

УДК 621.314.26

**С.В. КОРОЛЬ** (канд. техн. наук)  
**Национальный технический университет Украины**  
**«Киевский политехнический институт»**  
[svkorol@ukr.net](mailto:svkorol@ukr.net)

## ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНЫМ КОРРЕКТОРОМ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

*Предложен новый алгоритм векторного управления трехфазным мостовым преобразователем, который работает в режиме компенсации реактивной мощности. Синтез и исследование выполнялось с использованием полной нелинейной модели широтноимпульсного преобразователя. Показано, что алгоритм обеспечивает асимптотическое регулирование реактивной компоненты входного тока преобразователя.*

**Ключевые слова:** активный корректор, коэффициент мощности, реактивная мощность, векторное управление, трехфазный широтно-импульсный преобразователь, звено постоянного тока.

**Актуальность работы.** Корректировка коэффициента мощности позволяет уменьшить потери электроэнергии в сетях электроснабжения, уменьшить нагрузку на сеть, повысить качество электроэнергии, а, следовательно, увеличить срок службы и качество работы потребителей подключенных к этой сети. Развитие цифровой техники и технологий создания силовых ключей привело к активизации разработки активных компенсаторов реактивной мощности на основе полупроводниковых преобразователей, которые позволяют обеспечить плавное регулирование реактивной мощности и, следовательно, достичь ее полной компенсации. Разработка алгоритмов управления трехфазными мостовыми преобразователями базируется на использовании структуры с подчиненным регулированием координат и с гистерезисным управлением входными токами [1] или упреждающим управлением токами с постоянной частотой коммутации [2], [3]. Такие подходы основаны на линеаризованной модели, и поэтому не обеспечивают возможного быстрого действия и точности регулирования, а также требуют значительной емкости в звене постоянного тока.

**Цель работы.** Разработка и исследование нового векторного алгоритма управления реактивной мощностью на входе трехфазного мостового преобразователя работающего в режиме компенсатора реактивной мощности.

**Результаты исследования.** В работе предложен алгоритм управления трехфазным мостовым повышающим АС-DC преобразователем, работающим в режиме компенсатора реактивной мощности. При рассмотрении считается, что все элементы цепи линейны и их параметры не зависят от времени, все ключи и источники напряжения идеальны, а ключи переключаются так, что выходное напряжение звена постоянного тока  $V_d$  никогда не уменьшается до нуля. Разработка алгоритма базируется на том, что  $V^* > 0$  – постоянное заданное значение напряжения в звене постоянного тока, все параметры УВ известны и постоянны, токи  $i_d$ ,  $i_q$  и напряжение в звене постоянного тока  $V_d$  доступны для измерения.

В синхронно вращающейся системе координат (d-q) ориентированной по вектору напряжения сети, уравнения динамики токов на входе преобразователя имеют вид [4]:

$$L di_d / dt = \omega Li_q - Ri_d - V_d p_d / 2 + E \quad (1)$$

$$L di_q / dt = -\omega Li_d - Ri_q - V_d p_q / 2 \quad (2)$$

где  $\omega$  - угловая частота вращения вектора напряжения,  $p_d$  и  $p_q$  - функции переключения,  $E$  - амплитуда фазного напряжения.

Дифференциальное уравнение для напряжения в цепи постоянного тока преобразователя:

$$CdV_d / dt = 3(p_d i_d + p_q i_q) / 4, \quad (3)$$

Для модели преобразователя, которая описывается системой из трех нелинейных дифференциальных уравнений, нужно синтезировать алгоритм формирования вектора управляющих воздействий  $p = (p_d, p_q)^T$ .

Основной целью управления активным корректором является регулирование реактивной мощности, которая пропорциональна реактивной компоненте входного тока преобразователя. Поэтому целью управления является

$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{i}_q = 0$ , где  $\tilde{i}_q = i_q - i_q^*$ ,  $\tilde{i}_q$  и  $i_q^*$  – ошибка регулирования и задание реактивной составляющей входного тока преобразователя соответственно. Дополнительно, алгоритм должен обеспечивать стабилизацию напряжения в звене постоянного с ограниченной ошибкой  $\tilde{V} = V_d - V^*$ .

Сформируем алгоритм управления реактивной компонентой вектора входного тока преобразователя в виде:

$$p_q = -2L \left( \omega i_d + R i_q^* / L - k_{iq} \tilde{i}_q - x_q \right) / V_d, \quad V_d \neq 0 \quad (4)$$

$$\dot{x}_q = k_{iqi} \tilde{i}_q,$$

где  $k_{iq} > 0$ ,  $k_{iqi} > 0$  - настроечные коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих регулятора тока по оси q.

В реальных установках целью является полная компенсация реактивной мощности в установившихся режимах, поэтому скорость изменения задания для реактивной компоненты может быть снижена до уровня необходимого для принятия  $i_q^* = const$ . В этом случае, после подстановки (4) в (3), результирующая динамика ошибки отработки реактивной составляющей тока запишется:

$$\dot{\tilde{i}}_q = - \left( R/L + k_{iq} \right) \tilde{i}_q - x_q - i_q^* \quad (5)$$

$$\dot{x}_q = k_{iqi} \tilde{i}_q. \quad (6)$$

Как видно из (5) динамика ошибок отработки реактивного тока линейна и асимптотически устойчива для всех  $k_{iq} > 0$ ,  $k_{iqi} > 0$ . Дополнительно, за счет развязывающих свойств управления, достигается независимость регулирования реактивной компоненты тока от процессов регулирования в контуре напряжения.

Уравнения динамики подсистемы регулирования напряжения, исходя из уравнений (3) и (4) запишутся:

$$\dot{V}_d = 3 \left( p_d i_d + p_q i_q \right) / 4C \quad (7)$$

$$\dot{i}_d = -R i_d / L + \omega i_q + E/L - V_d p_d / 2L.$$

Систему управления напряжением в звене постоянного тока построим по двух контурной структуре с внутренним контуром регулирования тока  $i_d$  и внешним – регулирования  $V_d$ . Алгоритм регулирования тока по оси d

$$p_d = -2L \left( R i_d^* / L - \omega i_q - E/L - k_{id} \tilde{i}_d - x_d \right) / V_d \quad (8)$$

$$\dot{x}_d = k_{idi} \tilde{i}_d,$$

при  $i_d^* = const$ , обеспечивает асимптотическое затухание ошибки регулирования тока  $\tilde{i}_d$ , динамика которой описывается уравнением:

$$\dot{\tilde{i}}_d = - \left( R/L + k_{id} \right) \tilde{i}_d - x_d \quad (9)$$

$$\dot{x}_d = k_{idi} \tilde{i}_d.$$

Динамика ошибки регулирования напряжения, после подстановки (4), (8) в (3) имеет вид:

$$\dot{\tilde{V}} = -3L \left[ \left( R i_d^* / L - \omega i_q - E/L - k_{id} \tilde{i}_d - x_d \right) i_d + \left( R i_q^* / L + \omega i_d - k_{iq} \tilde{i}_q - x_q \right) i_q \right] / 2C V_d. \quad (10)$$

Сформировав задание для тока  $i_d$

$$i_d^* = \left( E - \sqrt{E^2 + 4R \left( 2C k_i V_d \tilde{V} / 3 - R i_q^{*2} \right)} \right) / 2R, \quad (11)$$

получим динамику ошибки стабилизации напряжения в звене постоянного тока

$$\dot{\tilde{V}} = - \frac{3L}{2C V_d} \left[ \left( \frac{R}{L} i_d^* - \omega i_q - \frac{E}{L} \right) \tilde{i}_d + \left( -\omega \tilde{i}_q - k_{id} \tilde{i}_d - x_d \right) i_d + \left( \frac{R}{L} i_q^* + \omega i_d \right) \tilde{i}_q + \left( \omega \tilde{i}_d - k_{iq} \tilde{i}_q - x_q \right) i_q \right] - k_i \tilde{V}. \quad (12)$$

Возмущение, вносимое составляющей пропорциональной  $\tilde{i}_q$  через третье и четвертое слагаемое в (12), затухает со скоростью определяемой коэффициентами  $k_{iq}$  и  $k_{iqi}$  и независит от ошибки регулирования напряжения, а влияние первых двух слагаемых нивелируется весомой отрицательной составляющей  $-k_i \tilde{V}$ .

Моделирование производилось для модели (1) – (3) при питании от трехфазной сети с амплитудой напряжения  $E = 310$  В, частотой 50 Гц, индуктивностью входного фильтра  $L = 0.01$  Гн и активным сопротивлением  $R = 1$  Ом. Значения настроечных параметров в алгоритме управления (4), (8), (11) использовались следующие:  $k_i = 200$ ,  $k_{id} = 50$ ,  $k_{idi} = 625$ ,  $k_{iq} = 50$ ,  $k_{iqi} = 625$ . Считалось что конденсатор в звене постоянного тока ( $\tilde{N} = 1000 \dot{i} \hat{e} \hat{O}$ ) предварительно заряжен до 540 В и заданное значение напряжения в звене постоянного тока  $V^*$  за 0.2с возрастает с 540 до 700В, рис. 1. В момент времени  $t = 0.4$  с происходит скачек задания для реактивной компоненты тока на входе преобразователя  $i_q$  с нулевого значения до 20 А, а в момент времени  $t = 0.7$  с происходит реверсирование задания до -20 А. Из графика видно, что ошибка регулирования реактивной компоненты входного тока  $i_q$  при неизменном задании равна нулю, а ошибки,

возникающие при скачкообразном изменении задания  $i_q^*$  затухают в ноль за 0.2с. При этом ошибка регулирования напряжения в звене постоянного тока не превышает 10 В, а токи являются ограниченными. В установившемся режиме фазный ток и напряжения на входе преобразователя синусоидальны, при этом до 0.7с ток опережает напряжение почти на  $90^\circ$ , а после этого отстает на тот же угол.

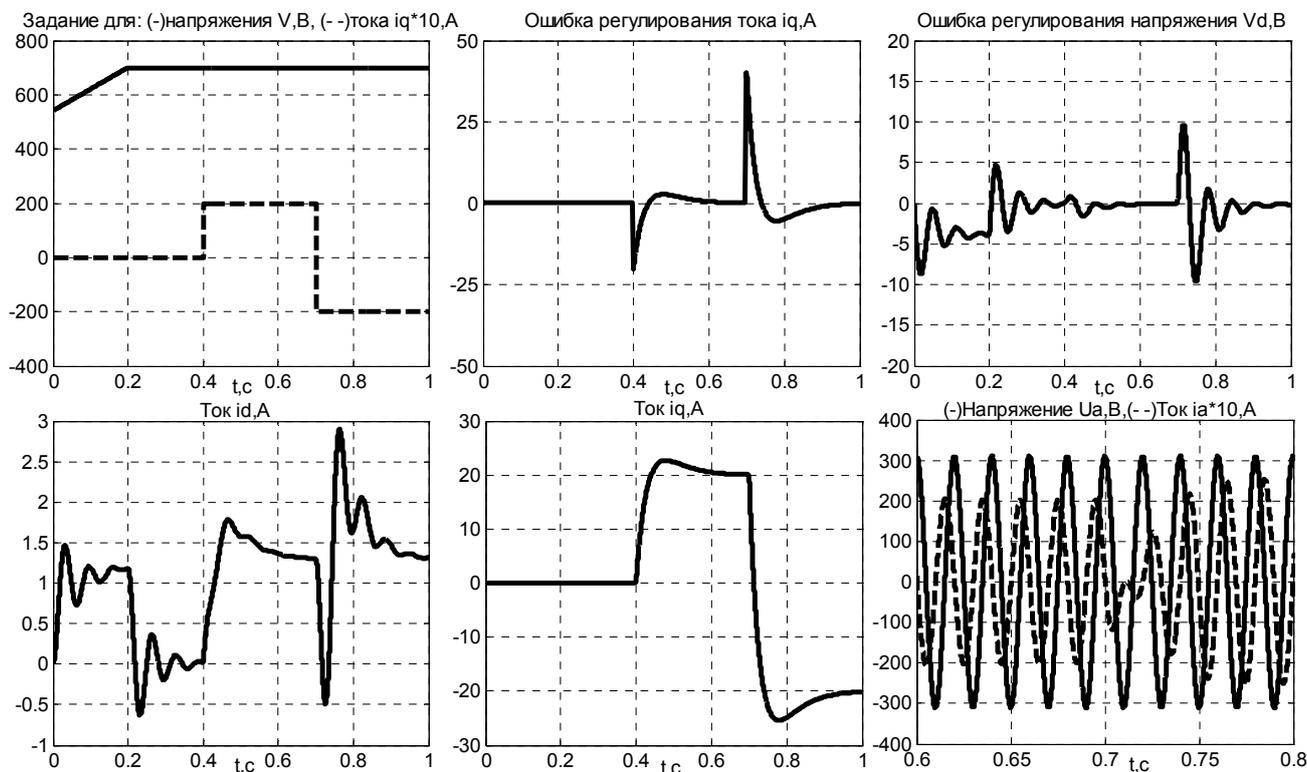


Рисунок 1 – Графики переходных процессов при компенсации реактивной мощности

**Выводы.** Предложен новый алгоритм управления компенсатором реактивной мощности на основе трехфазного широтно-импульсного преобразователя, который позволяет развязать процессы управления реактивной компонентой входного тока преобразователя и стабилизации напряжения в звене постоянного тока. Предложенное решение обеспечивает регулирование реактивной компоненты входного тока преобразователя с нулевой статической ошибкой, приемлемое качество стабилизации напряжения в звене постоянного тока при синусоидальных входных токах преобразователя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B.T.Ooi, J. C. Salmon, J. W. Dixon, and A. B. Kulkarni. A three-phase controlled-current PWM converter with leading power factor // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1987. – vol.IA-23, – No1, – pp. 78-84.
2. R. Wu, S. B. Dewan, and G. R. Slemon. A PWM ac-to-dc converter with fixed switch frequency // IEEE Trans. Ind. Applicat., – 1990. – vol.26. – No.5, – pp. 880-885.
3. E. Wernekinck, A. Kawamura, and R. Hoft, “A high frequency ac/dc converter with unity power factor and minimum harmonic distortion”, *IEEE Trans. Power Electron.* - 1991. - vol. 6, no. 3. - pp. 364-370.
4. Пересада С.М. Новая концепция управления входным преобразователем: формирование полной энергии преобразования / С.М. Пересада, С.В. Король // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2002. – Ч. 1. – С. 66 – 70.

#### REFERENCES

1. B.T.Ooi, J. C. Salmon, J. W. Dixon, and A. B. Kulkarni. *A three-phase controlled-current PWM converter with leading power factor* // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1987. – vol.IA-23, – No1, – pp. 78-84.
2. R. Wu, S. B. Dewan, and G. R. Slemon. *A PWM ac-to-dc converter with fixed switch frequency* // IEEE Trans. Ind. Applicat., – 1990. – vol.26. – No.5, – pp. 880-885.
3. E. Wernekinck, A. Kawamura, and R. Hoft, “*A high frequency ac/dc converter with unity power factor and minimum harmonic distortion*”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 6, no. 3, pp. 364-370, 1991.
4. Peresada S.M., Korol S.V. *The new concept of the input controlled converter: the formation of the total energy conversion* *Tehnichna elektrodinamika. Tematichnij випуск „Silova elektronika ta energoefektivnist”*. –2002. – part. 1. – pp. 66 – 70.

С.В. КОРОЛЬ

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

**Векторне керування активним коректором коефіцієнта потужності.** Запропоновано новий нелінійний алгоритм векторного керування трифазним мостовим перетворювачем, який працює в режимі компенсації реактивної потужності. Синтез і дослідження виконувалось з використанням повної нелінійної моделі широтноімпульсного перетворювача. Показано, що алгоритм забезпечує асимптотичне регулювання реактивної компоненти вхідного струму перетворювача.

**Ключові слова:** активний коректор, коефіцієнт потужності, реактивна потужність, векторне керування, трифазний широтно-імпульсний перетворювач, ланка постійного струму.

S. KOROL

National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute"

**Vector Control of the Active Corrector of Power Factor.** Power factor correction reduces the power losses in power networks, reduces the network load, improves power quality, and, therefore, increases the lifetime and performance of electric devices connected to the network. Active correctors can smoothly adjust the reactive power, reaching full power factor correction. Implementation of vector methods for active compensator control can improve performance and accuracy of control comparative with the scalar control methods. A new nonlinear vector control algorithm for three-phase bridge converter, which operates in reactive power compensation mode, was proposed. Design made for the full nonlinear model of three-phase inverter in the vector voltage oriented coordinate system. The proposed algorithm consists of: double circuit system of voltage stabilization in the DC link, and of input current reactive component control subsystem, which does not depend of the voltage stabilization in the DC link. The analytical dependences for dynamics error of converter input current reactive component and voltage in the DC link are obtained. It is shown that asymptotic stability of converter input current reactive component control subsystem is achieved. Converter input current reactive component control error depends on the rate of reference change and at a constant reference goes to zero. The theoretical conclusions are confirmed by computer simulation using the full nonlinear model of pulse-width converter. Simulation has shown that the proposed algorithm corrects the leading and the lagging power factor. Control error of input current reactive component attenuates to zero for 0.2 seconds. Error voltage regulation in the DC link does not exceed 10 volts. As a result, is proposed solution, which provides independent control of input current reactive component with stabilizing the voltage in the DC link simultaneously.

**Key words:** active corrector, power factor, reactive power, vector control, three-phase pulse-width converter, DC link.