

es entering the boiler after the heating chamber with cold metallic charge. Based on the analysis of the recovery boiler the overall efficiency of an independent power supply system is defined.

Keywords: electric arc furnace, recovery boiler, combined-cycle plant, power supply diagram, electric furnace steelmaking.

References

1. Bushuev A.N., Kulagin A.Yu., Kartavtsev S.V. Power performance evaluation of an independent power supply system of electric furnace steelmaking. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering]. 2014, no. 6, pp. 24-29.
2. Bushuev A.N., Shablovskay E.B. Power evaluation of reheating of hazardous emissions, while preheating impure scrap with gases of a moderate temperature in electric steelmaking. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2013, vol. 16, no. 15, pp. 34-41.
3. Thermal design of boilers (standard method). 3rd edition, rev. and ext. St. Petersburg: NPO TsKTI, 1998, 256 p.
4. Khzmalyan D.M., Kagan Ya.A. *Teoriya gorenija i topochnye ustroistva: ucheb. Posobie dlya vuzov* [Theory of combustion and furnaces: teaching aid for higher schools]. Moscow: Energy, 1976, 488 p.
5. Mikhailovsky V.N., Agapitov E.B., Bigeev V.A., Kablukova M.S. Assessment of the energy intensity of steel produced in electric arc furnaces. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2011, no. 9, pp. 17-18.

УДК 621.314.53621.314.5

ВНЕШНИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЕНСИРОВАННЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Хохлов Ю.И., Сафонов В.И., Лозингер П.В.

Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия

Аннотация. Получены зависимости, описывающие внешние и энергетические характеристики двухфазных компенсированных выпрямителей, выполненных по двум схемам: в случае подключения звена управления к шинам постоянного тока диодного выпрямителя; в случае его подключения к питающей сети через промежуточный активный преобразователь. Рассмотрены особенности характеристик в этих случаях. Реактивная мощность, потребляемая из сети, существенно зависит от способа управления. Сделан вывод о целесообразности использования первой схемы только в случае компенсированного выпрямителя.

Ключевые слова: Компенсированный выпрямитель, векторное управление, внешние характеристики, энергетические характеристики, плавное регулирование выпрямленного напряжения.

Введение

Необходимым условием ведения таких технологических процессов, как электролиз алюминия, цинка, магния и других металлов, является применение источника регулируемого постоянного напряжения [1]. Традиционно в качестве такого источника питания используются компенсированные либо некомпенсированные выпрямительные агрегаты, в которых применяется фазовый способ регулирования выпрямленного напряжения за счет использования тиристоров в качестве силовых ключей, либо дросселей насыщения в силовых цепях. Однако фазовый способ управления ведет к уменьшению коэффициента мощности за счет возрастания вместе с углом управления потребляемой выпрямителем из сети реактивной мощности даже в случае его исполнения в компенсированном варианте [2]. В патентах [3, 4] представлены способы управления выпрямительным агрегатом, позволяющие регулировать выпрямленное напряжение без уменьшения коэффициента мощности. Это осуществля-

ется за счет внесения последовательно с напряжением сети через вольтодобавочный трансформатор напряжения управления, созданного дополнительно введенным автономным инвертором напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Вопросы экспериментального исследования протекающих в управляемых упомянутым способом преобразователях описаны в [5–7]. В настоящей работе проведено исследование внешних и энергетических характеристик компенсированного выпрямительного агрегата с векторным управлением.

Материалы и методы исследования

В силу возможности дальнейшего обобщения полученных результатов на многофазные схемы исследование проведено на примере двухфазного компенсированного выпрямителя. Выражения, описывающие протекающие в таком выпрямителе электромагнитные процессы, представлены в [8]. На основании этих выражений получены внешние и энергетические характеристики данного выпрямителя.

Схемы двухфазных нулевых компенсированных выпрямителей, в которых реализуются описанные в [3] и [4] способы, представлены на рис. 1, а и б соответственно. Схема на рис. 1, а отличается от схемы на рис. 1, б тем, что дополнительно введенный автономный инвертор осуществляет обмен активной мощностью с шинами постоянного тока компенсированного выпрямителя, а следовательно, влияет на величину выпрямленного тока. При расчете характеристик двухфазного выпрямителя это влияние учитывается дополнительной ветвью управления, подключенной к шинам постоянного тока, содержа-

щей сглаживающую индуктивность L_{dy} и источник тока I_{dy} (рис. 2).

Выражения для выпрямленных напряжения и тока преобразователя представлены в [8]. Внешние характеристики описываются уравнением:

$$U_{d*} = f(I_{dn*}), \quad (1)$$

где U_{d*} – нормированное выпрямленное напряжение выпрямителя; I_{dn*} – нормированный ток нагрузки.

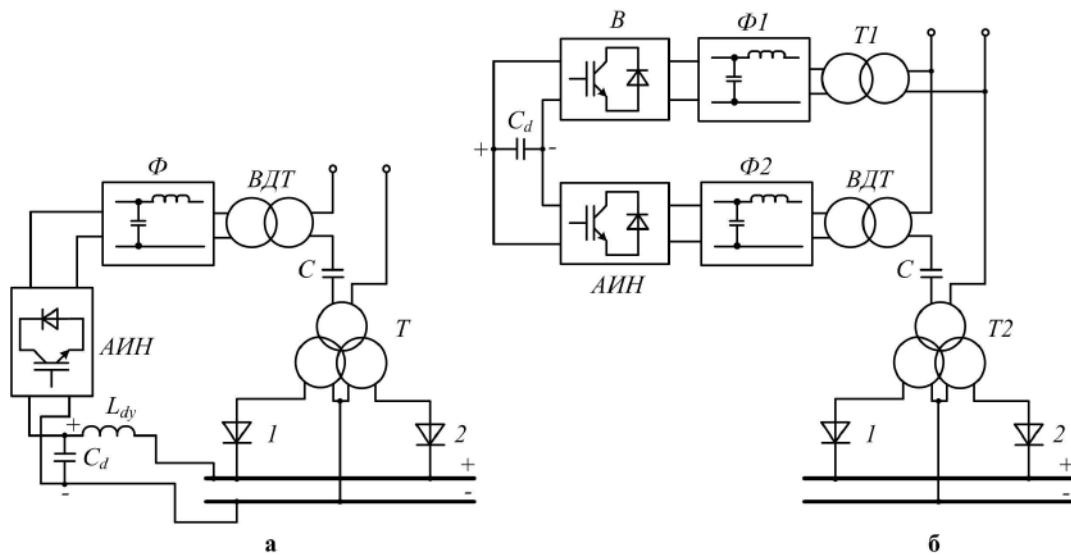


Рис. 1. Схемы двухфазных нулевых компенсированных выпрямителей с векторным управлением

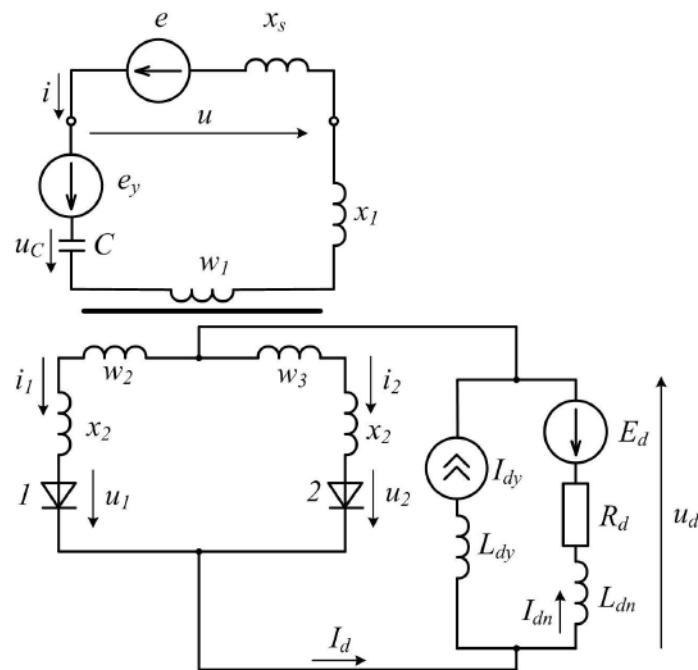


Рис. 2. Схема замещения двухфазного нулевого компенсированного выпрямителя с векторным управлением

Для выпрямителя на **рис. 1, б** справедливо условие $I_{dn^*} = I_{d^*}$. В случае выпрямителя на **рис. 1, а** выполняется равенство $I_{dn^*} = I_{d^*} - I_{dy^*}$.

Мощность управления P_{dy^*} , потребляемая или отдаваемая инвертором, имеет вид:

$$\begin{aligned} P_{dy^*} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (e_y \cdot i) d\theta = a \cdot \Delta_E \frac{v}{(v^2-1)^2} \left\{ \frac{1}{4} \frac{v^2-1}{v} \times \right. \\ \times [\gamma \sin(\rho - \Delta_\alpha) + \sin(2\alpha + \rho + \Delta_\alpha + \gamma) \sin \gamma] + \\ + \frac{(U_{d^*})^2}{(\Delta_E k_U)^2} \sin(\rho - \Delta_\alpha) \left(\frac{1}{v} \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} - \operatorname{tg} \frac{v\gamma}{2} \right) - \\ - \frac{(I_{d^*})^2}{(\Delta_E k_I)^2} \sin(\rho - \Delta_\alpha) [(1 + [v^2 - 1]k_I) \times \\ \times (\frac{1}{v} \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2} - \operatorname{ctg} \frac{v\gamma}{2}) + \frac{k_I}{v} (v^2 - 1)^2 \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2}] + \\ + \frac{U_{d^*} I_{d^*}}{(\Delta_E)^2 k_U k_I} \cos(\rho - \Delta_\alpha) [\operatorname{tg} \frac{v\gamma}{2} \times \\ \times (\frac{1}{v} \operatorname{ctg} \frac{v\gamma}{2} - \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2}) + (1 + [v^2 - 1]k_I) \times \\ \times \operatorname{ctg} \frac{v\gamma}{2} (\frac{1}{v} \operatorname{tg} \frac{v\gamma}{2} - \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}) + \frac{k_I}{v} (v^2 - 1)^2] \}. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда ток нагрузки I_{dn^*} определяется формулой

$$I_{dn^*} = I_{d^*} - \frac{P_{dy^*}}{U_{d^*}}. \quad (3)$$

Реактивная мощность, потребляемая выпрямителем из энергосистемы (в точке с бесконечной мощностью короткого замыкания), определяется по формуле:

$$\begin{aligned} Q_{e^*} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (e \cdot \frac{di}{d\theta}) d\theta = \Delta_E \frac{v^2}{(v^2-1)^2} \left\{ -\frac{1}{4} \frac{v^2-1}{v^2} \times \right. \\ \times [\gamma \cos(\Delta_\alpha) - \cos(2\alpha + \Delta_\alpha + \gamma) \sin \gamma] + \\ + \frac{(U_{d^*})^2}{(\Delta_E k_U)^2} \cos(\Delta_\alpha) \cdot \left(\frac{1}{v} \operatorname{tg} \frac{v\gamma}{2} - \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \right) - \\ - \frac{(I_{d^*})^2}{(\Delta_E k_I)^2} \cos(\Delta_\alpha) (1 + [v^2 - 1]k_I) \times \\ \times (\frac{1}{v} \operatorname{ctg} \frac{v\gamma}{2} - \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2}) + \frac{U_{d^*} I_{d^*}}{(\Delta_E)^2 k_U k_I} \sin(\Delta_\alpha) \times \\ \times [\operatorname{tg} \frac{v\gamma}{2} \cdot (\frac{1}{v} \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2} - \operatorname{ctg} \frac{v\gamma}{2}) + (1 + [v^2 - 1]k_I) \times \\ \times \operatorname{ctg} \frac{v\gamma}{2} (\frac{1}{v} \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} - \operatorname{tg} \frac{v\gamma}{2})] \}. \end{aligned} \quad (4)$$

Реактивная мощность, потребляемая выпрямителем в точке подключения к питающей сети, определяется по выражению:

$$Q_{n^*} = Q_{e^*} - 8 \frac{q}{\pi} [(U_{d^*} I_{dn^*})^2 + (Q_{e^*})^2], \quad (5)$$

где $q = \frac{x_S}{n^2 x_k}$ – доля приведенного сопротивления питающей сети в сопротивлении контура коммутации; $n = \frac{W_1}{W_2} = \frac{W_1}{W_3}$ – коэффициент трансформации.

Коэффициент реактивной мощности в точке подключения выпрямителя к питающей сети определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{Q_{n^*}}{U_{d^*} I_{dn^*}}. \quad (6)$$

Результаты и их обсуждение

По полученным выше соотношениям на **рис. 3 и 4** построены внешние и энергетические характеристики выпрямителя при $v=0$ (некомпенсированный выпрямитель) и $v=2$ соответственно. Характеристики получены при следующих условиях: $a = 0,5$; $\psi = \frac{\pi}{2}$; $q = 0,2$; $n = 1$.

При построении характеристик угол коммутации менялся в диапазоне $0 \leq \gamma \leq 35^\circ$, фаза управляющего напряжения – в диапазоне $0 \leq \rho \leq 180^\circ$. Характеристики приведены в относительных единицах, приведенных к базисным величинам:

$$U_6 = \frac{E_{km}}{\pi}; I_6 = \frac{E_{km}}{x_k}.$$

Для выпрямителя на **рис. 1, б** при $v=0$ внешние характеристики обладают характерным для некомпенсированного выпрямителя наклоном [2]. Увеличение фазы управляющего напряжения в диапазоне $0 \leq \rho \leq 180^\circ$ при фиксации его амплитуды приводит к смещению соответствующей внешней характеристики ближе к оси абсцисс (**рис. 3, а**). При этом до определенного угла происходит уменьшение потребляемой реактивной мощности в точке подключения к питающей сети Q_{n^*} , а следовательно, и $\operatorname{tg} \varphi_n$, при одном и том же значении тока нагрузки (**рис. 3, в и д**). Дальнейшее увеличение фазы управляющего напряжения приводит к повышению потребляемой преобразователем реактивной мощности, что обусловлено достижением максимума углом Δ_α .

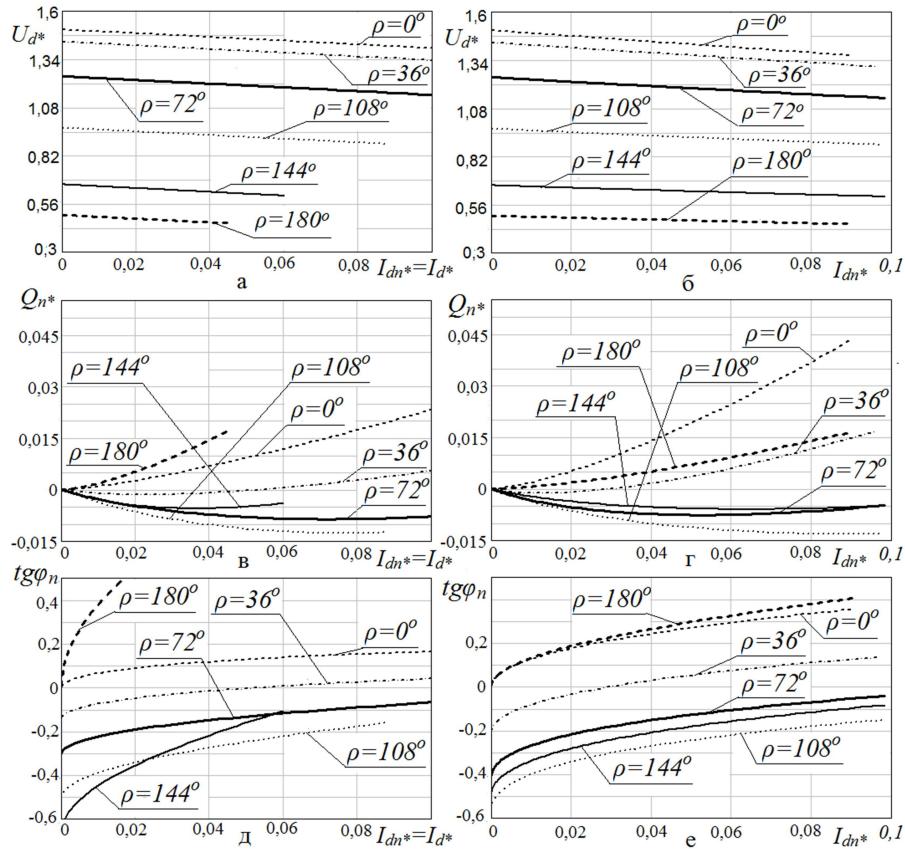


Рис. 3. Внешние и энергетические характеристики выпрямителя при $v=0$ и $a=0,5$

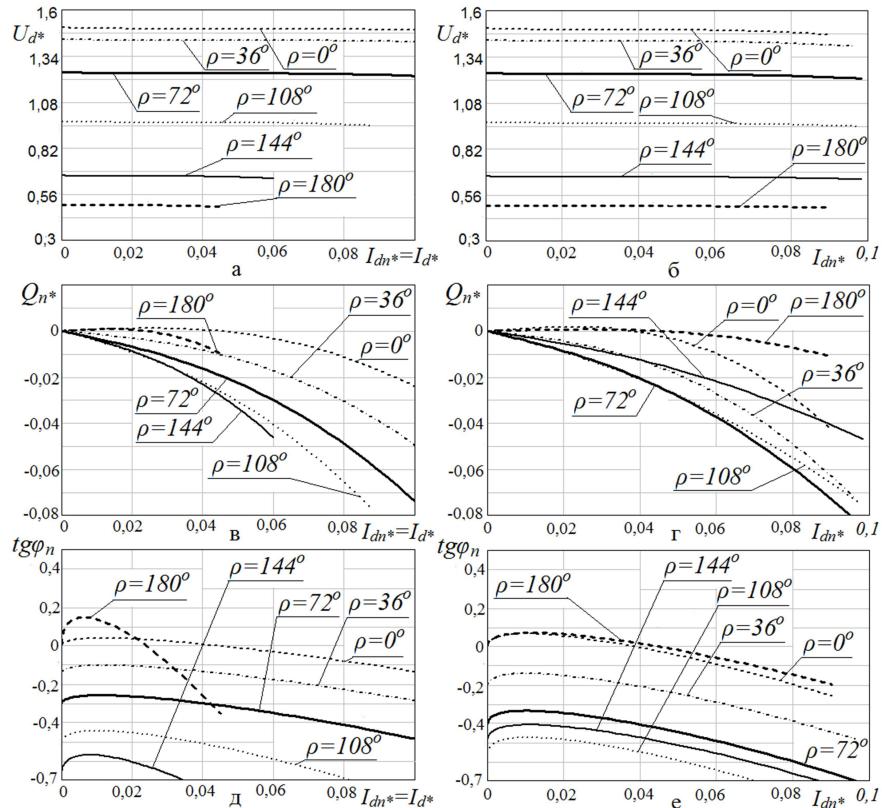


Рис. 4. Внешние и энергетические характеристики выпрямителя при $v=2$ и $a=0,5$

В случае выпрямителя на **рис. 1, а** при $v=0$ и малых углах ρ наблюдаются более мягкие внешние характеристики преобразователя (см. **рис. 3, б** по сравнению с **рис. 3, а**). Также имеется большее потребление реактивной мощности (см. **рис. 3, г, е** по сравнению с **рис. 3, в, д**). При увеличении угла ρ снижается, а затем меняет направление активная мощность, которой АИН обменивается с шинами постоянного тока. При больших значениях данного угла наблюдается увеличение жесткости внешних характеристик и снижение потребления реактивной мощности по сравнению со схемой на **рис. 1, а**.

В случае компенсированного выпрямителя при $v=2$, выполненного по схеме **рис. 1, б**, внешние характеристики обладают характерной жесткостью [2]. Изменение фазы управляющего напряжения в пределах $0 \leq \rho \leq 180^\circ$ также приводит к переходу на внешние характеристики, более близкие к оси абсцисс (**рис. 4, а**). Поскольку компенсированный выпрямитель при $v=2$ позволяет генерировать реактивную мощность, увеличение угла ρ приводит к дополнительной ее генерации с последующим ее снижением при достижении определенного угла ρ , соответствующего максимуму Δ_α (**рис. 4, в, д**). При применении схемы **рис. 1, а** смягчение внешних характеристик по сравнению со случаем **рис. 1, б** незначительно, зависимость характера изменения жесткости внешних характеристик от угла ρ аналогична случаю $v=0$. При малых углах ρ наблюдается большая генерация реактивной мощности по сравнению со случаем **рис. 1, б** при одном и том же значении I_{dn^*} . Аналогично случаю $v=0$ при достижении некоторого значения ρ меняется направление потока активной мощности через АИН и наблюдается снижение генерируемой им реактивной мощности по сравнению со случаем **рис. 1, б**.

Анализ результатов, показанных на **рис. 3**, позволяет сделать вывод о том, что для некомпенсированного выпрямителя предпочтительнее способ регулирования, представленный на **рис. 1, б**. В этом случае отсутствует влияние звена управления на жесткость внешних характеристик и на увеличение потребляемой преобразователем реактивной мощности.

Несомненным достоинством схемы на **рис. 1, а** является уменьшение количества необходимых для ее функционирования элементов. Как показывает **рис. 4**, внешние характеристики компенсированного преобразователя $v=2$ для обоих

схем отличаются незначительно. В случае схемы **рис. 1, а** при малых ρ наблюдается дополнительная генерация реактивной мощности по сравнению со схемой (см. **рис. 1, б**). Однако при одних и тех же токах нагрузки угол коммутации для схемы на **рис. 1, а** больше, чем в случае схемы на **рис. 1, б**. Это может ограничить область такого способа регулирования для многофазных схем.

Выводы

Обобщена теория двухфазного компенсированного преобразователя для случая наличия векторного управления. На основании полученных уравнений построены внешние и энергетические характеристики для двух различных схем двухфазных выпрямителей. Возможность экономии установленной мощности оборудования в случае отбора мощности управления с шин постоянного тока выпрямителя оправдывает себя в случае компенсированного выпрямителя. Полученные результаты необходимо распространить на многофазные схемы, что позволит определить целесообразность использования той или иной схемы управления выпрямителем в конкретных практических случаях.

Список литературы

1. Электротехнологические промышленные установки: учебник для вузов / И.П. Евтюкова, Л.С. Кацевич, Н.М. Некрасова, А.Д. Свенчанский; под. ред. А.Д. Свенчанского. М.: Энергоатомиздат, 1982. 400 с.
2. Хохлов Ю.И. Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетноократных гармоник токов преобразовательных блоков. Челябинск: ЧГТУ, 1995. 355 с.
3. Патент RU 2333589C1. Способ управления многофазным выпрямительным агрегатом / Хохлов Ю.И., 10.09.2008. Бюл. № 25, 19.03.2007.
4. Патент RU 2402143C1. Способ управления многофазным выпрямительным агрегатом / Хохлов Ю.И., Гиззатуллин Д.Н., Осипов А.Г., 20.10.2010. Бюл. № 29, 19.03.2009.
5. Хохлов Ю.И., Гиззатуллин Д.В., Осипов А.Г. Моделирование электромагнитных процессов в компенсированном выпрямителе с обратной связью на основе АИН с ШИМ // Вестник ЮУрГУ, Серия «Энергетика». 2008. Вып. 9. № 11. С. 32–38.
6. Гиззатуллин Д.В. Экспериментальное исследование компенсированного выпрямителя с обратной связью по напряжению на основе АИН с ШИМ // Вестник ЮУрГУ, Серия «Энергетика». 2010. № 32. С. 32–35.
7. Осипов А.Г. Экспериментальное исследование компенсированного выпрямителя с векторным управлением // Вестник ЮУрГУ, Серия «Энергетика». 2010. № 32. С. 36–39.
8. Электромагнитные процессы в компенсированных преобразователях с векторным управлением / Хохлов Ю.И., Сафонов В.И., Константинов В.Д., Лонзингер П.В. // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. URL: <http://www.science-education.ru/117-13505>

OUTPUT AND POWER PERFORMANCE OF COMPENSATED RECTIFIERS WITH VECTOR CONTROL

Khokhlov Yuriy Ivanovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Power Supply Systems Department of South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: Khokhlov@energo.susu.ac.ru.

Safonov Valeriy Ivanovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: val-iv-s@yandex.ru.

Lonzinger Petr Vladimirovich – Postgraduate Student, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: lpw91@mail.ru.

Abstract. Dependences describing biphasic compensated rectifiers' output and power performance were obtained in the cases of two different circuitries. The circuitries are a circuit with connection of a control link to DC buses of a diode rectifier and a circuit with its connection to a power system by means of an active PWM converter. The features arising in these cases were examined. Reactive power of a supply network significantly depends on a type of a rectifier circuit. A conclusion about the suitability of the first circuitry only in the case of the compensated rectifier was made.

Keywords: Compensated rectifier, vector control, output performance, power performance, rectified voltage slide control.

References

1. Yevtyukova I.P., Katsevich L.S., Nekrasova N.M., Svenchanskiy A.D., *Elektrotehnologicheskie promyshlennye ustanovki: Uchebnik dlya vuzov* [Electro-technological industrial equipment: textbook for universities]. Moscow: Energoatomizdat, 1982, 400 p.
2. Khokhlov Yu.I. *Kompensirovannye vypryamiteli s filtratsiey v kommutiruyushchie kondensatory nechetnokratnykh garmonik tokov preobrazovatelynykh blokov* [Compensated rectifiers with a filtration of odd-multiple harmonics of transforming block currents in switching capacitors]. Chelyabinsk: ChGTU, 1995, 355 p.
3. Patent RU 2333589C1. *A multiphase rectifier control method*. Inventor: Khokhlov Yu.I. Date of publication: 10.09.2008. Bulletin no. 25. Effective date for property rights: 19.03.2007.
4. Patent RU 2402143C1. *A multiphase rectifier control method*. Inventors: Khokhlov Yu.I., Gizzatullin D.V., Osipov A.G. Date of publication: 20.10.2010. Bulletin no. 29. Effective date for property rights: 19.03.2009
5. Khokhlov Yu.I., Gizzatullin D.V., Osipov A.G. *Modelirovaniye elektromagnitnykh protsessov v kompensirovannom vypryamitele s obratnoy svyazyu na osnove AIN s ShIM* [Modelling of electromagnetic processes of a compensated rectifier with a feedback based on VSI with PWM]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Energetika"* [Bulletin of the South Ural State University. Power Engineering Series], 2008, iss. 9, no. 11, pp.32-38.
6. Gizzatullin D.V. *Eksperimentalnoe issledovanie kompensirovannogo vypryamitelya s obratnoy svyazyu po napryazheniyu na osnove AIN s ShIM* [Experimental investigation of the compensated voltage feedback rectifier on the bases of the autonomous voltage inverter with PWM]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Energetika"* [Bulletin of the South Ural State University. Power Engineering Series], 2010, no. 32, pp.32-35.
7. Osipov A.G. *Eksperimentalnoe issledovanie kompensirovannogo vypryamitelya s vektornym upravleniem* [Experimental investigation of the compensated rectifier with vectorial control]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Energetika"* [Bulletin of the South Ural State University. Power Engineering Series], 2010, no. 32, pp.36-39.
8. Khokhlov Yu.I., Safonov V.I., Konstantinov V.D., Lonzinger P.V. *Elektromagnitnye protsessy v kompensirovannyykh preobrazovatelyakh s vektornym upravlyeniem* [Electromagnetic processes in a compensated converter with vector control]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, no. 3. URL: <http://www.science-education.ru/117-13505>