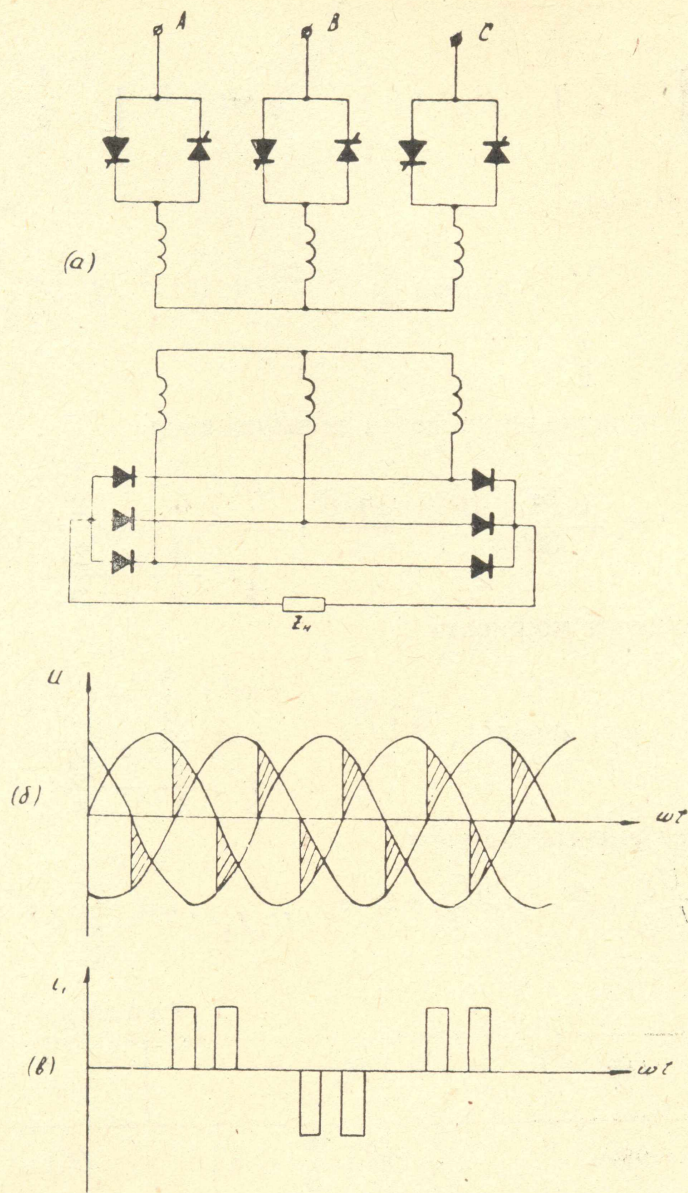


Рис. 3

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{2\phi} \quad \text{— выпрямленное напряжение при } \alpha=0.$$

Потребляемые активная и реактивная мощности определяются

$$P = P_d = U_d I_d = U_{d0} I_d \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right) \right]$$

$$Q = -\frac{3\sqrt{6}}{\pi} \int_{\alpha}^{\frac{2}{3}\pi} U_{2\phi} I_d \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) d\omega t = U_{d0} I_d \sin\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right).$$

Амплитуда и действующее значение первой гармоники первичного тока

$$i_{1(1)m} = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\alpha}{2}}^{\frac{2}{3}\pi - \frac{\alpha}{2}} I_d d\omega t + \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \frac{\alpha}{2}}^{\pi - \frac{\alpha}{2}} I_d d\omega t$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{\alpha}{2}}^{\frac{2}{3}\pi - \frac{\alpha}{2}} I_d^2 d\omega t + \int_{\frac{\pi}{3} + \frac{\alpha}{2}}^{\pi - \frac{\alpha}{2}} I_d d\omega t} = I_d \sqrt{\frac{4}{3} - \frac{2\alpha}{\pi}}.$$

Коэффициент сдвига

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \cos \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2} \right),$$

т. е. $\varphi = \frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2}.$

Коэффициент искажения найдется из выражения

$$\nu = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{3U_1 I_1} = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} \cdot \frac{\cos \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2} \right)}{\sqrt{\frac{4}{3} - \frac{2\alpha}{\pi}}}.$$

Тогда коэффициент мощности

$$\kappa = \nu \cos \varphi = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} \cdot \frac{\cos^2 \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2} \right)}{\sqrt{\frac{4}{3} - \frac{2\alpha}{\pi}}}$$

Введем относительные единицы

$$U'_d = \frac{U_d}{U_{d0}}; P' = \frac{P}{U_{d0} I_d}; Q' = \frac{Q}{U_{d0} I_d}; \kappa = \frac{\kappa}{\frac{3}{\pi}}; \nu' = \frac{\nu}{\frac{3}{\pi}}.$$

Таблица 2

UB	TK	
$\cos \alpha$	$1 + \cos \left(\frac{\pi}{3} + \alpha \right)$	U'_α
$\cos \alpha$	$1 + \cos \left(\frac{\pi}{3} + \alpha \right)$	P'
$\sin \alpha$	$\sin \left(\frac{\pi}{3} + \alpha \right)$	α'
$\cos \alpha$	$\cos \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2} \right)$	$\cos \varphi$
$\cos \alpha$	$\frac{2\sqrt{6} \cos^2 \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2} \right)}{3 \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{2\alpha}{\pi}}}$	κ'
1	$\frac{2\sqrt{6}}{3} \frac{\cos \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2} \right)}{\sqrt{\frac{4}{3} - \frac{2\alpha}{\pi}}}$	ν'

По данным табл. 2 строятся сравнительные энергетические характеристики трехфазных схем ТК и УВ (рис. 4).

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

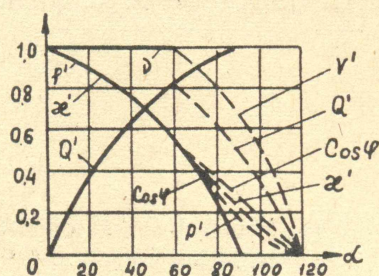


Рис. 4

1. Применение ТК позволяет улучшить все энергетические характеристики (v , x , $\cos\varphi$, P , Q) при меньшей потребляемой мощности.
2. Уменьшается загрузка сети реактивными токами, при этом реактивная энергия не возвращается в сеть, а используется для поддержания тока в нагрузке.
3. Улучшается гармонический состав потребляемого тока, что особенно важно при работе от генератора соизмеримой мощности.
4. При однофазном ТК в случае необходимости стабилизации выходного напряжения целесообразно иметь угол регулирования $\alpha=20^\circ$, что соответствует работе выпрямительного устройства с максимальным коэффициентом мощности.
5. К недостаткам следует отнести необходимость иметь дополнительные неуправляемые вентили.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Богрый. Анализ схем выпрямления трехфазного тока с управляемыми кремневыми вентилями на первичной стороне трансформатора. Труды Мордовского НИЭИ, вып. II, 1964.
2. Н. Х. Ситник. Силовая полупроводниковая техника. «Энергия», 1968.