

УДК 621.314.222.6

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ АКТИВНЫМИ СИЛОВЫМИ ФИЛЬТРАМИ**О.В. Нос, Е.С. Кучер, А.В. Бакляк***Новосибирский государственный технический университет*

Среди всего многообразия различных способов снижения влияния преобразовательной техники на качество электрической энергии можно выделить несколько основных направлений, из которых наиболее перспективными являются подходы, основанные на использовании внешних фильтрокомпенсирующих устройств. Традиционно для обеспечения гармонического закона изменения токов и напряжений применяют пассивные корректирующие RLC -цепи соответствующего порядка, шунтирующие нагрузку по цепи прохождения пульсационных составляющих, полупроводниковые активные силовые фильтры (АСФ), осуществляющие предварительное искажение трехфазных переменных, или их различного рода совместные комбинации. При этом алгоритмы активной фильтрации обладают рядом преимуществ по отношению к методам пассивной коррекции, к числу которых, например, можно отнести низкий уровень собственных среднеквадратичных потерь, автоматическую подстройку к изменяющимся режимам работы электрооборудования и конфигурации питающей сети, полную инвариантность к температурному дрейфу параметров и т. д., что в конечном итоге полностью снимает какие-либо ограничения по области практического применения. Данная статья посвящена анализу алгоритмических принципов построения систем управления последовательно-параллельными АСФ с использованием p - q теории мгновенной мощности, а также аналитических методов, основанных на выделении из нелинейной трехфазной системы прямой последовательности фаз по основной гармонике.

Ключевые слова: активный силовой фильтр, компенсационные воздействия, алгоритм компенсации.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-77-87

Введение

Широкое распространение полупроводниковых преобразователей электрической энергии в составе различного рода технологического оборудования, частотно-регулируемых электроприводов, цифровой вычислительной и копировальной техники и т. д. приводит к искажению синусоидальной формы сигналов в трехфазной сети, что неблагоприятно сказывается на других потребителях электрической энергии. В настоящее время наиболее эффективным подходом к решению прикладной задачи улучшения гармонического состава напряжений и токов является преднамеренная генерация в систему электроснабжения силовых компенсационных воздействий, формируемых на выходе АСФ [1, 2], которые в зависимости от конечных целей энергосбережения [3] функционируют в режимах быстродействующего источника напряжения (последовательный АСФ) или тока (параллельный АСФ) [4], причем каждый из них обладает собственными достоинствами и недостатками. Так, например, в первом случае мультигармонический состав фазных токов остается неизменным и не подвергается какой-либо коррекции, а параллельный АСФ обеспечивает приемлемое качество компенсации неэффективных потоков электрической энергии только в случае синусоидального

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России и DAAD в рамках международного научно-образовательного сотрудничества по программе «Михаил Ломоносов».

симметричного закона изменения трехфазных напряжений. В этой связи наиболее предпочтительным вариантом технической реализации алгоритмов активной фильтрации является совместная последовательно-параллельная комбинация двух типов АСФ [5], которая в зарубежных литературных источниках получила название Unified Power Quality Conditioner (UPQC) [4, 6, 7]. В данной статье рассматриваются алгоритмические принципы формирования компенсационных воздействий на выходе UPQC, основанные на математическом описании трехфазных переменных во временной и частотной областях.

1. Последовательно-параллельный АСФ

UPQC структурно состоит из системы управления **CS**, двух автономных инверторов напряжения **VSI1** и **VSI2**, объединенных между собой по звену постоянного тока через силовой емкостной фильтр **C** и аккумуляторную батарею **GB**, автоматического выключателя **Q**, а также датчиков тока **UA** и напряжения **UV**, что иллюстрирует рис. 1 [6, 8]. Первый инвертор **VSI1** через согласующий трансформатор **TV** осуществляет одновременное регулирование амплитуды u_m и углового сдвига трехфазных напряжений u_s источника **TS**, а также исключает в их спектре высокочастотные гармоники. В свою очередь **VSI2** подсоединяется параллельно нелинейному потребителю **NL** через индуктивный дроссель **L**, который предназначен для снижения пульсаций i_c , и выполняет три базовые функции, а именно устраняет искажения в потребляемых токах i_s , компенсирует реактивную мощность по основной гармонике, а также осуществляет стабилизацию u_{dc} . Помимо этого UPQC поддерживает непрерывное питание нагрузки в случае кратковременной просадки u_s за счет запасенной в **GB** электрической энергии.

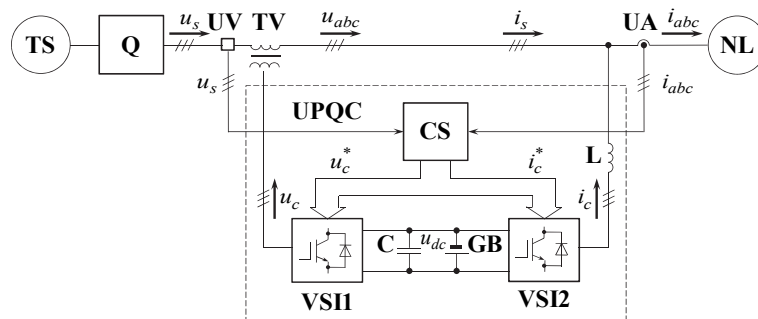


Рис. 1 – Функциональная схема UPQC

Fig. 1 – Block diagram of a UPQC

В номинальном режиме работы UPQC большая часть потребляемой мощности передается непосредственно от источника **TS** к нагрузке **NL** и только ее небольшая часть, как правило, не превышающая 15 % [7], проходит через силовые цепи последовательно-параллельного АСФ с целью коррекции искажений и углового сдвига, а также заряда аккумуляторной батареи **GB**. При нахождении действующих значений напряжений u_s вне рабочего диапазона автоматический выключатель **Q** отсоединяет потребителя **NL** от сети **TS**, переводя его на резервное питание от **GB** через **VSI2**, что обуславливает широкое распространение UPQC в системах жизнеобеспечения и хранения данных, телекоммуникационных объектах, аварийно-спасательном оборудовании и т. д.

2. Алгоритмы управления параллельным АСФ

Алгоритмические принципы построения систем управления UPQC, который, как было указано выше, представляет собой последовательно-параллельный АСФ, базируются на различных способах представления трехфазных переменных во временной или частотной областях, причем в последнем случае требуется наличие высокопроизводительных программно-аппаратных средств в составе **СS** из-за необходимости проведения большого объема вычислительных операций. В свою очередь среди всего многообразия аналитических процедур определения компенсационных воздействий i_c и u_c во временной области на практике наибольшее распространение получил метод на основе так называемой исходной $p-q$ теории мгновенной мощности [9], в рамках которой первоначально осуществляется переход от трехфазных переменных к координатам состояния x_α, x_β, x_o в соответствии с линейным ортогональным преобразованием E. Clarke [10, 11]

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

здесь x_a, x_b, x_c – мгновенные значения фазных напряжений или токов, после чего постулируются [4, 12]:

– активная мгновенная мощность, заданная в виде скалярного произведения векторов напряжения и тока в плоскости α, β ,

$$p_{\alpha\beta} = \bar{u}_\alpha \cdot \bar{i}_\alpha + \bar{u}_\beta \cdot \bar{i}_\beta;$$

– вектор мгновенной реактивной мощности, определяемый на основании правил векторного произведения

$$\bar{q}_{\alpha\beta} = \bar{u}_\alpha \times \bar{i}_\beta + \bar{u}_\beta \times \bar{i}_\alpha,$$

– мгновенная мощность нулевой составляющей, вычисляемая как результат скалярного произведения векторов напряжения и тока, направленных по координатной оси аппликат o

$$p_o = \bar{u}_o \cdot \bar{i}_o.$$

Как показано в [13], при полном преобразовании электрической энергии на стороне нагрузки в составе потребляемой мгновенной мощности присутствует только постоянная составляющая активной мгновенной мощности

$$\bar{P}_{\alpha\beta} = p_{\alpha\beta} - \tilde{p}_{\alpha\beta} = \text{const},$$

здесь $\tilde{p}_{\alpha\beta}$ – переменная составляющая $p_{\alpha\beta}$, получаемая на выходе специальной динамической подсистемы низкочастотной фильтрации [2], в результате чего алгоритм управления параллельным АСФ в координатах состояния α, β, o принимает следующий вид:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \\ i_{co} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} u_\alpha & -u_\beta & 0 \\ u_\beta & u_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \|\mathbf{u}_{\alpha\beta}\|^2 \cdot u_o^{-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p}_{\alpha\beta} - \bar{p}_o \\ q_{\alpha\beta} \\ p_o \end{bmatrix},$$

где $q_{\alpha\beta} = u_\alpha i_\beta - u_\beta i_\alpha$ – модуль вектора $\vec{q}_{\alpha\beta}$, или окончательно, после обратного перехода к фазным переменным

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \\ i_{co} \end{bmatrix}.$$

В заключение также необходимо отметить, что помимо описанного выше подхода к решению задачи синтеза непрерывных законов токовой компенсации с использованием пространственных векторов, к которому также относится расширенная модификация исходной p - q теории [14] и p - q - r теория мгновенной мощности [15], алгоритмы активной фильтрации могут реализовываться в рамках математических аппаратов тензорного исчисления [16] и некоммутативной алгебры кватернионов [17–19].

3. Алгоритмы управления последовательным АСФ

В соответствии с основными положениями исходной p - q теории, изложенными в предыдущем разделе, формирование компенсационных воздействий u_c на выходе последовательного АСФ применительно к трехфазной системе с изолированной средней точкой основывается на следующей аналитической зависимости:

$$\begin{bmatrix} u_{c\alpha} \\ u_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{bmatrix} i_\alpha & -i_\beta \\ i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p}_{\alpha\beta} \\ q_{\alpha\beta} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Как отмечено в [4], техническая реализация (2) позволяет обеспечить полное исключение $\tilde{p}_{\alpha\beta}$ и $q_{\alpha\beta}$ только в случае симметричной гармонической системы токов нагрузки i_a, i_b, i_c , что представляет интерес только с теоретической точки зрения и не имеет практического приложения. В этой связи далее остановимся более подробно на анализе других способов численного расчета u_c , которые базируются на непосредственном определении высокочастотных составляющих u_s или выделении из полного спектра трехфазной системы напряжений источника прямой последовательности фаз по основной гармонике.

Один из вариантов функциональной схемы алгоритма коррекции напряжений **TS**, выполненного на основе первого теоретического приема, иллюстрирует рис. 2 [20], в соответствии с которым входные сигналы с датчиков **UV** оцифровываются с помощью аналого-цифрового преобразователя **ADC** и поступают на центральный процессор обработки сигналов **DSP**. Далее из дискретных значений u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} вычитаются основные гармоники, получаемые при помощи рекур-

сивного фильтра низких частот **LPF**, и полученная разность через цифро-аналоговый преобразователь **DAC** подается в качестве задания u_c^* на трехканальный широтно-импульсный модулятор **VSI**.

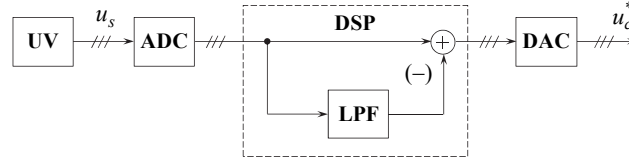


Рис. 2 – Функциональная схема системы управления последовательного АСФ

Fig. 2 – Block diagram of series APF control block

Далее рассмотрим основные положения метода синтеза управлений последовательным АСФ, базирующимся на принятии в качестве эталона прямой последовательности фаз по основной гармонике [3, 4],

$$u_{1+} = \frac{1}{3}(u_{sa1} + au_{sb1} + a^2u_{sc1}) = u_{m1+} \cos(\omega t + \phi_{1+}),$$

где $a = e^{j120^\circ}$ – оператор поворота на угол 120° ; $u_{sa1}, u_{sb1}, u_{sc1}$ – гармонические составляющие с угловой частотой $\omega = 100\pi \text{ с}^{-1}$, выделяемые из полного спектра фазных напряжений источника **TS** после прохождения сигналов с датчиков **UV** через полосовой фильтр [21], передаточная функция которого в изображениях Лапласа, например, может быть выбрана в виде [22]

$$W(s) = \frac{\omega^{-1}Q^{-1}s}{\omega^{-2}s^2 + \omega^{-1}Q^{-1}s + 1},$$

здесь Q – добротность.

В свою очередь переход от u_{1+} к фазным значениям выполняется в виде

$$\begin{bmatrix} u_{sa1+} \\ u_{sb1+} \\ u_{sc1+} \end{bmatrix} = u_{m1+} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi_{1+}) \\ \cos(\omega t - 120^\circ + \phi_{1+}) \\ \cos(\omega t + 120^\circ + \phi_{1+}) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

причем левую часть (3) можно также непосредственно получить из матричного равенства [5]

$$\begin{bmatrix} u_{sa1+} \\ u_{sb1+} \\ u_{sc1+} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} u_{sa1} \\ u_{sb1} \\ u_{sc1} \end{bmatrix} - \frac{1}{6} \begin{bmatrix} u_{sb1} + u_{sc1} \\ u_{sc1} + u_{sa1} \\ u_{sa1} + u_{sb1} \end{bmatrix} + j \frac{1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} u_{sb1} - u_{sc1} \\ u_{sc1} - u_{sa1} \\ u_{sa1} - u_{sb1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где j – оператор поворота на угол 90° , реализуемый при помощи фазосдвигающего фильтра с передаточной функцией второго порядка

$$W(s) = \frac{s^2 - \omega s + a}{s^2 + \omega s + a},$$

где $a = \pi/2$ – постоянный коэффициент.

Выделение гармонических составляющих в функции ω из периодических не-синусоидальных функций времени u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} можно также выполнить в частотной области, воспользовавшись тригонометрическим рядом Фурье

$$u_{si} = \frac{B_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \sin(k\omega t) + B_k \cos(k\omega t)),$$

где i – нижний индекс, показывающий буквенное обозначение одной из фаз a, b, c ; B_0, A_k, B_k – коэффициенты, соответственно определяемые как

$$A_k = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi\omega^{-1}} u_{si} \sin(k\omega t) dt \text{ при } k = 1, 2, 3, \dots,$$

$$B_k = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi\omega^{-1}} u_{si} \cos(k\omega t) dt \text{ при } k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Численные значения A_1 и B_1 , отвечающие за амплитуду и угловой сдвиг первой гармоники соответствующего напряжения u_{si} , вычисляются на основе текущей информации о первых членах следующих линейных комбинаций [14, 23]:

$$u_{si} \sin \omega t = \frac{A_1}{2} + \frac{B_0}{2} \sin \omega t + \frac{B_1}{2} \sin 2\omega t - \frac{A_1}{2} \cos 2\omega t + \dots,$$

$$u_{si} \cos \omega t = \frac{B_1}{2} + \frac{B_0}{2} \cos \omega t + \frac{B_1}{2} \cos 2\omega t + \frac{A_1}{2} \sin 2\omega t + \dots,$$

что иллюстрирует рис. 3, на котором в качестве **LPF** обозначен фильтр низких частот.

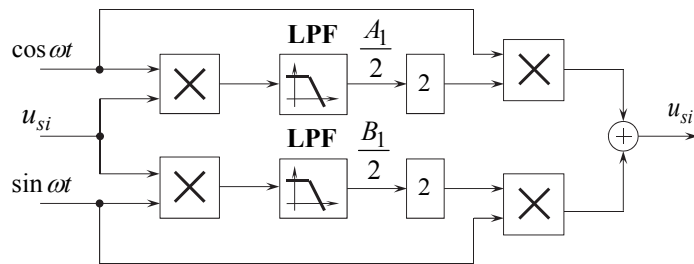


Рис. 3 – Структурная схема выделения основной гармоники одной фазы напряжения u_{si1}

Fig. 3 – Method to obtain the voltage fundamental component u_{si1}

В заключение рассмотрим базовые принципы теоретического приема к расчету компенсационных напряжений u_c в преобразованном пространстве состояний [5], основанном на последовательно выполняемых инвариантных относительно скалярных величин переходах от алгебраического вектора-столбца из левой части матричных уравнений (3) или (4) к α, β координатам $x_{\alpha 1+}, x_{\beta 1+}$ в соответствии с (1), а затем к d, q переменным [24]:

$$x_{d1+} = x_{\alpha 1+} \cos \gamma + x_{\beta 1+} \sin \gamma ,$$

$$x_{q1+} = x_{\beta 1+} \cos \gamma - x_{\alpha 1+} \sin \gamma ,$$

где γ – угол поворота плоскости d, q относительно неподвижной продольной оси α двумерного подпространства α, β ,

$$\gamma = \arctg \frac{x_{\beta 1+}}{x_{\alpha 1+}} ,$$

в результате чего алгоритм активной фильтрации принимает следующий вид:

$$\begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} = \frac{U_{abc}}{u_{d1+}} \begin{bmatrix} u_{a1+} \\ u_{b1+} \\ u_{c1+} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} ,$$

здесь U_{abc} – модуль пространственного вектора напряжений, желаемое значение которого выбирается как [11]

$$U_{abc} = \sqrt{3} \cdot 220 \text{ В.}$$

Таким образом, описанные в данном разделе аналитические процедуры численного расчета компенсационных воздействий u_c на выходе последовательного АСФ в конечном итоге обеспечат коррекцию мгновенной формы трехфазных напряжений источника с целью обеспечения синусоидального закона изменения с одновременным соблюдением условия симметрии по мгновенным значениям.

Заключение

Практическая реализация представленных в данной статье алгоритмических решений в области управления последовательно-параллельными АСФ позволит значительно улучшить мгновенную форму сетевых напряжений и токов, а также исключить из состава потребляемой от источника мгновенной мощности все составляющие, обусловленные негативным действием высокочастотных гармоник и параметрической асимметрии. По этой причине данный тип силовых преобразовательных устройств в настоящее время является наиболее эффективным техническим средством энергосбережения [1, 18, 19], позволяющим существенно повысить качество доставляемой конечному потребителю электрической энергии с одновременным снижением активных потерь в трехфазных системах электропитания общего назначения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Германской службы академических обменов и Министерства образования и науки РФ в рамках международного научно-образовательного сотрудничества по программе «Михаил Ломоносов» по теме «Синтез алгоритмов управления полупроводниковыми устройствами компенсации неактивной мощности с использованием гиперкомплексных чисел».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Akagi H.** Active harmonic filters // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93, iss. 12. – P. 2128–2141. – doi: 10.1109/JPROC.2005.859603.
2. **Nos O.V., Kharitonov S.A.** A system to control power currents of ineffective instantaneous power compensation // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86, iss. 2. – P. 72–78. – doi: 10.3103/S1068371215020108.

3. **Нос О.В.** Гармонический анализ кватерниона мгновенной мощности трехфазной нагрузки произвольного вида // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 1 (26). – С. 75–84. – doi: 10.17212/1727-2769-2015-1-75-84.
4. **Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M.** Instantaneous power theory and applications to power conditioning. – Piscataway, New Jersey: IEEE Press; Hoboken, New Jersey: Wiley, 2007. – 379 p.
5. **Lee G.-Myoung, Dong-Choon Lee, Jul-Ki Seok** Control of series active power filters compensating for source voltage unbalance and current harmonics // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2004. – Vol. 51, iss. 1. – P. 132–139. – doi: 10.1109/TIE.2003.822040.
6. **Nasiri A., Amac A.E., Emadi A.** Series-parallel active filter/uninterruptible power supply system // Electric Power Components and Systems. – 2004. – Vol. 32, iss. 11. – P. 1151–1163. – doi: 10.1080/15325000490441507.
7. **Шальгин К.А., Нос О.В.** Техническая реализация принципов энергосбережения на базе силовых активных фильтров // Труды VIII международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 2. – С. 28–32.
8. A new control strategy of UPQC in three-phase four-wire system / T. Zhili, L. Xun, C. Jian, K. Yong, Z. Yang // IEEE 38 Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC'07, USA, Orlando, 17–21 June 2007: [proceedings]. – Piscataway, New Jersey: IEEE Press, 2007. – P. 1060–1065. – doi: 10.1109/PESC.2007.4342139.
9. **Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A.** Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits // Proceedings of the International Power Electronics Conference (IPEC'83), Japan, Tokio, 1983. – Tokyo, 1983. – P. 1375–1386. – doi: 10.1002/ej.4391030409.
10. **Duesterhoeft W.C., Schulz M.W., Clarke E.** Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1951. – Vol. 70, iss. 2. – P. 1248–1255. – doi: 10.1109/T-AIEE.1951.5060554.
11. **Нос О.В.** Математические модели преобразования энергии в асинхронном двигателе: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 168 с.
12. **Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A.** Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1984. – Vol. IA-20, iss. 3. – P. 625–630. – doi: 10.1109/TIA.1984.4504460.
13. **Herrera R.S., Salmerón P., Kim H.** Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: different approaches, assessment, and experimental results // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55, iss. 1. – P. 184–196. – doi: 10.1109/TIE.2007.905959.
14. **Nabae A., Nakano H., Togasawa S.** An instantaneous distortion current compensator without any coordinate transformation // International Power Electronic Conference, IPEC'95: proceedings, 3–7 April 1995. – Yokohama, Japan, 1995. – P. 1651–1655.
15. **Kim H., Akagi H.** The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames // Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS'99, Hong Kong, 27–29 July 1999. – Piscataway, New Jersey: IEEE Press, 1999. – Vol. 1. – P. 422–427. – doi: 10.1109/PEDS.1999.794600.
16. **Ustariz A.J., Cano E.A., Tacca H.E.** Tensor analysis of the instantaneous power in electrical networks // Electric Power Systems Research. – 2010. – Vol. 80, iss. 7. – P. 788–798. – doi: 10.1016/j.epsr.2009.12.004.
17. **Cristaldi L., Ferrero A.** Mathematical foundations of the instantaneous power concepts: an algebraic approach // European Transactions on Electrical Power. – 1996. – Vol. 6, iss. 5. – P. 305–309. – doi: 10.1002/etep.4450060504.
18. **Нос О.В., Панкратов В.В.** Алгоритм управления выходными токами активного силового фильтра с использованием гиперкомплексных чисел // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 33–39.
19. **Нос О.В., Панкратов В.В.** Анализ трехфазных систем компенсации мгновенной неэффективной мощности в кватернионном базисе // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 3–8.
20. **Агунов А.В.** Спектрально-частотная силовая активная фильтрация // Электротехника. – 2004. – № 10. – С. 30–32.

21. A novel control algorithm for static series compensators by use of PQR instantaneous power theory / S.-J. Lee, H. Kim, S.-K. Sul, F. Blaabjerg // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2004. – Vol. 19, iss. 3. – P. 814–827. – doi: 10.1109/TPEL.2004.826499.
22. **Титце У., Шенк К.** Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство: пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
23. **Salmerón P., Herrera R.S., Vázquez J.R.** A new approach for three-phase loads compensation based on the instantaneous reactive power theory // *Electric Power Systems Research*. – 2008. – Vol. 78, iss. 4. – P. 605–617. – doi: 10.1016/j.epsr.2007.05.003.
24. **Park R.H.** Two-reaction theory of synchronous machines // *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. – 1929. – Vol. 48, iss. 3. – P. 716–727. – doi: 10.1109/TAIEE.1929.5055275.

CONTROL STRATEGIES OF THE SERIES–SHUNT ACTIVE POWER FILTERS

Nos O.V., Kucher E.S., Baklyak A.V.

Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russian Federation

Currently there are a number of ways for power quality improvement by reducing the influence of electronic converters on the AC public distribution systems. One of the most effective of them is based on the implementation of harmonic filtering and inactive power compensation. Conventionally to provide current and voltage sinusoidal waveforms passive *RLC*-filters, active power filters (APF) or their combinations are used. The passive ones allow us to shunt the high frequency current harmonics, generated by a nonlinear load. The APFs generate instantaneous compensative actions for preliminary distortion three-phase currents or voltages. In this context APF control strategies have a set of significant advantages over the passive compensation approach. Firstly an APF has the lower RMS losses in the power circuits. In the second place, APF can be automatically adjusted to the conditions changes such as operating modes or topology of AC electrical power system. Moreover, APF can be invariant to the thermal drift of the parameters. This makes implementation of APF free of any practical limitations in its application area. This paper deals with algorithmic principles for the series-shunt active power filter control strategies. The analysis is based on both the instantaneous *p-q* power theory and analytic techniques using extraction of positive sequence fundamental component from any nonlinear three-phase electrical quantities.

Keywords: active power filter, compensative actions, control strategy of compensation.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-77-87

REFERENCES

1. Akagi H. Active harmonic filters. *Proceedings of the IEEE*, 2005, vol. 93, iss. 12, pp. 2128–2141. doi: 10.1109/JPROC.2005.859603
2. Nos O.V., Kharitonov S.A. A system to control power currents of ineffective instantaneous power compensation. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, iss. 2, pp. 72–78. doi: 10.3103/S1068371215020108
3. Nos O.V. Garmonicheskii analiz kvaterniona mgnovennoi moshchnosti trekhfaznoi nagruzki proizvol'nogo vida [Harmonic analysis of the instantaneous power quaternion of an arbitrary-type three-phase load]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 1 (26), pp. 75–84. doi: 10.17212/1727-2769-2015-1-75-84
4. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Piscataway, New Jersey, IEEE Press; Hoboken, New Jersey, Wiley, 2007. 379 p.
5. Lee G.-M., Lee D.-Ch., Seok J.-K. Control of series active power filters compensating for source voltage unbalance and current harmonics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, vol. 51, iss. 1, pp. 132–139. doi: 10.1109/TIE.2003.822040
6. Nasiri A., Amac A.E., Emadi A. Series-parallel active filter/uninterruptible power supply system. *Electric power components and systems*, 2004, vol. 32, iss. 11, pp. 1151–1163. doi: 10.1080/15325000490441507

7. Shalygin K.A., Nos O.V. [Energy efficiency principles based on active power filters technical implementation]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi (XIX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014*. T. 2 [Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on the Automatic Electric Drive], Saransk, October, 7–9, 2014, vol. 2, pp. 28–32.
8. Zhili T., Xun L., Jian C., Yong K., Yang Z. A new control strategy of UPQC in three-phase four-wire system. *IEEE 38 Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC07*, USA, Orlando, 17–21 June 2007: [proceedings]. Piscataway, New Jersey, IEEE Press, 2007, pp. 1060–1065. doi: 10.1109/PESC.2007.4342139
9. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. *Proceedings of the international power electronics conference IPEC'83*, Japan, Tokyo, 1983, pp. 1375–1386. doi: 10.1002/eej.4391030409
10. Duesterhoeft W.C., Schulz M.W., Clarke E. Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1951, vol. 70, iss. 2, pp. 1248–1255. doi: 10.1109/T-AIEE.1951.5060554
11. Nos O.V. *Matematicheskie modeli preobrazovaniya energii v asinkhronnom dvigatele* [Mathematical models of electrical energy conversion in the induction motor]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1990. 168 p.
12. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1984, vol. IA-20, iss. 3, pp. 625–630. doi: 10.1109/TIA.1984.4504460
13. Herrera R.S., Salmerón P., Kim H. Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: different approaches, assessment, and experimental results. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, iss. 1, pp. 184–196. doi: 10.1109/TIE.2007.905959
14. Nabae A., Nakano H., Togasawa S. An instantaneous distortion current compensator without any coordinate transformation. *International Power Electronic Conference IPEC'95*: [proceedings], Japan, Yokohama, 3–7 April 1995, pp. 1651–1655.
15. Kim H., Akagi H. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference. *Proceedings of the IEEE 1999 international conference on power electronics and drive systems PEDS'99*, Hong Kong, 27–29 July 1999. Piscataway, New Jersey, IEEE Press, 1999, vol. 1, pp. 422–427. doi: 10.1109/PEDS.1999.794600
16. Ustariz A.J., Cano E.A., Tacca H.E. Tensor analysis of the instantaneous power in electrical networks. *Electric Power Systems Research*, 2010, vol. 80, iss. 7, pp. 788–798. doi: 10.1016/j.epsr.2009.12.004
17. Cristaldi L., Ferrero A. Mathematical foundations of the instantaneous power concepts: an algebraic approach. *European Transactions on Electrical Power*, 1996, vol. 6, iss. 5, pp. 305–309. doi: 10.1002/etep.4450060504
18. Nos O.V., Pankratov V.V. Algoritm upravleniya vykhodnymi tokami aktivnogo silovogo fil'tra s ispol'zovaniem giperkompleksnykh chisel [Control strategy of shunt active power filters by using hypercomplex numbers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2012, no. 6, pp. 33–39.
19. Nos O.V., Pankratov V.V. Analiz trekhfaznykh sistem kompensatsii mgnovЕННОИ neeffektivnoi moshchnosti v kvaternionnom bazise [Analysis of three-phase system in quaternion basis for ineffective instantaneous power compensation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2013, no. 6, pp. 3–8.
20. Agunov A.V. Spektral'no-chastotnaya silovaya aktivnaya fil'tratsiya [Spectral frequency active power filtering]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2004, no. 10, pp. 30–32. (In Russian)
21. Lee S.-J., Kim H., Sul S.-K., Blaabjerg F. A novel control algorithm for static series compensators by use of PQR instantaneous power theory. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, vol. 19, iss. 3, pp. 814–827. doi: 10.1109/TPEL.2004.826499
22. Tietze U., Schenk Ch. Halbeiter-Schaltungstechnik. Fünfte überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1980. 734 p. (Russ. ed.: Tittse U., Shenk K. *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika*. Translated from German. Moscow, Mir Publ., 1982. 512 p.).

23. Salmerón P., Herrera R.S., Vázquez J.R. A new approach for three-phase loads compensation based on the instantaneous reactive power theory. *Electric Power Systems Research*, 2008, vol. 78, iss. 4, pp. 605–617. doi: 10.1016/j.epsr.2007.05.003
24. Park R.H. Two-reaction theory of synchronous machines. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1929, vol. 48, iss. 3, pp. 716–727. doi: 10.1109/T-AIEE.1929.5055275

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Нос Олег Викторович – родился в 1972 году, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры проектирования технологических машин Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов связана с решением прикладных задач повышения энергоэффективности трехфазных систем переменного тока. Автор и соавтор более 70 научных и учебно-методических работ. (Адрес: 630073, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: nos@corp.nstu.ru).

Nos Oleg Victorovich (b. 1972) – Candidate of Science (Eng.). He is an associate professor at the department of technological machine design in the Novosibirsk state technical university. His research interests include instantaneous power theories and power quality. He is author and co-author of more than 70 scientific papers and work-books. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: nos@corp.nstu.ru).



Кучер Екатерина Сергеевна – родилась в 1984 году, канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – адаптивное бездатчиковое управление асинхронными электроприводами. Автор и соавтор более 15 научных работ. (Адрес: 630073, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: kucher@corp.nstu.ru).

Kucher Ekaterina Sergeevna (b. 1984) – Candidate of Science (Eng.). She is an associate professor at the department of electric drives and industry automation in the Novosibirsk state technical university. Scientific interests – adaptive sensorless control of AC electric drives. She is author and co-author of more than 15 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: kucher@corp.nstu.ru).



Бакляк Алина Валерьевна – родилась в 1992 году, закончила Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов связана с улучшением качества электрической энергии в трехфазных системах переменного тока. (Адрес: 630073, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: alina_baklyak@mail.ru).

Baklyak Alina Valerievna (b. 1992) – graduated from Novosibirsk State Technical University. Scientific interests are concerned with power quality improvement of AC three-phase systems. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: alina_baklyak@mail.ru).

Статья поступила 11 мая 2015 г.

Received May 11, 2015

To Reference:

Nos O.V., Kucher E.S., Baklyak A.V. Algoritmy upravleniya posledovatel'no-parallel'nymi aktivnymi silovymi fil'trami [Control strategies of the series-shunt active power filters]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 2 (27), pp. 77–87. doi: 10.17212/1727-2769-2015-2-77-87