

УДК 621.31:621.38

Активные силовые фильтры в задачах повышения качества электрической энергии*

К.А. ШАЛЫГИН, О.В. НОС

В статье выполнен обзор современных методов компенсации мгновенной неэффективной мощности и технической реализации алгоритмов управления выходными токами активного силового фильтра, используемого в прикладных задачах повышения энергоэффективности трехфазных систем передачи, распределения и преобразования электрической энергии переменного тока.

Ключевые слова: активный силовой фильтр, компенсация мгновенной неэффективной мощности, кватернион, гиперкомплексное пространство.

ВВЕДЕНИЕ

Повсеместное использование нелинейных потребителей, таких как частотные преобразователи в структуре электроприводов, трансформаторы, мощные электрические печи и т. д., привело к необходимости разработки и внедрения трехфазных систем коррекции формы кривых тока и напряжения.

Применение традиционных способов компенсации, основанных на использовании емкостных батарей и пассивных RLC -фильтров, может приводить к нежелательным явлениям из-за возникновения резонансных электромагнитных процессов между индуктивностью линий передачи и параллельными конденсаторами. По этой причине в последние годы большое внимание уделялось «активным» способам подавления гармоник [1], технически реализуемых при помощи активных силовых фильтров (АСФ) [2]. Принцип действия данного полупроводникового устройства основан на генерации сигнала обратного по величине гармоническим составляющим, подлежащим компенсации, и/или реактивных токов в определенной точке системы. Для АСФ было предложено несколько законов управления [3], при этом наиболее распространенным являлся алгоритм, основанный на современной теории мгновенных активной и реактивной мощностей ($p-q$ -теория) [4].

1. АКТИВНЫЕ СИЛОВЫЕ ФИЛЬТРЫ

На данный момент существует два основных способа подключения АСФ, а именно последовательное и параллельное [5–8], что иллюстрирует рис. 1, на котором в качестве $i_s, i_l, i_c, u_s, u_l, u_c$ обозначены фазные токи и напряжения питающей сети, нагрузки и активного фильтра соответственно; u_{dc} – напряжение в цепи постоянного тока. В первом случае АСФ выступает в качестве управляемого генератора фазных напряжений (рис. 1, а), выбираемого на полный ток потребителя, вследствие чего он имеет высокую мощность и, соответственно, стоимость, и массогабаритные показатели [1].

Подключение АСФ параллельно питающей линии [8] является наиболее распространенным способом соединения данного типа электротехнического устройства, при котором выполняется компенсация различного рода пульсаций, асимметрии и сдвига по фазе, вызванных работой нелинейного потребителя.

* Статья получена 27 июня 2013 г.

На данный момент существует 3 основных типа параллельных АСФ:

- однофазные фильтры для компенсации реактивных токов, образуемых однофазной нагрузкой;
- трехфазные трехпроводные фильтры для генерации компенсационных токов в трехфазной симметричной системе без нулевого провода;
- трехфазные четырехпроводные фильтры для выработки компенсационных токов в трехфазной сети с нулевым проводом.

Данная статья посвящена исследованию алгоритмов компенсации мгновенной неактивной мощности в трехфазной трехпроводной системе с АСФ, изображенной на рис. 1, б.

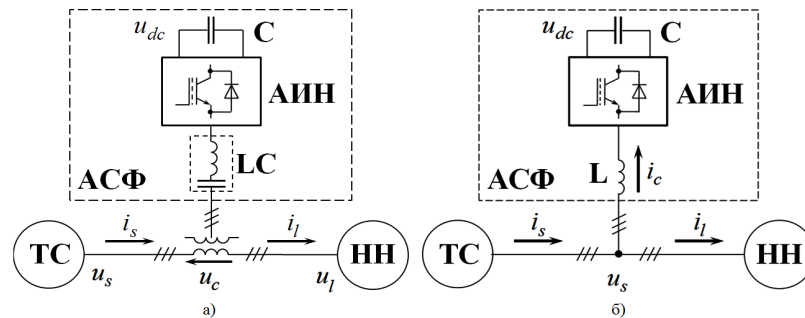


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема трехфазной системы:

а – с последовательным АСФ; б – с параллельным АСФ

АСФ содержит трехфазный инвертор напряжения **АИН**, подключенный к трехфазной трехпроводной сети **ТС** и нелинейной несимметричной нагрузке **НН**, а также сглаживающие дроссели **L**, предназначенные для снижения пульсаций выходных токов. Сигналы задания на компенсационные воздействия формируются управляющей частью АСФ на основе мгновенных значений активной и реактивной мощностей. Звено постоянного тока представляет собой конденсаторную батарею **C** с необходимой емкостью, специальный алгоритм управления которой обеспечивает предварительный заряд и стабилизацию напряжения без использования дополнительного источника питания.

1.1. Автономный инвертор напряжения

АИН, как правило, реализуется по типовой схеме двухуровневого трёхстоечного IGBT-инвертора. Выбор величины индуктивности сглаживающего дросселя **L** определяется компромиссом между подавлением ШИМ пульсаций и возможностью обеспечить высокие значения производных выходного тока [9], минимальное значение которой определяется из следующего соотношения [10]:

$$L = \frac{u_{dc}^*}{1.2 \cdot \omega_s \cdot i_{mc}},$$

где u_{dc}^* – желаемое значение напряжения звена постоянного тока; i_{mc} – амплитудное значение компенсационных токов на выходе АСФ; ω_s – угловая частота питающей сети.

Емкость звена постоянного тока выбирается в соответствии со следующим выражением [11]:

$$C_{dc} = \frac{P_c}{\omega_s \cdot \Delta u_{dc}^{\max} \cdot u_{dc}^*},$$

где p_c – мощность на выходе АСФ; $\Delta u_{dc}^{\max}$ – величина максимального отклонения (пульсаций) текущего напряжения в звене постоянного тока от $u_{dc}^* = \text{const}$, причем величина стаби-

лизируемого напряжения на конденсаторе, контролируемого ПИ-регулятором, должно быть не менее [11]

$$u_{dc}^* = 2\sqrt{2} \cdot U_s,$$

где U_s – среднеквадратичное значение фазного напряжения на входе АСФ.

2.2. Система управления АСФ

Как было указано ранее, система управления АСФ осуществляет формирование компенсационных воздействий на основании текущей информации о мгновенных значениях активной и реактивной мощностей [4, 12].

На сегодняшний день существует большое количество алгоритмов расчета текущих значений трехфазных токов коррекции на выходе АСФ, базирующихся, например, на исходной и модифицированной (расширенной) p - q -теориях мгновенных активной и реактивной мощностей [4].

Основные положения исходной p - q -теории были впервые опубликованы японскими учеными под руководством профессора Н. Akagi в 1983 году на японском языке [13] и позднее в журнале *IEEE Transactions on Industry Applications* [14]. Данная теория основывается на преобразовании исходной системы координат ABC в систему координат $\alpha\beta$, известное как линейное ортогональное преобразование Е. Clarke, и осуществляется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

идентичное преобразование и для системы токов.

При соблюдении условия симметрии

$$x_a + x_b + x_c = 0, \quad (2)$$

где x_a, x_b, x_c – фазные переменные, нулевые составляющие тока и напряжения отсутствуют, вследствие чего (1) имеет вид

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix},$$

аналогично и для токов.

Авторы исходной p - q -теории выделяют следующие составляющие уравнения баланса мгновенных мощностей:

– мгновенная активная мощность, определяемая как результат скалярного произведения пространственных векторов фазных напряжений и токов:

$$P_{\alpha\beta} = \vec{u}_{\alpha\beta} \cdot \vec{i}_{\alpha\beta} = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta = \bar{p} + \tilde{p},$$

где $\bar{p}$ – постоянная составляющая мгновенной активной мощности, соответствующая электрической энергии переменного тока в единицу времени, которая передается от источника питания к нагрузке; $\tilde{p}$ – переменная составляющая активной мощности, отвечающая за влияние гармоник и несимметрии [7];

– мгновенная мощность нулевой составляющей

$$p_o = \vec{u}_o \cdot \vec{i}_o = \bar{p}_o + \tilde{p}_o;$$

– вектор мгновенной реактивной мощности, задаваемый в виде векторного произведения как

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

с модулем

$$|\vec{q}| = q = u_\alpha i_\beta - u_\beta i_\alpha = \bar{q} + \tilde{q}.$$

Мгновенная реактивная мощность не является физической переменной и представляет собой некоторую величину, используемую для расчетов и построения системы управления АСФ, для которой авторы p - q -теории вводят новую размерность «вольт-ампер мнимый» (vai) [4], не совпадающую с размерностью классической реактивной мощности.

Графическая интерпретация потоков энергии в единицу времени представлена на рис. 2 [15].

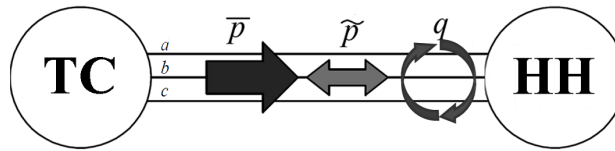


Рис. 2. Компоненты мощности

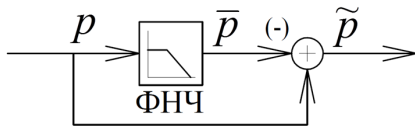


Рис. 3. Функциональная схема выделения переменной составляющей мгновенной активной мощности

АСФ генерирует на своем выходе переменную составляющую мгновенной активной мощности, выделяемую при помощи специальной подсистемы низкочастотной фильтрации (рис. 3) [16], а также полную мгновенную реактивную мощность, не потребляя при этом $\bar{p}$ [4].

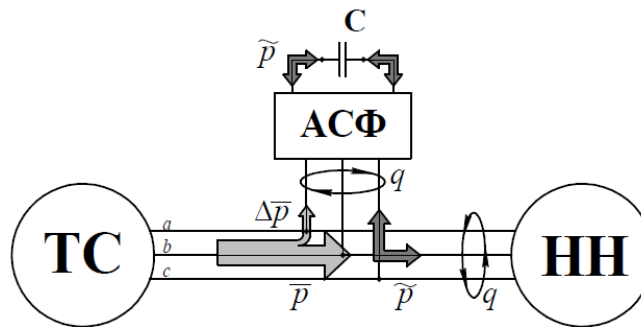


Рис. 4. Функциональная схема компенсации мгновенной неэффективной мощности с помощью АСФ

Звено постоянного тока C заряжается непосредственно из сети $ТС$, а стабилизация напряжения u_{dc} происходит за счет компенсации средних за период T активных потерь мощности $\Delta \bar{p}$ [17], величина которых определяется уравнением баланса энергий [18]:

$$\int_0^T \Delta \bar{p} dt = 3 \int_0^T \left(u_m \Delta i_{mc} \cos^2 \omega_s t \right) dt = \frac{3}{2} u_m \Delta i_{mc} T,$$

где u_m , Δi_{mc} – максимальное мгновенное значение фазного напряжения u_s с угловой частотой ω_s и активного тока АСФ соответственно, откуда [18]:

$$\Delta i_{mc} = \frac{2}{3} \frac{C u_{dc}^*}{u_m T} \Delta u_{dc},$$

где $\Delta u_{dc} = u_{dc}^* - u_{dc}$ – величина отклонения текущего напряжения u_{dc} в звене постоянного тока от желаемого значения $u_{dc}^* = \text{const}$. На основании последнего равенства можно заключить, что при формировании выходного тока АСФ с амплитудой Δi_{mc} и нулевым фазовым сдвигом относительно соответствующего напряжения u_s достигается компенсация активных потерь $\Delta \bar{p}$ за период T , следствием чего является поддержание на заданном уровне среднего значения напряжения на емкостном фильтре [18].

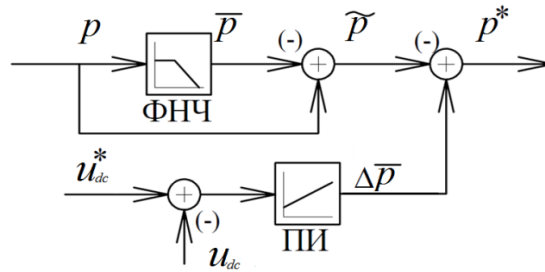


Рис. 5. Схема формирования задающего воздействия на мгновенную мощность компенсации

В итоге компенсационные токи при соблюдении условия симметрии (2) имеют следующий вид:

$$i_{\alpha\beta}^* = \frac{1}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \begin{bmatrix} u_{\alpha} & u_{\beta} \\ -u_{\beta} & u_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\tilde{p} + \Delta \bar{p} \\ -q \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Учитывая тот факт, что мгновенная мощность представляет собой алгебраическую сумму активной и нулевой составляющих, то разработанный Н. Akagi с соавторами подход к анализу энергетических характеристик трехфазных систем получил свое дальнейшее развитие в виде так называемой расширенной (видоизмененной) p - q -теории, на основании которой активная мгновенная мощность задается в виде скалярного произведения трехмерных векторов напряжения и тока в осях $\alpha\beta o$ [19]:

$$p_{\alpha\beta o} = \vec{u}_{\alpha\beta o} \cdot \vec{i}_{\alpha\beta o} = \vec{u}_{\alpha} \cdot \vec{i}_{\alpha} + \vec{u}_{\beta} \cdot \vec{i}_{\beta} + \vec{u}_o \cdot \vec{i}_o,$$

а пространственный вектор мгновенной мнимой мощности определяется на основании векторного произведения как

$$\vec{q}_{\alpha\beta o} = \vec{u}_{\alpha\beta o} \times \vec{i}_{\alpha\beta o} = \det \begin{pmatrix} \vec{e}_{\alpha} & \vec{e}_{\beta} & \vec{e}_o \\ u_{\alpha} & u_{\beta} & u_o \\ i_{\alpha} & i_{\beta} & i_o \end{pmatrix} = q_{\alpha} \cdot \vec{e}_{\alpha} + q_{\beta} \cdot \vec{e}_{\beta} + q_o \cdot \vec{e}_o,$$

где $q_{\alpha}, q_{\beta}, q_o$ – координаты $\vec{q}_{\alpha\beta o}$ в ортонормированном базисе $\vec{e}_{\alpha}, \vec{e}_{\beta}, \vec{e}_o$

$$q_{\alpha} = u_{\beta} i_o - u_o i_{\beta}, \quad q_{\beta} = u_o i_{\alpha} - u_{\alpha} i_o, \quad q_o = u_{\alpha} i_{\beta} - u_{\beta} i_{\alpha},$$

связанные между собой с помощью следующего уравнения связи [4]:

$$\vec{u}_{\alpha\beta o} \cdot \vec{q}_{\alpha\beta o} = u_{\alpha} q_{\alpha} + u_{\beta} q_{\beta} + u_o q_o = 0. \quad (4)$$

Таким образом, компенсационный ток в расширенной p - q -теории, по аналогии с (3) и учете активных потерь в АСФ, находится как

$$i_{\alpha\beta o}^* = \frac{1}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2 + u_o^2} \begin{bmatrix} u_{\alpha} & 0 & u_o & -u_{\beta} \\ u_{\beta} & -u_o & 0 & u_{\alpha} \\ u_o & u_{\beta} & -u_{\alpha} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\tilde{p} + \Delta\bar{p} \\ -q_{\alpha} \\ -q_{\beta} \\ -q_o \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Если выполняется условие симметрии по напряжению (2) при соединении нагрузки в «звезду» без нулевого провода, то формула (5) преобразуется в (3).

Способ формирования компенсационных воздействий, основанный на расширенной p - q -теории, имеет такую же простоту в настройке, что и исходная p - q теория. В качестве мгновенной неэффективной мощности для компенсации могут быть выбраны как все компоненты уравнения баланса за исключением $\bar{p}$, так и его отдельные элементы, например, только сумма составляющих $\bar{q} + \tilde{q}$.

В качестве основных недостатков выше рассмотренных теорий активной и реактивной мгновенных мощностей можно отметить следующее [19]:

- одновременное применение математических аппаратов матричного исчисления и векторной алгебры может приводить к несовместимости получаемых результатов [20], так как, например, операция векторного произведения применительно к матрицам-столбцам не определена;

- наличие уравнения связи (4) в модифицированной p - q -теории приводит к необходимости дополнительного преобразования четырех координат мгновенной мощности для их геометрического отображения в трехмерном вещественном пространстве $\mathcal{R}^3$;

- практическое использование формул (3) и (5) для выработки токов компенсации на выходе АСФ требует наличия высокопроизводительных программно-аппаратных средств из-за необходимости перемножения трехмерных алгебраических векторов и хранения девяти элементов матриц.

2. КВАТЕРНИОННЫЙ БАЗИС

Кватернион представляет собой специальный математический объект, состоящий из одной действительной единицы и трех мнимых единиц $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3$ с вещественными коэффициентами $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ [21]:

$$\Lambda = \lambda_0 \circ 1 + \lambda_1 \circ \mathbf{q}_1 + \lambda_2 \circ \mathbf{q}_2 + \lambda_3 \circ \mathbf{q}_3, \quad (6)$$

для которых постулируются 16 правил умножения [22]:

$$1 \circ 1 = 1, \quad 1 \circ \mathbf{q}_k = \mathbf{q}_k \circ 1 = \mathbf{q}_k, \quad \mathbf{q}_k \circ \mathbf{q}_l = -\delta_{kl} + \varepsilon_{klm} \circ \mathbf{q}_m, \quad (7)$$

где $\circ$ – символ умножения в алгебре кватернионов; $k, l, m = 1, 2, 3$ – нижний индекс, показывающий порядковый номер мнимой единицы; δ_{kl} – трехмерный символ Кронекера, симметричный по своим индексам $\delta_{kl} = \delta_{lk}$:

$$\delta_{kl} = \begin{cases} 1, & \text{при } k = l, \\ 0, & \text{при } k \neq l; \end{cases}$$

ε_{klm} – антисимметричный по индексам трехмерный символ Леви–Чивиты, который удовлетворяет следующим равенствам:

$$\varepsilon_{123} = \varepsilon_{231} = \varepsilon_{312} = 1, \quad \varepsilon_{213} = \varepsilon_{321} = \varepsilon_{132} = -1;$$

и равен нулю, если два или три индекса равны друг другу.

Произведение четырех единиц вида (7) можно также представить в более развернутой форме, что иллюстрирует таблица 1.

Таблица 1

Правила перемножения единиц кватерниона

	1	$\mathbf{q}_1$	$\mathbf{q}_2$	$\mathbf{q}_3$
1	1	$\mathbf{q}_1$	$\mathbf{q}_2$	$\mathbf{q}_3$
$\mathbf{q}_1$	$\mathbf{q}_1$	-1	$\mathbf{q}_3$	$-\mathbf{q}_2$
$\mathbf{q}_2$	$\mathbf{q}_2$	$-\mathbf{q}_3$	-1	$\mathbf{q}_1$
$\mathbf{q}_3$	$\mathbf{q}_3$	$\mathbf{q}_2$	$-\mathbf{q}_1$	-1

Множитель перед единицей носит название скалярной (действительной) части кватерниона $\lambda_0 = \text{scal } \Lambda$, а линейная комбинация с мнимыми единицами относится к векторной составляющей $\text{vect } \Lambda = \lambda_1 \circ \mathbf{q}_1 + \lambda_2 \circ \mathbf{q}_2 + \lambda_3 \circ \mathbf{q}_3$.

В данной ассоциативной алгебре также используются определения сопряженного кватерниона [23, 24]: $\bar{\Lambda} = \text{scal } \Lambda - \text{vect } \Lambda = \lambda_0 \circ 1 - \lambda_1 \circ \mathbf{q}_1 - \lambda_2 \circ \mathbf{q}_2 - \lambda_3 \circ \mathbf{q}_3$,

нормы $\|\Lambda\| = \Lambda \circ \bar{\Lambda} = \bar{\Lambda} \circ \Lambda = \sum_{k=1}^4 \lambda_k^2$, а также обратного кватерниона $\Lambda^{-1} = \frac{\bar{\Lambda}}{\|\Lambda\|}$.

Если фазные переменные представить в Гамильтоновой форме (6) как

$$\mathbf{u} = u_a \circ \mathbf{q}_1 + u_b \circ \mathbf{q}_2 + u_c \circ \mathbf{q}_3, \quad \mathbf{i} = i_a \circ \mathbf{q}_1 + i_b \circ \mathbf{q}_2 + i_c \circ \mathbf{q}_3,$$

то кватернион мгновенной мощности будет определяться как результат произведения

$$\mathbf{p} = \mathbf{u} \circ \mathbf{i} = \text{scal } \mathbf{p} + \text{vect } \mathbf{p},$$

который в соответствии с выше рассмотренными правилами произведения (7) имеет следующие составляющие:

- скалярная составляющая кватерниона мощности $\text{scal } \mathbf{p}$: $p \circ 1 = -(u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c) \circ 1$;
- векторная составляющая $\text{vect } \mathbf{p}$: $q_a \circ \mathbf{q}_1 = (u_b i_c - u_c i_b) \circ \mathbf{q}_1$, $q_b \circ \mathbf{q}_2 = (u_c i_a - u_a i_c) \circ \mathbf{q}_2$, $q_c \circ \mathbf{q}_3 = (u_a i_b - u_b i_a) \circ \mathbf{q}_3$.

Обратный переход к компенсационным токам осуществляется из следующего выражения:

$$\mathbf{i}^* = \mathbf{u}^{-1} \circ \mathbf{p}^*, \quad (8)$$

где $\mathbf{u}^{-1}$ – обратный кватернион напряжения; $\mathbf{p}^*$ – кватернион компенсируемой мгновенной неэффективной мощности, который имеет следующий вид:

$$\mathbf{p}^* = (-\tilde{p} + \Delta \bar{p}) \circ 1 - q_a \circ \mathbf{q}_1 - q_b \circ \mathbf{q}_2 - q_c \circ \mathbf{q}_3.$$

В соответствии с выше рассмотренными методами выделения переменной составляющей мгновенной активной мощности, стабилизации напряжения звена постоянного тока АСФ на заданном уровне и формирования компенсационных воздействий в гиперкомплексном пространстве, полный алгоритм можно представить в виде функциональной схемы, изображенной на рис. 6.

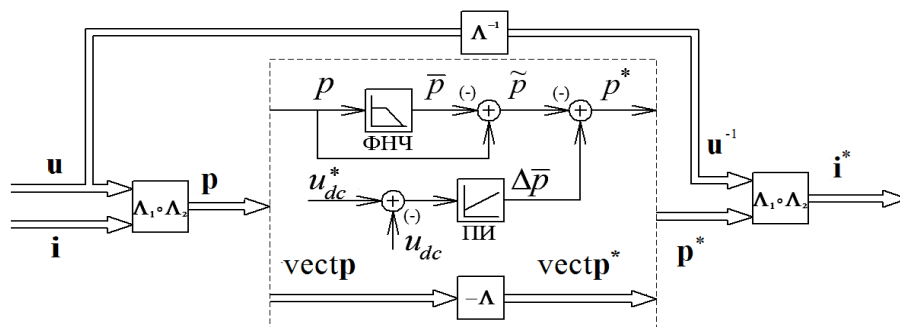


Рис. 6. Функциональная схема алгоритма формирования компенсационных воздействий в кватернионном базисе

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСФ

Исследование алгоритма управления (8) с параметрами трехфазной нелинейной несимметричной нагрузки и АСФ, представленными на рис. 7 и в табл. 2 соответственно, производилось в программной среде «MatLab Simulink».

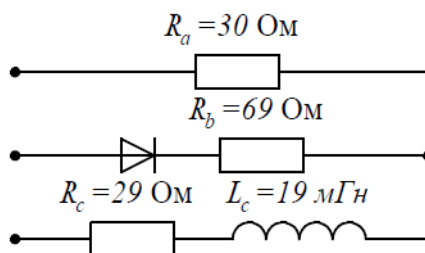


Рис. 7. Трехфазная несимметричная нелинейная нагрузка

Таблица 2

Параметры системы с АСФ

Параметр силовой части и системы управления АСФ	Значение
Емкость звена постоянного тока	1.65 мФ
Индуктивность дросселей	9.4 мГн
Частота среза контура регулирования фазных токов в разомкнутом состоянии	650 Гц
Частота коммутации транзисторов	2.7 кГц
Коэффициент датчика напряжения	0.01
Коэффициент датчика тока	0.18 ВА ⁻¹
Напряжение звена постоянного тока	550 В

Как видно из рис. 8 и 9, формы фазных токов до компенсации характерны для случая нелинейной нагрузки с коэффициентом гармоник 43.42 %.

После включения алгоритма компенсации кватерниона мгновенной неэффективной мощности вида (8) фазные токи источника принимают вид представленный на рис. 10 с соответствующим спектром гармоник для тока фазы *b* (рис. 11).

Как видно из представленных временных зависимостей, после включения в работу АСФ все три фазных тока имеют одинаковую амплитуду со сдвигом 120°, а угол между напряжением и током практически равен 0°, что иллюстрирует рис. 12, на котором начало процесса компенсации обозначено вертикальной линией. При этом также необходимо отметить, что коэффициент гармоник уменьшился с 43.42 % до 13.32 % (рис. 11).

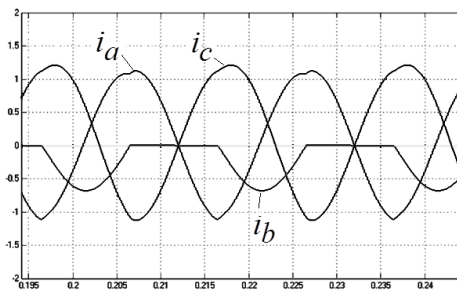


Рис. 8. Токи сети до компенсации

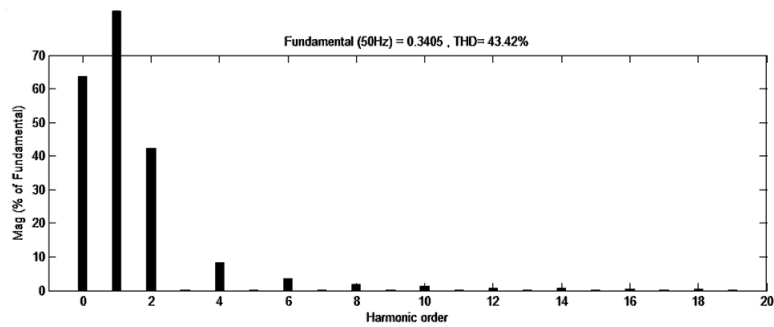
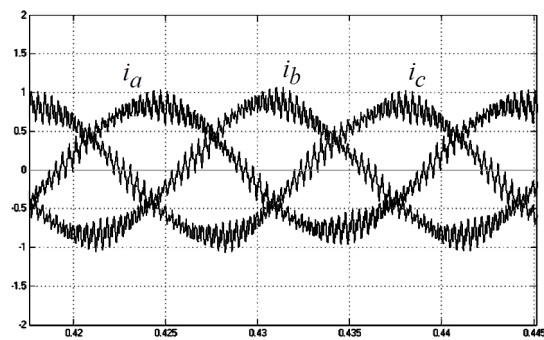
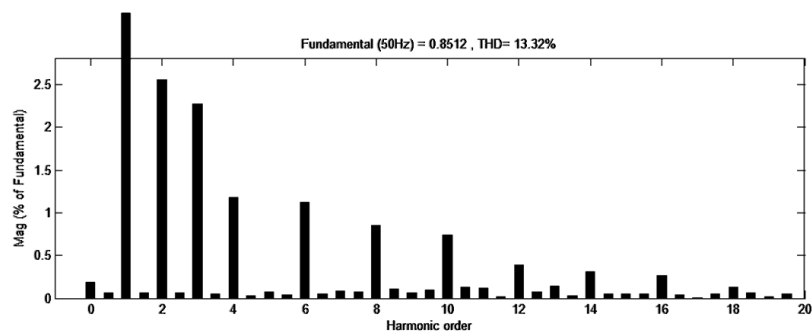
Рис. 9. Спектральный анализ тока фазы b до компенсации

Рис. 10. Токи источника после компенсации

Рис. 11. Спектральный анализ тока фазы b после компенсации

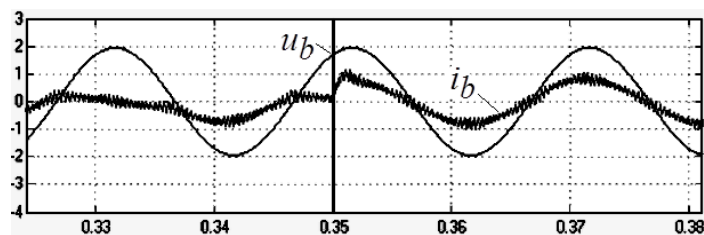


Рис. 12. Ток и напряжение фазы b до и после включения алгоритма компенсации

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА КОМПЕНСАЦИИ В КВАТЕРНИОННОМ БАЗИСЕ

В целях подтверждения правильности результатов цифрового моделирования, на производственных площадях ЗАО «ЭРАСИБ» (г. Новосибирск) было проведено экспериментальное исследование режимов работы АСФ, реализованного на базе общепромышленного преобразователя частоты типа «ЭРАТОН-М4» с численными значениями параметров силовой части и системы управления, представленными в табл. 2.

На рис. 13 и 14 изображены осциллограммы токов и напряжений нагрузки до начала процесса компенсации, иллюстрирующие нелинейность трехфазной системы.

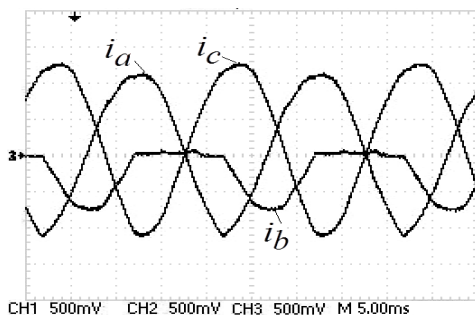


Рис. 13. Фазные токи сети до компенсации

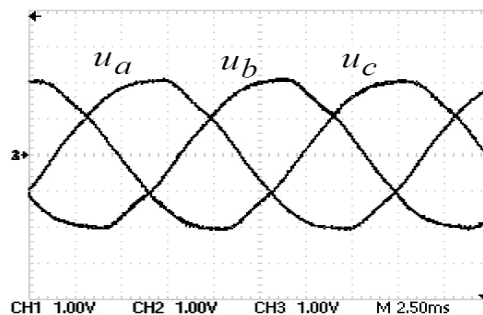


Рис. 14. Фазные напряжения

В свою очередь на рис. 15 и 16 представлены экспериментальные зависимости после вступления в работу АСФ, обозначенного на рис. 16 поперечной линией, которые практически полностью совпадают с результатами цифрового моделирования. По причине того, что опорным сигналом для выработки задающих воздействий являются фазные напряжения, то токи после компенсации повторяют их форму и имеющие место искажения.

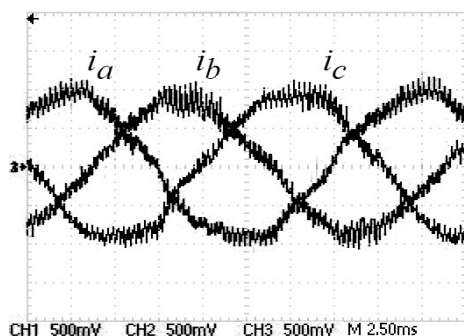


Рис. 15. Токи сети после компенсации

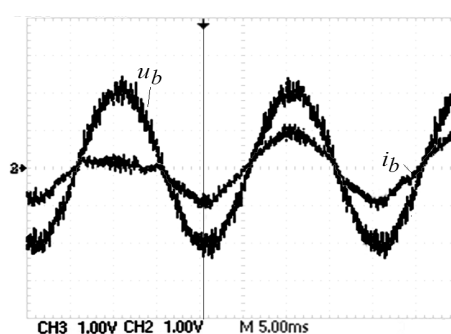


Рис. 16. Ток и напряжение фазы b до и после включения алгоритма компенсации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, как видно из результатов цифрового моделирования и экспериментальных исследований, практическое применение АСФ позволят значительно улучшить форму потребляемых от сети токов и, как следствие, повысить энергоэффективность различных электротехнических комплексов и промышленных установок. При этом техническая реализация алгоритма управления вида (8) не требует наличия высокопроизводительных программно-аппаратных средств, что объясняется простотой структуры системы управления АСФ. Так, например, формирование компенсационных воздействий при цифровом моделировании процессов в гиперкомплексном пространстве при прочих равных условиях приблизительно в 10 раз быстрее, чем алгоритм, основанный на исходной p - q -теории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Akagi H. Active harmonic filters / H. Akagi // Proceedings of the IEEE. – Dec. 2005. – Vol. 93. – № 12. – P. 2128–2141.
- [2] Singh B. A review of active filters for power quality improvement / B. Singh, K. Al-Haddad, A. Chandra // IEEE Trans. Ind. Electron. – Oct. 1999. – Vol. 46. – № 5. – P. 960–971.
- [3] Shyu K.K. Model reference adaptive control design for a shunt active-power-filter systems / K.K. Shyu, M. Yang, Y.M. Chen and other // IEEE Trans. Ind. Electron. – Jan. 2008. – Vol. 55. – № 1. – P. 97–106.
- [4] Akagi H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning (IEEE Press Series on Power Engineering) / H. Akagi, E. Watanabe, M. Aredes. – New York: Wiley, 2007.
- [5] Gyugyi L. Active ac power filters / L. Gyugyi, E.C. Strycula // IEEE IAS annual meeting. – 1976. – P. 529–535.
- [6] Mohan N. Active filters for ac harmonic suppression / N. Mohan, H.A. Peterson, W.F. Long // IEEE/PES Winter Meeting. – July 1977. – Vol. 96. – P. 168–174.
- [7] Peng F.Z. A new approach to harmonic compensation in power systems a combined system of shunt passive and series active filters / F.Z. Peng, H. Akagi, A. Nabae // IEEE Trans. Ind. Applicat. – Nov/Dec 1990. – Vol. 26. – № 6. – P. 983–990.
- [8] Sasaki H. A new method to eliminate ac harmonic currents by magnetic compensation—Considerations on basic design / H. Sasaki, T. Machida // IEEE Trans. Power Appl. Syst. – Sept. 1971. – Vol. 90. – № 5. – P. 2009–2019.
- [9] Corasaniti V.F. Hybrid active filter for reactive and harmonics compensation in a distribution network / V.F. Corasaniti, M.B. Barbieri, P.L. Arnera and other // IEEE Trans. Ind. Electron. – Mar. 2009. – Vol. 56. – № 3. – P. 670–677.
- [10] Krim F. Parameter Estimation of Shunt active Filter for power quality improvement / F. Krim // The 5th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2011) – Shah Alam, Selangor, Malaysia: 6–7 June 2011. – P. 306–311.
- [11] Malesani L. Active filter for reactive power and harmonics compensation / L. Malesani, L. Rossetto, and P. Tenti // Proc. IEEE PESC'86, 1986. – P. 321–330.
- [12] Herrera R.S. Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: Different approaches, assessment, and experimental results / R.S. Herrera, P. Salmerón, H. Kim // IEEE Transaction, Ind. Electron. – Jan. 2008. – Vol. 55. – № 1. – P. 184–196.
- [13] Akagi H. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IPEC'83 – Int. Power Electronics Conf. – Tokyo, Japan, 1983. – P. 1375–1386.
- [14] Akagi H. Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IEEE Trans. Industry Applic. – May/June 1984. – Vol. 20. – P. 625–630.
- [15] Afonso J.L. Shunt Active Filter for Power Quality Improvement / J.L. Afonso, M. Aredes, E. Watanabe and other // International Conference UIE 2000 – «Electricity for a Sustainable Urban Development» – Lisbon, Portugal: 1–4 November 2000. – P. 683–691.
- [16] Nakata A. A new method for separating AC component of instantaneous real power and imaginary power suitable for active filters / A. Nakata, A. Ueda, A. Torii // Proceedings of the Power Conversion Conference – Nagaoka, Japan: Aug 1997. – Vol. 2. – P. 719–724.
- [17] Cui Xiao-Xi Study on DC voltage control of hybrid active power filters / Xiao-Xi Cui, Chi-Seng Lam, Ning-Yi Dai and other // The 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA2011) – Beijing, China: Jun. 2011. – P. 856–861.
- [18] Nos O.V. DC-bus voltage control strategy of active power filter / O.V. Nos, K.A. Shalygin // The 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM–2013: proceedings. – Erlagol, Altai, Russia, 2013. – P. 345–348.
- [19] Нос О.В. Алгоритм управления выходными токами активного силового фильтра с использованием гиперкомплексных чисел / О.В. Нос, В.В. Панкратов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 33–39.
- [20] Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург, Уральское отделение РАН, 2000. – 654 с.
- [21] Нос О.В. Применение алгебры кватернионов в математических моделях электрических машин переменного тока / О.В. Нос // Автоматизированные электромеханические системы: сб. науч. тр. – Новосибирск, НГТУ, 2011. – С. 16–32.
- [22] Фурман А.Я. Комплексные и гиперкомплексные системы в задачах обработки многомерных сигналов / А.Я. Фурман. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 451 с.
- [23] Бранец В.Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский. – М.: Наука. Глав ред. физ.-мат. лит., 1973. – 320 с.
- [24] Кантор И.Л. Гиперкомплексные числа / И.Л. Кантор, А.С. Солодовников. – М.: Наука. Глав ред. физ.-мат. лит., 1973. – 144 с.

REFERENCES

- [1] Akagi H. Active harmonic filters / H. Akagi // Proceedings of the IEEE. – Dec. 2005. – vol. 93, no. 12. – pp. 2128–2141.
- [2] Singh B. A review of active filters for power quality improvement / B. Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra // IEEE Trans. Ind. Electron. – Oct. 1999. – vol. 46, no. 5. – pp. 960–971.
- [3] Shyu K.K. Model reference adaptive control design for a shunt active-power-filter systems / K.K. Shyu, M. Yang, Y.M. Chen and other // IEEE Trans. Ind. Electron. – Jan. 2008. – vol. 55, no. 1. – pp. 97–106.
- [4] Akagi H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning (IEEE Press Series on Power Engineering) / H. Akagi, E. Watanabe, M. Aredes. – New York: Wiley, 2007.
- [5] Gyugyi L. Active ac power filters / L. Gyugyi, E.C. Strycula // IEEE IAS annual meeting. – 1976. – pp. 529–535.
- [6] Mohan N. Active filters for ac harmonic suppression / Mohan N., Peterson H.A., Long W.F. // IEEE/PES Winter Meeting – July 1977. – vol. 96 – pp. 168–174.
- [7] Peng F.Z. A new approach to harmonic compensation in power systems a combined system of shunt passive and series active filters / F.Z. Peng, H. Akagi, A. Nabae // IEEE Trans. Ind. Appl. – Nov/Dec 1990 – vol. 26, no. 6 – pp. 983–990.
- [8] Sasaki H. A new method to eliminate ac harmonic currents by magnetic compensation-Considerations on basic design / H. Sasaki and T. Machida // IEEE Trans. Power Appl. Syst. – Sept. 1971. – vol. 90, no. 5 – pp. 2009–2019.
- [9] Corasaniti V.F. Hybrid active filter for reactive and harmonics compensation in a distribution network / V.F. Corasaniti, M.B. Barbieri, P.L. Arnera and other // IEEE Trans. Ind. Electron. – Mar. 2009. – vol. 56, no. 3 – pp. 670–677.
- [10] Krim F. Parameter Estimation of Shunt active Filter for power quality improvement / F. Krim // The 5th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2011) – Shah Alam, Selangor, Malaysia: 6-7 June 2011. – pp. 306–311.
- [11] Malesani L. Active filter for reactive power and harmonics compensation / L. Malesani, L. Rossetto, P. Tenti // Proc. IEEE PESC'86, 1986, pp. 321–330.
- [12] Herrera R.S. Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: Different approaches, assessment, and experimental results / R.S. Herrera, P. Salmerón, H. Kim // IEEE Transaction, Ind. Electron. – Jan. 2008. – vol. 55, no. 1 – pp. 184–196.
- [13] Akagi H. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IPEC'83 - Int. Power Electronics Conf. – Tokyo, Japan, 1983. – pp. 1375–1386.
- [14] Akagi H. Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IEEE Trans. Industry Applic. – May/June 1984 – vol. 20. – pp. 625–630.
- [15] Afonso J.L. Shunt Active Filter for Power Quality Improvement / J.L. Afonso, M. Aredes, E. Watanabe and other // International Conference UIE 2000 - "Electricity for a Sustainable Urban Development" – Lisbon, Portugal: 1-4 November 2000 – pp. 683–691.
- [16] Nakata A. A new method for separating AC component of instantaneous real power and imaginary power suitable for active filters / A. Nakata, A. Ueda, A. Torii // Proceedings of the Power Conversion Conference – Nagaoka, Japan: Aug 1997. – vol. 2. – pp. 719–724.
- [17] Cui Xiao-Xi Study on DC voltage control of hybrid active power filters / Xiao-Xi Cui, Chi-Seng Lam, Ning-Yi Dai and other // The 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA2011) – Beijing, China: Jun. 2011 – pp. 856–861.
- [18] Nos O.V. DC-bus voltage control strategy of active power filter / O.V. Nos, K.A. Shalygin // The 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM-2013: proceedings. – Erilgol, Altai, Russia, 2013. – pp. 345–348.
- [19] Nos O.V. Algoritmy upravleniya vyhodnymi tokami aktivnogo silovogo fil'tra s ispol'zovaniem giperkompleksnykh chisel / O.V. Nos, V.V. Pankratov // Izv. vuzov. Elektromekhanika. – 2012. – №6. – S. 33–39.
- [20] Shrejner R.T. Matematicheskoe modelirovanie jelektricheskikh modeljeh jelektricheskikh mashin peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovateljami chastoty / R.T. Shrejner. – Ekaterinburg, Ural'skoe otdelenie RAN, 2000. – 654 s.
- [21] Nos O.V. Primenenie algebry kvaternionov v matematicheskikh modeljeh jelektricheskikh mashin peremennogo toka / O.V. Nos // Avtomatizirovannye jelektricheskije sistemy: sb. nauch. tr. – Novosibirsk, NGTU, 2011. – S. 16–32.
- [22] Furman A.Ja. Kompleksnye i giperkompleksnye sistemy v zadachah obrabotki mnogomernykh signalov / A.Ja. Furman. – M.: FIZMATLIT, 2004. – 451 s.
- [23] Branec V.N. Primenenie kvaternionov v zadachah orientacii tverdogo tela / V.N. Branec, I.P. Shmyglevskij. – M.: Nauka. Glav. red. fiz.-mat. lit., 1973. – 320 s.
- [24] Kantor I.L. Giperkompleksnye chisla / I.L. Kantor, A.S. Solodovnikov. – M.: Nauka. Glav. red. fiz.-mat. lit., 1973. – 144 s.

Шалыгин Кирилл Александрович, ассистент кафедры проектирования технологических машин Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – проектирование машин. Имеет 12 публикаций. E-mail: ptm@mail.fam.nstu.ru

Нос Олег Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования технологических машин Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – проектирование машин. Имеет более 60 публикаций. E-mail: kaf@appm.mtf.nstu.ru

K.A. Shalygin, O.V. Nos

Active power filters for improvement of power conditioning

This article presents a review of modern methods for ineffective instantaneous power compensation and the technical application of strategies to control the output currents of an active power filter used in energy efficiency improvement applied to three-phase systems of transmission, distribution and transformation of electric energy.

Key words: active power filter, ineffective instantaneous power correction, quaternion, hypercomplex space.