

## СИМЕТРУВАННЯ НАПРУГ І СТРУМІВ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА ДОПОМОГОЮ ОБ'ЄДНАНОГО РЕГУЛЯТОРА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Вінницький національний технічний університет

### Анотація

В статті отримано умови симетрування напруг і струмів за допомогою об'єднаного регулятора якості електроенергії з використанням комплексних потужностей зворотної послідовності та досліджено помилки симетрування за різних статичних характеристик навантажень за напругою у разі керування за збуренням.

**Ключові слова:** симетрування навантажень, умови керування за збуренням, статичні характеристики вузлів навантажень за напругою.

### Вступ

Одним з найбільш ефективних пристроїв гнучких систем електропередавання є об'єднаний регулятор потоку потужності, що є поєднанням статичного синхронного компенсатора СТАТКОМ і статичного поздовжнього компенсатора, які зв'язані через спільну ланку постійного струму [1]. В останні роки об'єднані регулятори потоку потужності були адаптовані для застосування в розподільних мережах [2, 3]. Об'єднаний регулятор якості електроенергії може компенсувати різні показники погіршення якості електроенергії, такі як: провал, перенапругу, несиметрію, флікер, несинусоїдність. Об'єднаний регулятор якості електроенергії складається з паралельного і послідовного компенсаторів. Послідовний компенсатор повинен компенсувати напругу джерела спотворення, паралельний компенсатор послаблює небажані складові струму навантаження (реактивну складову струму, струми зворотної та нульової послідовностей, гармонічні складники струмів). Крім того, паралельний компенсатор повинен регулювати напругу на шині постійного струму з метою забезпечення компенсуючої здатності об'єднаного регулятора якості електроенергії [1 – 4].

Мета роботи полягає в отриманні та дослідженні умов симетрування навантажень за допомогою об'єднаного регулятора якості електроенергії та дослідженні помилок симетрування за різних статичних характеристик вузлів навантажень.

### Результати дослідження

Умови симетрування струмів за зворотною послідовністю отримують з умов повної або часткової компенсації реактивної складової струму прямої послідовності  $\dot{I}_1$  та обох складових струму зворотної послідовності  $\dot{I}_2$  навантаження (за рівності нулю струму нульової послідовності). Для дійсної та уявної складових фазних струмів компенсатора дістанемо:

$$\begin{aligned}
 I'_a &= -\operatorname{Re} \dot{I}_2; \quad I''_a = -k \operatorname{Im} \dot{I}_1 - \operatorname{Im} \dot{I}_2; \\
 I'_b &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 - \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2; \quad I''_b = -k \operatorname{Im} \dot{I}_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 + \frac{1}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2; \\
 I'_c &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2; \quad I''_c = -k \operatorname{Im} \dot{I}_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 + \frac{1}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2.
 \end{aligned} \tag{1}$$

де  $k$  – ступінь компенсації реактивної потужності.

Умови симетрування напруг за зворотною послідовністю можна отримати з умов компенсації обох складових напруги зворотної послідовності  $\dot{U}_2$  (за рівності нулю напруги нульової

послідовності). Для дійсної та уявної складових фазних напруг компенсатора дістанемо:

$$\begin{aligned} U'_a &= -\operatorname{Re}\dot{U}_2; \quad U''_a = -\operatorname{Im}\dot{U}_2; \\ U'_b &= \frac{1}{2}\operatorname{Re}\dot{U}_2 - \frac{\sqrt{3}}{2}\operatorname{Im}\dot{U}_2; \quad U''_b = \frac{\sqrt{3}}{2}\operatorname{Re}\dot{U}_2 + \frac{1}{2}\operatorname{Im}\dot{U}_2; \\ U'_c &= \frac{1}{2}\operatorname{Re}\dot{U}_2 + \frac{\sqrt{3}}{2}\operatorname{Im}\dot{U}_2; \quad U''_c = -\frac{\sqrt{3}}{2}\operatorname{Re}\dot{U}_2 + \frac{1}{2}\operatorname{Im}\dot{U}_2. \end{aligned} \quad (2)$$

В якості інформативних параметрів можуть бути використані дійсна та уявна частини комплексних умовних потужностей зворотної послідовності [7 – 9]:

$$\underline{S}_{21} = \frac{1}{2}(\underline{S}_{2p} + \underline{S}_{2q}) = 3\dot{U}_1^* I_2 = \frac{1}{2} \left[ \left( \dot{U}_\alpha^* I_\alpha - \dot{U}_\beta^* I_\beta \right) + j \left( \dot{U}_\alpha^* I_\beta + \dot{U}_\beta^* I_\alpha \right) \right]. \quad (3)$$

$$\underline{S}_{12} = \frac{1}{2}(\underline{S}_{2p} - \underline{S}_{2q}) = 3\dot{U}_2^* I_1 = \frac{1}{2} \left[ \left( \dot{U}_\alpha^* I_\alpha - \dot{U}_\beta^* I_\beta \right) - j \left( \dot{U}_\alpha^* I_\beta + \dot{U}_\beta^* I_\alpha \right) \right], \quad (4)$$

$$\text{де } \underline{S}_{2p} = 3 \left( \dot{U}_1^* I_2 + \dot{U}_2^* I_1 \right) = \left( \dot{U}_\alpha^* I_\alpha - \dot{U}_\beta^* I_\beta \right); \quad \underline{S}_{2q} = 3 \left( \dot{U}_1^* I_2 - \dot{U}_2^* I_1 \right) = j \left( \dot{U}_\alpha^* I_\beta + \dot{U}_\beta^* I_\alpha \right) -$$

комплексні потужності зворотної послідовності;  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, I_1, I_2$  – комплексні напруги та комплексні спряжені струми відповідно прямої та зворотної послідовностей;  $\dot{U}_\alpha, \dot{U}_\beta, I_\alpha, I_\beta$  – комплексні напруги та комплексні спряжені струми в системі  $\alpha\beta$ -координат.

За використання комплексних умовних потужностей зворотної послідовності  $\underline{S}_{21} = P_{21} + jQ_{21} = 3\dot{U}_1^* I_2$  та  $\underline{S}_{12} = P_{12} + jQ_{12} = 3\dot{U}_2^* I_1$  як інформативних параметрів систем керування вирази складників відповідних миттєвих потужностей можна записати у вигляді:

$$p_{21} = \frac{1}{2}(p_{2p} + p_{2q}) = \frac{1}{2}(u_\alpha - u'_\beta)(i_\alpha + i'_\beta); \quad q_{21} = \frac{1}{2}(q_{2p} + q_{2q}) = \frac{1}{2}(u'_\alpha + u_\beta)(i_\alpha + i'_\beta), \quad (5)$$

$$p_{12} = \frac{1}{2}(p_{2p} - p_{2q}) = \frac{1}{2}(u_\alpha + u'_\beta)(i_\alpha - i'_\beta); \quad q_{12} = \frac{1}{2}(q_{2p} - q_{2q}) = \frac{1}{2}(u'_\alpha - u_\beta)(i_\alpha - i'_\beta), \quad (6)$$

де  $u_\alpha, u_\beta, i_\alpha, i_\beta$  – миттєві напруги та струми в системі  $\alpha\beta$ -координат; штрихом позначено фазовий зсув миттєвих величин на  $-90$  ел. градусів.

У виразах (5), (6) використано миттєві умовні потужності зворотної послідовності [10–12]

$$p_{2p}(t) = u_\alpha i_\alpha - u'_\beta i'_\beta; \quad q_{2p}(t) = u'_\alpha i_\alpha + u_\beta i'_\beta; \quad (7)$$

$$p_{2q}(t) = u_\alpha i'_\beta - u'_\beta i_\alpha; \quad q_{2q}(t) = u'_\alpha i'_\beta + u_\beta i_\alpha. \quad (8)$$

### Висновки

Отримано умови керування об'єднаним регулятором якості електроенергії з використанням комплексних струму та провідностей зворотної послідовності навантаження. Для керування об'єднаним регулятором якості електроенергії можна використати різні умови керування за збуренням. Вибір тієї чи іншої умови залежить від статичних характеристик вузлів навантажень. За будь-якої вибраної умови керування за збуренням повинно доповнюватися керуванням за відхиленням.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hingorani, N. G. Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems / Hingorani N. G., Gyugyi L. – IEEE Press book, 2000. – 432 p.
2. Fujita, H. The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series- and Shunt- Active Filters / Hideaki Fujita, Hirofumi Akagi // IEEE Transactions on Power Electronics, March 1998, Vol. 13, No. 2.

3. Aredes, M. An universal active power line conditioner / M. Aredes, K. Neumann, E. H. Watanabe // IEEE Trans. on Power Delivery, Apr 1998, Vol. 13, No. 2. – P. 545–551.
4. Unified Power Quality Conditioner for Compensating Voltage Interruption / B.-M. Han, B.-H. Cho, S.-K. Sul and J.-E. Kim // Journal of Electrical Engineering & Technology, 2006, Vol. 1, No. 4. – P. 503–512.
5. Маркушевич Н. С. Качество напряжения в городских электрических сетях [Текст] / Н. С. Маркушевич, Л. А. Солдаткина – М.: Энергия, 1975. – 128 с.
6. Бурбело М. Й. Квазірівноважені частотно-варіаційні вимірювальні системи [Текст] / М. Й. Бурбело. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 225 с.
7. Бурбело М. Й. Роздільне вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, Ю. В. Ільчук // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Науково-виробничий журнал Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2011. – № 1. – С. 44–46.
8. Бурбело М. Й. Вимірювальні канали для установок динамічної компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко, М. В. Никитенко // Вісник НУ “Львівська політехніка” Електроенергетичні та електромеханічні системи, 2010, № 666. – С. 14–18.
9. Бурбело М. Й. Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, М. В. Никитенко // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 54–56.
10. Бурбело М. Й. Визначення потужностей трифазної несиметричної системи з ізольованою нейтраллю / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук. // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 6. – С. 66–70.
11. Бурбело М. Й. Визначення потужностей за несиметричних режимів трифазних мереж із заземленою нейтраллю / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 71–75.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

**Бурбело Михайло Йосипович** – д.т.н., професор кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: burbelomj@gmail.com;

**Лебедь Денис Юрійович** — аспірант кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту: 4e15b.lebyd@gmail.com;

**Лобода Юрій Васильович** — канд. техн. наук, старший викладач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: lobodaeseem@gmail.com;

**Бабенко Олексій Вікторович** — к.т.н., доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: oleksij\_babenko@ukr.net;

**Войтюк Юрій Петрович** — к.т.н., доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: voytyuk@vntu.edu.ua.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**M. J. Burbelo**  
**D.Y. Lebed**  
**Yu. V. Loboda**  
**O. V. Babenko**  
**Yu. P. Voytyuk**

## **CALMIZATION OF VOLTAGES AND CURRENTS OF DISTRIBUTION ELECTRICAL NETWORKS USING THE COMBINED ELECTRICITY QUALITY REGULATOR**

Vinnitsia National Technical University

### **Abstract**

The paper obtains the conditions for balancing voltages and currents using a combined power quality regulator using complex reverse sequence capacities and investigates balancing errors for different static characteristics of voltage loads in the case of perturbation control.

**Keywords:** load balancing, perturbation control conditions, static characteristics of voltage load nodes.

Burbelo Mykhailo Yo. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: burbelomj@gmail.com;

Lebed Denys Yu. — Post-Graduate Student of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: 4e15b.lebyd@gmail.com;

Loboda Yurii V. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: lobodaeseem@gmail.com;

Babenko Oleksiy V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: oleksij\_babenko@ukr.net;

Voytyuk Yuriy P. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: voytyuk@vntu.edu.ua.

**М. И. Бурбело  
Д. Ю. Лебедь  
Ю. В. Лобода  
А. В. Бабенко  
Ю. П. Войтюк**

## **СИММЕТРИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ОБЪЕДИНЕННОГО РЕГУЛЯТОРА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Винницкий национальный технический университет

### ***Аннотация***

*В статье получены условия симметрирования напряжений и токов с помощью объединенного регулятора качества электроэнергии с использованием комплексных мощностей обратной последовательности и исследованы ошибки симметрирования при различных статических характеристиках нагрузок по напряжению при управлении по возмущению.*

**Ключевые слова:** симметрирования нагрузок, условия управления по возмущению, статические характеристики узлов нагрузок по напряжению.

Бурбело Михаил Иосифович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: burbelomj@gmail.com;

Лебедь Денис Юрьевич — аспирант кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: 4e15b.lebyd@gmail.com;

Лобода Юрий Васильевич — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: lobodaeseem@gmail.com;

Бабенко Алексей Викторович — канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: oleksij\_babenko@ukr.net;

Войтюк Юрий Петрович — канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: voytyuk@vntu.edu.ua.