

Научная статья
УДК 621.31
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.2.006

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТЯХ, ПИТАЮЩИХ ДУГОВЫЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫЕ ПЕЧИ

**Елизавета Игоревна Губская¹, Виталий Валентинович Колобов²,
Алексей Сергеевич Карпов³, Вера Васильевна Ярошевич⁴**

^{1–4}Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия

¹e.gubskaya@ksc.ru

²v.kolobov@ksc.ru

³a.karpov@ksc.ru

⁴v.yaroshevich@ksc.ru

Аннотация

Дуговые сталеплавильные печи являются мощным источником возмущений, ухудшающих качество электроэнергии в питающих сетях. Нагрузка электропечи носит нелинейный резкопеременный характер, что приводит к значительным колебаниям напряжения и, следовательно, к возникновению фликера. Для того чтобы стабилизировать напряжение сети, эффективной и достаточной мерой является компенсация реактивной мощности. В статье представлен краткий обзор и анализ эффективности наиболее широко применяемых компенсирующих устройств. Приведена модель в среде ATP/EMTP, имитирующая работу устройства компенсации реактивной мощности ДСП на участке действующей электросети одного из предприятий тяжелой промышленности.

Ключевые слова:

дуговая сталеплавильная печь, электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, фликер, компенсация реактивной мощности, ATP/EMTP

Благодарности:

работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-20051 «Разработка технических решений для эффективного электроснабжения потребителей Арктической зоны РФ»).

Original article

REACTIVE POWER COMPENSATION IN POWER SYSTEMS SUPPLYING ELECTRIC ARC FURNACES

Elizaveta I. Gubskaya¹, Vitalii V. Kolobov², Aleksei S. Karpov³, Vera V. Yaroshevich⁴

^{1–4}Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia

¹e.gubskaya@ksc.ru

²v.kolobov@ksc.ru

³a.karpov@ksc.ru

⁴v.yaroshevich@ksc.ru

Abstract

Electric arc furnaces are powerful source of disturbances that deteriorates power quality in power systems. The electric furnace load is of nonlinear and drastically variable character, which leads to significant voltage fluctuations and, consequently, flicker. To stabilize AC voltage, reactive power compensation is an effective and sufficient measure. The article presents a brief review of the most widely used compensating devices and analyses efficiency of these. An ATP/EMTP model simulating the operation of EAF reactive power compensation device in real power system of one facility of heavy industry is presented.

Keywords:

electric arc furnace, electromagnetic compatibility, power quality, flicker, reactive power compensation, ATP/EMTP

Acknowledgments:

This work was supported by the Russian Science Foundation (project № 24-29-20051 “Development of technical solutions for efficient power supply to consumers of the Arctic zone of the Russian Federation”).

Введение

Дуговые электрические печи используются для плавления металлов за счет тепловой энергии электрической дуги. Благодаря ряду технических и экономических преимуществ относительно других агрегатов электропечи нашли широкое применение в производстве сталей. Однако, ввиду нелинейного и резкопеременного характера нагрузки, дуговые сталеплавильные печи (ДСП) являются мощным источником искажений качества электроэнергии и тем самым оказывают негативное воздействие на других потребителей, подключенных к той же системе электроснабжения.

В технической литературе [1–7] одной из основных причин несоответствия качества электроэнергии в сетях, питающих ДСП, установленным нормам указан фликер. Согласно действующему в РФ стандарту [8] фликер определяется как ощущение неустойчивости зрительного восприятия, вызванное световым источником, яркость или спектральный состав которого изменяются во времени. Возникновение этого возмущения обусловлено колебаниями напряжения сети (как правило, продолжительностью менее 1 мин), в том числе одиночными быстрыми его изменениями. К воздействию фликера наиболее чувствительны осветительные приборы, электрические вращающиеся машины, устройства на основе силовой электроники, а также электротермические и другие установки. Более того, высокий уровень фликера влияет отрицательным образом не только на другое электрооборудование, но и непосредственно на работу ДСП. Это связано с тем, что эффективность технологического процесса плавки, вследствие нелинейности вольт-амперной характеристики электрической дуги, напрямую зависит от поддержания стабильного напряжения электросети.

Для сглаживания колебаний напряжения и фликера, а следовательно, для стабилизации напряжения сети, как правило, применяют устройства компенсации реактивной мощности.

В данной статье основное внимание уделяется обзору наиболее широко распространенных компенсирующих устройств. Также в работе приведена модель в среде АТР/ЕМТР, имитирующая работу компенсатора реактивной мощности ДСП на участке действующей электросети одного из предприятий тяжелой промышленности, на основе которой в дальнейшем планируется разработка алгоритма управления «умным» компенсирующим устройством.

Способы компенсации реактивной мощности ДСП

В настоящее время на практике наиболее часто встречается использование следующих устройств компенсации реактивной мощности.

Установка *блока статических конденсаторов*, собранных по схеме «треугольник» или «звезда», является наименее эффективным способом снижения дозы фликера, поскольку данное устройство значительно повышает напряжение сети в моменты погасания электрической дуги и даже может увеличивать его до значений, превышающих допустимые пределы. Кроме того, в некоторых случаях наличие блока конденсаторов в сети может привести к возникновению резонанса на определенных частотах и, как следствие, к возрастанию колебаний напряжения [9].

Статический тиристорный компенсатор (static VAR compensator, сокр. SVC) включает основные элементы двух типов: тиристорно-реакторные группы (ТРК) и тиристорно-конденсаторные группы (ТКГ), а также фильтро-компенсирующие цепи (ФКЦ), которые предназначены в основном для подавления гармоник низкого порядка, генерируемых самим компенсатором [10]. Исполнение схемы SVC встречается в двух видах, как показано на рис. 1.

Тиристорный компенсатор позволяет поддерживать высокий коэффициент мощности, независимо от колебаний реактивной мощности, вызванных работой ДСП, а также подавлять высшие гармоники, генерируемые в сеть печью. Использование данной установки является наименее дорогостоящим из возможно допустимых способов компенсации. Однако необходимо отметить, что SVC позволяет снизить кратковременную дозу фликера максимум в 2–2,5 раза [11]. Достижение более высоких показателей ограничено временными задержками, которые составляют до 100 мс [12] (в зависимости от производителя), и динамическим взаимодействием ФКЦ в составе SVC с электрической сетью.

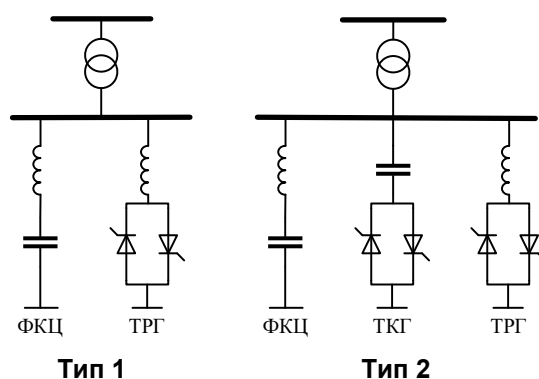


Рис. 1. Схема статического тиристорного компенсатора
Fig. 1. SVC schematic diagram

Статический генератор (static VAR generator, сокр. SVG) реактивной мощности, или *статический синхронный компенсатор* (static synchronous compensator, сокр. STATCOM), конструктивно состоит из тонкопленочных конденсаторов постоянного тока, управляемого инвертора напряжения на базе IGBT транзисторов и реактора или трансформатора, через который устройство подключается к сети, как показано на рис. 2.

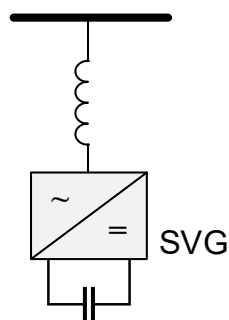


Рис. 2. Схема статического генератора реактивной мощности
Fig. 2. SVG schematic diagram

SVG формирует выходное напряжение по принципу многоуровневой широтно-импульсной модуляции (ШИМ): фазное напряжение генератора образовано суммарным выходным напряжением всех силовых ячеек. От SVC статический генератор реактивной мощности отличается, во-первых, меньшим на порядок временем отклика на изменения контролируемого параметра, которое составляет не более 5 мс [13]; во-вторых, возможностью снизить кратковременную дозу фликера минимум в 4 раза [14]. Дополнительным достоинством SVG является компактность конструкции за счет отсутствия высокомоощных конденсаторов.

Сравнительный анализ применения технологий SVC и SVG для компенсации реактивной мощности дуговых электропечей приведен в исследованиях [14–18]. Авторы выражают единое мнение, что SVG наиболее эффективно решает проблему колебаний питающего напряжения и фликера. Это обосновано следующими выводами.

1. За счет существенно сокращенных временных задержек SVG значительно лучше снижает уровень фликера относительно SVC той же мощности. При этом эффект сглаживания возмущения может быть усилен путем увеличения мощности устройства, что невозможно в случае с тиристорным компенсатором.

2. При низком напряжении сети SVG также обеспечивает сглаживание фликера лучше, чем SVC, так как с уменьшением напряжения реактивная мощность, генерируемая SVG, сокращается линейно, в то время как реактивная мощность на выходе SVC, пропорциональная квадрату величины напряжения, стремительно падает, что нарушает стабильность напряжения электросети.

3. Другими преимуществами статического генератора являются более плавное регулирование реактивной мощности и значительно меньшая генерация высших гармоник в сеть.

Недостатком SVG по отношению к SVC следует указать более высокую стоимость устройства.

Компенсация реактивной мощности на участке действующей сети 10 кВ

В 2023 г. сотрудниками ЦЭС КНЦ РАН посредством сертифицированных анализаторов Metrel типа MI 2893 (класс А по ГОСТ [19]) была произведена регистрация показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в сети 10 кВ предприятия тяжелой промышленности, на площадке которого функционируют несколько маломощных ДСП.

Упрощенная схема электропитания одной из установок представлена на рис. 3. ДСП подключается к сети посредством электропечного понижающего трансформатора ЭПТ со ступенчатым регулированием низшего напряжения, типовая мощность которого составляет 12500 кВА. Подключение трансформатора к сборным шинам распределительного устройства осуществляется через разъединитель РД и автоматический вакуумный выключатель ВВ с трансформаторами тока ТТ.

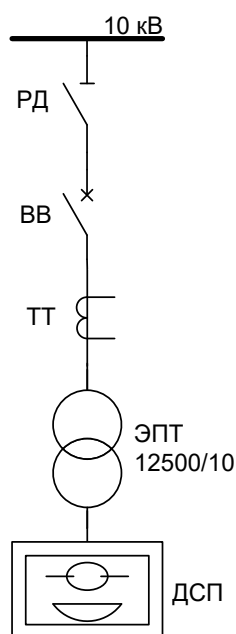


Рис. 3. Упрощенная схема электроснабжения ДСП
Fig. 3. Simplified diagram of the EAF power supply

В результате проведенных измерений получены графики мощности (активной $P_{\text{сум}}$, МВт; реактивной $N_{\text{сум}}$, Мвар и полной $S_{\text{сум}}$, МВА), потребляемой ДСП, которые приведены на рис. 4. Символьные обозначения мощностей соответствуют стандарту [20].

Как можно видеть, нагрузка электропечи изменяется скачкообразно в широком диапазоне. При этом на секции шин РУ 10 кВ, обеспечивающей электроснабжение ДСП, зафиксировано превышение кратковременной и длительной доз фликера установленных норм примерно в 7 и 3 раза соответственно.

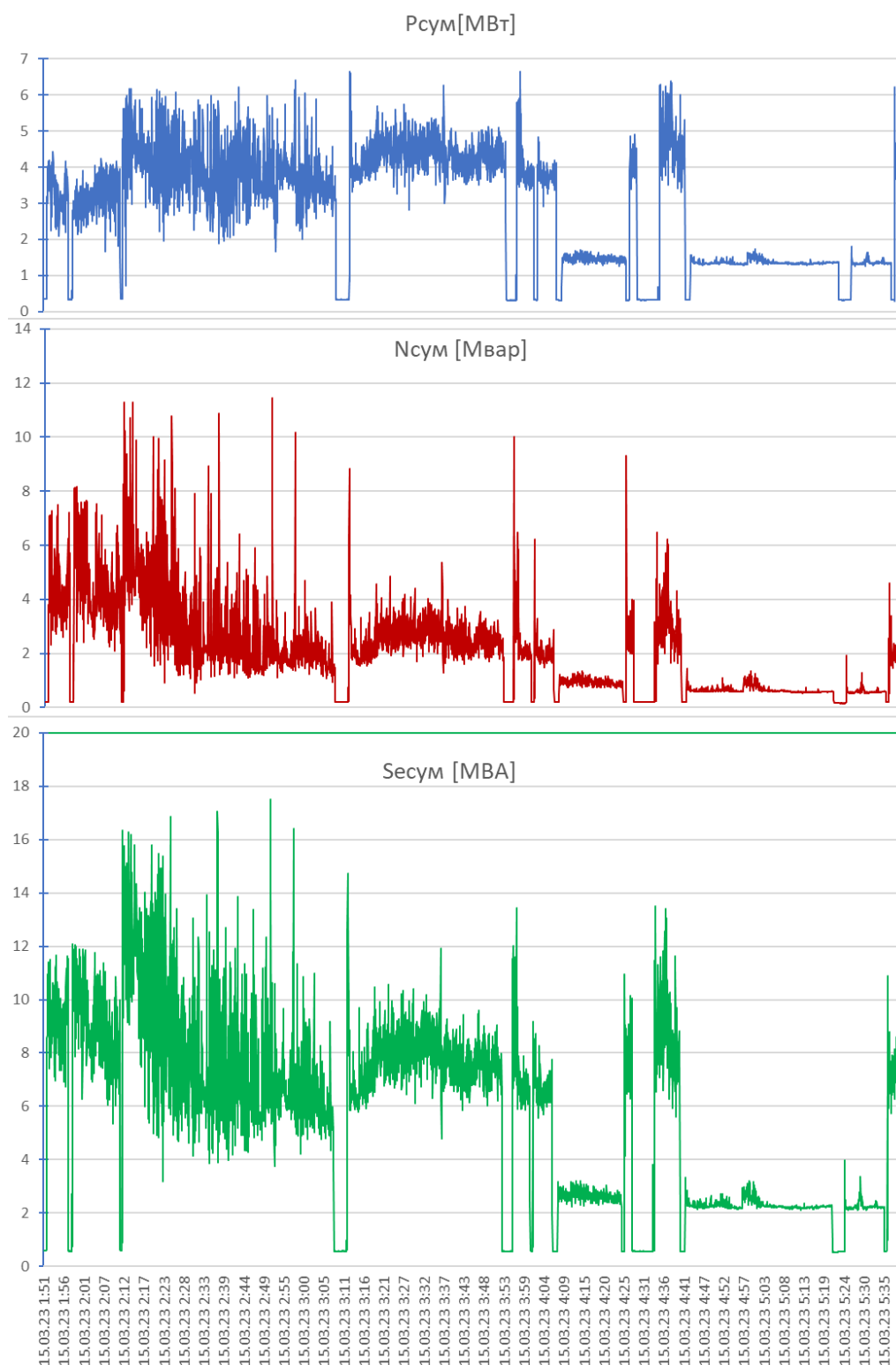


Рис. 4. Графики мощности, потребляемой ДСП
Рис. 4. Plot of the EAF power consumption

В качестве возможного решения данной проблемы предлагается подключение параллельно с потребителем (ДСП) компенсирующего устройства, работа которого, по сути, аналогична работе синхронного двигателя без нагрузки на валу [21; 22]. Принцип действия данной установки поясняют векторные диаграммы, которые приведены на рис. 5. Компенсация реактивной мощности не производится, если ЭДС компенсатора $\dot{E}_K$ численно равна напряжению сети $\dot{U}_c$ (рис. 5, 1). Когда ЭДС устройства достигает значения $\dot{E}'_K$, превышающего $\dot{U}_c$ на величину падения напряжения $\Delta\dot{E}$ (рис. 5, 2), под действием $\Delta\dot{E}$ в сети возникает реактивный ток $\dot{I}'_p$, который опережает напряжение сети на 90° (емкостной ток). Синхронный компенсатор в этом случае выдает реактивную мощность в сеть. Если же $\dot{E}''_K < \dot{U}_c$ (рис. 5, 3), генерируется ток $\dot{I}''_p$, отстающий от напряжения сети на 90° (индуктивный ток), компенсатор при этом потребляет реактивную мощность.

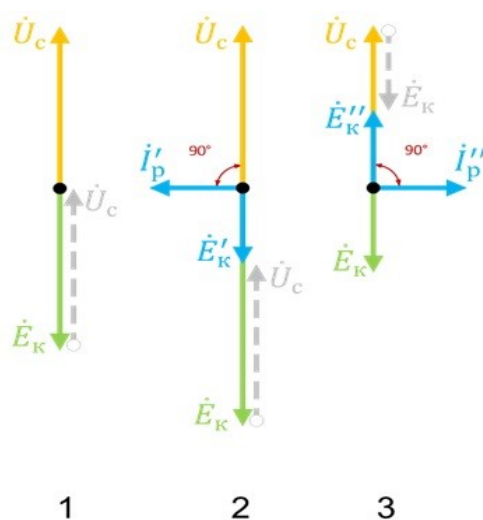


Рис. 5. Векторные диаграммы синхронного компенсатора:
1 — компенсация отсутствует; 2 — емкостный режим; 3 — индуктивный режим
Fig. 5. Vector diagrams of a synchronous compensator:
1 — standby mode; 2 — capacitive mode; 3 — inductive mode

Приведенный принцип компенсации реактивной мощности ДСП демонстрирует модель, выполненная в среде АТР/ЕМТР, как показано на рис. 6.

Использованные для создания модели элементы, а также их назначение сведены в таблице.

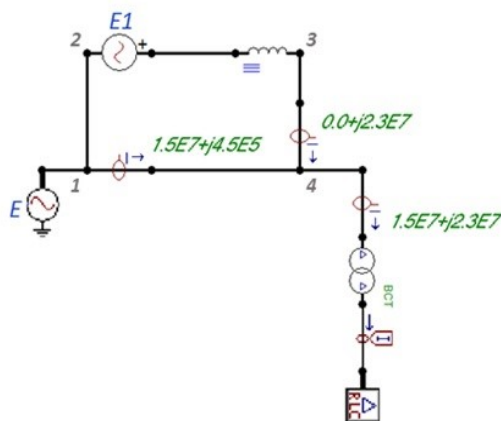
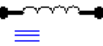
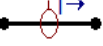


Рис. 6. Общий вид модели рассматриваемого участка сети 10 кВ в АТР/ЕМТР
Fig. 6. ATP/EMTP model of the 10 kV network under study

Описание элементов модели
The model components description

Элемент	Описание
	Трехфазный источник переменного напряжения
	
	Элемент для моделирования трехфазной цепи, состоящий из трех параллельных индуктивных катушек
	Элемент, измеряющий ток, А
	Модель двухобмоточного трансформатора. Задаются паспортные данные электропечного трансформатора
	Элемент для моделирования трехфазной цепи, состоящий из трех RLC цепей, соединенных по схеме «треугольник». Имитирует нагрузку ДСП

Данная модель отражает конфигурацию исследуемого участка сети, заданные параметры включают реальные паспортные данные электропечного трансформатора.

Модель имитирует работу исследуемого участка электросети в режиме, когда нагрузка печи максимальна (режим горения электрических дуг). При этом на участке 1234, включающем источник ЭДС EI и индуктивный элемент, формируется чисто реактивный ток, который накладывается на реактивную составляющую тока в сети. Таким образом, компенсатор обеспечивает сглаживание резких колебаний реактивной мощности в сети.

Представленная модель ляжет в основу разработки «умного» компенсирующего устройства, сочетающего как аппаратную, так и программную части, оптимизированные для наиболее эффективной работы в сети, обеспечивающей электропитание ДСП на данном предприятии.

Применение такого устройства позволит поддерживать баланс реактивной мощности в системе электроснабжения и, следовательно, снизить колебания питающего напряжения и уровень фликера.

Заключение

Вследствие специфического характера нагрузки дуговые сталеплавильные печи вызывают мощные возмущения, искажающие качество электроэнергии в сетях промышленных предприятий. Быстрые и резкие изменения потребляемой ДСП мощности приводят к значительным колебаниям напряжения и возникновению фликера. Для сглаживания этих явлений устанавливают устройства компенсации реактивной мощности, такие как SVC и SVG.

Применение SVC долгое время являлось общепринятым способом компенсации, несмотря на отсутствие во многих случаях возможности удовлетворить в полной мере требования к качеству электроэнергии за счет ряда ограничений, обусловленных особенностью конструкции (наличие тиристорных вентилей, LC-фильтров). Эти технические ограничения были преодолены с развитием IGBT транзисторов, которые легли в основу технологии SVG.

Статический генератор реактивной мощности выгодно отличается от других компенсаторов, в первую очередь, быстродействием, которое является критически важным параметром, так как возмущения, вызванные работой ДСП, носят крайне быстрый и случайный характер. Благодаря этому и другим преимуществам SVG считается значительно более эффективным, хотя и дорогостоящим, компенсирующим устройством.

Установку с таким же принципом действия предлагается использовать на участке действующей сети 10 кВ промышленного предприятия, для которого ЦЭС КНЦ РАН выполнял в 2023 г. ряд договорных работ. Достичь наиболее полного соответствия качества электроэнергии в данной

электросети теоретически возможно с помощью «умного» компенсирующего устройства, которое способно обеспечивать практически мгновенное изменение вырабатываемой реактивной мощности. Для этого необходимо минимизировать временные задержки между обработкой входного сигнала и генерированием выходного, в связи с чем требуется определение оптимальной конфигурации схемы устройства, а также разработка алгоритма для блока управления, что является направлением дальнейшего исследования.

Радикальные пути решения данной проблемы включают замену силового трансформатора на более мощный, а также реорганизацию действующей схемы электроснабжения в целом. Однако существенный недостаток перечисленных мер — высокие финансовые затраты промышленных предприятий.

Список источников

1. Ершов А. М. Системы электроснабжения. Часть 2: Электрические нагрузки. Компенсация реактивной мощности: курс лекций. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. 230 с.
2. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электрической энергии и их контроль на промышленных предприятиях. 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
3. Andrei H., Cepisca C., Grigorescu S. Power quality and electrical arc furnaces / ed. Eberhard A. Rijeka: InTech, 2011. 362 с.
4. Bhonsle D. C., Kelkar R. B. Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling // Energy. 2016. Vol. 115. P. 830–839.
5. Sajeesh D., Seema J. Research on power quality issues in electric arc furnace and its mitigation techniques // Int. J. Eng. Res. Technol. 2014. Vol. 3, No 1. P. 1121–1124.
6. Электромагнитная совместимость потребителей: монография / И. В. Жежеленко [и др.]. М.: Машиностроение, 2012. 351 с.
7. Reactive compensation for AC electric arc furnace considering power quality constraints / X. Zhu [et al.] // Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP. Belo Horizonte, 2016. P. 919–924.
8. Межгосударственный стандарт ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
9. Deaconu S. I., Nicolae P. G., Latinovic T. Comparative study for EAF's reactive energy compensation methods and power factor improvement // WSEAS Trans. Syst. 2010. Vol. 9, No 9. P. 979–988.
10. Eremia M., Liu Ch., Edris A. Static Var Compensator (SVC) // Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence. Hoboken, New Jersey: Wiley & IEEE Press, 2016. Ch. 5. P. 271–338.
11. Static Var Compensator The key to better arc furnace economy // ABB Group. Leading digital technologies for industry. URL: https://library.e.abb.com/public/6c4608703c0e7760832577bb004fae9/A02-0102_E.pdf (дата обращения: 25.04.2024).
12. Статические генераторы реактивной мощности СТАТКОМ // Группа СВЭЛ. URL: <https://svel.ru/catalog/ustroystva-uluchsheniya-kachestva-elektricheskoy-energii/staticheskie-generatory-reaktivnoy-moshchnosti-statkom/> (дата обращения: 25.04.2024).
13. Статические генераторы реактивной мощности (СТАТКОМ, СГРМ, SVG) // НПП «РУ-ИНЖИНИРИНГ». URL: <https://ru-drive.com/products/staticheskie-generatory-reaktivnoy-moshchnosti-6-35-kv/> (дата обращения: 25.04.2024).
14. Static synchronous compensator (STATCOM) for arc furnace and flicker compensation. Report prepared by Working Group B4.19, published by CIGRE as “Technical Brochure No 237” in 2003. 170 p.
15. Zhang Z., Fahmi N. R., Norris W. T. Flicker analysis and methods for electric arc furnace flicker (EAF) mitigation (a survey) // 2001 IEEE Porto Power Tech Conference. Porto, 2001. P. 508–513.
16. Schauder C. STATCOM for compensation of large electric arc furnace installations // 1999 IEEE Power Eng. Soc. Summer Meet. PES 1999 — Conf. Proc. 1999. Vol. 2. P. 1109–1112.
17. Samet H., Jarrahi M. A. A comparison between SVC and STATCOM in flicker mitigation of electric arc furnace using practical recorded data // 30th Power System Conference (PSC). Tehran, 2015.

P. 300–304.

18. Kashani M. G., Babaei S., Bhattacharya S. SVC and STATCOM application in Electric Arc Furnace efficiency improvement // 2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Rogers, AR, USA, 2013. P. 1–7.
19. Межгосударственный стандарт ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 60 с.
20. IEEE Std 1459-2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. Approved 2 February 2010. IEEE, 2010. 50 p.
21. Кацман М. М. Электрические машины: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. М.: Издательский центр «Академия», 2017. 496 с.
22. Кабышев А. В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 234 с.

References

1. Ershov A. M. *Sistemy elektrosnabzheniya. Chast' 2: Elektricheskie nagruzki. Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti* [Electrical power systems. Part 2: Electrical loads. Reactive power compensation]. Chelyabinsk, Publ. centre SUSU, 2018, 230 p. (In Russ.).
2. Zhezhelenko I. V., Saenko Yu. L. *Pokazateli kachestva elektricheskoy energii i ih kontrol' na promyshlennyyh predpriyatiyah* [Power quality indices and control of those at industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat, 2000, 252 p. (In Russ.).
3. Andrei H., Cepisca C., Grigorescu S. *Power quality and electrical arc furnaces*. Rijeka, InTech, 2011, 362 p.
4. Bhonsle D. C., Kelkar R. B. Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling. *Energy*, 2016, Vol. 115, pp. 830–839.
5. Sajeesh D., Seema J. Research on power quality issues in electric arc furnace and its mitigation techniques. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2014, Vol. 3, No. 1, pp. 1121–1124.
6. Zhezhelenko I. V., Shidlovskiy A. K., Pivnyak G. G., Saenko Yu. L., Noyberger N. A. *Elektromagnitnaya sovmestimost' potrebitely* [Electromagnetic compatibility of consumers]. Moscow, Mashinostroenie, 2012, 351 p. (In Russ.).
7. Zhu X., Chen H., Hu P., Chen R. Reactive compensation for AC electric arc furnace considering power quality constraints. *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*. Belo Horizonte, 2016, pp. 919–924.
8. *GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tehnikeskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards of power quality in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform, 2014, 20 p. (In Russ.).
9. Deaconu S. I., Nicolae P. G., Latinovic T. Comparative study for EAF's reactive energy compensation methods and power factor improvement. *WSEAS Transactions on Systems*, 2010, Vol. 9, No. 9, pp. 979–988.
10. Eremia M., Liu Ch., Edris A. *Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence*. Hoboken, New Jersey, Wiley & IEEE Press, 2016, ch. 5, pp. 271–338.
11. Static Var Compensator The key to better arc furnace economy. ABB Group. Leading digital technologies for industry. Available at: https://library.e.abb.com/public/6c4608703c0e7760832577bb004face9/A02-0102_E.pdf (accessed 25.04.2024).
12. *Statische generatory reaktivnoy moshchnosti STATKOM* [Static VAR generator STATCOM]. *Gruppa SVEL* [SVEL Group]. (In Russ.). Available at: <https://svel.ru/catalog/ustroystva-uluchsheniya-kachestva-elektricheskoy-energii/staticheskie-generatory-reaktivnoy-moshchnosti-statkom/> (accessed

- 25.04.2024).
13. *Statische generatory reaktivnoy moshchnosti (STATKOM, SGRM, SVG)* [Static VAR generator (STATCOM, SVG, SVG)]. *NPP "RU-INZhINIRING"* [NPO "RU-INZhINIRING"]. (In Russ.). Available at: <https://ru-drive.com/products/staticheskie-generatory-reaktivnoy-moshchnosti-6-35-kv/> (accessed 25.04.2024).
 14. Static synchronous compensator (STATCOM) for arc furnace and flicker compensation. Report prepared by Working Group B4.19, published by CIGRE as "Technical Brochure No 237" in 2003, 170 p.
 15. Zhang Z., Fahmi N. R., Norris W. T. Flicker analysis and methods for electric arc furnace flicker (EAF) mitigation (a survey). *2001 IEEE Porto Power Tech Conference*. Porto, 2001, pp. 508–513.
 16. Schauder C. STATCOM for compensation of large electric arc furnace installations. *1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meet, PES 1999, Conference Proceedings*, 1999, Vol. 2, pp. 1109–1112.
 17. Samet H., Jarrahi M. A. A comparison between SVC and STATCOM in flicker mitigation of electric arc furnace using practical recorded data. *30th Power System Conference (PSC)*. Tehran, 2015, pp. 300–304.
 18. Kashani M. G., Babaei S., Bhattacharya S. SVC and STATCOM application in Electric Arc Furnace efficiency improvement. *2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. Rogers, AR, USA, 2013, pp. 1–7.
 19. *GOST 30804.4.30-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tehnikeskikh sredstv elektromagnitnaya. Metody izmereniy pokazateley kachestva elektricheskoy energii* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Methods of measurement of power quality indices]. Moscow, Standartinform, 2014, 60 p. (In Russ.).
 20. IEEE Std 1459-2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. IEEE, 2010, 50 p.
 21. Kacman M. M. *Elektricheskie mashiny* [Electric Machines]. Moscow, Publ. centre "Akademiya", 2017, 496 p. (In Russ.).
 22. Kabyshev A. V. *Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti v elektroustanovkah promyshlennykh predpriyatiy* [Reactive power compensation in electrical installations of industrial enterprises]. Tomsk, Publ. Tomsk polytechnic university, 2012, 234 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Е. И. Губская — инженер;
В. В. Колобов — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;
А. С. Карпов — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
В. В. Ярошевич — научный сотрудник.

Information about the authors

E. I. Gubskaya — Engineer;
V. V. Kolobov — PhD (Engineering), Leading Research Associate;
A. S. Karpov — PhD (Engineering), Senior Research Associate;
V. V. Yaroshevich — Research Associate.

Статья поступила в редакцию 15.05.2024; одобрена после рецензирования 27.05.2024; принята к публикации 31.05.2024.
The article was submitted 15.05.2024; approved after reviewing 27.05.2024; accepted for publication 31.05.2024.