

УДК 621.314

DOI:10.17213/0136-3360-2016-1-71-77

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АКТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ. ПРЯМОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТЬЮ

Ю.В. Скурятин, А.В. Белоусов

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308034, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

Повышение энергоэффективности систем электроснабжения в части снижения потерь, обусловленных неактивными составляющими полной мощности, может быть достигнуто за счет применения силовых активных фильтров (САФ). Рассматривается стратегия обеспечения посредством САФ требуемого качества потребляемой электроэнергии, основанная на прямом управлении токами сети, реализация которого осуществляется применением релейного управления на скользящих режимах. При этом процессы, протекающие в нагрузке, не контролируются, а формирование токов осуществляется на основе текущей информации о токах сети и потоке энергии в цепи постоянного тока САФ. Реализация предложенного подхода позволяет снизить себестоимость САФ, за счет уменьшения количества датчиков тока. Результаты цифрового моделирования показывают способность системы обеспечивать единичный коэффициент мощности при синусоидальной форме потребляемых токов в случае работы трехфазной сети на существенно нелинейную и несимметричную нагрузку. При этом возмущения, действующие со стороны сети, не оказывают влияния на качество активной фильтрации.

Ключевые слова: силовой активный фильтр, качество электроэнергии, электромагнитная совместимость, полупроводниковый преобразователь, скользящий режим, релейное управление.

Введение

Прогресс в области силовой электроники обусловил широкое использование полупроводниковых преобразователей в составе различного рода электротехнического оборудования. Вместе с тем, полупроводниковые преобразователи электроэнергии (например, выпрямители, тиристорные регуляторы переменного напряжения и др.), являясь нелинейными потребителями, генерируют в сеть высшие гармонические составляющие тока, что, в свою очередь, оказывает негативное влияние на работу сети и других потребителей, подключенных к этой же сети. В условиях ограниченности энергетических ресурсов и непрерывного роста их потребления увеличение доли мощности нелинейных и несимметричных потребителей в общей установленной мощности потребителей электроэнергии делает особенно актуальными вопросы энергоэффективности производства, транспортировки, распределения и потребления электроэнергии, одним из главных

показателей которой является надлежащее качество электрической энергии.

Постановка задачи

Для достижения предельно высокого качества электроэнергии необходимо, чтобы активная мощность, потребляемая от трехфазного симметричного источника, была равна полной мощности, что соответствует отсутствию всех неактивных ее составляющих. Поэтому задачу обеспечения надлежащего качества электрической энергии можно рассматривать как задачу формирования в линейных проводниках трехфазной сети симметричных синусоидальных токов с нулевым фазовым сдвигом относительно соответствующих напряжений, решение которой может быть реализовано применением параллельных силовых активных фильтров (САФ).

Классическая стратегия управления параллельным САФ, определяющая структуру функциональной схемы трехфазной системы с САФ

(рис. 1), предполагает формирование задания на компенсирующие воздействия на основе информации о неактивных составляющих мощности нагрузки, предварительно выделенных из информации о мгновенных значениях токов нагрузки и напряжений на нагрузке. Обработка задания на компенсирующие воздействия осуществляется регуляторами токов САФ с использованием различных методов широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

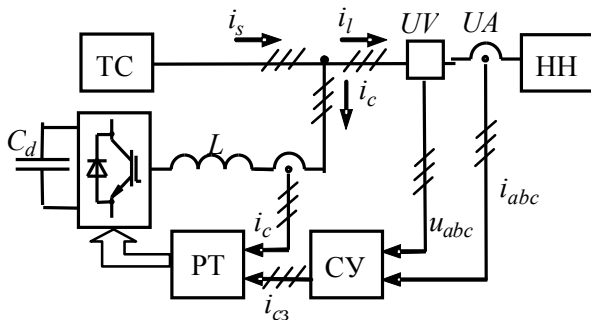


Рис. 1. Функциональная схема системы с параллельным САФ

В рамках задачи повышения эффективности активной фильтрации основное внимание исследователей приковано к развитию методов определения неактивных составляющих мощности нагрузки, на основании которых формируются компенсирующие воздействия. К основным методам, используемым для формирования задания на компенсационные токи, можно отнести теорию мощности по Фризе [1], $p-q$ -теорию мгновенной мощности, предложенную коллективом ученых под руководством профессора Н. Акаги, и ее вариации. Не останавливаясь на широко известных достоинствах указанных методов, отметим их недостатки. Математический аппарат $p-q$ -теории не учитывает несимметрию системы фазных напряжений, что накладывает ограничения на использование этой теории в случае симметрирования фазных токов и формирования синусоидальных фазных токов при несинусоидальных напряжениях сети [2]. $D-q$ -метод позволяет сформировать симметричную трехфазную синусоидальную систему токов независимо от несимметрии и наличия высших гармонических составляющих в напряжении сети [3]. Однако необходимость выполнения ортогональных преобразований координат состояния системы при использовании теорий активной и реактивной мгновенных мощностей при их практической реализации требует высокопроизводительных программно-аппаратных средств [4]. Определенную перспективу в устранении отмеченных недостатков представляет метод с использованием в алгоритмах управления выходными токами САФ гиперкомплексных чисел [4], но

предельные возможности данного подхода по обеспечению качества электроэнергии до конца не изучены. И, наконец, недостатком, свойственным всем указанным выше методам и обусловленным описанной выше стратегией управления, а следовательно, и схемой, является необходимость установки шести датчиков мгновенного значения тока и трех датчиков мгновенного значения напряжения, что существенно повышает себестоимость преобразователя.

Авторами статьи предлагается развитие стратегии управления силовым активным фильтром, сущность которой заключается в непосредственном (прямом) принудительном формировании потребляемой из сети мощности с требуемыми характеристиками качества. Благодаря этому предполагается снизить себестоимость преобразователя за счет уменьшения количества датчиков тока и повысить эффективность активной фильтрации.

Целью работы является разработка управления силовым активным фильтром, которое реализует прямое управление мощностью, потребляемой из сети, и оценка его эффективности при работе сети на несимметричную нелинейную нагрузку.

Решение задачи

Данную задачу можно рассматривать как задачу одновременного принудительного формирования трех координат объекта управления, имеющих между собой электрическую связь и взаимосвязанные каналы задающих и возмущающих воздействий. В качестве объекта управления выступают линейные проводники сети, а устройством управления является САФ, необходимым условием работы которого является поддержание напряжения звена постоянного тока в определенном диапазоне значений. При такой постановке задачи целью управления будет формирование в линейных проводниках трехфазной сети симметричных синусоидальных токов с одновременным поддержанием напряжения на конденсаторе САФ в заданном диапазоне значений. Влияние нагрузки в таком случае можно рассматривать как возмущающее воздействие на объект управления, изменяющееся заранее непредсказуемым образом, но ограниченное по величине и скорости изменения.

В качестве метода управления для решения поставленной задачи целесообразно применить разрывное управление на скользящих режимах, достоинства которого широко известны, а эффективность применения в задачах принудительного формирования координат системы показана в [5 – 8].

В общем виде система описывается уравнением

$$\dot{x} = f(x, t, u),$$

где x, f – векторы, размерность которых определяется количеством переменных состояния системы; u – вектор управления, каждая компонента которого претерпевает разрывы по своей поверхности, заданной уравнением $s_i(x) = 0$:

$$u_i(x, t) = \begin{cases} u_i^+(x, t) & \text{при } s_i(x) > 0; \\ u_i^-(x, t) & \text{при } s_i(x) < 0 \quad (i=1, 2, 3). \end{cases}$$

В качестве поверхностей разрыва, количество которых равно размерности вектора управления, выберем

$$S_i = \eta_i = 0 \quad (i=1, 2, 3), \quad (1)$$

где $\eta_1 = I_{sa3} - I_{sa}$ – ошибка величины тока, протекающего в линейном проводе фазы A ; $\eta_2 = I_{sb3} - I_{sb}$ – ошибка величины тока, протекающего в линейном проводе фазы B ; $\eta_3 = I_{sc3} - I_{sc}$ – ошибка величины тока, протекающего в линейном проводе фазы C ; $I_{sa3}, I_{sb3}, I_{sc3}$ – сигналы задания токов в линейных проводниках сети; I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} – сигналы обратной связи, пропорциональные токам, протекающим в линейных проводниках сети.

Применительно к рассматриваемой системе условие существования скользящего режима будет

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_k(x) > 0 & \text{ при } (S_k(x) < 0 \text{ and } \forall u_j); \\ \dot{S}_k(x) < 0 & \text{ при } (S_k(x) > 0 \text{ and } \forall u_j); \\ (j=1, 2, 3; k=1, 2, 3; j \neq k). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для физической реализации управления введем вектор состояния системы $u_p = (u_{p1}, u_{p2}, u_{p3})^T$, компоненты которого определяются положением изображающей точки относительно соответствующей поверхности переключения (1):

$$u_{pi} = \begin{cases} 1 & \text{при } s_i(x) > 0; \\ 0 & \text{при } s_i(x) < 0 \quad (i=1, 2, 3). \end{cases}$$

Каждой комбинации состояний компонент вектора u_p ставится в соответствие комбинация импульсов управления вентилями, реализующая вектор управления, который удовлетворяет условию существования скользящего режима (2).

Для определения амплитуд сигналов задания токов, протекающих в линейных проводниках сети синфазно с соответствующими фазными напряжениями, рассмотрим баланс активных мощностей в системе:

$$P_S = P_l + \Delta P + P_C,$$

где P_S – активная мощность, потребляемая из сети, $P_S = \frac{1}{T} \int_0^T (i_{sa}u_{sa} + i_{sb}u_{sb} + i_{sc}u_{sc}) dt$; P_l – активная мощность нагрузки; ΔP – мощность потерь; P_C – мощность, затрачиваемая на накопление (или сброс) энергии в конденсаторе звена постоянного тока, $P_C = \frac{1}{T} \int_0^T (i_d u_d) dt$; T – период времени, на котором осуществляется интегрирование мощностей.

Для достижения цели управления необходимо, чтобы вся мощность, потребляемая из сети в текущем периоде, расходовалась на покрытие потерь в преобразователе и необратимое преобразование энергии в нагрузке:

$$P_S = P_l + \Delta P. \quad (3)$$

В этом случае мощность накопления будет равна нулю – $P_C = 0$, а энергия, накопленная в конденсаторе звена постоянного тока САФ, в конце каждого периода будет неизменна. При нарушении (3) на $(i - 1)$ -м периоде мощность, потребляемая из сети на последующем i -м периоде P_{Si} , корректируется на величину, равную мощности накопления, по формуле

$$P_{Si} = P_{S(i-1)} + P_{C(i-1)} = P_{S0} + \sum_{m=1}^{i-1} P_{Cm}, \quad (4)$$

где P_{S0} – активная мощность, потребляемая из сети перед вступлением в работу САФ; $P_{S(i-1)}$ – мощность, потребляемая из сети на $(i - 1)$ -м периоде; $P_{C(i-1)}$ – мощность, затрачиваемая на накопление (или сброс) энергии в конденсаторе звена постоянного тока на $(i - 1)$ -м периоде,

$$P_{C(i-1)} = \frac{1}{T} \int_{t_{i-1}}^{t_{i-1}+T} (i_d u_d) dt.$$

Формирование мощности сети на каждом периоде в соответствии с (4) обеспечит выполнение (3), однако среднее значение напряжения на конденсаторе САФ будет иметь статическую ошибку, зависящую от потребляемой нагрузкой мощности. Для поддержания напряжения на конденсаторе САФ в заданном диапазоне значений необходимо на каждом i -м периоде потребляемую из сети мощность дополнительно скорректировать на величину

$$P_{Ki} = P_{K(i-1)} + \frac{\Delta Q_{i-1}}{\Delta t} = \sum_{m=0}^{i-1} \frac{\Delta Q_m}{\Delta t}, \quad (5)$$

где ΔQ_{i-1} – отклонение энергии, накопленной в конденсаторе звена постоянного тока (ЗПТ) САФ от заданного значения, $\Delta Q_{i-1} = \frac{C_d U_{d3}^2}{2} - \frac{C_d U_{d(i-1)}^2}{2}$;

U_{d3} – заданное значение напряжения на конденсаторе звена постоянного тока САФ; $U_{d(i-1)}$ – значение напряжения на конденсаторе ЗПТ САФ, определяемое в конце $(i - 1)$ -го периода; Δt – коэффициент, определяющий скорость обработки отклонения напряжения на конденсаторе ЗПТ САФ.

С учетом (5) выражение (4) будет иметь вид

$$P_{Si} = P_{C(i-1)} + P_{S(i-1)} + P_{K(i-1)} + \frac{\Delta Q_{(i-1)}}{\Delta t} = P_{S0} + \sum_{m=1}^{i-1} P_{Cm} + \sum_{m=0}^{i-1} \frac{\Delta Q_m}{\Delta t}.$$

Амплитуда токов заданий для i -го периода будет

$$I_{mi} = \frac{2P_{Si}}{3U_m}, \tag{6}$$

где U_m – амплитуда напряжений сети.

Схема силовой части трехфазной системы (рис. 2), реализующая предложенное управление, содержит: трехфазную сеть, состоящую из источников e_a, e_b, e_c и внутреннего сопротивления сети Z_s ; силовой активный фильтр, состоящий из вентильного блока на транзисторах $VT1 - VT6$, емкостного фильтра в цепи постоянного тока C_d и трехфазного индуктивного фильтра низких частот на стороне переменного тока L ; трехфазную нелинейную несимметричную нагрузку НН. Датчики тока $UA1-UA3$ устанавливаются непосредственно в линейных проводниках сети, что необходимо для реализации прямого управления мощностью. Синхронизация формируемых токов с сетью осуществляется посредством датчиков напряжения $UV1-UV3$. Вычисление амплитуд токов задания осуществляется в соответствии с (6) на основе текущей информации от датчика тока $UA4$ и напряжения $UV4$, установленных в ЗПТ САФ.

Приняты допущения: сеть образует трехфазную симметричную систему ЭДС; внутренние сопротивления сети линейны, и их параметры не зависят от времени; вентили САФ идеальные; конденсатор цепи постоянного тока C_d предварительно заряжен до номинального напряжения и имеет емкость, при которой энергия конденсатора, заряженного до номинального напряжения, превышает энергию, потребляемую

нагрузкой в течение двух (или более) периодов сетевого напряжения.

Функциональная схема системы управления (см. рис. 2) содержит: блок, вычисляющий в соответствии с (6) сигналы задания формируемых токов БВЗТ; сумматоры $AW1 - AW3$, определяющие отклонение токов от задания; релейные элементы $A1 - A3$, вычисляющие вектор состояния системы u_p ; блок логики F , осуществляющий выбор комбинаций импульсов управления вентилями в функции вектора u_p .

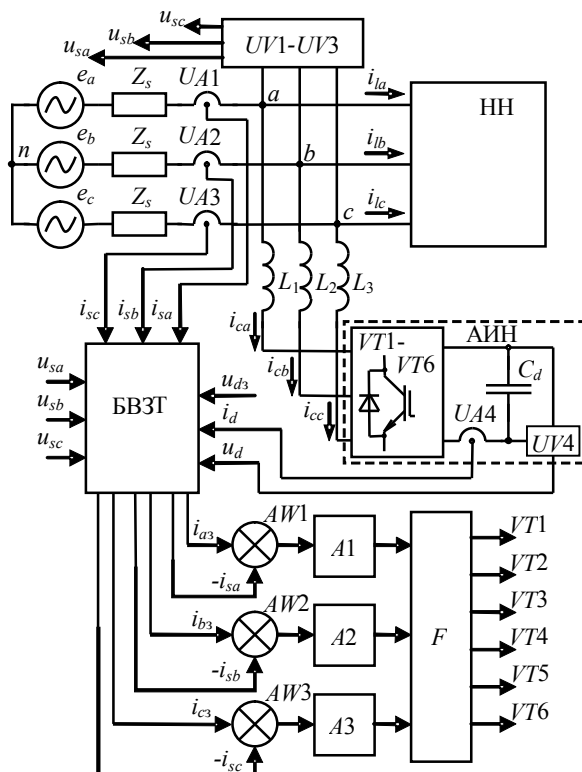


Рис. 2. Функциональная схема трехфазной системы с САФ

Используя компьютерное моделирование, рассмотрим свойства системы, реализующей предложенное управление. На рис. 3, а представлены диаграммы работы системы на несимметричную активно-индуктивную нагрузку. Параметры системы: $L_1 = L_2 = L_3 = 1$ мГн, $C_d = 1000$ мкФ, $U_{dн} = 700$ В, $\Delta t = 40 \cdot 10^{-3}$, $R_s = 0,1$ Ом, $L_s = 10 \cdot 10^{-6}$ мГн. Параметры нагрузки: активные сопротивления фаз соответственно равны $R_{на} = 3$ Ом, $R_{nb} = 10$ Ом, $R_{nc} = 50$ Ом, индуктивности фаз равны $L_{на} = L_{nb} = L_{nc} = 50$ мГн. На интервале времени от 0 до 0,02 с САФ отключен. Токи САФ равны нулю, токи, потребляемые из сети, несимметричны и имеют различный фазовый сдвиг относительно соответствующих напряжений. После вступления в работу САФ (момент времени $t = 0,02$) система формирует в линейных проводниках трехфазной сети синусоидальные симметричные токи ($THD_1 < 0,7\%$) с практически нулевым фазовым

сдвигом относительно соответствующих напряжений, что соответствует высокому качеству потребляемой электроэнергии.

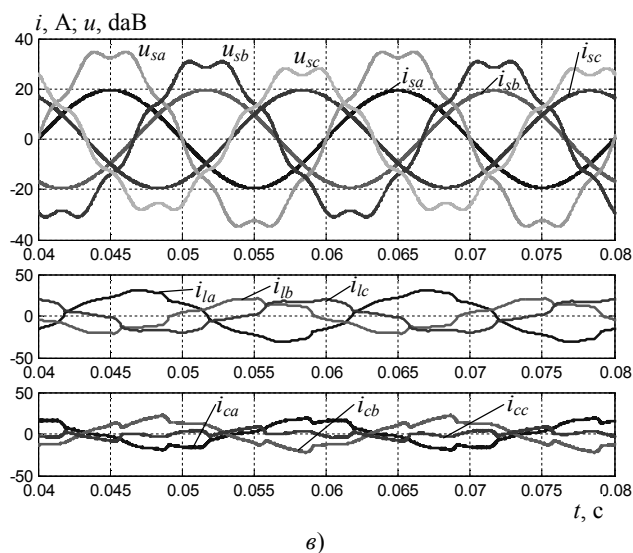
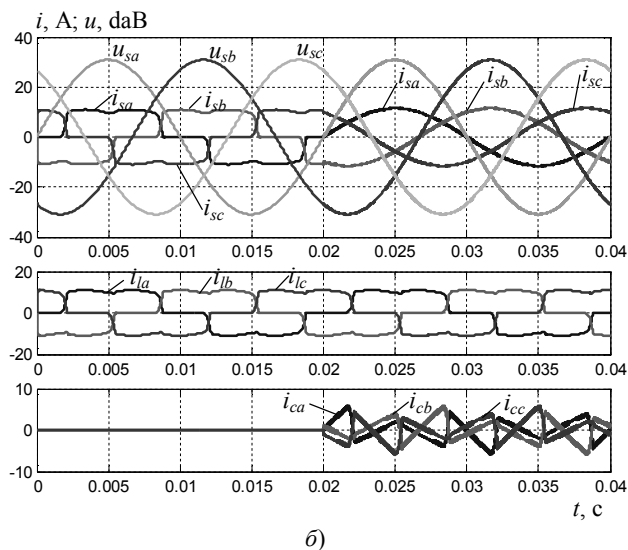
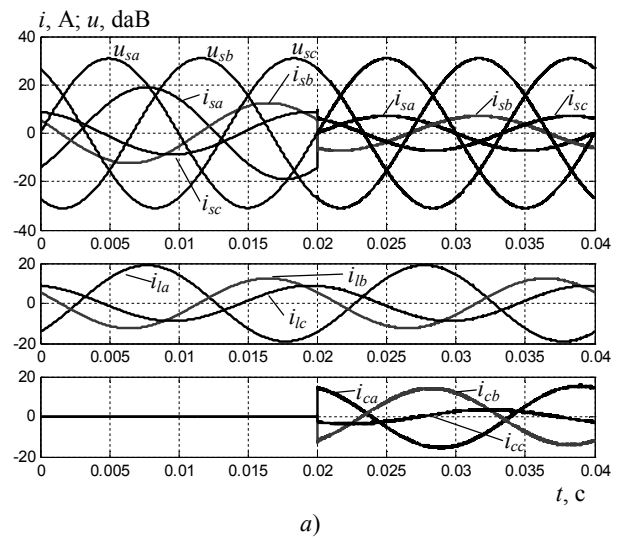


Рис. 3. Работа на: *a* – несимметричную нагрузку; *б* – нелинейную нагрузку; *в* – несимметричную нелинейную нагрузку при несинусоидальном несимметричном источнике напряжений

При работе на нелинейную нагрузку, в качестве которой выступает трехфазный мостовой выпрямитель (сопротивление нагрузки выпрямителя равно 50 Ом, индуктивность коммутационных дросселей на стороне переменного тока равна 1 мГн), система, как и в предыдущем случае, обеспечивает гармоническую форму потребляемых токов при $\cos\varphi = 1$ (рис. 3, *б*).

Наличие в форме напряжений источника нелинейных искажений и несимметрии системы фазных напряжений при работе на несимметричную и нелинейную нагрузку не оказывает влияния на способность системы обеспечивать высокое качество потребляемой электроэнергии (рис. 3, *в*).

На рис. 4 показаны диаграммы работы системы на несимметричную нелинейную нагрузку при отклонении начального значения напряжения на конденсаторе от заданного значения на величину 90 В. После вступления в работу САФ формирует, как и в предыдущих случаях, симметричные синусоидальные токи с нулевым фазовым сдвигом относительно соответствующих напряжений. При этом за счет выбора требуемого значения амплитуды формируемых токов система отрабатывает отклонение напряжения на конденсаторе фильтра от заданного значения с последующим поддержанием на заданном уровне.

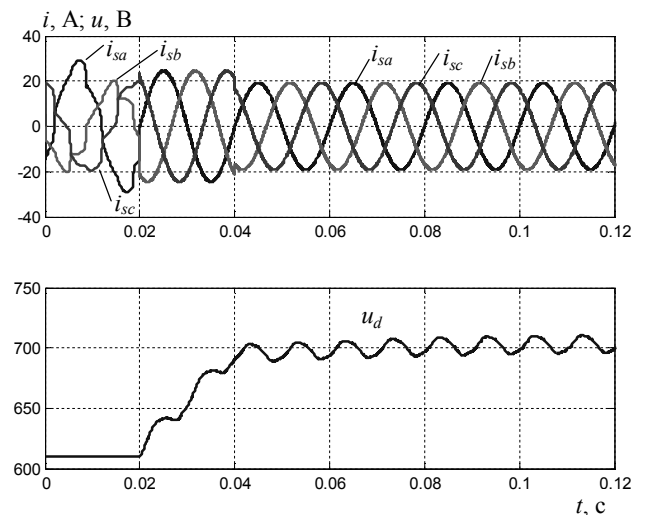


Рис. 4. Переходный процесс установления напряжения звена постоянного тока

ВЫВОДЫ

1. Разработанный алгоритм, реализующий прямое управление мощностью, потребляемой из сети, позволяет сформировать в линейных про-

водниках сети практически синусоидальные токи с нулевым фазовым сдвигом относительно соответствующих напряжений при работе сети на существенно нелинейную и несимметричную нагрузку. При этом нелинейные искажения или несимметрия системы фазных напряжений источника не оказывают влияния на качество активной фильтрации.

2. Предложенное управление позволяет уменьшить количество датчиков тока в силовых цепях, снизить требования к точности датчиков напряжения и, соответственно, снизить себестоимость САФ.

3. Практическая реализация разработанного управления не требует выполнения преобразования координат или других сложных математических вычислений, что позволяет минимизировать количество математических операций программной части системы управления (СУ) и, соответственно, снизить требования к производительности микропроцессорной техники аппаратной части СУ.

4. Предложенное управление является перспективным для решения задачи обеспечения предельно высокого качества электроэнергии, и ее дальнейшее исследование и развитие имеет большое практическое значение.

Скурятин Юрий Васильевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и автоматика» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. E-mail: yuriy-skuryatin@yandex.ru

Белоусов Александр Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и автоматика» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. E-mail: ntk@intbel.ru

Поступила в редакцию

14 октября 2015 г.

*Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika
(Russian Electromechanics)
2016, no. 1(543), pp. 71-77*

IMPROVING THE ACTIVE FILTERING EFFICIENCY. DIRECT CONTROL OF POWER CONSUMPTION

Yu.V. Skuriatin, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russian Federation, 308012, Belgorod, Kostyukov str., 46.

A.V. Belousov, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russian Federation, 308012, Belgorod, Kostyukov str., 46.

Nowadays Active Power Filters (APF) are one of the most effective devices to improve energy efficiency of power supply systems. They are designed for the harmonic filtering, load balancing, power factor correction, etc. This paper presents a strategy of ensuring electrical power of the required quality using APF. The strategy is based on direct control of the line currents which is implemented by means of the sliding mode control. In this case, the processes occurring in the load are out of control. Current generating takes place on the basis of processing data on the line currents and the energy flow in the DC circuit of APF. Implementing the proposed approach can allow to reduce the working cost of APF by reducing the number of current sensors. The results of digital modeling confirm the ability of the system to provide the unity power factor under the sinusoidal form of

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Лохов С.М. Энергетические составляющие мощности вентиляльных преобразователей: учеб. пособие. Ч.1. Челябинск: ЮУрГУ, 1999. 106 с.

2. Сінолиций А.Ф., Кольсун В.А., Козлов В.С. Р-Q теорія миттєвої потужності для пристроїв активної фільтрації. Обмеження застосування // Електротехніка та електроенергетика. 2013. № 2. С. 34 – 39.

3. Бурлака В.В., Поднебенная С.К., Дьяченко М.Д. Обзор методов управления активными фильтрами // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Кременчук: КрНУ, 2011. Вип. 1/2011 (13). С. 51 – 54.

4. Нос О.В., Панкратов В.В. Алгоритм управления выходными токами активного силового фильтра с использованием гиперкомплексных чисел // Изв. вузов. Электромеханика. 2012. № 6. С. 33 – 39.

5. Частотно-токовый преобразователь с релейным управлением / Ю.В. Скурятин, Ю.П. Самчелеев, И.С. Шевченко, Д.И. Морозов // Технічна електродинаміка. Тем.вип. Силова електроніка та енергоефективність. 2003. Ч. 3. С. 5 – 8.

6. Скурятин Ю.В., Денисевич Н.А. Автономный инвертор напряжения электромагнитно совместимый с нагрузкой: Сб. науч. трудов ДонГТУ. Алчевск: ДонГТУ. 2011. Вып. 35. С. 293-301.

7. Скурятин Ю.В., Денисевич Н.А. Повышение электромагнитной совместимости частотно-токовых преобразователей с нагрузкой // Технічна електродинаміка. 2012. № 2. С. 65 – 66.

8. Скурятин Ю.В., Денисевич Н.А. Повышение электромагнитной совместимости с сетью преобразователей частоты: Сб. науч. трудов ДонГТУ. Алчевск: ДонГТУ. 2012. Вып. 36. С. 407 – 414.

the consumed currents in a three-phase circuit feeding a highly non-linear and unbalanced load. As this takes place, the line disturbances do not affect the quality of the active filtering.

Key words: active power filters, power quality, electromagnetic compatibility, power conditioning, semiconductor converter, sliding mode control, on-off control.

R E F E R E N C E S

1. Lokhov S.M. *Energeticheskie sostavlyayushchie moshchnosti ventil'nykh preobrazovateley* [Energy components for power rectifier converters]. Chelyabinsk, South Ural State University Publ., 1999, 106 p.
2. Sinolytsyi A.F., Kolsun V.A., Kozlov V.S. P-Q teoriia mittevoi potuzhnosti dlya pristroiv aktyvnoi filtratsii. Obmezhennia zastosuvannia [Irp p-q theory for active power filters. limitation of application]. *Elektrotehnika ta elektroenerhetika*, 2013, no. 2, pp. 34 – 39. [In Ukraina]
3. Burlaka V.V., Podnebennaia S.K., D'iachenko M.D. Obzor metodov upravleniia aktivnymi fil'trami [Review of active filters control methods]. *Elektromekhanichni i energozberihayuchi systemy*, 2011, vol. 1/2011 (13), pp. 51 – 54. [In Ukraina]
4. Nos O.V., Pankratov V.V. Algoritm upravleniya vyhodnymi tokami aktivnogo silovogo filtra s ispolzovaniem giperkompleksnyh chisel [Algorithm of management of output currents of the active power filter with use of hypercomplex numbers]. *Izv. vuzov. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2012, no. 6, pp. 33 – 39. [In Russ.]
5. Skuriatin Yu.V., Samcheleev Yu.P., Shevchenko I.S., Morozov D.I. Chastotno-tokovyy preobrazovatel s releynym upravleniem [The frequency and current converter with relay management]. *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vyp. Silova elektronika ta enrgoefektivnist*, 2003, vol. 3, pp.5-8. [In Ukraina]
6. Skuriatin Yu. V. Denisevich N. A. Avtonomnyy invertor napryazheniya elektromagnitno sovmestimyy s nagruzkoy [The autonomous voltage inverter possessing electromagnetic compatibility with the load]. *Sbornik nauchnyh trudov Donbasskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*, 2011, vol. 35, pp.293-301.
7. Skuriatin Yu.V., Denisevich N.A. Povyshenie elektromagnitnoy sovmestimosti chastotno-tokovykh preobrazovateley s nagruzkoy [Increase of electromagnetic compatibility of converter of frequency of current with the load]. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2012, no. 2, pp. 65-66. [In Ukraina]
8. Skuriatin Yu.V., Denisevich N.A. Povyshenie elektromagnitnoy sovmestimosti s set'yu preobrazovateley chastoty [Increase of electromagnetic compatibility of converters of frequency with the network]. *Sb. nauch. trudov DonGTU*, 2012, vol. 36, pp. 407-414. [In Ukraina]

Information about the authors:

Yurii V. Skuriatin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: yuriy-skuriatin@yandex.ru

Aleksandr V. Belousov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: ntk@intbel.ru

Received 14 October 2015