

**А.А. Колб, канд. техн. наук**

(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

## ВЫДЕЛЕНИЕ НЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЬНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ

**Введение.** Проблема энергосбережения является наиболее актуальной в электроэнергетике, решение которой непосредственно связано с оценкой качества электроэнергии. Необходимость экономичного потребления, снижения непроизводительных затрат, а также разработка эффективных быстродействующих замкнутых систем управления качеством электроэнергии обуславливает необходимость развития методов выделения и непрерывного контроля неактивных составляющих полной мощности в нелинейных и несимметричных системах.

До настоящего времени имеется много критических замечаний относительно предложенного С. Budeanu [1] способа разделения кажущейся мощности на ортогональные составляющие. Неоднозначность определения ортогональных составляющих мощности для несинусоидальных токов и напряжений является основным фактором, ограничивающим их практическое применение при разработке замкнутых систем автоматической коррекции качества электроэнергии на основе АИН с ШИМ.

**Цель работы** – выделение и непрерывный контроль неактивных составляющих полной мощности в нелинейных несимметричных системах для управления качеством электроэнергии с помощью силовых активных фильтров (САФ) на основе АИН с ШИМ.

**Анализ последних достижений и публикаций.** При исследовании несинусоидальных систем кривые напряжения и тока обычно представляются в виде ряда Фурье:

$$u = \sum U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k); \quad i = \sum I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k - \varphi_k), \quad (1)$$

где  $U_{km}$ ,  $I_{km}$  – амплитудные значения соответствующих гармоник напряжения и тока сети;  $\psi_k$  – начальная фаза напряжения  $k$ -й гармоники;  $\varphi_k$  – фазовый сдвиг между  $k$ -ми гармониками напряжения и тока.

Для несинусоидальных токов и напряжений имеем:

$$S^2 = \sum_{k=0}^{\infty} U_k^2 \sum_{k=0}^{\infty} I_k^2; \quad P^2 + Q^2 = \left( \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k \right)^2 + \left( \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k \right)^2 \quad (2)$$

Из (2) следует, что для несинусоидальных систем, в отличие от синусоидальных, квадрат кажущейся мощности не равен сумме квадратов активной и реактивной мощностей. Поэтому для устранения этого неравенства (невязки) между ортогональными составляющими мощностей кажущуюся мощность определяют так:

$$S^2 = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}, \quad (3)$$

где  $D$  – мощность искажения, обусловленная перебором произведений гармоник тока и напряжения различного порядка, определяемая как [2]

$$D = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} [U_n^2 I_k^2 + U_k^2 I_n^2 - 2U_n I_k U_k I_n \cos(\varphi_k - \varphi_n)]}. \quad (4)$$

В несинусоидальных несимметричных системах ортогональные составляющие мощности, за исключением активной, являются расчетными величинами, не имеющими, как правило, непосредственной связи с реальными энергообменными процессами, что является основным фактором, ограничивающим их практическое применение при разработке и управлении вентильными компенсаторами.

**Результаты исследования.** Эффективное высокочастотное импульсное управление потоками электроэнергии с помощью силовых активных фильтров может быть достигнуто лишь при оперировании с мгновенной мощностью, которая однозначно характеризует энергообменные процессы в несинусоидальных несимметричных системах. Анализ электрообменных процессов в нелинейных системах, с целью формирования управляющих воздействий для коррекции качества электроэнергии, удобно производить с помощью обобщенных (результатирующих) пространственных векторов напряжения и тока [2], которые определяются как:

$$\bar{U} = \frac{2}{3} \left( u_A + \bar{\alpha} u_B + \bar{\alpha}^2 u_C \right); \quad \bar{I} = \frac{2}{3} \left( i_A + \bar{\alpha} i_B + \bar{\alpha}^2 i_C \right), \quad (5)$$

где  $u_A, u_B, u_C, i_A, i_B, i_C$  - соответственно мгновенные значения напряжения и тока в фазах сети;  $\bar{\alpha} = e^{j2\pi/3}$ ,  $\bar{\alpha}^2 = e^{j4\pi/3}$  - единичные вектора, сдвигающие фазу на  $120^\circ$  и  $240^\circ$  в положительном направлении;  $2/3$  – согласующий коэффициент, найденный из условия инвариантности мощности.

При отсутствии нулевых составляющих токов мгновенное значение мощности определяется как скалярное произведение соответствующих пространственных векторов

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[ \bar{U} \bar{I}^A \right] = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C, \quad (6)$$

где  $\bar{U}$  - результирующий вектор напряжения сети;  $\bar{I} = \frac{2}{3}(i_A + \bar{\alpha}^2 i_B + \bar{\alpha} i_C)$  - сопряженный вектор результирующего вектора тока.

Существенно, что приведенное выражение справедливо как в переходных процессах, так и в установившихся режимах при любом законе изменения векторов  $\bar{U}$  и  $\bar{I}$  в функции времени при условии [3]:  $i_A + i_B + i_C = 0$ .

Формирование управляющих воздействий, пропорциональных токам, подлежащих компенсации (неактивные составляющие мощности), наиболее просто реализуются на основе обобщенных пространственных векторов  $\bar{U}$  и  $\bar{I}$  во вращающейся системе координат  $x, y$ , ось  $x$  которой ориентирована по вектору напряжения [4, 5].

Переход от неподвижной системы координат  $\alpha, \beta$  к вращающейся  $x, y$  (рис.1), ориентированной по вектору  $\bar{U}$ , реализуется с помощью соотношения

$$\bar{I}(\alpha, \beta) = I e^{j\psi_i} = I e^{j(\psi_u - \psi)} = I e^{j\psi_u} e^{-j\psi} = \bar{I}(x, y) e^{j\psi_u}, \quad (7)$$

где  $I$  - модуль результирующего вектора тока;  $\bar{I}(x, y) = I e^{-j\psi}$  - результирующий вектор тока во вращающейся системе координат;  $\psi$  - фазовый сдвиг между результирующими векторами тока и напряжения.

Обратный переход реализуется на базе выражения:

$$\bar{I}(x, y) = \bar{I}(\alpha, \beta) e^{-j\psi_u}. \quad (8)$$

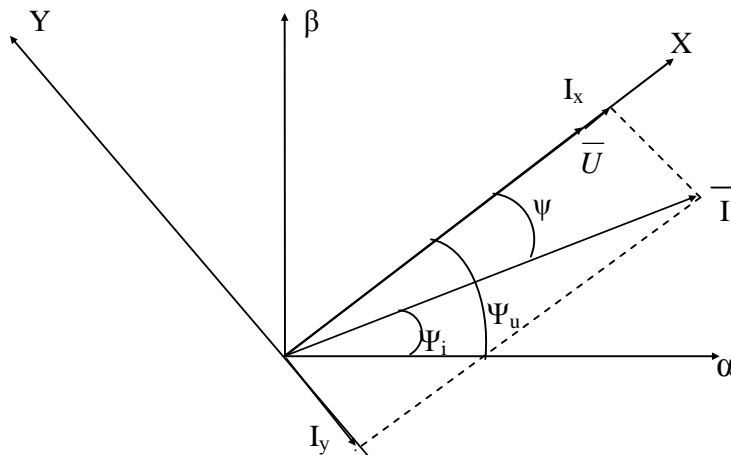


Рис.1. Переход от неподвижной системы координат  $\alpha, \beta$  к вращающейся  $x, y$

Подставляя в (6) значения соответствующих векторов  $\bar{U}$  и  $\bar{I}$  в неподвижной системе координат (рис.1):

$$\bar{U}(\alpha, \beta) = U e^{j\psi_u}; \quad \bar{I}(\alpha, \beta) = I e^{-j\psi_i},$$

получим выражение для активной мощности

$$P = \frac{3}{2} [UIe^{J(\psi_u - \psi_i)}] = \frac{3}{2} [UIe^{J\psi}] = \frac{3}{2} UI_x = \frac{3}{2} U_{\max} I_{\max} \cos \psi, \quad (9)$$

так как модули векторов напряжения  $U$  и тока  $I$  равны амплитудным значениям соответствующих переменных:  $U = U_{\max}$ ;  $I = I_{\max}$ .

По аналогии с (9) реактивная мощность определяется как  $Q = 3UI_y / 2$ .

Таким образом, в линейных трехфазных системах проекция  $I_x$  результирующего тока статора на ось  $x$  вращающейся системы координат пропорциональна активной мощности и содержит только постоянную составляющую при любом фазовом сдвиге между напряжением и током. При этом ортогональная составляющая  $I_y$  также содержит только постоянную составляющую, пропорциональную реактивной мощности. В нелинейных и несимметричных системах указанные компоненты, наряду с постоянными составляющими, содержат и переменные  $I_{xv}$ ,  $I_{yv}$  (рис.2).

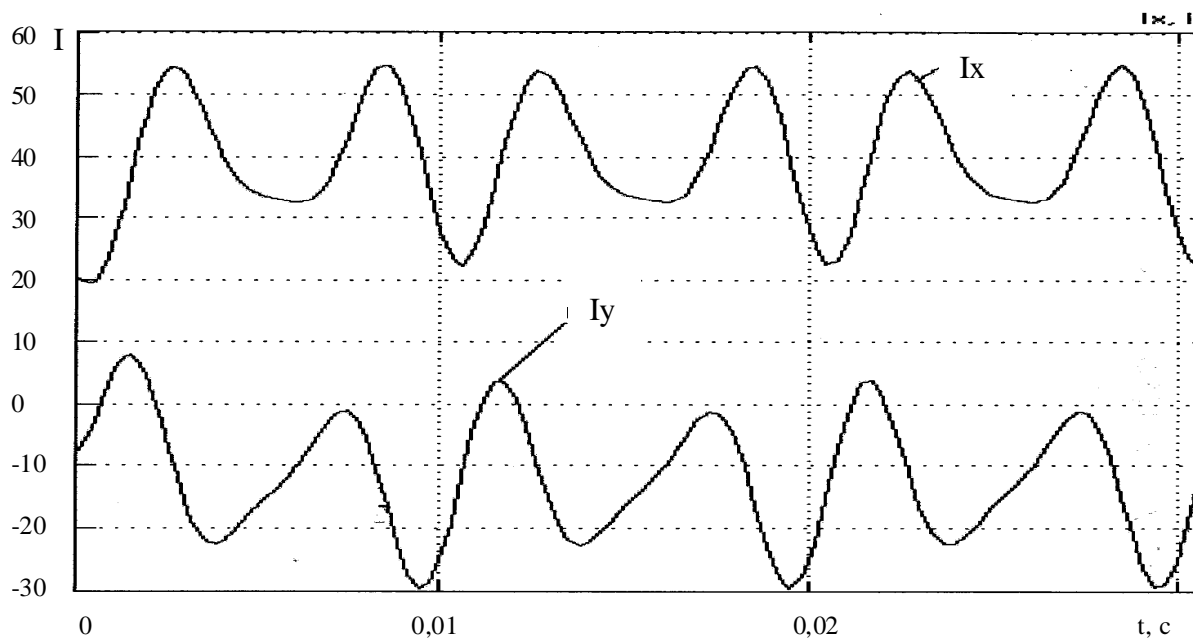


Рис. 2. Ортогональные составляющие  $I_x$ ,  $I_y$  обобщенного вектора тока в синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети, при наличии гармоник третьего и пятого порядков

В указанных системах переменная составляющая  $I_{xv}$  совместно с  $I_y$  могут быть использованы в качестве управляющих воздействий для построения систем автоматического регулирования качества электроэнергии на основе полностью управляемых преобразователей. При этом сумма компонент  $(I_{xv} + I_y)$  пропорциональна неактивным составляющим полной мощности. Использование указанных составляющих в САР качества электроэнергии на основе АИН с ШИМ с релейно-векторным управлением позволяет: реализовать компенсацию реактивной мощности (мощность сдвига), которая пропорциональна постоянной составляющей  $I_y$ ; компенсировать мощность искажения, пропорциональную сумме переменных ортогональных компонент  $I_x$  и  $I_y$ ; реализовать компен-

сацию всех неактивных составляющих полной мощности; устранить колебания и асимметрию напряжения; обеспечить практически синусоидальную форму тока синфазную с напряжением и, как следствие, равенство полной мощности источника и передаваемой в нагрузку активной мощности; выбором места подсоединения САР обеспечить минимальные потери в линии.

На основании изложенного и [4, 5] на рис.3 приведена функциональная схема САР качества электроэнергии.

На приведенной схеме обозначено: ПФ1 ... ПФ3 – преобразователи фаз для перехода от трехфазной системы к двухфазной и наоборот; ПК1, ПК2 – преобразователи координат для перехода от неподвижной системы координат  $\alpha, \beta$  к вращающейся  $x, y$  и наоборот;  $\Phi$  – фильтр для выделения переменной составляющей проекции  $I_x$  результирующего вектора тока; РРТ – релейные регуляторы тока.

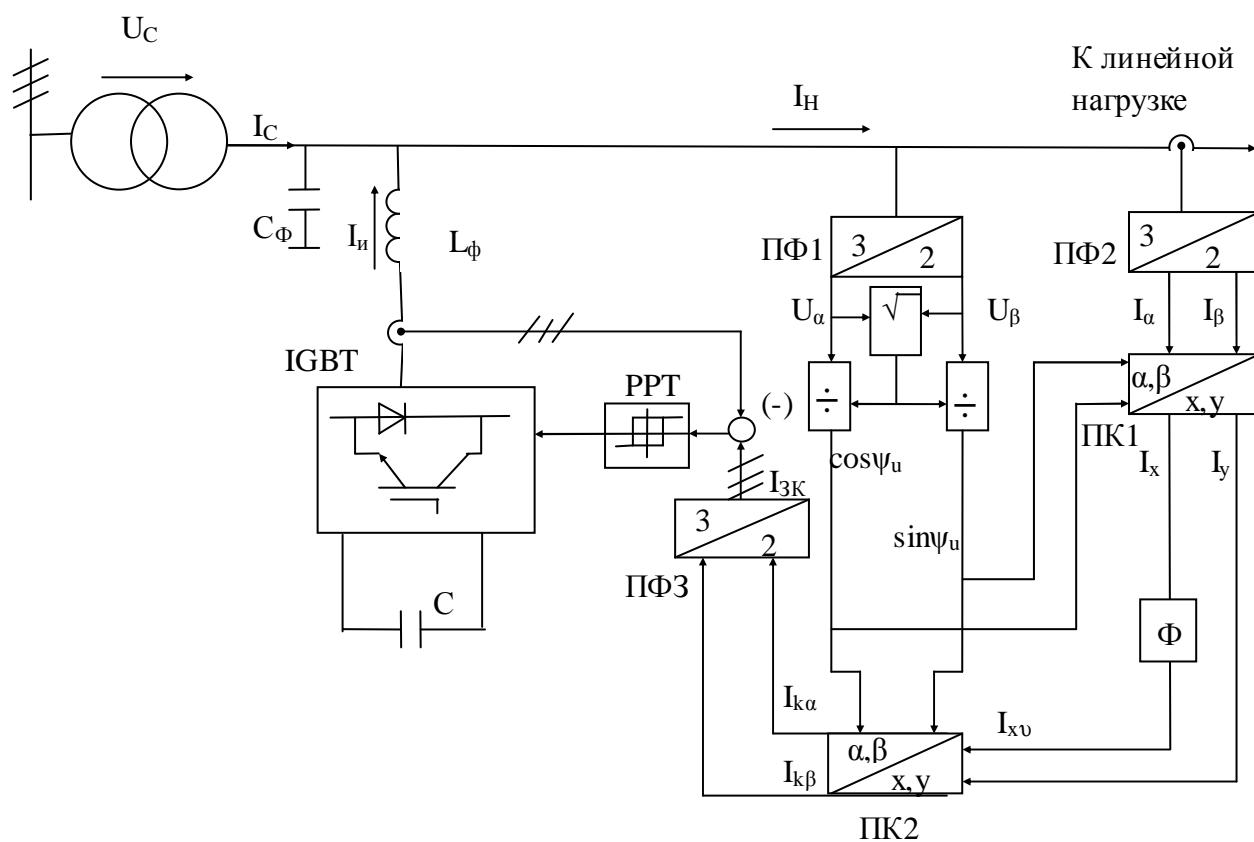


Рис.3. Функциональная схема САР качества электроэнергии на основе IGBT инвертора с релейно-векторным управлением

Пространственное положение обобщенного вектора напряжения сети, необходимое для реализации преобразователей координат, определяется как:

$$\sin \psi_U = U_\beta / \sqrt{U_\alpha^2 + U_\beta^2}; \cos \psi_U = U_\alpha / \sqrt{U_\alpha^2 + U_\beta^2}, \quad (10)$$

где  $U_\alpha = U_A$ ;  $U_\beta = (U_B - U_C) / \sqrt{3}$  - ортогональные составляющие вектора напряжения сети в неподвижной  $\alpha, \beta$  системе координат.

Перспективным является применение комбинированных систем, в которых статические реактивные нагрузки компенсируются с помощью, например,

конденсаторных батарей, а динамические (пиковые) нагрузки и мощность искажения с помощью вентильных компенсаторов, обладающих высоким быстродействием и точностью.

Результаты компьютерного моделирования САР качества электроэнергии приведены на рис.4, из которого следует, что предложенная система, обладая высоким быстродействием, устраняет высшие гармоники, обеспечивает практически синусоидальный ток в сети  $I_c$  синфазный с напряжением.

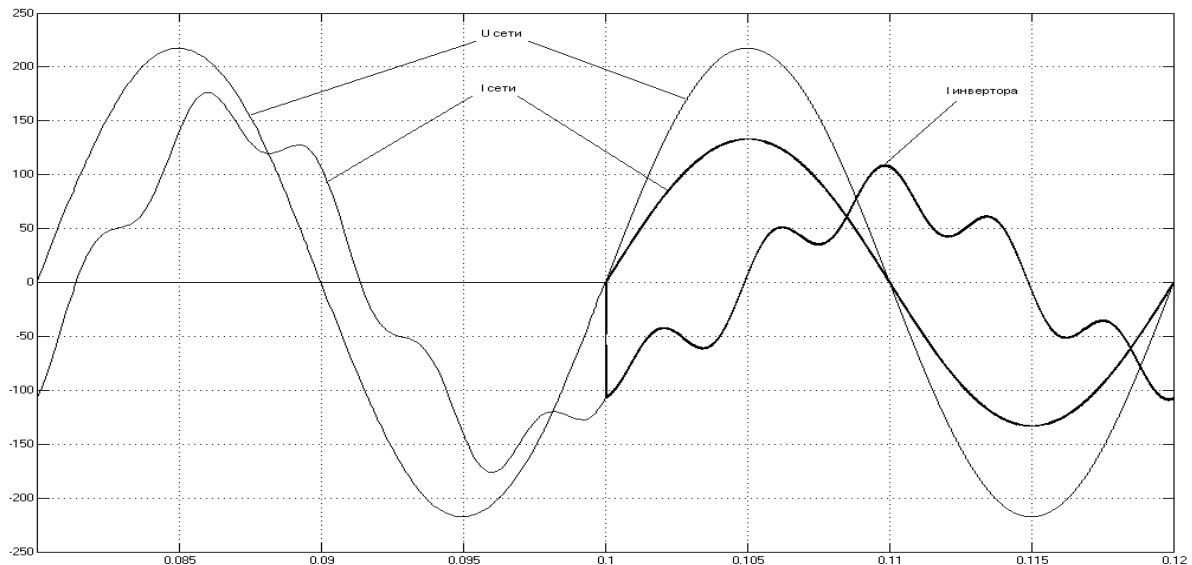


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования при отсутствии (а) и наличии (б) САР качества электроэнергии

### Выводы.

1. В нелинейных и несимметричных системах сумма переменной составляющей  $I_{x0}$  проекции результирующего вектора тока статора на ось  $x$  вращающейся системы координат  $x, y$ , ориентированной по вектору напряжения сети, и ортогональной составляющей  $I_y$  пропорциональна неактивным составляющим полной мощности.

2. Предложенная быстродействующая замкнутая САР качества электроэнергии с релейно-векторным управлением с использованием обобщенных векторов тока и напряжения позволяет решить задачи, недоступные традиционным компенсирующим устройствам.

3. Вследствие высокого быстродействия и точности воспроизведения управляющих воздействий САР позволяет быстро и точно разгрузить питающую сеть от неактивных составляющих полной мощности и, как следствие, повысить ее пропускную способность и улучшить электромагнитную совместимость различных резкопеременных, несимметричных и нелинейных (в том числе и вентильных) реактивных нагрузок.

### Список литературы

1. Budeanu C. J. Probleme de la presence des puissances reactives dans les installations de produc-

- tion et distribution d'énergie électrique// Rapports et discussion sur la puissance reactive. CIGRE, Paris, 1929, Pt 3, p. 117 – 218.
2. Супронович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок // Пер. с польск. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
  3. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока: Пер. с нем. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
  4. Колб А.А. Энергосберегающая система группового питания электроприводов с общим преобразователем с двухсторонней проводимостью и емкостным накопителем энергии // Вестник Кременчугского политехнического университета, 2003, вып.1. – с.135 – 143.
  5. Воробьев А.А., Колб А.А. Групповое питание электроприводов с общим накопителем энергии как новое направление энергоснабжения // Вестник Харьковского политехнического университета. Проблемы автоматизированного электропривода. – Харьков. НГУ, 2003, №10. – т.1. – с. 224 – 228.