

А. А. Колб, канд техн. наук

(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ФИЛЬТРАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

Введение. Решение проблемы повышения качества электроэнергии средствами промышленного электропривода, где имеются огромные резервы, требует внедрения устройств, позволяющих одновременное и независимое управление координатами электропривода и качеством электроэнергии.

Групповое питание регулируемых электроприводов (рис.1) на основе АИН с ШИМ от общих шин постоянного тока с емкостным накопителем электроэнергии обладает рядом существенных преимуществ [1, 2], основными из которых являются: исключение двухсторонней циркуляции энергии между сетью и потребителями, так как энергия рекуперативного торможения одного или группы электродвигателей передается (минуя сеть) на другие двигатели двигательного режима; снижение потерь в элементах силовой цепи и их установленной мощности. Существенным является то, что запасенная энергия емкостным накопителем может быть использована для гибкого управления основными показателями качества электроэнергии с помощью параллельных активных фильтров (ПАФ).

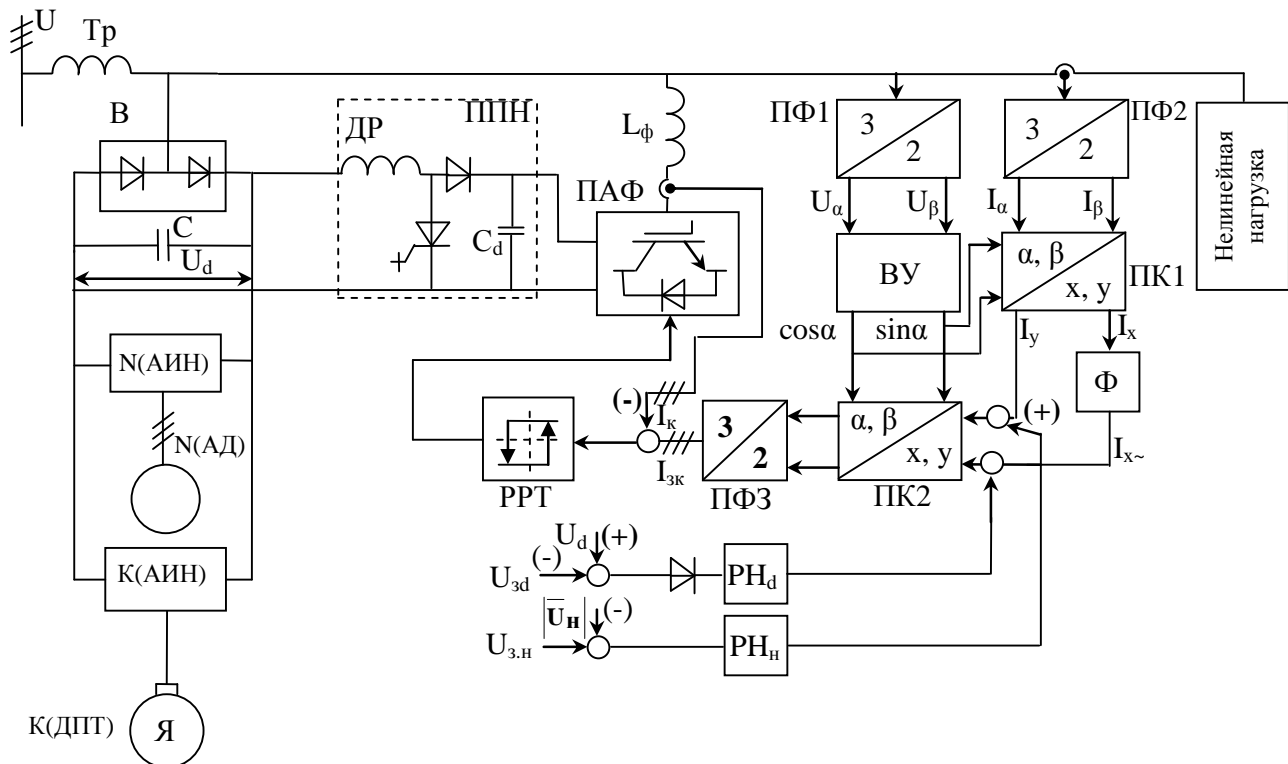


Рис.1. Функциональная схема управления качеством электроэнергии в системах группового питания электроприводов

Целью работы является разработка системы управления ПАФ с использованием I_x и I_y теории мгновенных значений неактивных составляющих

полной мощности на базе обобщенных векторов напряжения и тока сети в синхронно вращающейся системе координат x, y .

Материалы и результаты исследования. Любые три синусоидальные функции времени, например, напряжения сети, сумма мгновенных значений которых равна нулю, могут быть представлены в виде обобщенных (результатирующих) векторов в двумерном пространстве

$$\bar{U} = \frac{2}{3}(u_A + \bar{\alpha}u_B + \bar{\alpha}^2u_C) = \bar{U}e^{j\omega_1 t}, \quad (1)$$

где $2/3$ – согласующий коэффициент, найденный из условия инвариантности мощности; u_A, u_B, u_C – мгновенные значения напряжений сети; $\bar{\alpha} = e^{j120^\circ}$, $\bar{\alpha}^2 = e^{j240^\circ}$ – единичные векторы, сдвигающие фазу в положительном направлении соответственно на 120° и 240° ; ω_1 – круговая частота напряжения сети.

Результирующий вектор напряжения можно разложить в неподвижной системе координат α, β на вещественную и мнимую составляющие

$$\bar{U} = U_\alpha + jU_\beta. \quad (2)$$

и перейти от трехфазной системы напряжения к двухфазной.

Если вещественная ось α совпадает с вектором напряжения фазы A , а ось β опережает ее на 90° , то согласно (1) и (2) преобразование координат из трехфазной системы (A, B, C) в двухфазную (α, β) реализуется как

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Если вектор фазы A совпадает с осью α , а векторы напряжения фазы B и C повернуты соответственно на 120° и 240° в положительном направлении, то проекции результирующего вектора на эту систему векторов определяют мгновенные значения фазных напряжений, которые на основании (2) и (3) определяются с помощью выражений:

$$u_A = U_\alpha; u_B = -\frac{U_\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta; u_C = -\frac{U_\alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta. \quad (4)$$

В общем случае мгновенное значение мощности при отсутствии нулевых составляющих токов определяется как скалярное произведение вектора напряжения и сопряженного вектора тока [3]

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\bar{U} \cdot \bar{I}^*] = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C, \quad (5)$$

где $\bar{I}^* = \frac{2}{3}(i_A + \bar{\alpha}^2 i_B + \bar{\alpha} i_C)$ - сопряженный вектор тока.

Если в неподвижной системе координат α, β обозначить γ_u, γ_i - углы между осью α и векторами соответственно напряжения и тока сети, модули которых равны их амплитудным значениям, то можно записать:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{\alpha,\beta} &= U_\alpha + jU_\beta = U_m \cos \gamma_u + jU_m \sin \gamma_u; \\ \bar{I}_{\alpha,\beta}^* &= I_\alpha - jI_\beta = I_m \cos \gamma_i - jI_m \sin \gamma_i. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получим выражение для мгновенных значений активной и реактивной мощности (действительная и мнимая составляющие)

$$\begin{bmatrix} p = P + p_{\sim} \\ q = Q + q_{\sim} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} U_\alpha & U_\beta \\ U_\beta & -U_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где P, p_{\sim}, Q, q_{\sim} - постоянные и переменные составляющие соответственно ортогональных составляющих активной и реактивной мощности.

В симметричных и линейных трехфазных системах отсутствуют переменные составляющие указанных мощностей. Переменные составляющие возникают лишь в несимметричных и нелинейных системах. Это позволяет в системах управления качеством электроэнергии на основе параллельных активных фильтров (ПАФ) по отдельным каналам регулировать реактивную мощность сдвига первой гармоники и мощность искажения.

Дополнительные преимущества при построении замкнутых быстродействующих систем компенсации неактивных составляющих мощности дает переход от неподвижной системы координат α, β к вращающейся x, y , ось x которой ориентирована по вектору напряжения сети.

Прямой и обратный переход из одной системы координат в другую реализуется с помощью выражений:

$$\bar{U}_{x,y} = \bar{U}_{\alpha,\beta} e^{-j\alpha}; \quad \bar{U}_{\alpha,\beta} = \bar{U}_{x,y} e^{j\alpha}, \quad (8)$$

где α - угол между координатными осями неподвижной и вращающейся

системы координат; $\bar{U}_{x,y}$, $\bar{U}_{\alpha,\beta}$ - результирующие вектора соответственно во вращающейся и неподвижной системе координат.

Пространственное положение, например, результирующего вектора напряжения сети определяется как

$$\cos \alpha = U_{\alpha} / U ; \sin \alpha = U_{\beta} / U , \quad (9)$$

где $U = \sqrt{U_{\alpha}^2 + U_{\beta}^2}$, U_{α} , U_{β} - модуль результирующего вектора напряжения сети и его ортогональные составляющие.

Существенно, что во вращающейся системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети мгновенные значения мощности могут быть представлены в виде

$$p = P + p_{\sim} = \frac{3}{2} U I_x ; q = Q + q_{\sim} = \frac{3}{2} U I_y , \quad (10)$$

где I_x, I_y – ортогональные составляющие результирующего вектора тока сети во вращающейся системе координат, ось x которой ориентирована по вектору напряжения сети.

В синхронно вращающейся системе координат трехфазная синусоидальная система токов представляется неподвижным вектором с фиксированными ортогональными проекциями постоянного напряжения на оси x, y . При этом упрощается реализация и настройка регуляторов САУ, работающих с сигналами постоянного тока, а не переменного.

Как и в неподвижной системе координат, в случае симметричных и линейных систем проекции I_x, I_y вектора тока, а, следовательно, активная и реактивная составляющие мощности не содержат согласно (10) переменных составляющих.

Применение вращающейся системы координат позволяет наиболее просто выделить (идентифицировать) и непрерывно контролировать неактивные составляющие токов, подлежащие компенсации. При этом постоянная составляющая I_y пропорциональна реактивной мощности сдвига первой гармоники, а сумма переменных составляющих обеих проекций – мощности искажения.

На основании изложенного разработана на основе ПАФ замкнутая САР традиционных показателей качества электроэнергии в системах электропривода с общими питающими шинами постоянного тока (рис. 1). Энергетические показатели ПАФ можно проанализировать на основании соотношений [4], полученных без учета потерь энергии

$$Q = \frac{(U - U_K \cos \beta) U}{x} ; P = \frac{U U_K \sin \beta}{x} , \quad (11)$$

где Q, P – реактивная и активная составляющие мощности, генерируемые или потребляемые компенсатором на основе ПАФ; U, U_K, β – соответственно модули векторов напряжения сети, компенсатора и угол между ними; x – суммарное реактивное сопротивление контура сеть - ПАФ.

Из (11) следует, что максимальная реактивная мощность, генерируемая компенсатором при $\beta=0$ и прямоугольно-ступенчатой форме его выходного напряжения

$$Q_{max} \approx 0,1 \cdot U_K^2 / x, \quad (12)$$

будет незначительной. Кроме того при указанной форме напряжения инвертора ПАФ появляются в сети дополнительные гармоники тока.

Синусоидальная ШИМ позволяет реализовать на выходе компенсатора практически синусоидальный ток. Однако при этом существенно снижается основная гармоника выходного напряжения и, следовательно, уровень генерируемой реактивной мощности. Именно поэтому в предлагаемой системе (рис. 1) применен повышающий широтно-импульсный преобразователь постоянного напряжения (ППН) в постоянное. Это позволяет увеличить напряжение в звене постоянного тока ПАФ до требуемого уровня, найденного по (11) с учетом ожидаемого пика реактивной мощности.

В предлагаемой схеме рис.1 общие шины постоянного тока, от которых питаются регулируемые электроприводы постоянного и переменного тока, подключены к неуправляемому (можно управляемому) выпрямителю. С мощностью повышающего ППН напряжение в звене постоянного тока ПАФ увеличивается до требуемого значения.

Управление ПАФ реализуется в синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети. Для чего с помощью преобразователей фаз, реализованных с использованием (3) трехфазные переменные напряжения и тока преобразуются в двухфазные неподвижной системы координат α, β . С помощью вычислительного устройства (ВУ) на основании (9) определяется пространственное положение ($\cos\alpha$ и $\sin\alpha$) обобщенного вектора напряжения. На основании этих сигналов с помощью выражения линейного преобразования координат, представленного в векторной форме

$$\begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix}, \quad (13)$$

реализуется переход из неподвижной системы координат во вращающуюся.

На вход преобразователя координат ПК2 поступают составляющая тока I_y и переменная составляющая $I_{x\sim}$, сумма которых пропорциональна неактивным

составляющим мощности в нелинейных системах на выходе ПК2, реализованного как

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{x\sim} \\ I_y \end{bmatrix}, \quad (14)$$

формируются составляющие неактивной мощности в неподвижной системе координат. Эти составляющие с помощью преобразователя фаз ПФЗ трансформируются в задание фазных токов, подлежащих компенсации. С помощью релейных регуляторов тока (РРТ), охваченных обратной связью по фактическому току компенсатора, реализуется с высокой точностью и быстродействием обработка задающих воздействий.

При заданных энергетических ограничениях РРТ позволяют достигнуть предельно возможного быстродействия и точности обработки задающих воздействий, что позволяет быстро и точно разгрузить сеть от пиков реактивной мощности и добиться практически синусоидального тока сети (рис.2). Из этого рисунка следует, что динамические процессы, возникающие в момент включения ПАФ не искажают форму тока сети, что свидетельствует о достаточно высоком быстродействии системы компенсации.

Для стабилизации напряжения на общих питающих шинах постоянного тока служит регулятор напряжения РН_d, на вход которого подается разность задающего U_{sd} и фактического напряжения U_d . Если энергия рекуперативного торможения группы приводов окажется больше потребляемой, то рост напряжения на конденсаторе C_d устраняется возвратом энергии в сеть с помощью ПАФ, работающего в режиме компенсатора активной и реактивной мощности. В этом случае на вход ПК2 помимо переменной составляющей $I_{x\sim}$, пропорциональной мощности искажения, поступает также и постоянная составляющая, пропорциональная активной мощности первой гармоники, что обеспечивает

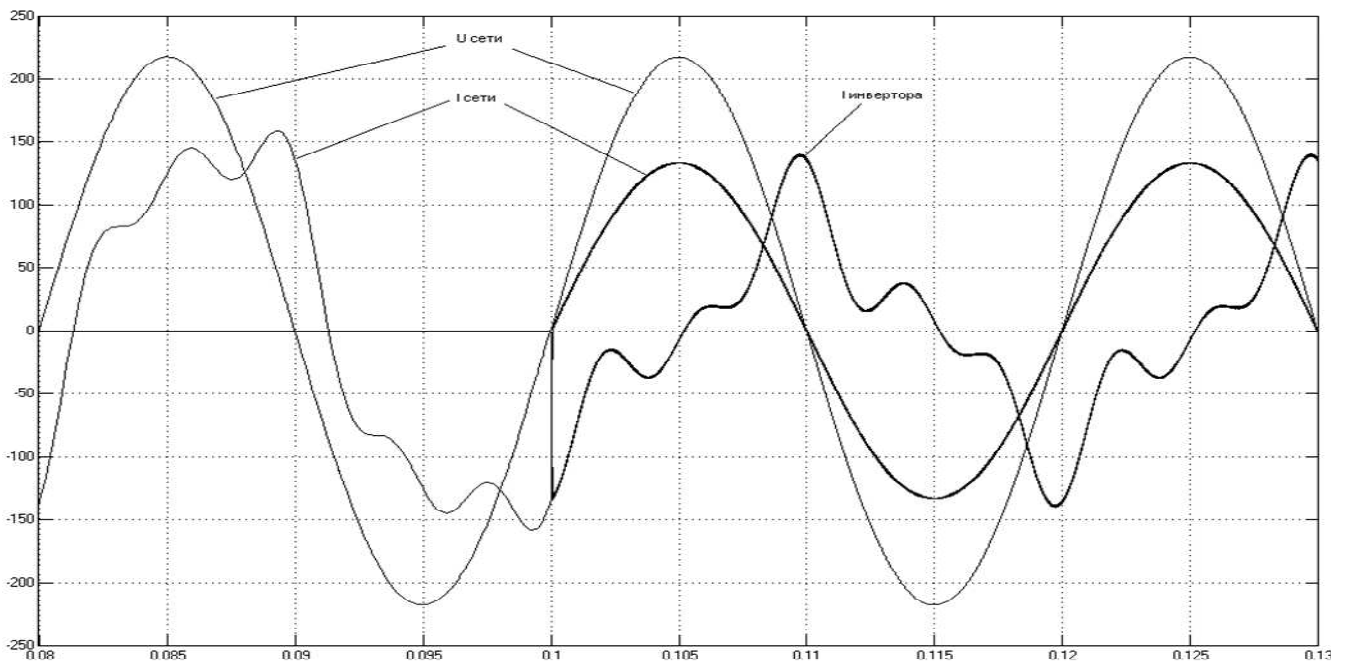


Рис.2. Компьютерные графики напряжения U_c и тока I_c сети, тока инвертора $I_{и}$ ПАФ при его отсутствии (а) и наличии (б)

возврат энергии в сеть. При этом вектор выходного напряжения инвертора ПАФ опережает вектор напряжения сети.

Для устранения колебаний и отклонений напряжения на нагрузке применен регулятор напряжения ($РН_n$), с помощью которого варьируется реактивная составляющая мощности, принимая емкостной или реактивный характер, соответственно при уменьшении и увеличении напряжения на нагрузке.

Выводы. 1. Теория I_x , I_y мгновенной мощности на базе обобщенных векторов тока и напряжения в синхронно вращающейся системе координат позволяет наиболее просто выделить неактивные составляющие мощности и гибко управлять потоками электроэнергии с помощью параллельных активных фильтров (ПАФ).

2. Применение повышающего преобразователя постоянного напряжения в постоянное на входе ПАФ позволяет существенно увеличить генерируемую им реактивную мощность.

3. Система релейно-векторного управления ПАФ позволяет с предельно возможным быстродействием и точностью разгрузить сеть от набросов реактивной мощности и тем самым исключить колебания и отклонения напряжения на нагрузке.

Список литературы:

1. Колб А.А. Энергосберегающая система группового питания электроприводов с общим преобразователем с двухсторонней проводимостью и емкостным накопителем. //Вестник Кременчугского государственного политехнического университета. – Кременчуг, - 2003, вып.1. – с. 135 – 139.

2. Воробьев А.А., Колб А.А. Групповое питание электроприводов с общим накопителем энергии как новое направление энергосбережения. //Вестник Харьковского политехнического университета. Проблемы автоматизированного электропривода. – Харьков: НТУ, 2003, № 10. – с. 10 – 48.
3. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока: Пер. с нем. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 774с.
4. Колб А.А. Повышение энергетической эффективности ЭМС на базе емкостных накопителей энергии. //Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук. техн. зб. – 2002. – Вып. № 69. – с. 61 – 70.