

Данный метод был успешно опробован и дал положительные результаты при включении ВЛ 220 кВ Щёлоков – ТАНЕКО, когда соединялись ПС 500 кВ Щёлоков и КРУЭ 220 кВ ОАО «ТАНЕКО», питаемые от разных энергосистем. И предварительный замер через ДЗЛ показал фазный сдвиг два градуса, что в дальнейшем подтвердилось традиционной подачей напряжения на «пустые» шины и замером вольтамперфазометром.

Также при вводе реконструированной подстанции на заводе ОАО «Аммоний», где отсутствовало эталонное напряжение, была произведена проверка правильности фазировки при помощи ДЗЛ и получен положи-

тельный результат.

Нами также проводилось множество лабораторных исследований с использованием двух полуккомплектов ДЗЛ, на которых имитировались различные варианты возможных событий в цепях напряжения, и во всех случаях результат оказался положительный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернобровов Н.В. Релейная защита. – М.: Книга по Требованию, 2013. 624 с.
2. Руководство по эксплуатации шкафа ДЗЛ типа ШЭ2607 093.
3. Лыкин А.В. Электрические системы и сети: учеб. пособие. М.: Логос, 2006. 254 с.

INFORMATION IN ENGLISH

PHASING OF ENERGETICS OBJECTS BY THE DIFFERENTIAL PROTECTION OF THE LINES WITH DATA COMMUNICATIONS USING FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINKS

Usmanov R.R., Petrov D.S.

The aim of the research was to receive the method of remote phasing of energetic objects using the vector transfer in the form of a digital signal by a longitudinal differential lines protection, which are working using fiber-optic line communications. A necessity of a method development appeared due to a situations, when on a new energetics objects there was no voltage, which makes possible to do the comparison while phasing. The development method was successfully tested in a laboratory conditions and also in process of facility commissioning of switchgear on OJSC “TANECO” and load-center substation on OJSC “Ammonium”.

Keywords: phasing, differential protection of connection lines, electric substation, fiber-optic communication link, power line, synchronization.

REFERENCES

1. Chernobrovov N.V. *Relejnaya zashchita* [Relay protection]. Moscow: Kniga po Trebovaniyu, 2013, 624 p.
2. Operating manual of DZL-type locker SHE2607 093.
3. Lykin A.V. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Moscow: Logos, 2006, 254 p.

УДК 621.314.64

Белый А.В., Маклаков А.С., Радионов А.А.

НОВЫЙ МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПОСРЕДСТВОМ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ УМНЫХ СЕТЕЙ

Главная цель статьи состоит в разработке нового способа управления активным выпрямителем напряжения (АВН) для компенсации реактивной мощности в питающей сети. Основное внимание в этом исследовании было уделено теоретическому анализу возможности управления активной, реактивной и полной мощности в системе АВН – питающая сеть. На основании полученных результатов мы можем сделать вывод о том, что регулирование реактивной мощности с помощью АВН возможно при использовании новой системы автоматического регулирования (САР). Наиболее актуально использовать новую САР, когда рядом с точкой подключения к питающей сети параллельно работают установки с нелинейной нагрузкой. Это позволит уменьшить величину потребляемой реактивной мощности с подстанции и улучшить технико-экономические показатели системы электроснабжения в целом для предприятия.

Ключевые слова: активный выпрямитель напряжения; замкнутая система управления; корректировка коэффициента мощности; компенсация реактивной мощности; промышленная умная сеть.

ВВЕДЕНИЕ

Последние законодательные акты Правительства РФ, регламентирующие коммерческие отношения предприятий с энергосистемой, показывают, что на потребителя электрической энергии возлагаются достаточно высокие требования и обязанности. В частности, введены нормативные значения коэффициента реактивной мощности $\text{tg}\varphi=0,4$ для внутризаводских сетей напряжением 6-20 кВ и $\text{tg}\varphi=0,35$ для напряжения 0,4 кВ. Кроме того, для стимулирования выполнения данных требований Федеральной службой по тарифам

РФ введена новая методика расчета повышающих или понижающих коэффициентов на потребляемую электроэнергию. Эта методика предоставляет потребителю возможность получить скидку на электроэнергию при поддержании требуемого коэффициента реактивной мощности. Участие потребителя в соглашениях с сетевой организацией регулируется Постановлением Правительства РФ. Следовательно, возможности компенсации реактивной мощности на предприятиях приобретают особую актуальность и значимость.

В настоящее время наиболее широкое распро-

странение получили статические компенсаторы реактивной мощности на базе полностью управляемых силовых полупроводниковых устройств, которые в общих чертах представляют собой батарею конденсаторов, подключенную в точке избыточного потребления реактивной мощности [1]. Такая компенсация может применяться в различных узлах электрических цепей для различных классов напряжения [2]. Кроме того, массовое внедрение в производство получили активных выпрямители напряжения (АВН) для питания реверсивных автоматизированных электроприводов переменного тока [3]. Такие выпрямители тоже имеют возможность участвовать в регулировании реактивной мощности в питающей сети [4]. Однако уровень теоретических и прикладных исследований мощных активных АВН при управлении режимами компенсации реактивной мощности не соответствует должному рассмотрению в отечественной и зарубежной литературе.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является разработка и исследование нового энергосберегающего способа управления АВН для питания реверсивных автоматизированных электроприводов переменного тока. Решения основных теоретических задач получены методами математического и имитационного моделирования в среде *Matlab* приложения *Simulink*. Для достижения цели в работе были поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Проведен теоретический анализ возможного управления активной, реактивной и полной мощности в системе АВН – питающая сеть.
2. Предложена и синтезирована система управления АВН в режимах регулирования реактивной мощности.
3. Представлено теоретическое рассмотрение интеграции реверсивных автоматизированных электроприводов переменного тока на базе АВН в интеллектуальную промышленную сеть.

СИСТЕМА АВН – ПИТАЮЩАЯ СЕТЬ

АВН представляет собой управляемый источник напряжения со звеном постоянного тока (DC) [5-7]. В большинстве случаев для питания реверсивных автоматизированных электроприводов переменного тока с номинальной мощностью выше 1 МВт АВН выполняются по трехуровневой топологии с разделительными диодами [8, 9]. Для АВН применяют современные алгоритмы коммутации полупроводниковых ключей с удалением выделенных гармоник или с минимизацией суммарного показателя гармонического искажения (THD) [10-14]. На **рис. 1** представлена принципиальная схема АВН, однофазная схема замещения и векторная диаграмма.

Принцип действия АВН с удобно рассмотреть с помощью однофазной схемы замещения на **рис. 1, б**. В точке подключения к сети его можно представить в виде источника выходного напряжения E_{ABH} , подключенного через реактор с эквивалентным индуктивным сопротивлением X_L и эквивалентным активным сопротивлением R к питающей сети с напряжением E_c . Разность напряжений E_{ABH} и сети E_c приходится на X_L и R , падения напряжения на которых U_L и U_R , α – угол сдвига между E_{ABH} и E_c и φ – угол сдвига между током

I и E_c . Из векторной диаграммы (**рис. 1, б**) можно вывести уравнения для активной P_c , реактивной Q_c и полной мощности S_c относительно питающей сети [15]:

$$P_c = \frac{E_c E_{ABH} (R \cdot \cos(\alpha) + X_L \sin(\alpha)) - E_c^2 R}{R^2 + X_L^2}, \quad (1)$$

$$Q_c = \frac{E_c E_{ABH} (X_L \cos(\alpha) - R \sin(\alpha)) - E_c^2 X_L}{R^2 + X_L^2}, \quad (2)$$

$$S_c = \sqrt{\frac{E_c^2 (E_{ABH}^2 - 2 \cdot E_{ABH} E_c \cos(\alpha) + E_c^2)}{R^2 + X_L^2}}, \quad (3)$$

$$E_{ABH} = m \cdot U_{dc} \cdot K_{ШИМ}, \quad (4)$$

где K_{ABH} – коэффициент ШИМ, U_{dc} – напряжение DC, m – коэффициент модуляции.

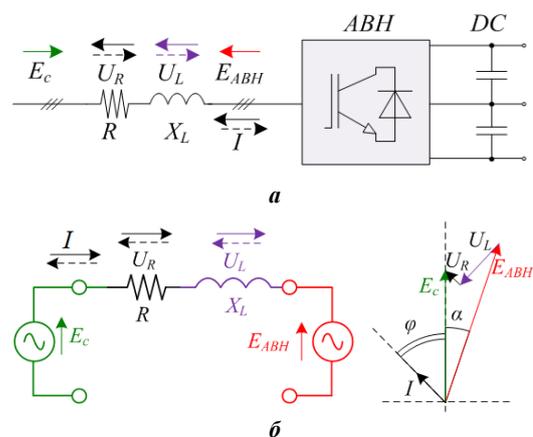


Рис. 1. Принципиальная схема АВН (а), однофазная схема замещения и векторная диаграмма (б) в точке подключения к сети

Используя уравнения (1)-(3) и (4) на **рис. 2** построены графики зависимостей активной $P_c=f(E_{ABH}, \alpha)$, реактивной $Q_c=f(E_{ABH}, \alpha)$ и полной $S_c=f(E_{ABH}, \alpha)$ мощности для всех возможных углов α . Для построения графиков использовались следующие параметры в системе относительных единиц: угол α в диапазоне от -180° до $+180^\circ$; выходное напряжение E_{ABH} в диапазоне от 0 до 2 о.е.; напряжение сети $E_c=1$ о.е.; $R=0,003$ о.е.; $X_L=0,5$ о.е. Значения были приняты с целью построения наглядных трехмерных поверхностей и определения максимумов и минимумов функций.

Анализ зависимостей на **рис. 2** показал, что положительные максимумы активной, реактивной и полной мощности достигаются при максимальном напряжении $E_{ABH}=2$ о.е., но при различных углах α . Отрицательные максимумы полной (**рис. 2, в**) и реактивной (**рис. 2, б**) мощности совпадают при $E_{ABH}=2$ о.е. и $\alpha=\pm 180^\circ$. Положительный максимум и минимум активной мощности достигается при $E_{ABH}=2$ о.е. и $\alpha=\pm 90^\circ$ (**рис. 2, а**).

В серийно выпускаемых АВН диапазоны изменения угла α и выходного напряжения могут отличаться в зависимости от силовой схемы. В большинстве случаев у АВН при работе на двигатель переменного тока угол α находится в малых диапазонах $\pm 10^\circ$, а выходное напряжение в среднем может составлять от 70 до 130% действующего напряжения сети. Кроме того, величина

потребляемой или инвертируемой активной мощности из питающей сети определяется исключительно нагрузкой. Это может вносить существенные ограничения в условия работы АВН в режимах генерации реактивной мощности. На **рис. 3** показаны зависимости с учетом рассмотренных выше ограничений при тех же параметрах.

На **рис. 3**, в видно, что полная мощность S_c АВН имеет максимумы при углах $\pm\alpha_{max}$ при напряжениях E_{ABH} равное 0,7 и 1,3 о.е. Используя зависимости на **рис. 3** можно построить систему управления АВН таким образом, чтобы при определённых значениях α и напряжениях E_{ABH} обеспечивалось постоянство максимальной потребляемой полной мощности из питающей сети $S_c = f(E_{ABH}, \alpha) = S_{cmax}$ и поддерживалась требуемая активная мощность со стороны нагрузки. Для того чтобы АВН не вышел за пределы ограничения по максимальной мощности, необходимо обеспечить зависимое ограничение величины реактивной мощности Q_{clim} , используя следующее уравнение:

$$Q_{clim} = \sqrt{S_{cmax}^2 - P_c^2} \quad (5)$$

НОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВН

За основу построения новой системы управления (СУ) АВН была принята классическая структура с прямой ориентацией по вектору питающего напряжения, которая подробно рассмотрена в трудах [16, 17]. При построении такой СУ приняты следующие допущения: идеальная синхронизация с питающей сетью; симметричная система питающих напряжений; баланс напряжений в звене постоянного тока (DC). В СУ используются пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы токов по осям dq , ПИ регулятор напряжения DC и регулятор реактивной мощности с зависимым ограничением [18]. На **рис. 4** показана функциональная схема СУ АВН.

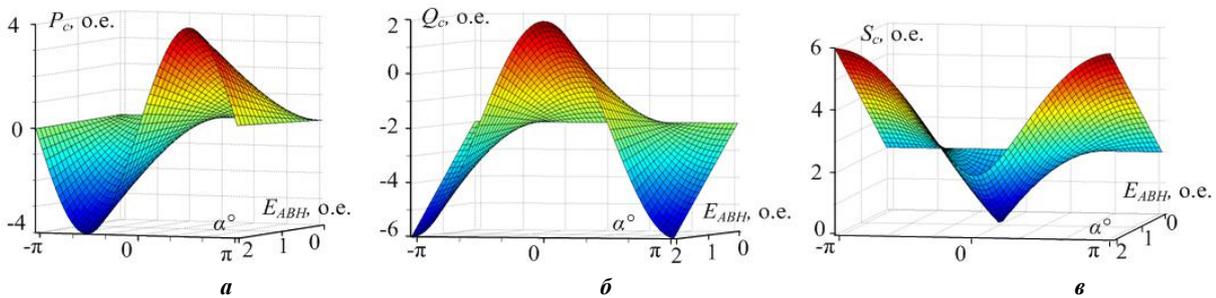


Рис. 2. Графики зависимостей $P_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ (а), $Q_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ (б), $S_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ (в)

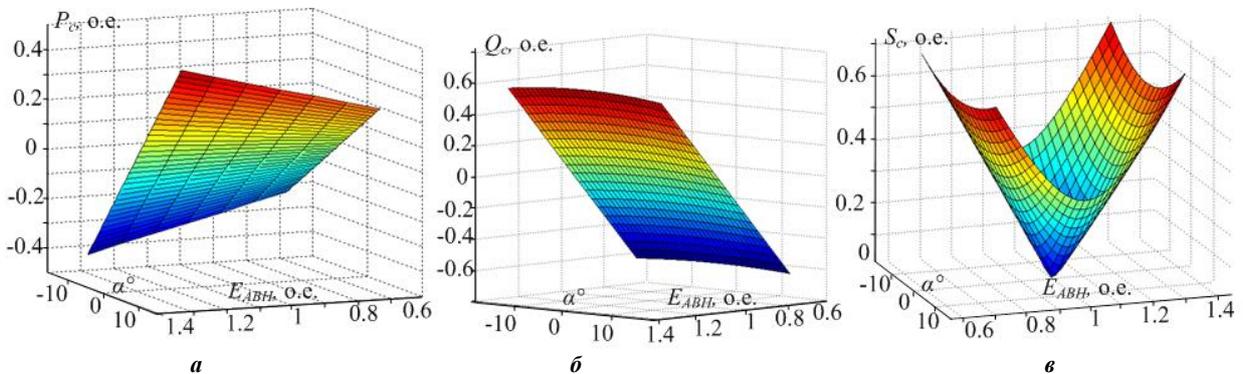


Рис. 3. Графики зависимостей $P_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ (а), $Q_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ (б), $S_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ (в) с учетом ограничений

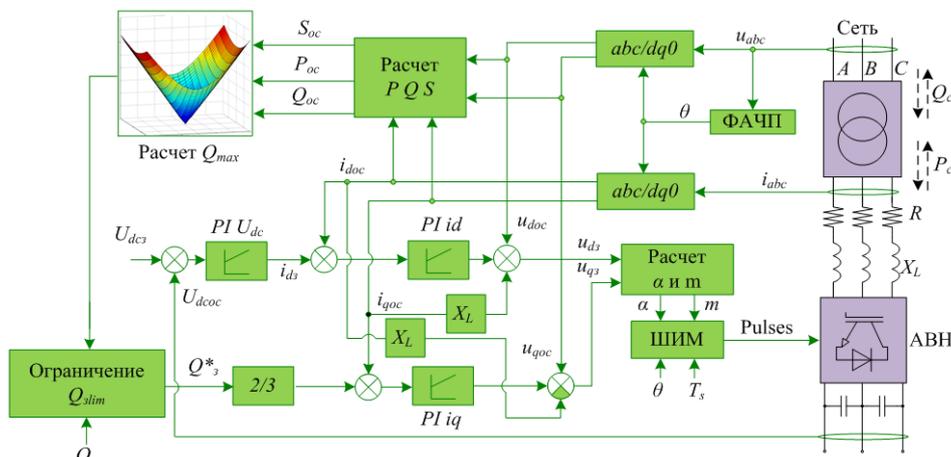


Рис. 4. Рис. 4. Функциональная схема новой СУ АВН

На рис. 4 приняты следующие обозначения: X_L, R – эквивалентное индуктивное и активное сопротивление в точке подключения АВН к сети переменного тока; T_S – период квантования ШИМ; m – коэффициент модуляции АВН; α – угол сдвига; u_{abc} – напряжения сети; i_{abc} – токи сети; θ – угол поворота вектора напряжений сети в системе dq ; i_{d3} и i_{d0c} – заданный и реальный ток по оси d ; i_{q3} и i_{q0c} – заданный и реальный ток по оси q ; $U_{dc\max}$ и U_{dc0c} – заданное и реальное напряжение DC ; P_{oc} , Q_{oc} и S_{oc} – измеренная активная, реактивная и полная мощность; Q_{lim} – рассчитанное ограничение по реактивной мощности; Q_3 – заданная реактивная мощность; Q_3^* – заданная реактивная мощность с учетом ограничения; ФАЧП – устройство фазовой автоподстройки частоты.

СИСТЕМА АВН – ПРОМЫШЛЕННАЯ SMART GRID

Авторами предлагается использовать новую СУ АВН, когда рядом с точкой подключения к питающей сети параллельно работают потребители реактивной мощности. Перспективен такой способ управления совместно с технологией интеллектуальной промышленной сети (Industrial Smart Grid). Industrial Smart Grid может осуществлять на верхнем уровне управления мониторинг в реальном времени коэффициента мощности сети $\cos(\varphi)_c$ и формировать на локальном уровне управления АВН задание на генерацию или потребление реактивной мощности Q_3 . Это позволит корректировать коэффициент мощности в точке подключений к питающей сети и компенсировать избыточную реактивную мощность [19]. Когда на подстанции будет перекомпенсация или недокомпенсация реактивной мощности, то в зависимости от режима работы электропривода АВН сможет сгенерировать или потребить некоторую величину реактивной мощности, тем самым улучшив коэффициент мощности в требуемой точке сети. На рис. 5 показан в упрощенном виде принцип корректировки коэффициента мощности сети посредством энергосберегающей СУ АВН для интеллектуальной системы электроснабжения предприятия.

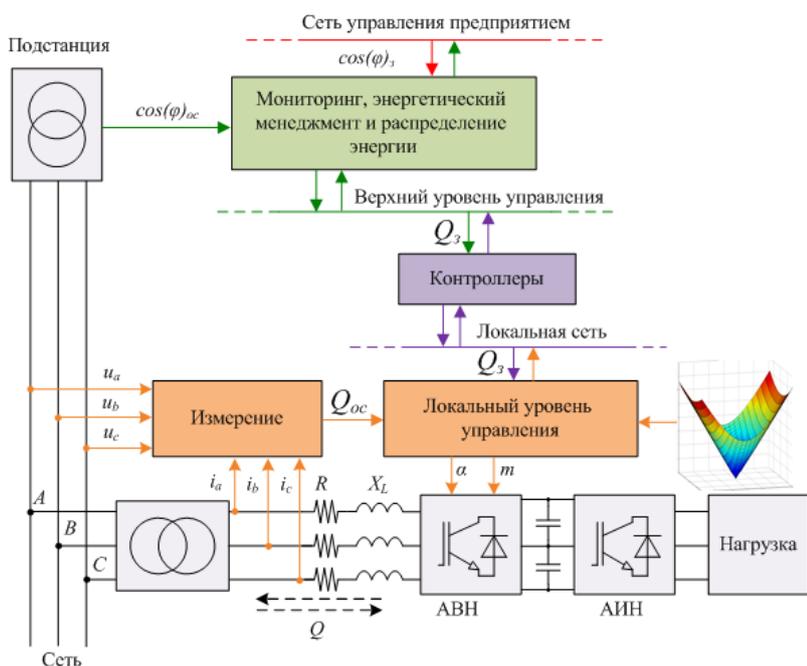


Рис. 5. Функциональная схема интеллектуальной промышленной сети

По результатам исследований был проведен теоретический анализ возможного управления активной, реактивной и полной мощности в системе АВН – питающая сеть и построены зависимости потоков мощности в этой системе. На базе этих зависимостей разработана новая СУ АВН. Определено, что с помощью новой СУ АВН при питании реверсивных автоматизированных электроприводов переменного тока можно компенсировать реактивную мощность и корректировать коэффициент мощности питающей сети. Это позволит снизить расход электроэнергии, стабилизировать напряжение и повысить пропускную способность сети. Величину потребляемой или генерируемой реактивной мощности необходимо рассчитывать в соответствии с нагрузочной диаграммой электропривода. Наиболее актуально использовать данный метод управления, когда рядом с точкой подключения электропривода к питающей сети параллельно работают установки с нелинейной нагрузкой, т.е. потребители реактивной мощности. Особенно перспективно такой способ управления использовать совместно с технологией промышленной Industrial Smart Grid.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Храмшин Т.Р., Абдулвелеев И.Р., Корнилов Г.П. Математическая модель силовой схемы мощного СТАТКО-Ма // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т. 2. № 1. С. 38-46.
2. J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J. Pontt, and S. Kouro Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 6, pp. 2930–2945, Dec. 2007.
3. J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F.Z. Peng. Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 4, pp. 724–738, Aug. 2002.
4. Маклаков А.С. Анализ работы активного выпрямителя напряжения в режимах компенсации реактивной мощности // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. № 1. С. 43-50.
5. Remus Teodorescu, Marco Liserre, Pedro Rodriguez. Grid converters for photovoltaic and wind power systems. UK: John Wiley & Sons, Ltd., p. 398. 2011.
6. Маклаков А.С., Радионов А.А. Исследование векторной ШИМ с различными таблицами переключения силовых ключей трехуровневого преобразователя / Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т.2. №1. С. 30-37.
7. A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi. A neutralpoint clamped PWM inverter. IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 1A-17, no. 5, pp. 518–523, Sept. 1981.
8. L.G. Franquelo, J. Napoles, R. Portillo, J.I. Leon, and M. Aguirre. A flexible selective harmonic mitigation technique to meet grid codes in three level PWM converters. IEEE Trans. Ind. Electron., vol.54, no.6, pp. 3022–3029, Dec. 2007.
9. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 48-52.
10. Исследование воздействия активных выпрямителей большой мощности на

питающую сеть / Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Р.Р. Храмшин, Д.С. Крубцов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. №1. С. 80-83.

11. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Методы широтно-импульсной модуляции мощных активных выпрямителей при несимметрии напряжения // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №4. С. 7-13.

12. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Математическая модель силовой схемы главных электроприводов прокатных станов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т.1. №1. С. 3-7.

13. Маклаков А.С., Радионов А.А. Влияние на сеть трёхфазного мостового двухуровневого активного выпрямителя напряжения при различных видах ШИМ // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 40-47.

14. Маклаков А.С., Гасияров В.Р., Белый А.В. Энергосберегающий электропривод на базе двухзвенного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным

инвертором напряжения // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т.1. №1. С. 23-30.

15. Leopoldo G. Franquelo, Jose Rodriguez, Jose I. Leon, Samir Kouro, Ramon Portillo and Maria A.M. Prats. The age of multilevel converters arrives. IEEE industrial electronics magazine. pp. 28–39. June 2008.

16. Моделирование электротехнических комплексов металлургических предприятий: учеб. пособие. / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, А.А. Мурзинов. Магнитогорск. 2012. 235 с.

17. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 654 с.

18. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Математическая модель активного выпрямителя в несимметричных режимах работы // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т.1. №2. С. 3-9.

19. Маклаков А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистового стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. № 3– С. 16-25.

INFORMATION IN ENGLISH

NEW REACTIVE POWER COMPENSATION METHOD BY ACTIVE RECTIFIERS FOR INDUSTRIAL SMART GRID

Belyj A.V., Maklakov A.S., Radionov A.A.

The aim of this paper is to develop a new way to control active power rectifier (APR) for Reactive Power Compensation (RPC) in a power network. The emphasis of this research was on the theoretical analysis of controllability of the active, reactive and full power in the APR system - power network. On the basis of received results, we can make a conclusion about reactive power regulation with help of APR: it is possible with the use of a new automated control system (ACS). The most important thing is to use this new ACS, when the installations with a non-linear load work in parallel near with the consumption point of current. It allows to decrease the value of input reactive power from the electrical substation and to improve the technical-and-economic indexes of the electrical power supply system in whole for a factory.

Keywords: active power rectifier; feedback-control system; power factor correction; reactive power compensation; industrial smart grid.

REFERENCES

1. Khrumshin T.R., Abdulvelev I.R., Kornilov G.P. *Matematicheskaya model' silovoy skhemy moshchnogo STATKOMa* [Mathematical Model of the Power Circuit of STATCOM]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering]. 2015. vol. 2, no. 1, pp. 18-46.

2. J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J. Pontt, and S. Kouro. Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, pp. 2930–2945, Dec. 2007.

3. J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F.Z. Peng. Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 724–738, Aug. 2002.

4. Maklakov A.S., *Analiz raboty aktivnogo vypryamatelya napryazheniya v rezhimakh kompensacii reaktivnoy moshchnosti* [Analysis of active power rectifier work in modes of reactive power compensation]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2013, no. 1, pp. 43-50.

5. Remus Teodorescu, Marco Liserre, Pedro Rodriguez. *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. UK:

John Wiley & Sons, Ltd., p. 398. 2011.

6. Maklakov A.S., Radionov A.A., *Issledovanie vektornoj SHIM s razlichnymi tablicami pereklyucheniya silovykh klyuchey trekhurovnevoogo preobrazovatelya* [Research of vector PWM with different selection tables of three level converter]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering]. 2015, vol. 2, no. 1, pp. 30-37.

7. A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi. A neutralpoint clamped PWM inverter. *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 1A-17, no. 5, pp. 518–523, Sept. 1981.

8. L.G. Franquelo, J. Napoles, R. Portillo, J.I. Leon, and M. Aguirre. A flexible selective harmonic mitigation technique to meet grid codes in three level PWM converters. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.54, no.6, pp. 3022–3029, Dec. 2007.

9. Hramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. *Otsenka metodov shirotno-impul'snoy modulyacii napryazheniya aktivnykh vypryamiteley prokatnykh stanov* [Evaluation of PWM-methods of active rectifiers voltage of rolling mills]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2013, no2., pp. 48-52.

10. Khrumshin T.R., Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khrumshin R.R., Krubtsov D.S. *Issledovaniye vozdeystviya aktivnykh vypryamiteley bolshoy moshchnosti na pitayushchuyu set* [Investigation of the influence high power active rectifiers to the power network]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University]. 2013, no. 1, pp. 80-83.

11. Khrumshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. *Metody shirotno-impul'snoy modulyacii moshchnykh aktivnykh vypryamiteley pri nesimmetrii napryazheniya* [Methods PWM of large power active rectifier under unbalanced voltage operating conditions]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2014, vol. 2, no. 4, pp. 7-13.

12. Khrumshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. *Matematicheskaya model' silovoy skhemy glavnykh elektroprivodov prokatnykh stanov* [A Mathematical Model of the Power Circuit of Main Electric Drives of Rolling Mills]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian

Internet Journal of Electrical Engineering]. 2014, Vol.1, no. 1, pp. 3-7.

13. Maklakov A.S., Radionov A.A., *Vliyanie na set' tryohfaznogo mostovogo dvuhurovnevoogo aktivnogo vypriamatelya napryazheniya pri razlichnyh vidah SHIM* [Influence of AFE rectifier with different types of PWM on supply power]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2013, no. 2, pp. 40–47.

14. Maklakov A.S., Gasiyarov V.R., Belyi A.V. *Energoberegayushchij elektroprivod na baze dvuhzvennogo preobrazovatelya chastoty s aktivnym vypriamitelem i avtonomnym invertorom napryazheniya* [Energy-saving electric drive on the basis of back to back converter]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering]. 2014, no. 1, pp. 23-30.

15. Leopoldo G. Franquelo, Jose Rodríguez, Jose I. Leon, Samir Kouro, Ramon Portillo and Maria A.M. Prats. The age of multilevel converters arrives. *IEEE industrial electronics magazine*. pp. 28–39. June 2008.

16. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khrumshin T.R., Murzikov A.A. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh*

kompleksov metallurgicheskikh predpriyatiy: ucheb. posobiye [Simulation of electrical systems of metallurgical enterprises]. Magnitogorsk, 2012, 235 p.

17. Shreyner R.T. *Matematicheskoye modelirovaniye elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC drives based on semiconductor frequency converters], Yekaterinburg: UrO RAN, 2010, 654 p.

18. Hramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. *Matematicheskaya model' aktivnogo vypriamatelya v nesimmetrichnyh rezhimakh raboty* [Mathematical model of the active rectifier under unbalanced voltage operating conditions]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering]. Vol. 1, no. 2, pp. 3-9, 2014.

19. Maklakov A.S., *Imitacionnoe modelirovaniye glavnogo elektroprivoda prokatnoj kleti tolstolistovogo stana 5000* [Simulation of the main electric drive of the 5000 plate mill rolling stand]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2014, no.3. pp. 16-25.