

УДК 621.316.72

А.И. Чивенков, В.В. Севастьянов

**СИЛОВОЙ МОДУЛЬ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы, посвященные созданию и исследованию устройства для регулирования величины и направления межсетевых потоков мощности в составе интегрированной системы управления электрическими сетями распределенной энергосистемы. Предложен алгоритм работы системы управления устройством. Приведены результаты моделирования в различных режимах работы регулируемых электрических сетей.

*Ключевые слова:* гибкая система электропередачи, межсетевой поток мощности, компенсация реактивной мощности, регулируемый инвертор напряжения, силовой активный фильтр, синхронная система координат, имитационная модель.

В понятие «разработка типовых схем электрических сетей и распределительных устройств распределенной системы электроснабжения» все чаще вводится термин «интеллектуальные электрические сети» (Smart Grid) [1]. Под данным термином понимаются электросети, имеющие глубокую степень автоматизации, позволяющие управлять перетоками активной и реактивной мощностей, а также допускающие интеграцию малой и распределенной генерации в общую энергосистему. Данная система должна автоматически регулировать подачу электроэнергии в зависимости от режима потребления и требует разработки автоматизированной системы управления узлом нагрузки.

Одной из составляющих SmartGrid являются гибкие системы передачи переменного тока – Flexible Alternative Current Transmission System (FACTS) [2]. Эти системы направлены на регулирование величины и направления потоков мощности электрической энергии разветвленной сети единой энергетической системы, а также на улучшение параметров качества напряжения питающих цепей электроприемников. В свою очередь, системы FACTS для выполнения упомянутых функций базируются на таком техническом устройстве, как контроллер межсетевого потока мощности – Interline Power Flow Controller (IPFC) [3].

В соответствии с существующими тенденциями была поставлена задача исследования путей создания интегрированной системы управления электрическими сетями (ИСУЭС) распределенной энергосистемы. Вопросы взаимодействия традиционных и возобновляемых источников с сетью рассматривались в [4]. В последующих исследованиях они получили дальнейшее развитие. Работа выполнялась при финансовой поддержке министерства образования и науки РФ (ГК № 16.526.12.6016 от 11.10.11 г.).

В соответствии с существующими требованиями к силовому модулю и с учётом проведенного анализа возможных технических решений [5], наиболее целесообразной и перспективной схемотехникой силовой части была признана топология, построенная на базе трехфазного инвертора напряжения (ИН).

Исследования проводились с использованием имитационного моделирования в пакете прикладных программ MATLAB Simulink.

Имитационная модель силового модуля ИСУЭС приведена на рис. 1. В его состав входят два инвертора напряжения Inverter\_1 и Inverter\_2, объединенных общим емкостным накопителем C\_1, C\_2 (Series RLC Branch). Инверторы выполнены на базе трехфазного моста с IGBT- транзисторами (Universal Bridge) и индуктивно-емкостным фильтром (3-Phase Series RLC Branch) на выходе. Регистрация токов и напряжений в фазах инверторов выполняется измерителями M\_inv\_1 и M\_inv\_2 (Three-Phase V-I Measurement). На параллельную работу с сетью инверторы включаются коммутаторами Breaker\_1 и Breaker\_2 (Ideal Switch).

Дальнейшей задачей являлась разработка соответствующего алгоритма управления инверторами напряжения, позволяющего обеспечить взаимодействие инверторов между собой и соответствующими сетями в процессе регулирования потоков активной и реактивной мощности в узле нагрузки.

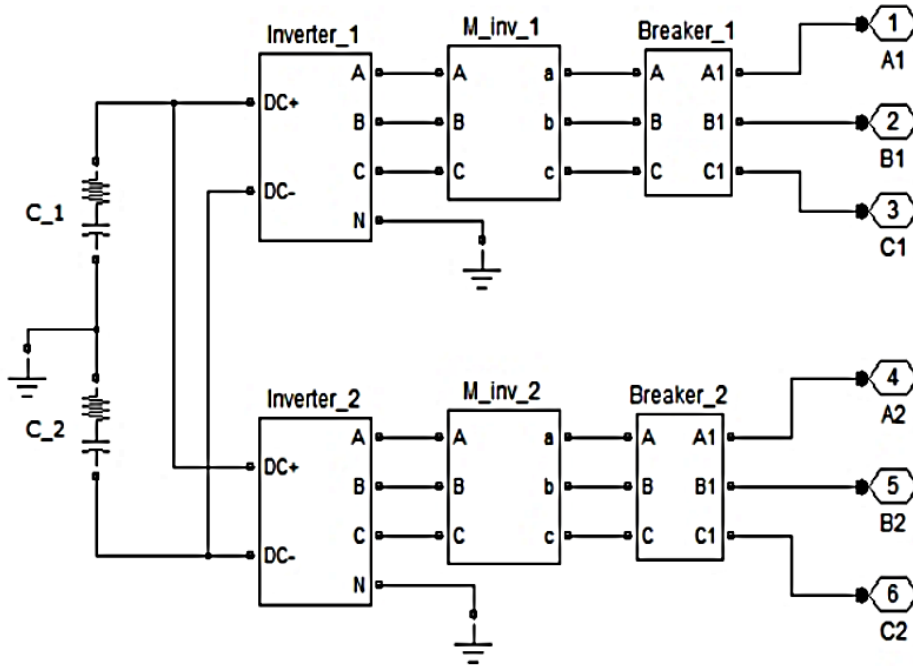


Рис. 1. Имитационная модель силового модуля ИСУЭС

В настоящее время наиболее часто используются два метода управления инверторами с функциями компенсации и регулирования составляющих мощности сети. Это метод «мгновенной мощности» и метод управления в синхронной системе координат путем преобразований Парка-Горева.

Метод «мгновенной мощности» основан на вычислении мощности нагрузки с использованием токов и напряжений нагрузки в стационарной ортогональной системе координат  $\alpha - \beta$ . Недостатком этого метода является непосредственное использование проекций обобщенного вектора напряжения сети при вычислении токов задания. В переходных режимах это может привести к колебательному процессу выходного тока и напряжения инвертора, что и наблюдалось в процессе имитационного моделирования.

Поэтому в дальнейшем был принят для реализации метод управления в синхронной системе координат. Метод основан на прямом и обратном преобразовании Парка-Горева. Прямое преобразование заключается в нахождении проекций обобщенного вектора тока или напряжения на оси ортогональной системы координат, вращающейся синхронно с вектором напряжения сети:

$$\begin{aligned}
 i_d &= \frac{2}{3} \left[ i_a \cdot \sin \theta + i_b \cdot \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cdot \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right]; \\
 i_q &= \frac{2}{3} \left[ i_a \cdot \cos \theta + i_b \cdot \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cdot \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right]; \\
 i_o &= \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $\theta = \omega_1 \cdot t$  – значение угла поворота системы координат, вращающейся с частотой  $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$ , относительно неподвижной системы координат.

В синхронной системе координат постоянные составляющие проекций на оси  $d-q$  будут соответствовать активной и реактивной составляющим тока первой гармоники.

Обратное преобразование Парка-Горева осуществляется в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} i_a &= i_d \cdot \sin\theta + i_q \cdot \cos\theta + i_o ; \\ i_b &= i_d \cdot \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_q \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_o ; \\ i_c &= i_d \cdot \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_q \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_o . \end{aligned} \quad (2)$$

Относительной трудностью в реализации данного метода является необходимость синхронизации с основной гармоникой напряжения сети сигналов  $\cos\theta$  и  $\sin\theta$ . В данном случае для синхронизации принята система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Управление реализовано по методу одношагового прогноза [7]. Ток в фазах формируется как:

$$i_n(t) = \frac{1}{L} \int (u_c(t) - u_n(t)) dt ,$$

где  $i_n(t)$  – ток инвертора,  $u_c(t)$ ,  $u_n(t)$  – фазное напряжение сети и инвертора,  $L$  – индуктивность дросселя фильтра инвертора.

Напряжение инвертора вычисляется на каждом такте модуляции с целью обеспечения равенства среднего значения генерируемого тока и тока задания:

$$\overline{u_n} = \overline{u_c} - L \frac{\overline{i_{ref}} - \overline{i_c}}{T_m} , \quad (3)$$

где  $T_m$  – период модуляции;  $\overline{u_n}$ ,  $\overline{u_c}$ ,  $\overline{i_{ref}}$ ,  $\overline{i_c}$  – обобщенные векторы соответственно напряжения инвертора, напряжения сети, тока задания и тока сети в синхронной системе координат  $d-q$ .

Таким образом, управление фазными токами инвертора осуществляется посредством формирования соответствующих напряжений.

Система управления инверторами, реализующая упомянутые ранее закономерности, приведена на рис. 2. Для преобразования трехфазных систем токов и напряжений сети ( $I_{gred}$ ,  $U_{gred}$ ) в двухфазную ортогональную синхронную систему координат  $I_d - I_q$ ,  $U_d - U_q$  построены блоки координатных преобразователей  $abc\_dq0$  и  $abc\_dq1$ . Они выполняют операции в соответствии с (1). Для работы координатных преобразователей необходимы сигналы синхронизации  $\sin\theta$  и  $\cos\theta$ . Эти сигналы вырабатываются блоком фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) «PLL».

Для каждой из составляющих обобщенного вектора выделен свой канал обработки. Выбор составляющих обеспечивается селекторами сигналов  $Selector1 \dots Selector4$  из библиотеки «*Simulink/Signal Routing*». Для выделения постоянных составляющих проекций по осям  $d-q$ , соответствующих активной и реактивной составляющим тока первой гармоники, построены фильтры низкой частоты  $Filter_I$ ,  $Filter_U$ .

В соответствии с выражением (3), полученные токи сети  $I_d$ ,  $I_q$  необходимо сравнить с токами задания  $I_{d\_ref}$ ,  $I_{q\_ref}$ . Физически значениями данных переменных являются, соответственно, необходимая амплитуда активной составляющей и необходимая амплитуда реактивной составляющей тока сети. Для этого на каждом шаге модуляции определяется разность тока задания и текущего тока сети с помощью сумматоров «*Sum1*» и «*Sum2*» из библиотеки «*Simulink/Math Operations*».

Разность токов умножается на коэффициент, равный отношению  $L/T_m$ , формируемый блоками «Gain1» и «Gain2» из библиотеки «Simulink/Math Operations», где  $F_m$  – частота модуляции,  $L$  – индуктивность фильтра инвертора.

Далее, в соответствии с выражением (3) на базе сумматоров «Sum3» и «Sum4» вычисляются составляющие напряжения управления инвертором. Координатный преобразователь  $dq0\_abc$  выполняет обратное преобразование переменных из синхронной системы координат в трехфазную систему в соответствии с (2). Таким образом, получаем напряжение управления по каждой из фаз инвертора. Импульсы управления ключами формируются путем классической ШИМ в блоке  $PWM\_modulation$ .

Для включения источника напряжения параллельно сети необходимо выполнить мероприятия по синхронизации с сетью. В данном случае равенство частот напряжений обеспечивается блоком ФАПЧ «PLL». В соответствии с алгоритмом управления в качестве задания инвертору указываются необходимые составляющие обобщенного вектора тока сети. Поэтому, если перед включением в параллель инвертору будет задан текущий ток сети, то инвертор не должен будет влиять на сеть. Это предполагает режим холостого хода, в котором инвертор генерирует напряжение, по амплитуде и фазе равное напряжению сети. Это позволяет подключить инвертор параллельно сети без уравнивающих токов.

Режим синхронизации поддерживается программной записью составляющих текущего тока сети в регистры Const1 и Const2. Этот режим продолжается до тех пор, пока внешний управляющий сигнал  $Start$  является пассивным. Если данный сигнал становится активным, то система переходит в режим отработки внешних заданий при параллельной работе с сетью.

В данном модуле ИСУЭС два инвертора напряжения имеют один общий емкостный накопитель. Для нормального функционирования модуля напряжение накопителя в процессе работы должно оставаться неизменным. Это делает режимы работы инверторов взаимозависимыми. Если один из инверторов предает мощность в сеть, параллельно с которой он работает, то он будет являться ведущим. Второй инвертор будет подчиненным, и его режим работы будет определяться условием постоянства напряжения на емкостном накопителе.

В процессе работы были определены области соответствующих режимов работы ведущего и подчиненного инвертора. Они приведены на рис. 3.

На диаграмме концы векторов обозначены дробью, числитель которой соответствует относительному значению активной составляющей, а знаменатель – реактивной составляющей тока инвертора. Режимы работы ведущего инвертора охватываются областью  $0/0\_1/0\_1/-1\_0/-1\_0/0$ . Соответствующие режимы работы подчиненного инвертора – областью  $0/0\_1/0\_1/-1\_0/1\_0/0$ . Определение токов задания подчиненного инвертора выполняется в соответствии с выражениями, в которых индекс «master» соответствует токам задания ведущего инвертора, а индекс «slave» – токам задания подчиненного инвертора:

$$\begin{aligned} I_{d\_master} &= I_{d\_ref} ; \\ I_{q\_master} &= I_{q\_ref} ; \\ I_{d\_i1} &= -I_{d\_ref} + 1 ; \\ I_{q\_i1} &= -I_{q\_ref} - 1 ; \\ I_{d\_i2} &= -I_{d\_i1} ; \\ I_{q\_i2} &= -I_{d\_i1} - I_{q\_i1} ; \\ I_{d\_slave} &= -I_{d\_i2} + 1 ; \\ I_{q\_slave} &= -I_{q\_i2} - 1 . \end{aligned}$$

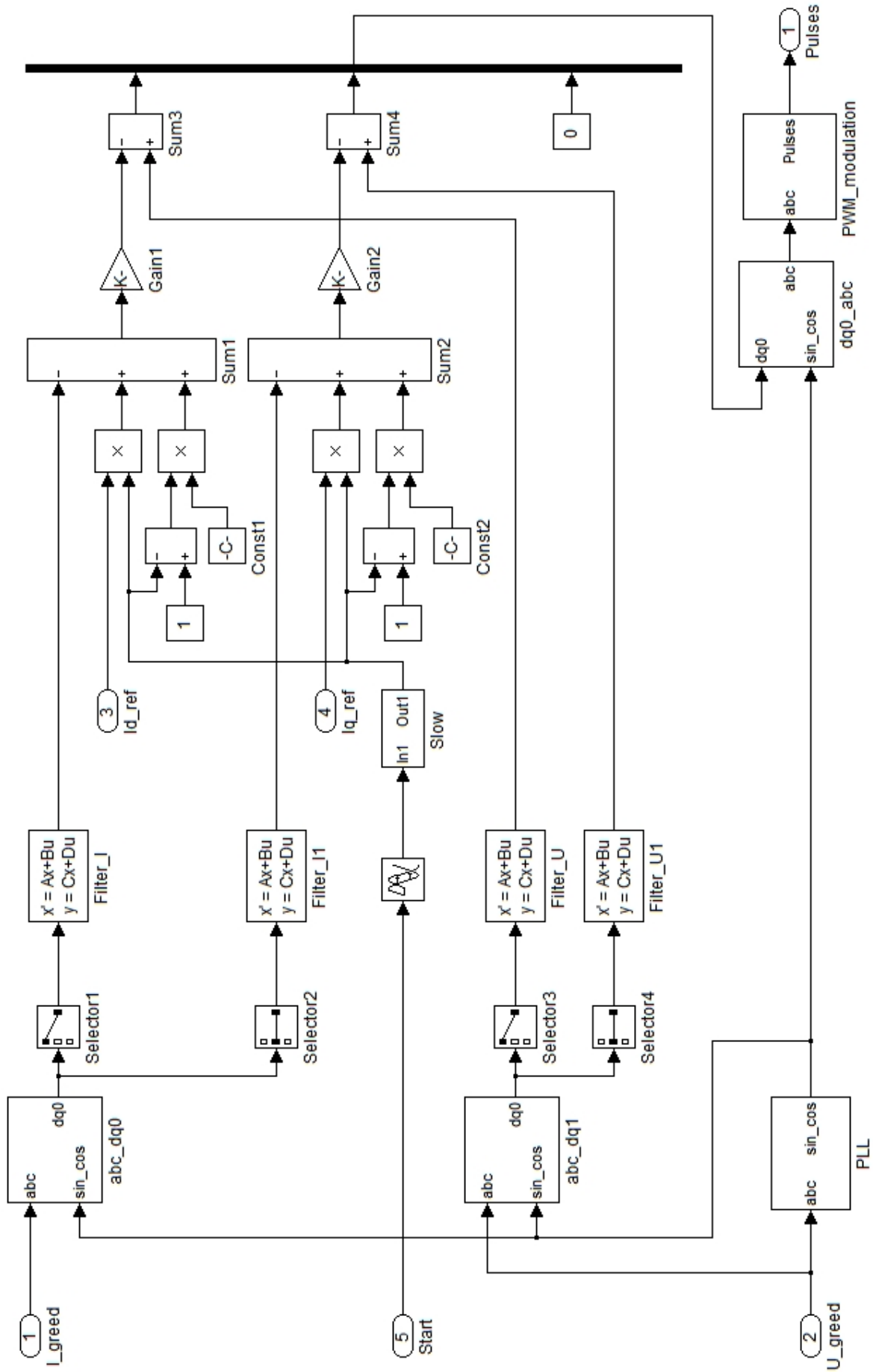


Рис. 2. Имитационная модель системы управления инвертором напряжения

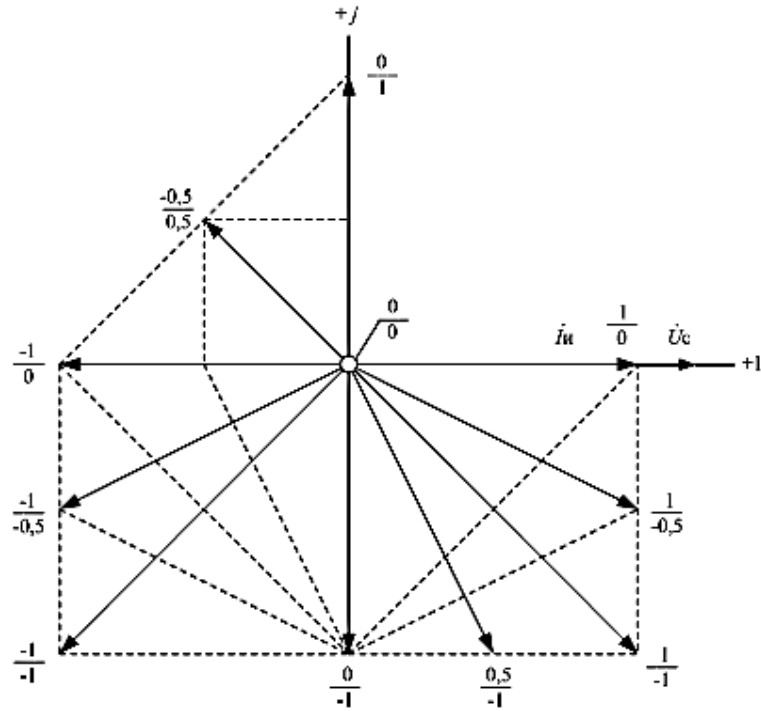


Рис. 3. Диаграмма соответствия токов ведущего и подчиненного инверторов

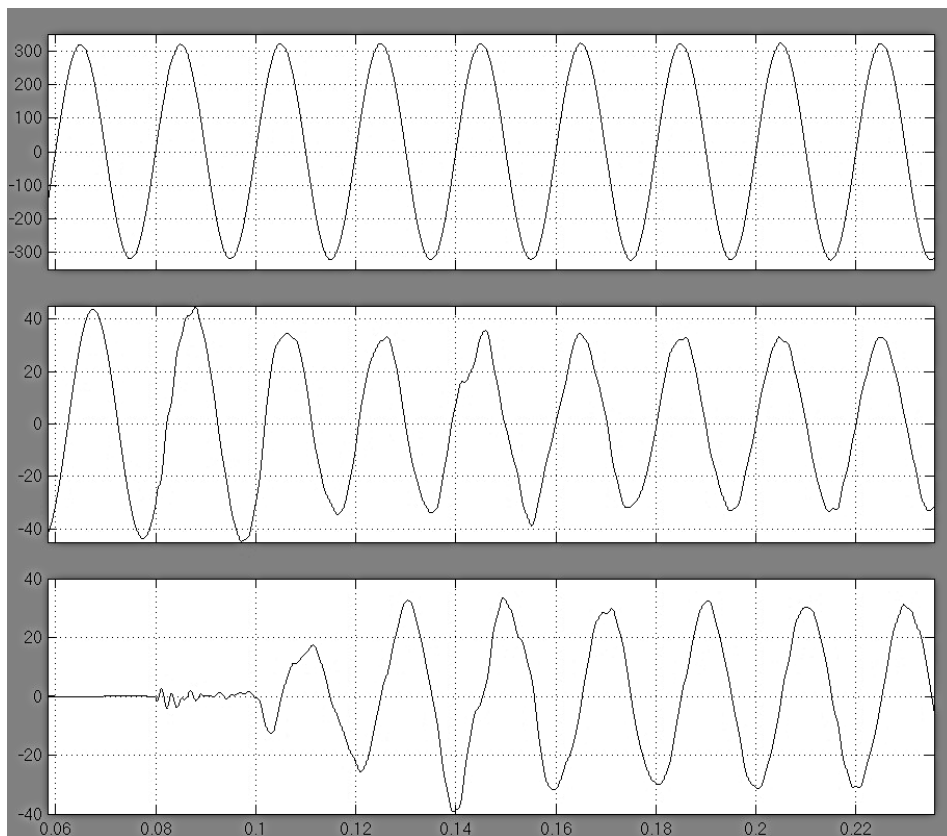


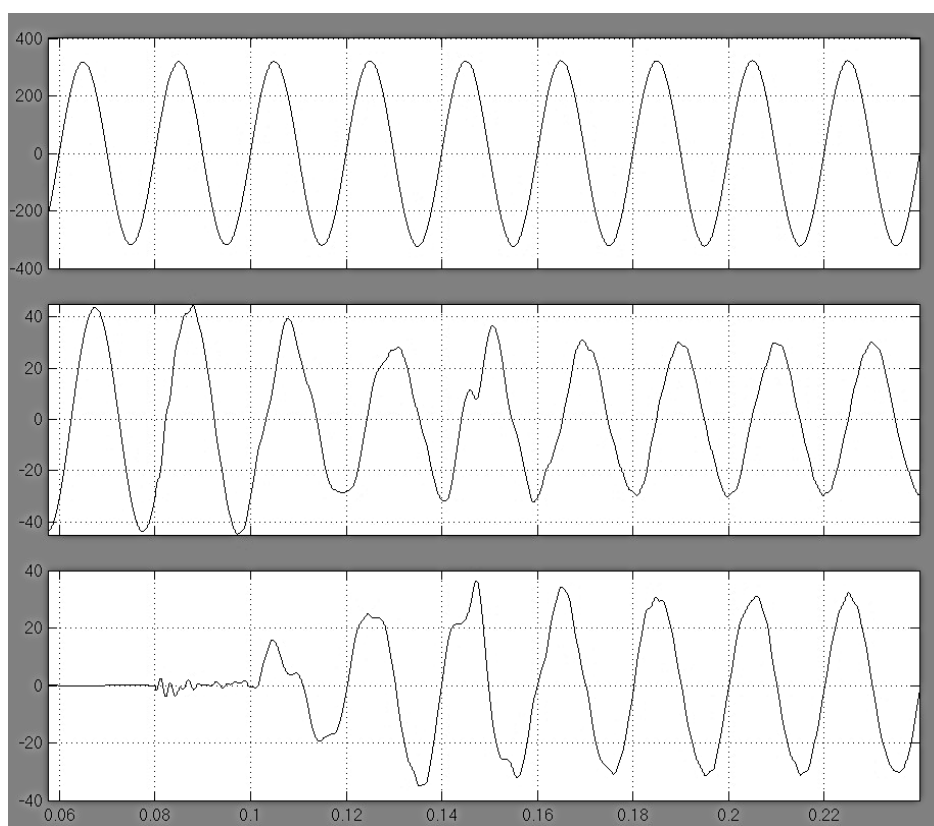
Рис. 4. Осциллограммы (сверху вниз) напряжения сети (В), тока сети (А) и тока инвертора (А) при генерации инвертором реактивного тока (задание  $I_d = 1, I_q = 0$ )

Для исследования разработанного силового модуля ИСУЭС проводилось имитационное моделирование переходных и стационарных режимов в процессе взаимодействия инверторов с соответствующими сетями.

Экспериментально проверялась работа инвертора в режиме генерации реактивного тока, равного реактивному току нагрузки: задание  $I_d = 1$ ,  $I_q = 0$ . Это соответствует компенсации реактивной мощности сети. Осциллограммы данного режима приведены на рис. 4.

До включения инвертора (0,08 секунды) ток сети был активно-индуктивным в соответствии с параметрами нагрузки. После включения инвертора и выхода его на заданный режим (после 0,18 секунды) ток сети становится чисто активным, а ток инвертора носит чисто индуктивный характер.

Исследовалась работа инвертора в режиме генерации активного тока, равного активному току нагрузки: задание  $I_d = 0$ ,  $I_q = 1$ . Это соответствует разгрузке сети по активной мощности. Осциллограммы данного режима приведены на рис. 5.



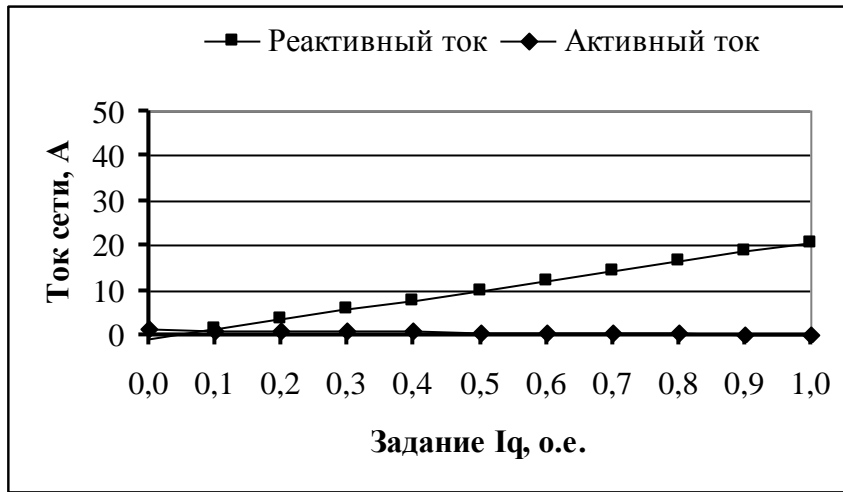
**Рис. 5. Осциллограммы (сверху вниз) напряжения сети (В), тока сети (А) и тока инвертора (А) при генерации инвертором активного тока (задание  $I_d = 0$ ,  $I_q = 1$ )**

В рамках экспериментального исследования были получены регулировочные характеристики при изменении задания по реактивной и активной составляющим тока сети.

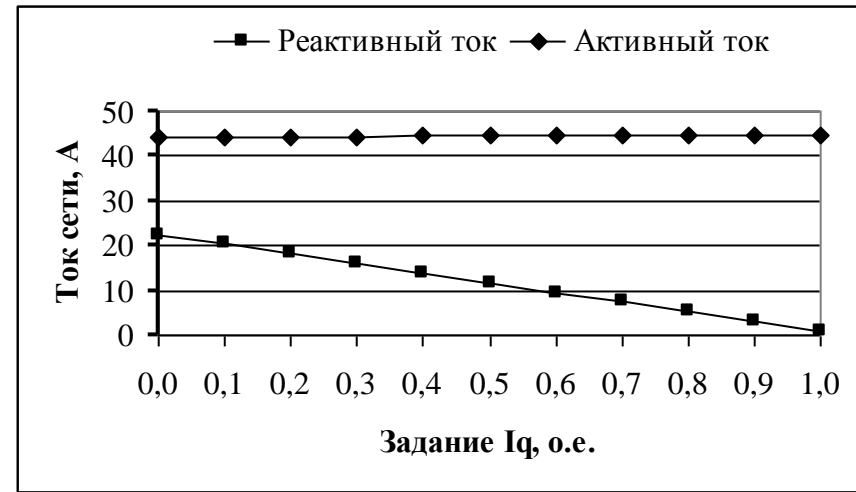
Графические зависимости при изменении задания по реактивному току для основной и вторичной сети приведены на рис. 6. Характеристики показывают наличие регулируемого потока реактивной мощности из вторичной сети в основную.

Графические зависимости при изменении задания по активному току для основной и вторичной сети приведены на рис. 7. Характеристики показывают наличие регулируемого потока активной мощности из вторичной сети в основную.

В ходе выполнения работ подтверждены начальные предпосылки возможности регулирования величин и направлений потоков мощностей в соответствии с установленными параметрами управления качеством электроэнергии распределенной системы электроснабжения интеллектуальных электрических сетей.

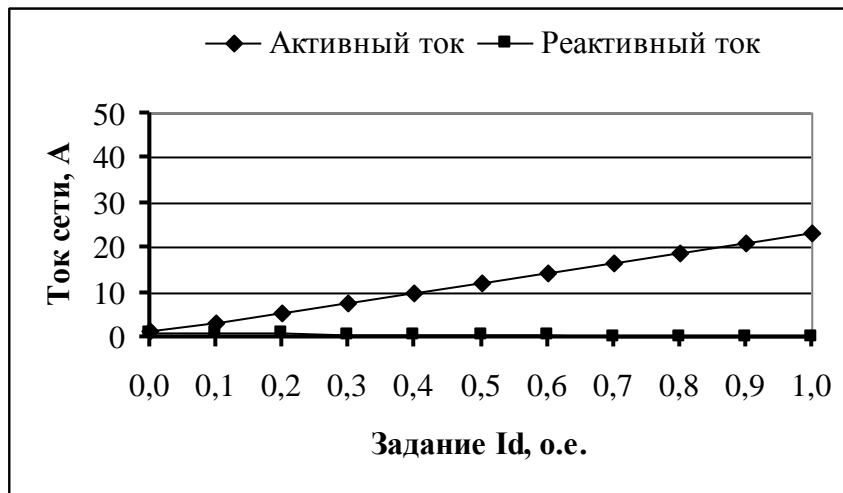


а)

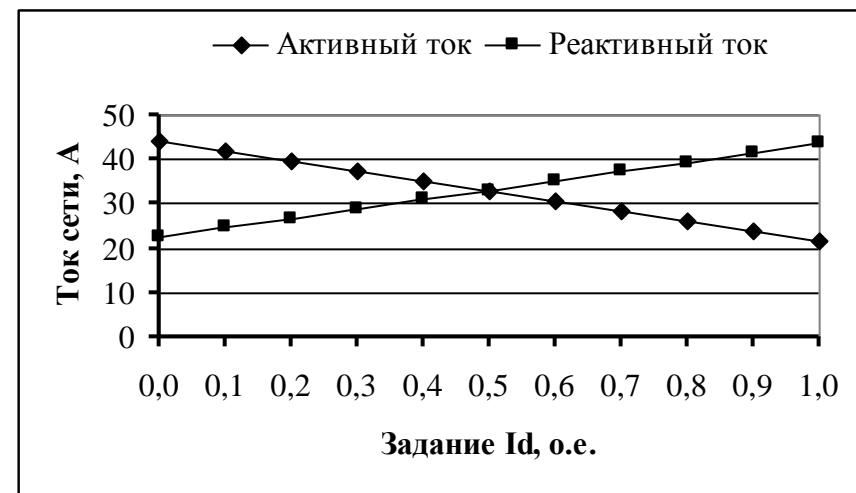


б)

Рис. 6. Регулировочные характеристики основной сети (а) и вторичной сети (б) по реактивному току задания



а)



б)

Рис. 7. Регулировочные характеристики основной сети (а) и вторичной сети (б) по активному току задания



**Библиографический список**

1. Интеллектуальные сети: российский взгляд. Энергоэксперт. 2009. № 4.
2. **Padiyar, K. R.** FACTS controllers in power transmission and distribution / K.R. Padiyar. – New Age International (P) Ltd. Publishers, 2007. – 532 с.
3. **Sasan Salem, Sood V. K.** Simulation and controller design of an Interline Power Flow Controller in EMTP RV / Sasan Salem // International Conference on Power Systems Transients in Lyon, France on June 4-7, 2007.
4. **Чивенков, А.И.** Определение структурной схемы устройства сопряжения модульного типа / А.И. Чивенков [и др.] // Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. Малая энергетика, Т. 23. 2008. С. 211-219.
5. **Зиновьев, Г.С.** Силовая электроника: учеб. пособие, углубленный курс / Г.С. Зиновьев. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2012. – 667 с.
6. **Черных, И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 288 с.
7. **Смирнов, М.И.** Пуско-регулирующее устройство на базе статического компенсатора реактивной мощности // Автореферат дис. на соиск. уч. степ. к.т.н. / М.И. Смирнов. – М.: МЭИ, 2007. – 20 с.

*Дата поступления*

*в редакцию 19.04.2013*

**A.I. Chyvenkov, V.V. Sevastyanov**

**THE POWER MODULE OF INTEGRATED CONTROL SYSTEM BY POWER GRIDS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev

**Purpose:** Creation and research of device for interline power flow control in load nodes of the distributed electric networks.

**Design/methodology/approach:** The power module uses two current source converters that share a common dc-link. Each current source converters injects a current - with controllable amplitude and phase angle - into the power transmission line. Each current source converters provides parallel reactive power compensation for an individual line and it can also supply/absorb active power to/from the common dc-link.

**Findings:** Offered hardware facilities and control system algorithm of device for interline power flow control. Demonstrated simulation results in differently power module and power grids regimes.

**Research limitations/implications:** Research limitations – electric power industry. The study of an IPFC system with two parallel lines has demonstrated the flexible control of active/reactive power to assist in the transmission system.

**Originality/value:** Thus, the power module has an additional degree of freedom to control active power flow in the power system when compared to a traditional compensator. This capability makes it possible to transfer power from over- to under-loaded lines, reduce the line resistive voltage drop, and improve the stability of the power system.

*Key words:* flexible transmission system, interline power flow, reactive power compensation, adjustable voltage inverter, power active filter, synchronous reference frame, simulation model.