

*А.А. Колб, канд. техн. наук*

*(Украина, Днепродзержинск, Национальный горный университет)*

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ

**Введение.** Надежное электроснабжение потребителей качественной электроэнергией в значительной степени зависит от применения современных автоматических быстродействующих систем управления неактивными составляющими полной мощности на основе АИН с ШИМ. Системы управления качеством электроэнергии, построенные по принципу замкнутых систем автоматического регулирования, обладают более широкими функциональными возможностями. В случае выбора соответствующих структур и алгоритмов управления достигаются более высокие статические и динамические показатели качества регулирования неактивных составляющих полной мощности.

**Целью настоящей работы** является синтез системы управления ПАФ с повышающим преобразователем постоянного напряжения на входе с использованием метода  $I_x, I_y$  теории мгновенной мощности.

**Результаты исследования.** Расчетная схема и векторная диаграмма системы сеть – вентильный компенсатор в обобщенных векторах представлены на рис. 1, где обозначено:  $\bar{U}_C, \bar{U}_K$  - обобщенные (результатирующие) вектора трехфазного напряжения сети и первой гармоники вентильного компенсатора;  $L_K$  - суммарная индуктивность контура, включая индуктивность рассеяния трансформатора и фильтра;  $R_K$  - эквивалентное сопротивление, учитывающее потери в контуре, включая потери в ключах инвертора;  $\bar{I}_K$  - результирующий вектор первой гармоники тока компенсатора;  $\alpha, \beta$  и  $x, y$  - координатные оси неподвижной и синхронно вращающейся системы координат;  $\varphi_x = \omega_1 t$  - угол поворота вращающейся системы координат относительно неподвижной;  $\omega_1 = 2\pi f_1$  - угловая частота напряжения сети;  $\beta$  - фазовый сдвиг между результирующими векторами напряжения сети и компенсатора;  $I_{ka}, I_{kp}$  - активная и реактивная (на рис. 1 - емкостная) составляющие вектора тока компенсатора по отношению к напряжению сети;  $I_x, I_y$  - ортогональные составляющие вектора тока сети в синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети (постоянные составляющие которых пропорциональны соответственно активной и реактивной мощности),  $\Delta\bar{U} = \bar{U}_C - \bar{U}_K$ .

Мгновенная мощность при отсутствии нулевых составляющих определяется в общем случае скалярным произведением результирующего вектора напряжения сети  $\bar{U}_C$  на сопряженный вектор тока  $\bar{I}_C^*$

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\bar{U}_C \cdot \bar{I}_C^*], \quad (1)$$

где  $\bar{U}_C = U_\alpha + jU_\beta$ ;  $\bar{I}_C^* = I_\alpha - jI_\beta$  - обобщенный вектор напряжения сети и сопряженный вектор тока и их ортогональные составляющие.

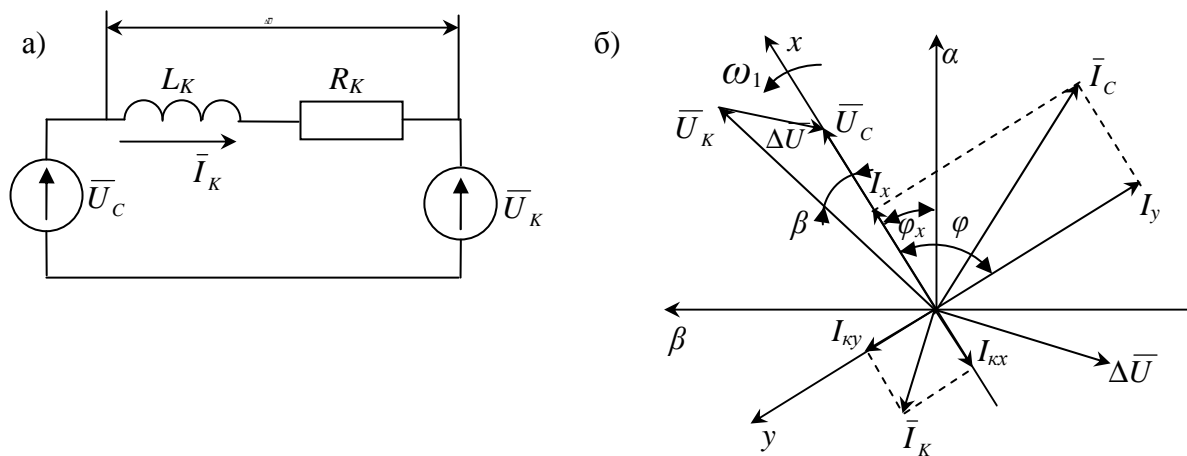


Рис. 1. Расчетная схема (а) и векторная диаграмма (б) системы сеть – компенсатор в режиме компенсации активно-реактивной мощности

Выражения для мгновенных значений активной и реактивной мощности, представленные в виде постоянной и переменной составляющих в матричной форме записи, имеют вид:

$$\begin{bmatrix} p = P + p_{\sim} \\ q = Q + q_{\sim} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} U_\alpha & U_\beta \\ U_\beta & -U_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по результирующему вектору напряжения сети, выражение (2) принимает вид:

$$p = P + p_{\sim} = \frac{3}{2} U_C I_x; \quad q = Q + q_{\sim} = \frac{3}{2} U_C I_y, \quad (3)$$

где  $I_x, I_y$  – ортогональные составляющие результирующего вектора тока на оси  $x, y$ ;  $U_C$  - модуль результирующего вектора напряжения сети, равный амплитудному значению фазного напряжения.

В линейных симметричных системах ортогональные составляющие  $I_x$  и  $I_y$  не содержат переменных составляющих и являются пропорциональными соответственно активной и реактивной мощности. В нелинейных и несимметричных системах указанные составляющие содержат также компоненты, зависящие как от наличия высших гармоник, так и от несимметрии нагрузки. При этом постоянная составляющая  $I_x$  соответствует минимально возможному току в линии при компенсации реактивной мощности сдвига первой гармоники и мощности искажения. Сумма составляющей  $I_y$  и переменной  $I_{x\sim}$  соответствуют неактивным составляющим тока, подлежащим компенсации. Причем перемен-

ные компоненты двойной частоты ортогональных составляющих  $I_x$  и  $I_y$  обусловлены несимметрией нагрузки. Эти составляющие, легко выделяемые (идентифицируемые) в синхронно вращающейся системе координат, могут быть использованы для непрерывного контроля мгновенных составляющих неактивной мощности и импульсного управления качеством электроэнергии на основе силовых параллельных активных фильтров (ПАФ).

Реактивная мощность, генерируемая ПАФ, определяемая как [2]

$$Q = \frac{3}{2} \frac{(U_c - U_K \cos \beta) \cdot U_c}{x_\phi}, \quad (4)$$

зависит от величины и ориентации напряжения вентильного компенсатора  $U_K$ . Поэтому эффективным направлением повышения генерируемой реактивной энергии является увеличение напряжения в звене постоянного тока ПАФ. Для этой цели в схеме рис.2 используется повышающий преобразователь постоянного напряжения в постоянное (ППН). Уровень напряжения на выходе ППН определяется с помощью (4), исходя из требуемой  $Q$ , генерируемой ПАФ и, например, для АИН с синусоидальной ШИМ

$$U_d = \frac{\sqrt{2}(3U_c^2 - 2Qx_\phi)}{3m \cos \beta U_c}, \quad (5)$$

где  $m = U_{зад} / U_{он}$  - коэффициент модуляции;  $U_{зад}$ ,  $U_{он}$  - напряжение задания и опорное,  $x_\phi$  - индуктивное сопротивление контура сеть – ПАФ.

В неподвижной системе координат уравнение электрического равновесия вентильного компенсатора в обозначениях рис.1 имеет вид:

$$\bar{U}_K - \bar{U}_C = \bar{I}_K R_\phi + L_\phi \frac{d\bar{I}_K}{dt}. \quad (6)$$

Переходя к синхронно вращающейся системе координат с использованием зависимости  $\bar{U}_{K(\alpha,\beta)} = \bar{U}_{K(x,y)} e^{-j\varphi_x}$ , получим из (6)

$$\bar{U}_K e^{j\varphi_x} - \bar{U}_C e^{j\varphi_x} = R_\phi \bar{I}_K e^{j\varphi_x} + L_\phi \frac{d(\bar{I}_K e^{j\varphi_x})}{dt}, \quad (7)$$

где  $\varphi_x$  - угол между координатными осями неподвижной и вращающейся систем координат.

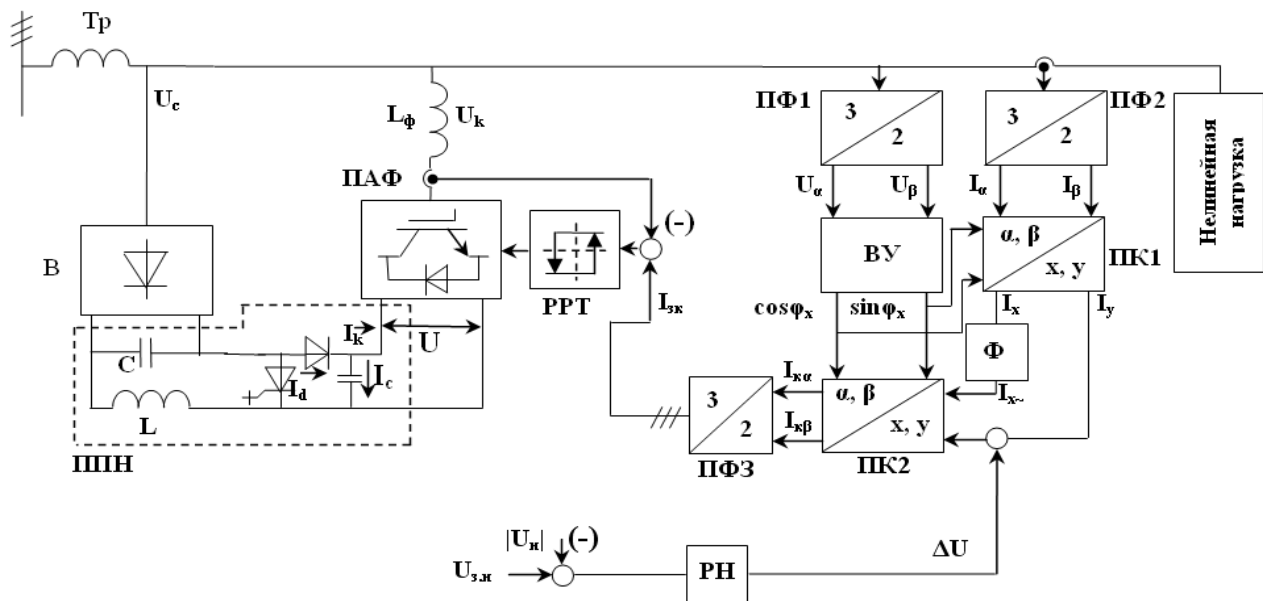


Рис.2. Функциональная схема управления параллельным активным фильтром (ПАФ) при наличии повышающего преобразователя постоянного напряжения в постоянное (ППН)

Дифференцируя (8), получим после преобразования для ортогональных составляющих напряжения и тока:

$$U_{kx} - U_{cx} = R_\phi I_{kx} + L_\phi \frac{dI_{kx}}{dt} - \omega_1 L_\phi I_{ky}, \quad U_{ky} - U_{cy} = R_\phi I_{ky} + L_\phi \frac{dI_{ky}}{dt} + \omega_1 L_\phi I_{kx}. \quad (8)$$

Дополнительные преимущества при представлении вентильного компенсатора как объекта управления и синтеза регуляторов САУ качеством электроэнергии, получаются в синхронно вращающейся системе координат  $x, y$ , ориентированной по результирующему вектору напряжения сети. При этом в (8) исчезает составляющая  $U_{cy}$ .

На основании баланса активных мощностей на входе и выходе вентильного компенсатора  $1,5U_c I_{kx} + \Delta P = U_d I_k$  с учетом  $I_c = CdU_c / dt$  находятся соотношения между токами  $I_c, I_k$  и напряжением  $U_d$ .

Соответствующая приведенным уравнениям структурная схема непрерывной модели ПАФ представлена на рис.3, где обозначено  $T_k = L_k / R_k$  - электромагнитная постоянная контура сеть - вентильный компенсатор. Управляющими воздействиями являются ортогональные составляющие  $U_{kx}, U_{ky}$  напряжения вентильного компенсатора, а возмущающими - компоненты  $U_{cx}$  и  $U_{cy}$  результирующего вектора напряжения сети, которые поступают на входы сумматоров. На входы сумматоров поступают также сигналы перекрестных связей  $U_x$  и  $U_y$ , присущие ПАФ как объекту управления.

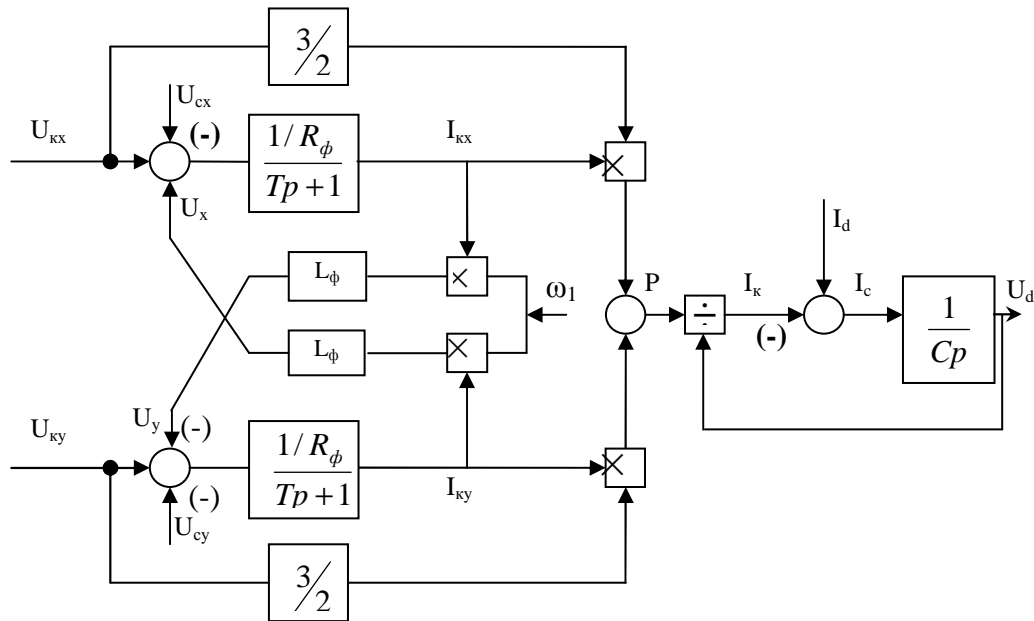


Рис.3. Структурная схема непрерывной модели ПАФ

Выходными переменными являются ортогональные составляющие  $I_{kx}$ ,  $I_{ky}$  результирующего вектора компенсатора и напряжение  $U_d$  в звене постоянного тока. Так как выходное напряжение компенсатора в цепи переменного тока формируется инвертированием  $U_d$ , то это напряжение является также и возмущающим воздействием.

Каждому значению  $U_d$  соответствует предельная величина  $U_{np}$  выходного переменного напряжения инвертора вентильного компенсатора. Поэтому условие линейности преобразователя постоянного напряжения в переменное с помощью инвертора можно записать в виде ограничения

$$U_{kx}^2 + U_{ky}^2 \leq U_{np}^2,$$

которое отражает предельные возможности инвертора напряжения ПАФ.

Управление режимами ПАФ может применяться для нескольких различных целей:

1. Компенсация реактивной мощности сдвига первой гармоники, пропорциональной постоянной составляющей  $I_y$  результирующего вектора тока нагрузки, для снижения потерь электроэнергии в линии.
2. Минимизация (подавление) высших гармоник, для чего в схеме рис.2 в качестве управляющих воздействий следует использовать сумму переменных составляющих компонент  $I_x$ ,  $I_y$  вектора тока нагрузки.
3. Компенсация неактивных составляющих полной мощности, пропорциональной сумме компоненты  $I_y$  и переменной составляющей  $I_x$  (рис.2).
4. Стабилизация напряжения на нагрузке путем варьирования коэффициента мощности относительно заданного оптимального значения в сторону опе-

режения при уменьшении напряжения и наоборот. Для чего в схеме рис.2 предусмотрен регулятор напряжения, выходной сигнал которого  $\Delta U$  корректирует реактивную составляющую тока в функции отклонения направления напряжения от заданного значения.

Применение во внутреннем контуре САУ релейных регуляторов тока (РРТ) и пространственно векторных принципов выделения (идентификации) неактивных составляющих токов на основе  $I_x, I_y$  теории мгновенной мощности позволяет достичь предельно достижимого быстродействия при заданных энергетических ограничениях. При этом исключаются противоречия между устойчивостью и инвариантностью САУ, сохраняющей при требуемом запасе по напряжению в звене постоянного тока основные показатели регулирования независимо от внешних и параметрических возмущений.

Разносторонние компьютерные исследования [2, 3] показали, что предложенная замкнутая САУ качеством электроэнергии на основе ПАФ при наличии повышающего преобразователя постоянного напряжения в постоянное с релейными регуляторами тока позволяет с высокой точностью и практически без запаздывания компенсировать неактивные составляющие тока в режиме резкопеременных нелинейных нагрузок. В качестве примера на рис.4 приведены графики напряжения и тока сети и инвертора вентильного компенсатора в режиме подавления высших гармоник.

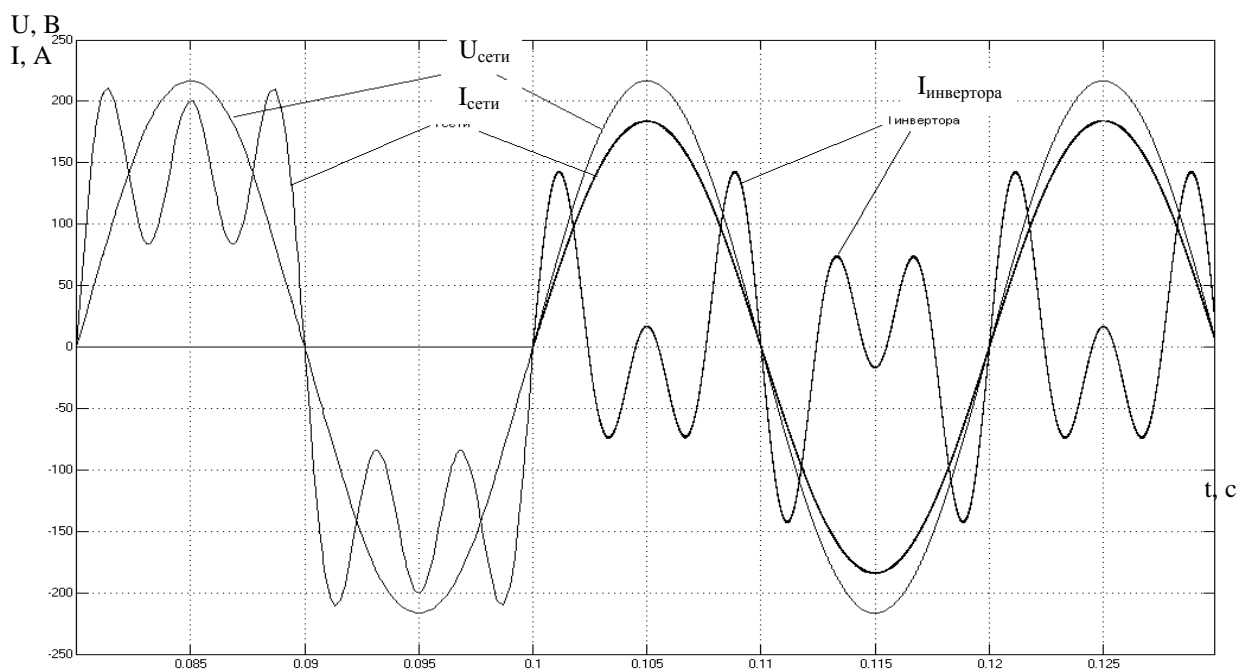


Рис.4. Графики напряжения и тока сети и инвертора вентильного компенсатора в режиме подавления высших гармоник: при отсутствии ( $t < 0,1$  с) и наличии ( $t > 0,1$  с) компенсации

## Выводы.

1. Использование повышающего преобразователя постоянного напряжения в постоянное в системах управления качеством электроэнергии на основе

ПАФ позволяет существенно увеличить генерируемую реактивную мощность, а также компенсировать кратковременные провалы напряжения в режиме коротких замыканий и симметрировать нагрузку.

2. Применение синхронно вращающейся системы координат, ориентированной по результирующему вектору напряжения сети, позволяет на базе метода  $I_x, I_y$  теории мгновенной мощности наиболее просто выделить и непрерывно контролировать неактивные составляющие токов в нелинейных системах с целью управления вентильными компенсаторами на основе обращенных АИН с ШИМ.

3. Релейные регуляторы тока в САУ качеством электроэнергии позволяют с высоким быстродействием и точностью компенсировать неактивные составляющие полной мощности в режиме резкопеременных реактивных нагрузок, включая мощные тиристорные приводы постоянного тока.

### Список литературы

1. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока: Пер. с нем. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963, - 774 с.
2. Колб А.А. Энергосберегающая система группового питания электроприводов с общим преобразователем с общим преобразователем с двухсторонней проводимостью и емкостным накопителем энергии. //Вестник Кременчугского государственного политехнического университета. Кременчуг, - 2003, вып.1. – с. 135 – 139.
3. Колб. А.А. Релейно-векторное управление САФ в режиме компенсации мощности искажения. //Науковий вісник НГУ. – 2004, №3. – с. 68 – 74.