

Крубцов Д.С.

ООО «Объединенная сервисная компания»

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ К НЕСИММЕТРИИ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Проанализирована известная система управления активного выпрямителя с предупредлением по напряжению обратной последовательности, повышающая устойчивость его работы при несимметрии питающего напряжения. Особенностью данной системы является наличие блока задержки, который совместно с фильтром высших гармоник вносит ошибку между истинным значением напряжения и выделенным сигналом обратной последовательности. Предложена система управления активного выпрямителя с предупредлением по сетевому напряжению, в которой отсутствует дополнительный блок задержки. Проанализированы три способа фильтрации сетевого напряжения, среди которых выбран оптимальный. Произведена оценка работы активного выпрямителя с усовершенствованной системой управления при различных провалах напряжения. Предложенная система управления удовлетворяет поставленным требованиям и повышает устойчивость работы активного выпрямителя при рассматриваемых провалах напряжения.

Ключевые слова: прокатный стан, активный выпрямитель, система управления, провал напряжения, несимметрия напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) мощных активных выпрямителей с питающей сетью, как уже отмечалось ранее [1], рассматривается и решается на двух уровнях: во-первых, как воздействие активного выпрямителя на сеть [2–4], которое является главным образом в генерации высших гармоник и искажении напряжения в точке подключения, а во-вторых, по восприимчивости самого выпрямителя к нарушениям со стороны сети.

Использование широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в активном выпрямителе исключает потребление реактивной мощности, а благодаря методу удаления выделенных гармоник [5–9] частотный диапазон гармонических составляющих в сетевом токе может быть скорректирован в достаточно широких пределах.

Устойчивая работа активных выпрямителей возможна при изменении коэффициента модуляции в определенном диапазоне. Это обстоятельство накладывает жесткие требования к качеству питающего напряжения и, в первую очередь, как показали исследования, к несимметрии питающего напряжения.

Несимметрия напряжения часто возникает при несимметричных провалах и проявляется в том, что в сетевом напряжении кроме прямой последовательности возникает составляющая обратной последовательности [10]. В результате создаются условия для протекания токов обратной последовательности, величина которых ограничивается исключительно сопротивлением трансформатора или реактора на входе преобразователя. Значительные токи обратной последовательности приводят к отключению активного выпрямителя, нарушению технологического режима и простоям оборудования.

Таким образом, задача повышения устойчивости активного выпрямителя к нарушениям со стороны сети является актуальной и практически значимой. Её решение возможно по двум направлениям: во-первых, уменьшением вероятности появления провалов напряжения как первопричины несимметрии, что достигается применением автономных источников, многократным резервированием, разделением кольцевых схем и пр. [1, 11–15], а во-вторых, адаптацией системы управ-

ления активного выпрямителя к искажениям напряжения питающей сети.

В настоящей статье рассмотрены и проанализированы методы повышения устойчивости активных выпрямителей к несимметрии питающего напряжения аппаратными средствами, т.е. за счет совершенствования систем управления.

В литературе известна система управления активным выпрямителем с предупредлением по напряжению обратной последовательности. Для выделения сигнала обратной последовательности выполняют ряд операций; на первом этапе исходная трехфазная система преобразуется в двухфазную с помощью преобразования Кларка [16–20]:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -0,5 & -0,5 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{ab} \\ 0 \\ u_{bc} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где u_{α} , u_{β} – напряжения в неподвижной системе координат $\alpha\beta$; u_{ab} , u_{bc} – линейные напряжения.

Сигналы u_{α} и u_{β} при несимметрии напряжения перестают быть ортогональными, их представляют как сумму напряжений прямой и обратной последовательности. Последние выделяют, вводя задержку на четверть периода по схеме (рис. 1). На данном рисунке блок Т/4 обеспечивает задержку напряжений u_{α} и u_{β} на четверть периода.

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha+} \\ u_{\beta+} \\ u_{\alpha-} \\ u_{\beta-} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{\alpha}(t) \\ u_{\beta}(t) \\ u_{\alpha}(t - \frac{T}{4}) \\ u_{\beta}(t - \frac{T}{4}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $u_{\alpha+}$, $u_{\beta+}$ – составляющие напряжения прямой последовательности; $u_{\alpha-}$, $u_{\beta-}$ – составляющие напряжения обратной последовательности; $u_{\alpha}(t)$, $u_{\beta}(t)$ – измеренное напряжение в системе координат $\alpha\beta$; $u_{\alpha}(t-T/4)$, $u_{\beta}(t-T/4)$ – измеренное напряжение в системе координат $\alpha\beta$ с задержкой на четверть периода.

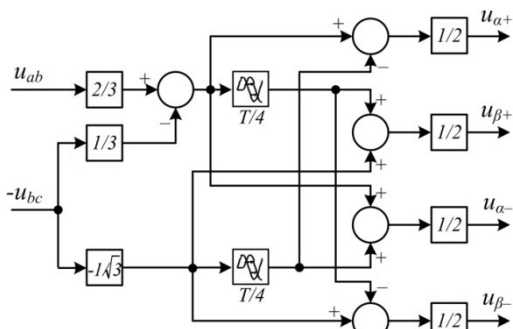


Рис. 1. Структурная схема блока выделения составляющих напряжения прямой и обратной последовательностей

Даже при столь малой задержке возникает рассогласование между истинным значением и выделенным сигналом обратной последовательности. Эта ошибка становится еще более заметной при введении фильтра высших гармоник; присутствие, которого весьма необходимо, так как из-за искажения кривой сетевого напряжения в сигнале задания возникают ложные срабатывания широтно-импульсного модулятора и, как следствие, возможна перегрузка ключей по току.

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В настоящей статье предложены и проанализированы системы с предупредлением по напряжению сети (рис. 2).

Для устойчивой работы ШИМ сетевое напряжение пропускают через фильтр. Был проведен анализ статических и динамических показателей активного выпрямителя с фильтрами различных типов, организация которых не вызывает затруднение, а именно:

- 1) фильтр второго порядка с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтр) в неподвижной системе координат $\alpha\beta$ и частотой среза 500 Гц;
- 2) БИХ-фильтр в подвижной системе координат dq;
- 3) фильтр скользящего среднего с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр) в подвижной системе координат с периодом усреднения 0,001 с.

Для оценки качества перечисленных выше фильтров при переходе от симметричного к несимметричным режимам сравнивались следующие показатели: первоначальный бросок сетевого тока и его небаланс в установившемся несимметричном режиме; размах колебаний напряжений в звене постоянного тока; диапазон изменения коэффициента модуляции в несимметричных режимах. Результаты моделирования показали, что наилучшие показатели и адаптацию к несимметрии питающего напряжения обеспечивает система управления по третьему варианту, схема которого приведена на рис. 3.

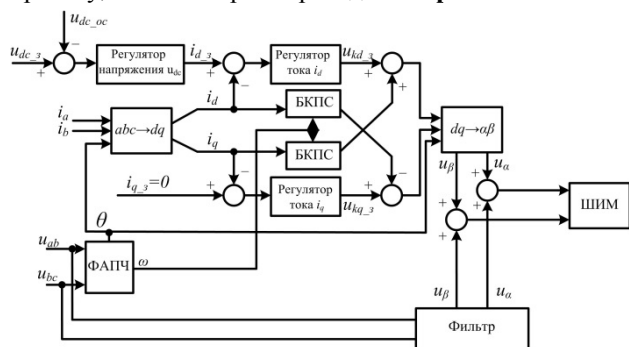


Рис. 2. Структурная схема системы управления активного выпрямителя с предупредлением по сетевому напряжению



Рис. 3. Блок выделения составляющей напряжения обратной последовательности с помощью КИХ-фильтра

В первом блоке сетевое напряжение преобразуют в систему вращающихся координат dq. Выходной сигнал этого блока содержит постоянную составляющую, пропорциональную напряжению обратной последовательности, переменную составляющую двойной частоты от напряжения прямой последовательности, а также напряжение высших гармоник. Для подавления высокочастотного сигнала и напряжения прямой последовательности используют КИХ-фильтр с периодом осреднения 0,001 с. Далее выделенный сигнал преобразуется в неподвижную систему координат $\alpha\beta$ и суммируется с выходами регуляторов тока. Амплитудно-частотные характеристики фильтров второго порядка с частотой среза 500 Гц и фильтра скользящего среднего с периодом усреднения 1/1000 с приведены на рис. 4.

Как видно из графика, в диапазоне частот, генерируемых активным выпрямителем, начиная с 60-й гармоники (3000 Гц) и далее, эффективность по ослаблению высших гармоник становится примерно одинаковой. Для оценки работоспособности и запасов устойчивости активного выпрямителя с предложенной системой управления при наиболее экстремальных провалах напряжения производилось сравнение реальных показателей с предельно допустимыми, взятыми из опыта эксплуатации:

1. Бросок тока при появлении несимметрии напряжения не должен превышать $1,9 I_{ном}$, а его максимальное значение в установившемся режиме при этом не должно быть выше $1,5 I_{ном}$.
2. Величина колебаний напряжения в звене постоянного тока, обусловленная токами обратной последовательности, не должна превышать 5% номинальной величины.

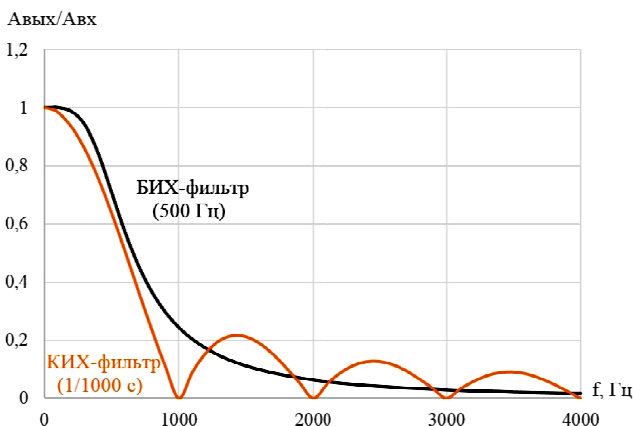


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики фильтра второго порядка с частотой среза 500 Гц и фильтра скользящего среднего с периодом усреднения 1/1000 с

3. Коэффициент модуляции в несимметричных режимах не должен быть ниже порогового значения для используемого метода ШИМ, равного 0,45.

В последующем задавались сочетания несимметричных провалов напряжения:

- а) провал в фазе А на 10%, в фазе В на 20%;
- б) провал в фазе А на 15%, в фазе В на 30%;
- в) провал в фазе А на 20%, в фазе В на 45%.

Результаты моделирования приведены на рис. 5–7. Осциллограммы, обозначенные буквами а, б, в, соответствуют вышеприведенным сочетаниям провалов напряжения.

Как видно из рис. 5, для всех исследуемых провалов напряжения бросок тока в переходных режимах не превышает $1,56 I_{ном}$, а в установившемся режиме величина потребляемого тока при самом глубоком провале составляет $1,29 I_{ном}$, что находится в допустимых пределах. Для всех исследуемых несимметричных провалов величина колебаний напряжений находится в допустимых пределах и не превышает 2,5% от установившегося значения. Наименьшее значение коэффициента модуляции активного выпрямителя при самой неблагоприятной ситуации составляет 0,48, а это значит, что все три условия, сформулированные ранее, полностью выполняются.

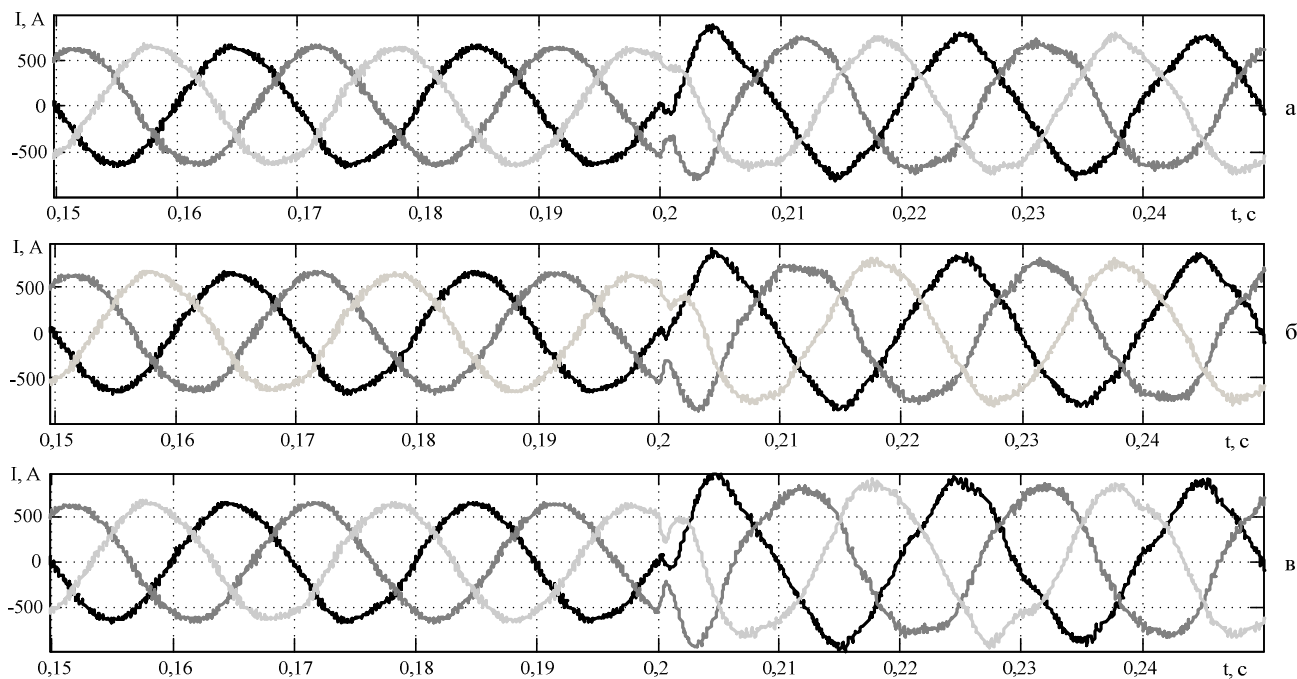


Рис. 5. Кривые мгновенных значений потребляемого тока при различной несимметрии питающей сети

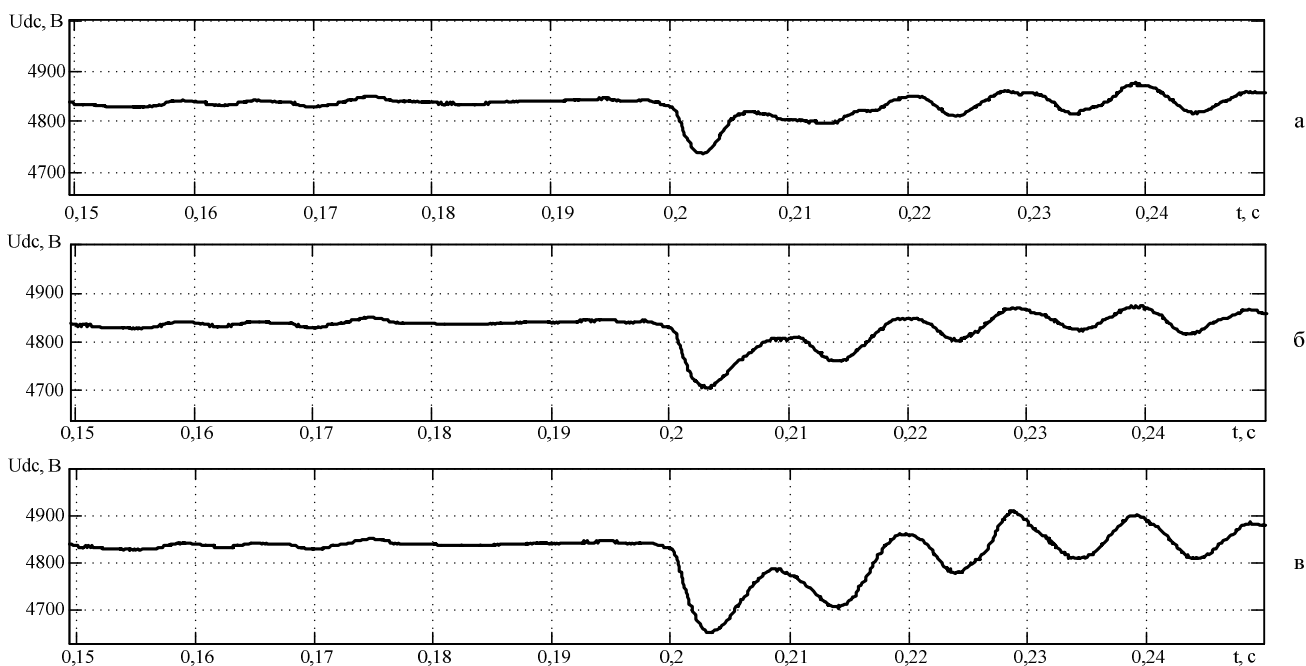


Рис. 6. Кривые мгновенных значений напряжений в звене постоянного тока при различной несимметрии питающей сети

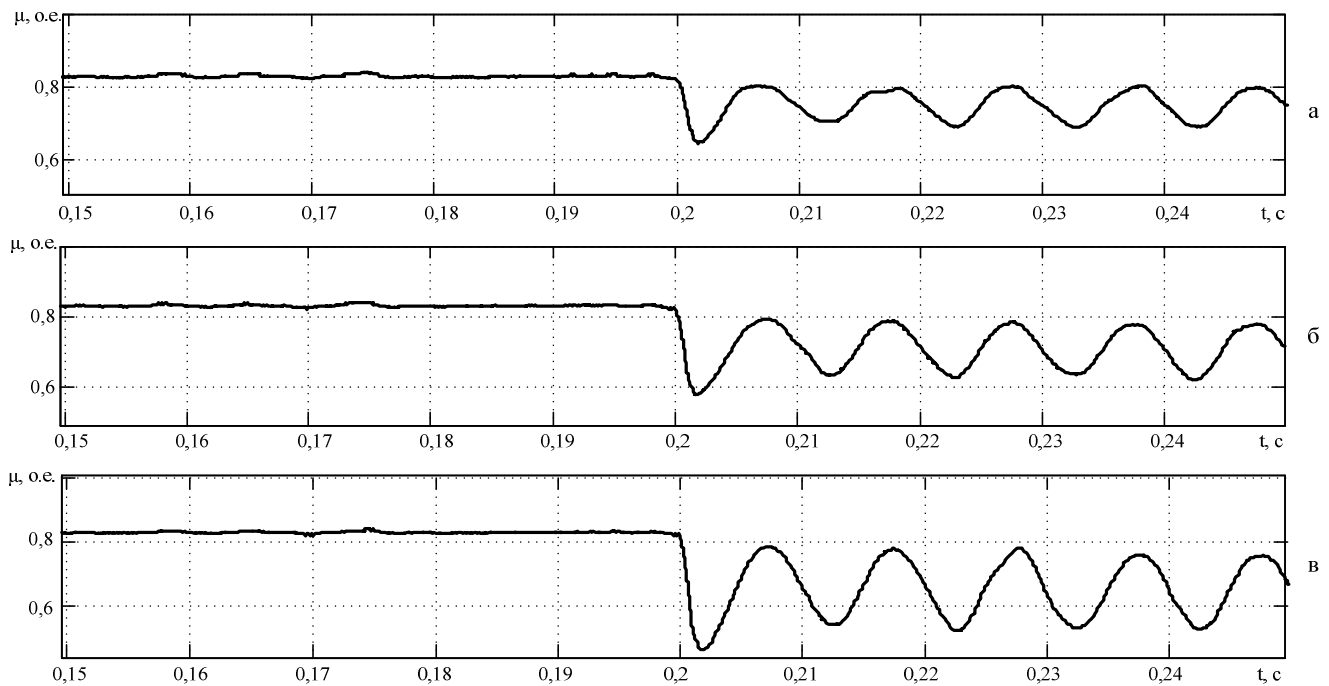


Рис. 7. Кривые мгновенных значений коэффициента модуляции при различной несимметрии питающей сети

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Система с предупредлением по напряжению обратной последовательности не обеспечивает устойчивой работы мощного высоковольтного активного выпрямителя при несимметричных провалах напряжения. Это обусловлено задержкой при выделении составляющей напряжения обратной последовательности и наличием фильтра высших гармоник.

2. Адаптация системы управления активного выпрямителя к несимметрии питающего напряжения осуществляется путем введения сетевого напряжения в качестве корректирующего сигнала прямого действия.

3. Для фильтрации сетевого напряжения используется фильтр скользящего среднего с конечной импульсной характеристикой (КИХ - фильтр) во вращающейся системе координат. Среди предложенных вариантов фильтрации он обеспечивает наименьший бросок тока в переходных режимах и наилучшую симметрию в симметричном режиме.

4. Предложенная система управления активного выпрямителя с адаптацией к несимметрии питающего напряжения удовлетворяет поставленным требованиям и повышает устойчивость работы активного выпрямителя при рассматриваемых провалах напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способы повышения устойчивости электроприводов непрерывных производств при провалах напряжения / Храмин Т.Р., Корнилов Г.П., Крубцов Д.С., Николаев А.А., Карандаева О.И., Журавлев П.Ю. // Вестник ЮУрГУ: Энергетика. 2014. №2. С. 80–87.
2. Храмин Т.Р., Корнилов Г.П., Крубцов Д.С. Оценка гармонического состава напряжения сети при работе активных выпрямителей большой мощности // Труды международной пятнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». Екатеринбург, 2012. С. 157–160.
3. Исследование воздействия активных выпрямителей большой мощности на питающую сеть / Храмин Т.Р., Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмин Р.Р., Крубцов

- Д.С. // Вестник ИГЭУ. 2013. №1. С. 80–83.
4. Study of Evaluation Voltage Harmonic Distortion on Active Rectifiers / Kornilov G.P., Khramshin T.R., Nikolaev A.A., Krubtsov D.S., Khramshin R.R. // International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation: Proceedings of the XI International Conference-Seminar (ISNCC 2013), Zelona Gora, Poland. 2013, pp. 1–3.
5. Храмин Т.Р., Корнилов Г.П., Крубцов Д.С. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 48–53.
6. Применение широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник для улучшения качества выходного напряжения трехуровневого инвертора / Левин А.Д., Радковский Г.В., Радченко Ю.Н. Липанов В.М., Шутько В.Ф. // Электротехника. 2006. № 1. С. 57–61.
7. A Flexible Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes in Three-Level PWM Converters / Franquelo L.G., Napoles J., Portillo Guisado R.C., Leon J.I., Aguirre M.A. // IEEE Transactions On Industrial Electronics. 2007. Vol. 54. № 6. pp. 3022–3029.
8. Resonances in a High-Power Active-Front-End Rectifier System / Rodriguez J.R., Pontt J., Huerta R., Alzamora G., Becker N., Kouro S., Cortes P., Lezana P. // IEEE Transactions On Industrial Electronics. 2005. Vol. 52. № 2. pp. 482–488.
9. Fei W. A, Du X., Wu B. Generalized Half-Wave Symmetry SHE-PWM Formulation for Multilevel Voltage Inverters // IEEE Transactions On Industrial Electronics. 2010 Vol. 57. № 9. pp. 3030–3038.
10. Крубцов Д.С., Храмин Т.Р., Вишняков С.Г. Повышение устойчивости мощных электроприводов на базе активных выпрямителей при провалах напряжения // Материалы 72-й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования». Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И.Носова. 2014. Т 2. С.113–118.
11. Проблемы качества внутривозовского электроснабжения и их решение на примере ОАО «ММК» / Журавлев Ю.П., Коваленко А.Ю., Корнилов Г.П., Славгородский В.Б., Николаев А.А., Храмин Т.Р. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2011. №4. С. 26–30.
12. Ограничение провалов напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий/ Корнилов Г.П.,

- Коваленко А.Ю., Николаев А.А., Абдулвелеев И.Р., Храшшин Т.Р. // Электроэнергетика. 2014. № 2(23). С. 44–48.
13. Теличко Л.Я., Басов П.М. Способы сохранения устойчивости ответственных электроприводов металлургических предприятий при провалах напряжения в системе электропитания // Энергетические системы. 2010. №1. С. 38–42.
 14. Влияние ДКИН на качество электроэнергии при коротких замыканиях в питающих электрических сетях / Федотов А.И., Кузнецов Р.В., Федотов Е.А., Леухин А.Н. // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 3-4. С. 36–41.
 15. Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутривозовского электроснабжения / Николаев А.А., Корнилов Г.П., Ивекеев В.С., Ложкин И.А., Котышев В.Е. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №1. С. 59–69.
 16. Operation of Grid-Connected DFIG Under Unbalanced Grid Voltage Condition / Zhou Y., Bauer P., Ferreira J.A., Pierik J. // IEEE Transactions On Energy Conversion. 2009. Vol. 24. № 1. pp. 240–246.
 17. Control Strategies Based on Symmetrical Components for Grid-Connected Converters Under Voltage Dips / Alepuz S., Busquets-Monge S., Bordonau J., Martnnez-Velasco J.A., Silva C.A., Pontt J., Rodriguez J. // IEEE Transactions On Industrial Electronics. 2009. Vol. 56. № 6. pp. 2162–2173.
 18. Haijun T., Di H. Study of Control Strategy Based Dual-PWM Converter under Unbalanced Input Voltage Condition // Advances in Electronic Engineering, Communication and Management Vol.1, Lecture Notes in Electrical Engineering. 2012. Vol. 139. pp. 267–272.
 19. Analysis of Compensation Strategies for Dynamic Voltage Restorer Based on DSFR-PLL Control / Zhang X., Yan J., Wen Z., Jin D. // Advances in Electronic Engineering, Communication and Management Vol.2, Lecture Notes in Electrical Engineering. 2012. Vol. 140. pp. 555–562.
 20. Храшшин Т.Р., Корнилов Г.П., Крубцов Д.С. Повышение устойчивости мощных активных выпрямителей при провалах напряжения // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск, 2014. Т.2. С. 334–338.

Поступила в редакцию 25 апреля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVING STABILITY OF ACTIVE RECTIFIERS OF ELECTRIC ROLLING MILLS TO UNBALANCED VOLTAGE

Dmitrij S. Krubcov

Electrician, Shop «Energy service», LLC «United service company», Magnitogorsk, Russia. E-mail: vozburk@mail.ru

The well-known control system of the active rectifier with negative phase-sequence voltage precontrol increasing stability of its operation in case of asymmetry of power voltage has been analyzed. The main characteristic of this system is the existence of the unit of a time delay, which together with the harmonic filter introduces an error between the true value of voltage and the selected reverse sequence signal. The control system of the active rectifier with the mains voltage precontrol in which there is no additional unit of a time delay is described. Three methods of the mains voltage filtering are analyzed and the optimum one is selected. Evaluation of the work of the active rectifier with advanced control system in case of different dips of voltage is made. The offered control system meets the delivered requirements and increases stability of operation of the active rectifier in case of the considered voltage dips.

Keywords: Rolling mill, active rectifier, control system, voltage dip, voltage unbalance.

REFERENCES

1. Hramshin T.R., Kornilov G.P., Krubcov D.S., Nikolaev A.A., Karandaeva O.I., Zhuravlev P.Ju. Methods of improving the stability of electric drives of continuous production during voltage sags. *Vestnik JuURGU: Jenergetika* [Bulletin SUSU: Power Engineering.], 2014, no. 2, pp. 80–87. (In Russian)
2. Hramshin T.R., Kornilov G.P., Krubcov D.S. Estimation of the harmonic composition of the mains voltage during operation of active rectifiers of high power. *Trudy mezhdunarodnoj pjatnadcatoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Jelektroprivody peremennogo toka». Ekaterinburg* [Proceedings of the international fifteenth scientific and technical conference "AC electric drives"]. Ekaterinburg, 2012, pp. 157–160. (In Russian)
3. Hramshin T.R., Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Hramshin R.R., Krubcov D.S. Research of the Influence of High Power Active Rectifiers on Mains Supply. *Vestnik IGJeU* [Bulletin of ISPU], 2013, no. 1, pp. 80–83. (In Russian)
4. Kornilov G.P., Khrashhin T.R., Nikolaev A.A., Krubcov D.S., Khrashhin R.R. Study of Evaluation Voltage Harmonic Distortion on Active Rectifiers. International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation: Proceedings of the XI International Conference-Seminar (ISNCC 2013), Zelona Gora, Poland. 2013, pp. 1–3.
5. Hramshin T.R., Kornilov G.P., Krubcov D.S. *Otsenka metodov shirotno-impulsnoi modulyatsii napryazheniya aktivnykh vypryamiteley prokatnykh stanov* [Evaluation of PWM methods of voltage active rectifiers at rolling mills]. Russian Internet Journal of Industrial Engineering, 2013, no. 2, pp. 48–53. (In Russian)
6. Levin A.D., Radkovskiy G.V., Radchenko Y.N., Lipanov V.M., Shut'ko V.F. Application of SHE PWM to improve the quality of the output voltage. *Jelektrotehnika* [Electrical Engineering], 2006, no.1, pp. 57–61. (In Russian)
7. Franquelo L.G., Napoles J., Portillo Guisado R.C., Leon J.I., Aguirre M.A. A Flexible Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes in Three-Level PWM Converters. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2007, vol. 54, no. 6, pp. 3022–3029.
8. Rodriguez J.R., Pontt J., Huerta R., Alzamora G., Becker N., Kouro S., Cortes P., Lezana P. Resonances in a High-Power Active-Front-End Rectifier System. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2005, vol. 52, no. 2, pp. 482–488.
9. Fei W. A, Du X., Wu B. Generalized Half-Wave Symmetry SHE-PWM Formulation for Multilevel Voltage Inverters. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2010, vol. 57, no. 9, pp. 3030–3038.
10. Krubcov D.S., Hramshin T.R., Vishnjakov S.G. Improving the sustainability of powerful electric drives on the basis of active rectifiers with voltage dips. *Materialy 72-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tehniki i*

- obrazovaniya*» MGTU im. G.I.Nosova. [Proceedings of the 72th international scientific-technical conference "Actual problems of modern science, technology and education"]. 2014, vol. 2, pp. 113–118. (In Russian)
11. Zhuravlev Ju.P., Kovalenko A.Ju., Kornilov G.P., Slavgorodskij V.B., Nikolaev A.A., Hramshin T.R. Problems of quality of in-plant power supply and their solution on the example of OJSC MMK. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jelektromehanika* [Proceedings of higher educational institutions. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 26–30. (In Russian)
 12. Kornilov G.P., Kovalenko A.Ju., Nikolaev A.A., Abdulvelev I.R., Hramshin T.R. Restriction of voltage dips in industrial power supply systems. *Jelektrojenergetika* [Power engineering], 2014, no. 2(23), pp. 44–48. (In Russian)
 13. Telichko L.Ja., Basov P.M. Methods for maintaining the stability of critical electric drives of metallurgical enterprises in case of voltage failures in the power supply system. *Jenergeticheskie sistemy* [Power systems], 2010, no. 1, pp. 38–42. (In Russian)
 14. Fedotov A.I., Kuznecov R.V., Fedotov E.A., Leuhin A.N. Effect of DCIN on the quality of electricity in case of short circuits in supplying electrical networks. *Izvestija VUZ. Problemy jenergetiki* [Proceedings of higher educational institutions. Energy problems], 2015, no. 3–4, pp. 36–41. (In Russian)
 15. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A., Kotyshev V.E. Using of Static Var Compensator of the UltraHigh Power Electric Arc Furnace to Support Electric Power System Stability and to Increase Reliability of Factory Power Supply. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2014, no. 1, pp. 59–69. (In Russian)
 16. Zhou Y., Bauer P., Ferreira J.A., Pierik J. Operation of Grid-Connected DFIG Under Unbalanced Grid Voltage Condition. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 2009, vol. 24, no. 1, pp. 240–246.
 17. Alepuz S., Busquets-Monge S., Bordonau J., Martinez-Velasco J.A., Silva C.A., Pontt J., Rodriguez J. Control Strategies Based on Symmetrical Components for Grid-Connected Converters Under Voltage Dips. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 2162–2173.
 18. Haijun T., Di H. Study of Control Strategy Based Dual-PWM Converter under Unbalanced Input Voltage Condition. *Advances in Electronic Engineering, Communication and Management Vol.1, Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, vol. 139, pp. 267–272.
 19. Zhang X., Yan J., Wen Z., Jin D. Analysis of Compensation Strategies for Dynamic Voltage Restorer Based on DSFR-PLL Control. *Advances in Electronic Engineering, Communication and Management Vol.2, Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, vol. 140, pp. 555–562.
 20. Hramshin T.R., Kornilov G.P., Krubcov D.S. Improving the stability of powerful active rectifiers in voltage sags. *Trudy VIII Mezhdunarodnoj (XIX Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu jelektroprivodu AJeP-2014 Saransk* [Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive AEP-2014 Saransk]. 2014, vol. 2, pp. 334–338. (In Russian)

Крубцов Д.С. Повышение устойчивости активных выпрямителей электроприводов прокатных станков к несимметрии питающего напряжения // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 2 (35). С. 19–24. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-19-24](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-19-24)

Krubcov D.S. Improving Stability of Active Rectifiers of Electric Rolling Mills to Unbalanced Voltage. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 19–24. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-19-24](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-19-24)