

## АНОТАЦІЯ

*Лобода Ю. В.* Система керування статичними компенсаторами реактивної потужності в несиметричних несинусоїдних режимах розподільних мереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 „Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2020.

У дисертаційній роботі поставлена й вирішена актуальна задача зменшення помилок симетрування струмів зворотної та нульової послідовностей і компенсації вищих гармонік в несиметричних несинусоїдних режимах розподільних електричних мереж.

**Наукова новизна отриманих результатів** і положень, що виносяться на захист, полягає у вдосконаленні системи керування статичними компенсаторами реактивної потужності в розподільних електричних мережах шляхом формування миттєвих синусоїдних струмів зворотної та нульової послідовностей.

В роботі отримано такі наукові результати:

1. Вперше обґрунтовано метод прямого керування струмом статичного синхронного компенсатора з формуванням несинусоїдних сигналів, що дорівнюють різниці струмів навантаження фаз та їх основних гармонік, і синусоїдних несиметричних сигналів, відповідно, для компенсації вищих гармонік і симетрування струмів навантаження, що дозволяє забезпечити розділення контурів керування фільтруванням вищих гармонік та симетруванням нелінійних несиметричних навантажень.

2. Удосконалено метод керування статичними тиристорними компенсаторами з використанням умовних потужностей зворотної послідовності і відповідних струмів в системі dq-координат, що забезпечує підвищення їх точності та швидкодії за наявності несиметричних споживачів.

3. Дістав подальшого розвитку метод керування статичними синхронними компенсаторами з використанням миттєвих симетричних

струмів зворотної та нульової послідовностей, що забезпечує зменшення динамічних помилок симетрування струмів навантаження.

**Практичне значення отриманих результатів** роботи полягає: у розробці систем прямого керування струмом СТАТКОМ для покращення якості симетрування навантажень та компенсації вищих гармонік. Їх впровадження сприятиме покращенню якості електроенергії, зокрема зменшенню несинусоїдності та несиметрії напруги в розподільних мережах.

На основі аналізу літературних джерел проаналізовано сучасні засоби та пристрої динамічної компенсації реактивної потужності та підвищення якості електричної енергії в розподільних мережах. Представлені принципи роботи СТК та СТАТКОМ та їх порівняльна характеристика. Недоліком методів керування статичними компенсаторами, які основані на миттєвих струмах зворотної послідовності, є те, що вони не забезпечують високої швидкодії та характеризуються значним перерегулюванням при накидах навантажень. Недоліком методів керування статичними компенсаторами, які основані на теорії миттєвої потужності, є те, що вміст вищих гармонік після компенсації є суттєвим.

Проаналізовано можливості вимірювання реактивної потужності в несиметричних і несинусоїдних режимах електричних мереж із заземленою нейтраллю з використанням класичної та миттєвої теорії потужностей. Показано, що за незначної несиметрії можна використовувати будь-яку з потужностей. Найбільш просто реалізувати вимірювання з використанням миттєвої теорії потужностей. Зі збільшенням несиметричності режиму мережі доцільно застосовувати реактивну потужність, що основана на класичній теорії потужностей.

Введено поняття ефективних активної, реактивної та повної потужностей на періоді напруги живлення, а також середньоквадратичних відхилень активної, реактивної та повної потужностей на періоді напруги живлення. Показано, що для визначення потужності пульсацій можна

використовувати середньоквадратичні відхилення активної, реактивної та повної потужностей.

Проаналізовано умови симетрування навантажень, що представлені через ортогональні складники умовної потужності зворотної послідовності, і показано, що їх застосування в якості інформативних параметрів для керування компенсаційними симетрувальними пристроями забезпечує можливість істотного зменшення помилок симетрування.

Розроблено структурну схему пристрою динамічної компенсації реактивної потужності з симетруванням навантажень, що містить один контур регулювання. Показано, що керування установками динамічної компенсації реактивної потужності можна здійснювати шляхом об'єднання контурів компенсації реактивної потужності та симетрування навантаження. Час запізнення пристрою динамічної компенсації реактивної потужності не перевищує  $0,05 \dots 0,08$  с.

Проаналізовано помилки симетрування швидкозмінних навантажень з використанням умовних потужностей зворотної послідовності. Показано, що застосування миттєвих умовних потужностей зворотної послідовності навантаження забезпечує допустиме значення помилок симетрування, що зумовлені несинусоїдністю.

Аналіз помилок симетрування швидкозмінних навантажень за умов несинусоїдності з використанням методу прямого формування реактивних потужностей фаз симетрувального пристрою на основі вимірних поточних значень дійсної та уявної складових комплексної умовної потужності зворотної послідовності, який є одним з найкращих методів симетрування швидкозмінних навантажень, показав, що методичні помилки симетрування порівняно незначні, однак інструментальні помилки симетрування можуть бути досить істотними.

Удосконалено систему  $dq$ -керування струмом СТАТКОМ з формуванням  $i_{d2}$  та  $i_{q2}$ , що забезпечує істотне зменшення перерегулювання у разі симетрування синусоїдних струмів навантаження.

Обґрунтовано метод прямого керування струмом СТАТКОМ, згідно з яким за фазними несинусоїдними струмами навантаження визначаються їх діючі значення і формуються синусоїдні одиничні сигнали з початковими фазами, які дорівнюють початковим фазам несинусоїдних струмів. Добуток цих величин забезпечує формування синусоїдних струмів, що дорівнюють основній гармоніці несинусоїдних струмів фаз навантаження. Різниця струмів навантаження і сформованих синусоїдних струмів компенсується СТАТКОМ і забезпечує фільтрування вищих гармонік. Для отримання миттєвих струмів зворотної послідовності в системах прямого керування струмом СТАТКОМ використані лінійні перетворення миттєвих струмів фаз навантаження. Моделювання компенсатора підтвердило достатньо високу точність симетрування та фільтрування вищих гармонік.

При дослідженні процесу керування СТАТКОМ показано, що помилки симетрування та фільтрування вищих гармонік залежать від швидкості зміни навантаження. З аналізу залежностей випливає, що струм нульової послідовності компенсується точно, а струм зворотної послідовності основної гармоніки, а також струми прямої та зворотної послідовностей вищих гармонік компенсуються з помилками, які залежать від швидкості зміни навантаження. Причиною помилок є інерційність формування потужностей. Помилки можна характеризувати залишковим струмом зворотної послідовності. У разі фіксування активної та реактивної потужностей СТАТКОМ помилки відсутні, однак при цьому СТАТКОМ повинен споживати активну та реактивну потужності за малих навантажень і генерувати – за великих навантажень.

Проаналізовано точність симетрування навантажень та якість компенсації вищих гармонік СТАТКОМ, реалізованого на основі  $pq$ -теорії миттєвої потужності. Значення коефіцієнта нелінійних спотворень струмів фаз мережі  $THDI$  та рівень пульсацій струмів мережі порівняно великі. У разі застосування СТАТКОМ з керуванням в системі  $dq$ -координат точність симетрування навантажень та якість компенсації вищих гармонік достатні.

Приведений порівняльний аналіз систем керування СТАТКОМ показав, що найкращими з точки зору фільтрування вищих гармонік та симетрування струмів система керування СТАТКОМ з прямим керуванням струмом в системі  $dq$ -координат. Пульсації струмів мережі і, відповідно, пульсуючих потужностей мережі в перехідних режимах на 30% менші, ніж у разі використання СТАТКОМ з керуванням в системі  $dq$ -координат.

В роботі проведено моделювання роботи пристрою на основі методу прямого керування струмом СТАТКОМ за умов істотного рівня несиметрії. Даний метод дає можливість розділити сигнали компенсації вищих гармонік і симетрування навантажень, що дозволяє обмежувати певні функції в залежності від потужності пристрою. Діючі значення задавальних струмів СТАТКОМ порівнюється з номінальним струмом інвертора напруги СТАТКОМ і у разі перевищення номінального струму розраховуються коефіцієнти передавання для обмеження функції симетрування (компенсації реактивної потужності). Такий підхід дозволяє більш ефективно використовувати потужність пристрою в пікових режимах.

Одержані наукові результати а саме: метод прямого керування струмом статичного синхронного компенсатора впроваджено в ТОВ “Українські технологічні продукти”, що підтверджено актом про впровадження від 06.02.2020 р. Результати роботи також використовуються у ВНТУ на кафедрі “Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент” для підготовки фахівців за спеціальністю 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”, довідка про впровадження від 07.02.2020 р.

**Ключові слова:** якість електроенергії, нелінійні і несиметричні споживачі, компенсація реактивної потужності, симетрування навантажень, компенсація вищих гармонік, розподільчі електричні мережі, умовні потужності зворотної та нульової послідовностей, миттєві струми зворотної та нульової послідовностей.

## ABSTRACT

*Loboda Yu. V.* Control system of static reactive power compensators in asymmetric non-sinusoidal modes of distribution networks. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis is submitted for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 141 „Electric power, electrical engineering and electromechanics”. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2020.

The thesis sets and solves the urgent task of errors reduction in balancing the currents of return and zero sequences together with the compensation of higher harmonics in asymmetric non - sinusoidal modes of distributive electric networks.

**The scientific novelty** of the obtained results and the provisions submitted for the protection implies for the improvement of the control system of static compensators of reactive power in electrical distribution networks by forming instantaneous sinusoidal currents of reverse and zero sequences.

The following scientific results were obtained in the work:

1. For the first time there had been substantiated the method of direct current control of static synchronous compensator with the formation of non-sinusoidal signals equal which equal the difference in currents of the of the phases loading and their main harmonics and sinusoidal asymmetric signals, respectively, for the compensation of higher harmonics and balancing of load currents, that allows to ensure the segmentation of controlling filtering contours of the higher harmonics and balancing the nonlinear asymmetric loads.

2. There had been improved the method for controlling the static thyristor compensators with the use of conditional powers of the reverse sequence and the corresponding currents in the  $dq$ -coordinate system, which provides for an increase in their accuracy and response in the presence of asymmetric consumers.

3. The method of controlling static synchronous compensators with the use of instantaneous symmetric currents of the reverse and zero sequences has been further

developed, which provides for the reduction of dynamic errors in the balancing of load currents.

**The practical significance** of the obtained results is: the development of direct current control systems STATCOM to improve the quality of load balancing and compensation of higher harmonics. Their implementation will help improve the quality of electricity, in particular by reducing non-sinusoid and voltage asymmetry in distribution networks.

On the base of the analysis of reference sources there had been analyzed the modern means and devices of dynamic compensation of reactive power and improvement of electric energy quality in distribution networks. The principles of work of SVC and STATCOM and their comparative characteristic had been presented. The disadvantage of static compensators control methods, which are based on instantaneous reverse sequence currents, is that they do not provide for high speed and are characterized by significant over-regulation during load sketches. The disadvantage of static compensator control methods, which are based on the theory of instantaneous power, is that the content of higher harmonics after compensation is significant.

There had been analyzed the possibilities of reactive power measurement in asymmetric and non - sinusoidal modes of electric networks with grounded neutral using classical and instantaneous power theory. It had been shown that any of the capacities can be used for slight asymmetry. It is easy to make measurements using instantaneous power theory. With increasing asymmetry of the network mode, it is advisable to use reactive power based on the classical theory of power.

The concept of effective active, reactive and full power during the supply voltage period, as well as standard deviations of active, reactive and full power during the supply voltage period had been introduced. It is shown that the standard deviations of active, reactive and full powers can be used to determine the power of pulsations.

The conditions of load balancing, presented through orthogonal components of the conditional power of the reverse sequence, are analyzed, and it is shown that

their use as informative parameters for control of compensating balancing devices provides for the possibility of significant reduction of balancing errors.

The block diagram of the device of dynamic compensation of reactive power with load balancing containing one control circuit is developed. It has been shown that dynamic reactive power compensation units can be controlled by combining reactive power compensation circuits and load balancing. The delay time of the dynamic reactive power compensation device does not exceed 0.05... 0.08 s.

Errors of balancing of fast-changing loads with the use of conditional powers of the reverse sequence are analyzed. It is shown that the application of instantaneous conditional powers of the reverse sequence of loading provides for the allowable value of balancing errors caused by non-sinusoid.

Analysis of balancing errors of fast-changing loads under non-sinusoidal conditions using the method of direct formation of reactive powers of phases of the balancing device based on measured current values of real and imaginary components of complex conditional power of reverse sequence, which is one of the best methods of balancing fast-changing loads minor, but instrumental balancing errors can be quite significant.

The  $dq$ -current control system STATCOM with the formation of  $i_{d2}$  and  $i_{q2}$  has been improved, which provides for the significant reduction in over-regulation in the case of balancing sinusoidal load currents.

The method of direct control of STATCOM current is substantiated, according to which their active values are determined by phase non-sinusoidal load currents and sinusoidal unit signals with initial phases equal to the initial phases of non-sinusoidal currents are formed. The product of these values provides for the formation of sinusoidal currents equal to the fundamental harmonic of non-sinusoidal currents of the load phases.

The difference between the load currents and the generated sinusoidal currents is compensated by STATCOM and provides for the filtering of higher harmonics. Linear transformations of instantaneous currents of load phases are used to obtain instantaneous reverse sequence currents in STATCOM direct current control



systems. Compensation modeling confirmed a fairly high accuracy of balancing and filtering of higher harmonics.

In the study of the STATCOM control process, it is shown that the errors of balancing and filtering of higher harmonics depend on the rate of change of load. From the analysis of dependences it follows that the zero sequence current is compensated exactly, and the reverse sequence current of the fundamental harmonic, as well as the forward and reverse sequence currents of higher harmonics are compensated with errors that depend on the rate of change of load. The cause of errors is the inertia of power generation. Errors can be characterized by a residual current of the reverse sequence.

In the case of fixing active and reactive power by STATCOM, there are no errors, however, STATCOM must consume active and reactive power at low loads and generate – at high loads.

The accuracy of load balancing and the quality of compensation of higher harmonics by STATCOM, realized on the basis of  $pq$ -theory of instantaneous power, are analyzed. The values of the nonlinear distortion coefficient of THDI phase currents and the level of network current ripple are relatively large. In the case of STATCOM with control in the  $dq$ -coordinate system, the accuracy of load balancing and the quality of compensation of higher harmonics are sufficient.

The presented comparative analysis of STATCOM control systems showed that the best in terms of filtering higher harmonics and current balancing is the STATCOM control system with direct current control in the  $dq$ -coordinate system. The ripple of the network currents and, accordingly, the pulsating power of the network in transient modes is 30% less than in the case of using STATCOM with control in the  $dq$ -coordinate system.

The paper simulates the operation of the device based on the method of direct current control STATCOM under conditions of a significant level of asymmetry. This method makes it possible to separate the signals of compensation of higher harmonics and load balancing, which allows you to limit certain functions depending on the power of the device. The current values of the set currents

STATCOM is compared with the rated current of the voltage inverter STATCOM and in case of exceeding the rated current, the transfer coefficients are calculated to limit the balancing function (reactive power compensation). This approach allows you to more efficiently use the power of the device in peak modes.

The obtained scientific results: the method of the direct current control of the static synchronous compensator was introduced in LLC "Ukrainian technological products", which is confirmed by the act of implementation of 06.02.2020. The results are also used in the VNTU by the Department of "Electrotechnical systems of electric power consumption and energy management" for training specialists in the specialty 141 - "Electric power, electrical engineering and electromechanics", certificate of implementation of 07.02.2020.

**Keywords:** power quality, nonlinear and asymmetric consumers, reactive power compensation, load balancing, higher harmonics compensation, electrical distribution networks, conditional reverse and zero sequence capacities, reverse and zero sequence instantaneous currents.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що внесені до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук:

[1] М. Й. Бурбело, Л. М. Мельничук, та Ю. В. Лобода, «Вибір інформативних параметрів для керування симетрувальними пристроями», *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*, № 165, с. 54 – 56, 2015.

[2] М. М. Бурбело, О. М. Кравець, М. В. Никитенко, та Ю. В. Лобода, «Керування пристроями динамічної компенсації реактивної потужності за несиметричних швидкозмінних навантажень», *Науково-виробничий журнал Кременчуцького державного політехнічного університету. Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, № 2, с. 37–43, 2013.

[3] М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, Ю. В. Войтюк, та Ю. В. Лобода, «Керування установками динамічної компенсації реактивної потужності за несиметричних навантажень», *Наукові праці ВНТУ*. № 4. с. 1-7, 2016. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/486/485>

[4] М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, С. М. Мельничук, та Ю. В. Лобода, «Визначення потужностей навантажень трифазних електричних мереж в несинусоїдних та несиметричних режимах», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 51–56, 2017.

[5] М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, та Ю. В. Лобода, «Аналіз помилок симетрування швидкозмінних навантажень за умов несинусоїдності», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 47 –50. 2016.

[6] М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, та Ю. В. Лобода, «Умови симетрування електричних навантажень розподільних мереж за допомогою

СТАТКОМ», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 139–144. 2016.

[7] М. Й. Бурбело, Ю. В. Лобода, та О. В. Степура, «Аналіз динамічних помилок розподільних СТАТКОМ, що зумовлені неточністю формування задавальних струмів», *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 3(271), с. 220-225, 2019.

Матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що входять науково-метричну базу даних SCOPUS

[8] M. J. Burbelo, V. Zavadskiy, A. Koczorowska-Gazda, L. M. Melnychuk, and Yu. V. Loboda, «Measurement of reactive power under asymmetrical nonsinusoid modes of electric networks with earthed neutral», *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 100311X, 2016.. Available: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2564860>. doi:10.1117/12.2248788.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[1] М. Й. Бурбело, та Ю. В. Лобода, «Керування установками динамічної компенсації реактивної потужності за різкозмінних навантажень», *III міжнародна науково-технічна конференція. Оптимальне керування електроустановками*, Вінниця, 2015.

[2] Ю. П. Добровольський, та Ю. В. Лобода, «Дослідження сучасних засобів компенсації реактивної потужності», *XLVIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 2019.

[3] Ю. В. Лобода, «Аналіз використання сучасних засобів підвищення якості електроенергії в розподільчих мережах», *XLVII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 2018.

[4] Ю. В. Лобода, «Застосування статичних синхронних компенсаторів для компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень», *XLVI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 2017.

[5] М. Й. Бурбело, та Ю. В. Лобода, «Система прямого керування струмом статичного синхронного компенсатора», *SCIENCE, RESEARCH, DEVELOPMENT #26, TECHNICS AND TECHNOLOGY*, Познань/Poznan, 27.02.2020- 28.02.2020 р.

[6] О. Р. Лещенко, Ю. В. Лобода, М. Й. Бурбело, «Застосування статком для підвищення якості електроенергії», *Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 27-28 квітня 2020 р.

[7] В. С. Бажура, Ю. В. Лобода, та М. Й. Бурбело, «Застосування активних фільтрів на тяговому міському електротранспорті», *Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 27-28 квітня 2020 р.