

УДК 621.317.7

**М. Й. Бурбело**, д-р техн. наук, проф.;**В. І. Романовський**, канд. техн. наук, доц.;**С. М. Мельничук**

## ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТЕЙ НЕСИМЕТРИЧНОГО РЕЖИМУ ТРИФАЗНОЇ ВРІВНОВАЖЕНОЇ СИСТЕМИ

*Проаналізовано можливості підвищення швидкодії вимірювання потужностей несиметричних режимів трифазної врівноваженої системи з використанням ортогональних складових миттєвих потужностей.*

### Розгляд проблеми

Несиметричні режими трифазних врівноважених систем, до яких, зокрема, відносяться розподільні мережі з ізольованою нейтраллю напругою 6, 10, 35 кВ, характеризують комплексними повною  $\underline{S}$  та пульсуючою  $\underline{N}$  потужностями [1—3], а також комплексною умовною потужністю зворотної послідовності  $\underline{S}_2$  [4], відповідно:

$$\underline{S} = 3 \left( \dot{U}_1^* I_1 + \dot{U}_2^* I_2 \right); \quad \underline{N} = 3 (\dot{U}_1 I_2 + \dot{U}_2 I_1); \quad \underline{S}_2 = 3 \left( \dot{U}_1^* I_2 + \dot{U}_2^* I_1 \right), \quad (1)$$

де  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, I_1, I_2$  — комплексні напруги і струми, відповідно, прямої та зворотної послідовностей;  $\dot{U}_1^*, \dot{U}_2^*, I_1^*, I_2^*$  — комплексні спряжені струми відповідних послідовностей.

Комплексна повна потужність  $\underline{S}$  відображає споживання електричної енергії, а комплексні пульсуюча потужність  $\underline{N}$  та умовна потужність зворотної послідовності  $\underline{S}_2$  характеризують несиметрію режиму трифазної системи.

Комплексні потужності трифазної врівноваженої системи можна представити через комплексні напруги та струми в ортогональній системі координат Кларка:

$$\underline{S} = \dot{U}_\alpha^* I_\alpha + \dot{U}_\beta^* I_\beta; \quad \underline{N} = \dot{U}_\alpha I_\alpha - \dot{U}_\beta I_\beta; \quad \underline{S}_2 = \dot{U}_\alpha^* I_\alpha - \dot{U}_\beta^* I_\beta, \quad (2)$$

де  $\dot{U}_\alpha, \dot{U}_\beta, I_\alpha, I_\beta, I_\alpha^*, I_\beta^*$  — комплексні напруги і струми та комплексні спряжені струми в ортогональній системі координат Кларка.

Активна та реактивна потужності можуть бути визначені інтегруванням ортогональних складових миттєвих потужностей:

$$\begin{aligned} p(t) &= p_\alpha(t) + p_\beta(t) = u_\alpha(t) i_\alpha(t) + u_\beta(t) i_\beta(t); \\ q(t) &= q_\alpha(t) + q_\beta(t) = u_\alpha'(t) i_\alpha(t) + u_\beta'(t) i_\beta(t), \end{aligned} \quad (3)$$

де  $p_\alpha(t), p_\beta(t)$  — ортогональні складові миттєвої активної потужності;  $q_\alpha(t), q_\beta(t)$  — ортогональні складові миттєвої реактивної потужності;  $u_\alpha, u_\beta, i_\alpha, i_\beta$  — ортогональні складові напруги та струму; штрихом позначено перетворення Гільберта ортогональної складової.

З метою виключення перетворення Гільберта, яке забезпечує фазовий зсув усіх гармонічних складових напруги або струму на  $-90$  електричних градусів і є достатньо складним за технічною реалізацією, можна використати простіше інтегровальне перетворення.

Несиметрія режиму приводить до появи пульсацій миттєвих активної та реактивної потужностей. За визначенням [3] пульсуюча потужність трифазного несиметричного навантаження є змінною складовою миттєвої активної потужності:

$$N(t) = \operatorname{Re} \left( \underline{N} e^{j2\omega t} \right) = N \cos(2\omega t + \xi) = -(p(t) - P), \quad (4)$$

де  $P$  — активна потужність трифазного навантаження;  $N$  — модуль пульсуючої потужності, який є амплітудою коливань змінної складової миттєвої потужності;  $\omega$  — кругова частота напруги живлення;  $\xi$  — початкова фаза косинусоїдної функції пульсуючої потужності, частота коливань якої вдвічі вища від частоти коливань напруги живлення.

Дійсна та уявна складові комплексної умовної потужності зворотної послідовності можуть бути визначені інтегруванням ортогональних складових миттєвих потужностей:

$$p_2(t) = p_\alpha(t) - p_\beta(t); \quad q_2(t) = q_\alpha(t) - q_\beta(t). \quad (5)$$

Вимірювання потужностей в несиметричних режимах вимагає застосування інтегровальних перетворювачів, що істотно позначається на швидкодії отримання інформації. Підвищення швидкодії є необхідним в процесі побудови пристроїв динамічної компенсації реактивної потужності, пристроїв релейного захисту від несиметричних коротких замикань та неповнофазних режимів. Основною вимогою таких пристроїв є висока швидкість вимірювальних перетворювачів.

Метою роботи є аналіз можливостей способів вимірювання потужностей трифазної несиметричної зрівноваженої системи, які можуть забезпечити високу швидкість отримання інформації.

### Обґрунтування результатів

Для визначення активної та реактивної потужностей з максимально високою швидкістю пропонується використати властивість взаємної компенсації змінних складових миттєвих потужностей:

$$P = 0,5(p(t) + p'(t)) = 0,5(p_\alpha(t) + p_\beta(t) + p_\alpha'(t) + p_\beta'(t)); \quad (6)$$

$$Q = 0,5(q(t) + q'(t)) = 0,5(q_\alpha(t) + q_\beta(t) + q_\alpha'(t) + q_\beta'(t)). \quad (7)$$

де  $p_\alpha'(t) = u_\alpha'(t)i_\alpha'(t)$ ,  $p_\beta'(t) = u_\beta'(t)i_\beta'(t)$  — ортогональні складові миттєвої активної потужності;  $q_\alpha'(t) = -u_\alpha(t)i_\alpha'(t)$ ,  $q_\beta'(t) = -u_\beta(t)i_\beta'(t)$  — ортогональні складові миттєвої реактивної потужності.

Миттєві потужності  $p(t) = p_\alpha(t) + p_\beta(t)$  та  $p'(t) = p_\alpha'(t) + p_\beta'(t)$ , а також  $q(t) = q_\alpha(t) + q_\beta(t)$  та  $q'(t) = q_\alpha'(t) + q_\beta'(t)$  мають однакові постійні складові, а їх змінні складові за несиметричного навантаження знаходяться у протифазі (рис. 1).

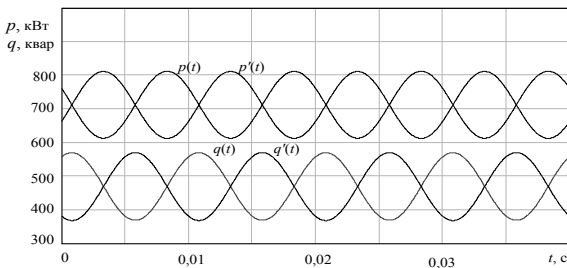


Рис. 1. Залежності складових потужності за несиметричного навантаження

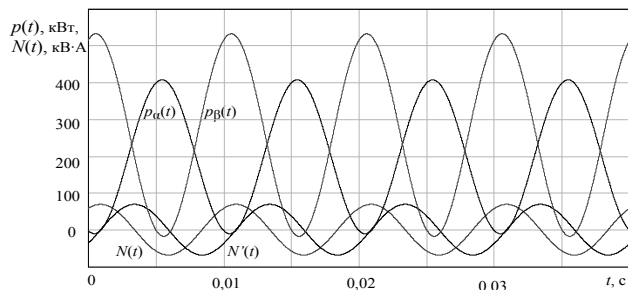


Рис. 2. Залежності ортогональних складових миттєвої потужності та пульсуючих потужностей за несиметричного режиму

Підставивши (6) в (4), отримаємо вираз для миттєвої пульсуючої потужності

$$N(t) = -(p(t) - P) = -0,5(p_\alpha(t) + p_\beta(t) - p_\alpha'(t) - p_\beta'(t)). \quad (8)$$

Вираз для пульсуючої потужності можна отримати і через різницю реактивних потужностей:

$$N'(t) = -(q(t) - Q) = -0,5(q_\alpha(t) + q_\beta(t) - q_\alpha'(t) - q_\beta'(t)). \quad (9)$$

Миттєві потужності  $N(t)$  та  $N'(t)$  мають однакові змінні складові та зсунуті на кут  $\pi/2$  (рис. 2):

$$N'(t) = \text{Im}(\underline{N}e^{j2\omega t}) = N \sin(2\omega t + \xi). \quad (10)$$

Для вимірювання амплітуди пульсуючих потужностей можуть бути використані будь-які з відомих способів вимірювання амплітудних або діючих значень синусоїдних величин. Наприклад,

можна використати алгоритм

$$N = \sqrt{\frac{1}{T/2} \int_{t_*-T/4}^{t_*} (p(t) - P)^2 dt}. \quad (11)$$

Вибір масштабувального коефіцієнта зумовлений тим, що модуль комплексної пульсуючої потужності визначається амплітудним значенням миттєвої пульсуючої потужності. Тривалість інтегрування може бути взята рівною одній чверті періоду, оскільки частота квадрата пульсуючої потужності в чотири рази вища від частоти напруги живлення.

Реалізація вимірювань дійсної  $N_a$  та уявної  $N_r$  складових комплексної пульсуючої потужності  $\underline{N} = N_a + jN_r$  характеризується недостатньою швидкодією. Синусоїду основної гармоніки можна виділити за формулою коефіцієнтів ряду Фур'є для основної гармоніки.

Вони можуть бути також реалізовані з використанням вимірювальних перетворювачів зі строкуванням миттєвих величин шляхом визначення миттєвих значень  $N(t)$  в моменти часу, відповідно,  $t_* = 0$  та  $t_* = -T/4$  або  $t_* = T/2$  та  $t_* = T/4$  (в останньому випадку миттєві значення беруться зі знаком мінус). Для цього можна використати миттєві значення  $N'(t)$  в моменти часу, відповідно,  $t_* = T/4$  та  $t_* = 0$  або  $3T/4$  та  $T/2$  (зі знаком мінус).

Вимірювання дійсної  $N_a$  та уявної  $N_r$  складових комплексної пульсуючої потужності можуть бути реалізовані інтегруванням миттєвих значень  $N(t)$  протягом половини періоду напруги живлення з межами інтегрування  $t_* = -T/4 \dots T/4$  та  $t_* = T/2 \dots T$  або  $t_* = T/4 \dots 3T/4$  та  $t_* = 0 \dots T/2$  (в останньому випадку миттєві значення беруться зі знаком мінус). Для цього також можна використати інтегрування миттєвих значень  $N'(t)$  з межами інтегрування  $t = 0 \dots T/2$  та  $t = -T/2 \dots T/2$  або  $t = 0 \dots T/2$  та  $t = -T/2 \dots T/2$  (зі знаком мінус).

Для отримання інформації про дійсну  $N_a$  та уявну  $N_r$  складові комплексної пульсуючої потужності перспективними можуть виявитися розроблені в працях [5—7] адаптивні нерекурсивні фільтри, які призначені для визначення ортогональних складових основної гармоніки струму або напруги за час, менший чверті періоду.

У разі необхідності швидкого отримання інформації про параметри несиметрії значно кращим варіантом є використання складових комплексної умовної потужності зворотної послідовності, визначення яких пропонується здійснювати за формулами

$$P_2 = 0,5(p_2(t) + p_2'(t)) = 0,5(p_\alpha(t) - p_\beta(t) + p_\alpha'(t) - p_\beta'(t)); \quad (12)$$

$$Q_2 = 0,5(q_2(t) + q_2'(t)) = 0,5(q_\alpha(t) - q_\beta(t) + q_\alpha'(t) - q_\beta'(t)). \quad (13)$$

Миттєві потужності  $p_2(t) = p_\alpha(t) - p_\beta(t)$  та  $p_2'(t) = p_\alpha'(t) - p_\beta'(t)$  мають однакові постійні складові, а їх змінні складові за несиметричного навантаження знаходяться в протифазі (рис. 3). Інформативним параметром у цьому випадку є їх постійні складові. Аналогічні властивості мають миттєві потужності  $q_2(t) = q_\alpha(t) - q_\beta(t)$  та  $q_2'(t) = q_\alpha'(t) - q_\beta'(t)$ .

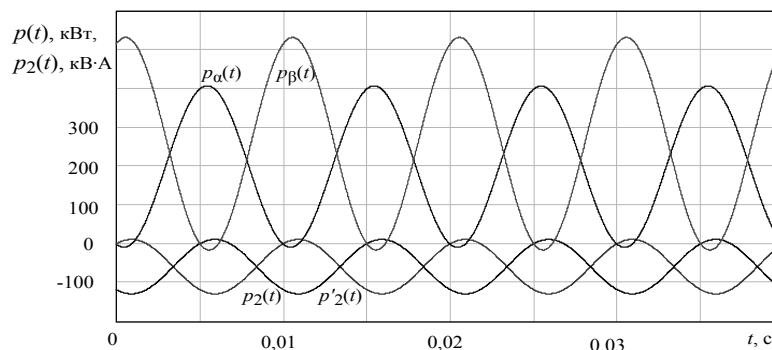


Рис. 3. Залежності ортогональних складових миттєвої потужності та дійсної складової умовної потужності зворотної послідовності

Застосування (12), (13) істотно покращує швидкодію вимірювальних перетворювачів потужностей несиметричного режиму і може бути рекомендовано для пристроїв релейного захисту та автоматики, установок динамічної компенсації реактивної потужності.

### Висновки

Запропоновано спосіб вимірювання активної та реактивної потужностей, а також дійсної та уявної складових умовної потужності зворотної послідовності трифазної системи у вигляді суми та різниці ортогональних складових миттєвих потужностей. Показано можливість вимірювання параметрів пульсуючої потужності з використанням стробувального та інтегрального перетворень.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Милях А. Н. Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях / А. Н. Милях, А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. — К. : Наукова думка, 1973. — 219 с.
2. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. — К. : Наукова думка, 1985. — 268 с.
3. Мельников Н. А. Реактивная мощность в электрических сетях / Н. А. Мельников. — М. : Энергия, 1975. — 128 с.
4. Маркушевич Н. С. Качество напряжения в городских электрических сетях / Н. С. Маркушевич, Л. А. Солдаткина. — М. : Энергия, 1975. — 128 с.
5. Лямец Ю. Я. Адаптивная цифровая обработка входных величин релейной защиты / Ю. Я. Лямец, В. И. Антонов, А. П. Арсентьев // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1988. — № 6. — С. 51—59.
6. Лямец Ю. Я. Адаптивный цифровой фильтр основной гармоники токов и напряжений электрической сети / Ю. Я. Лямец, В. И. Антонов, А. П. Арсентьев // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1989. — № 6. — С. 115—126.
7. Лямец Ю. Я. Простейший адаптивный фильтр основной гармоники тока короткого замыкания / Ю. Я. Лямец, Н. В. Подшивалин, Э. М. Шнеерсон // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1991. — № 3. — С. 54—60.

Рекомендована кафедрою відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів

Стаття надійшла до редакції 22.04.2013  
Рекомендована до друку 19.07.13

**Бурбело Михайло Йосипович** — професор.

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

**Романовський Володимир Ігорович** — доцент.

Кафедра електроенергетики, Сумський державний університет, Суми;

**Мельничук Сергій Миколайович** — інженер Південно-Західної електроенергетичної системи ДП НЕК «Укренерго», Вінниця