

А.А. Колб, канд. техн. наук

(Украина, Днепродзержинск, Национальный горный университет)

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК В СИСТЕМАХ ГРУППОВОГО ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Введение. Перспективным решением проблемы энергосбережения средствами промышленного электропривода и компенсации неактивных составляющих полной мощности в нелинейных и несимметричных системах с резкопеременной реактивной нагрузкой является применение систем группового питания электроприводов с емкостными накопителями, снабженных силовыми активными компенсаторами (САК) [1, 2]. В системах группового питания частотно-регулируемых электроприводов от общих питающих шин постоянного тока используются как выпрямительные установки (управляемые и диодные) [1,2], так и активные выпрямители (АВ) [3], выполненные на полностью управляемых силовых переключающих элементах, мощность которых должна быть рассчитана исходя из суммарной установленной мощности электроприводов и реактивной мощности, подлежащей компенсации. При этом реализация мощных АВ приводит к их существенному удорожанию.

Постановка задач исследования. В статье рассматривается один из возможных вариантов построения систем группового питания электроприводов с емкостным накопителем энергии на основе диодного выпрямителя, снабженного параллельным силовым активным компенсатором (САК) с системой релейного векторного управления, синтезируемой на основе метода I_x, I_y теории мгновенной мощности, а также моделирование электромагнитных процессов в САК в режиме компенсации реактивной мощности диодного выпрямителя.

Материалы исследования. Функциональная схема системы группового питания электроприводов от общих питающих сетей постоянного тока с емкостным накоплением энергии приведена на рис. 1. Емкостной накопитель C_d позволяет аккумулировать избыточную энергию рекуперативного торможения одного или группы приводов и минуя сеть передать приводам двигательного режима. При этом исключается двухсторонняя циркуляция энергии между сетью и приводами и, следовательно, дополнительные потери в устройствах на входе системы. Накопленная энергия повторно используется также для управления качеством энергии посредством силового активного компенсатора, который содержит: включенный по обращенной схеме АИН с ШИМ; входной фильтр L_ϕ ; емкость C_ϕ в звене постоянного тока.

В рассматриваемой схеме выделенное и контроль мгновенных значений неактивных составляющих тока, подлежащих компенсации, реализуется с использованием обобщенных (результатирующих) векторов тока и напряжения в синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети [4].

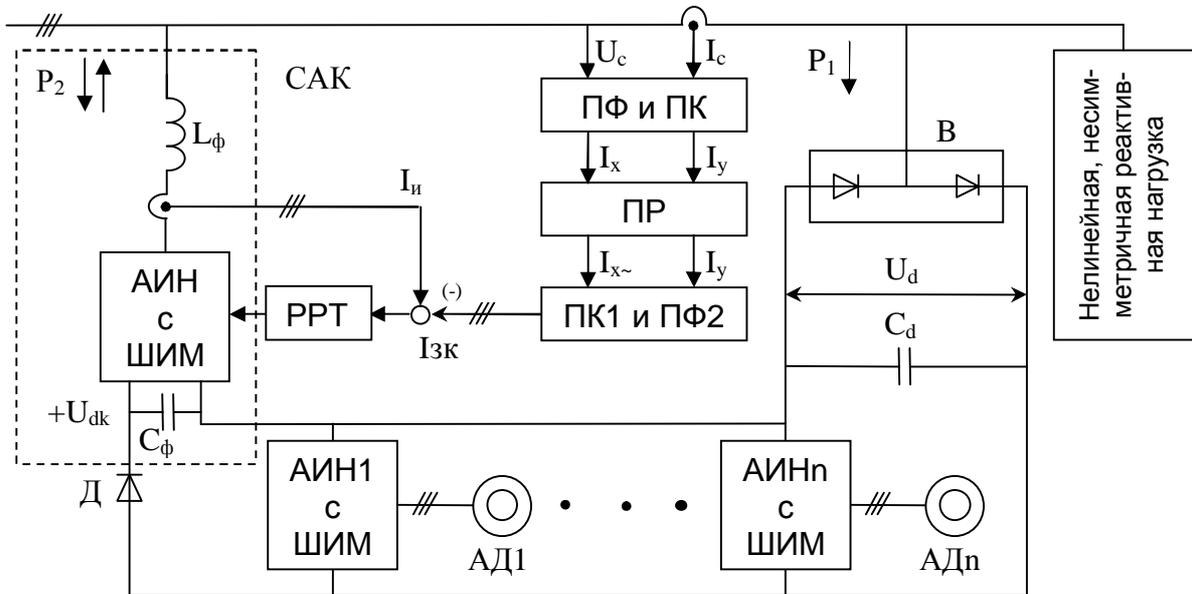


Рис. 1. Функциональная схема управления качеством электроэнергии в системах группового питания электроприводов с диодным выпрямителем (В) и емкостным накопителем (Cd)

Любые переменные трехфазной системы, сумма мгновенных значений которых равна нулю, могут быть представлены в двухмерном пространстве обобщенным вектором [5], который, например, для тока сети представляется как

$$\bar{I} = \frac{2}{3} \cdot (i_A + i_B e^{j \cdot 120^\circ} + i_C e^{j \cdot 240^\circ}) = I_a + j \cdot I_b = I_m e^{j i}, \quad (1)$$

где $2/3$ – масштабирующий коэффициент, найденный из условия инвариантности мощности трехфазной и двухфазной систем; i_A, i_B, i_C – мгновенные значения токов; $\bar{a} = e^{j \cdot 120^\circ}$; $\bar{a}^2 = e^{j \cdot 240^\circ}$ – единичные векторы, сдвигающие фазу в положительном направлении на 120° и 240° ; $I_m, j i$ – модуль (равный амплитудному значению) и аргумент вектора тока.

Аналитическую зависимость составляющих I_a и I_b от мгновенных значений фазных токов трехфазной системы можно установить с помощью соотношений:

$$I_a = \text{Re}(\bar{I}) = \text{Re} \left[\frac{2}{3} \cdot (i_A + \bar{a} \cdot i_B + \bar{a}^2 \cdot i_C) \right] = \frac{2}{3} \cdot \left(i_A - \frac{i_B + i_C}{2} \right); \quad (2)$$

$$I_b = \text{Im}(\bar{I}) = \text{Im} \left[\frac{2}{3} \cdot (i_A + \bar{a} \cdot i_B + \bar{a}^2 \cdot i_C) \right] = \frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}}. \quad (3)$$

В общем случае для симметричных систем мгновенные значения мощности определяются как скалярное произведение вектора напряжения сети и сопряженного вектора тока [4]

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re} [\bar{U} \cdot \bar{I}^*] = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[\frac{2}{3} \cdot (u_A + \bar{a} \cdot u_B + \bar{a}^2 \cdot u_C) \cdot \frac{2}{3} (i_A + \bar{a}^2 \cdot i_B + \bar{a} \cdot i_C) \right] = \quad (4)$$

$$= u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C,$$

где $\bar{U} = \frac{2}{3} \cdot (u_A + \bar{a} \cdot u_B + \bar{a}^2 \cdot u_C)$; $\bar{I}^* = \frac{2}{3} (i_A + \bar{a}^2 \cdot i_B + \bar{a} \cdot i_C)$ – обобщенный вектор напряжения и сопряженный тока.

В неподвижной системе координат a, b обобщенный вектор напряжения и сопряженный тока, модули которых равны амплитудным значениям, определяются известными соотношениями:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{a,b} &= U_a + jU_b = U_m \cos j_u + jU_m \sin j_u; \\ \bar{I}_{a,b}^* &= I_a - jI_b = I_m \cos j_i - jI_m \sin j_i, \end{aligned} \quad (5)$$

где j_u, j_i – углы между осью a и векторами напряжения и тока.

С учетом этого выражение (4) приводится к виду

$$\begin{aligned} p &= \frac{3}{2} \operatorname{Re} [(U \cos j_u + jU \sin j_u)(I \cos j_i - jI \sin j_i)] = \\ &= \frac{3}{2} \operatorname{Re} [(U_a I_a + U_b I_a) + j(U_b I_a - U_a I_b)], \end{aligned} \quad (6)$$

где действительная составляющая равна среднему значению мгновенной мощности, т. е. активной

$$\begin{aligned} p &= \frac{3}{2} [U_a I_a + U_b I_a] = \frac{3}{2} U_m I_m (\cos j_u \cos j_i + \sin j_u \sin j_i) = \\ &= \frac{3}{2} U_m I_m \cos(j_u - j_i) = 3UI \cos j, \end{aligned} \quad (7)$$

а мнимая составляющая соответствует реактивной мощности

$$Q = \frac{3}{2} (U_b I_a - U_a I_b) = \frac{3}{2} U_m I_m (\sin j_u \cos j_i - \cos j_u \sin j_i) = 3UI \sin j, \quad (8)$$

где j – фазный сдвиг между обобщенными векторами напряжения и тока сети.

В несимметричных системах при отсутствии нулевой составляющей тока мгновенное значение мощности определяется как скалярное произведение обобщенного вектора напряжения $\bar{U} = \bar{U}_1 + \bar{U}_2$ на сопряженный вектор тока $\bar{I} = \bar{I}_1^* + \bar{I}_2^*$ [4]

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[(\bar{U}_1 + \bar{U}_2) (\bar{I}_1^* + \bar{I}_2^*) \right] = \frac{3}{2} \left[\bar{U}_1 \bar{I}_1^* + \bar{U}_2 \bar{I}_2^* + \bar{U}_1 \bar{I}_2^* + \bar{U}_2 \bar{I}_1^* \right], \quad (9)$$

где $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{I}_1^*, \bar{I}_2^*$ – обобщенные векторы напряжений и сопряженные токов соответственно прямой и обратной последовательностей.

По аналогии с (4) в приведенном выражении составляющие

$$\frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[\bar{U}_1 \bar{I}_1^* \right] = P_1, \quad \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[\bar{U}_2 \bar{I}_2^* \right] = P_2 \quad (10)$$

соответствуют активной мощности, а составляющая

$$\frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[\bar{U}_1 \bar{I}_2^* + \bar{U}_2 \bar{I}_1^* \right] \quad (11)$$

представляет собой переменную мощность, пульсирующую с двойной частотой около нулевого среднего значения. Амплитуду этой составляющей называют мощностью несимметрии. Следовательно, в трехфазных несимметричных системах с изолированной нейтрально симметрирование нагрузками и компенсация реактивной мощности несимметрии адекватна подавлению мощности, пульсирующей с двойной частотой.

В уравнениях (7) и (8), записанных для неподвижной системы координат a, b , составляющие U_a, U_b, I_a, I_b являются гармоническими функциями времени, что затрудняет процедуру выделения неактивных составляющих мощности для формирования параметра управления и синтез регуляторов САР. В синхронно вращающейся системе координат x, y трехфазные переменные представляются уже соответствующими им неподвижными векторами с постоянными проекциями на оси координат, что упрощает реализацию и синтез регуляторов САР, работающих на постоянном, а не переменном токе.

Переход из одной системы координат в другую для прямых и обращенных векторов реализуется с помощью соотношений [4]:

$$\bar{I}_{x,y} = \bar{I}_{a,b} e^{-j j_k}; \bar{I}_{a,b} = \bar{I}_{x,y} e^{j j_k}; \bar{I}_{x,y}^* = \bar{I}_{a,b}^* e^{j j_k}; \bar{I}_{a,b}^* = \bar{I}_{x,y}^* e^{-j j_k}, \quad (12)$$

где j_k – угол между координатными осями.

С учетом (12) выражение (4) в синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по вектору напряжения ($U_y=0$), приводится к виду

$$\begin{aligned}
p &= \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[\bar{U}_{(a,b)} \cdot \bar{I}_{(a,b)}^* \right] = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[\bar{U}_{(x,y)} e^{j j_k} \cdot \bar{I}_{(a,b)}^* e^{-j j_k} \right] = \\
&= \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[\bar{U}_{(x,y)} \cdot \bar{I}_{(x,y)}^* \right] = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[U_m e^{j 0^\circ} \cdot I_m e^{j j} \right] = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[U_x (I_x + j I_y) \right],
\end{aligned} \tag{13}$$

где $U_x = U_m$ – составляющая обобщенного вектора напряжения по оси x ; I_x, I_y – ортогональные составляющие обобщенного вектора тока; j_k – угол между координатными осями, равный сдвигу фаз между напряжением и током.

В приведенном выражении действительная составляющая равна среднему значению мгновенной мощности, т. е. активной $P = \frac{3}{2} U_m I_x$, а мнимая – реактивной $Q = \frac{3}{2} U_m I_y$. Следовательно, составляющая I_y может быть использована в качестве управляющего параметра для компенсации реактивной мощности с помощью обращенных АИН с ШИМ.

Пространственное положение результирующего вектора напряжения сети и его модуль определяются с помощью соотношений:

$$\sin j_k = \frac{U_b}{U}; \quad \cos j_k = \frac{U_a}{U}; \quad U = \sqrt{U_a^2 + U_b^2}. \tag{14}$$

Преобразователи фаз (ПФ) и координат (ПК) рис. 1, реализованные на основании приведенных соотношений, реализуют переход от трехфазной системы к двухфазной, а затем к вращающейся системе координат x, y , ориентированной по вектору напряжения сети.

На выходе преобразователя фаз ПФ2, реализующего переход от двухфазной системы к трехфазной, формируется задания $I_{3к}$ на фазные токи, подлежащие компенсации, которые поступают на входы релейных регуляторов тока (РРТ), где за счет отрицательной обратной связи по току реализуется замкнутый способ ШИМ.

Наличие диода D в схеме рис. 1 позволяет реализовать отдельное и независимое управление координатами электропривода и качеством электроэнергии. Это является одним из преимуществ систем группового питания с диодным выпрямителем, снабженных параллельным САК, установленная мощность которого рассчитывается только исходя из реактивной мощности, подлежащей компенсации.

Из рис. 2, на котором представлены кривые напряжения и тока сети, выходного тока САК (ток компенсации), видно, что при наличии компенсатора потребляемый из сети ток становится практически синусоидальным и синхфазным с напряжением. Система регулирования позволяет также реализовать отстающий или опережающий коэффициент мощности равный или близкий к единице. О высоком быстродействии и точности САК с РРТ свидетельствуют

графики компьютерного моделирования (рис 3) фильтрации 49-й гармоники тока (максимальный номер гармоники, уровень которой нормируется).

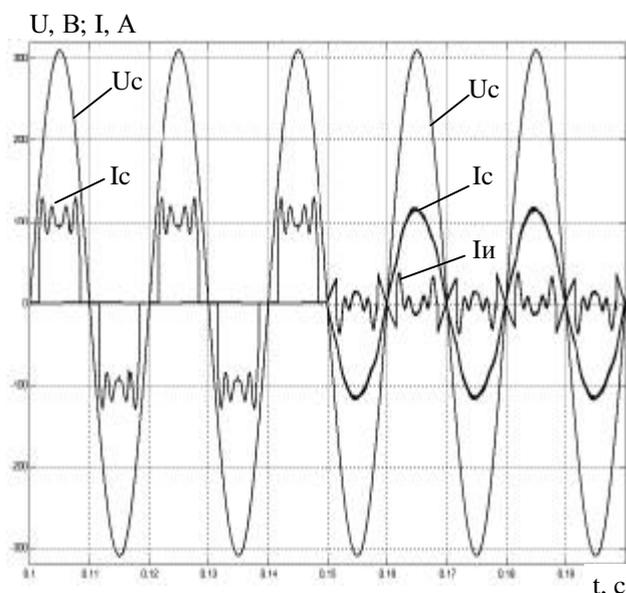


Рис.2. Графики напряжений и токов в режиме компенсации реактивной мощности диодного выпрямителя (U_c , I_c , I_i – соответственно напряжение и ток сети, ток инвертора САК)

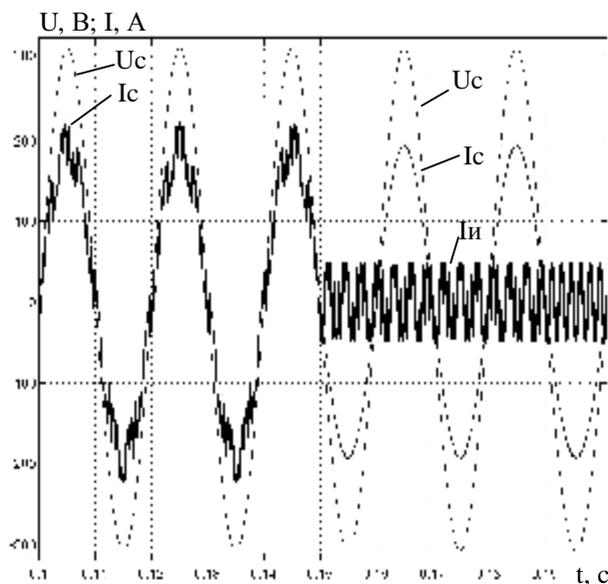


Рис. 3. Графики напряжения и токов в режиме фильтрации 49-й гармоники

Выводы. Системы группового питания частотно-регулируемых электроприводов от общих шин постоянного тока с емкостными накопителями, снабженные параллельными САК, синтезированными на основе метода I_x , I_y теории мгновенной мощности с использованием релейных регуляторов тока компенсации, позволяют:

- уменьшить потери энергии из-за отсутствия энергообменных процессов между сетью и приводами в режиме рекуперативного торможения;
- практически полностью компенсировать неактивные составляющие мощности в нелинейных и несимметричных системах с реактивной нагрузкой, обеспечивая коэффициент мощности близкий или равный единице емкостного или индуктивного характера.

Список литературы

1. Воробьев А.А., Колб А.А. Групповое питание электроприводов с общим накопителем энергии как новое направление энергосбережения // Вестник НГУ «ХПН»: Харьков. – 2003. – №10. – С. 224–228.
2. Колб А.А. Силовые активные компенсаторы в системах группового питания электроприводов // Вісн. КДПУ – 2007. – № 3(44). – Ч.2. – С. 44–48.
3. Пивняк Г. Г., Волков А.В. Современные частотно-регулируемые электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. – Д.: Национальный горный университет, 2006. – 470 с.
4. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока: Пер. с нем. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.