

РЕГУЛИРУЕМОЕ СИММЕТРИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

С.А. Сидоров, Л.Э. Рогинская

Рассмотрена проблема несимметрии напряжений в сетях электроснабжения. Дан обзор средств устранения несимметрии токов, применяемых в настоящее время, приведены их достоинства и недостатки. Предложено использование симметрирующего устройства с индуктивным накопителем энергии, построенным на управляемом энергообмене между сетью и дросселем с помощью трехфазного мостового преобразователя. Приведены схемы симметрирующего устройства, блока IGBT модулей, блока Control и дано описание их работы.

Для исследования разработанного симметрирующего устройства была создана компьютерная модель в пакете Matlab/Simulink. Представлена общая схема компьютерной модели симметрирующего устройства, дано описание ее блоков и рассмотрено несколько цепочек их взаимодействия.

Рассматривается неполнофазный режим работы симметрирующего устройства, приводятся осциллограммы напряжения в сети и токов на нагрузке и в сети при использовании симметрирующего устройства.

Построенная в пакете Matlab/Simulink система управления с трехфазным мостом из транзисторных модулей и с нагрузкой в виде дросселя позволяет получить эффективное снижение несимметрии токов сети и соответственно устранить несимметрию напряжений питающей сети, это доказывают приведенные в статье осциллограммы.

Ключевые слова: несимметрия напряжений, несимметрия токов, симметрирующее устройство, дроссель, соотношения токов.

Введение

В настоящее время все большее значение приобретают вопросы энергосбережения и качества электроэнергии [1, 2]. Согласно нормам на качество электроэнергии, коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности не должно превышать 2 % от номинального в течение 95 % времени интервалом в одну неделю и 4 % в течение 100 % времени интервалом в одну неделю [3]. Несимметрия токов и напряжений может возникнуть при подключении к трехфазной сети мощных однофазных нагрузок, таких как индукционные печи, установки электрошлакового переплава, электросварочные агрегаты, тяговые тиристорные электроприводы постоянного тока и др. [4]. В данной работе рассмотрено устройство для симметрирования и компенсации реактивной мощности – симметрирующее устройство с индуктивным накопителем энергии.

По нашему мнению, исследованию симметрирующих устройств с индуктивными накопителем энергии уделяется мало внимания, и данная работа призвана несколько улучшить существующее положение дел.

Симметрирующие устройства

В большинстве случаев в промышленности для симметрирования однофазных электропечных нагрузок применяются симметрирующие устройства, работающие по схеме Штейнметца, реже статические тиристорные компенсаторы [5, 6]. Симметрирующее устройство, работающее по схеме Штейнметца имеет ряд недостатков, основные из которых: необходимость ручного регулирования параметров устройства в процессе работы, большие

габариты и масса активной части [7]. Статические тиристорные компенсаторы несмотря на лучшую управляемость сильно искажают форму кривой тока и потребляют реактивную мощность вследствие несовершенства системы управления [8, 9].

Симметрирующие устройства с индуктивным накопителем энергии промышленными предприятиями не производятся. Однако на нашем и европейском рынках имеются компенсаторы типа СТАТКОМ с емкостными накопителем энергии, но они дороги и имеют более сложную конструкцию.

Симметрирующее устройство с индуктивным накопителем энергии

Симметрирующее устройство с индуктивным накопителем энергии состоит из последовательно подключенного Г-образного LC-фильтра нижних частот и трехфазного мостового полупроводникового преобразователя с индуктивностью (дроссель с зазором) на стороне постоянного тока [10]. Принципиальная схема симметрирующего устройства приведена на рис. 1. Трехфазный мостовой преобразователь образуют шесть полностью управляемых ключей с односторонней проводимостью – шесть IGBT-транзисторов [11]. Симметрирующее устройство подключается к сети параллельно.

Принцип действия симметрирующего устройства заключается в управляемом энергообмене между сетью и дросселем посредством мостового преобразователя. При несимметрии мгновенная мощность трехфазной системы содержит переменную составляющую, значение которой определяется током обратной последовательности. Управляя потоком энергии между дросселем с зазором и

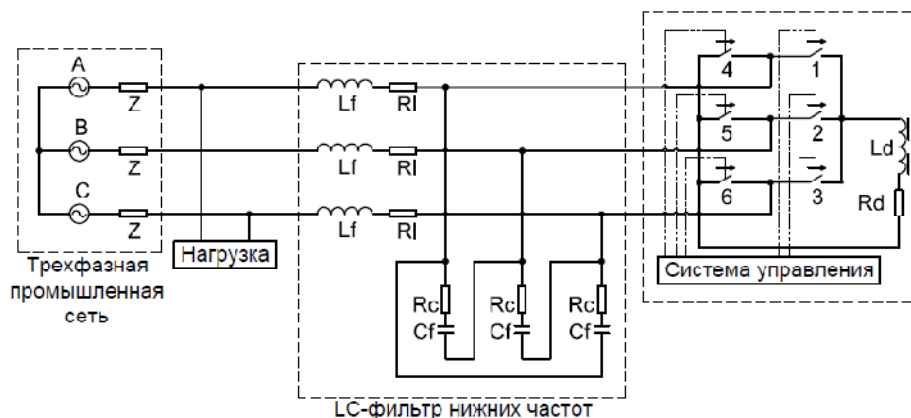


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема симметрирующего устройства

сеть, можно обеспечить равенство нулю тока обратной последовательности и таким образом исключить переменную составляющую мгновенной мощности трехфазной сети.

Способ управления симметрирующим устройством основан на том факте, что в любой момент времени сумма токов в трехфазной системе равна нулю (справедливо как для прямой, так и для обратной последовательности токов) или $I_{A2} + I_{B2} + I_{C2} = 0$, следовательно, один из них равен сумме двух других не только векторно, но и по модулю мгновенного значения ввиду равенства знаков последних токов. Из этих соображений можно получить 6 случаев (см. таблицу). Границами случаев являются переходы токов через ноль.

Все «случаи» в таблице расположены определенным образом: такое чередование знаков фаз характерно для обратной последовательности тока.

Подробно рассмотрим первый случай (остальные случаи аналогичны первому). В этом случае происходит потребление тока обратной последовательности из фазы *B* и отдача в фазы *A* и *C*. Модуль тока обратной последовательности фазы *B* равен сумме модулей токов обратных последовательностей фаз *A* и *C*. Во время этого промежутка времени вентиль в «положительной» ветви моста фазы *B* (вентиль 2 на рис. 1) открыт и ток из фазы *B* течет в дроссель с зазором [12]. Чтобы цепь была замкнута (протекал ток), необходимо открыть вентили в «отрицательной» ветви моста фаз *A* и *C* (вентили 4 и 6 на рис. 1). Но одновременно открыть вентили фаз *A* и *C* нельзя – произойдет короткое замыкание. Следовательно, надо открыть сначала один, а потом другой. Поэтому необходимо правильно определить время открытия и закрытия этих вентилях. Время открытия и за-

крытия этих транзисторов находится из соотношения:

$$|I_{A2}|/|I_{C2}| = T_A/T_C,$$

где I_{A2} , I_{C2} – токи обратной последовательности фаз *A* и *C* за промежуток времени $T_A + T_C$; T_A , T_C – время нахождения в открытом состоянии транзисторов в фазах *A* и *C*.

Для облегчения фильтрации высших гармоник целесообразно повысить несущую частоту с 300 Гц ($50 \text{ Гц} \times 6$) до 12 600 ($300 \text{ Гц} \times 42$) [13].

Максимальная несущая частота определяется характеристиками используемых транзисторов и величиной потерь в них. Таким образом, алгоритм управления транзисторами основан на широтно-импульсном модулировании с несущей частотой в 12,6 кГц и организован таким образом, чтобы ток через дроссель не прерывался [14]. Мостовой преобразователь, изменяя угол включения и выключения транзисторов, осуществляет регулирование переменной составляющей мгновенной мощности трехфазной сети.

Компьютерная модель симметрирующего устройства

Для исследования разработанного симметрирующего устройства была создана компьютерная модель в пакете Matlab с использованием Simulink [15]. Общая схема компьютерной модели симметрирующего устройства представлена на рис. 2: блок Source имитирует работу трехфазной сети промышленной частоты, блок Filter – трехфазный Г-образный фильтр нижних частот, блок IGBT – трехфазный мост с IGBT-транзисторами, блок RL – дроссель с зазором, блок Control – система управления транзисторами, блок Series RLC

Возможные случаи соотношения токов

	1	2	3	4	5	6
I_{A2}	«-» (< 0)	«-» (< 0)	«-» (< 0)	«+» (> 0)	«+» (> 0)	«+» (> 0)
I_{B2}	«+» (> 0)	«+» (> 0)	«-» (< 0)	«-» (< 0)	«-» (< 0)	«+» (> 0)
I_{C2}	«-» (< 0)	«+» (> 0)	«+» (> 0)	«+» (> 0)	«-» (< 0)	«-» (< 0)

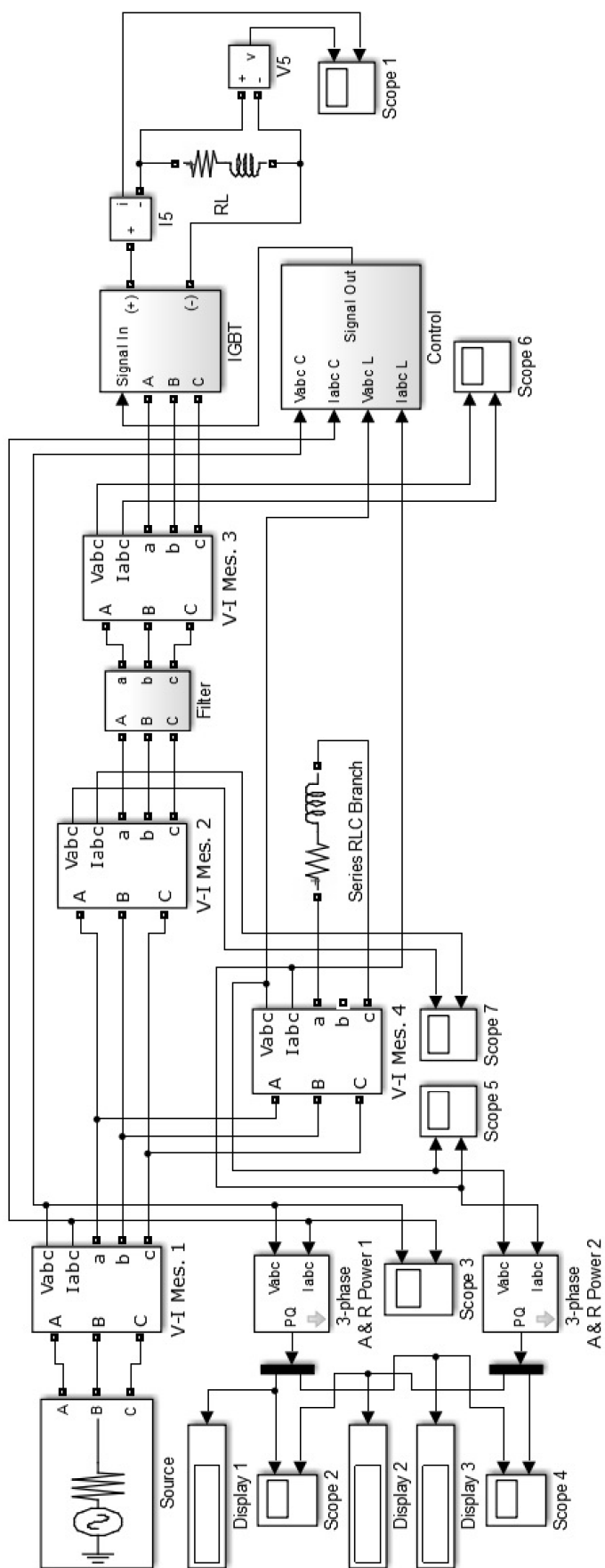


Рис. 2. Структурная схема модели симметрирующего устройства

Branch имитирует однофазную нагрузку, блоки V-I MES. 1–4, V5 и I5 – блоки измерения токов и напряжений, блоки 3-phase A&R Power 1, 2 – блоки измерения активных и реактивных мощностей, Scope 1–7 – осциллографы, Display 1–3 – цифровые дисплеи.

В блок Control поступают измеренные мгновенные значения напряжения сети, токов симметрирующего устройства и нагрузки. На основе полученных данных производится расчет токов обратной последовательности для каждой из фаз, после чего вычисляются поправочные (регулируемые) коэффициенты для подсистемы переключения транзисторов [16]. Переключение транзисторов происходит согласно вышеописанному принципу.

На рис. 3 представлена упрощенная схема системы управления переключением транзисторов (блок Control на рис. 2). На данной схеме опущены подсистемы вычисления токов обратной последовательности и системы синхронизации, представлены следующие блоки: I_{A2} , I_{B2} , I_{C2} – источники квантованных по уровню синусоидальных сигналов по форме полностью соответствующими синусоидам токов обратной последовательности; RS – источник пилообразного сигнала, причем период пилообразного сигнала равен периоду дис-

кретизации квантованного по уровню синусоидального сигнала; Comp 1–3 – блоки сравнения с нулем; Abs 1–3 – блоки, выдающие модуль исходного сигнала; Scope 1, 2 – блоки-осциллографы; NOT 1–9 – блоки логического отрицания; Prod 1–3 – блок арифметического умножения; OR 1–6 – блок логического «или»; RO 1–3 – блоки сравнения; AND 1–18 – блоки логического «и»; Out 1–6 – выходные блоки, блоки подачи сигналов на транзисторы 1–6 соответственно. На выходных блоках сигнал «1» соответствует состоянию «включено», а сигнал «0» – «выключено».

Далее рассмотрим несколько цепочек взаимодействия блоков системы управления переключением транзисторов – остальные подобны рассматриваемым. Квантованный по уровню синусоидальный сигнал, полностью соответствующий по фазе синусоиде тока обратной последовательности в фазе A с блока Ia поступает в блок Abs 1, на выходе которого получается модуль квантованного по уровню синусоидального сигнала, который поступает в блок Prod 1 совместно с сигналом с блока RS. Сигнал с блока Abs 1 также поступает в блок RO 3.

В блоке Prod 1 происходит умножение двух сигналов. На выходе получается пилообразный сигнал, вписанный в модуль квантованного по

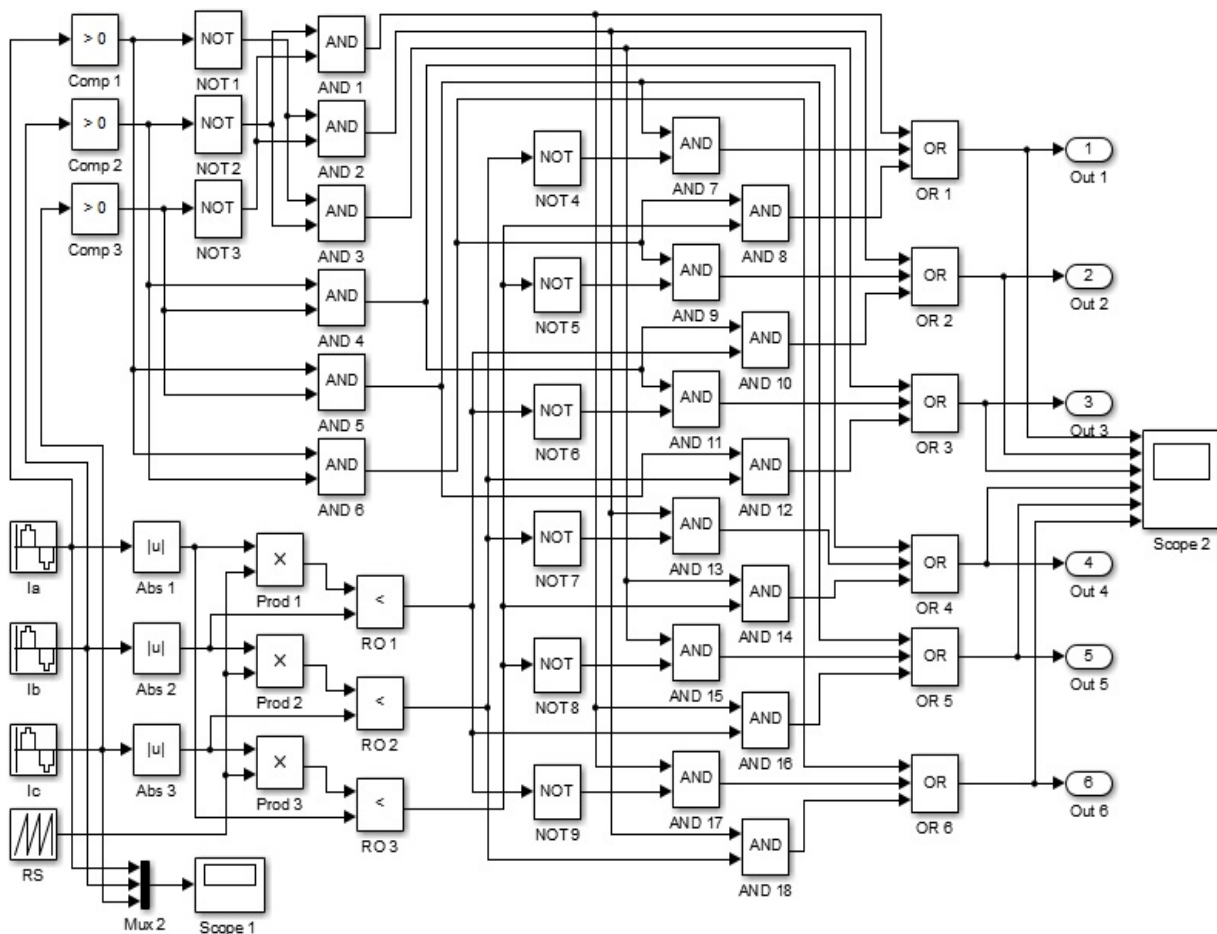


Рис. 3. Схема блока Control

уровню синусоидального сигнала, или же пилообразный сигнал, промодулированный квантованным по уровню синусоидальным сигналом.

Последний сигнал сравнивается в блоке RO 1 с выходным сигналом блока Abs 2 – модулем квантованного по уровню синусоидального сигнала с блока Ib. Сигнал с блока RO 1 поступает в блоки NOT 6 и 9, AND 10 и 16. Сигналы с блоков NOT 6 и 9 после логического отрицания поступают в блоки AND 11 и 17, соответственно. Сигналы в блоках AND 10, 11, 16 и 17 подвергаются логической операции «и» совместно с другими соответствующими сигналами, после чего поступают в блоки OR 2, 3, 5 и 6 соответственно. Далее эти сигналы подвергаются логической операции «или» совместно с другими соответствующими сигналами, после чего поступают на выход блока Control (см. рис. 2) – в блоки Out 2, 3, 5 и 6 соответствен-

но. Этой цепочке преобразования сигналов аналогичны цепочки: Ib, Abs 2, Out 1, 3, 4, и 6 (OR 1, 3, 4 и 6) и Ic, Abs 3, Out 1, 2, 4, и 5 (OR 1, 2, 4, и 5). Одновременно с этой цепочкой преобразования происходит следующее: сигнал с блока Ia поступает в блок Comp 1, где сравнивается с нулем, после чего поступает в блоки NOT 1, AND 5 и 6. Сигнал с блока NOT 1 после логического отрицания поступает в блоки AND 2 и 3 соответственно. Сигналы в блоках AND 2, 3, 5 и 6 подвергаются логической операции «и», совместно с другими соответствующими сигналами, после чего поступают в блоки AND 13, 18 и OR 2 (с блока AND 2), AND 14, 15 и OR 3 (с блока AND 3), AND 7, 12, и OR 5 (с блока AND 5), AND 8, 9 и OR 6 (с блока AND 6). Сигналы в блоках AND 7–9, 12–15 и 18 подвергаются логической операции «и» совместно с другими соответствующими сигналами и поступают в бло-

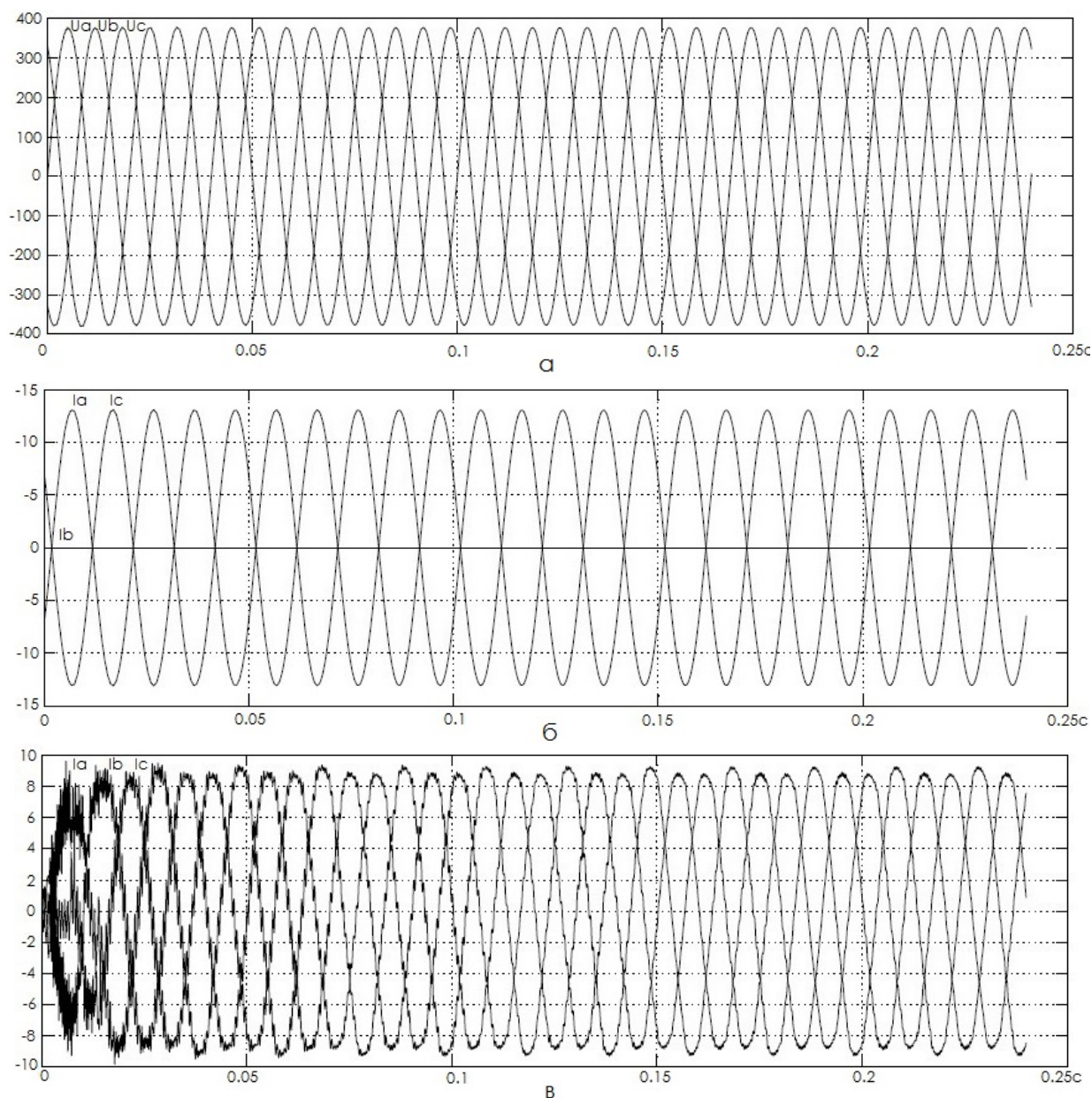


Рис. 4. Осциллограммы напряжения в сети (а), токов на нагрузке (б) и токов в сети после симметрирования (в)

ки OR 1–6, где они подвергаются логической операции «или» совместно с другими соответствующими сигналами, после чего поступают на выход блока Control (см. рис. 2) – в блоки Out 1–6. Этой цепочке преобразования сигналов аналогичны цепочки: Ib, Comp 2 – Out 1–6, и Ic, Comp 3 – Out 1–6.

Блоки Comp 1–3, NOT 1–3 и AND 1–6 реализуют разделение на шесть случаев в зависимости от знаков токов согласно таблице. Блоки Abs 1–3, Prod 1–3, RO 1–3 и RS производят увеличение несущей частоты переключений в 42 раза (до 12,6 кГц) и разделяют время работы соответствующих транзисторов пропорционально токам. Остальные блоки носят вспомогательный характер.

Одним из наиболее тяжелых режимов работы симметрирующего устройства является неполнофазный режим, который также заметно влияет на несимметрию напряжений. Рассмотрим режим работы устройства при однофазной нагрузке – фазы A и C имеют номинальную нагрузку активно-индуктивного характера, нагрузка в третьей фазе B отсутствует. Симметрирующее устройство выполняет перераспределение токов между фазами для получения симметричных токов и напряжений в фазах сети.

На рис. 4 представлены осциллограммы напряжений в сети и токов на нагрузке и в сети. Из рис. 4, б видно, что ток нагрузки однофазный. На рис. 4, в представлена осциллограмма токов в сети после симметрирования.

Например, согласно расчету, до симметрирования ток нагрузки индукционной печи ИЧТ-2,5 I_A и I_C равен по величине 1880 А, а $\cos \varphi = 0,18$. После симметрирования токи I_A, I_B, I_C равны 1085 А, а $\cos \varphi = 1$, то есть наряду с симметрированием происходит компенсация реактивной мощности.

Заключение

Несимметрия токов и напряжений приводит к ухудшению режимов работы практически всех потребителей электроэнергии. Так как активная мощность цепи, подключенная к источнику питания прямой последовательности и нагруженная на токи обратной последовательности равна нулю, то возможно выполнить симметрирование с помощью реактивных элементов, в том числе индуктивных элементов [17].

Построенная в пакете Matlab система управления с трехфазным мостом из транзисторных модулей и с нагрузкой в виде дросселя позволяет получить эффективное снижение несимметрии токов сети и соответственно устранить несимметрию напряжений питающей сети, это доказывают приведенные в статье осциллограммы.

Литература

1. Карташев, И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы ее кон-

троля и обеспечения / И.И. Карташев, Э.Н. Зувев. – М.: Изд-во МЭИ, 2001.

2. Розанов, Ю.К. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчинский // *Электротехника*. – 1998. – № 3. – С. 10–17.

3. ГОСТ Р 54149–2010. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2010.

4. Adrian, P. *Active Load Balancing in a Three-Phase Network by Reactive Power Compensation* / P. Adrian. – Romania: «Politehnica» University of Timisoara, 2012.

5. Чередниченко, В.С. Индукционные установки для нагрева и электрофизической обработки жидкостей в электромагнитных полях / В.С. Чередниченко. – М.: Электротехника, 2003.

6. Розанов, Ю.К. Современные методы регулирования качества электроэнергии средствами силовой электроники / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчинский, А.А. Кваснюк // *Электротехника*. – 1999. – № 4. – С. 28–32.

7. *Электрооборудование и автоматика электротермических установок: справ.* / А.П. Альтгаузен, И.М. Берещицкий, М.Я. Смелянский и др. – М.: Издат. центр «Энергия», 1978. – 360 с.

8. Han, B.M. *Reactive-power compensator using thyristor PWM current source inverter* / B.M. Han // *This paper appears in: Power Electronics Specialists Conference*, 2000.

9. Olivier, G. *Thyristor Current Source with an Improved Power Factor* / G. Olivier, V.R. Stefanovic // *Industrial Electronics, IEEE Transactions on nov.* – 1982.

10. Сидоров, С.А. Симметрирование трехфазных сетей при несимметричной нагрузке / С.А. Сидоров, Л.Э. Рогинская // *Интеграция образования, науки и производства в условиях многоуровневого профессионального образования: сб. науч. тр.* – Кумертау: филиал Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та, 2014. – С. 167–169.

11. Зиновьев, Г.С. *Основы силовой электроники* / Г.С. Зиновьев. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – 199 с.

12. *Управление потоками электроэнергии в преобразователе со сверхпроводящим индуктивным накопителем* / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчинский, М.Г. Лепанов, М.Г. Киселёв // *Электричество*. – 2008. – № 8. – С. 22–27.

13. Коротченко, Ю.И. *Частотные фильтры электрических сигналов: пассивные фильтры* / Ю.И. Коротченко. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. – 21 с.

14. Ивакин, В.Н. *Исследование характеристик сверхпроводникового индуктивного накопителя с преобразователем на основе инвертора напряжения* / В.Н. Ивакин // *Электротехника*. – 2001. – № 9. – С. 48–53.

15. Черных, И.В. *Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems*

и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

16. Характеристики и конструкции вентильных преобразователей для сверхпроводящих накопителей энергии / Б.М. Антонов, А.А. Кувшинов, Б.Д. Курносков и др. // *Электричество*. – 1995. – № 8. – С. 23–31.

17. Сидоров, С.А. Фазопреобразовательное устройство для несимметричных нагрузок / С.А. Сидоров, Л.Э. Рогинская // *Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение: межвуз. сб. науч. тр.* – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2013. – С. 121–125.

Сидоров Сергей Анатольевич, аспирант кафедры «Электромеханика», Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; 79373414900@yandex.ru.

Рогинская Любовь Эммануиловна, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика», Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; 79373414900@yandex.ru.

Поступила в редакцию 1 июля 2014 г.

**Bulletin of the South Ural State University
Series “Power Engineering”
2014, vol. 14, no. 3, pp. 33–40**

CONTROLLED BALANCING DEVICE WITH INDUCTIVE ENERGY STORAGE

S.A. Sidorov, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation,
79373414900@yandex.ru,

L.E. Roginskaya, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation,
79373414900@yandex.ru

The paper covers the problem of voltage unbalance in supply networks. The authors give overview of existing ways to remove current unbalance and observe benefits and drawbacks of these ways. The paper proposes usage of a balancing device with inductive energy storage based on controlled energy exchange between network and reactor by means of three-phase bridge converter. The paper also presents diagrams of the balancing device, power unit with IGBT valves and control unit, and describes their functioning.

Study of the balancing device was conducted with the use of computer model created with Matlab/Simulink program. The paper presents general arrangement of the balancing device computer model, description of its units and several chains of their interaction.

The authors observe open-phase operating mode of the balancing device and give oscillograms of mains voltage and currents at using of balancing device.

Matlab/Simulink-generated controlling system with three-phase bridge composed of transistor modules and reactor allows of reducing unbalance of currents and thus of eliminating unbalance of supplying network voltage, that is proven by the oscillograms in given the paper.

Keywords: voltage unbalance, current unbalance, balancing device, reactor, ratio of currents.

References

1. Kartashev I.I., Zuev E.N. *Kachestvo elektroenergii v sistemah elektrosnabzheniya. Sposoby eye kontrolya i obespecheniya* [Quality of Electric Power in Power Supply Systems. Ways of Monitoring and Enforcement]. Moscow, Izdatelstvo MEI, 2001.
2. Rozanov Y.K., Ryabchinskiy M.V. [Contemporary Methods Improving Power Quality (Analytical Review)]. *Russian Electrical Engineering*, 1998, no. 3, pp. 10–17. (in Russ.)
3. GOST R 54149–2010. *Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [Quality Standards of Electrical Energy in Power Supply Systems for General Use]. Moscow, Standartinform, 2010.
4. Adrian P. Active Load Balancing in a Three-Phase Network by Reactive Power Compensation, “Politehnica” University of Timisoara, Romania, 2012.
5. Cherednichenko V.S. [Induction Heating Installation and Electrophysical Treatment Fluids in Electromagnetic Fields]. *Russian Electrical Engineering*, 2003. (in Russ.)

6. Rozanov Y.K., Ryabchinskiy M.V., Kvasnyuk A.A. [Contemporary Methods Control Power Quality Means Power Electronics]. *Russian Electrical Engineering*, 1999, no. 4, pp. 28–32. (in Russ.)
7. Altgauzen A.P. *Elektrooborudovaniye i avtomatika elektrotermicheskikh ustanovok: spravochnik* [Electric and Automatic Electrothermal Installations: Reference Book]. Moscow, Izdatelskiy tsentr “Energiya”, 1978. 360 p.
8. Han B.M. Reactive-Power Compensator Using Thyristor PWM Current Source Inverter, This paper appears in: Power Electronics Specialists Conference, 2000.
9. Olivier G., Stefanovic V.R. Thyristor Current Source with an Improved Power Factor. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on nov*, 1982.
10. Sidorov S.A., Roginskaya L.E. [Balancing of Three-Phase Networks with Unbalanced Load]. *Trudy nauchnoy konferentsii “Integratsiya obrazovaniya, nauki i proizvodstva v usloviyakh mnogourovnevnogo professionalnogo obrazovaniya”* [Proc. Scien. Conf. “Integration of Education, Science and Production in a Multi-Level Professional Education”]. Kumertau, 2014, pp. 167–169. (in Russ.)
11. Zinovyev G.S. *Osnovy silovoy elektroniki* [Fundamentals of Power Electronics]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ., 2004. 199 p.
12. Rozanov Y.K., Ryabchinskiy M.V., Lapanov M.G., Kiselev M.G. [Control Power Flows in the Inverter with a Superconducting Inductive Storage]. *Electrical Technology Russia*, 2008, no. 8, pp. 22–27. (in Russ.)
13. Korotchenko Y.I. *Chastotnyye filtry elektricheskikh signalov: passivnyye filtry* [Frequency Filters Electric Signals: Passive Filters]. Orenburg, Orenburg State University Publ., 2005. 21 p.
14. Ivakin V.N. [Investigation of the Characteristics of Superconducting Inductive Storage Converter Based Voltage Inverter]. *Russian Electrical Engineering*, 2001, no. 9, pp. 48–53. (in Russ.)
15. Chernykh I. V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of Electrical Devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press; St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p.
16. Antonov B.M., Kuvshinov A.A., Kurnosov B.D. [Characteristics and Design of Valve Inverters for Superconducting Energy Storage]. *Electrical Technology Russia*, 1995, no. 8, pp. 23–31. (in Russ.)
17. Sidorov S.A., Roginskaya L.E. [Phase Converter Device for Unbalanced Loads]. *Trudy nauchnoy konferentsii “Elektroenergeticheskiye sistemy i seti. Energoberezheniye”* [Proc. Scien. Conf. “Power Systems and Networks. Energy Saving”]. Ufa, 2013, pp. 121–125. (in Russ.)

Received 1 July 2014