

В.В. Гніліцький, к.т.н., доц.
О.А. Поліщук, аспір.

Житомирський державний технологічний університет

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ОПТИМАЛЬНОГО СИМЕТРУВАННЯ НАПРУГ КОМПЕНСАЦІЙНИМИ УСТАНОВКАМИ У ТРИФАЗНИХ МЕРЕЖАХ

Запропоновано методику розрахунку оптимальних значень аргументів очікуваних фазних напруг для отримання більш якісного симетрування напруг у трифазних мережах.

Постановка проблеми. Під несиметричним режимом трифазної електричної мережі розуміють такий режим, при якому умови роботи фаз є неоднаковими [1, 3].

Несиметрія напруг призводить до виникнення додаткових втрат активної потужності в електричних мережах, зниження їх пропускної здатності, а також до зменшення терміну експлуатації електрообладнання [1, 2]. У свою чергу споживачі електричної енергії також впливають на якість електроенергії, зокрема на симетрію напруг. Такий взаємний вплив електрообладнання та живлячої системи визначають терміном «електромагнітна сумісність».

Таким чином, симетрування напруг є однією з важливих ланок вирішення проблеми електромагнітної сумісності [6, 7].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В [10] запропонована математична модель керування несиметрією напруг у системах електропостачання, котра базується на засадах теорії Фризе.

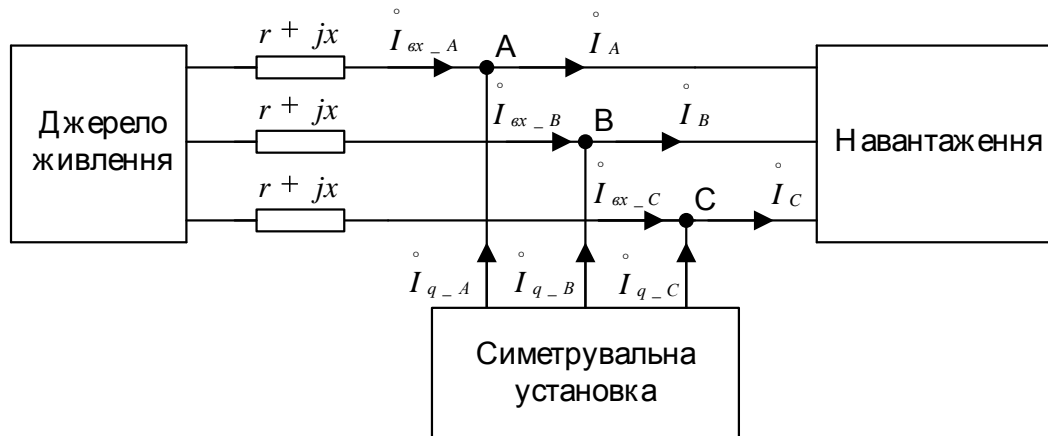


Рис. 1. Схема симетрування напруг

Струми симетрувальної установки (СУ), ін'єкцію котрих необхідно здійснити в електромережу для отримання очікуваного результату (рис. 1), знаходяться за таким співвідношенням [4, 9, 5]:

$$\begin{bmatrix} \overset{\circ}{I}_{q_A} \\ \overset{\circ}{I}_{q_B} \\ \overset{\circ}{I}_{q_C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overset{\circ}{I}_A \\ \overset{\circ}{I}_B \\ \overset{\circ}{I}_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \overset{\circ}{I}_{ex_A} \\ \overset{\circ}{I}_{ex_B} \\ \overset{\circ}{I}_{ex_C} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де $\overset{\circ}{I}_A, \overset{\circ}{I}_B, \overset{\circ}{I}_C$ – струми у навантаженні, котрі встановляться після симетрування напруг, А;
 $\overset{\circ}{I}_{ex_A}, \overset{\circ}{I}_{ex_B}, \overset{\circ}{I}_{ex_C}$ – струми в лінії живлення, що встановлюються після симетрування напруг, А.

У свою чергу струми, які повинні встановитись у живлячій лінії після симетрування напруг (рис. 1), можна знайти таким чином:

$$\begin{bmatrix} \overset{\circ}{I}_{ex_A} \\ \overset{\circ}{I}_{ex_B} \\ \overset{\circ}{I}_{ex_C} \end{bmatrix} = \frac{1}{\overset{\circ}{Z}_l} \cdot \begin{bmatrix} \overset{\circ}{U}_{S_A} - \overset{\circ}{U}_A \\ \overset{\circ}{U}_{S_B} - \overset{\circ}{U}_B \\ \overset{\circ}{U}_{S_C} - \overset{\circ}{U}_C \end{bmatrix} = \overset{\circ}{Y}_l \cdot \begin{bmatrix} \overset{\circ}{U}_{S_A} - \overset{\circ}{U}_A \\ \overset{\circ}{U}_{S_B} - \overset{\circ}{U}_B \\ \overset{\circ}{U}_{S_C} - \overset{\circ}{U}_C \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де $\overset{\circ}{Z}_l$ – комплексний опір лінії живлення, Ом; $\overset{\circ}{Y}_l$ – провідність лінії живлення, См; $\overset{\circ}{U}_{S_A}, \overset{\circ}{U}_{S_B}, \overset{\circ}{U}_{S_C}$ – фазні напруги з боку джерела живлення, В; $\overset{\circ}{U}_A, \overset{\circ}{U}_B, \overset{\circ}{U}_C$ – фазні напруги з боку навантаження, В.

З іншого боку, струми СУ можна визначити за допомогою таких співвідношень:

$$\overset{\circ}{I}_{q_A} = -\overset{\circ}{U}_A \overset{\circ}{Y}_{q_A}; \quad (3)$$

$$\overset{\circ}{I}_{q_B} = -\overset{\circ}{U}_B \overset{\circ}{Y}_{q_B}; \quad (4)$$

$$\overset{\circ}{I}_{q_C} = -\overset{\circ}{U}_C \overset{\circ}{Y}_{q_C}, \quad (5)$$

де $\overset{\circ}{Y}_{q_A}, \overset{\circ}{Y}_{q_B}, \overset{\circ}{Y}_{q_C}$ – фазні провідності СУ, См.

Струми у навантаженні знайдуться за аналогічними співвідношеннями:

$$\overset{\circ}{I}_A = \overset{\circ}{U}_A \overset{\circ}{Y}_A; \quad (6)$$

$$\overset{\circ}{I}_B = \overset{\circ}{U}_B \overset{\circ}{Y}_B; \quad (7)$$

$$\overset{\circ}{I}_C = \overset{\circ}{U}_C \overset{\circ}{Y}_C, \quad (8)$$

$\overset{\circ}{Y}_A, \overset{\circ}{Y}_B, \overset{\circ}{Y}_C$ – фазні провідності навантаження, См.

Враховавши (2) і (3)–(8), тотожність (1) можна перетворити у наступну:

$$\overset{\circ}{Y}_{q_f} = \frac{\overset{\circ}{U}_{S_f} - \overset{\circ}{U}_f}{\overset{\circ}{U}_f} \cdot \overset{\circ}{Y}_l - \overset{\circ}{Y}_f, \quad (9)$$

де $\overset{\circ}{U}_f$ – фазна напруга, очікувана після симетрування, В; $\overset{\circ}{Y}_f$ – фазна провідність навантаження, См;

$\overset{\circ}{Y}_{q_f}$ – фазна провідність СУ, См; $\overset{\circ}{U}_{S_f}$ – фазна напруга з боку джерела живлення, В.

Фазна потужність СУ знаходиться таким чином:

$$\overset{\circ}{S}_{q_f} = \overset{\circ}{U}_f \overset{*}{U}_{S_f} \overset{*}{Y}_l - \overset{\circ}{U}_f^2 \left(\overset{*}{Y}_f + \overset{*}{Y}_l \right). \quad (10)$$

Мета роботи – розрахувати оптимальний аргумент фазної напруги, очікуваної після симетрування.

Викладення основного матеріалу. Нехай напруги потрібно симетрувати до величин

$$\overset{\circ}{U}_A = U_\phi \cdot e^{j \cdot \arg(\overset{\circ}{U}_A)}, \quad \overset{\circ}{U}_B = U_\phi \cdot e^{j \cdot \left(\arg(\overset{\circ}{U}_A) - \frac{2\pi}{3} \right)}, \quad \overset{\circ}{U}_C = U_\phi \cdot e^{j \cdot \left(\arg(\overset{\circ}{U}_A) + \frac{2\pi}{3} \right)}.$$

При неправильному виборі величини $\arg(\overset{\circ}{U}_A)$ можна отримати від'ємні дійсні частини повних потужностей СУ, тобто від'ємні активні потужності, що свідчить про те, що СУ має здійснювати ін'єкцію активної потужності в електромережу. При використанні, наприклад, конденсаторних установок [8], такий результат є неприпустимим, тому критерії вибору величини $\arg(\overset{\circ}{U}_A)$ можна сформулювати таким чином:

$$\begin{cases} \operatorname{Re}\left(\dot{S}_{q-A}\right) \geq 0 \\ \operatorname{Re}\left(\dot{S}_{q-B}\right) \geq 0, \\ \operatorname{Re}\left(\dot{S}_{q-C}\right) \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

де \dot{S}_{q-A} , \dot{S}_{q-B} , \dot{S}_{q-C} – повні фазні потужності СУ, ВА.

З огляду на те, що величина $\arg(\dot{U}_A)$ не повинна дуже відрізнятись від величини $\arg(\dot{U}_{S-A})$, а також, беручи до уваги факт, що при розв'язанні подібних задач приймають $\arg(\dot{U}_{S-A}) = 0$, потрібно врахувати такий критерій:

$$\left| \arg(\dot{U}_A) \right| \rightarrow \min. \quad (12)$$

Оскільки $P = \operatorname{Re}(\dot{S}) = U^2 \operatorname{Re}(\dot{Y})$, тобто активна потужність прямо пропорційна дійсній частині провідності, для спрощення аналізу умови (11) і (12) можна подати у такому вигляді:

$$\begin{cases} \operatorname{Re}\left(\dot{Y}_{q-A}\right) \geq 0 \\ \operatorname{Re}\left(\dot{Y}_{q-B}\right) \geq 0 \\ \operatorname{Re}\left(\dot{Y}_{q-C}\right) \geq 0 \\ \left| \arg(\dot{U}_A) \right| \rightarrow \min \end{cases} \quad (13)$$

З (9), виділивши дійсну частину фазної провідності СУ, можна отримати залежність $\operatorname{Re}(\dot{Y}_{q-\phi}) \left(\arg(\dot{U}_\phi) \right)$:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\left(\dot{Y}_{q-\phi}\right) \left(\arg(\dot{U}_\phi) \right) &= \frac{Y_l \cdot U_{S-\phi}}{U_\phi} \cdot \cos\left(\arg(\dot{Y}_l) + \arg(\dot{U}_{S-\phi}) - \arg(\dot{U}_\phi)\right) - \\ &- \operatorname{Re}\left(\dot{Y}_l\right) - \operatorname{Re}\left(\dot{Y}_\phi\right). \end{aligned} \quad (14)$$

Записавши (14) для фаз А, В і С, при цьому поклавши $\arg(\dot{U}_B) = \arg(\dot{U}_A) - 2\pi/3$ і $\arg(\dot{U}_C) = \arg(\dot{U}_A) + 2\pi/3$, а також розв'язавши систему нерівностей (13), отримаємо такі результати (рис. 2):

$$\arg(\dot{U}_A) = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} |\max(\alpha_{1A}, \alpha_{1B}, \alpha_{1C})| \geq |\min(\alpha_{2A}, \alpha_{2B}, \alpha_{2C})| \\ \min(\alpha_{2A}, \alpha_{2B}, \alpha_{2C}) \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} |\max(\alpha_{1A}, \alpha_{1B}, \alpha_{1C})| < |\min(\alpha_{2A}, \alpha_{2B}, \alpha_{2C})| \\ \max(\alpha_{1A}, \alpha_{1B}, \alpha_{1C}) \end{array} \right. \end{cases}, \quad (15)$$

де

$$\alpha_{1,2A} = \arg(\dot{Y}_l) + \arg(\dot{U}_{S-A}) \mp \arccos\left(\frac{U_A \cdot \left(\operatorname{Re}(\dot{Y}_A) + \operatorname{Re}(\dot{Y}_l)\right)}{U_{S-A} \cdot Y_l}\right);$$

$$\alpha_{1,2B} = \arg(\dot{Y}_n) + \arg(\dot{U}_{S-B}) \mp \arccos \left(\frac{U_B \cdot (\operatorname{Re}(\dot{Y}_B) + \operatorname{Re}(\dot{Y}_n))}{U_{S-B} \cdot Y_n} \right) + \frac{2\pi}{3};$$

$$\alpha_{1,2C} = \arg(\dot{Y}_n) + \arg(\dot{U}_{S-C}) \mp \arccos \left(\frac{U_C \cdot (\operatorname{Re}(\dot{Y}_C) + \operatorname{Re}(\dot{Y}_n))}{U_{S-C} \cdot Y_n} \right) - \frac{2\pi}{3}.$$

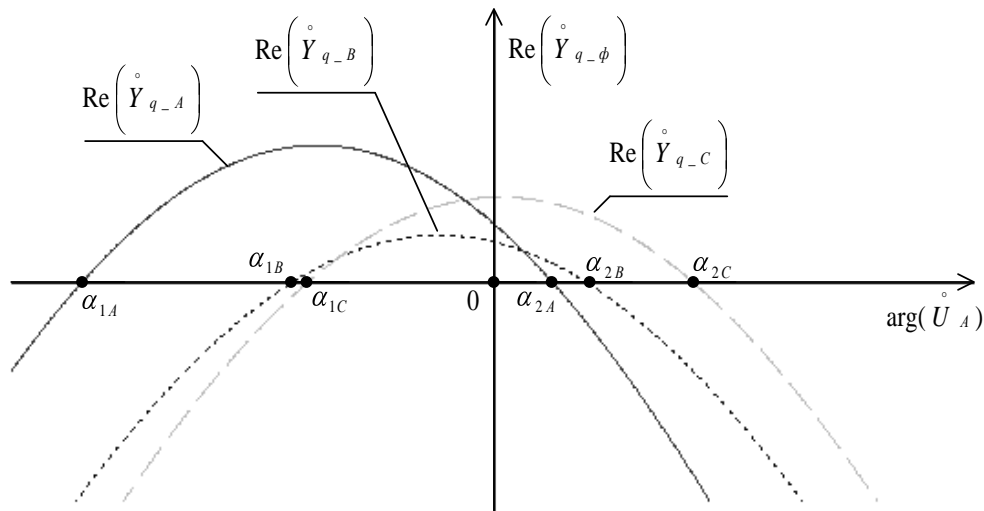


Рис. 2. Графіки функцій $\operatorname{Re}(\dot{Y}_{q-\phi})\left(\arg(\dot{U}_A)\right)$ для фаз A, B, C в околі $\arg(\dot{U}_A) = 0$

Розв'язки системи (13) знаходяться серед нульових точок функцій $\operatorname{Re}(\dot{Y}_{q-\phi})\left(\arg(\dot{U}_A)\right)$, оскільки лише при таких значеннях $\arg(\dot{U}_A)$ активна потужність споживана СУ буде найменшою.

Якщо, наприклад, вимоги до економічності споживання активної потужності СУ будуть жорсткими, тоді $\arg(\dot{U}_A)$ знайдеться таким чином:

$$\arg(\dot{U}_A) = \begin{cases} \begin{cases} P_q \left(\min(\alpha_{2A}, \alpha_{2B}, \alpha_{2C}) \right) \geq P_q \left(\max(\alpha_{1A}, \alpha_{1B}, \alpha_{1C}) \right) \\ \max(\alpha_{1A}, \alpha_{1B}, \alpha_{1C}) \end{cases} \\ \begin{cases} P_q \left(\min(\alpha_{2A}, \alpha_{2B}, \alpha_{2C}) \right) < P_q \left(\max(\alpha_{1A}, \alpha_{1B}, \alpha_{1C}) \right) \\ \min(\alpha_{2A}, \alpha_{2B}, \alpha_{2C}) \end{cases} \end{cases}, \quad (16)$$

де P_q – сумарна трифазна активна потужність, споживана СУ, Вт.

Висновки. Для якісного симетрування напруг необхідно правильно обрати аргументи очікуваних фазних напруг. Вибір можна здійснити за умовами (15) і (16).

Список використаної літератури:

1. *Рогальський Б.С.* Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. Ч. II / *Б.С. Рогальський*. – Вінниця : ВДТУ, 2006. – 104 с.
2. *Терешкевич Л.Б.* Математичні методи керування несиметрією напруг в системах електропостачання / *Л.Б. Терешкевич, М.І. Цибульський* // Технічна електродинаміка. – 2006. – № 2. – С. 64–67.
3. *Бурбело М.Й.* Умови керування двофазними симетрувальними установками / *М.Й. Бурбело, М.В. Кузьменко* // Гірнича електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 82. – С. 3–7.

4. Fryze S. Active and Apparent power in non-sinusoidal systems / *S.Fryze* // *Przeglad Elektrot.* – No 7. – 1931. – Pp. 193–203 (In Polish).
5. Fang Z. Peng. Compensation of non-active current in power systems / *Fang Z. Peng, Leon M. Tolbert* // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 2002. – Vol. 45, No 1. – Pp. 293–297.
6. Аполлонский С.М. Электротехника и электроника. Трёхфазные электрические цепи / *С.М. Аполлонский, В.В. Леонтьев.* – СПб, 2002.
7. Power electronic control in electrical systems / *E.Acha and others* // Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP – A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd. – 2002.
8. Ильяшов В.П. Конденсаторные установки / *В.П. Ильяшов.* – 2-ое изд., перераб. и доп. – М. : “Энергоатомиздат”, 1983 . – 152 с.
9. Жемеров Г.Г. Теория мощности Фризе и современные теории мощности / *Г.Г. Жемеров, О.В. Ильина* // *Електротехніка і електромеханіка* / “Теоретична електротехніка”. – 2007. – № 6. – С. 63–65.
10. Гнілицький В.В. Розрахунок симетрування напруг у трифазних мережах на основі теорії Фризе / *В.В. Гнілицький, О.А. Поліщук* // *Вісник ЖДТУ.* – 2012. – № 2 (61). – С. 71–74.

ГНІЛИЦЬКИЙ Віталій Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та управління в технічних системах Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- цифрова обробка сигналів;
- інформаційні системи;
- мікропроцесорні пристрої в енергозбереженні.

Тел.: (0412)37–84–82.

E-mail: gnil@ztu.edu.ua

ПОЛІЩУК Олександр Анатолійович – аспірант Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- мікропроцесорні пристрої в енергозбереженні.

Стаття надійшла до редакції 23.08.2012

Гніліцький В.В., Поліщук О.А. Розрахунок параметрів оптимального симетрування напруг компенсаційними установками у трифазних мережах

Гніліцький В.В., Поліщук О.А. Расчет параметров оптимального симметрирования напряжений компенсационными установками в трехфазных сетях.

Гніліцький В.В., Поліщук О.А. The calculation parameter optimum of voltage balancing compensation installation in three-phase networks.

УДК 621.316

Расчет параметров оптимального симметрирования напряжений компенсационными установками в трехфазных сетях / В.В. Гніліцький, О.А. Поліщук

Предложена методика расчета оптимальных значений аргументов ожидаемых фазных напряжений для получения более качественного симметрирования напряжений в трехфазных сетях.

УДК 621.316

The calculation parameter optimum of voltage balancing compensation installation in three-phase networks / В.В. Гніліцький, О.А. Поліщук

The methods of the calculation optimum values of arguments of the expected phase voltages for reception more qualitative voltage balancing in three-phase networks is offered.