

В.П. Тараканов, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника»
В.В. Вахнина, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника»
А.А. Кувшинов, доктор технических наук,
профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: двухмостовой преобразователь; вентильный мост; аномальная гармоника; параметрическая несимметрия.

Аннотация: В статье рассмотрена проблема компенсации аномальных гармоник тока и напряжения, вызываемых параметрической несимметрией контуров коммутации многомостового преобразователя. Отличие индуктивностей контуров коммутации между фазами и отдельными вентильными мостами многомостового преобразователя (например, при использовании трансформаторов с соединением вентильных обмоток звездой, треугольником, зигзагом или треугольником с продолженными сторонами) представляет реально ощутимую несимметрию, приводящую к появлению во входном токе и выходном напряжении преобразователя аномальных гармоник, не свойственных идеализированному режиму. Рассмотрены условия минимизации аномальных гармоник выпрямленного напряжения, обусловленных неравенством индуктивных сопротивлений контуров коммутации двух последовательно соединенных вентильных мостов двенадцатипульсного преобразователя путем искусственно вводимой несимметрии по углам управления, и оценивается эффективность технической реализации.

Получены зависимости, определяющие условие минимизации аномальных гармоник напряжения на выходе и тока на входе двенадцатипульсного преобразователя, обусловленных неравенством цепей контуров коммутации вентильного моста.

Получено соотношение, позволяющее осуществить управление многомостовым преобразователем за счет введения коррекции по углам управления вентильного моста, которое позволяет уменьшить уровень аномальных гармоник в выходном напряжении и входном токе двенадцатипульсного преобразователя, обусловленных параметрической несимметрией цепей коммутации отдельных вентильных мостов.

Компенсация аномальных гармоник, обусловленных параметрической несимметрией, может быть осуществлена за счет введения в систему управления преобразователя дополнительно канала, который корректирует углы управления вентильного моста, реализуя условие минимизации.

Простота и достаточная эффективность исследуемого способа компенсации на основе формирования сигнала коррекции углов управления вентильных мостов за счет применения наиболее доступных технической реализации параметров в качестве сигналов обратной связи определяют целесообразность его использования в эквивалентных схемах преобразователей различных назначений и позволяют улучшить их электромагнитную совместимость с питающей системой.

ВВЕДЕНИЕ

Для уменьшения в энергосистеме высших гармонических тока и улучшения формы выпрямленного напряжения мощные преобразователи выполняют по многомостовым эквивалентным многопульсным схемам выпрямления, используя для их создания фазоповоротные трансформаторы и трансформаторы со специальными схемами соединения обмоток [1–9].

Известно, что при несимметричных режимах многофазных (многомостовых) тиристорных преобразователей как на стороне переменного, так и на стороне постоянного тока появляются аномальные гармоники, не свойственные симметричному режиму [10–15]. Спектр аномальных гармоник многомостовых преобразователей в общем случае определяется как несимметрией каждого моста [10; 11; 16], так и несимметрией, обусловленной различием режимов и параметров отдельных шестифазных вентильных мостов (ВМ) [12; 14].

Отличие индуктивностей контуров коммутации между фазами и отдельными ВМ многомостового преобразователя (например, при использовании трансформаторов с соединением вентильных обмоток звездой, треугольником, зигзагом или треугольником с продолжен-

ными сторонами) представляет реально ощутимую несимметрию, приводящую к появлению во входном токе и выходном напряжении преобразователя аномальных гармоник, не свойственных идеализированному режиму. Методика расчета уровней аномальных гармоник входного тока и выходного напряжения 12-пульсного двухмостового преобразователя (ВП-12), вызванных междумостовой несимметрией цепей коммутации, рассмотрена в [13]. В данной работе рассматриваются условия компенсации аномальных гармоник выпрямленного напряжения, обусловленных неравенством индуктивных сопротивлений X_{γ} контуров коммутации последовательно соединенных ВМ ($\Delta X_{\gamma} = X_{\gamma 2} - X_{\gamma 1}$) ВП-12, путем искусственно вводимой несимметрии по углам управления ($\Delta \alpha = \alpha_2 - \alpha_1$) и оценивается эффективность технической реализации.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

При анализе воспользуемся допущениями, общепринятыми при исследовании мощных преобразовательных электроустановок [13]. Каждый ВМ работает в режиме 2-3.

Гармонический состав выпрямленного напряжения каждого ВМ в режиме 2-3 [13]:

$$u_1 = \frac{1}{2}U_{01} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_{1n} \cos n\omega t + b_{1n} \sin n\omega t);$$

$$u_2 = \frac{1}{2}U_{02} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_{2n} \cos n\omega t + b_{2n} \sin n\omega t),$$

где u_1, u_2 – мгновенные значения выпрямленных напряжений мостов;
 $n=6k, k=1, 2, 3, \dots$

Для выделения аномальных гармоник рассмотрим разность мгновенных значений выпрямленных напряжений ВМ:

$$u_2 - u_1 = \frac{1}{2}(U_{02} - U_{01}) + \sum_{n=1}^{\infty} [(a_{2n} - a_{1n}) \cos n\omega t + (b_{2n} - b_{1n}) \sin n\omega t],$$

где косинусные a_{1n}, a_{2n} и синусные b_{1n}, b_{2n} коэффициенты ряда Фурье определяются из условий работы каждого ВМ в шестифазном режиме [13], то есть

$$\begin{aligned} a_{2n} - a_{1n} &= \\ &= \frac{3E_m \sqrt{3}}{2\pi} \left[\frac{\cos(n+1)\alpha_2 + \cos(n+1)(\alpha_2 + \gamma_2)}{n+1} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\cos(n-1)\alpha_2 + \cos(n-1)(\alpha_2 + \gamma_2)}{n-1} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\cos(n+1)\alpha_1 + \cos(n+1)(\alpha_1 + \gamma_1)}{n+1} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\cos(n-1)\alpha_1 + \cos(n-1)(\alpha_1 + \gamma_1)}{n-1} \right]; \\ b_{2n} - b_{1n} &= \\ &= \frac{3E_m \sqrt{3}}{2\pi} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha_2 + \sin(n+1)(\alpha_2 + \gamma_2)}{n+1} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sin(n-1)\alpha_2 + \sin(n-1)(\alpha_2 + \gamma_2)}{n-1} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sin(n+1)\alpha_1 + \sin(n+1)(\alpha_1 + \gamma_1)}{n+1} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sin(n-1)\alpha_1 + \sin(n-1)(\alpha_1 + \gamma_1)}{n-1} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где E_m – амплитудное значение фазного напряжения на входе ВМ.

Угол управления α , индуктивное сопротивление фазы X_γ и угол коммутации γ вентилей каждого ВМ при условии постоянства выпрямленного тока I_d связаны соотношением [13]

$$\begin{aligned} \alpha_1 + \gamma_1 &= \arccos\left(\cos \alpha_1 - \frac{2X_{\gamma 1} I_d}{\sqrt{3}E_m}\right); \\ \alpha_2 + \gamma_2 &= \arccos\left(\cos \alpha_2 - \frac{2X_{\gamma 2} I_d}{\sqrt{3}E_m}\right). \end{aligned} \quad (2)$$

Амплитуда и фаза аномальной гармоники соответственно равны

$$\begin{aligned} \Delta u_n &= u_{2n} - u_{1n} = \sqrt{(a_{2n} - a_{1n})^2 + (b_{2n} - b_{1n})^2}; \\ \varphi_{2n} - \varphi_{1n} &= \arctg \frac{a_{2n} - a_{1n}}{b_{2n} - b_{1n}} \end{aligned} \quad (3)$$

Выражения (3) справедливы при любых $X_{\gamma 1}, X_{\gamma 2}$ и α_1, α_2 .

При достаточно малых $\Delta X_\gamma = X_{\gamma 2} - X_{\gamma 1}$ и $\Delta \alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ амплитуда аномальной гармоники

$$\Delta u_n = \sqrt{\Delta a_n^2 + \Delta b_n^2}, \quad (4)$$

в линейном приближении

$$\Delta a_n = \frac{\partial a_{1n}}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial a_{1n}}{\partial \gamma} \Delta \gamma; \quad (5)$$

$$\Delta b_n = \frac{\partial b_{1n}}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial b_{1n}}{\partial \gamma} \Delta \gamma.$$

Подставив a_{1n} и b_{1n} из (1) в (5), получим

$$\begin{aligned} \Delta a_n &= \frac{3Em\sqrt{3}}{\pi} [\Delta \alpha \sin \alpha_1 \cos n\alpha_1 + \\ &\quad + (\Delta \alpha + \Delta \gamma) \sin(\alpha_1 + \gamma_1) \cos n(\alpha_1 + \gamma_1)]; \\ \Delta b_n &= \frac{3Em\sqrt{3}}{\pi} [\Delta \alpha \sin \alpha_1 \sin n\alpha_1 + \\ &\quad + (\Delta \alpha + \Delta \gamma) \sin(\alpha_1 + \gamma_1) \sin n(\alpha_1 + \gamma_1)]. \end{aligned} \quad (6)$$

Амплитуда аномальной гармоники

$$\Delta u_n = \frac{3Em\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{\Delta \alpha^2 \sin^2 \alpha_1 + (\Delta \alpha + \Delta \gamma)^2 \sin^2(\alpha_1 + \gamma_1) + 2(\Delta \alpha + \Delta \gamma) \Delta \alpha \sin \alpha_1 \sin(\alpha_1 + \gamma_1) \cos n\gamma_1}. \quad (7)$$

Здесь $\Delta \alpha$ и $\Delta \gamma$ не являются независимыми переменными, поскольку α, γ, X_γ функционально связаны соотношением (2), дифференцируя которое, при условии постоянства выпрямленного тока, определим

$$\Delta \gamma = \frac{\cos \alpha_1 - \cos(\alpha_1 + \gamma_1)}{\sin(\alpha_1 + \gamma_1)} x + \frac{\sin \alpha_1 + \sin(\alpha_1 + \gamma_1)}{\sin(\alpha_1 + \gamma_1)} \Delta \alpha, \quad (8)$$

здесь $x = \frac{\Delta X_\gamma}{X_{\gamma 1}}$ – степень несимметрии индуктивностей

цепей коммутации ВМ.

Подставив (8) в (7), получим соотношение, позволяющее определить амплитуду аномальной гармоники при заданных α_1, γ_1, x и n как функцию от $\Delta \alpha$,

$$u_n^* = \sqrt{\Delta\alpha^2 \sin^2 \alpha_1 \cos^2 n \frac{\gamma_1}{2} + 2x\Delta\alpha \cos^2 n \frac{\gamma_1}{2} \sin(\alpha_1 + \frac{\gamma_1}{2}) \sin \alpha_1 \sin \frac{\gamma_1}{2} + x^2 \sin^2 \frac{\gamma_1}{2} \sin(\alpha_1 + \gamma_1)}, \quad (9)$$

где $u_n^* = \frac{\Delta u_n}{3\sqrt{3}Em/\pi}$ – относительное значение амплитуды n -й гармоники.

Исследование функции (9) на экстремум позволило получить соотношение

$$\Delta\alpha = \left| \frac{\cos(\alpha_1 + \gamma_1) - \cos \alpha_1}{2 \sin \alpha_1} x \right|, \quad (10)$$

которое является условием минимума.

Интегрируя (10), предварительно исключив из него γ_1 , и используя (2), можно записать

$$2 \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha d\alpha = - \int_{X_{\gamma_1}}^{X_{\gamma_2}} \frac{2Id}{\sqrt{3}Em} dX_{\gamma};$$

$$2(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) = \frac{2Id(X_{\gamma_2} - X_{\gamma_1})}{\sqrt{3}Em}.$$

Возвращаясь к переменной γ , получим

$$\cos \alpha_2 + \cos(\alpha_2 + \gamma_2) = \cos \alpha_1 + \cos(\alpha_1 + \gamma_1). \quad (11)$$

Соотношение (11) является условием равенства постоянных составляющих выпрямленного напряжения каждого ВМ ($U_{o2}=U_{o1}$), т.е. указывает на один из возможных вариантов технической реализации способа управления многофазным преобразователем с минимальным уровнем аномальных гармоник [18–20].

Компенсация аномальных гармоник, обусловленных параметрической несимметрией, может быть осуществлена за счет введения в систему управления преобразователя дополнительно канала, который корректирует углы управления ВМ на величину $\pm\Delta\alpha$. Введение сигнала коррекции углов управления, пропорционального величине рассогласования выпрямленных напряжений ВМ, позволяет уравнивать выходные напряжения ВМ, снижая уровень аномальных гармоник на выходе преобразователя [15].

Допуская однозначное соответствие между уровнем аномальных гармоник напряжения на выходе и тока на входе ВП-12, полагаем, что соотношение (10) является условием минимума также и для аномальных гармоник тока.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из анализа приведенных зависимостей следует, что амплитуды аномальных гармоник тока и напряжения при введении коррекции углов управления $\Delta\alpha$ снижаются до минимального значения. При увеличении сте-

пени несимметрии x минимальное значение амплитуды аномальных гармоник смещается в сторону увеличения коэффициента $\Delta\alpha/\alpha$. С увеличением углов коммутации γ эффективность компенсации уровней аномальных гармоник возрастает.

Соотношение (11) минимума аномальных гармоник при $\Delta\alpha$, пропорциональном Δu , получено из условия линейного приближения, поэтому необходимо оценить эффективность вводимого в систему управления пропорционального канала в сравнении с реальной зависимостью $u_n^* = f(\alpha, \gamma, x)$. Сравнительную оценку проведем для режима работы преобразователя с $\alpha=10$ эл. град, $\gamma=20$ эл. град при отличии цепей коммутации на 10 %.

Относительные значения амплитуд аномальных гармоник $n=6, 18$ приведены в таблице 1, где верхние значения рассчитаны в соответствии с реальной зависимостью u_n^* , а нижние – по формуле (9).

Таблица 1. Относительные значения амплитуд аномальных гармоник $n=6, 18$

$\Delta\alpha$ эл. град	$n=6$	$n=18$
-1,6	0,0348 0,0457	0,0576 0,0320
-1,2	0,0318 0,0402	0,0499 0,0283
-0,8	0,0289 0,0337	0,0417 0,0242
-0,4	0,0261 0,0255	0,0328 0,0192
0	0,0237 0,0163	0,0236 0,0123
0,4	0,0213 0,0135	0,0140 0,0082
0,8	0,0172 0,0281	0,0044 0,0167
1,2	0,0212 0,0356	0,0071 0,0225
1,6	0,0225 0,0418	0,0171 0,0268

На основании анализа данных таблицы в области минимальных значений, получаемых за счет введения коррекции $\pm\Delta\alpha$, уровень аномальной гармоники $n=6$ снижается на 18 %, а для $n=18$ – на 67 %, в то время как в идеальном варианте уровень гармоник $n=6$ и $n=18$ снижается соответственно на 20 % и 82 %.

Простота и достаточная эффективность исследуемого способа компенсации на основе формирования сигнала коррекции углов управления ВМ за счет применения наиболее доступных технической реализации параметров в качестве сигналов обратной связи определяют целесообразность его использования в эквивалентных схемах ВП различных назначений и позволяют улучшить электромагнитную совместимость ВП с питающей системой.

ВЫВОДЫ

1. Получены зависимости, определяющие условие минимизации аномальных гармоник напряжения на выходе и тока на входе ВП-12, обусловленных неравенством цепей контуров коммутации ВМ.
2. Получено соотношение, позволяющее осуществить управление многомостовым преобразователем за счет введения коррекции по углам управления ВМ, которое позволяет уменьшить уровень аномальных гармоник в выходном напряжении и входном токе ВП-12, обусловленных параметрической несимметрией цепей коммутации отдельных ВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
2. Бурман А.П., Строев В.А. Современная электроэнергетика. Ч. 2. 5-е изд. М.: МЭИ, 2010. 632 с.
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2004. 358 с.
4. Барыбин Ю.Г. Справочник по проектированию электроснабжения. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.
5. Добрусин Л.А. Многомостовые преобразователи в электроэнергетике XXI века // Перспективные направления в развитии энергетики и электротехнического оборудования в 2000-2010 годах: тез. докл. М., 1999. С. 120.
6. Добрусин Л.А. Анализ проблемы электромагнитной совместимости преобразователей с питающей сетью // Перспективные направления в развитии энергетики и электротехнического оборудования в 2000–2010 годах: тез. докл. М., 1999. С. 121–122.
7. Эффективность использования многофазных схем преобразователей для обеспечения качества электроэнергии / И.И. Карташев [и др.] // Электро. 2003. № 5. С. 23–27.
8. Анализ качества напряжения в системе электроснабжения предприятий с мощной преобразовательной нагрузкой и разработка мероприятий по компенсации высших гармоник / И.И. Карташев [и др.] // Метрология электрических измерений в электроэнергетике: доклады Второй науч.-практ. конф. М.: НЦ ЭНАС, 2002. С. 17–19.
9. Фишлер Я.Л. Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок. М.: Энергоатомиздат, 1989. 320 с.
10. Маценко В.П., Смирнов В.И. Гармоники двенадцатипульсного выпрямителя при несимметричных питающих напряжениях // Науч. тр. Омского ин-та инженеров железнодорожного транспорта. 1976. Т. 169. С. 9–12.
11. Попов С.Г. Неканонические гармоники напряжения тиристорного преобразователя // Электричество. 1979. № 10. С. 69–71.
12. Яценко А.А., Тараканов В.П. Гармонический анализ фазного тока двухмостового преобразователя при несимметрии контуров коммутации и способы компенсации неканонических гармоник тока // Известия

- высших учебных заведений СССР. Энергетика. 1984. № 9. С. 13–18.
13. Яценко А.А., Тараканов В.П. Минимизация неканонических гармоник входного тока и выходного напряжения двухмостового преобразователя // Известия высших учебных заведений СССР. Энергетика. 1987. № 3. С. 55–59.
14. Яценко А.А., Тараканов В.П., Журба С.П. Гармонический анализ выходного напряжения двухмостового преобразователя с междумостовой несимметрией контуров коммутации. М., 1983. Деп. в Информэлектро 19.10.83, № 320.
15. А.С. СССР № 1074365. Яценко А.А., Журба С.П., Тараканов В.П. Способ управления двенадцатиразным двухмостовым преобразователем.
16. Григорьев О., Петухов В., Соколов В., Красилов И. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ // Новости электротехники. 2002. № 6. С. 47–56.
17. Буре И.Г., Мосичева И.А., Буре А.Б., Гапеенков А.В. Фильтрокомпенсирующее устройство с улучшенными технико-экономическими характеристиками // Вестник Московского энергетического института. 1997. № 2. С. 21–27.
18. Писарев А.Л., Деткин Л.П. Управление тиристорными преобразователями. М.: Энергия, 1975. 264 с.
19. Fujita H., Yamasaki T., Akagi H. A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial systems // IEEE Transactions on power electronics. 2000. Vol. 15. № 2. P. 215–222.
20. Le Roux A.D., Mouton Hd.T., Akagi H. Digital control of an integrated series active filter and diode rectifier with voltage regulation // IEEE Transactions on industry applications. 2003. Vol. 39. № 6. P. 1814–1820.

REFERENCES

1. GOST 32144–2013. Electric power. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Quality standard for electric power in general-purpose electric power supply systems. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p. (In Russian).
2. Burman A.P., Stroeve V.A. *Sovremennaya elektroenergetika* [Modern power generating industry]. 5th ed. Moscow, MEI Publ., 2010. Pt. 2, 632 p.
3. Zhezhenko I.V. *Visshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya prompredpriyatii* [Higher harmonics in electric power supply systems of production enterprises]. Moscow, Energoatomizdat publ., 2004, 358 p.
4. Barybin Yu.G. *Spravochnik po proektirovaniyu elektrosnabzheniya* [Reference-book on electric power supply engineering]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1990, 576 p.
5. Dobrysin L.A. Multi-bridge converters in electric power industry of the XXI century. *Perspektivnie napravleniya v razvitii energetiki i elektrotehnicheskogo obudovaniya v 2000-2010 godah*. Moscow, 1999, p. 120.
6. Dobrysin L.A. Analysis of the problem of electromagnetic compatibility of converters with supply main. *Perspektivnie napravleniya v razvitii energetiki i elektrotehnicheskogo obudovaniya v 2000-2010 godah*. Moscow, 1999, pp. 121–122.
7. Kartashev I.I., Banshchikov V.I., Surov V.I., Tulsy V.N., Shamonov R.G. Efficiency of the converter mono-phase

- circuit design application for electric power quality assurance. *Elektro*, 2003, no. 5, pp. 23–27.
8. Kartashev I.I., Ivakin V.N., Tulsy V.N., Shamonov R.G., Surov V.I., Banshchikov V.I. Analysis of the voltage quality in the power supply system of the enterprises with heavy converting load and development of measures for the higher harmonics compensation. *Metrologiya elektricheskikh izmereniy v elektroenergetike*. Moscow, 2002, pp. 17–19.
 9. Fishler Ya.L. *Transformatornoe oborudovanie dlya preobrazovatelnykh ustanovok* [Transformer equipment for converter installations]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1989, 320 p.
 10. Matsenko V.P., Smirnov V.I. Harmonics of the twelve-pulse rectifier in case of asymmetric supply voltage. *Nauchnie trudi Omskogo instituta inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta*, 1976, vol. 169, pp. 9–12.
 11. Popov S.G. Noncharacteristic harmonics of the thyristor converter voltage. *Elektrichestvo*, 1979, no. 10, pp. 69–71.
 12. Yatsenko A.A., Tarakanov V.P. Harmonic analysis of phase current of the double-bridge converter in case of the commutation circuit asymmetry and the methods of noncharacteristic current harmonics compensation. *Izvestiya visshih uchebnykh zavedeniy SSSR. Energetika*, 1984, no. 9, pp. 13–18.
 13. Yatsenko A.A., Tarakanov V.P. Minimization of noncharacteristic harmonics of input current and output voltage of the double-bridge converter. *Izvestiya visshih uchebnykh zavedeniy SSSR. Energetika*, 1987, no. 3, pp. 55–59.
 14. Yatsenko A.A., Tarakanov V.P., Zhurba S.P. Harmonic analysis of input voltage of the double-bridge converter with the inter-bridge asymmetry of the commutation circuits. Moscow, 1983. (In Russian, unpublished).
 15. Yatsenko A.A., Zhurba S.P., Tarakanov V.P. Method of control of the twelve-phase double-bridge converter. *Avtorskoe svidetelstvo SSSR № 1074365*. (In Russian).
 16. Grigoryev O., Petuhov V., Sokolov V., Krasilov I. Higher harmonics in power supply systems of 0,4 kW. *Novosti elektrotehniki*, 2002, no. 6, pp. 47–56.
 17. Bure I.G., Mosicheva I.A., Bure A.B., Gapeenkov A.V. Filter compensating device with improved technical and economic features. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 1997, no. 2, pp. 21–27.
 18. Pisarev A.L., Detkin L.P. *Upravlenie tiristornymi preobrazovatelyami* [Thyristor converters control]. Moscow, Energiya publ., 1975, 264 p.
 19. Fujita H., Yamasaki T., Akagi H. A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial systems. *IEEE Transactions on power electronics*, 2000, vol. 15, no. 2, pp. 215–222.
 20. Le Roux A.D., Mouton Hd.T., Akagi H. Digital control of an integrated series active filter and diode rectifier with voltage regulation. *IEEE Transactions on industry applications*, 2003, vol. 39, no. 6, pp. 1814–1820.

INVESTIGATION OF METHOD OF COMPENSATING FOR ABNORMAL HARMONIC DOUBLE-BRIDGE CONVERTER WITH PARAMETRIC UNBALANCED

© 2015

V.P. Tarakanov, candidate of technical sciences,
docent of the «Department of electricity supply and Electrotechnology»

V.V. Vakhnina, doctor of technical sciences,
professor, head of the chair «Department of electricity supply and Electrotechnology»

A.A. Kuvshinov, Doctor of the technical sciences,
professor «Department of electricity supply and Electrotechnology»

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: double-bridge converter; valve bridge; abnormal harmonics; parametric asymmetry.

Annotation: The article deals with the problem of compensation abnormal current and voltage harmonics caused by the asymmetry parameter switching circuits of multi-bridge converter. Unlike circuit inductance switching between phases and individual gating bridges of multi-bridge converter (for example, when using transformers with a compound Gate windings star, triangle, zigzag or triangle with the continuation of the parties) is really appreciable asymmetry, leading to the appearance of the input current and output voltage harmonics disturbance not peculiar to the idealized mode. The conditions to minimize the disturbance of the rectified voltage harmonics caused by inequality inductive loop resistance switching two series-connected rectifier bridges twelve-converter by artificially introduced asymmetry in the corners of the control, and evaluate the effectiveness of technical implementation.

The dependencies that determine the condition of minimizing disturbance harmonics of the output voltage and input current twelve-converter circuits caused by inequality circuits switching valve bridge.

A relationship makes it possible to control multi-bridge converter by introducing correction in the corners of the control valve of the bridge, which reduces the level of harmonic disturbances in the output voltage and input current twelve-converter due to the asymmetry parameter circuit switching valve of individual bridges.

Payment abnormal harmonics caused by the asymmetry parameter, can be accomplished by the introduction of the control system further channel converter that adjusts the angles of the control valve bridge, realizing the condition of minimization.

The simplicity and efficiency of the test method is sufficient compensation on the basis of the signal correction angle control valve bridges through the use of the most accessible technical implementation parameters as feedback signals determine the appropriateness of its use in the equivalent circuit of the converter for different purposes and can improve their electromagnetic compatibility with the supply system.