

В.С.Бойко, докт.техн.наук, **Е.А.Кудря**, канд.техн.наук, **А.А.Шуляк** (Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев)

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОКОВ КОНДЕНСАТОРОВ КАСКАДНОЙ КОМПЕНСАЦИОННОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Представлены результаты исследования электромагнитных процессов в конденсаторах коммутующего звена двенадцатипульсного каскадного компенсационного выпрямителя. Произведена количественная оценка влияния высших гармоник тока на реактивную мощность конденсаторов, исследованы зависимости составляющих реактивной мощности от величины угла коммутации вентилей и тока нагрузки.

Представлено результати досліджень електромагнітних процесів у конденсаторах комутаційної ланки дванадцатипульсного каскадного компенсаційного випрямляча. Здійснено кількісну оцінку впливу вищих гармонічних складових гармонік струму на реактивну потужність конденсаторів, досліджено залежності складових реактивної потужності від величини кута комутації вентилів та струму навантаження.

Введение. Компенсационные преобразовательные системы относятся к классу преобразовательных устройств силовой электроники, которые наряду с функцией преобразования параметров электрической энергии в режиме выпрямления или инвертирования способны компенсировать собственную реактивную мощность, а в случае необходимости, генерировать реактивную мощность в питающую сеть. В зависимости от уровня выходного напряжения такие преобразовательные устройства могут быть реализованы на базе нулевой или каскадной схемы.

Каскадные компенсационные преобразовательные системы работают в режиме одноступенчатой емкостной коммутации. Поэтому в их состав обязательно входит коммутующее звено. В преобразовательных системах нулевого типа оно состоит из трехфазного уравнительного реактора и трехфазной батареи коммутующих конденсаторов.

Коммутующее звено преобразовательных систем каскадного типа конструктивно значительно проще, поскольку состоит лишь из трехфазной батареи конденсаторов, которая может быть соединена либо в звезду, либо в треугольник.

Каскадные компенсационные преобразовательные системы целесообразно использовать для питания потребителей с напряжением 1000 В и выше. Они способны обеспечить высокие технико-экономические показатели при двенадцати- и двадцатичетырехпульсном преобразовании. На рис. 1 показана схема двенадцатипульсного каскадного компенсационного выпрямителя, исследованию условий работы конденсаторов коммутующего звена которого посвящена настоящая работа.

Каскадные компенсационные преобразовательные системы целесообразно использовать для питания потребителей с напряжением 1000 В и выше. Они способны обеспечить высокие технико-экономические показатели при двенадцати- и двадцатичетырехпульсном преобразовании. На рис. 1 показана схема двенадцатипульсного каскадного компенсационного выпрямителя, исследованию условий работы конденсаторов коммутующего звена которого посвящена настоящая работа.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является исследование электромагнитных процессов в конденсаторах коммутующего звена

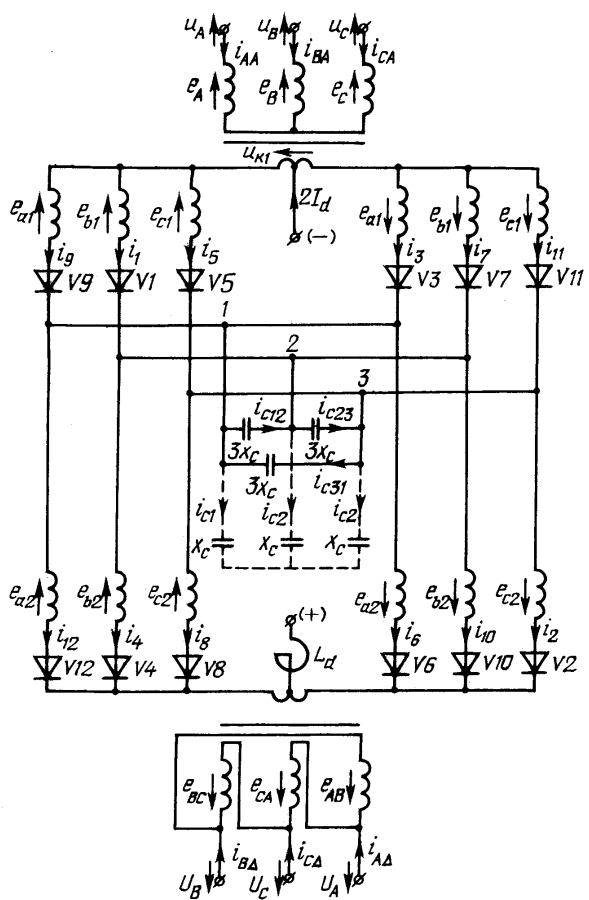


Рис. 1

© Бойко В.С., Кудря Е.А., Шуляк А.А., 2010

двенадцатипульсного каскадного компенсационного выпрямителя, что необходимо для определения мощности конденсаторной батареи и достижения требуемых показателей энергоэффективности преобразовательного устройства.

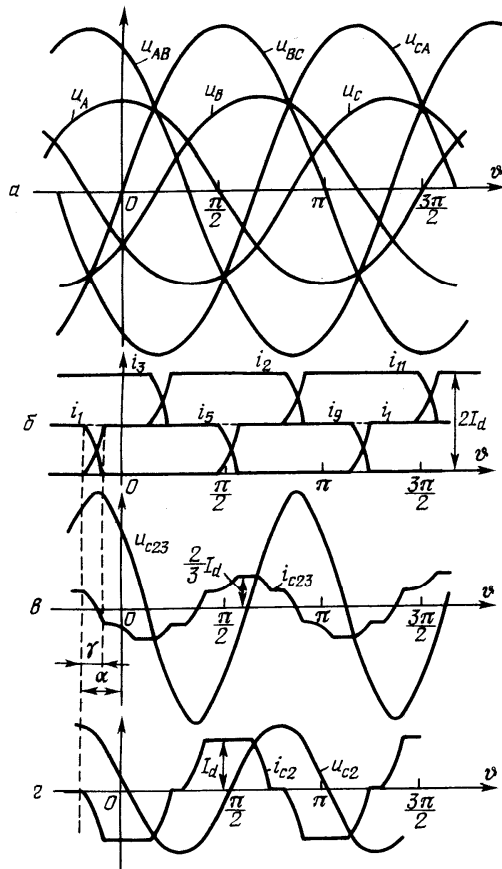


Рис. 2

В основу анализа положены следующие допущения:

- система питающих напряжений синусоидальна и симметрична; потери в вентилях не учитываются;
- ток намагничивания преобразовательного трансформатора равен нулю;
- ток в цепи нагрузки ($2I_d$) идеально сглажен.

Если за начало отсчета выбрать момент вступления в работу вентиля V_5 , то кривая тока i_{c1} конденсаторов при включении их в звезду (на рис. 1 показано пунктиром) будет занимать такое положение на временной оси, как и показано на рис. 3 ($\vartheta = \omega t$).

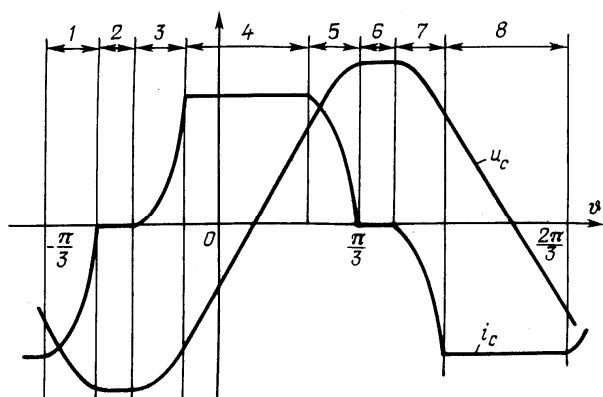


Рис. 3

При этом уравнения токов по участкам запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned}
 1 - & -\frac{\pi}{3} \leq \vartheta \leq -\frac{\pi}{3} + \gamma, & i_c &= -I_d + i_k; \\
 2 - & -\frac{\pi}{3} + \gamma \leq \vartheta \leq -\frac{\pi}{6}, & i_c &= 0; \\
 3 - & -\frac{\pi}{6} \leq \vartheta \leq -\frac{\pi}{6} + \gamma, & i_c &= i_k; \\
 4 - & -\frac{\pi}{6} + \gamma \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{6}, & i_c &= I_d;
 \end{aligned}$$

Результаты исследований. Технологичность при практической реализации, а также энергетические и технико-экономические показатели различных режимов работы каскадного компенсационного преобразователя дают основания считать его одним из наиболее перспективных типов таких преобразователей. Кривые напряжений и токов этого преобразователя показаны на рис. 2.

Как видно из этого рисунка, форма кривой напряжения на конденсаторах отлична от синусоидальной и имеет частоту f_c , в 2 раза выше частоты f питающей сети.

Технико-экономические показатели преобразовательной системы зависят от эффективной работы всех ее звеньев, в том числе и от эффективности использования коммутирующих конденсаторов. Здесь существенное значение имеет частота, величина и форма рабочего тока и напряжения конденсаторов.

Определение допустимого рабочего напряжения на конденсаторах, через которые протекает периодический несинусоидальный ток, и согласование с паспортным напряжением осуществляется методом гармонических составляющих [3].

Мощность потерь в конденсаторах при несинусоидальном напряжении и токе вычисляется как сумма активных мощностей каждой гармонической составляющей. Этим обусловлена необходимость исследования гармонического состава токов и напряжений коммутирующих конденсаторов, используемых в компенсационном преобразователе.

$$\begin{aligned}
5 - \quad \frac{\pi}{6} \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{6} + \gamma, \quad i_c = I_d - i_k; & \quad 6 - \quad \frac{\pi}{6} + \gamma \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{3}, \quad i_c = 0; \\
7 - \quad \frac{\pi}{3} \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{3} + \gamma, \quad i_c = -i_k; & \quad 8 - \quad \frac{\pi}{3} + \gamma \leq \vartheta \leq \frac{2\pi}{3}, \quad i_c = -I_d.
\end{aligned}$$

Входящий в эти уравнения ток коммутации i_k является током вступающего в работу вентиля и имеет такую закономерность изменения [2]:

$$i_k = \frac{I_d}{2} + \frac{\sqrt{3}U_m \cos(\vartheta - \alpha - \delta)}{2\omega L_\gamma (\xi^2 - 1)} + K_1 \cos \xi(\vartheta - \delta) + K_2 \sin \xi(\vartheta - \delta). \quad (1)$$

Здесь U_m – амплитуда фазного напряжения на входе питающего трансформатора, приведенная к вторичной обмотке трансформатора со схемой соединения Y/Y; ω – угловая частота напряжения сети ($\omega = 2\pi f$); L_γ – индуктивность рассеивания фазы преобразовательного трансформатора, приведенная к его вторичной обмотке; α – свободно устанавливающийся опережающий угол регулирования компенсационного преобразователя; ξ – относительное значение собственной частоты колебаний в контуре коммутации $\xi = \omega_o / \omega$, $\omega_o = (L_\gamma C)^{-0,5}$.

Величина угла δ в выражении для тока коммутации меняется по участкам и принимает значения, соответствующие началу участка.

Константы K_1 и K_2 определяются из соотношений:

$$K_1 = -\frac{\sqrt{3}U_m \cos \alpha}{2\omega L_\gamma (\xi^2 - 1)} - \frac{I_d}{2}; \quad K_2 = -\frac{\sqrt{3}U_m \sin \alpha}{2\omega L_\gamma (\xi^2 - 1)\xi}.$$

Анализ формы кривой тока вентиля i_k при вступлении его в работу в интервале коммутации по (1) показал, что при диодной реализации каскадной компенсационной преобразовательной системы в различных режимах работы она изменяется мало. Поэтому для дальнейшего анализа можно подобрать более простую аналитическую функцию, которая с достаточной точностью опишет ток коммутации вентиля i_k , существенно упростив все дальнейшие исследования, в том числе и анализ гармонического состава тока коммутирующих конденсаторов.

Проведенный авторами анализ показал, что точное решение для тока коммутации i_k можно аппроксимировать функцией $i_k = I_d(\vartheta - \delta)^2 / \gamma^2$ (так называемой “квадратичной” коммутацией). Расчет подтвердил, что основные характеристики преобразователя (свободно устанавливающийся угол регулирования α , угол коммутации вентиля γ , выпрямленное напряжение U_d , коэффициент мощности преобразователя $\cos \varphi$), рассчитанные исходя из предположения о “квадратичном” изменении тока коммутации, отличаются от характеристик, полученных на основе уточненного решения для тока коммутации (1), всего на $3 \div 4\%$. Учитывая, что расчетные выражения при “квадратичной” аппроксимации тока коммутации вентиля проще и удобнее для анализа, их можно рекомендовать для расчета параметров преобразователя и, особенно, при определении его проектных характеристик.

Анализируемая кривая тока конденсаторов i_c (рис. 3) симметрична относительно оси абсцисс и имеет частоту $\omega_c = 2\omega$. Поэтому ряд Фурье такой функции имеет вид [1]

$$i_c = \sum_{k=1}^{\infty} B_{(2k)} \sin 2k\vartheta + \sum_{k=1}^{\infty} C_{(2k)} \cos 2k\vartheta = \sum_{k=1}^{\infty} I_{Cm(2k)} \sin(2k\vartheta + \psi_{2k}). \quad (2)$$

Коэффициенты ряда Фурье $B_{(2k)}$ и $C_{(2k)}$ с учетом указанной симметрии определяются из выражений

$$B_{(2k)} = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/3}^{2\pi/3} i_c \sin 2k\vartheta d\vartheta, \quad C_{(2k)} = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/3}^{2\pi/3} i_c \cos 2k\vartheta d\vartheta. \quad (3)$$

Приняв в выражениях для i_C “квадратичный” закон изменения тока коммутации $i_k = I_d(\vartheta - \delta)^2 / \gamma^2$ и выполнив необходимые математические операции, для коэффициентов $B_{(2k)}$ и $C_{(2k)}$ получим

$$B_{(2k)} = \frac{4I_d}{\pi k} \sin \frac{k\pi}{2} \cos \frac{k\pi}{6} L_{(2k)}; \quad C_{(2k)} = \frac{4I_d}{\pi k} \sin \frac{k\pi}{2} \cos \frac{k\pi}{6} F_{(2k)}, \quad k=1,2,3,\dots$$

Амплитуда тока гармонической составляющей определяется известным соотношением [1]

$$I_{Cm} = \sqrt{B_{(2k)}^2 + C_{(2k)}^2} = I_{Cm(2k)} = \frac{4I_d}{\pi k} \sin \frac{k\pi}{2} \cos \frac{k\pi}{6} \sqrt{F_{(2k)}^2 + L_{(2k)}^2}. \quad (4)$$

Как видно из (4), в токе конденсаторов компенсационного преобразователя присутствуют гармоники $n = 2, 10, 14, 22, 26, \dots$ и отсутствуют гармоники, для которых k – четное, или кратное 3. Константы $F_{(2k)}$ и $L_{(2k)}$ при “квадратичном” законе изменения тока коммутации вентилей равны

$$F_{(2k)} = \frac{4k\gamma \sin 2k\gamma + 2 \cos 2k\gamma - 2}{(2k\gamma)^2} = F_{(n)}, \quad L_{(2k)} = \frac{2 \sin 2k\gamma - 4k\gamma \cos 2k\gamma}{(2k\gamma)^2} = L_{(n)}.$$

Реактивная мощность 3-х фаз конденсаторов, обусловленная током n -й гармоники, равна $Q_{C(n)} = 3I_{Cm(n)}^2 / 2n\omega C$, где C – емкость конденсаторов на фазу. Учитывая значения гармонических составляющих тока конденсаторов (4) $I_{Cm(2k)} = I_{Cm(n)}$, для реактивной мощности 3-х фаз конденсаторов на частоте n -й гармоники получим

$$Q_{C(n)} = \frac{72I_d^2}{n^3 \pi^2 \omega C} \cdot (F_{(n)}^2 + L_{(n)}^2), \quad n = 2, 10, 14, 22, \dots$$

Если в это выражение подставить значения констант $F_{(n)}$ и $L_{(n)}$, окончательно получим

$$Q_{C(n)} = \frac{72I_d^2}{n^3 \pi^2 \omega C} \cdot \frac{4n^2\gamma^2 - 8n\gamma \sin n\gamma + 8(1 - \cos n\gamma)}{(n\gamma)^4}. \quad (5)$$

Из (5) для реактивной мощности основной гармоники ($n=2$)

$$Q_{C(\omega)} = \frac{72I_d^2}{8\pi^2 \omega C} \cdot \frac{\gamma^2 - \gamma \sin 2\gamma + \sin^2 \gamma}{\gamma^4}. \quad (6)$$

Анализ выражений (5) и (6) показывает, что высшие гармонические составляющие реактивной мощности конденсаторов ($n = 10, 14, 22, \dots$) не превышают 0,008 реактивной мощности основной гармоники ($n = 2$), причем с увеличением угла коммутации вентилей γ доля реактивной мощности высших гармоник снижается (рис. 4). Принимая во внимание, что реактивная мощность участка электрической цепи с несинусоидальным током определяется как сумма реактивных мощностей гармонических составляющих тока [1] и учитывая значения реактивных мощностей высших гармонических составляющих (рис. 4), реактивную мощность конденсаторной батареи преобразовательной системы можно считать равной $Q_C \approx (1.012 \div 1.015) Q_{C(\omega)}$. При этом, как уже упоминалось, напряжение на конденсаторах изменяется с частотой f_c , которая в 2 раза выше частоты питающей сети.

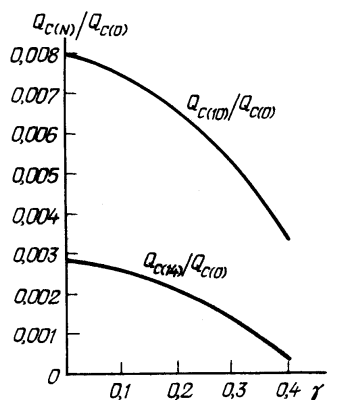


Рис. 4

Полагая, что мощность потерь в конденсаторе пропорциональна его реактивной мощности, и учитывая, что перегрев диэлектрика конденсаторов по сравнению с температурой окружающей среды пропорционален мощности потерь [3], для обеспечения эквивалентного теплового режима конденсаторов, используемых в компенсационной преобразовательной системе, необходимо, чтобы реактивная мощность конденсаторов коммутирующего звена равнялась номинальной (паспортной) мощности. Учет других факторов (изменение

частоты тока и амплитуды напряженности электрического поля в диэлектрике) на срок службы конденсаторов здесь не рассматривается.

Запишем выражение (6) для $Q_{C(\omega)}$ в относительных единицах, приняв следующую систему базисных величин: базисное напряжение $U_{\delta} = \sqrt{3}U_m$; базисный ток $I_{\delta} = \sqrt{3}U_m/2\omega L_{\gamma}$; базисная мощность $S_{\delta} = U_{\delta}I_{\delta} = 3U_m^2/2\omega L_{\gamma}$.

Тогда для относительного значения основной гармоники реактивной мощности конденсаторов получим

$$Q_{C(\omega)}^* = Q_{C(\omega)} / S_{\delta} = \frac{72I_d^2}{8\pi^2\omega C} \cdot \frac{2\omega L_{\gamma}}{3U_m^2} f(\gamma) = \frac{9I_d^2(2\omega L_{\gamma})^2}{2\pi^2\omega^2 C L_{\gamma} 3U_m^2} f(\gamma) = \frac{9(I_d^*)^2}{2\pi^2} \xi^2 f(\gamma). \quad (7)$$

Здесь принято: $I_d^* = 2I_d\omega L_{\gamma} / \sqrt{3}U_m = I_d / I_{\delta}$ – относительное значение половины выпрямленного тока; $f(\gamma) = \gamma^2 - \gamma \sin 2\gamma + \sin^2 \gamma / \gamma^4$ – коэффициент, учитывающий изменение реактивной мощности основной гармоники за счет угла коммутации γ .

Анализ выражения $f(\gamma)$ показывает, что при возрастании γ от 0 до 0,4 рад ($0 \leq \gamma \leq 23^\circ$) значение $f(\gamma)$ снижается от 1 до 0,965. Следовательно, влияние коэффициента $f(\gamma)$ на реактивную мощность конденсаторов несущественно.

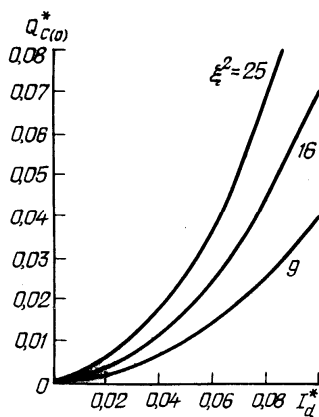


Рис. 5

Зависимости реактивной мощности конденсаторов (для основной гармоники) от выпрямленного тока (в относительных единицах) показаны на рис. 5. Из полученных решений и графиков видно, что реактивная мощность конденсаторов существенно зависит от тока нагрузки преобразователя и емкости конденсаторов.

Вывод. Выполнен гармонический анализ токов конденсаторов каскадной компенсационной преобразовательной системы, который позволил определить спектр гармоник тока и значения их амплитуд. Указанное решение использовано при получении расчетных выражений для составляющих реактивной мощности конденсаторов. Произведена количественная оценка влияния высших гармоник тока на реактивную мощность конденсаторов, исследованы зависимости составляющих реактивной мощности от величины угла коммутации вентилей и тока нагрузки.

1. Бойко В.С., Бойко В.В., Видолок Ю.Ф. та ін. Теоретичні основи електротехніки: У 3 т. – К: ІВЦ Видавн. «Політехніка». – 2004. – Т1. – 272 с.

2. Бойко В.С., Кудря Е.А., Потяженко Н.А., Шуляк А.А. Электромагнитный процесс в компенсационной преобразовательной системе с регулируемым компенсирующим устройством // Техн.електродинаміка – 2008. – №3. – С. 37–42.

3. Ренне В.Т. Электрические конденсаторы. – Л.: «Энергия», 1969.

Надійшла 02.02.2010