

УДК 621.317:621.311

М. Й. Бурбело, д. т. н., доц.;

О. В. Бабенко, асп.

АЛГОРИТМ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СИМЕТРУВАЛЬНИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ

Визначено критерії для компенсації напруг зворотної та нульової послідовностей симетрувально-го трансформатора а також інформативні параметри, які необхідно вимірювати для забезпечення пофазового регулювання. Розроблено алгоритм роботи цифрового вимірювального каналу для отримання інформативних параметрів.

Суть проблеми

Несиметрія напруги у вузлах електричних навантажень енергосистеми негативно впливає на надійність та ефективність роботи споживачів електричної енергії. Одним з найвідоміших сучасних засобів симетрування напруги є симетрувальні трансформатори [1]. Принцип роботи останніх оснований на пофазовому регулюванні напруг, що може забезпечуватись механічними, тиристорно-механічними та іншими пристроями, які дозволяють здійснювати регулювання вихідної напруги трансформатора шляхом зміни кількості витків фаз первинної обмотки або впливу на магнітний потік осердя. Ефективність роботи таких установок залежить від точності і швидкодії вимірювальних систем, що забезпечують отримання інформації, необхідної для реалізації закону регулювання. Такі системи містять канали аналого-цифрової та цифрової обробки вхідних сигналів, точність і швидкодія яких є недостатньою.

Постановка завдання

В роботах [2, 3] отримано умову компенсації напруги зворотної послідовності на низькій стороні симетрувального трансформатора, з'єданого за схемою Δ/Υ

$$\frac{K_2}{K_1} = -\frac{\dot{U}'_2}{\dot{U}'_1} e^{-j60^\circ}, \quad (1)$$

де K_1 , K_2 — комплексні коефіцієнти передавання трансформатора прямої та зворотної послідовностей; $\dot{U}'_1 = (\dot{E}_1 - \dot{I}_{1L}\underline{Z})$, $\dot{U}'_2 = (\dot{E}_2 - \dot{I}_{2L}\underline{Z})$ — значення комплексних напруг прямої та зворотної послідовностей первинної обмотки трансформатора, тут: \dot{E}_1 , \dot{E}_2 — комплексні ЕРС прямої та зворотної послідовностей джерела, \dot{I}_{1L} , \dot{I}_{2L} — комплексні лінійні струми прямої та зворотної послідовності на високій стороні, \underline{Z} — комплексний опір системи електропередавання ($\underline{Z} = \underline{Z}_L + \underline{Z}_T$, тут \underline{Z}_L — комплексний опір лінії електропередавання; \underline{Z}_T — опір короткого замикання трансформатора).

Аналогічно (1) отримано умову, за якою здійснюється компенсація напруги нульової послідовності

$$\frac{K_3}{K_1} = -\frac{\dot{U}'_0}{\sqrt{3}\dot{U}'_1} e^{-j30^\circ}, \quad (2)$$

де K_3 — комплексний коефіцієнт передавання симетрувального трансформатора нульової послідовності; \dot{U}'_0 — спад напруги від струму нульової послідовності в кожній з фаз первинної обмотки. ($\dot{U}'_0 = \dot{I}_{0f}\underline{Z}_T$, де \dot{I}_{0f} — фазний струм нульової послідовності в первинній обмотці трансформатора).

Комплексні коефіцієнти передавання трансформатора описуються виразами

$$\underline{K}_1 = -\frac{1}{3}(k_A + k_B + k_C); \quad \underline{K}_2 = -\frac{1}{3}(k_A + ak_B + a^2k_C); \quad \underline{K}_3 = -\frac{1}{3}(k_A + a^2k_B + ak_C), \quad (3)$$

де k_A, k_B, k_C — коефіцієнти передавання фаз трансформатора.

Обґрунтування результатів дослідження

Для систем електропостачання з невеликим значенням опору лінії електропередачі в процесі регулювання відношення $\frac{\dot{U}_2'}{\dot{U}_1'}$ та $\frac{\dot{U}_0'}{\dot{U}_1'}$ практично не змінюються. В такому випадку можна отримати рекурентні рівняння для регулювання напруг зворотної та нульової послідовностей на низькій стороні трансформатора

$$\left(\frac{\underline{K}_2}{\underline{K}_1}\right)_n = -\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} + \frac{\underline{K}_2}{\underline{K}_1}; \quad \left(\frac{\underline{K}_3}{\underline{K}_1}\right)_n = -\frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_1} + \frac{\underline{K}_3}{\underline{K}_1}, \quad (4)$$

де n — індекс, що означає наступне значення, яке необхідно встановити; $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0$ — напруги прямої, зворотної та нульової послідовностей вторинної обмотки трансформатора.

На основі (4) сформовано закони пофазового регулювання симетрувальним трансформатором для компенсації напруг зворотної та нульової послідовностей. На рис. 1. зображено векторні діаграми регулювання параметра \underline{K}_2 . Для цього необхідно виконати зміну коефіцієнтів передавання в двох (рис. 1а) або трьох (рис. 1б) фазах.

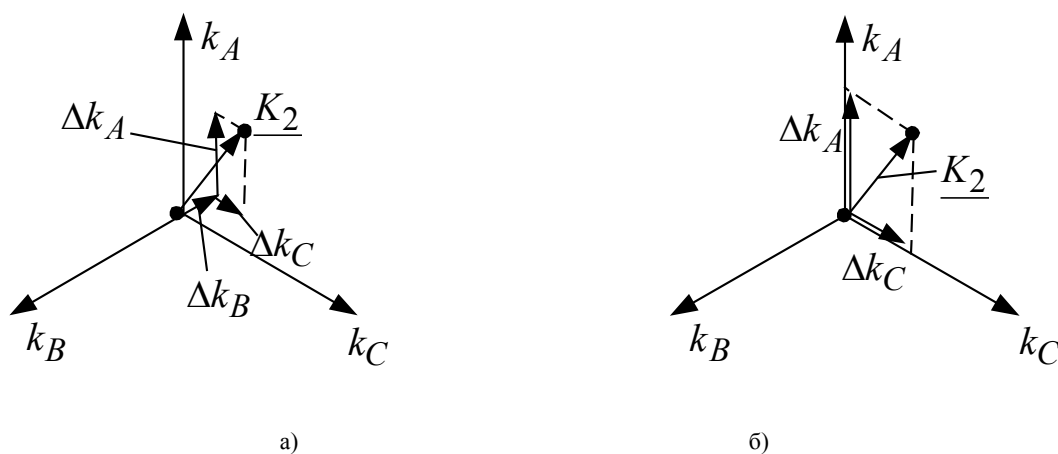


Рис. 1. Векторні діаграми параметра \underline{K}_2 у разі двофазного (а) та трифазного (б) регулювання

Аналогічним чином можна показати і можливість компенсації напруги нульової послідовності.

З огляду на (4) стає очевидним, що інформативними параметрами симетрувального трансформатора є комплексні відношення \dot{U}_2/\dot{U}_1 та \dot{U}_0/\dot{U}_1 . Ці величини можуть визначатись опосередковано шляхом цифрової обробки у відповідності з виразами

$$u_2' = \frac{u_2 u_1 + v_2 v_1}{u_1^2 + v_1^2}; \quad v_2' = \frac{v_2 u_1 + u_2 v_1}{u_1^2 + v_1^2}; \quad u_0' = \frac{u_0 u_1 + v_0 v_1}{u_1^2 + v_1^2}; \quad v_0' = \frac{v_0 u_1 + u_0 v_1}{u_1^2 + v_1^2}, \quad (5)$$

де $u_2' = \text{Re}(\dot{U}_2/\dot{U}_1)$; $v_2' = \text{Im}(\dot{U}_2/\dot{U}_1)$; $u_0' = \text{Re}(\dot{U}_0/\dot{U}_1)$; $v_0' = \text{Im}(\dot{U}_0/\dot{U}_1)$; u_1, u_2, u_0 — дійсні складові напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей; v_1, v_2, v_0 — уявні складові напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Таким чином, для вимірювання величин (5) необхідно отримати інформацію про дійсні та уявні складові напруг трьох послідовностей. Дійсні та уявні складові напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей, визначені відносно напруги фази В, можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} u_1 &= (U_a \cos \psi_a - 0,5U_b - 0,5U_c \cos \psi_c + 0,5\sqrt{3}U_c \sin \psi_c)/3; \\ v_1 &= (U_a \sin \psi_a + 0,5\sqrt{3}U_b - 0,5U_c \sin \psi_c - 0,5\sqrt{3}U_c \cos \psi_c)/3; \\ u_2 &= (U_a \cos \psi_a - 0,5U_b - 0,5U_c \cos \psi_c - 0,5\sqrt{3}U_c \sin \psi_c)/3; \\ v_2 &= (U_a \sin \psi_a + 0,5\sqrt{3}U_b - 0,5U_c \sin \psi_c + 0,5\sqrt{3}U_c \cos \psi_c)/3; \\ u_0 &= (U_b + U_c \cos \psi_c + U_a \cos \psi_a)/3; \\ v_0 &= (U_c \sin \psi_c + U_a \sin \psi_a)/3, \end{aligned}$$

де U_a, U_b, U_c — діючі значення фазних напруг вторинної обмотки трансформатора, з'єднаної в зірку; ψ_a, ψ_c — кути зсуву між векторами напруг фаз А та С та вектором напруги фази В.

Структура вимірювальних перетворень для отримання складових (5) показана на рис. 2.

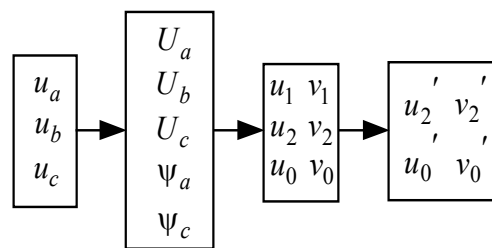


Рис. 2. Блок-схема алгоритму обробки інформації

Синфазна та квадратурна складові фазних напруг можуть бути визначені за допомогою розкладу миттєвих напруг u_a, u_b, u_c в ряд Фур'є за виразами (на прикладі напруги фази А)

$$U_a \cos \psi_a = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N u_a \left(n \frac{2\pi}{N} \right) \sin \left(n \frac{2\pi}{N} \right); \quad U_a \sin \psi_a = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N u_a \left(n \frac{2\pi}{N} \right) \cos \left(n \frac{2\pi}{N} \right),$$

де n — порядковий номер дискретного вимірювання; N — кількість дискретних вимірювань.

Такий шлях вказує на необхідність використання складних обчислень, що знижує швидкодію вимірювальної системи, і ефективний лише за значних спотворень форми кривої напруги. Це пояснюється тим, що критерії пофазового регулювання виведені для умов синусоїдної напруги, а за несинусоїдності необхідно визначати діючі значення напруг на першій гармоніці.

В [4] розглянуто можливість роздільного перетворення синфазних та квадратурних складових сигналів методом інтегрування. Проаналізуємо можливість застосування цього методу для визначення синфазної та квадратурної складових напруги зворотної послідовності $u_2(\omega t)$, що аналітично може бути описано у вигляді

$$u_2(\omega t) = \frac{1}{3} \left(u_a(\omega t) + u_b \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) + u_c \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) \right). \quad (6)$$

Для одержання синфазної складової напруги $u_2(\omega t)$ необхідно виконати її інтегрування протягом півперіоду опорної напруги, в якості якої прийнято напругу $u_a(\omega t)$. Синфазна складова напруги зворотної послідовності визначиться шляхом обробки її значень у відповідності з виразом

$$u_{2\text{сф}} = \frac{k_{\text{нр}}}{3m} \left(\sum_{n=0}^{m-1} u_A[n] + u_B[n'_{B2} + n] + u_C[n'_{C2} + n] \right), \quad (7)$$

де m — кількість стробувань напруг протягом періоду, тривалістю π ; n'_{B2} , n'_{C2} — початкові моменти стробувань кривих напруг $u_B(\omega t)$ та $u_C(\omega t)$ в моменти, відповідно $\omega t = 1\frac{1}{3}\pi$ та $\omega t = 2\frac{2}{3}\pi$ відносно початку періоду опорної напруги; $k_{\text{пр}} = 0,9$ — коефіцієнт приведення результату цифрової обробки напруги до діючого значення її синфазної складової.

Рис. 3а є графічною ілюстрацією отримання синфазної складової напруги зворотної послідовності в трифазній несиметричній системі напруг.

Квадратурна складова напруги зворотної послідовності отримується як результат її інтегрування в межах, зсунутих на $\frac{\pi}{2}$ відносно півперіоду опорної напруги (рис. 3б). Вираз для визначення цієї складової запишеться таким чином:

$$u_{2\text{КВ}} = -\frac{k_{\text{пр}}}{3m} \left(\sum_{n=0}^{m-1} u_A[n''_{A2} + n] + u_B[n''_{B2} + n] + u_C[n''_{C2} + n] \right), \quad (8)$$

де n''_{A2} , n''_{B2} , n''_{C2} — початкові моменти стробувань напруг $u_A(\omega t)$, $u_B(\omega t)$ та $u_C(\omega t)$ в моменти відповідно $\frac{1}{2}\pi$, $1\frac{5}{6}\pi$ та $3\frac{1}{6}\pi$ відносно початку опорної напруги.

Алгоритм визначення синфазної та квадратурної складових напруг прямої та нульової послідовностей реалізується аналогічно до попереднього. Вирази для визначення цих складових відрізняються лише межами інтегрування фазних напруг.

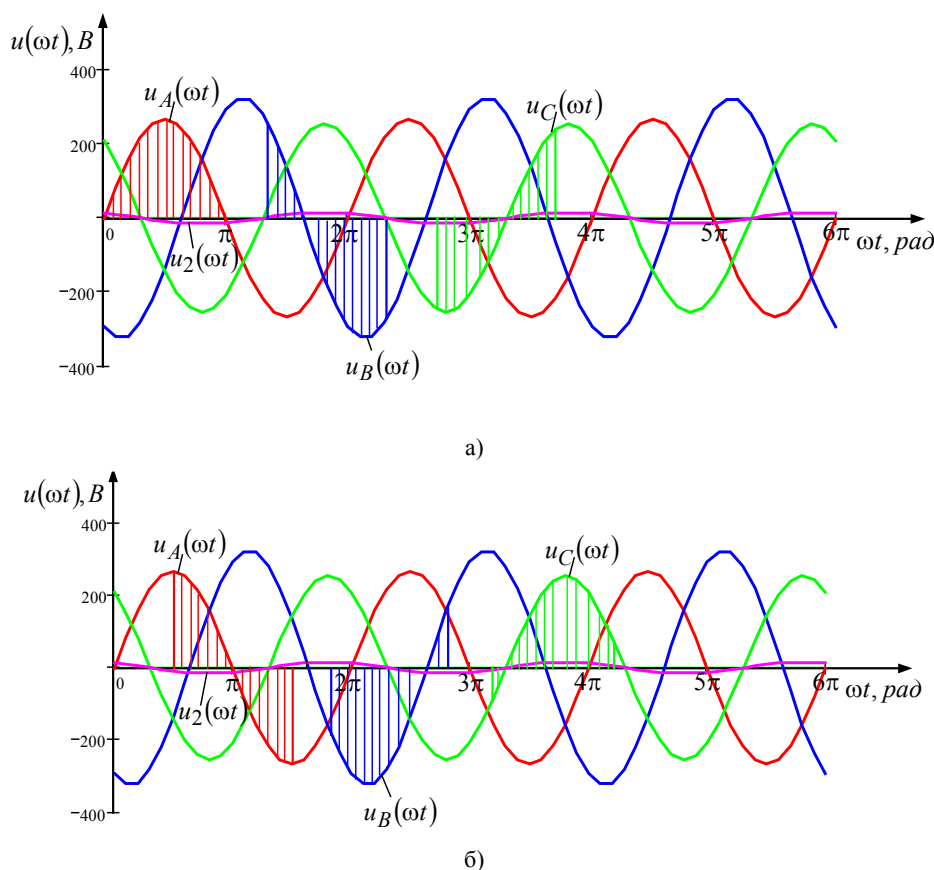


Рис. 3. До визначення синфазної та квадратурної складових напруги зворотної послідовності

Перевагою алгоритму є забезпечення більшої точності вимірювання за умов несинусоїдності порівняно з методом стробування в точках переходу через нуль і максимуму опорної напруги.

Висновки

В результаті аналізу напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей вторинної обмотки симетрувального трансформатора визначено критерії для їх компенсації. Інформативними параметрами, які необхідно вимірювати для забезпечення пофазового регулювання, є комплексні відношення \dot{U}_2/\dot{U}_1 та \dot{U}_0/\dot{U}_1 .

Розроблено алгоритм роботи цифрового вимірювального каналу напруг зворотної послідовності, оснований на методі інтегрування. Відповідно до алгоритму сформовано вирази для визначення синфазної та квадратурної складової напруги зворотної послідовності. Алгоритм може бути застосовано для побудови швидкодійних вимірювальних каналів установок симетрування напруг, що працюють за умов значних спотворень кривих напруг та струмів електричної мережі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сергеевков Б. Н., Киселёв В. М., Акимова Н. А. Электрические машины. Трансформаторы / Под ред. И. П. Копылова. — М.: Высшая школа, 1989. — 352 с.
2. Бурбело М. Й., Бабенко О. В. Формування математичних моделей вимірювальних систем установок симетрування // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2005. — № 6. — С. 242—251.
3. Бурбело М. Й., Терешкевич Л. Б., Бабенко О. В. Аналіз алгоритмів керування симетрувальним трансформатором // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. — 2005. — Вип. 37. — С. 13—18.
4. Раздельное преобразование комплексных сопротивлений / Добров Е. Е., Татаринцев И. Г., Черноус В. Н., Штамбергер Г. А. / Под ред. Г. А. Штамбергера. — Львов: Вища школа, 1985. — 136 с.

Бурбело Михайло Йосипович — завідувач кафедри, **Бабенко Олексій Вікторович** — аспірант.

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту
Вінницький національний технічний університет