

## АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ СИМЕТРУВАЛЬНИМИ ПРИСТРОЯМИ ЗА БАГАТОКРАТНОЇ НЕСИМЕТРІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

**М.Й. Бурбело**, докт. техн. наук, **М.В. Девятко**, **Ю.П. Войтюк**,  
Вінницький національний технічний університет,  
Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21021, Україна.

*В статті обґрунтовано алгоритм керування компенсаційними симетрувальними пристроями за багатократною несиметрією в розподільних мережах у разі істотної несиметрії навантажень та напруги джерела живлення.* Бібл. 3, рис. 5.

**Ключові слова:** несиметричне трифазне навантаження, компенсаційні симетрувальні пристрої, багатократна несиметрія, провідність зворотної послідовності.

**Вступ.** Симетруванню трифазних навантажень з використанням компенсаційних симетрувальних пристроїв (СП) присвячено низку праць, наприклад, [1, 3]. Однак аналіз відомих алгоритмів керування компенсаційними СП вказує на необхідність їхньої адаптації для застосування в розподільних мережах з багатократною несиметрією навантажень.

Під багатократною несиметрією в електричних мережах розуміють наявність в мережі двох або більше несиметричних споживачів або несиметрії напруги джерела живлення [3]. Вектор провідностей фаз компенсаційних СП за багатократною несиметрією навантажень формується у вигляді [2]

$$b_{BC} = \frac{1}{3}[(b_1 - b_{ex}) - 2k_2 b_2]; \quad b_{CA} = \frac{1}{3}[(b_1 - b_{ex}) + k_2 b_2 - \sqrt{3}k_2 g_2]; \quad b_{AB} = \frac{1}{3}[(b_1 - b_{ex}) + k_2 b_2 + \sqrt{3}k_2 g_2], \quad (1)$$

де  $b_{ex} = g_1 \operatorname{tg} \varphi_{ex}$  – задане значення вхідної реактивної провідності після симетрування;  $g_1 = \operatorname{Re}(\underline{Y}_1)$ ,  $b_1 = -\operatorname{Im}(\underline{Y}_1)$  – активна та реактивна провідності прямої послідовності навантаження  $\underline{Y}_1 = \underline{I}_1 / \underline{U}_1$ ;  $g_2 = \operatorname{Re}(\underline{Y}_2)$ ;  $b_2 = -\operatorname{Im}(\underline{Y}_2)$  – активна та реактивна умовні провідності зворотної послідовності навантаження  $\underline{Y}_2 = \underline{I}_2 / \underline{U}_1$ ;  $\operatorname{tg} \varphi_{ex}$  – задане значення коефіцієнта реактивної потужності;  $k_2$  – коефіцієнт, що характеризує ступінь симетрування навантажень. Регулюванням  $k_2$  забезпечується прийняття оптимального рішення щодо симетрування струму та напруги зворотної послідовності у вузлі мережі за наявності інших несиметричних споживачів. Водночас застосування цього підходу за істотної несиметрії навантажень або напруги джерела живлення не забезпечує необхідної точності досягнення оптимуму.

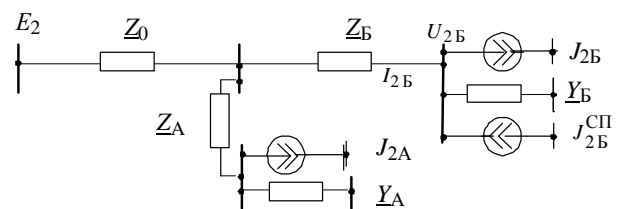
**Мета роботи.** Мета роботи полягає в обґрунтуванні інформативного параметра та алгоритму керування компенсаційними СП за істотної несиметрії навантажень та напруги джерела живлення.

**Обґрунтування результатів.** Розглянемо заступну схему розподільної мережі з двома несиметричними споживачами, приєднаними до вузлів А та Б, до останнього з яких приєднано СП (рис. 1).

Характерною особливістю багатократною несиметрії є зміщення мінімумів залежностей напруги і струму зворотної послідовності в процесі регулювання СП (рис. 2). Як видно з рис. 2, під час регулювання  $k_2$  мінімум залежності напруги за однакового характеру несиметрії  $U_{2B}(a)$  в суміжних вузлах мережі зміщується вправо, а за протилежного  $U_{2B}(b)$  – вліво відносно мінімуму залежності струму зворотної послідовності. За незначної несиметрії напруги джерела живлення (коефіцієнт зворотної послідовності напруги складає  $K_{2U}=0,6\%$ ) відносно розташування мінімумів зберігається (рис. 3). Однак мінімум напруги зворотної послідовності у даному випадку не досягає нульового значення. У випадку збільшення несиметрії напруги джерела живлення розташування мінімумів може істотно змінитися.

Основним призначенням компенсаційних СП є симетрування навантажень. Водночас, згідно з вимогами ГОСТ 13109-97 основним параметром, що регламентується в електричних мережах, є коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю. З метою обґрунтування умов симетрування розглянемо вираз для напруги зворотної послідовності у вузлі Б за багатократною несиметрією

$$\dot{U}_{2B} = \dot{E}_{2B} + (\underline{Z}_0 + \underline{Z}_B)(\dot{J}_{2B} - \dot{J}_{2B}^{СП}) + \underline{Z}_0 \dot{J}_{2A} \rightarrow \min, \quad (2)$$



**Рис. 1**

де  $\dot{E}_{2B}$  – складова напруги зворотної послідовності напруги у вузлі Б, що зумовлена напругою зворотної послідовності  $\dot{E}_2$  джерела живлення. За умови  $\dot{U}_{2B} \rightarrow \min$  з урахуванням можливості досягнення нульового значення напруги зворотної послідовності отримуємо

$$\dot{J}_{2B}^{CP} = \dot{J}_{2B} + (\dot{E}_{2B} + \underline{Z}_0 \dot{J}_{2A}) / (\underline{Z}_0 + \underline{Z}_B). \quad (3)$$

З цього виразу наглядно видно, що мінімум напруги зворотної послідовності в процесі регулювання СП буде зміщеним відносно мінімуму струму зворотної послідовності  $\dot{J}_{2B}^{CP} = \dot{J}_{2B}$ . Величина зміщення залежить від струму зворотної послідовності в суміжному вузлі, співвідношення опорів дільниці приєднання СП та головної дільниці мережі, та складової напруги зворотної послідовності напруги у вузлі Б, що зумовлена напругою зворотної послідовності  $\dot{E}_2$  джерела живлення. З (3) випливає, що в момент компенсації струму  $\dot{J}_{2B}$  напруга зворотної послідовності у вузлі Б визначається напругою зворотної послідовності джерела живлення та струмом зворотної послідовності навантаження у вузлі А

$$\dot{U}_{2B}^{(0)} = \dot{E}_{2B} + \underline{Z}_0 \dot{J}_{2A}. \quad (4)$$

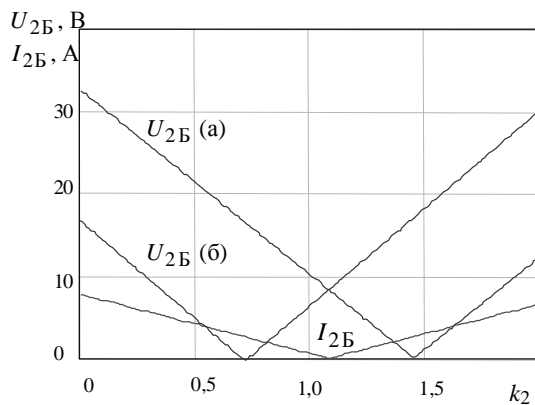


Рис. 2

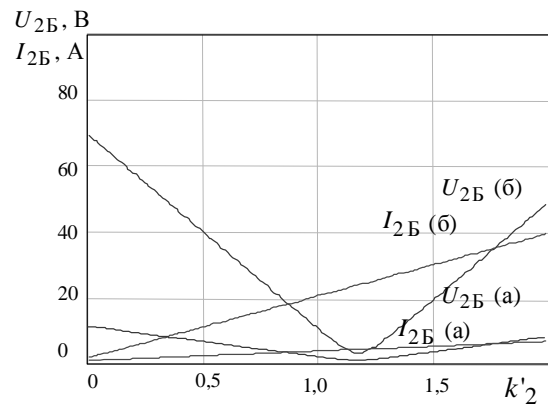


Рис. 3

Вирази (3) та (4) характеризують значення струму СП та напруги зворотної послідовності за двократною несиметрії навантажень. За наявності декількох вузлів з несиметричним навантаженням, приєднаних до спільного вузла живлення, значення струму СП та напруги зворотної послідовності у вузлі Б будуть відповідно визначатися з виразів  $\dot{J}_{2B}^{CP} = \dot{J}_{2B} + [\dot{E}_{2B} + \sum \underline{Z}_0 \dot{J}_{2i}] (\underline{Z}_0 + \underline{Z}_B)^{-1}$ ;  $\dot{U}_{2B}^{(0)} = \dot{E}_{2B} + \sum \underline{Z}_0 \dot{J}_{2i}$ , де  $\dot{J}_{2i}$  – комплексне значення струму зворотної послідовності  $i$ -го вузла з несиметричним навантаженням.

Симетрування пропонується здійснювати в два етапи. На першому використовуються умови симетрування (1) при  $k_2=1$ , що забезпечують мінімум струму зворотної послідовності,

$$b_{BC}^{(0)} = [(b_1 - b_{ex}) - 2b_2]/3; \quad b_{CA}^{(0)} = [(b_1 - b_{ex}) + b_2 - \sqrt{3}g_2]/3; \quad b_{AB}^{(0)} = [(b_1 - b_{ex}) + b_2 + \sqrt{3}g_2]/3. \quad (5)$$

На другому етапі в (1) вводиться додаткова провідність  $\Delta Y_2$

$$\underline{Y}'_2 = \underline{Y}_2 - \Delta Y_2 = \underline{Y}_2 - (\dot{U}_{2B}^{(0)} / \dot{U}_{1B}^{(0)}) (\underline{Z}_0 + \underline{Z}_B)^{-1}, \quad (6)$$

а умови (1) після заміни  $\underline{Y}_2 = g_2 - jb_2$  на  $\underline{Y}'_2 = g'_2 - jb'_2$  набувають вигляду

$$b_{BC}^{(1)} = b_{BC}^{(0)} + [-2k'_2 b'_2]/3; \quad b_{CA}^{(1)} = b_{CA}^{(0)} + [k'_2 b'_2 - \sqrt{3}k'_2 g'_2]/3; \quad b_{AB}^{(1)} = b_{AB}^{(0)} + [k'_2 b'_2 + \sqrt{3}k'_2 g'_2]/3. \quad (7)$$

Залежності напруги і струму зворотної послідовності за незначної ( $K_{2U}=0,6\%$ ) та істотної ( $K_{2U}=1,5\%$ ) несиметрії напруги джерела живлення в процесі регулювання коефіцієнта  $k'_2$ , введеного в (7) аналогічно  $k_2$  в умовах (1), є схожими (рис. 4). Вигляд залежностей напруги і струму зворотної послідовності на другому етапі не змінюється за однакового та протилежного характеру несиметрії навантажень. У даному випадку мінімум напруги зворотної послідовності досягається при  $k'_2 \approx 1$ . При цьому струм зворотної послідовності зростає. Зростають і втрати потужності (рис. 5), що зумовлені струмом зворотної послідовності. Особливо суттєвим є зростання втрат потужності за істотної несиметрії напруги джерела живлення.

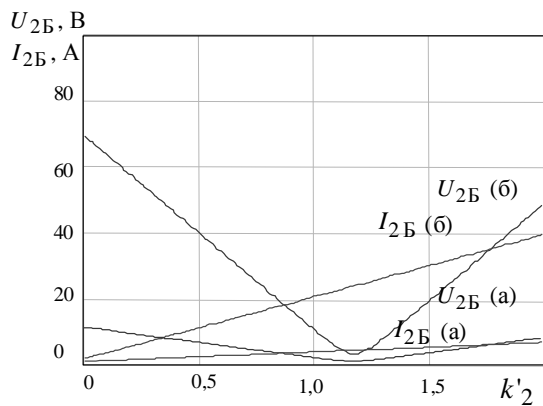


Рис. 4

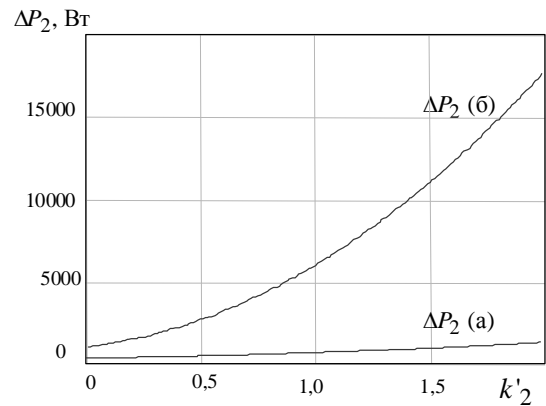


Рис. 5

На другому етапі можливим є вибір компромісного меншого значення коефіцієнта  $k'_2$ , наприклад, в діапазоні 0,5...0,8 з метою необхідності дотримання вимог ГОСТ 13109-97 щодо напруги зворотної послідовності і обмеження значення струму зворотної послідовності. З показаних на рис. 5 залежностей випливає, що при  $K_{2U} > 1,0$  % застосування компенсаційних СП супроводжується значними втратами активної потужності, а тому компенсаційні СП можна рекомендувати для симетрування напруги лише при  $K_{2U} < 1,0$  %.

**Висновки.** Показано, що за багатократної несиметрії в розподільних мережах керування компенсаційними СП доцільно здійснювати за провідністю зворотної послідовності навантаження з адаптивним коригуванням цієї провідності за значенням напруги зворотної послідовності в момент досягнення симетрії за струмом зворотної послідовності.

1. Баталов А.Г., Гриб О.Г., Сендерович Г.А. и др. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. – Харьков: ХНАГХ, 2006. – 272 с.

2. Бурбело М.Й., Кузьменко М.В., Бірюков О.О., Кінзерська О.М. Симетрування навантажень вузлів електричних мереж з використанням двофазних симетрувальних установок // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 5. – С. 35–38.

3. Кузнецов В.Г., Григорьев А.С., Данилюк В.Б. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях. – К.: Наукова думка, 1992. – 240 с.

УДК 621.316.7

#### АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СИММЕТРИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ ПРИ МНОГОКРАТНОЙ НЕСИММЕТРИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

М.И. Бурбело, докт. техн. наук, М.В. Девятко, Ю.П. Войтюк

Винницкий национальный технический университет,  
Хмельницкое шоссе, 95, Винница, 21021, Украина.

В статье обоснован алгоритм управления компенсационными симметрирующими устройствами при многократной несимметрии в распределительных сетях в случае существенной несимметрии нагрузок и напряжения источника питания. Библи. 3, рис. 5.

**Ключевые слова:** несимметричная трехфазная нагрузка, компенсационные симметрирующие устройства, многократная несимметрия, проводимость обратной последовательности.

#### ALGORITHM OF CONTROL BALANCING DEVICE WITH MULTIPLE ASYMMETRY IN THE DISTRIBUTION NETWORKS

M.J. Burbelo, M.V. Deviatko, Yu.P. Voitiuk

Vinnitsia National Technical University,  
Khmelnyske shosse, 95, Vinnitsia, 21021, Ukraine.

The article proved balancing compensation algorithm of control devices for repeated asymmetry in the distribution networks in the event of a significant asymmetry loads and supply voltage. References 3, figures 5.

**Keywords:** asymmetrical three-phase load, balancing compensation devices, repeated asymmetry, the conductivity of the reverse sequence.

1. Batalov A.G., Grib O.G., Senderovich G.A. etc. Quality of electrical energy in electrical power supply systems: (manual). – Kharkov: KhNAME, 2006. – 272 p. (Rus)

2. Burbelo M.J., Kuzmenko M.V., Biriukov O.O., Kinzerska O.M. Symmetry of loadings of knots with the use of diphasic symmetry options in electrical networks // Visnyk Vinnitskoho Politekhnichnoho Instytutu. – 2008. – № 5. – Pp. 35–38. (Ukr)

3. Kuznetsov V.G., Grigoriev A.S., Daniliuk V.B. Decrease of asymmetry and unsinusoidality voltages in electrical networks. – Kyiv: Naukova dumka, 1992. – 240 p. (Rus)

Надійшла 07.02.2012

Received 07.02.2012