

УЗЕЛ ИСКУССТВЕННОЙ КОММУТАЦИИ НА ТИРИСТОРАХ ДЛЯ ШЕСТИФАЗНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С УРАВНИТЕЛЬНЫМ РЕАКТОРОМ

А. И. ЗАЙЦЕВ, Ю. М. АЧКАСОВ, М. А. БОРОВИКОВ, В. Н. МИШИН,
А. А. КУВШИНОВ, В. П. ОБРУСНИК, В. И. ЧИРЬЕВ

В большинстве вентильных преобразователей выпрямленное напряжение регулируется путем изменения угла отпирания вентилей α . При увеличении угла α коэффициент мощности вентильных преобразователей резко уменьшается. В настоящее время только ртутные выпрямители преобразуют свыше 15% всей производимой электроэнергии в стране. Поэтому повышение коэффициента мощности преобразовательных агрегатов является весьма важной народнохозяйственной задачей.

На возможность создания вентильных схем с искусственной коммутацией для генерации реактивной энергии указывал Г. И. Бабат [1], ряд схем был разработан И. Л. Кагановым [2] И. М. Чиженко [3] и др.

Несмотря на большое количество разработанных схем и способов искусственной коммутации, практическое применение нашли лишь компенсационные агрегаты, созданные в Киевском политехническом институте (КПИ) под руководством И. М. Чиженко. Однако, схема КПИ требует относительно большого увеличения установленной мощности дополнительного оборудования, в основном за счет трехфазной уравнивательной катушки.

Ниже рассматривается простая схема искусственной коммутации тока в шестифазном выпрямителе с уравнительным реактором, состоящая из коммутирующего конденсатора С и коммутирующих управляемых вентилей V_1 и V_{11} (рис. 1).

Рассмотрим работу преобразователя с узлом искусственной коммутации, начиная с момента времени, когда конденсатор С заряжен поллярностью, указанной на рис. 1, причем напряжение на нем

$$U_c > e_{2a} - e_{1z}.$$

Временные диаграммы, поясняющие работу и назначение отдельных элементов схемы, представлены на рис. 2.

Предположим, что ток пропускают силовые вентили V_1 и V_6 . В момент времени, когда нужно искусственно выключить вентиль V_1 , открывается вентиль V_{11} . К этому моменту на сетке вентилей V_1 должен быть запирающий потенциал.

Конденсатор С начинает разряжаться на работающий вентиль B_1 , пропуская через него ток в непроводящем направлении. Через промежуток времени, равный времени коммутации γ_1 , ток с главного вентиля B_1 переходит на коммутирующий B_1 и на другой главный B_6 . Затем

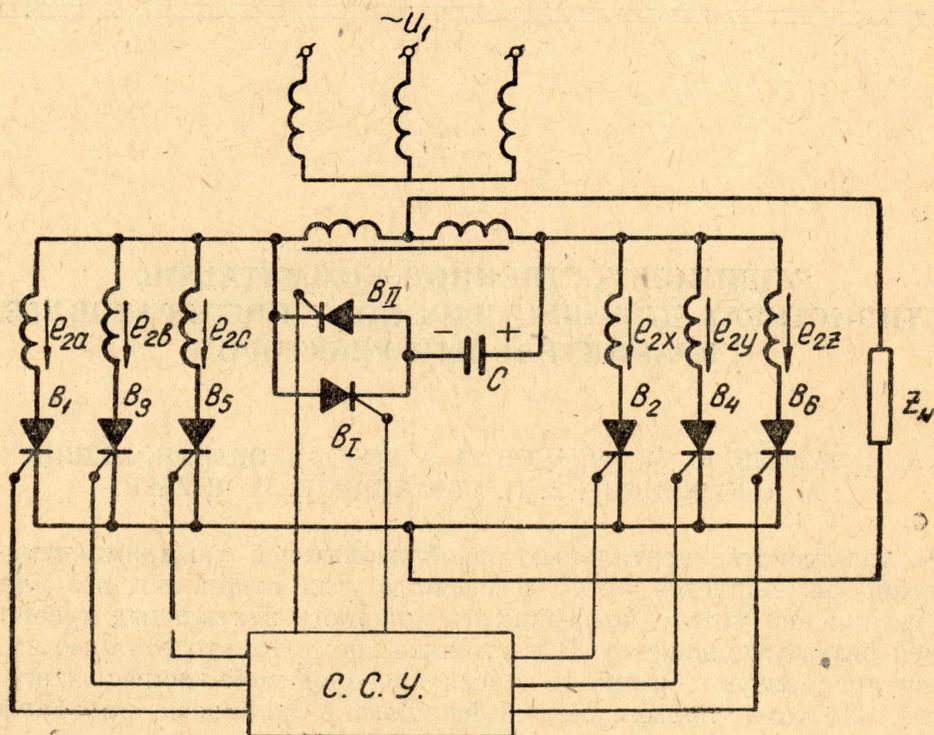


Рис. 1.

коммутирующий конденсатор разряжается и перезаряжается постоянным током, равным половине тока нагрузки.

Когда снижающееся напряжение U_c сравнивается с фазовым напряжением в цепи выходящего из работы вентиля B_1 и затем становится меньше его, создаются условия для повторного зажигания этого вентиля. Чтобы предупредить это, нужно так подобрать величину емкости C , чтобы при данном токе нагрузки сравнение напряжений U_c и e_{2a} происходило не ранее чем через промежуток времени

$$\Theta_{\text{мин}} = \gamma_1 + \delta,$$

где δ — время дионизации вентиля после гашения.

Когда напряжение на конденсаторе достигнет величины

$$U_c = e_{2z} - e_{2b}$$

создадутся условия для включения вентиля B_3 . К этому времени на его сетке должен быть положительный потенциал.

Под действием увеличивающегося напряжения e_{2b} за промежуток времени, равный времени коммутации γ_2 , ток с коммутирующего вентиля B_1 переходит на главный B_3 .

В результате конденсатор C оказался заряженным противоположной полярностью до напряжения.

$$U_c > e_{2z} - e_{2b}.$$

Затем открывается коммутирующий вентиль B_{II} конденсатор снова перезаряжается, производя коммутацию тока с вентиля B_6 на вентиль B_4 .

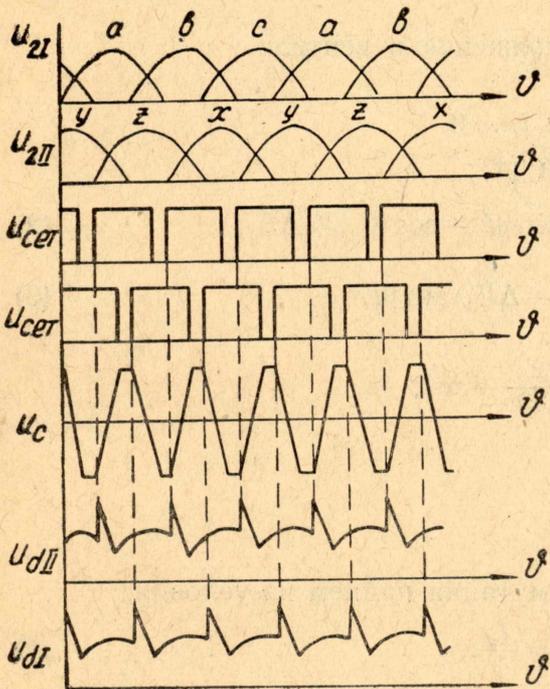


Рис. 2.

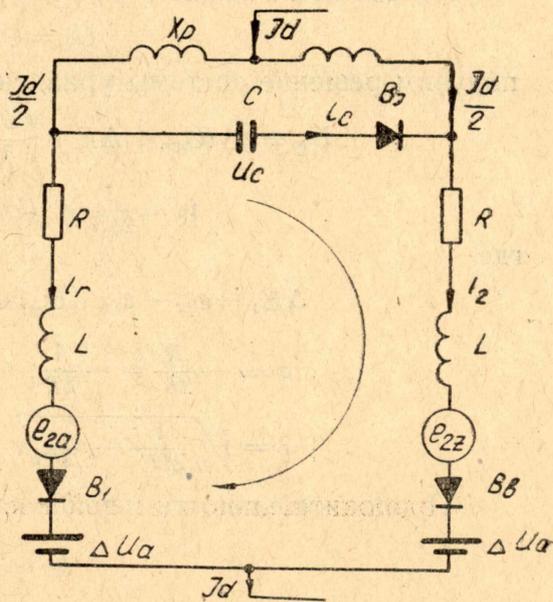


Рис. 3.

Этот процесс повторяется с тройной частотой питающей сети, причем полезно используется заряд обоих знаков.

При проектировании узла искусственной коммутации задача сводится к выбору величины коммутирующей емкости в зависимости от нагрузки и параметров преобразователя. Схема замещения рабочего контура узла искусственной коммутации при переходе тока с главного вентиля, выходящего из работы, на коммутирующий (первая коммутация) представлена на рис. 3.

Анализ проведем при следующих допущениях:

1. Параметры контура коммутации, ток нагрузки и фазные напряжения трансформатора в течение времени выключения остаются неизменными.

2. Величины падений напряжения на вентилях равны и не зависят от протекающего тока.

Процесс коммутации тока с выключаемого вентиля в цепь коммутирующего описывается следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} e_{2z} - \Delta U_a + \Delta U_a - e_{2a} &= L \cdot \frac{di_2}{dt} + i_2 R - L \frac{di_1}{dt} - i_1 R + U_c \\ i_1 &= \frac{I_d}{2} - i_c \\ i_2 &= \frac{I_d}{2} + i_c \\ i_c &= C \frac{du_c}{dt} \end{aligned} \right\} (1)$$

где C — величина коммутирующей емкости;

RuL — активное сопротивление и индуктивность фазы трансформатора;

I_d, i_c, i_1, i_2 — токи нагрузки, конденсатора, вентилях B_1 и B_6 соответственно;

ΔU_a — внутреннее падение напряжения в вентиле.

Учитывая начальные условия

$$U_c = U_{co}, \quad i_c = 0$$

получим решение системы уравнений (1):

$$U_c = e^{\sigma t} (U_{co} + \Delta E_1) \left(\frac{\sigma}{\beta} \sin \beta t - \cos \beta t \right) + \Delta E_1; \quad (2)$$

$$i_c = \frac{1}{2L\beta} e^{\sigma t} (U_{co} + \Delta E_1) \sin \beta t, \quad (3)$$

где

$$\Delta E_1 = e_{2z} - e_{2a} - U_n \cos \left(\frac{2\pi}{3} - \alpha \right);$$

$$\sigma = -\frac{R}{2L} = -\frac{1}{2T};$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2LC} - \frac{1}{4T^2}}.$$

Продолжительность первой коммутации найдем из условия:

$$(i_c)_{t=\gamma_1} = \frac{I_d}{2}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3) и разложив в ряд Маклорена показательную и тригонометрическую функции, получим приближенно:

$$\gamma_1 = T \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2I_d R}{U_{co} + \Delta E_1}} \right). \quad (5)$$

Условием надежного выключения силового вентиля является

$$(U_c)_{t=\gamma_1+\delta} = \Delta E_1. \quad (6)$$

Поэтому, учитывая, что после коммутации конденсатор разряжается постоянным по величине током,

$$\Delta E_1 = e^{\sigma \gamma_1} (U_{co} + \Delta E_1) \left(\frac{\sigma}{\beta} \sin \beta \gamma_1 - \cos \beta \gamma_1 \right) + \Delta E_1 + \frac{I_d}{C} \delta. \quad (7)$$

Решив совместно (5) и (7), получим величину начального напряжения на коммутирующем конденсаторе:

$$U_{co} = \frac{I_d}{3,14C} (\sqrt{2CL} + \delta) - \Delta E_1. \quad (8)$$

После погасания силового вентиля по конденсатору протекает постоянный ток, равный $\frac{I_d}{2}$. Время протекания постоянного тока при условии

$$(U_c)_{t=\gamma_1+t_n} = \Delta E_2 \quad (9)$$

определится из формулы:

$$t_n = \delta + \frac{2C(\Delta E_2 - \Delta E_1)}{I_d}, \quad (10)$$

где

$$\Delta E_2 = e_{2z} - e_{2b} = U_m \cos \left[\frac{\pi}{3} - \alpha + \omega(\gamma_1 + t_n) \right].$$

Схема замещения рабочего контура узла искусственной коммутации при переходе тока с коммутирующего вентиля на главный, вступающий в работу (вторая коммутация), дана на рис. 4. Она отличается от предыдущей только значениями фазных напряжений трансформатора. Поэтому дифференциальное уравнение, описывающее процесс второй коммутации, будет иметь тот же вид (1), только вместо ΔE_1 в него войдет ΔE_2 .

Учитывая начальные условия

$$U_c = \Delta E_1, \quad i_c = \frac{I_y}{2},$$

получим решение уравнений (1) для второй коммутации:

$$U_c = \frac{I_d}{2C\beta} e^{\gamma t} \sin \beta t + \Delta E_2, \quad (11)$$

$$i_c = \frac{I_d}{2\beta} e^{\gamma t} (\sigma \sin \beta t + \beta \cos \beta t). \quad (12)$$

Условием окончания процесса перезаряда коммутирующего конденсатора является:

$$\left. \begin{aligned} (i_c)_{t=\gamma_2} &= 0 \\ (U_c)_{t=\gamma_2} &= U_{co} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Подставив (13) в (12), получим продолжительность второй коммутации:

$$\gamma_2 = \frac{2LRC}{2L - R^2C} \left(\sqrt{\frac{4T}{RC} - 1} - 1 \right). \quad (14)$$

Полное время перехода тока с одного главного анода на другой должно подчиняться условию:

$$t_{к\gamma} < \frac{1}{2f_k}, \quad (15)$$

где $t_{к\gamma} = \gamma_1 + t_n + \gamma_2$;
 $f_k = 150$ гц — частота коммутации.

После подстановки (14) в (11) и разложения показательной и тригонометрической функций в ряды Маклорена получим:

$$U_{co} = \frac{I_d}{\sqrt{2}} \left(\sqrt{\frac{L}{C}} - R \right) + \Delta E_2. \quad (16)$$

Приравняв (8) и (16), получим уравнение второй степени относительно емкости C . Решение его дает минимальную емкость коммутирующего конденсатора, достаточную для надежной коммутации:

$$C = \frac{I_d}{\Delta E^2} [0,44\delta\Delta E + 0,3I_d L - \sqrt{I_d(0,14\delta L\Delta E + 0,096I_d L^2)}], \quad (17)$$

где $\Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_2$.

Зная емкость и напряжение на конденсаторе, можно подсчитать необходимую установленную мощность конденсаторов в узле искусственной коммутации. Конденсаторы, применяемые в энергосистемах для улучшения коэффициента мощности, маркируются обычно при промышленной частоте 50 гц. Поэтому установленная мощность конденсато-

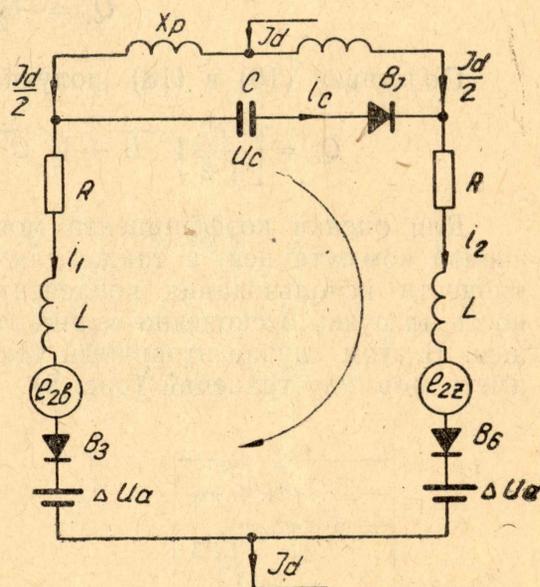


Рис. 4.

ров, приведенная к частоте 50 гц в предположении, что форма напряжения на конденсаторах близка к синусоидальной, будет определяться выражением из [2]:

$$Q_c = \frac{U_{co}^2 C}{2} \omega. \quad (18)$$

Подставив (16) в (18), получим:

$$Q_c = \left[\frac{I_d}{\sqrt{2}} V \overline{L} + V \overline{C} \left(\Delta E_2 - \frac{I_d}{\sqrt{2}} R \right) \right]^2 \omega. \quad (19)$$

Для оценки коэффициента мощности преобразователя с искусственной коммутацией, а также для определения коэффициента эффективности использования конденсаторов предположим, что индуктивность нагрузки бесконечно велика, то есть ток нагрузки идеально сглажен. В этом случае вторичный ток силового трансформатора будет иметь формулу трапеций (рис. 5).

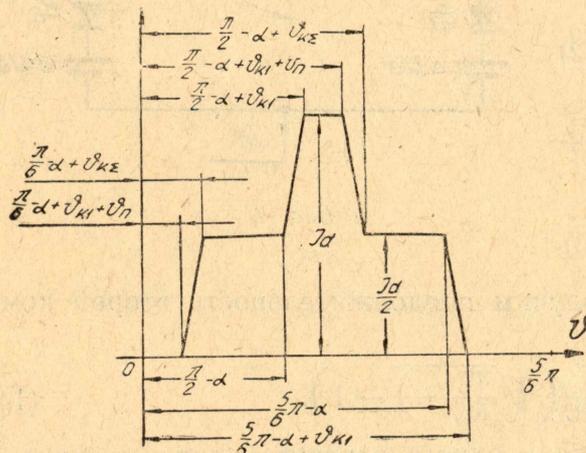


Рис. 5.

После приближенного разложения кривой переменного тока в ряд Фурье получим действующее значение первой гармонической тока

$$I_{(1)} = \frac{\sqrt{2} I_d}{\pi} \cos \frac{v_{к\kappa} - v_{\pi}}{4} \times \cos \left(\frac{\pi}{6} - \frac{v_{к\kappa} + v_{\pi}}{4} \right) \quad (20)$$

и угол сдвига первой гармонической

$$\varphi_{(1)} = \alpha - \frac{v_{к\kappa}}{2}, \quad (21)$$

где $v_{к\kappa} = \omega t_{к\kappa}$,

$v_{\pi} = \omega t_{\pi}$.

Реактивная мощность, генерируемая преобразователем:

$$Q = 3UI_{(1)} \sin \varphi_{(1)} = 3U \frac{\sqrt{2} I_d}{\pi} \cos \frac{v_{к\kappa} - v_{\pi}}{4} \cos \left(\frac{\pi}{6} - \frac{v_{к\kappa} + v_{\pi}}{4} \right) \cdot \sin \left(\alpha - \frac{v_{к\kappa}}{2} \right), \quad (22)$$

где U — действующее значение фазного напряжения трансформатора.

Отношение выражений (22) и (19) даст коэффициент эффективности использования конденсаторов.

Экспериментальная проверка рассмотренной схемы искусственной коммутации проводилась на установке с тиратронами типа ТГ1-5/3. В качестве коммутирующих вентилей использовались тиристоры типа Д-238Г. Проведенные опыты показали хорошую работоспособность схемы. Коэффициент эффективности использования конденсаторов достигал величины 4,5 ÷ 5.

Подобные схемы рекомендуется применять в тех случаях, когда значительное снижение выпрямленного напряжения, как в схеме КПИ, не допускается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. И. Бабат, Я. А. Кацман. Тиратронные преобразователи с улучшенным коэффициентом мощности и тиратронные компенсаторы. Электричество, 1937, № 4.
 2. И. Л. Каганов. Электронные и ионные преобразователи, ч. III, ГЭИ, 1956.
 3. И. М. Чижено. Схема преобразования электрического тока «звезда-прямая и обратная звезды с уравнительными катушками и коммутирующими конденсаторами». Известия КПИ, том XXII, Киев, 1957.
-