

DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-116-124

УДК 621.33

ББК 31.264.5

А.В. МАКАРОВ, В.Г. МАКАРОВ, Т.В. МАКАРОВА, А.А. ПЕТРОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО СИНХРОННОГО КОМПЕНСАТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

Ключевые слова: статический синхронный компенсатор, СТАТКОМ, многоуровневый инвертор напряжения, H-мостовой инвертор, нелинейная нагрузка, компенсация реактивной мощности, фильтрация высших гармоник тока, тиристорный преобразователь электроэнергии, тиристорный привод переменного тока.

Цель исследования – разработка имитационной модели системы электроснабжения промышленного предприятия, модели нелинейной нагрузки, представляющей собой тиристорный привод переменного тока, и модели статического синхронного компенсатора, а также определение предварительных параметров для проектирования статического синхронного компенсатора для удовлетворения требований к коэффициентам мощности и пределам гармонических и интергармонических искажений напряжения, заданных для точки общего присоединения к сети питания. В процессе работы использовались аналитические и численные методы математического программирования и управления электромеханическими системами. Были использованы программные продукты VisualStudio и PSIM. В результате исследования были разработаны имитационные модели системы электроснабжения промышленного предприятия, нелинейной нагрузки и статического синхронного компенсатора. Определена мощность статического синхронного компенсатора для снижения потребления реактивной мощности и величины высших гармоник тока в точке общего присоединения при работе нелинейной нагрузки.

Эксплуатация приводов понижающих преобразователей частоты переменного напряжения, используемых без редукторных приводных механизмов, приводит к образованию определенных гармонических и интергармонических искажающих составляющих [1]. Частота и амплитуда таких составляющих зависят от скорости работы электродвигателя переменного тока. Для того чтобы результирующие гармоники и интергармоники напряжения оставались ниже предельных показателей, указанных в соответствующих стандартах качества электроэнергии, требуется использование устройств, для снижения величин токов высших гармоник [2]. В качестве таких устройств, как правило, применяются от трех до пяти емкостных и/или высокочастотных демпфированных фильтров, каждый из которых настроен на собственную частоту и предназначен для ограничения интенсивности искажений в сети до приемлемых уровней [3]. Также применяются активные фильтры высших гармоник, которые подключаются параллельно искажающей нагрузке. Эти устройства, представляющие собой инверторы напряжения, формируют токи высших гармоник в противофазе к токам высших гармоник искажающей нагрузки [4]. Установка устройств, снижающих токи высших гармоник, играет важную роль, поскольку обеспечивает эффективную и бесперебойную работу всего подключенного оборудования [6].

Промышленное предприятие получает питание от коммунальной сети напряжением 220 кВ или (альтернативно) от блока газопоршневых генераторов небольшой мощности. Электрическая энергия на предприятии распределяется по линиям 35 кВ и 10 кВ. Точка общего присоединения расположена на подстанции 220 кВ. Упрощенная однолинейная схема системы электроснабжения промышленного предприятия приведена на рис. 1.

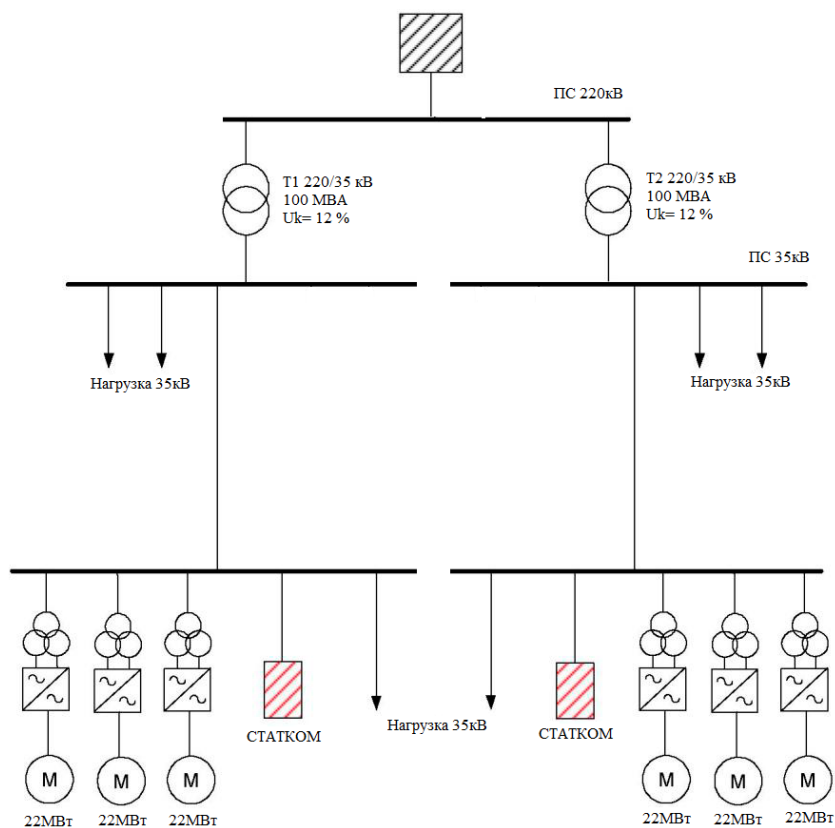


Рис. 1. Однолинейная схема системы электроснабжения промышленного предприятия

Нагрузки на секциях шин 35 кВ получают питание от трансформаторов с установленной мощностью 100 МВА. Основными потребителями промышленного предприятия являются нелинейные нагрузки, представляющие собой шесть асинхронных двигателей мощностью по 22 МВт каждый, подключённых по три на каждую секцию шин 35 кВ. Затем электроэнергия распределяется внутри предприятия по кабелям с преобразованием напряжения до 10, 4,16 и 0,48 кВ. Приводные механизмы представляют собой 12-импульсные приводы переменного тока, понижающих преобразователей частоты переменного напряжения. Статические синхронные компенсаторы подключаются на каждую секцию шин параллельно нелинейной нагрузке.

Согласно требованиям к качеству электрической энергии ГОСТ 32144-2013, устанавливается рекомендуемое значение коэффициента искажения кривой напряжения, которое нелинейно связано с токами высших гармоник, поэтому для определения тока статического синхронного компенсатора необходимо проводить моделирование системы электроснабжения [7].

Для построения модели сети в программно-техническом комплексе PSIM, а также для моделирования и расчета гармоник при определении мощности активного фильтра использовались следующие исходные данные. Номинальная частота питающего напряжения сети составляет 50 Гц. Величина минимального тока трехфазного короткого замыкания на секциях шин подстанции 220 кВ составляет $I_{к.з} = 17,24$ кА, а подстанции 35 кВ – $I_{к.з} = 8,26$ кА.

В качестве эквивалентного источника напряжения в модели использовано напряжение 220 кВ с импедансом, выбранным на основе указанных токов коротких замыканий, два основных трансформатора питания на подстанции 220 кВ Т1 и Т2 220/35 кВ с установленной мощностью 100 МВА, напряжение короткого замыкания $u_k = 12\%$. Нагрузки низкого напряжения представлены в виде сосредоточенных суммарных нагрузок, разделенных на нагрузки двигателей, общие нагрузки и нелинейные нагрузки (приводы с регулируемой скоростью). Модель системы электроснабжения промышленного предприятия приведена на рис. 2.

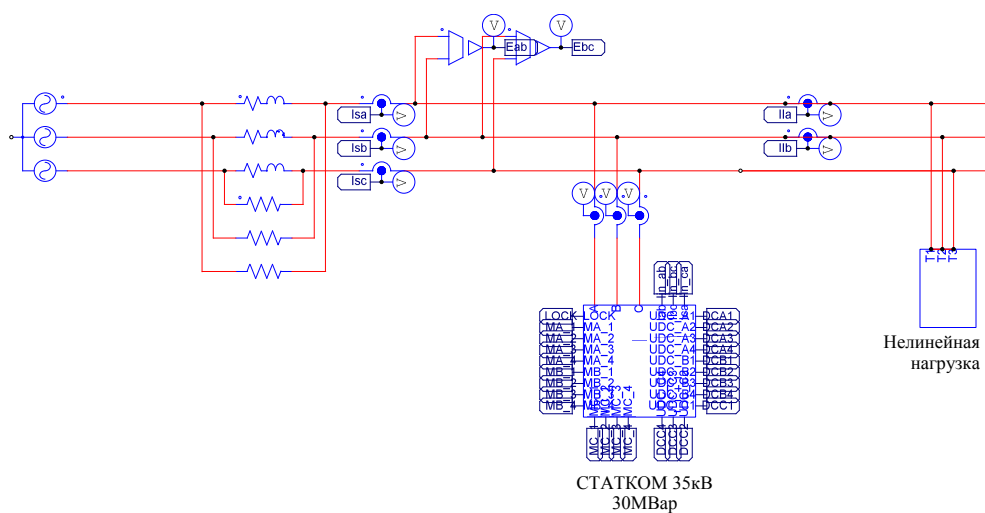


Рис. 2. Имитационная модель системы электроснабжения промышленного предприятия

Статический синхронный компенсатор представляет собой многоуровневый инвертор напряжения, состоящий из четырех последовательно подключённых силовых ячеек, электрическая схема которого приведена на рис. 3. Каждая силовая ячейка представляет собой H-мостовой инвертор, электрическая схема которого приведена на рис. 4 [5].

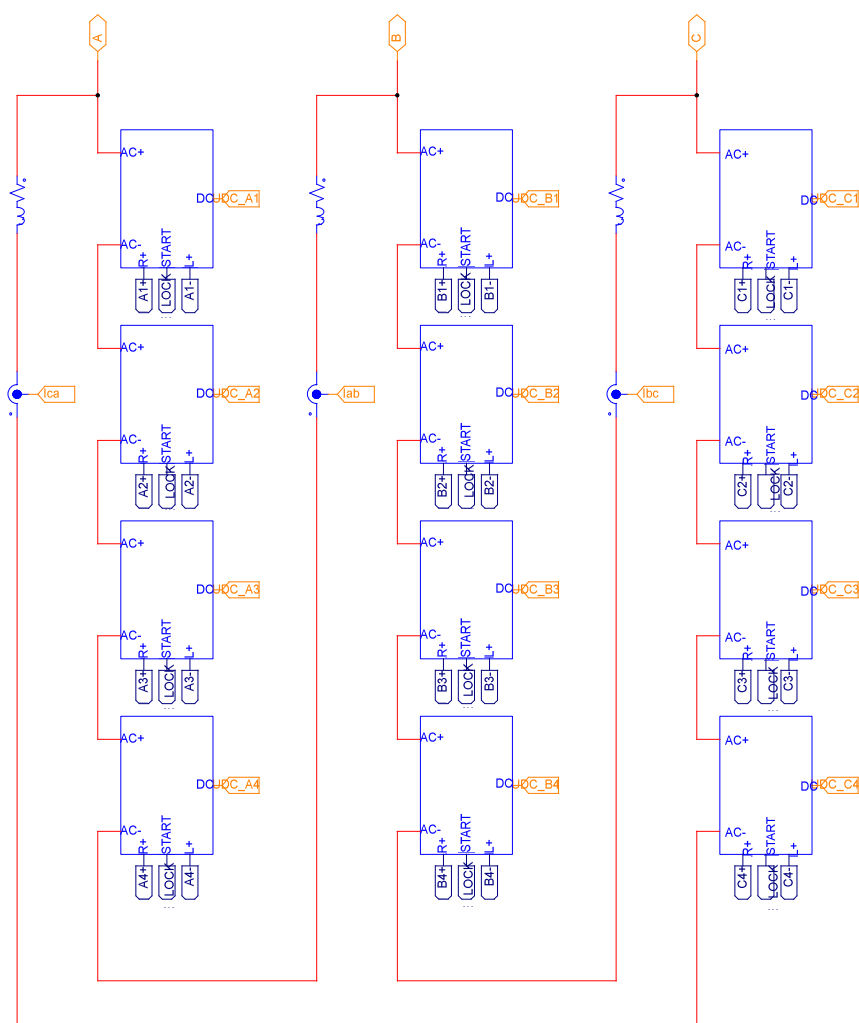


Рис. 3. Модель статического синхронного компенсатора

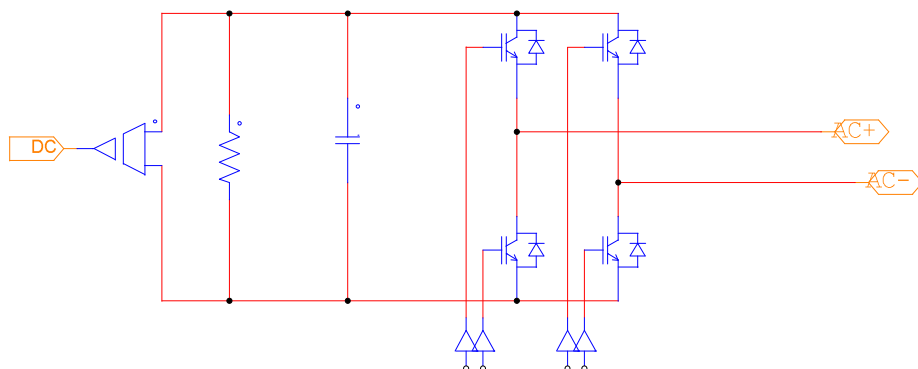


Рис. 4. Модель силовой ячейки статического синхронного компенсатора

Ток, потребляемый тиристорным приводом переменного тока, и его спектр приведены на рис. 5 и 6.

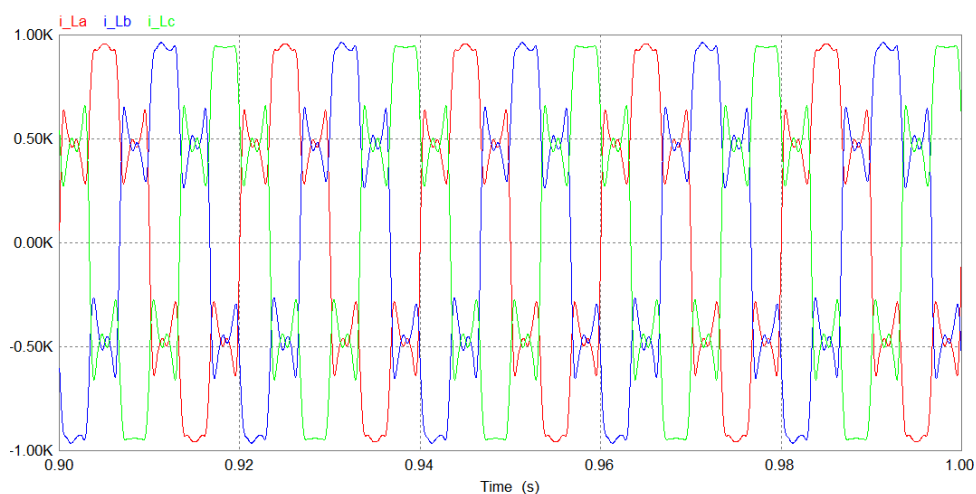


Рис. 5. Ток, потребляемый нелинейной нагрузкой

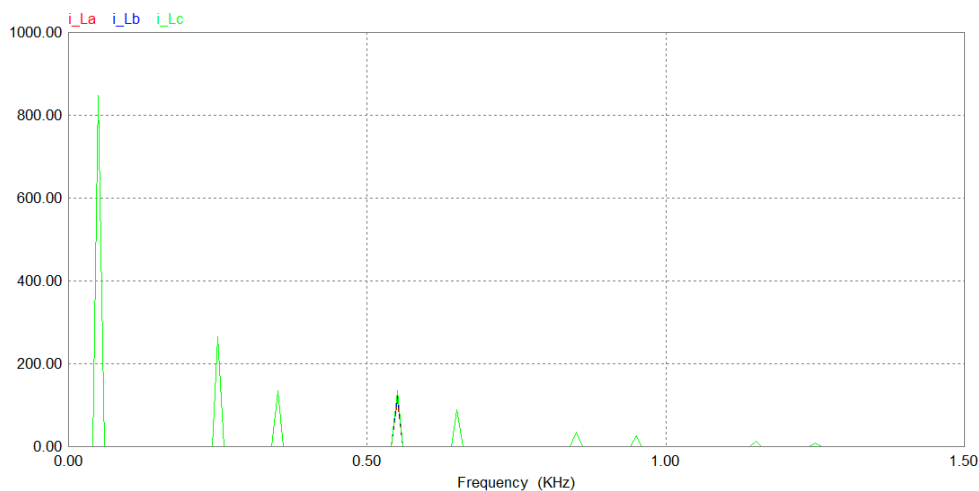


Рис. 6. Спектр тока, потребляемого нелинейной нагрузкой

Видно, что ток, потребляемый тиристорным приводом переменного тока, несинусоidalен и содержит составляющие токов высших гармоник канонического порядка.

При подключении статического синхронного компенсатора параллельно искажающей нагрузке снижаются высшие гармоники тока.

Потребляемый на секциях шин ПС 35 кВ ток и его спектр приведены на рис. 7 и рис. 8.

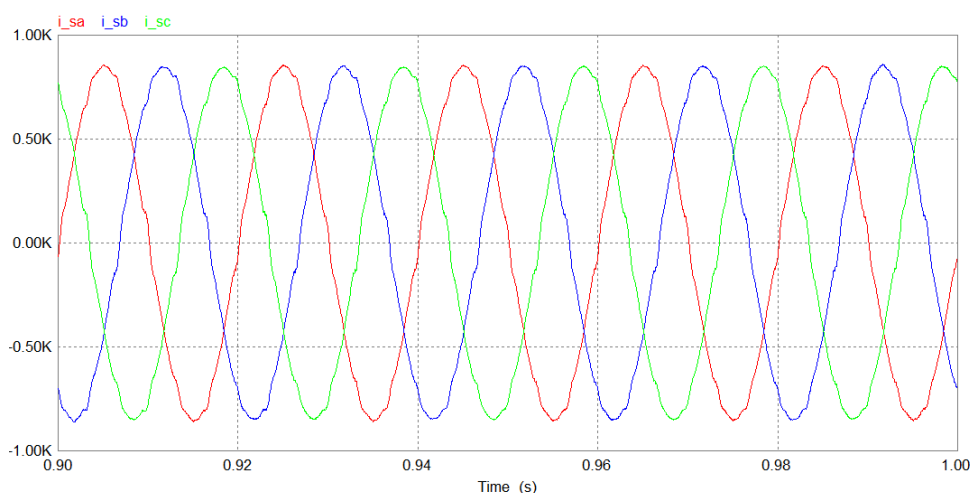


Рис. 7. Ток, потребляемый нелинейной нагрузкой, на секции шин ПС 35кВ

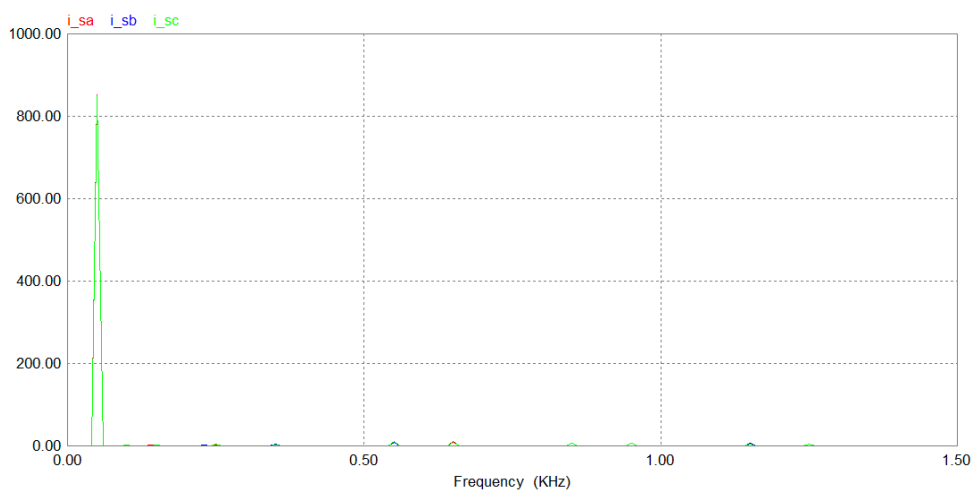


Рис. 8. Спектр тока на секции шин ПС 35кВ

Снижение высших гармоник тока обеспечивается за счет формирования инвертором напряжения тока, содержащего высшие гармоники в противофазе к высшим гармоникам тока, потребляемым нелинейной нагрузкой.

Статический синхронный компенсатор формирует высшие гармоники тока 5, 7, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 25-го порядка, его ток и спектр приведены на рис. 9 и 10.

В таблице приведены действующие значения токов высших гармоник, потребляемых приводами переменного тока на секции шин подстанции 35 кВ, на границе принадлежности, секции шин подстанции 220 кВ и статического синхронного компенсатора, полученные по результатам моделирования.

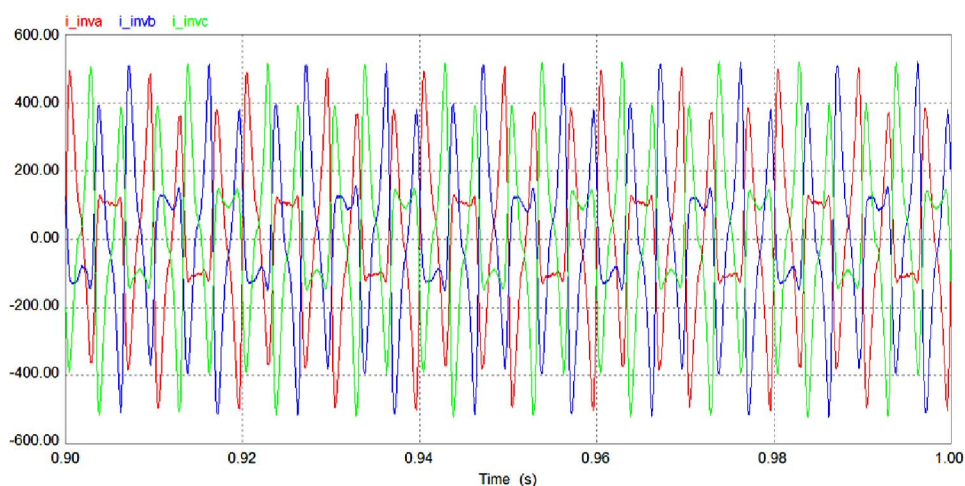


Рис. 9. Форма тока статического синхронного компенсатора

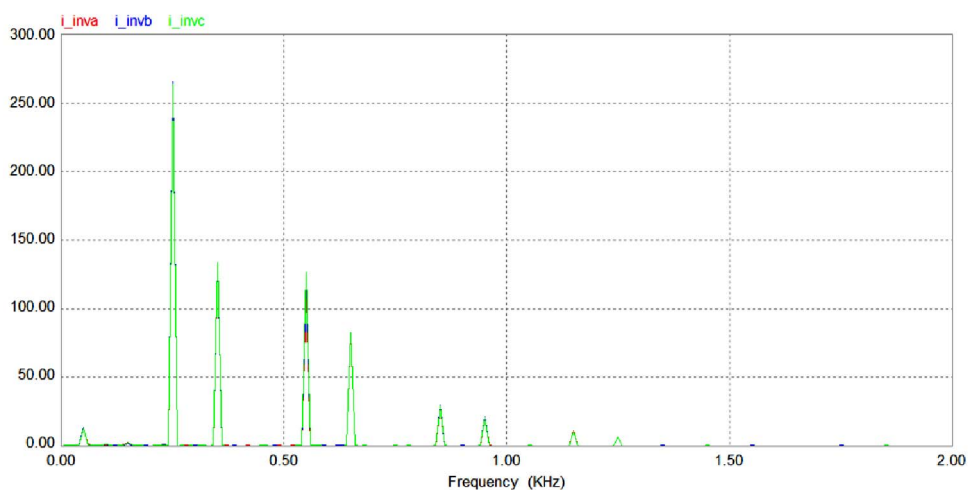


Рис. 10. Спектр тока статического синхронного компенсатора

Токи высших гармоник системы электроснабжения промышленного предприятия

Номер гармоники	Ток нагрузки, А	Ток сети, А	Ток СТАТКОМ, А
5	187,11	2,25	186,73
7	95,29	1,74	94,20
11	80,23	4,93	76,64
13	63,76	6,01	58,97
17	24,06	4,52	20,59
19	18,41	4,04	15,78
23	9,85	3,56	7,94
25	6,40	2,58	4,76

Согласно результатам моделирования системы электроснабжения промышленного предприятия, нагрузкой которого являются 12-пульсные тири-

сторонние преобразователи частоты, в системе электроснабжения присутствуют высшие гармоники тока канонического порядка, что характерно для преобразовательной техники, выполненной на тиристорах [8]. Высшие гармоники тока могут привести к снижению срока службы электрооборудования или к ложным срабатываниям устройств релейной защиты системы электроснабжения промышленного предприятия.

Установка на каждой секции шин 35 кВ подстанции 35 кВ промышленного предприятия статического синхронного компенсатора с номинальным током 232 А обеспечит снижение тока высших гармоник и компенсацию реактивной мощности в системе электроснабжения предприятия.

Литература

1. Acha E., Fuerte-Esquivel R.C., Ambriz-Perez H., Angeles-Camacho C. 2004 FACTS. Modeling and Simulation in Power Networks. Wiley & Sons LTD Publ., 2004, 420 p.
2. Chicco G., Mazza A. 100 Years of Symmetrical Components. *Energies*, 2019, vol. 12(3), pp. 1–20.
3. Dekka A., Wu B., Fuentes R.L., Perez M., Zargari N.R. Evolution of Topologies Modeling Control Schemes and Applications of Modular Multilevel Converters. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2017, vol. 5(4), pp. 1631–1656.
4. Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyui. Understanding FACTS: concepts and technology of Flexible AC transmission System, Wiley-IEEE Press Publ., 2000, 433 p, DOI: 10.1109/9780470546802.
5. Makarov A., Ferenets A., Metelev I. Simulation 35 kV 35 MVar STATCOM in EMTDC PSCAD. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1415. DOI: 10.1088/1742-6596/1415/1/012013.
6. Mohan Mathur R., Rajiv K. Varma. Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems. John Wiley & sons Inc Publ., 2002, 518 p.
7. Rodrigues P., Morais V.A., Martins A., Carvalho A. STATCOM Simulation Models for Analysis of Electrified Railways. IECON 2019 – 45th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society Lisbon Portugal, 2019. DOI: 10.1109/IECON.2019.8927256.
8. Shahnian F., Rajakaruna S., Ghosh A. 2Static compensators (STAT-COMs) in power systems. Springer, 2015, 735 p.

МАКАРОВ АЛЕКСЕЙ ВИТАЛЬЕВИЧ – ассистент кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева, Россия, Казань (amakarov.kai@gmail.com).

МАКАРОВ ВАЛЕРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева, Россия, Казань (vg_makarov@mail.ru).

МАКАРОВА ТАТЬЯНА ВЯЧЕСЛАВОВНА – аспирантка кафедры автоматики и управления, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева, Россия, Казань (Tanya.Dolgova.1995@mail.ru).

ПЕТРОВ АЛЕКСЕЙ АНДРЕЕВИЧ – аспирант кафедры электрооборудования, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева, Россия, Казань (PetrovAlekse95@mail.ru).

Aleksei V. MAKAROV, Valeriy G. MAKAROV,
Tatiana V. MAKAROVA, Aleksei A. PETROV

SIMULATION OF A STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR FOR A POWER SUPPLY SYSTEM WITH A NON-LINEAR LOAD

Key words: static synchronous compensator, STATCOM, multilevel voltage inverter, H-bridge inverter, non-linear load, reactive power compensation, high harmonic current filtering, 12-pulse thyristor inverter, thyristor AC drive.

The purpose of the work is developing a simulation model of factory's the power system, with a nonlinear load model, which is a 12-pulses thyristor inverter and a model of a static synchronous compensator, which is multi-level voltage inverter, based on H-bridge inverter. Also defining preliminary parameters for the design of a static synchronous compensator in order to meet the requirements for power factors and limits of voltage harmonic and interharmonic distortion specified for the point of common connection to the mains supply. The analytical and numerical methods of mathematical programming and control of electromechanical systems were used. VisualStudio and PSIM software products for developing a control system for electromechanical systems and compiling a simulation model of an industrial power supply system were used. As a result of the research, a simulation model of the power supply system of an industrial enterprise, a model of a nonlinear load and a static synchronous compensator were developed. The rated power of the static synchronous compensator is determined to reduce the consumption of reactive power and the magnitude of the higher harmonics of the current, at the point of common connection, during operating a non-linear load.

References

1. Acha E., Fuerte-Esquivel R.C., Ambriz-Perez H., Angeles-Camacho C. 2004 FACTS. Modeling and Simulation in Power Networks. Wiley & Sons LTD Publ., 2004, 420 p.
2. Chicco G., Mazza A. 100 Years of Symmetrical Components. *Energies*, 2019, vol. 12(3), pp. 1–20.
3. Dekka A., Wu B., Fuentes R.L., Perez M., Zargari N.R. Evolution of Topologies Modeling Control Schemes and Applications of Modular Multilevel Converters. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2017, vol. 5(4), pp. 1631–1656.
4. Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyui. Understanding FACTS: concepts and technology of Flexible AC transmission System, Wiley-IEEE Press Publ., 2000, 433 p. DOI: 10.1109/9780470546802.
5. Makarov A., Ferenets A., Metelev I. Simulation 35 kV 35 MVar STATCOM in EMTDC PSCAD. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1415. DOI: 10.1088/1742-6596/1415/1/012013.
6. Mohan Mathur R., Rajiv K. Varma. Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems. John Wiley & sons Inc Publ., 2002, 518 p.
7. Rodrigues P., Morais V.A., Martins A., Carvalho A. STATCOM Simulation Models for Analysis of Electrified Railways. IECON 2019 – 45th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society Lisbon Portugal, 2019. DOI: 10.1109/IECON.2019.8927256.
8. Shahnia F., Rajakaruna S., Ghosh A. 2Static compensators (STAT-COMs) in power systems. Springer, 2015, 735 p.

ALEKSEI V. MAKAROV – Assistant Lecturer, Electrical Equipment Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Russia, Kazan (amakarov.kai@gmail.com).

VALERIY G. MAKAROV – Doctor of Technical Science, Professor of Electrical Equipment Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Russia, Kazan (vg_makarov@mail.ru).

TATIANA V. MAKAROVA – Post-Graduate Student, Automation and Control Department, Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev, Russia, Kazan (Tanya.Dolgova.1995@mail.ru).

ALEKSEI A. PETROV – Post-Graduate Student, Electrical Equipment Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Russia, Kazan (PetrovAlekse95@mail.ru).

Формат цитирования: Макаров А.В., Макаров В.Г., Макарова Т.В., Петров А.А. Моделирование статического синхронного компенсатора для системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 3. – С. 116–124. DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-116-124.