УДК 621.317.7

РОЗДІЛЬНЕ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ НЕСИМЕТРИЧНИХ ШВИДКОЗМІННИХ ТРИФАЗНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Бурбело М.Й., д.т.н., проф., Мельничук С.М., Ільчук Ю.В.
Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця, Україна
E-mail: burbelo@energo.vstu.ua

Запропонований спосіб роздільного вимірювання параметрів несиметричних трифазних навантажень, в основу принципу дії якого покладено інтегрування миттєвих потужностей на ковзному інтервалі часу тривалістю половину періоду напруги живлення. Вимірювальний алгоритм має достатню стійкість і характеризується відсутністю методичних похибок вимірювання за наявності несиметрії трифазної напруги й вищих гармонік струму навантаження.

Ключові слова: несиметричне трифазне навантаження, комплексна умовна потужність зворотної послідовності, ортогональні напруги й струми, вимірювальний канал.

Вступ. Однією з найважливіших характеристик якості електроенергії є несиметрія напруг. Несиметрія напруг є вкрай небажаною. Вона викликає: зменшення надійності та ефективності роботи електроприймачів (асинхронних двигунів, освітлювальних установок, конденсаторних батарей, пристроїв автоматики та ін), призводить до збільшення втрат потужності в лініях електропередавання і трансформаторах та зменшення їх пропускної здатності. Ефективність застосування симетрувальних установок залежить від системи їх керування, точності та швидкодії вимірювання параметрів несиметрії навантажень.

Аналіз попередніх досліджень. Для аналізу несиметричних режимів трифазних електричних мереж з ізольованою нейтраллю напругою 6, 10, 35 кВ використовують комплексну повну потужність і умовну потужність зворотної послідовності

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

$$\underline{S}_2 = 3\left(\dot{U}_1 \overset{*}{I}_2 + \dot{U}_2 \overset{*}{I}_1\right) = 1{,}5\left(\dot{U}_\alpha \overset{*}{I}_\alpha - \dot{U}_\beta \overset{*}{I}_\beta\right), \qquad (2)$$

де $\dot{U}_1, \dot{U}_2$, $\overset{*}{I}_1, \overset{*}{I}_2$ – комплексні напруги та комплексні спряжені струми відповідно прямої та зворотної послідовностей; $\dot{U}_\alpha, \dot{U}_\beta$, $\overset{*}{I}_\alpha, \overset{*}{I}_\beta$ – комплексні напруги та комплексні спряжені струми в ортогональній системі координат Кларка.

В [1, 2] розроблено швидкодіючі вимірювальні канали для отримання інформації про активну та реактивну складові повної потужності $\underline{S} = P + jQ$, а в [3–5] про дійсну та уявну складові умовної потужності зворотної послідовності $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$, при побудові яких використано підхід, що оснований на інтегруванні добутку миттєвих напруг і струмів на ковзному інтервалі часу тривалістю півперіоду ($T/2$):

$$P(t) = \frac{3}{T}\int_{t-T/2}^{t}(u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta)dt;$$

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

$$P_2(t) = \frac{3}{T}\int_{t-T/2}^{t}(u_\alpha i_\alpha - u_\beta i_\beta)dt \ ;$$

$$Q_2(t) = \frac{3}{T}\int_{t-T/2}^{t}(u_\alpha' i_\alpha - u_\beta' i_\beta)dt, \qquad (4)$$

де u_α', u_β' – перетворення Гільберта ортогональних складових напруги.

Однак, як показано в [4, 5], перехідні характеристики вимірювального каналу для величин P_2, Q_2, в основу реалізації якого покладено формули (4), мають значне перерегулювання, що негативно впливатиме на стійкість системи динамічної компенсації реактивної потужності. Було запропоновано використання модифікованих виразів

$$P_2(t) = \frac{3}{T}\int_{t-T/2}^{t}(u_\alpha i_\alpha - u_\beta' i_\beta')dt;$$

$$Q_2(t) = \frac{3}{T}\int_{t-T/2}^{t}(u_\alpha' i_\alpha + u_\beta i_\beta')dt \qquad (5)$$

де i_β' – перетворення Гільберта ортогональної складової струму, застосування яких виключає перерегулювання системи динамічної компенсації реактивної потужності.

Необхідно відмітити, що комплексна умовна потужність зворотної послідовності $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$ характеризує потужність, зумовлену одночасно несиметрією струму навантаження та несиметрією напруги джерела живлення. Однак дуже часто виникає задача розділення цих потужностей, наприклад, при вирішенні задач симетрування навантажень за несиметрії напруг або визначення відповідальності споживачів за спотворення якості електроенергії. У таких випадках виниає необхідність роздільного вимірювання складових потужності зворотної послідовності.

Мета роботи полягає в розробці стійких алгоритмів роздільного вимірювання складових умовної потужності зворотної послідовності.

Матеріал і результати дослідження. Комплексну повну потужність можна подати у вигляді двох потужностей, зумовлених струмами прямої та зворотної послідовностей:

$$\underline{S}_{11} = 3\dot{U}_1 \overset{*}{I}_1 = 0{,}75\left(\dot{U}_\alpha \overset{*}{I}_\alpha + \dot{U}_\beta \overset{*}{I}_\beta\right) + \\ + j0{,}75\left(\dot{U}_\beta \overset{*}{I}_\alpha - \dot{U}_\alpha \overset{*}{I}_\beta\right); \quad (6)$$

$$\underline{S}_{22} = 3\dot{U}_2 \overset{*}{I}_2 = 0{,}75\left(\dot{U}_\alpha \overset{*}{I}_\alpha + \dot{U}_\beta \overset{*}{I}_\beta\right) - \\ - j0{,}75\left(\dot{U}_\beta \overset{*}{I}_\alpha - \dot{U}_\alpha \overset{*}{I}_\beta\right). \quad (7)$$

Аналогічно, комплексну умовну потужність зворотної послідовності можна навести у вигляді двох потужностей, зумовлених струмами прямої та зворотної послідовностей $\underline{S}_2 = \underline{S}_{12} + \underline{S}_{21}$, перша складова якої характеризує потужність спотворення, зумовлену несиметрією струму навантаження, а друга – несиметрією напруги джерела живлення:

$$\underline{S}_{12} = 3\dot{U}_1 \overset{*}{I}_2 = 0{,}75\left(\dot{U}_\alpha \overset{*}{I}_\alpha - \dot{U}_\beta \overset{*}{I}_\beta\right) + \\ + j0{,}75\left(\dot{U}_\beta \overset{*}{I}_\alpha + \dot{U}_\alpha \overset{*}{I}_\beta\right); \quad (8)$$

$$\underline{S}_{21} = 3\dot{U}_2 \overset{*}{I}_1 = 0{,}75\left(\dot{U}_\alpha \overset{*}{I}_\alpha - \dot{U}_\beta \overset{*}{I}_\beta\right) - \\ - j0{,}75\left(\dot{U}_\beta \overset{*}{I}_\alpha + \dot{U}_\alpha \overset{*}{I}_\beta\right). \quad (9)$$

Для отримання дійсної та уявної складових умовної потужності зворотної послідовності $\underline{S}_{12} = P_{12} + jQ_{12}$, зумовлених несиметричним навантаженням, можна використати інтегральні величини, які формуються аналогічно (3)–(5) на ковзному інтервалі часу протягом половини періоду напруги живлення у такому вигляді:

$$P_{12}(t) = \frac{0{,}75}{T}\int_{t-T/2}^{t}\left[\left(u_\alpha - u_\beta'\right)\left(i_\alpha + i_\beta'\right)\right]dt + \\ + \frac{0{,}75}{T}\int_{t-T/2}^{t}\left[\left(u_\alpha' + u_\beta\right)\left(i_\alpha' - i_\beta\right)\right]dt; \quad (10)$$

$$Q_{12}(t) = \frac{0{,}75}{T}\int_{t-T/2}^{t}\left[-\left(u_\alpha - u_\beta'\right)\left(i_\alpha' - i_\beta\right)\right]dt + \\ + \frac{0{,}75}{T}\int_{t-T/2}^{t}\left[\left(u_\alpha' + u_\beta\right)\left(i_\alpha + i_\beta'\right)\right]dt. \quad (11)$$

Аналогічно, для отримання дійсної та уявної складових умовної потужності зворотної послідовності $\underline{S}_{21} = P_{21} + jQ_{21}$, зумовлених несиметричною напругою живлення, можна використати інтегральні величини, які формуються у такому вигляді:

$$P_{21}(t) = \frac{0{,}75}{T}\int_{t-T/2}^{t}\left[\left(u_\alpha + u_\beta'\right)\left(i_\alpha - i_\beta'\right)\right]dt + \\ + \frac{0{,}75}{T}\int_{t-T/2}^{t}\left[\left(u_\alpha' - u_\beta\right)\left(i_\alpha' + i_\beta\right)\right]dt; \quad (12)$$

$$Q_{21}(t) = \frac{0{,}75}{T}\int_{t-T/2}^{t}\left[-\left(u_\alpha + u_\beta'\right)\left(i_\alpha' + i_\beta\right)\right]dt + \\ + \frac{0{,}75}{T}\int_{t-T/2}^{t}\left[\left(u_\alpha' - u_\beta\right)\left(i_\alpha - i_\beta'\right)\right]dt. \quad (13)$$

Для отримання дійсної та уявної складових потужності зворотної послідовності $\underline{S}_{22} = P_{22} + jQ_{22}$ необхідно виконати такі перетворення:

$$P_{22}(t) = \frac{0{,}75}{T}\int_{t-T/2}^{t}\left[\left(u_\alpha + u_\beta'\right)\left(i_\alpha + i_\beta'\right)\right]dt + \\ + \frac{0{,}75}{T}\int_{t-T/2}^{t}\left[\left(u_\alpha' - u_\beta\right)\left(i_\alpha' - i_\beta\right)\right]dt. \quad (14)$$

$$Q_{22}(t) = \frac{0{,}75}{T}\int_{t-T/2}^{t}\left[\left(u_\alpha + u_\beta'\right)\left(i_\alpha' - i_\beta\right)\right]dt + \\ + \frac{0{,}75}{T}\int_{t-T/2}^{t}\left[\left(u_\alpha' - u_\beta\right)\left(i_\alpha + i_\beta'\right)\right]dt. \quad (15)$$

Перехідні характеристики вимірювального каналу для всіх величин, в основу реалізації якого покладено формули (10)–(13), не мають перерегулювання при накиді навантаження (рис. 1, 2), що забезпечуватиме стійкість динамічної системи компенсації реактивної потужності.

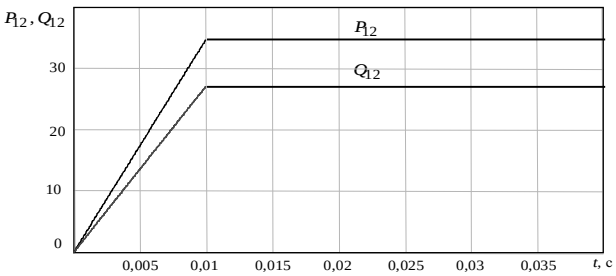

Рисунок 1 – Перехідні характеристики вимірювального каналу для величин P_{12}, Q_{12}

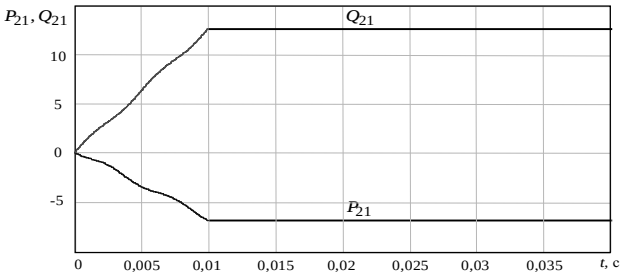

Рисунок 2 – Перехідні характеристики вимірювального каналу для величин P_{21}, Q_{21}

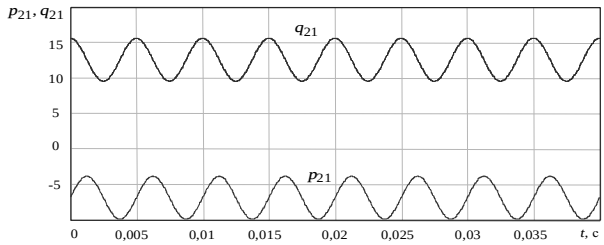

Рисунок 3 – Характер залежностей поточних значень підінтегральних величин p_{21}, q_{21}

Необхідність застосування інтегрування пояснюється коливаннями підінтегральних величин p_{12}, q_{12} та p_{21}, q_{21}, що використані в формулах (10) – (15), за несинусоїдності напруги живлення та струму навантаження (рис. 3).

Висновки. 1. Запропоновано спосіб роздільного вимірювання параметрів несиметрії трифазних навантажень, зумовлених несиметрією струму навантаження та несиметрією напруги живлення, в основу принципу дії якого покладено інтегрування миттєвих потужностей на ковзному інтервалі часу тривалістю пів періоду.

2. Запропоновані вимірювальні перетворення мають достатню стійкість і характеризуються відсутністю методичних похибок вимірювань за наявності несиметрії трифазної напруги і вищих гармонік струму навантаження.

ЛІТЕРАТУРА

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

2. Динамічна компенсація реактивної потужності в перехідних режимах електроприводів/ М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, О. М. Кравець, М. В. Никитенко // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 3. – 6 с.– [Електронний ресурс] http://www.nbuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-3.fils/uk/ 08mibpio_ua.pdf

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. 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.

5. 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.

Стаття надійшла 07.03.2011 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф. Чорним О.П.

РАЗДЕЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ БЫСТРОИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ТРЕХФАЗНЫХ НАГРУЗОК

Бурбело М.И., д.т.н., проф., Мельничук С.М., Ільчук Ю.В.
Винницкий национальный технический университет
Хмельницкое шоссе, 95, 21021, г. Винница, Украина
E-mail: burbelo@energo.vstu.ua

Предложен способ раздельного измерения параметров несимметричных трехфазных нагрузок, в основу принципа действия которого положено интегрирование мгновенных мощностей на скользящем интервале времени продолжительностью пол периода напряжения питания. Измерительный алгоритм обладает достаточной устойчивостью и характеризуется отсутствием методических погрешностей измерений при наличии несимметрии трехфазного напряжения и высших гармоник тока нагрузки.

Ключевые слова: несимметричная трехфазная нагрузка, комплексная условная мощность обратной последовательности, ортогональные напряжения и токи, измерительный канал.

SEPARATE MEASUREMENT OF PARAMETERS OF ASYMMETRICAL FAST VARIABLE THREE-PHASE LOADINGS

Burbelo M., Doc. Sc. (Tech.), Prof., Melnychuk S., Ilchuk J.
Vinnitsia national technical university
Khmelnytske shose, 95, 21021, Vinnytsia, Ukraine
E-mail: burbelo@energo.vstu.ua

The authors propose a method for measuring of asymmetrical three-phase loads, based on the principle of action is laid on the integration of the instantaneous power of a sliding time interval lasting half a period of supply voltage. Measuring channel has sufficient stability and is characterized by the absence of systematic errors of measurement in the presence of three-phase voltage unbalance and higher harmonics of load current

Key words: asymmetrical three-phase load, complex symbolic power reverse sequence, orthogonal voltages and currents, measurement channel.