

*А.А. Колб, канд. техн. наук*

*(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)*

## УПРАВЛЕНИЕ СИЛОВЫМИ АКТИВНЫМИ ФИЛЬТРАМИ В РЕЖИМЕ СИММЕТРИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ

**Вступление.** Вопросы повышения качества электроэнергии путем создания эффективных методов и средств симметрирования нагрузки многофазных систем приобретают большое практическое значение, так как это связано с надежностью электроснабжения, уменьшением потерь в электросетях и электроприемниках, что повышает эффективность их использования.

Современный этап развития электротехнических систем характеризуется значительным ростом числа и установленной мощности несимметричных потребителей, симметричное исполнение которых либо невозможно, либо нецелесообразно по техническим показателям. К таким потребителям относятся индукционные печи, установки электрошлакового переплава, электросварочные агрегаты, тяговые тиристорные электроприводы постоянного тока и др. Подключение таких нагрузок к трехфазной сети вызывает дополнительную несимметрию напряжений и токов, что отрицательно сказывается на работе всей электросистемы. Например, в асинхронных двигателях несимметричная система напряжений вызывает дополнительный нагрев и уменьшение допустимого момента из-за противодействующего вращающего момента, вызванного обратной последовательностью. Установлено [1], что срок службы асинхронного двигателя при несимметрии напряжения в 4% и номинальной нагрузке сокращается в два раза.

**Анализ последних публикаций.** В настоящее время наибольшее распространение получили статические симметрирующие устройства, в качестве силовых элементов которых используются дроссели и конденсаторные батареи [1,2]. Такие установки требуют большого числа силовых симметрирующих элементов и не обеспечивают высоких показателей симметрирования при быстрых изменениях параметров нагрузки в заданном диапазоне.

В [3] в качестве корректирующих устройств, выполняющих функции компенсации реактивной мощности и симметрирования нагрузки, применен преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока. Сигнал управления  $i_y(t)$ , пропорциональный неактивной составляющей тока, формируется путем вычитания мгновенных значений активной составляющей первой гармоники тока нагрузки  $i_{n1}(t)$  из мгновенных значений полного тока  $i_n(t)$ , т.е.

$$i_y(t) = i_n(t) - i_{n1}(t).$$

Амплитуда первой гармоники активной составляющей тока нагрузки в предположении постоянства амплитуды и синусоидальной формы питающего

напряжения определяется с помощью выражения:

$$I_{H1m} = 2P / U_m ,$$

где  $P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt$  – активная мощность нелинейной нагрузки.

Мгновенное значение активной составляющей тока нагрузки определяется согласно[3] как

$$i_{H1}(t) = \frac{I_{H1m}}{U_m} U_m \sin \omega t = \beta P U_m \sin \omega t ,$$

где  $\beta = 2/U_m^2$  - коэффициент пропорциональности.

Недостатком такого способа измерения является то, что при искаженной форме напряжения питающей сети получается сигнал  $i_{H1}(t)$ , находящийся в фазе с напряжением сети, но имеющий такое же искажение формы, как и напряжение. Кроме того, применение интегратора для определения потребляемой активной мощности ограничивает быстродействие измерительного устройства, что нарушает эффективность работы корректирующего устройства и не позволяет быстро и точно компенсировать неактивные составляющие мощности в режиме резкопеременной несимметричной реактивной нагрузки.

**Целью работы** является разработка на базе метода  $I_x, I_y (I_d, I_q)$  теории мгновенной мощности принципов управления силовыми активными фильтрами (САФ) в режиме симметрирования нагрузки.

**Материалы и результаты исследования.** В случае отсутствия составляющих нулевой последовательности мгновенные значения напряжений трехфазной несимметричной системы можно представить в виде:

$$\begin{aligned} u_A &= U_{1m} \sin \omega t + U_{2m} \sin(\omega t - \psi); \\ u_B &= U_{1m} \sin(\omega t - 120^\circ) + U_{2m} \sin(\omega t + 120^\circ - \psi); \\ u_C &= U_{1m} \sin(\omega t - 240^\circ) + U_{2m} \sin(\omega t + 240^\circ - \psi), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $U_{1m}, U_{2m}, \psi$  – амплитудные значения напряжения прямой и обратной последовательности и фазовый сдвиг между ними.

Аналогичные выражения можно записать для мгновенных значений токов с учетом фазового сдвига  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  между током и напряжением соответствующей последовательности. Подставляя эти значения напряжений и токов в уравнение для мгновенной мощности

$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C , \quad (2)$$

получим две составляющие произведений. Первая – сумма произведений напряжений и токов одинаковых последовательностей, которая для трех фаз соответствует активной мощности прямой и обратной последовательности

$$P = P_1 + P_2 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2. \quad (3)$$

Вторая – сумма произведений напряжений и токов различных последовательностей, которая пульсирует с двойной частотой относительно нулевого среднего значения

$$p_{\sim} = 3U_1 I_2 \cos(2\omega t - \psi - \varphi_2) + 3U_2 I_1 \cos(2\omega t - \psi - \varphi_1). \quad (4)$$

Амплитуду этой пульсирующей составляющей называют мощностью несимметрии

$$Q_H = 3\sqrt{U_1^2 I_2^2 + U_2^2 I_1^2 + 2U_1 I_2 U_2 I_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}. \quad (5)$$

Следовательно, мгновенная мощность несимметричной трехфазной системы без нулевой последовательности содержит постоянную составляющую (3), на которую накладывается пульсирующая с двойной частотой переменная составляющая (4).

Таким образом, в трехфазных системах с изолированной нейтралью, где отсутствуют токи нулевой последовательности, симметрирование нагрузки может быть реализовано компенсацией пульсирующей мощности [4,5]. Однако, безынерционное измерение и непрерывный контроль мгновенных значений переменной составляющей мощности требуют применения сложных измерительных устройств, что затрудняет управление САФ в режиме симметрирования. Погрешности, возникающие при определении задающих сигналов, пропорциональных мощности несимметрии, становятся причиной неточного симметрирования нагрузки и необоснованной перегрузке инвертора САФ.

Применение метода  $I_x, I_y$  теории мгновенной мощности на базе результирующих векторов напряжения и тока во вращающейся системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети, позволяет практически безынерционно выделить и непрерывно контролировать мгновенные значения неактивных составляющих полной мощности. Это позволяет управлять САФ как в режиме симметрирования, так и в режиме компенсации всех неактивных составляющих мощности или их отдельных составляющих.

При отсутствии нулевой составляющей результирующий пространственный вектор тока определяется известными соотношениями [6]

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2^*, \quad (6)$$

где  $\bar{I}_1, \bar{I}_2$  – результирующие пространственные векторы токов прямой и обратной последовательности;  $\dot{I}_1, \dot{I}_2^*$  – комплекс прямой составляющей тока и сопряженный с обратной последовательностью.

В этом случае мгновенное значение мощности определяется как скалярное произведение пространственного вектора напряжения  $\bar{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2^*$  на сопряженный вектор тока  $\bar{I}^* = \dot{I}_1^* + \dot{I}_2$

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\bar{U} \bar{I}^*] = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[(\dot{U}_1 + \dot{U}_2^*)(\dot{I}_1^* + \dot{I}_2)] = \frac{3}{2} \operatorname{Re}(\dot{U}_1 \dot{I}_1^* + \dot{U}_1 \dot{I}_2 + \dot{U}_2^* \dot{I}_1^* + \dot{U}_2^* \dot{I}_2). \quad (7)$$

Так как  $\operatorname{Re}[\dot{U}_2^* \dot{I}_2] = \operatorname{Re}[\dot{U}_2 \dot{I}_2^*]$ ;  $\operatorname{Re}[\dot{U}_2^* \dot{I}_1^*] = \operatorname{Re}[\dot{U}_2 \dot{I}_1]$ , то

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\dot{U}_1 \dot{I}_1^* + \dot{U}_2 \dot{I}_2^* + \dot{U}_2 \dot{I}_1 + \dot{U}_1 \dot{I}_2]. \quad (8)$$

В приведенном выражении составляющие  $\frac{3}{2} \operatorname{Re}[\dot{U}_1 \dot{I}_1^*] = P_1$  и  $\frac{3}{2} \operatorname{Re}[\dot{U}_2 \dot{I}_2^*] = P_2$  представляют среднюю мощность системы прямых и обратных составляющих тока и напряжения, а составляющая

$$\frac{3}{2} \operatorname{Re}[\dot{U}_1 \dot{I}_2 + \dot{U}_2 \dot{I}_1] \quad (9)$$

представляет собой переменную мощность пульсирующую с двойной частотой около нулевого среднего значения.

При наличии тока нулевой последовательности  $i_0$  результирующий пространственный вектор тока, определяемый как

$$I = \frac{2}{3} [(i_A + i_0) + \bar{\alpha}(i_B + i_0) + \bar{\alpha}^2(i_C + i_0)] = \frac{2}{3} (i_A + \bar{\alpha}i_B + \bar{\alpha}^2i_C), \quad (10)$$

не зависит от  $i_0$ , так как  $i_0(1 + \bar{\alpha} + \bar{\alpha}^2) = 0$ ,

где  $\bar{\alpha} = e^{j120^\circ}$ ;  $\bar{\alpha}^2 = e^{j240^\circ}$  – единичные векторы, сдвигающие фазу в положительном направлении на  $120^\circ$  и  $240^\circ$ .

Следовательно, нулевую составляющую тока нужно учитывать отдельно при расчете мощности асимметричной системы  $P = P_1 + P_2 + P_0$

Согласно изложенному и работе [7] следует, что в синхронно вращающейся системе координат, ось X которой ориентирована по результирующему вектору напряжения сети, активная мощность пропорциональна постоянной со-



нент, пульсирующих с двойной частотой, и их компенсация адекватно с помощью САФ симметрированию нагрузки. В случае необходимости дополнительно компенсировать реактивную мощность и мощность искажения (подавления высших гармоник) необходимо в приведенной схеме исключить фильтр Ф1, а вместо Ф2 использовать фильтр, выделяющий весь спектр переменной составляющей.

При работе САФ в режиме симметрирования нагрузки происходит передача энергии из фаз, менее нагруженных, в фазы с большей нагрузкой. При этом энергия из менее нагруженных фаз передается вначале с помощью инвертора с двухсторонней проводимостью в звено постоянного тока, выполняющего роль накопителя энергии, а затем из этого звена в более нагруженные фазы приемника.

### **Выводы**

1. Применение метода  $I_x, I_y$  теории мгновенной мощности позволяет наиболее просто выделить и непрерывно контролировать мгновенные значения всех ортогональных составляющих полной мощности (активная, реактивная, мощности искажения и несимметрии).

2. Выделение и компенсация с помощью САФ переменных составляющих двойной частоты из ортогональных компонент  $I_x$  и  $I_y$  адекватно симметрированию нагрузки.

### **Список литературы:**

1. Милях А.Н., Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях. – К.: Наук. думка, 1973. – 219 с.
2. Шидловский А.К., Кузнецов В. Г., Николаенко В.Т., Оптимизация несимметричных режимов систем электроснабжения. – К.: Наук. думка, 1987. – 174 с.
3. Супронович Т. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок: Пер. с польск. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
4. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества электроэнергии в электрических сетях. – К.: Наук. думка, 1985. – 208 с.
5. Шидловский А.К., Москаленко Г.А. – Симметрирующие устройства с трансформаторными фазосдвигающими элементами. – К.: Наук. думка, 1984. – 204 с.
6. Ковач К.П., Рац Н. Переходные процессы в машинах переменного тока: Пер. с нем. – М. – Л.:Госэнергоиздат, 1963. – 774 с.
7. Колб А.А., Релейно-векторное управление силовым активным фильтром в режиме компенсации мощности искажения. //Науковий вісник НГУ. – 2004. – № 3. – С. 61-68.