

**РАСЧЕТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С
ОДНОСТУПЕНЧАТОЙ ИСКУССТВЕННОЙ КОММУТАЦИЕЙ**

В. А. ШУБЕНКО

(Представлено профессором доктором В. К. Щербаковым)

Схемы с управляемыми вентильными аппаратами получили в настоящее время широкое распространение в различных областях техники для выпрямления и инвертирования тока, а также для преобразования частоты.

Известно, что всем схемам с вентильными аппаратами присуще свойство потреблять в большей или меньшей степени ток, отстающий по фазе от напряжения системы, к которой присоединен преобразователь. Этим свойством, вследствие реакции рассеяния системы, обладают даже выпрямители, работающие без задержки зажигания очередного вентиля, но особенно резко это свойство проявляется при регулируемых выпрямителях и инверторах. При преобразовании значительных электрических мощностей с этим свойством приходится считаться, так как работа преобразователя в таких условиях связана со значительной реактивной мощностью, потребляемой из системы переменного тока.

Известно, например, что дефицит реактивной мощности, возникающий на инверторном конце линий электропередачи постоянного тока, приводит к необходимости установки генераторов реактивной мощности, существенно влияющих на экономику линий постоянного тока.

В условиях преобразования значительных электрических мощностей, в силу ряда положительных качеств, является выгодной шестифазная схема, предложенная профессором Ларионовым, или каскадно-мостовые схемы, основанные на схеме Ларионова.

Уравнение изменения тока, уменьшающегося в течение времени коммутации применительно к этой схеме [1], выражается

$$i_2 = I_d \frac{\cos \alpha + \cos \left(\vartheta - \frac{\pi}{3} \right)}{\cos \alpha + \cos (\alpha + \gamma)} \quad (1)$$

Для определения угла перекрытия может служить следующее уравнение:

$$\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma) = \frac{2I_d X_a}{E_{\text{ам}}} \quad (2)$$

Соотношения 1 и 2 справедливы при достаточно большой индуктивности в цепи постоянного тока преобразователя.

В этих уравнениях:

I_d — величина тока в цепи постоянного тока,

X_a — реактанс рассеяния трансформатора и системы переменного тока,

$E_{\text{ам}}$ — амплитуда вторичного линейного напряжения,

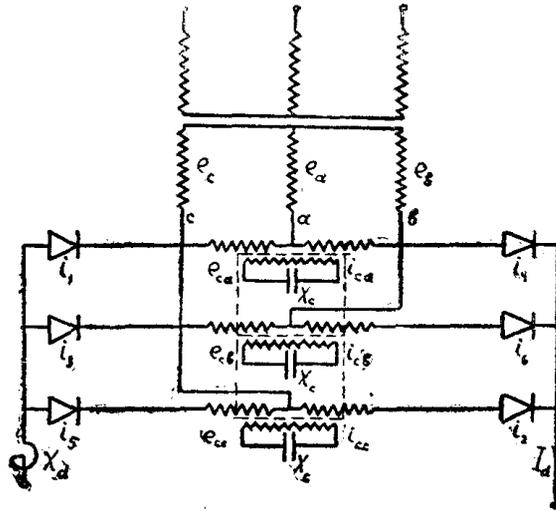
α — угол зажигания вентиля, отсчитываемый от момента зажигания при выпрямлении,

γ — угол перекрытия,

$\vartheta = \omega t$.

При работе в выпрямительном режиме с $\alpha \neq 0$ и особенно в режиме инвертирования этой схеме также присуще потребление из системы переменного тока реактивной мощности.

Помимо обычных способов генерирования реактивной мощности для преобразователей были предложены так называемые схемы искусственной коммутации токов, которые принято делить на двухступенчатые и одноступенчатые. Среди последних известны [2] несколько схем, базирующихся на введении дросселя с выведенной средней точкой и параллельно подключенными конденсаторами или вспомогательного трансформатора, вторичные обмотки которого замкнуты на конденсаторы (фиг. 1).



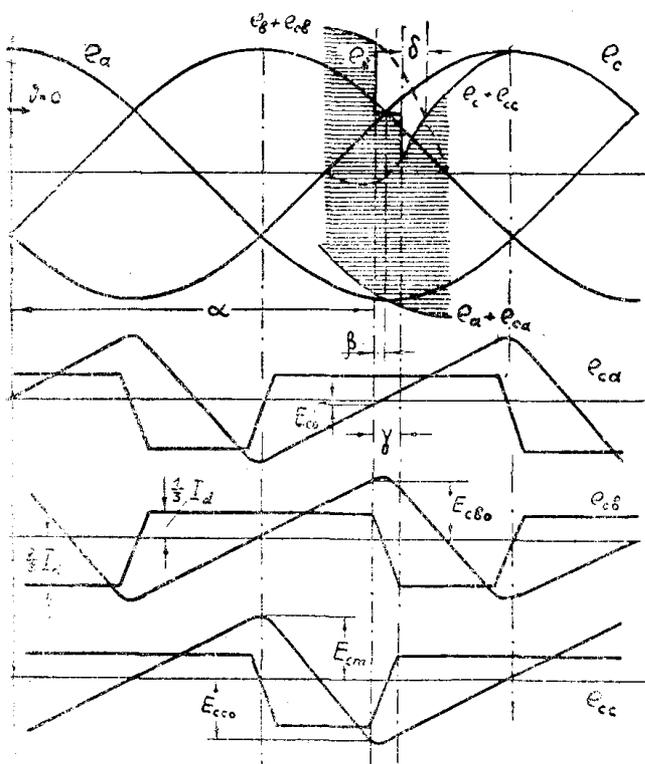
Фиг. 1.

Наличие в схеме такого вспомогательного трансформатора с конденсаторами во вторичных обмотках приводит к появлению в цепи переменного тока дополнительных э. д. с., накладывающихся на основные синусоидальные э. д. с. Искажение последних обеспечивает возможность увеличения угла α и изменение угла сдвига фаз между током и напряжением, так что инвертор, например, может быть избавлен от потребления реактивной мощности или даже работать в режиме генерирования ее. Кривые токов и напряжений, характеризующие работу преобразователя с искусственной коммутацией, показаны на фиг. 2.

Для оценки устойчивости работы инвертора, а также величины реактивной мощности инвертора необходимо иметь возможность определять угол γ .

Получим уравнение, характеризующее изменение тока в течение перекрытия, а также уравнение для определения угла γ при искус-

венной коммутации. Для того, чтобы облегчить решение задачи, используем следующие упрощающие предпосылки:



Фиг. 2.

1. Не учитываем активные и им эквивалентные сопротивления электрической цепи.

2. Пренебрегаем намагничивающим током вспомогательного трансформатора.

3. Отказываемся от учета влияния емкости обмоток трансформатора, его выводов и вентилях на характер протекания процесса коммутации.

4. Считаем, что в цепи постоянного тока преобразователя имеется дроссель с достаточно большой индуктивностью.

В расчете используем следующие обозначения величин:

i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} — токи через конденсаторы фаз a, b и c вспомогательного трансформатора,

i_3, i_5 — изменяющиеся в течение перекрытия токи вентилях 3 и 5,

e_{ca}, e_{cb}, e_{cc} — напряжения на конденсаторах фаз a, b и c ,

$E_{cao}, E_{cbo}, E_{cco}$ — напряжение на конденсаторах фаз a, b и c в момент начала коммутации,

X_a — сумма реактансов рассеяния главного и вспомогательного трансформаторов и приведенной реактивности системы переменного тока,

$X_c = \frac{1}{\omega C}$ — реактивное сопротивление емкости,

$$\frac{E_{am}}{X_c - X_a} = A; \quad \sqrt{\frac{X_c}{X_a}} = B;$$

$$E_{cbo} - E_{cco} = D.$$

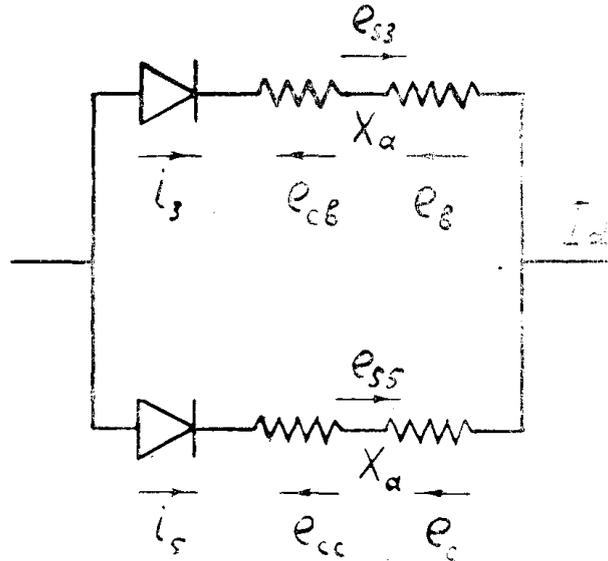
Используя условия магнитного равновесия вспомогательного трансформатора, возможно связать первичные и вторичные токи. Такая связь получается проще при коэффициенте трансформации $k_{тв} = 1$.

В интервале $\alpha - \frac{\pi}{3} + \gamma < \theta < \alpha$

$$\begin{aligned}
 I_d - i_{ca} + i_{cb} - I_d &= 0, \\
 I_d - i_{cb} + i_{cc} &= 0, \\
 i_{ca} + i_{cb} + i_{cc} &= 0, \\
 i_{ca} = i_{cb} &= \frac{1}{3} I_d, \\
 i_{cc} &= -\frac{2}{3} I_d.
 \end{aligned} \tag{3}$$

В интервале $\alpha < \vartheta < \alpha + \gamma$

$$\left. \begin{aligned}
 I_d - i_{ca} + i_{cb} - i_3 &= 0, \\
 i_3 - i_{cb} + i_{cc} - i_5 &= 0, \\
 i_3 + i_5 &= I_d, \\
 i_{ca} + i_{cb} + i_{cc} &= 0, \\
 i_{ca} &= -\frac{1}{3} I_d, \\
 i_{cb} = i_3 - \frac{2}{3} I_d, & \tag{4a} \\
 i_{cc} = i_5 - \frac{2}{3} I_d, & \tag{4b}
 \end{aligned} \right\}$$



Фиг. 3.

Для интервала $\alpha + \gamma < \vartheta < \alpha + \frac{\pi}{3}$,

аналогичным образом получим

$$i_{ca} = i_{cb} = -\frac{1}{3} I_d, \quad i_{cc} = -\frac{2}{3} I_d. \tag{5}$$

Таким образом, вне периодов коммутации токи через конденсаторы выражаются через ток I_d .

Баланс напряжений для контура коммутации по фиг. 3

в интервале $\alpha < \vartheta < \alpha + \gamma$

$$\left. \begin{aligned}
 e_{s3} - e_{cb} - e_b + e_c - i_{s5} + e_{cc} &= 0, \\
 e_s &= -X_a \frac{di}{d\vartheta}, \\
 e_c &= E_{co} + X_c i_c \cdot d\vartheta.
 \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

Из 4(б) и 4(в) следует, что

$$i_{cb} - i_{cc} = i_3 - i_5 = i. \quad (7)$$

При отсчете углов от момента начала коммутации

$$e_b - e_c = E_{\text{ли}} \sin(\vartheta + \alpha).$$

Таким образом, уравнение (6) может быть заменено дифференциальным уравнением, характеризующим изменение разности токов i в течение периода перекрытия,

$$\frac{d^2 i}{d\vartheta^2} + \frac{X_c}{X_a} i = - \frac{E_{\text{ли}}}{X_a} \cos(\vartheta + \alpha). \quad (8)$$

Для решения уравнения (8) операторным методом определены начальные условия.

В момент начала коммутации при $\vartheta = 0$

$$i_0 = I_d \text{ и}$$

$$\left(\frac{di}{d\vartheta} \right)_0 = - \frac{E_{\text{ли}} \sin \alpha + \mathcal{L}}{X_a}.$$

Решение уравнения (8) применительно к инверторному режиму, когда $\beta = \pi - \alpha$, дает:

$$i = A \cos(\vartheta - \beta) + (I_d - A \cos \beta) \cos B\vartheta + \left(\frac{\mathcal{L}}{BX_a} + AB \sin \beta \right) \sin B\vartheta. \quad (9)$$

Решая совместно (4а) и (7), получим

$$i_3 = \frac{i + I_d}{2}, \quad (10a)$$

$$i_5 = \frac{I_d - i}{2}. \quad (10б)$$

Подстановка (9), например, в (10а) не дает определенной связи $i_3 = f(\vartheta)$, так как постоянная \mathcal{L} , среди прочих определенных величин, неизвестна.

Постоянную \mathcal{L} можно определить, используя условия периодичности и уравновешенности трехфазной несинусоидальной системы токов и напряжений.

Из фиг. 2 следует

$$E_{ca0} = E_{cbo} - X_c I_d \frac{\pi}{9},$$

$$E_{cco} = E_{cbo} - X_c I_d \frac{2\pi}{9} + X_c \int_0^{\pi} i_3 d\vartheta, \quad (11)$$

$$\mathcal{L} = E_{cbo} - E_{cco} = X_c I_d \frac{2\pi}{9} - X_c \int_0^{\pi} i_3 d\vartheta.$$

Подставляя в (11) уравнение (10a) с учетом (9) и интегрируя, получим

$$D = \frac{1}{1 + \cos B\gamma} \left[2X_c I_d \left(\frac{2\pi}{9} - \frac{\gamma}{9} \right) - AX_c \sin(\gamma - \beta) - \right. \\ \left. - BX_a (I_d - A \cos \beta) \cdot \sin B\gamma - AX_c \sin \beta \cdot \cos B\gamma \right] \quad (12)$$

В уравнении (12) постоянная D выражена через неизвестный угол перекрытия γ при искусственной коммутации токов.

Если использовать условие, что при $\vartheta = \gamma$ $i_3 = 0$ для (10a), получим:

$$-\frac{A}{2} \cos(\gamma - \beta) + \frac{1}{2} \left(I_d - A \cos \beta \right) \cos B\gamma - \\ - \frac{1}{2} \left(\frac{D}{BX_a} + AB \sin \beta \right) \cdot \sin B\gamma + \frac{1}{2} I_d = 0. \quad (13)$$

Уравнение (12) и (13) при заданных I_d , $E_{\text{эл}}$, X_c , X_a и β составляют систему двух трансцендентных уравнений с двумя неизвестными D и γ , откуда эти величины и могут быть определены.

Подстановка постоянной D в уравнение (10a) с учетом (9) дает определенный закон изменения тока в течение перекрытия при искусственной коммутации.

Таким образом, вместо достаточно простого и легко решаемого уравнения для определения γ при естественной коммутации токов имеем систему двух трансцендентных уравнений для определения аналогичной величины при искусственной коммутации токов.

Уравнения (11, 12, 13) позволяют определять и другие величины, характерные для преобразователя с одноступенчатой искусственной коммутацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. А. Круг. Электромагнитные процессы в установках с управляемыми ртутными выпрямителями. ОНТИ, 1935.
2. Gen. El. Rev., Willis, 1932, t. 35, p. 32.