

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Лепанов М.Г., Киселев М.Г.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

В трехфазных системах электроснабжения основными параметрами, характеризующими качество электроэнергии, являются отклонение напряжения от номинального значения, искажение токов и напряжений, величина несимметрии напряжений и токов. Ухудшение качества электроэнергии обусловлено ограниченной мощностью источников электроэнергии, нелинейными потребителями, а также нагрузкой индуктивного характера [1]. Снижение коэффициента мощности ($\cos\varphi$) приводит к росту потерь при передаче электроэнергии. Высокочастотные гармонические составляющие тока и напряжения также приводят к увеличению потерь и нарушению работы различных электротехнических устройств. Несимметрия напряжений характеризуется наличием в трехфазной сети напряжений обратной и нулевой последовательностей, что приводит к дополнительным потерям мощности и ухудшению режимов и параметров ее работы. Наложение напряжений и токов обратной и нулевой последовательностей приводит к разным дополнительным отклонениям напряжения в фазах и к увеличению токов в отдельных фазах. Исключительное значение имеет проблема перегрузки нейтрального провода, в котором складываются токи нулевой последовательности и гармонические составляющие с тройной частотой по сравнению с основной.

Низкое качество электрической энергии характерно для систем электроснабжения объектов жилищно-коммунального хозяйства, офисных зданий, коттеджных поселков и других подобных потребителей, имеющих большое количество различных однофазных нелинейных нагрузок. Используемые в настоящее время средства фильтрации гармоник и симметрирования токов при помощи пассивных элементов имеют ряд ограничений и существенных недостатков, что не позволяет обеспечить электроснабжение потребителей с требуемыми показателями качества. Данная проблема решается посредством создания высокоэффективных устройств повышения качества электроэнергии (компенсации неактивной мощности) на базе выпрямительно-инверторных преобразователей с емкостными накопителями энергии (статических компенсаторов и активных фильтров) [2]. Улучшение характеристик подобных устройств достигается разработкой алгоритмов высокочастотного импульсного управления преобразователями.

Многофункциональный регулятор качества электроэнергии на основе силового электронного устройства компенсации неактивной мощности выполняет три функции: снижение искажения формы тока, потребляемого из сети; симметрирование токов в фазах сети; компенсация реактивной мощности. Устройство подключается непосредственно к шинам питания потребителей, обеспечивая потребление только активной составляющей мощности за счет повышения коэффициента мощности, уменьшения коэффициента гармонических искажений (THD) и компенсации обратной и нулевой последовательностей тока.

Принцип работы. Регулятор выполнен на основе силового электронного преобразователя, на стороне переменного тока которого включены дроссели, соединенные с электрической сетью (Рис. 1). Преобразователь представляет собой трехфазную мостовую схему на IGBT-транзисторах. Такой преобразователь способен генерировать ток произвольной фазы. Таким образом, комплексный вектор выходного тока может изменяться в четырех квадрантах относительно вектора напряжения, что соответствует выпрямительному и инверторному режимам работы с регулированием реактивной мощности. Форма тока дросселей определяется выходным напряжением в каждой фазе пре-

образователя. Создание требуемых выходных токов осуществляется методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) выходного напряжения преобразователя. На стороне постоянного тока преобразователя подключен конденсатор, обеспечивающий работу преобразователя в качестве источника напряжения (инвертора напряжения). Для генерирования реактивных токов, фильтрации гармоник или устранения небаланса токов сети на стороне постоянного тока преобразователя достаточно использовать конденсатор небольшой емкости.

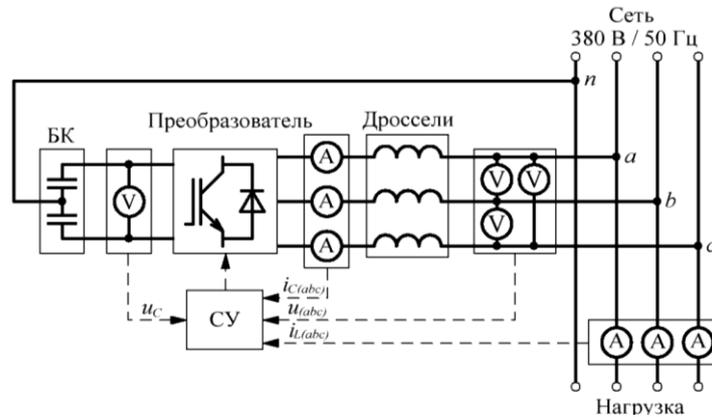


Рис. 1. Блок-схема регулятора качества электроэнергии (БК – блок конденсаторов; СУ – система управления)

Система управления преобразователя, выполненная на основе микроконтроллера (DSP), получает информацию с датчиков напряжений и токов. Измеряются напряжения и токи нагрузки, токи дросселей и напряжение на конденсаторном блоке. Используя эти входные сигналы, система управления формирует по заданному алгоритму импульсы управления транзисторами преобразователя. В системе управления регулятора, структурная схема которой показана на Рис. 2, можно выделить два основных функциональных блока, вычисляющих опорные сигналы токов и напряжений. Первый блок определяет неактивные составляющие тока нагрузки, которые должны быть скомпенсированы. Второй блок вычисляет сигналы напряжений, требуемых для формирования соответствующих токов.

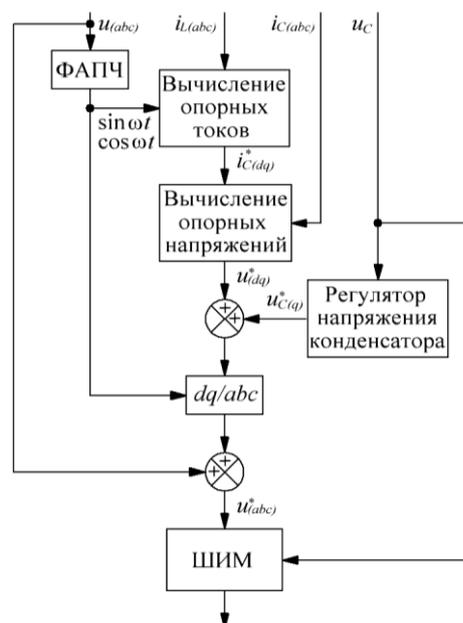


Рис. 2. Структура системы управления многофункционального регулятора

Алгоритмы управления основаны на использовании преобразования трехфазных координат во вращающуюся синхронную систему координат (abc/dq -преобразование) [3]:

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ q_1 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \sin \vartheta & \sin(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos \vartheta & \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где a, b, c – сигналы трех фаз; d_1, q_1 – составляющие пространственного вектора тока/напряжения в синхронных координатах; $\nu = \omega t$ – фазовый угол координатных осей d и q (фаза синхронизированных сигналов). Блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) генерирует гармонический сигнал основной частоты в фазе с напряжением фазы A . Этот блок реализуется как система регулирования на основе обратной связи по фазе синхронизируемого сигнала. В результате d -составляющая напряжения будет постоянной положительной величиной, а q -составляющая станет равной нулю. Таким образом, d -составляющая токов соответствует активному току, а q -составляющая равна амплитуде реактивной составляющей основной гармоники. В случае нелинейной и/или несимметричной нагрузки dq -компоненты токов содержат переменную (колебательную) составляющую, обусловленную высшими гармониками и/или обратной последовательностью тока. Для получения опорных сигналов токов в dq -координатах (вычисления их постоянных составляющих) используются фильтры нижних частот (ФНЧ) с минимальной фазовой задержкой и коэффициентом ослабления. Для управления токами регулятора необходимо создавать на выходе преобразователя соответствующие напряжения методом ШИМ. Регулирование тока обеспечивается посредством отрицательной обратной связи. Регулятор напряжения конденсатора обеспечивает поддержание на конденсаторах постоянного номинального уровня напряжения, который должен быть существенно выше амплитуды линейного напряжения, которое достигается в случае неуправляемого заряда через диоды преобразователя.

Фильтрация гармоник тока. В режиме активной фильтрации регулятор качества электроэнергии генерирует гармонические составляющие, соответствующие гармоникам тока с наибольшей амплитудой, потребляемого нелинейной нагрузкой. Алгоритм вычисления сигналов задания токов основан на использовании abc/dq -преобразования отдельно для каждой компенсируемой гармоники [4]. Учитывая, что 5-я и 11-я гармоники соответствуют обратной последовательности трехфазного сигнала, для вычисления опорных сигналов используется преобразование координат для обратной последовательности (abc/d_2q_2), а постоянные составляющие в d_2q_2 -координатах определяют амплитуду требуемой гармоники тока. Аналогично, для вычисления 3-й и 9-й гармоник применяется преобразование координат для нулевой последовательности.

На рис. 3 показаны результаты моделирования устройства в режиме компенсации гармоник тока для характерной нелинейной нагрузки – выпрямителя в каждой фазе. В спектре тока нагрузки присутствует значительная 3-я гармоника (150 Гц). Формируемые модулирующие сигналы содержат 3, 5, 7, 9 и 11-ю гармоники. Форма тока, потребляемого из сети, становится близкой к синусоидальной. Гармоники 3 и 9 замыкаются между регулятором и нагрузкой, обеспечивая, таким образом, разгрузку нейтрали.

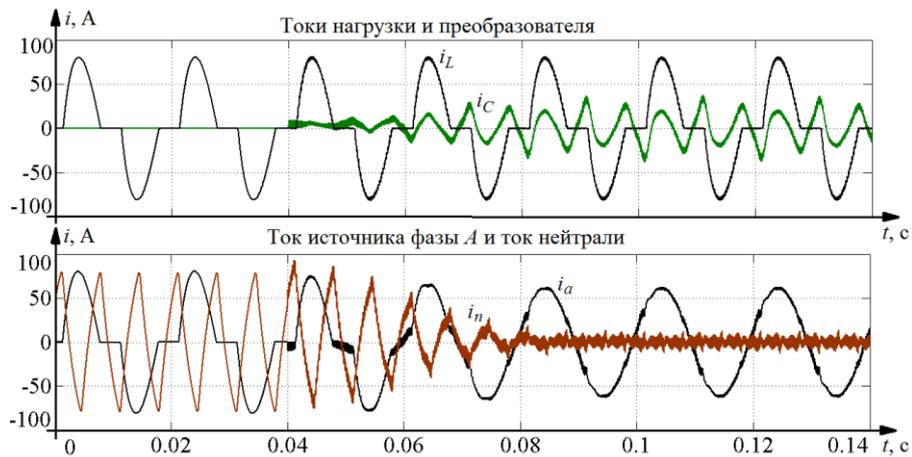


Рис. 3. Результаты моделирования регулятора качества электроэнергии в режиме активной фильтрации

Симметрирование токов. В режиме симметрирования токов регулятор генерирует токи, которые соответствуют обратной и нулевой последовательностям токов нагрузки [5]. Опорные сигналы вычисляются с использованием d_2q_2 -координат и d_0q_0 -координат.

Компьютерное моделирование режима симметрирования токов проводилось при резистивной несбалансированной нагрузке (Рис. 4). Амплитуда потребляемого тока фазы *B* в два раза меньше токов других фаз. В результате компенсации нулевой и обратной последовательностей токов происходит выравнивание фазных токов сети. Нулевая последовательность тока протекает в нейтральном проводе между регулятором и нагрузкой, а ток в нейтральном проводе сети снижается практически до нуля.

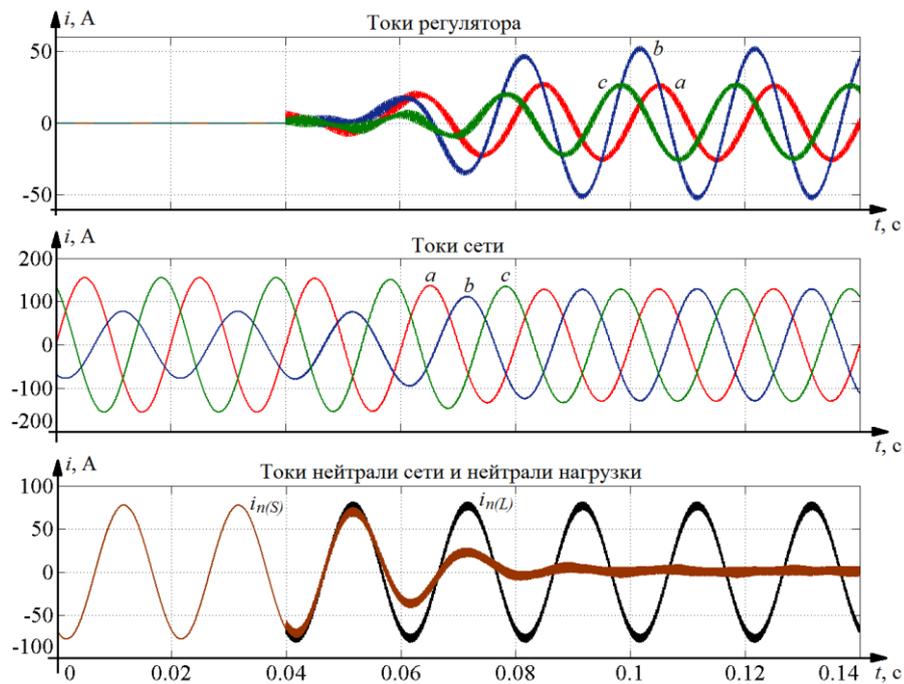


Рис. 4. Моделирование режима симметрирования токов

Список использованных источников

1. Карташев И.И., Тульский В.Н., Шаров Ю.В. и др. Управление качеством электроэнергии. – М.: Изд-во МЭИ, 2006.
2. Moreno-Munoz A. Power quality: mitigation technologies in a distributed environment. – London: Springer, 2007.
3. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника. – М.: МЭИ, 2007.
4. Montero M.I.M. Comparison of Control Strategies for Shunt Active Power Filters in Three-Phase Four-Wire Systems // IEEE Transactions on Power Electronics. 2007. Issue 1. – P. 229-236.
5. Киселев М.Г., Розанов Ю.К. Анализ режимов работы статического компенсатора реактивной мощности в режиме симметрирования нагрузки // Электричество. 2012. №3.