

# РОЗРОБКА МОДЕЛІ СИМЕТРУВАННЯ НАПРУГ У ТРИФАЗНИХ МЕРЕЖАХ

**В. В. Гнілицький**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: gnil@ztu.edu.ua

**О. А. Поліщук**

Асистент\*

E-mail: alex\_zdtu@ukr.net

\*Кафедра комп'ютеризованих систем управління і автоматики Житомирський державний технологічний університет вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

*Розглянуто існуючі моделі симетрування напруг в електричних мережах. Запропонована модель симетрування напруг на основі теорії Фризе, придатна при використанні компенсаційних симетрувальних установок. Проведена оцінка застосування отриманої моделі в порівнянні з існуючими. Визначено, що при застосуванні конденсаторних установок запропонована модель дає змогу отримати кращі показники симетрії напруги, ніж існуючі моделі симетрування напруг*

*Ключові слова: компенсація реактивної потужності, симетрування напруг, симетрування навантажень, теорія Фризе, несиметрія*

*Рассмотрены существующие модели симметрирования напряжений в электрических сетях. Предложена модель симметрирования напряжений на основе теории Фризе, пригодная при использовании компенсационных симметрирующих установок. Проведена оценка использования полученной модели в сравнении с существующими. Определено, что при использовании конденсаторных установок предложенная модель дает возможность получить лучшие показатели симметрии напряжения, чем существующие модели симметрирования напряжений*

*Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, симметрирование напряжений, симметрирование нагрузок, теория Фризе, несимметрия*

## 1. Вступ

Електроенергія, як особливий вид продукції, має характеристики, котрі дозволяють визначити рівень її придатності в різноманітних виробничих процесах. Сукупність таких характеристик, при котрих приймачі електроенергії здатні виконувати покладені на них функції, об'єднані під спільним поняттям якості електроенергії.

Несиметрія напруг – важлива характеристика якості електроенергії. Від підтримання показників несиметрії напруг в допустимих межах залежить надійність та ефективність роботи як виробничих, так і побутових споживачів. Внаслідок розвитку промисловості збільшилась кількість електричних споживачів, які негативно впливають на симетрію напруг. Особливо це характерно для мереж, що забезпечують живлення різконесиметричних навантажень, які є причиною виникнення несиметрії напруг.

Серед заходів і засобів зниження несиметрії напруг важливе місце займає використання симетрувальних установок (СУ): симетрувальних конденсаторних установок, симетрувальних трансформаторів, статичних тиристорних компенсаторів, важливим компонентом яких є система керування. В сучасних системах керування СУ широко використовуються мікропроцесорні пристрої, алгоритми роботи котрих базуються на математичних моделях симетрування напруг.

Таким чином, удосконалення моделей симетрування напруг є досить актуальним для електроенергетики.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Питання покращення якості електроенергії пов'язані з розвитком теорій реактивної потужності, з котрих слід виділити такі напрямки:

- 1) теорія потужності на основі миттєвих складових струму і напруги;
- 2) теорія миттєвої реактивної потужності;
- 3) теорія потужності на основі гармонічних складових струму і напруги.

В подальшому розвитку цих теорій і їх взаємодоповнень привели до виникнення різноманітних концепцій опису енергетичних процесів. Так в [1–3] теорія потужності на основі миттєвих складових струму і напруги використовується разом із частотним аналізом. У [4, 5] розвинута кількома авторами теорія миттєвої реактивної потужності. У [6, 8] викладено оригінальний підхід для визначення потужностей в електричних мережах із несиметричними та несинусоїдними напругами і струмами, котрий має характерні риси як частотного аналізу так і теорії потужності на основі миттєвих складових електричних величин.

Розглянемо існуючі підходи до симетрування напруг і навантажень.

Підхід, описаний в [9], призначений для симетрування напруг конденсаторними установками (КУ). Проте для отримання розв'язку необхідні ітерації алгоритму. В математичній моделі використовуються такі величини, як "природний" вектор напруги, характерний для даної мережі, зміна напруги в мережі, внаслідок ввімкнення і-ої секції КУ і т. п.

У повній мірі досліджене питання симетрування напруг поперечно-поздовжними СУ в [10].

Також існують підходи до симетрування напруг і навантажень, котрі базуються на теорії Фризе [11]. В [1, 7] ідею Фризе розширено для використання у трифазних мережах. Активний і неактивний струми для трьох фаз (рис. 1) пов'язані таким чином [1]:

$$\bar{i}_q(t) = \bar{i}(t) - \bar{i}_p(t), \quad (1)$$

$$\text{де } \bar{i}_p(t) = [i_{p1}(t), i_{p2}(t), i_{p3}(t)]^T, \bar{i}_q(t) = [i_{q1}(t), i_{q2}(t), i_{q3}(t)]^T,$$

$$\bar{i}(t) = [i_1(t), i_2(t), i_3(t)]^T;$$

$i_{pi}(t)$ ,  $i_{qi}(t)$ ,  $i_i(t)$  – активний, реактивний, повний струми відповідно  $i$ -ої фази,  $i=1,2,3$ .

Активні струми знаходяться за наступним співвідношенням:

$$\bar{i}_p(t) = \frac{P}{u_1^2(t) + u_2^2(t) + u_3^2(t)} \bar{u}_p(t), \quad (2)$$

де  $\bar{u}_p(t) = [u_1(t), u_2(t), u_3(t)]^T$ ;  $u_i(t)$  – напруги  $i$ -ої фази,  $i=1, 2, 3$ ;  $P$  – сумарна трифазна активна потужність навантаження.

Використавши співвідношення (2) для розрахунку активного струму і співвідношення (1) для розрахунку неактивних струмів, отримаємо струми компенсаційної СУ, ін'єкцію котрих необхідно здійснити в мережу для отримання повного симетрування навантажень.

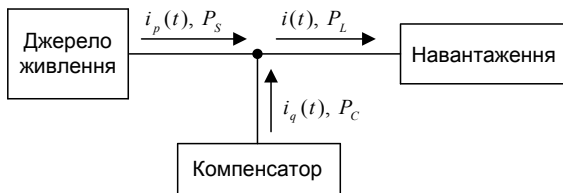


Рис. 1. Схема симетрування навантаження компенсаційною СУ:  $P_S$  – активна потужність, генерована джерелом, Вт;  $P_L$  – активна потужність, спожита навантаженням, Вт;  $P_C$  – активна потужність, спожита компенсаційною СУ (компенсатором), Вт

Даний підхід передбачає можливість як пофазного споживання, так і генерування СУ активної і реактивної потужності (РП) в мережу. При використанні СУ, котрі не дають змогу генерувати активну потужність (наприклад, конденсаторних установок), такий підхід для симетрування напруг є неприпустимим.

Підхід, розглянутий в [10], не придатний для використання лише компенсаційних СУ. Підхід, розглянутий в [1], котрий створений для компенсаційних СУ, не підходить для використання конденсаторних установок. А підхід, розглянутий у [9], придатний лише для конденсаторних установок. Одже, моделі симетрування напруг компенсаційними СУ досліджені не в повній мірі. Тому виникає необхідність розробки такої моделі симетрування напруг, котру можна було би використовувати з будь-яким типом компенсаційних СУ.

### 3. Ціль та задачі дослідження

Мета дослідження полягає у підвищенні показників якості електроенергії шляхом поліпшенням алгоритмів керування установками симетрування напруг вузлів електричних мереж.

Для досягнення зазначеної мети було поставлено наступні задачі:

- провести порівняльний аналіз існуючих моделей симетрування напруг, з'ясувати їх недоліки і переваги;

- розв'язати задачу симетрування напруг вузлів електричних мереж у фазних координатах за допомогою теорії Фризе. Розв'язок повинен задовольняти використанню компенсаційних СУ, котрі не дають змогу генерувати активну потужність;

- оцінити ефективність розробленої моделі при симетруванні напруг шляхом експериментальних досліджень.

### 4. Матеріали і методи дослідження процесу симетрування напруг

Для вирішення поставлених у роботі задач використано наступні методи досліджень:

- теоретична електротехніка – для отримання математичних моделей керування симетрувальними установками;

- теорія лінійної алгебри – для отримання аналітичних виразів законів симетрування;

- можливості комп'ютерного моделювання – при моделюванні процесів симетрування струмів і напруг.

### 5. Результати розробки моделі симетрування напруг

Запропонована наступна модель керування несиметрією напруг в системах електропостачання, котра базується на засадах теорії Фризе [12].

Нехай фазні напруги потрібно симетрувати до величин

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

Оптимальний аргумент очікуваної фазної напруги  $\arg(\dot{U}_A)$  знаходиться таким чином:

$$\arg(\dot{U}_A) = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} \max(\alpha_{1A}, \alpha_{1B}, \alpha_{1C}) \geq \min(\alpha_{2A}, \alpha_{2B}, \alpha_{2C}) \\ \min(\alpha_{2A}, \alpha_{2B}, \alpha_{2C}) \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} \max(\alpha_{1A}, \alpha_{1B}, \alpha_{1C}) < \min(\alpha_{2A}, \alpha_{2B}, \alpha_{2C}) \\ \max(\alpha_{1A}, \alpha_{1B}, \alpha_{1C}) \end{array} \right. \end{cases}, \quad (3)$$

де

$$\alpha_{1,2A} = \arg(\dot{Y}_L) + \arccos \left( \frac{U_A \cdot \left( \operatorname{Re}(\dot{Y}_A) + \operatorname{Re}(\dot{Y}_L) \right)}{U_{S\_A} \cdot Y_L} \right);$$

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

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

$\dot{U}_\phi$  – фазна напруга, очікувана після симетрування;  $Y_\phi$  – фазна провідність навантаження;  $Y_{q\_ф}$  – фазна провідність СУ;  $U_{S\_ф}$  – фазна напруга зі сторони джерела живлення;  $Y_л$  – провідність лінії живлення (рис. 2).

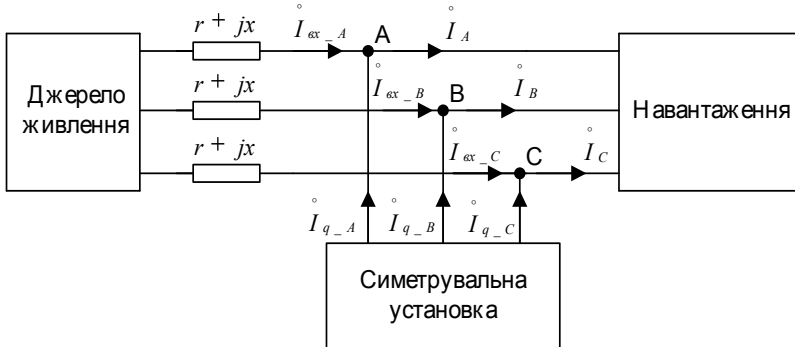


Рис. 2. Схема симетрування напруг

На наступному кроці знаходяться фазні потужності СУ:

$$\dot{S}_{q\_ф} = \dot{U}_\phi \dot{U}_{S\_ф}^* \dot{Y}_л - U_\phi^2 (\dot{Y}_\phi + \dot{Y}_л). \quad (4)$$

При потребі можна знайти фазні провідності СУ за наступним співвідношенням:

$$\dot{Y}_{q\_ф} = \frac{\dot{U}_{S\_ф} - \dot{U}_\phi}{\dot{U}_\phi} \cdot \dot{Y} - \dot{Y}_\phi, \quad (5)$$

після чого їх неважко перетворити у міжфазні провідності, а також знайти міжфазні потужності СУ.

Наведемо результати симетрування напруг існуючими методами, а також методами, отриманими в даній роботі, для схеми двотрансформаторної підстанції (рис. 3), під'єднаної до лінії 10 кВ [9].

Згідно з [9], для заступної схеми на рис. 3, маємо наступні початкові дані:

1) вектор-стовпець еквівалентних напруг  $\bar{U}_S$  зі сторони джерела живлення:

$$\bar{U}_S = \begin{bmatrix} \dot{U}_{S\_A} \\ \dot{U}_{S\_B} \\ \dot{U}_{S\_C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 219,327 \\ 223,743 \cdot e^{-j121,365^\circ} \\ 216,983 \cdot e^{j118,301^\circ} \end{bmatrix} \text{ В};$$

2) еквівалентний опір живильних мереж  $Z_L = 0,002 \cdot e^{j24,600^\circ}$  Ом;

3) еквівалентний опір трансформаторів T1 і T2  $Z_T = 0,021 \cdot e^{j70,500^\circ}$  Ом;

4) еквівалентні опориспоживачів  $Z_1 = 0,22 \cdot e^{j51,700^\circ}$  Ом,  $Z_2 = 0,37 \cdot e^{j33,740^\circ}$  Ом.

Результати симетрувальних ефектів, отриманих у [9], наведемо у табл. 1.

Розрахувавши для даної схеми симетрувальні ефекти за допомогою співвідношень (3)–(5), отримаємо наступні результати (табл. 2):

Отже, в результаті моделювання процесу симетрування напруг, було отримано менші показники несиметрії напруги (табл. 2), ніж ті, котрі для даної мережі (рис. 3) отримані існуючими методами (табл. 1).

Таблиця 1

Симетрувальні ефекти, котрі, згідно [9], будуть мати місце у вузлах А і В електромережі (рис. 3) від увімкнення СУ

Параметри режиму	Вихідний режим	Симетрування напруг у вузлі А	Симетрування напруг в обох вузлах	
			вузол А	вузол В
$Q_{ab}$ , квар	0	0	40,0	30,0
$Q_{bc}$ , квар	0	19,4	0	0
$Q_{ca}$ , квар	0	19,1	0	0
$U_{2(A)}$ , В	3,60	3,01	2,29	-
$U_{2(B)}$ , В	3,72	-	-	2,43

Таблиця 2

Отримані симетрувальні ефекти, котрі будуть мати місце у вузлах А і В електромережі (рис. 3) від увімкнення СУ

Параметри режиму	Вихідний режим	Симетрування напруг у вузлі А	Симетрування напруг в обох вузлах	
			вузол А	вузол В
$Q_{ab}$ , квар	0	0	0	0
$Q_{bc}$ , квар	0	20	20	20
$Q_{ca}$ , квар	0	70	70	70
$U_{2(A)}$ , В	3,60	2,07	2,05	-
$U_{2(B)}$ , В	3,72	-	-	2,06

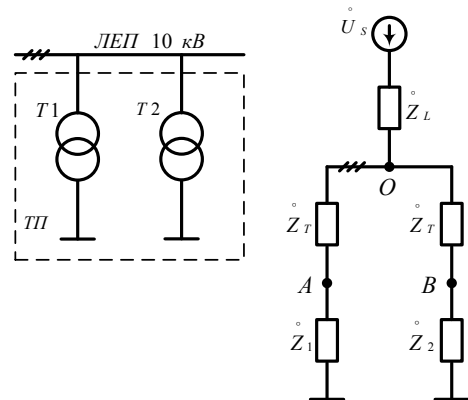


Рис. 3. Спрощена однолінійна схема під'єднання двотрансформаторної ТП до лінії 10 кВ (ліворуч) і заступна схема, перерахована на 0,4 кВ (праворуч)

## 6. Обговорення результатів симетрування напруг

Порівнюючи дані з табл. 1, 2 приходимо до висновків, що застосування математичних моделей симетрування напруг, отриманих у даній роботі, дає кращі результати. При симетруванні напруг в одному вузлі електричної мережі, напруга зворотної послідовності на 30 % менша, ніж напруга, отримана при використанні інших методів [9]. При симетруванні напруг у двох вузлах електричної мережі були отримані напруги зворотної послідовності, котрі приблизно на 10 % і на 15 % менші, ніж напруги, отримані у [9]. Така різниця пояснюється тим, що модель отримана в даній роботі, виводилась для одного вузла електромережі, тому і дає для цього випадку кращі результати.

## 7. Висновки

Розглянуто існуючі моделі симетрування напруг в електричних мережах. З'ясовано, що при використанні

компенсаційних симетрувальних установок такі моделі досліджені не у повній мірі.

Отримано математичну модель симетрування напруг вузлів електричних мереж, за допомогою використання котрої можна отримати кращу якість напруги, у порівнянні із застосуванням існуючих моделей. У цій моделі використано частотний аналіз кіл змінного струму разом із концепцією С. Фризе. При моделюванні процесу симетрування напруг для одного вузла електромережі було отримано параметри несиметрії напруги на 30 % менші, ніж параметри напруги, отримані існуючими методами. При моделюванні процесу симетрування напруг для двох вузлів мережі отримано параметри несиметрії напруги на 10–15 % менші, ніж параметри напруги, отримані існуючими методами.

Таким чином, при використанні отриманої моделі симетрування напруг в алгоритмах керування симетрувальними установками, можна поліпшити якість електроенергії.

## Література

1. Peng, F. Z. Compensation of non-active current in power systems [Text] / F. Z. Peng, L. M. Tolbert // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2002. – Vol. 45, Issue 1. – P. 293–297.
2. Czarnecki, L. S. Power related phenomena in three-phase unbalanced systems [Text] / L. S. Czarnecki // IEEE Transaction on Power Delivery. – 1995. – Vol. 10, Issue 3. – P. 1168–1176. doi: 10.1109/61.400893
3. Czarnecki, L. S. Comments on active power flow and energy accounts in electrical systems with nonsinusoidal waveforms and asymmetry [Text] / L. S. Czarnecki // IEEE Transaction on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, Issue 3. – P. 1244–1250. doi: 10.1109/61.517478.
4. Akagi, H. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components [Text] / H. Akagi, Y. Kanazava, A. Nabae // IEEE Transaction Industry Applications. – 1984. – Vol. 20, Issue 3. – P. 625–630. doi: 10.1109/tia.1984.4504460.
5. Nabae, A. A new definition of instantaneous active – reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three – phase circuits [Text] / A. Nabae, T. A. Tanaka // IEEE Transaction on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, Issue 3. – P. 1238–1244. doi: 10.1109/61.517477.
6. Ferrero, A. A new approach to the definition of power components in three-phase systems under nonsinusoidal conditions [Text] / A. Ferrero, G. Superti-Furga // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1991. – Vol. 40, Issue 3. – P. 568–577. doi: 10.1109/19.87021.
7. Peng, F. Z. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase systems [Text] / F. Z. Peng, J-S. Lai // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1994. – Vol. 45, Issue 1. – P. 293–297. doi: 10.1109/19.481350
8. Cristaldi, L. Current decomposition in asymmetrical, unbalanced three-phase systems under nonsinusoidal conditions [Text] / L. Cristaldi, A. Ferrero, G. Superti-Furga // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1994. – Vol. 43, Issue 1. – P. 63–68. doi: 10.1109/19.286356.
9. Бурбело, М. Й. Принцип симетрування електричного режиму для вузлів електричної мережі, розділених невеликим опором [Текст] / М. Й. Бурбело та ін. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 3. – С. 84–88.
10. Бабенко, О. В. Квазірівноважені вимірювальні канали для установок симетрування навантажень вузлів електричних мереж: дис. ...кандидата техн. наук: 05.14.02: захищ. 25.01.2008 / О. В. Бабенко. – Вінниця, 2007. – 183 с.
11. Fryze, S. Active and Apparent power in non-sinusoidal systems [Text] / S. Fryze // Przegląd Elektrot. – 1931. – Vol. 7. – P. 193–203. [In Polish]
12. Гніліцький, В. В. Розрахунок параметрів оптимального симетрування напруг компенсаційними установками у трифазних мережах [Текст] / В. В. Гніліцький, О. А. Поліщук // Вісник ЖДТУ. – 2012. – № 3 (62). – С. 32–36.