

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА БАЗЕ АКТИВНЫХ ДВУНАПРАВЛЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ SMART GRID СИСТЕМЫ

А.А. Радионов, А.С. Маклаков, А.Д. Чернышев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

В статье выполнены теоретические исследования применения технологии промышленной Smart Grid системы для главного электропривода прокатной клетки толстолистого стана 5000 с точки зрения генерации реактивной мощности. Типовые особенности основного силового электрооборудования главного электропривода прокатной клетки позволяют организовать управления потреблением или генерированием реактивной мощности. Генерирование или потребление реактивной мощности может быть осуществлено с помощью управления двухзвенными преобразователями частоты с активными выпрямителями напряжения. На базе экспериментальных и расчетных данных для марки стали Х70 было определено, что генерация реактивной мощности возможна в больших диапазонах во время черновых проходов. Наиболее актуально использовать данный метод управления, когда рядом с точкой их подключения параллельно работают установки с нелинейной нагрузкой. Данный метод управления перспективно использовать только совместно с технологией промышленной Smart Grid системы. Промышленная Smart Grid система должна осуществлять на верхнем уровне управления мониторинг в реальном времени величин активной и реактивной мощности и формировать на локальном уровне управления преобразователями задание на генерацию или потребление реактивной мощности. Это позволит уменьшить величину потребляемой реактивной мощности с подстанции и улучшить технико-экономические показатели системы электроснабжения.

Ключевые слова: умная сеть, электропривод, двухзвенный преобразователь частоты, компенсация реактивной мощности.

Введение

Приоритетным направлением в развитии металлургических предприятий является оптимальное использование электроэнергии промышленными объектами. Технологии энергосбережения развиваются в связи с ростом цен на электроэнергию и увеличение ее доли в себестоимости продукции. Одним из путей повышения энергоэффективности работы технологических объектов является использование интеллектуальных электронных систем, или так называемых «умных» сред [1–3]. На сегодняшний день существует большое количество «умных» сред в различных предметных областях: проекты «умных» сетей электроснабжения (smart grid), «умных» транспортных систем (intelligent transportation system), «умного» производства (smart manufacturing), «умных» домов (smart houses), «умных» городов (smart cities) и т. д. [4]. Большинство интеллектуальных технологий находятся на ранней стадии развития. Они должны будут преодолеть еще много технических и нормативных ограничений. Наиболее эффективными и развитыми сегодня из перечисленных выше «умных» сред являются технологии построения Smart Grid систем [5].

На современных металлургических предприятиях значительную часть мощных потребителей электрической энергии занимают реверсивные автоматизированные электроприводы. Такие потребители имеют возможность осуществлять двунаправленный обмен активной и реактивной мощностью с низким негативным влиянием на питаю-

щую сеть. Благодаря большим мощностям и возможности управления величинами потребляемой или генерируемой реактивной мощности, такие электроприводы имеют значительные перспективы для интеграции в Smart Grid системы. Это требует комплексного подхода для определения возможности и актуальности использования мощных электроприводов в Smart Grid.

Цель настоящей работы заключается в определении:

- возможности и целесообразности интеграции главного электропривода прокатной клетки толстолистого стана 5000 в систему Smart Grid с учетом прокатываемого сортамента и установленного оборудования;

- запаса мощности системы главного электропривода в статических и динамических режимах работы для каждого прохода металла на базе экспериментальных исследований;

- диапазона возможного генерирования или потребления реактивной мощности на основании расчетных данных потребляемой мощности системы электропривода.

Теоретические предпосылки применения главного электропривода прокатной клетки стана 5000 в составе промышленной Smart Grid системы

А. Типовые особенности и функциональные возможности Smart Grid в промышленности

Термин Smart Grid не имеет строгого определения. Его можно рассматривать как концепцию модернизации энергетических систем путем инте-

грации энергетических и информационных технологий. Технология Smart Grid включает в себя выработку, передачу и распределение электрической энергии потребителям на уровне высокого напряжения. На уровне низкого напряжения такое объединение обычно называют Microgrid.

Системы внутриводского электроснабжения являются наиболее подходящими объектами для начального формирования Smart Grid и Microgrid систем. В настоящее время большая часть современных металлургических предприятий уже имеет значительный «интеллект» в энергораспределительных системах. Практически во всех случаях потребители оборудованы измерительными датчиками, благодаря которым осуществляется непрерывный мониторинг энергопотребления в ходе технологического процесса. Эта информация передается в локальные информационные сети более высокого уровня, что позволяет осуществлять комплексный контроль энергопотребления предприятия. В такой среде намного легче понять и реализовать концепцию Smart Grid, так как некоторые из ее основных идей уже реализованы.

Для промышленной Smart Grid системы можно определить следующие функции: адаптивность (автоматическое и быстрое реагирование на изменяющиеся условия), прогнозируемость (идентификация различных изменений прежде, чем они произойдут), интегрированность (взаимодействие большого количества объектов в реальном времени), интерактивность (согласованность между потребителями и поставщиками электроэнергии), оптимальность (идеальное соотношение надежности, доступности, эффективности и экономичности) [6].

Качество электроэнергии является важным фактором для поддержания производственных затрат на низком уровне. Потребитель облагается штрафами при слишком высоком потреблении реактивной мощности и значительном гармоническом искажении питающего напряжения, так как это уменьшает пропускную способность сети и увеличивает потери. Применение технологии Smart Grid позволит обеспечить надлежащий контроль над потреблением реактивной мощности и фильтрации гармоник в распределительной сети [7].

В. Типовые особенности основного силового электрооборудования главного электропривода прокатной клетки стана 5000

Главный электропривод прокатной клетки стана 5000 представляет собой систему, в которой синхронный двигатель номинальной мощностью 12 МВт каждого рабочего вала подключается к трём параллельно соединённым двухзвенным преобразователям частоты (ДПЧ). ДПЧ состоят из трехуровневых активных выпрямителей напряжения (АВН) и трехуровневых автономных инверторов напряжения (АИН). Максимальная длительнодопустимая мощность каждого ДПЧ составляет

8,4 МВАр. Для улучшения качества выпрямленного напряжения, уменьшения гармонического состава потребляемого и инвертируемого тока применяется 18-пульсная схема выпрямления. Для реализации данной схемы используют три трансформатора с углами сдвига вторичных напряжений на +20°, 0°, -20°. На рис. 1 показана упрощённая принципиальная электрическая схема главного электропривода прокатной клетки стана 5000 для одного двигателя.

ДПЧ имеют возможность работать с отстающим, единичным или опережающим коэффициентом мощности. Данная особенность позволяет управлять двунаправленным обменом реактивной мощности между приводом и подстанцией, а также в случае необходимости как потреблять главным электроприводом прокатной клетки, так и генерировать им реактивную мощность. Кроме того, если в точке подключения ДПЧ к питающей сети будут параллельно работать установки с нелинейной нагрузкой, т. е. потребители реактивной мощности, то электропривод может скомпенсировать часть неактивной составляющей полной мощности этой нагрузки. Это позволяет уменьшать величину потребляемой реактивной мощности с подстанции и улучшать технико-экономические показатели системы электроснабжения.

С. О возможности компенсации реактивной мощности двухзвенным преобразователем частоты с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения

ДПЧ с АВН и АИН (рис. 2) представляет собой два управляемых источника напряжения, один из которых (АВН) присоединяется к сети переменного тока, а второй (АИН) непосредственно к нагрузке [8]. Оба источника напряжения имеют идентичную структуру и состоят из мостовых преобразователей на полностью управляемых полупроводниковых ключах и общего промежуточного звена постоянного тока (DC), накопление энергии в котором осуществляется в электрическом поле конденсатора C . АВН и АИН работают по принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и для улучшения гармонического состава тока и напряжения могут дополнительно комплектоваться фильтрами. АВН дополнительно комплектуется реактором L с большим показателем добротности и высоким напряжением короткого замыкания 10–15 % [9].

Пренебрегая активным сопротивлением со стороны сети и внутренними потерями в АВН и АИН, активная и реактивная мощности, потребляемые преобразователем, определяются по следующим выражениям [10, 11]:

$$P_{\text{сети}} = \frac{E_c \cdot E_{\text{АВН}}}{X_L} \cdot \sin(\alpha), \quad (1)$$

$$Q_{\text{сети}} = \frac{E_c \cdot (E_c - E_{\text{АВН}} \cdot \cos(\alpha))}{X_L}, \quad (2)$$

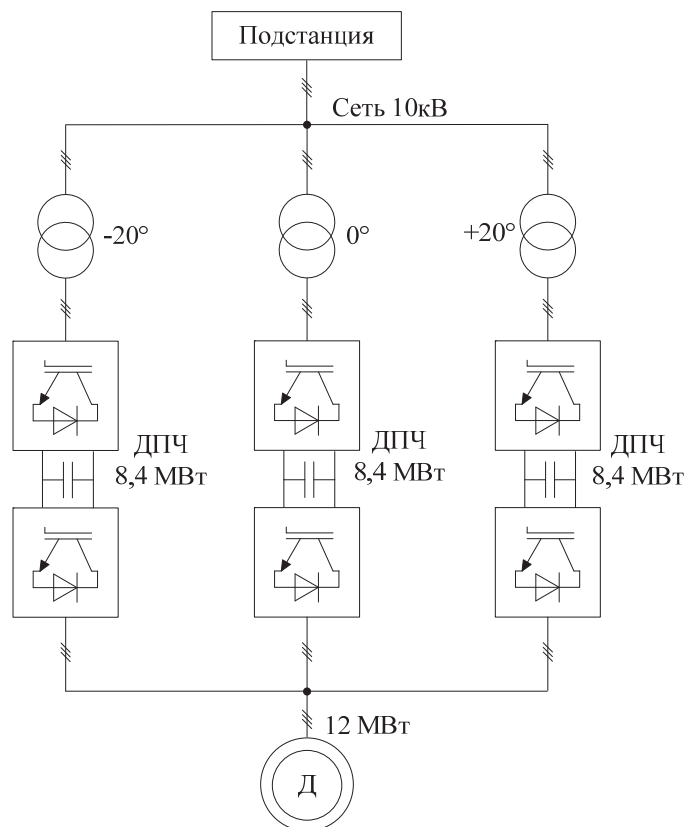


Рис. 1. Упрощенная принципиальная электрическая схема главного электропривода прокатной клетки стана 5000

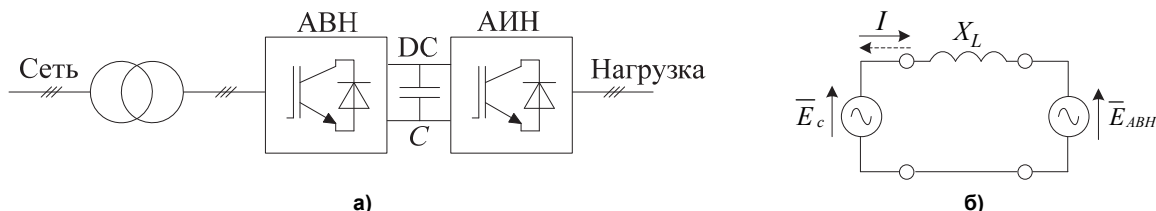


Рис. 2. Принципиальная схема ДПЧ с АВН и АИН (а) и эквивалентная электрическая схема относительно точки подключения к питающей сети (б)

где $P_{\text{сети}}$ и $Q_{\text{сети}}$ – активная и реактивная мощности, потребляемые (генерируемые) ДПЧ, X_L – эквивалентное индуктивное сопротивление на входе ДПЧ, $E_c = \text{const}$ – амплитуда фазного напряжения питающей сети, $E_{\text{АВН}}$ – амплитуда гладкой составляющей выходного фазного напряжения АВН, α – угол сдвига между E_c и $E_{\text{АВН}}$.

Анализ уравнения (1) позволяет сделать вывод, что величина активной мощности прямо пропорциональна величине выпрямленного напряжения и величине выпрямленного тока. Кроме того, активная мощность зависит от угла сдвига α , так как при малых углах $\sin(\alpha) \approx \alpha$. Из уравнения (2) видно, что реактивная мощность в основном зависит от разницы величин E_c и $E_{\text{АВН}}$, так как $\cos(\alpha) \approx 1$. Используя выражения (1) и (2), получим выражение для полной мощности ДПЧ:

$$S = \frac{E_c}{X_L} \sqrt{E_c^2 - 2 \cdot E_c \cdot E_{\text{АВН}} \cdot \cos(\alpha) + E_{\text{АВН}}^2}, \quad (3)$$

откуда следует, что полная мощность ДПЧ, есть функция двух переменных угла α и напряжения $E_{\text{АВН}}$. На рис. 3 представлена зависимость полной мощности $S = f(\alpha, E_{\text{АВН}})$. На рис. 3 видно, что различные значения угла сдвига α и выходного напряжения АВН $E_{\text{АВН}}$ образуют поверхность в форме конуса. Выходное напряжение АВН имеет следующую зависимость [12]:

$$E_{\text{АВН}} = k_{\text{ШИМ}} \cdot m \cdot U_{dc}, \quad (4)$$

где $k_{\text{ШИМ}}$ – коэффициент, зависящий от типа широтно-импульсной модуляции (ШИМ), m – коэффициент модуляции АВН. В большинство современных активных преобразователей средней мощности используется векторная ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник.

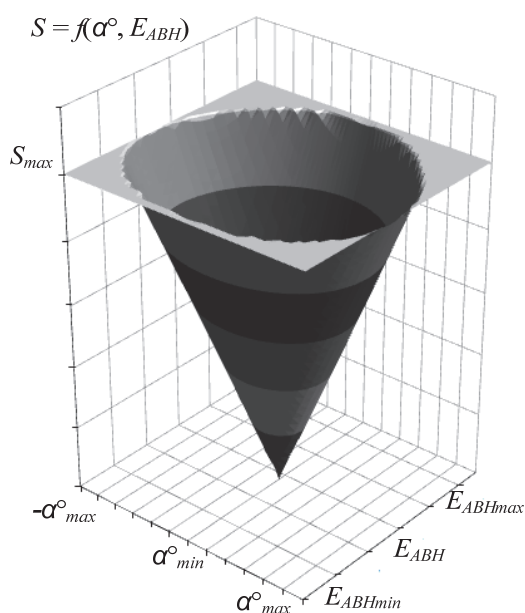


Рис. 3. Зависимость полной мощности от угла α и напряжения E_{ABH}

Используя уравнения (3) и (4), можно построить систему управления АВН таким образом, чтобы при определённых значениях α и E_{ABH} сохранялось постоянство максимальной потребляемой полной мощности преобразователя, другими словами, обеспечивалось максимальное использование преобразователя по потребляемому фазному току.

Следует отметить, что диапазон изменения угла α между вектором E_{ABH} и E_c в реальных АВН находится в небольшом диапазоне (от 1 до 15°). Данное обстоятельство требует от системы управления (СУ) АВН высокой точности и быстродействия при обеспечении устойчивой работы в этих режимах [13].

Определение диапазонов генерации и потребления реактивной мощности на основе экспериментальных и расчетных данных

Суммарная допустимая полная максимальная мощность S_{max} , которую могут потребить три преобразователя частоты главного электропривода клетки стана 5000, примерно равна 30 МВА. Кроме того, эти преобразователи могут работать с коэффициентом мощности то $-0,8$ до $0,8$ при номинальной мощности 6,2 МВт, т. е. генерировать или потреблять примерно 5 МВАР каждый.

На рис. 4 и 5 показаны условия работы главного электропривода для черновой и чистовой стадии прокатки, где w_d – скорость приводного двигателя, M_d – момент приводного двигателя, $S_{эл}$ – потребляемая мощность из питающей сети с учетом потерь и единичном коэффициенте мощности. Кривые переходных процессов получены с частотой квантования 500 Гц.

На рис. 4 видно, что во время черновых проходов у системы электропривода привода есть существенный запас по мощности от 10МВА и выше. Во время чистовых проходов, показанных

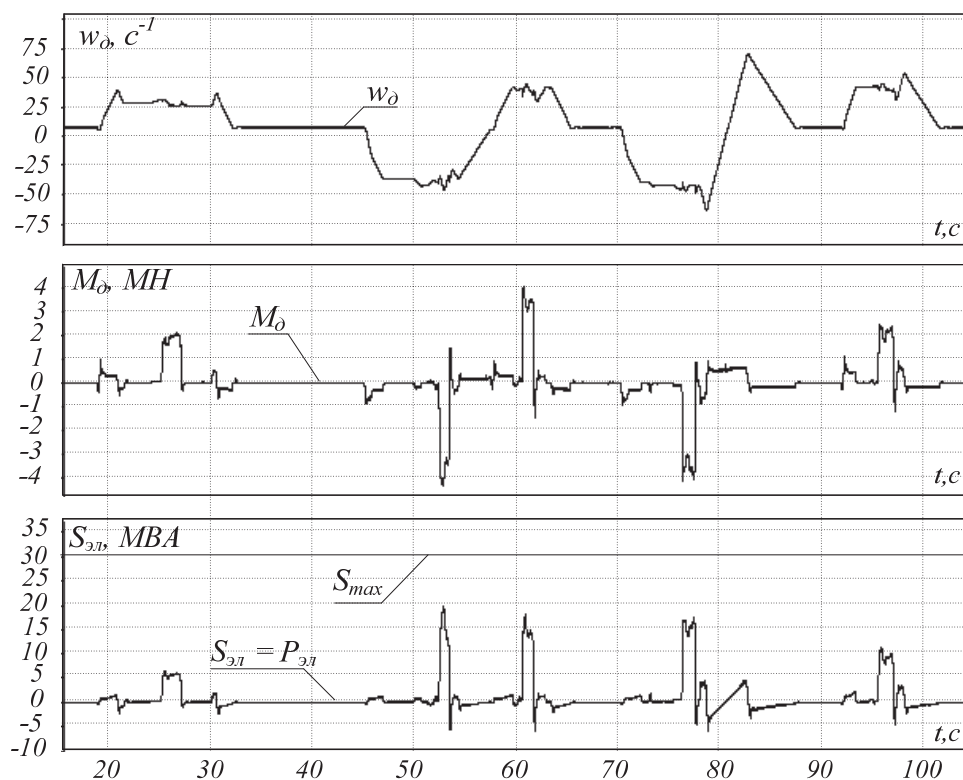


Рис. 4. Черновые проходы для марки стали X70

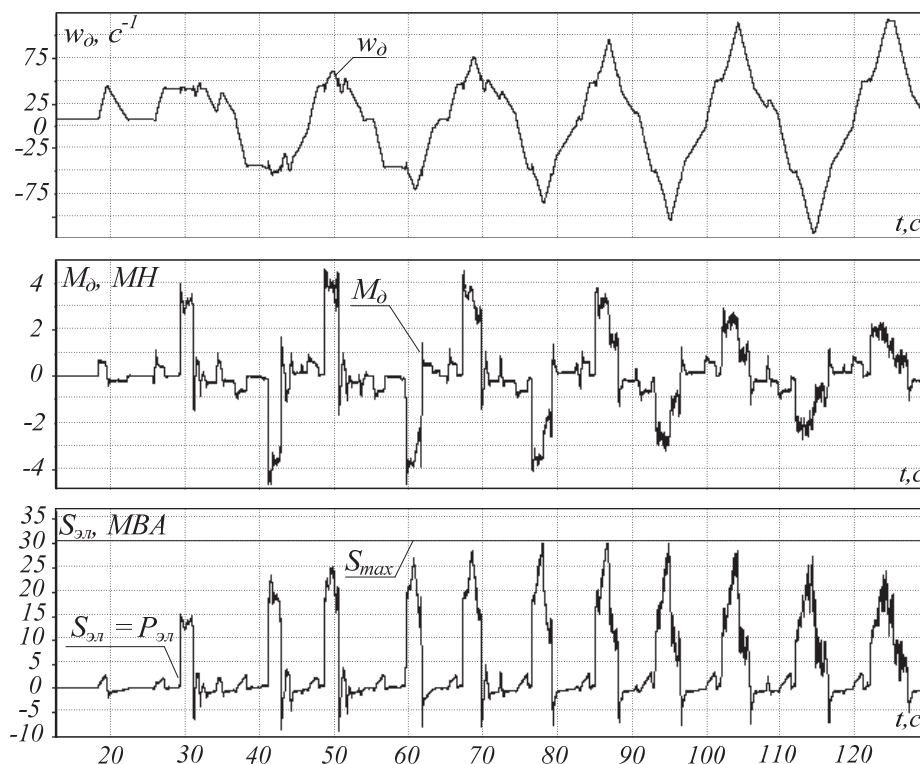


Рис. 5. Чистовые проходы для марки стали X70

на рис. 5, электропривод загружается практически на полную максимальную мощность и не имеет возможность генерировать или потреблять дополнительную реактивную мощность в больших пределах.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что во время черновых проходов можно использовать главные электропривода в качестве статических компенсаторов реактивной мощности с постоянной генерацией или потреблением до 5 МВАР каждый.

Проверка результатов с применением математической модели

Исследование условий работы главного электропривода во время черновых проходов и одновременной генерации реактивной мощности проводилось методом математического моделирования на имитационной модели, разработанной в программе Matlab/Simulink. Модель выполнена на базе упрощенной принципиальной схемы (см. рис. 1), более подробное математическое описание и реализация которой приведены в [14]. Результа-

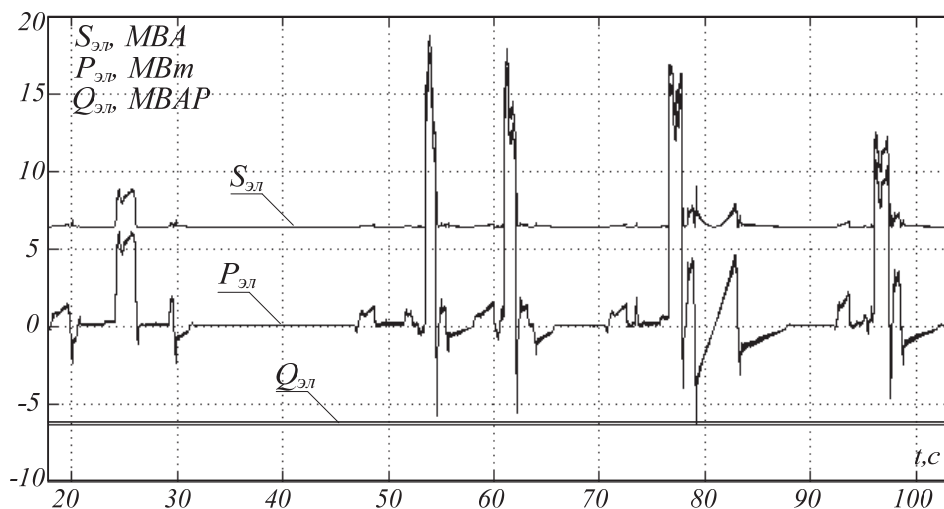


Рис. 6. Энергопотребление главного электропривода при черновых проходах для марки стали X70 при генерации реактивной мощности 6,4 МВАР

ты моделирования при генерации реактивной мощности главным электроприводом представлены на рис. 6, где $P_{эл}$ – потребляемая активная мощность из питающей сети, где $Q_{эл}$ – генерируемая реактивная мощность.

На рис. 6 видно, что при генерации реактивной мощности, полная реактивная мощность не выходит за пределы максимально допустимого значения.

Заключение

На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований для главного электропривода толстолистого стана 5000 было определено, что электропривод, построенный на базе ДПЧ с АВН и АИН, возможно использовать в качестве статического компенсатора реактивной мощности в сети с целью энергосбережения. Величину потребляемой или генерируемой реактивной мощности электроприводом необходимо рассчитывать в соответствии с нагрузочной диаграммой привода и возможностями преобразователей, иначе в тяжелых режимах работы возможна ситуация выхода за допустимые пределы энергопотребления.

Наиболее актуально использовать рассмотренный метод управления в тех случаях, когда рядом с точкой подключения электропривода к питающей сети параллельно с ним работают установки с нелинейной нагрузкой. Данный метод управления перспективно использовать только совместно с технологией промышленной Smart Grid системы, которая должна осуществлять на верхнем уровне управления мониторинг в реальном времени величин активной и реактивной мощности и формировать на локальном уровне управления преобразователями задание на генерацию или потребление реактивной мощности. Это позволит уменьшить величину потребляемой реактивной мощности с подстанции и улучшить технико-экономические показатели системы электроснабжения в целом для предприятия.

Литература

1. Радионон, А.А. О возможности компенсации реактивной мощности в сети посредством электропривода на базе AC-DC-AC преобразователя / А.А. Радионон, А.С. Маклаков // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. – 2014. – № 2. – С. 78–83.
2. Farhangi, H. The path of the smart grid / H. Farhangi // IEEE Power and Energy Magazine. – 2010. – Vol. 8, no. 1. – P. 18–28. DOI: 10.1109/MPRE.2009.934876
3. Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутривзаводского электроснабже-

ния / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.С. Ивекеев и др. // Машиностроение: сетевой электрон. науч. журнал. – 2014. – № 1. – С. 59–69.

4. Amin, S.M. Toward a smart grid / S.M. Amin, B.F. Wollenberg // IEEE Power and Energy Magazine. – 2005. – Vol. 3, no. 5. – P. 34–41. DOI: 10.1109/MPAE.2005.1507024

5. Маклаков, А.С. Анализ работы активного выпрямителя напряжения в режимах компенсации реактивной мощности / А.С. Маклаков // Машиностроение: сетевой электрон. науч. журнал. – 2013. – № 1. – С. 43–50.

6. Cook, D. Smart Environments. Technologies, protocols and applications / D. Cook, S. Das. – Hoboken NJ: Wiley-Interscience, 2005. – 329 p.

7. Smart grid – the new and improved power grid / X. Fang, S. Misra, G. Xue, D. Yang // IEEE Communications Surveys and Tutorials. – 2012. – Vol. 14, no. 4. – P. 944–980. DOI: 10.1109/SURV.2011.101911.00087

8. Маклаков, А.С. Влияние на сеть трёхфазного мостового двухуровневого активного выпрямителя напряжения при различных видах ШИМ / А.С. Маклаков, А.А. Радионон // Машиностроение: сетевой электрон. науч. журнал. – 2013. – № 2. – С. 40–47.

9. Храмин, Т.Р. Математическая модель силовой схемы главных электроприводов прокатных станов / Т.Р. Храмин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // Электротехника: сетевой электрон. науч. журнал. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 3–7.

10. Teodorescu R., Liserre M., Rodriguez P. Grid converters for photovoltaic and wind power systems / R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodriguez. – UK: John Wiley & Sons Ltd., 2011. – 398 p. DOI: 10.1002/9780470667057

11. Power conversion and control of wind energy systems / Bin Wu, Yongqiang Lang, Navid Zargari, Samir Kouro. – Canada: John Wiley & Sons INC, 2011. – 445 p. DOI: 10.1002/9781118029008

12. Маклаков, А.С. Энергосберегающий электропривод на базе двухзвенного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения / А.С. Маклаков, В.Р. Гасияров, А.В. Белый // Электротехника: сетевой электрон. науч. журнал. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 23–30.

13. Храмин, Т.Р. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов / Т.Р. Храмин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // Машиностроение: сетевой электрон. науч. журнал. – 2013. – № 2. – С. 48–52.

14. Маклаков, А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистого стана 5000 / А.С. Маклаков // Машиностроение: сетевой электрон. науч. журнал. – 2014. – № 3. – С. 16–25.

Раднонов Андрей Александрович, д-р техн. наук, профессор, проректор по учебной работе, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; RadionovAA@rambler.ru.

Маклаков Александр Сергеевич, аспирант кафедры мехатроники, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; maklakov.work@gmail.com.

Чернышев Алексей Дмитриевич, аспирант кафедры мехатроники, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; fis6en@gmail.com.

Поступила в редакцию 27 января 2015 г.

DOI: 10.14529/power150109

POWERFUL ELECTRIC DRIVES BASED ON ACTIVE BIDIRECTIONAL CONVERTERS WITHIN INDUSTRIAL SMART GRID

A.A. Radionov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, RadionovAA@rambler.ru,

A.S. Maklakov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, maklakov.work@gmail.com,

A.D. Chernyshev, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, fis6en@gmail.com

The paper addresses the issue of associating a concept of Smart Grid with a powerful main electric drive of plate mill rolling stand. This paper will review all theoretical capabilities of reactive power compensation in the supply mains by the main electric drive and present the resulting benefits to be gained in our understanding of the Smart Grid. Typical features of power electric equipment of the main electric drive allow us development of the control of the reactive power consumption or generation. The reactive power consumption or generation can be carried out by using of back to back converters which connect the electric drive with supply mains. Experiments in the plate mill were performed at the difficult-to-form steel grade in the range of roughing and finish rolling. It was found out that the reactive power generation can be used in the range of the roughing. The huge prospects of main electric drive integration of the plate mill rolling stand to the Smart Grid have been determined as they are able to provide high power and capabilities of the controlling reactive power flow by means of back to back converters. It can reduce a share of the consumption reactive power from a substation and to improve the power quality

Keywords: smart grid, electric drive, plate mill rolling, back-to-back converter, reactive power compensation.

References

1. Radionov A.A., Maklakov A.S. [Possibility of Reactive Power Compensation in Power Supply by Using Electric Drive on Base AC-DC-AC Converter]. *Russian Electromechanics*, 2014, no 2, pp. 78–83. (in Russ.)
2. Farhangi H. The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2010, vol. 8, no. 1, pp. 18–28. DOI: 10.1109/MPE.2009.934876
3. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A., Kotyishev V.E., [Tukhvatullin M.M. Using of the Static Var Compensator of the Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Supporting of Electrical Power System's Stability and Increasing Reliability of Factory Power Supply]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2014, no. 1, pp. 59–69. (in Russ.)
4. Amin S.M., Wollenberg B.F. Toward a Smart Grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2005, vol. 3, no. 5, pp. 34–41. DOI: 10.1109/MPE.2005.1507024
5. Maklakov A.S. [Analysis of PWM Boost Rectifier in Modes of Reactive Power Compensation]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2013, no. 1, pp. 43–50. (in Russ.)
6. Cook D., Das S. Smart Environments. Technologies, Protocols and Applications. Hoboken NJ, Wiley-Interscience, 2005. 329 p.
7. Fang X., Misra S., Xue G., Yang D. Smart Grid – the New and Improved Power Grid. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2012, vol. 14, no. 4, pp. 944–980. DOI: 10.1109/SURV.2011.101911.00087
8. Maklakov A.S., Radionov A.A. [Influence of AFE Rectifier with Different Types of PWM on Supply Power]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2013, no. 2, pp. 40–47. (in Russ.)

9. Khramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. [A Mathematical Model of the Power Circuit of Main Electric Drives of Rolling Mills]. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 3–7. (in Russ.)

10. Remus Teodorescu, Marco Liserre, Pedro Rodriguez. *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. UK, John Wiley & Sons Ltd., 2011. 398 p. DOI: 10.1002/9780470667057

11. BinWu, Yongqiang Lang, Navid Zargari, Samir Kouro. *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. Canada, John Wiley & Sons INC, 2011. 445 p. DOI: 10.1002/9781118029008

12. Maklakov A.S., Gasiyarov V.R., Belyi A.V. [Energy-Saving Electric Drive on the Basis of Back to Back Converter]. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 23-30. (in Russ.)

13. Hramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. [Evaluation of Methods PWM Voltage Active Rectifiers Rolling Mills]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2013, no. 2, pp. 48–52. (in Russ.)

14. Maklakov A.S. [Simulation of the Main Electric Drive of the Plate Mill Rolling Stand]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2014, no. 3, pp. 16–25. (in Russ.)

Received 27 January 2015

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Радионо́в, А.А. Использование мощных электроприводов на базе активных двунаправленных преобразователей в составе промышленной Smart Grid системы / А.А. Радионо́в, А.С. Маклако́в, А.Д. Черныше́в // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 74–81. DOI: 10.14529/power150109

REFERENCE TO ARTICLE

Radionov A.A., Maklakov A.S., Chernyshev A.D. Powerful Electric Drives Based on Active Bidirectional Converters within Industrial Smart Grid. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 74–81. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150109