УДК 621.317.7

М. И. Бурбело, д. т. н., проф.; В. И. Романовский, к. т. н., доц.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КАНАЛ ДЛЯ УСТАНОВОК ДИНАМИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Предложены структурные схемы быстродействующего измерительного канала для установок динамической компенсации реактивной мощности, основанного на интегрировании мгновенных мощностей на скользящем интервале времени, равном половине периода напряжения питания с использованием задержки во времени одной из ортогональных составляющих мгновенной мощности.

Ключевые слова: распределительные электрические сети, качество электрической энергии, реактивная мощность, динамическая компенсация.

Введение

установок динамической компенсации реактивной Применение мощности в электрических сетях обеспечивает одновременно оптимизацию ряда параметров качества электроэнергии (установившегося отклонения, колебаний, несимметрии напряжений) и требует совершенствования их информационного обеспечения. Особенно сложным является создание быстродействующих измерительных каналов параметров, характеризующих несимметричность электрической трехфазной нагрузки. В частности это касается измерительных каналов статических тиристорных компенсаторов (СТК), статических компенсаторов на базе инверторов напряжения, предназначенных для динамической компенсации реактивной мощности и симметрирования токов и напряжений в узлах присоединения быстроизменяющихся нагрузок потребителей, требующих осуществления регулирования с задержкой во времени, не превышающей половины периода напряжения питания.

Обоснование результатов

Анализ несимметричных режимов трехфазных электрических сетей напряжением 6, 10, 35 кВ с изолированной нейтралью выполняют с использованием комплексной полной мощности и комплексной условной мощности обратной последовательности

$$\underline{S} = 3 \left(\dot{U}_1 \overset{*}{I}_1 + \dot{U}_2 \overset{*}{I}_2 \right) = 1,5 \left(\dot{U}_\alpha \overset{*}{I}_\alpha + \dot{U}_\beta \overset{*}{I}_\beta \right); \tag{1}$$

$$\underline{S}_{2} = 3 \left(\dot{U}_{1} \overset{*}{I}_{2} + \dot{U}_{2} \overset{*}{I}_{1} \right) = 1,5 \left(\dot{U}_{\alpha} \overset{*}{I}_{\alpha} - \dot{U}_{\beta} \overset{*}{I}_{\beta} \right),$$
(2)

где $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ – комплексные напряжения и комплексные сопряженные токи соответственно прямой и обратной последовательности; $\dot{U}_{\alpha}, \dot{U}_{\beta}, \dot{I}_{\alpha}, \dot{I}_{\beta}$ – комплексные напряжения и комплексные сопряженные токи в ортогональной системе координат Кларка.

В [1, 2] разработаны алгоритмы для получения информации о составляющих полной мощности $\underline{S} = P + jQ$, а в [3 – 6] – о составляющих условной мощности обратной последовательности $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$, при построении которых использован подход, состоящий в интегрировании суммы или разности произведений мгновенных напряжений и токов (мгновенных мощностей) на скользящем интервале времени, равном половине периода

Наукові праці ВНТУ, 2014, № 3

напряжения питания (T/2):

$$P(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i_{\beta}) dt; \quad Q(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}' i_{\alpha} + u_{\beta}' i_{\beta}) dt; \quad (3)$$

$$P_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}i_{\alpha} - u_{\beta}i_{\beta}) dt; \quad Q_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}'i_{\alpha} - u_{\beta}'i_{\beta}) dt, \quad (4)$$

где u_{α}', u_{β}' – ортогональные составляющие напряжения сети после интегрирующего преобразования (в условиях несинусоидальности – после преобразования Гильберта, которое обеспечивает фазовый сдвиг всех гармонических составляющих напряжения на угол, равный 90 электрическим градусам).

Такой подход соответствует теории реактивной мощности С. Буденю.

Однако, как показано в [4, 5], переходные характеристики измерительного канала для величин P_2, Q_2 , в основе реализации которого формулы (4), имеют значительное перерегулирование, что отрицательно влияет на устойчивость системы динамической компенсации реактивной мощности. Для уменьшения перерегулирования было предложено использование выражений [4]

$$P_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}i_{\alpha} - u_{\beta}'i_{\beta}')dt; \quad Q_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}'i_{\alpha} + u_{\beta}i_{\beta}')dt, \quad (5)$$

где *i_в*' – интегрирующее преобразование ортогональной составляющей тока.

Недостатком измерительного канала является необходимость применения в случае существенной несинусоидальности тока преобразователей Гильберта, весьма сложных в реализации [7].

Для получения составляющих мощностей можно также использовать фазовый сдвиг на 90 электрических градусов, существующий между ортогональными составляющими трехфазных напряжения и тока [5]:

$$P(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (p_{\alpha}(t) + p_{\beta}(t)) dt; \quad Q(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (q_{\alpha}(t) - q_{\beta}(t)) dt; \quad (6)$$

$$P_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (p_{\alpha}(t) - p_{\beta}(t)) dt; \quad Q_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (q_{\alpha}(t) + q_{\beta}(t)) dt,$$
(7)

где $q_{\alpha} = u_{\beta}i_{\alpha}; q_{\beta} = u_{\alpha}i_{\beta}$ – ортогональные составляющие мгновенных реактивных мощностей.

Такой подход соответствует теории реактивной мощности С. Фриза. Он исключает необходимость использования интегрирующего преобразования, что существенно упрощает реализацию быстродействующих измерительных каналов. Вместе с тем перерегулирование для величин P_2 , Q_2 будет значительным [5].

С целью уменьшения перерегулирования предлагаем подход, заключающийся в применении фазового сдвига на четверть периода напряжения питания (*T*/4) сигналов, пропорциональных ортогональным составляющим мгновенных мощностей. Тогда вместо (4) получим

$$P_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (p_{\alpha}(t) - p_{\beta}(t-T/4)) dt;$$

$$Q_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (q'_{\alpha}(t) - q'_{\beta}(t-T/4)) dt,$$
(8)

Наукові праці ВНТУ, 2014, № 3

а вместо (7) получим

$$P_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (p_{\alpha}(t) - p_{\beta}(t-T/4)) dt;$$

$$Q_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (q_{\alpha}(t) + q_{\beta}(t-T/4)) dt,$$
(9)

где $p_{\alpha} = u_{\alpha}i_{\alpha}; p_{\beta} = u_{\beta}i_{\beta}; q'_{\alpha} = u'_{\alpha}i_{\alpha}; q'_{\beta} = u'_{\beta}i_{\beta}$ – ортогональные составляющие мгновенных мощностей.

На рис. 1, а изображены зависимости $p_{\alpha}(t), p_{\beta}(t), p_{\beta}(t-T/4), p(t), p_{2}(t)$, а на рис. 1, б – $q_{\alpha}(t), q_{\beta}(t), q_{\beta}(t-T/4), q(t), q_{2}(t)$, полученные путем математического моделирования в соответствии с формулами (6), (9). Аналогичные зависимости получаем по формулам (3), (8). Основной особенностью зависимостей $p_{2}(t), q'_{2}(t), q_{2}(t)$, входящих в подынтегральные выражения (8) и (9), обеспечивающей отсутствие перерегулирование во время переходного процесса, является малая амплитуда их колебаний. Именно благодаря этой особенности обеспечивается отсутствие перерегулирования на выходе интегрирующих устройств измерительного канала.





Рис. 1. Формирование мощностей: a) $P(t), P_2(t);$ б) $Q(t), Q_2(t)$

На рис. 2, а изображена структурная схема измерительного канала, реализующего алгоритм (8), который состоит из трансформатора напряжения *TH*, трансформатора тока *TT*, масштабного преобразователя напряжений *ПH*, масштабного преобразователя токов в напряжения *ПT*, двух интеграторов *И*1, *И*2, преобразователей мощности *ПM*1,..., *ПM*4, элементов задержки сигналов во времени ЭЗ1 и ЭЗ2, элемента скользящего интегрирования ЭСИ (элементы задержки и скользящего интегрирования реализуются с использованием микроконтроллера). На структурной схеме измерительного канала (рис 2, б), реализующего алгоритм (9), интеграторы отсутствуют.





Рис. 2. Структурные схемы измерительного канала: а) с использованием алгоритма (8); б) с использованием алгоритма (9)

Исследуем работу измерительного канала в переходном режиме, например, при подключении к сети несимметричной нагрузки. На рис. 3, а и б поданы переходные характеристики измерительного канала для величин P, Q и P_2, Q_2 при подключении к сети 10 кВ несимметричной нагрузки $\underline{S} = P + jQ = 925 + j291$ кВ·А, $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2 = 13 + j59$ кВ·А. Как следует из приведенных зависимостей, перерегулирование при подключении нагрузки по всем выходам измерительного канала отсутствует.



Рис. 3. Переходные характеристики измерительного канала: а) для величин P, Q; б) для величин P_2, Q_2

Основными источниками погрешностей измерительного канала являются амплитудные и фазовые погрешности измерительных трансформаторов напряжения и тока, а также погрешности, обусловленные несоответствием интервала интегрирования половине периода напряжения сети [6].

Анализ показал, что абсолютные погрешности измерения несимметричных составляющих нагрузки с использованием алгоритмов (8) и (9) не превышают погрешностей измерения активной и реактивной мощностей. Использование алгоритма (8) можно рекомендовать при наличии несимметрии трехфазного напряжения и высших гармоник в токе нагрузки. Вместе с тем алгоритм (9) чувствителен к несимметрии трехфазного напряжения, но инвариантен к наличию высших гармоник в токе нагрузки.

Выводы

Таким образом, предложен измерительный канал параметров несимметричных трехфазных нагрузок для установок динамической компенсации реактивной мощности, в основу принципа действия которого положено интегрирование мгновенных мощностей на

скользящем интервале времени, равной половине периода напряжения питания, с использованием задержки во времени одной из ортогональных составляющих мгновенной мощности. Измерительный канал обладает достаточной устойчивостью в переходных режимах, а также характеризуется отсутствием методических погрешностей измерений при наличии несимметрии трехфазного напряжения и высших гармоник тока нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурбело М. Й. Компенсація реактивної потужності асинхронних двигунів в різкозмінних режимах навантаження / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1. – С. 65 – 68.

2. Бурбело М. Й. Динамічна компенсація реактивної потужності в перехідних режимах електроприводів / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2010. – 104 с.

3. Бурбело М. Й. Спосіб вимірювання параметрів несиметрії навантажень вузлів електричних мереж / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко, М. В. Никитенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 3. – С. 30 – 33.

4. Бурбело М. Й. Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, М. В. Никитенко // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 54 – 56.

5. Бурбело М. Й. Вимірювальні канали для установок динамічної компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко, М. В. Никитенко // Вісник НУ "Львівська політехніка" Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2010. – № 666. – С. 14 – 18.

6. Бурбело М. Й. Вимірювальний перетворювач параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, М. В. Никитенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 5. – С. 72 – 75.

7. Штамбергер Г. А. Измерения в цепях переменного тока (методы уравновешивания) / Г. А. Штамбергер; под ред. К. Б. Карандеева. – Новосибирск: Наука, 1975. – 164 с.

Бурбело Михаил Иосифович – профессор кафедры электротехнических систем электроснабжения и энергетического менеджмента.

Винницкий национальный технический университет.

Романовский Владимир Игоревич – доцент кафедры электроэнергетики.

Сумской государственный университет.