

И.Ф. ДОМНИН, д-р техн. наук, проф. Институт ионосферы НАН Украины и МОН Украины

Е.А. КАЙДА, аспирант, каф. "Радиоэлектроника", НТУ "ХПИ"

Л.Ф. СИМОНОВА, мл. научн. сотр. каф. "Промышленная и биомедицинская электроника", НТУ "ХПИ"

МИНИМИЗАЦИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГАРМОНИК, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ ДВУХКАНАЛЬНОГО КОМПЕНСАТОРА НЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ

У статті розглядається спосіб мінімізації високочастотних гармонік, що генеруються випрямлячем двоканального компенсатора неактивних складових повної потужності. Аналізується залежність амплітуд вищих гармонік мережного струму від відносної напруги на конденсаторі нагромаджувача. Зроблено висновки за отриманими результатами.

This paper presents the method of high-frequency harmonic minimization, produced by two-channel rectifier appear in compensator of inactive components of the complete power. The dependence of high current harmonics amplitude and relative voltage on the reservoir capacitor is analyzed. Conclusions of obtained results are presented.

Постановка проблемы. Работа компенсированного управляемого выпрямителя (КУВ) в режиме компенсатора неактивных составляющих полной мощности требует выполнения комплекса исследований влияния параметров силовой схемы КУВ на регулируемые параметры питающей сети.

Анализ литературы. В работе [1] рассмотрены электромагнитные процессы и режимы мощных статических преобразователей. Характеристики полупроводникового фильтрокомпенсирующего устройства в установившемся режиме проанализированы в работе [2]. В работе [3] рассмотрено поведение гармоник в электрических сетях.

Цель статьи – минимизация высокочастотных гармоник, генерируемых выпрямителем двухканального компенсатора неактивных составляющих полной мощности.

Решение поставленной задачи. Схема компенсированного управляемого выпрямителя представлена на рис. 1. Коммутация тока в $BГ_C$ осуществляется под действием напряжения на конденсаторе C накопителя U_c , больше чем амплитуда линейного напряжения вторичной обмотки трансформатора T_1 . Коммутация тока в вентильном мосте на тиристорах $BГ_T$ происходит под действием напряжения сети.

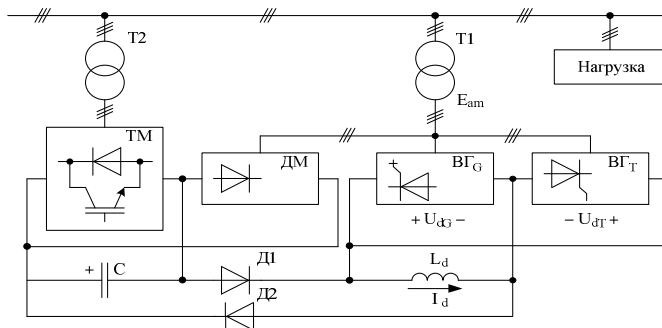


Рис. 1

При выключении ключей тиристорного моста на *GTO* тиристорах возникают коммутационные перенапряжения, которые связаны с накоплением энергии в индуктивностях рассеяния силового трансформатора. Амплитуда импульса коммутационного перенапряжения зависит от уровня напряжения на конденсаторе C и тока реактора L_d .

В исследуемом фильтрокомпенсирующем устройстве (ФКУ) для ограничения коммутационного перенапряжения используется вывод энергии, накапливаемой в индуктивностях рассеяния, через диодный мост ДМ и вспомогательные диоды Д1, Д2 в конденсатор C .

Импульсы коммутационных перенапряжений приводят к расширению спектра гармоник, присутствующих в токе питающей сети. Каждой высшей гармонике выпрямленного напряжения порядка n в переменном токе соответствуют две высшие гармоники тока с номерами $n-1$ и $n+1$. Для минимизации высокочастотных гармоник, генерируемых выпрямителем ФКУ в питающую сеть следует выяснить характер влияния угла коммутации ключей мостов на однооперационных и *GTO* тиристорах и напряжения на конденсаторе накопителя на гармонический состав тока сети.

Максимальная амплитуда импульса коммутационного перенапряжения определяется следующим образом:

$$U_{kn} = U_C - E_{gm1} \quad , \quad (1)$$

где E_{am1} – амплитуда линейного напряжения на вторичной обмотке силового трансформатора ФКУ.

Энергия, накопленная в индуктивности выключаемой фазы равна:

$$\Delta W_L = LI_d^2 / 2 \quad . \quad (2)$$

Приращение энергии конденсатора C на интервале коммутации при условии равенства нулю энергии ($\Delta W_N=0$), отдаваемой на этом интервале в питающую сеть, определяется выражением:

$$\Delta W_c = \frac{U_c I_d}{2\omega} \gamma_G . \quad (3)$$

При условии полной передачи энергии, накопленной в индуктивности выключаемой фазы в конденсатор, получим:

$$\frac{U_c I_d}{2\omega} \gamma_G = LI_d^2 / 2 , \quad (4)$$

откуда справедливо выражение (5) , устанавливающее связь между напряжением на конденсаторе C и углом коммутации моста на GTO тиристорах:

$$\gamma_G = \frac{LI_d \omega}{U_c} . \quad (5)$$

Решение поставленной задачи минимизации высокочастотных гармоник возможно путем получения общих аналитических выражений для разложения в ряд Фурье сетевого тока шестипульсного компенсационного управляемого выпрямителя при произвольных значениях углов управления α_G и α_T и углов коммутации γ_G и γ_T .

В схеме КУВ, выполняющего функцию компенсатора реактивной мощности, мгновенное значение фазного тока сети i_N определяется либо мгновенным значением тока моста на однооперационных тиристорах, либо мгновенным значением тока моста на GTO тиристорах:

$$\begin{aligned} i_N &= i_T , \text{ при } \alpha = \alpha_T ; \\ i_N &= i_G , \text{ при } \alpha = \alpha_G , \end{aligned} \quad (6)$$

где i_T , i_G – соответственно мгновенные значения сетевых фазных токов мостов на однооперационных и GTO тиристорах (см. рис. 1). Сетевой ток моста на GTO тиристорах содержит две составляющие: соответствующую току нагрузки, пропорционального компенсируемой реактивной мощности, и соответствующую току рекуперации. Анализ гармонического состава выполним без учета влияния силового активного фильтра на сетевой ток, потребляемый КУВ.

Косинусный и синусный ряды Фурье для высших гармоник сетевого тока КУВ могут быть определены как соответствующие косинусные и синусные ряды составляющих сетевого тока, обусловленных работой одного из мостов. Исходя из этого справедливы следующие равенства:

$$A_n = A_{Gn}; B_n = B_{Gn} ; \quad (7)$$

$$A_n = A_{Tn}; B_n = B_{Tn} , \quad (8)$$

где A_n , B_n , A_{Gn} , B_{Gn} , A_{Tn} и B_{Tn} – соответственно коэффициенты при n -й гармонике косинусного и синусного рядов Фурье суммарного сетевого тока и его составляющих.

В соответствии с [1] и с учетом (5) коэффициенты A_{Gn} , B_{Gn} , A_{Tn} и B_{Tn} вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned}
A_{Gn} &= \frac{U_a}{\sqrt{3}\omega L} \frac{\sin \frac{\pi n}{3}}{\frac{\pi n}{3}} F_{GA}(n); \\
B_{Gn} &= -\frac{U_a}{\sqrt{3}\omega L} \frac{\sin \frac{\pi n}{3}}{\frac{\pi n}{3}} F_{GB}(n); \\
A_{Tn} &= \frac{U_a}{\sqrt{3}\omega L} \frac{\sin \frac{\pi n}{3}}{\frac{\pi n}{3}} F_{TA}(n); \\
B_{Tn} &= -\frac{U_a}{\sqrt{3}\omega L} \frac{\sin \frac{\pi n}{3}}{\frac{\pi n}{3}} F_{TB}(n).
\end{aligned} \tag{9}$$

Входящие в выражения (5) коэффициенты $F_{GA}(n)$, $F_{GB}(n)$, $F_{TA}(n)$, $F_{TB}(n)$, вычисляются по следующим выражениям:

$$\begin{aligned}
F_{GA}(n) &= \frac{\sin(n+1) \frac{\gamma_G}{2}}{n+1} * \sin(n+1)(-\alpha + \frac{\gamma_G}{2}) - \frac{\sin(n-1) \frac{\gamma_G}{2}}{n-1} \cdot \sin(n-1)(-\alpha + \frac{\gamma_G}{2}); \\
F_{GB}(n) &= \frac{\sin(n+1) \frac{\gamma_G}{2}}{n+1} * \cos(n+1)(-\alpha + \frac{\gamma_G}{2}) - \frac{\sin(n-1) \frac{\gamma_G}{2}}{n-1} \cdot \cos(n-1)(-\alpha + \frac{\gamma_G}{2}); \\
\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
F_{TA}(n) &= \frac{\sin(n+1) \frac{\gamma_T}{2}}{n+1} * \sin(n+1)(\alpha + \frac{\gamma_T}{2}) - \frac{\sin(n-1) \frac{\gamma_T}{2}}{n-1} \cdot \sin(n-1)(\alpha + \frac{\gamma_T}{2}); \\
F_{TB}(n) &= \frac{\sin(n+1) \frac{\gamma_T}{2}}{n+1} * \cos(n+1)(\alpha + \frac{\gamma_T}{2}) - \frac{\sin(n-1) \frac{\gamma_T}{2}}{n-1} \cdot \cos(n-1)(\alpha + \frac{\gamma_T}{2}).
\end{aligned}$$

Полученные аналитические выражения позволяют проанализировать зависимость амплитуд высших гармоник сетевого тока, определяемого как:

$$\begin{aligned}
I_{Gn} &= \sqrt{A_{Gn}^2 + B_{Gn}^2}; \\
I_{Tn} &= \sqrt{A_{Tn}^2 + B_{Tn}^2},
\end{aligned} \tag{11}$$

от относительного напряжения на конденсаторе накопителя U_c^* , которое определяется как отношение величины напряжения на конденсаторе к амплитуде линейного напряжения на вторичной обмотке трансформатора питания

выпрямительного блока.

Графические зависимости, соответствующие полученным аналитическим выражениям для двух значений углов управления α_G , приведены на рис. 2-5. Рис. 2 показывает зависимость амплитуды пятой гармоники тока питающей сети, потребляемого выпрямителем фильтрокомпенсирующего устройства от относительного напряжения на конденсаторе накопителя; рис. 3 – амплитуды седьмой гармоники тока; рис. 4 – амплитуды одиннадцатой гармоники тока; рис. 5 – амплитуды тринадцатой гармоники тока.

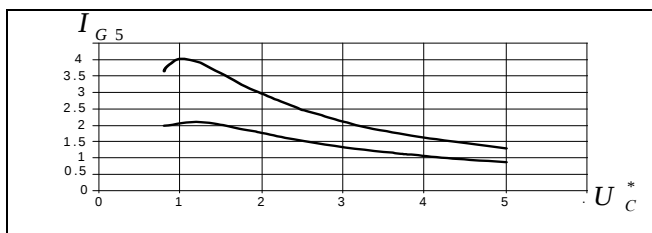


Рис. 2. Зависимость амплитуды пятой гармоники сетевого тока от напряжения на конденсаторе накопителя

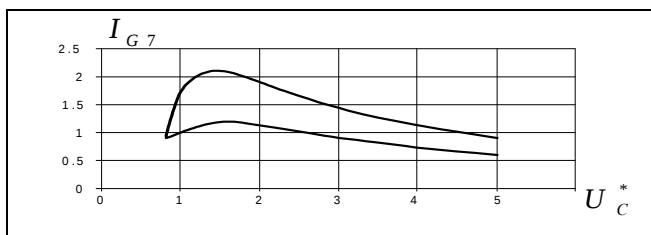


Рис. 3. Зависимость амплитуды седьмой гармоники сетевого тока от напряжения на конденсаторе накопителя

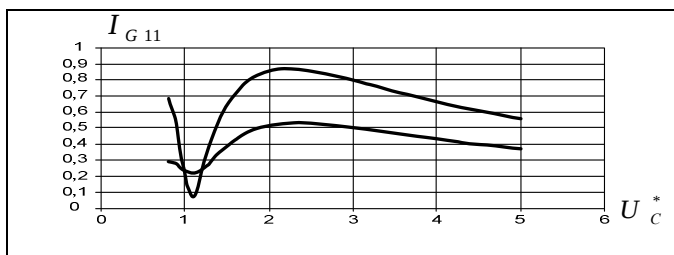


Рис. 4. Зависимость амплитуды одиннадцатой гармоники сетевого тока от напряжения на конденсаторе накопителя

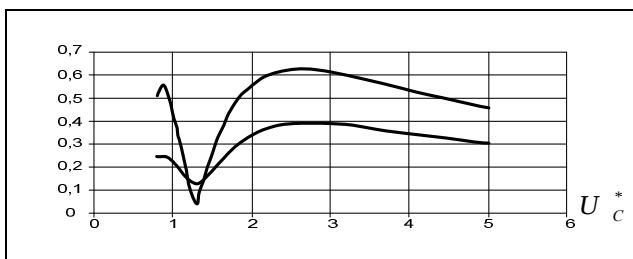


Рис.5. Зависимость амплитуды тринадцатой гармоники сетевого тока от напряжения на конденсаторе накопителя

Выводы. Анализ графических зависимостей позволяет сделать вывод о наличии диапазона значений напряжения на конденсаторе накопителя C , при котором происходит увеличение величин отдельных гармоник а, следовательно, и коэффициента пульсаций сетевого тока КУВ [2], что необходимо учитывать при выборе величины напряжения на конденсаторе накопителя. Напряжение на конденсаторе накопителя ограничено снизу условием коммутации GTO тиристоров и равно 1,05 от амплитудного значения линейного напряжения на вторичной обмотке трансформатора выпрямителя. Выбор величины напряжения на конденсаторе накопителя следует выполнять с учетом наличия диапазона, в котором происходит увеличение амплитуды отдельно взятых гармоник и коэффициента гармоник тока сети в целом. Величина напряжения на конденсаторе накопителя, выбираемая из условия обеспечения допустимого значения коэффициента гармоник тока питающей сети, равна удвоенному амплитудному значению линейного напряжения на вторичной обмотке трансформатора выпрямителя.

Список литературы: 1. Глинтерник С.Р. Электромагнитные процессы и режимы мощных статических преобразователей -Л.: Наука, 1968.- 308 с. 2. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Копачовец О.И. Характеристики полупроводникового фильтрокомпенсирующего устройства в установленном режиме // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність».-2003.-Ч.4.- С.15-20. 3. Ариллага Д., Брэдли Д. Гармоники в электрических сетях. – М.: Энергия, 1990. – 390 с.

Поступила в редакцию 25.01.2010