

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. Й. Бурбело, Ю. В. Лобода

**КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ
В НЕСИМЕТРИЧНИХ І НЕСИНУСОЇДНИХ
РЕЖИМАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2025

УДК 621.316.7
Б91

Рекомендовано до друку Вченою Радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 10 від 27.03.2025 р.)

Рецензенти:

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

С. М. Балюта, доктор технічних наук, професор

Бурбело, М. Й.

Б91 Компенсація реактивної потужності в несиметричних і несинусоїдних режимах електричних мереж: монографія / М. Й. Бурбело, Ю. В. Лобода. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – 110 с.

ISBN 978-966-641- 977-7

В монографії висвітлені теоретичні засади і практичні аспекти компенсації реактивної потужності за несинусоїдності та несиметрії струмів і напруг. Монографія розрахована на широке коло інженерно-технічних працівників, які займаються компенсацією реактивної потужності. Книга може бути корисною студентам та аспірантам електроенергетичних спеціальностей вищих навчальних закладів.

УДК 621.316.7

ISBN 978-966-641- 977-7 (друк)

ISBN 978-617-8163-62-4 (PDF)

© М. Бурбело, Ю. Лобода, 2025

© ВНТУ, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТЕЙ В НЕСИМЕТРИЧНИХ НЕСИНУСОЇДНИХ РЕЖИМАХ ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ...	5
1.1 Визначення реактивних потужностей в несиметричних несинусоїдних режимах трифазних електричних мереж	5
1.2 Визначення потужностей пульсацій в несиметричних несинусоїдних режимах трифазних електричних мереж	9
1.3 Визначення умовних потужностей зворотної послідовності в несиметричних несинусоїдних режимах трифазних електричних мереж	13
1.4 Висновки до розділу 1	15
РОЗДІЛ 2 СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СТАТИЧНИМИ ТИРИСТОРНИМИ КОМПЕНСАТОРАМИ	16
2.1 Статичні тиристорні компенсатори	16
2.2 Система автоматичного керування СТК фірми АВВ.....	17
2.3 Вибір інформативних параметрів для керування компенсаційними симетрувальними пристроями	20
2.4 Вимірювальні перетворювачі для систем керування СТК	25
2.5 Аналіз помилок симетрування швидкозмінних навантажень за умов несинусоїдності.....	31
2.6 Пристрій для симетрування навантажень на основі СТК	33
2.7 Висновки до розділу 2	41
РОЗДІЛ 3 СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СТАТИЧНИМИ СИНХРОННИМИ КОМПЕНСАТОРАМИ.....	42
3.1 Статичні синхронні компенсатори.....	42
3.2 Огляд систем керування СТАТКОМ	46
3.3 Розробка методу прямого керування струмом СТАТКОМ.....	62
3.4 Висновки до розділу 3	71
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СИЛОВИМИ АКТИВНИМИ ФІЛЬТРАМИ	72
4.1 Моделювання САФ в системі pq -координат.....	72
4.2 Моделювання САФ в системі dq -координат.....	82
4.3 Моделювання САФ на основі прямого керування струмом	89
4.4 Моделювання САФ з прямим керуванням струмом за істотного рівня несиметрії	98
4.5 Висновки до розділу 4	100
ПІДСУМКИ	101
ЛІТЕРАТУРА.....	103

ВСТУП

Статичні тиристорні та синхронні компенсатори і силові активні фільтри є одними з найбільш ефективних засобів компенсації реактивної потужності, зменшення коливань та несиметрії напруги. Запропоновано систему керування статичним тиристорним компенсатором реактивної потужності в несиметричних режимах електричних мереж, яка характеризується відсутністю перерегулювання завдяки вибору інформативних потужностей зворотної послідовності. Розроблено також систему прямого керування статичним синхронним компенсатором реактивної потужності та силовим активним фільтром в несинусоїдних несиметричних режимах електричних мереж, в основу якої покладені миттєві струми прямої, зворотної та нульової послідовності.

В першому розділі монографії наводяться визначення потужностей для трифазних мереж змінного струму в несиметричних несинусоїдних режимах. Показано, що в несиметричних несинусоїдних режимах електричних мереж потужність пульсацій містить дві складові, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю напруг і струмів. Складові, що зумовлені несинусоїдністю, визначено як різницю миттєвих потужності пульсацій та умовної потужності зворотної послідовності.

У другому розділі розроблено систему керування СТК, яка в процесі компенсації реактивної потужності у вузлі приєднання несиметричного різкозмінного навантаження здатна одночасно забезпечити і зменшення несиметрії напруг, а час затримки СТК не перевищує 25 мс і 60 мс, відповідно, під час компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень.

В третьому розділі 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 компенсацію миттєвих струмів зворотної послідовності.

На основі моделювання несиметричних несинусоїдних режимів, виконаному в четвертому розділі, встановлено, що точність симетрування навантажень силовими активними фільтрами (САФ) з системою керування, що реалізована на основі методу прямого керування, значно вища. Зважаючи на розширення функціональних можливостей роздільного керування під час компенсації окремих складових, така система керування рекомендується для практичного застосування.

ПІДСУМКИ

У роботі вирішено науково-прикладне завдання підвищення точності керування статичними компенсаторами реактивної потужності за наявності спотворень якості електроенергії в розподільних електричних мережах.

Основні теоретичні та експериментальні дослідження, які виконані в роботі, можуть бути узагальнені такими висновками:

1. 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.

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

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

4. 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.

5. 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.

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

7. 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.

8. Для отримання миттєвих струмів зворотної послідовності в системах прямого керування струмом СТАТКОМ використані лінійні перетворення миттєвих струмів фаз навантаження. Моделювання компенсатора показав достатньо високу точність симетрування та фільтрування вищих гармонік.

9. Динамічні помилки симетрування навантажень та фільтрування вищих гармонік за допомогою САФ залежать від швидкості зміни навантаження. За великих швидкостей збільшення та зменшення навантажень помилки істотні. У разі фіксування активної та реактивної потужностей САФ помилки відсутні, однак при цьому САФ повинен споживати активну та реактивну потужності за малих навантажень і генерувати – за великих навантажень.

10. На основі моделювання несиметричних несинусоїдних режимів встановлено, що точність симетрування навантажень та якість компенсації вищих гармонік САФ, реалізованого на основі pq -теорії миттєвої потужності, недостатні. Значення коефіцієнта нелінійних спотворень струмів фаз мережі THD_I та рівень пульсацій струмів мережі порівняно великі. У разі застосування САФ з керуванням в системі dq -координат точність симетрування навантажень та якість компенсації вищих гармонік достатні. Порівняльний аналіз систем керування САФ показав, що найкращими з точки зору фільтрування вищих гармонік та симетрування струмів є система керування САФ з прямим керуванням струмом в системі dq -координат.

ЛІТЕРАТУРА

1. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M., Instantaneous power theory and applications to power conditioning. IEEE Press / Willy-Interscience, 2007. 379 p.
2. Peng F. Z. and Lai J.-S., Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems. *IEEE Trans. Inst. Meas.* – 1996. Vol. 45, no. 1, Feb. P. 293-297.
3. Бурбело М. Й., Мельничук С. М., Визначення потужностей трифазної несиметричної системи з ізольованою нейтраллю. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 6. С. 66-70.
4. Бурбело М. Й., Мельничук С. М., Визначення потужностей за несиметричних режимів трифазних мереж із заземленою нейтраллю. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 4. С. 71-75.
5. Measurement of reactive power under asymmetrical nonsinusoid modes of electric networks with earthed neutral / M. J. Burbelo ; P. Pijarski ; V. Zavadskiy ; A. Koczorowska-Gazda ; L. M. Melnychuk ; Yu. V. Loboda. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. 2016, 100311X (September 28, 2016); doi: 10.1117/12.2248788. Режим доступу:
<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2564860>
6. Бурбело М. Й., Романовський В. І., Вимірювальний канал для установок динамічної компенсації реактивної потужності, *Електронний журнал Наукові праці ВНТУ*, 2014, № 3, с. 6.
7. Бурбело М. Й., Гадай А. В., Визначення потужностей нелінійних навантажень трифазних електричних мереж. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2016. № 24/25. С. 61-67.
8. Визначення потужностей навантажень трифазних електричних мереж в несинусоїдних та несиметричних режимах / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, С. М. Мельничук, Ю. В. Лобода. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. № 1. С. 51-56.
9. Бурбело М. Й., Квазірівноважені частотно-варіаційні вимірювальні системи. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. 225 с.
10. Mathur R. M. and Varma R. K. Thyristor-based facts controllers for electrical transmission systems. IEEE Press, Piscataway, 2002. 518 p.
11. Варецький Ю. О., Режими електричних мереж і систем електропостачання зі статичними тиристорними компенсаторами (методологія аналізу) // Автореф. дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.02. Львів. 1999. 35 с.

12. Шидловский А. К., Кузнецов В. Г., Повышение качества энергии в электрических сетях. Київ: Наукова думка, 1985. 268 с.

13. Кузнецов В. Г., Григорьев А. С., Данилюк В. Б., Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях [Текст]. Київ: Наукова думка, 1992. 240 с.

14. Авторское свидетельство 1330700 СССР. МКИ H02J 3/26. Симметрирующее устройство для произвольной трехфазной несимметричной нагрузки. А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, Г. А. Москаленко, А. Т. Лысенко, МКИ H02J 3/26. №3982935; Заявл. 02.12.85; Оpubл. 15.08.87. Бюл. № 30. 6 с.

15. Бурбело М. Й., Бабенко О. В., Квazізрівноважені вимірювальні канали для симетрувальних установок. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. 96 с.

16. Бурбело М., Бабенко О., Вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування швидкозмінних навантажень трифазних споживачів, *Промислова електроенергетика та електротехніка*, № 5, 2003, с. 25-27.

17. Квazікомпенсаційні вимірювальні пристрої для регуляторів реактивної потужності / М. Й. Бурбело, Б. С. Рогальський, В. М. Непийвода, С. І. Вознюк, *Енергетика и электрификация*, № 6, 2001, с. 29-33.

18. Бурбело М. Й., Квazікомпенсаційні вимірювальні перетворювачі для пристроїв симетрування трифазних навантажень, *Енергетика и электрификация*, № 12, 2001, с. 26-28.

19. Бурбело М. Й., Бірюков О. О., Бабенко О. В., Вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування трифазних навантажень, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, 2002, с. 92-95.

20. 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*, № 5, 2008, с. 35-38.

21. Бурбело М. Й., Кузьменко М. В., Аналіз умов симетрування навантажень з використанням компенсаційних симетрувальних установок, *Енергетика та електрифікація*, № 5, 2009, с. 3-6.

22. Бурбело М. Й., Мельничук Л. М., Лобода Ю. В., Вибір інформативних параметрів для керування симетрувальними пристроями. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Технічні науки, Випуск 165 "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". 2015, с. 54-56.*

23. Бурбело М. Й., Кузьменко М. В., Никитенко М. В., Спосіб вимірювання параметрів несиметрії навантажень вузлів електричних мереж, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2009, № 3. С. 30-33.

24. Зорін В. В., Бурбело М. Й., Волоцький А. М., Оцінка взаємовпливу статичних характеристик вузла навантажень і оптимальних розв'язків математичних моделей зменшення несиметрії та відхилень напруг, *Технічна електродинаміка*, № 1, 2009, с. 35-37.

25. Девятко М. В., Керування компенсаційно-симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень в розподільних мережах, автореф. дис. канд. техн. наук 05.14.02, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2011.

26. Войтюк Ю. П., Підвищення ефективності компенсації реактивної потужності в розподільних мережах з різкозмінними несиметричними навантаженнями, автореф. дис. канд. техн. наук 05.14.02, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2017.

27. Вимірювальні канали для установок динамічної компенсації реактивної потужності / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, М. В. Никитенко, А. В. Гадай. *Енергетика та електрифікація*. 2008. № 11. С. 42-45.

28. Бурбело М. Й., Гадай А. В., Динамічна компенсація реактивної потужності в перехідних режимах електроприводів: Монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. 104 с.

29. Бурбело М. Й., Мельничук С. М., Никитенко М. В., Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень, *Технічна електродинаміка*, 2011, № 2, с. 54-56.

30. Бурбело М. Й., Бабенко О. В., Никитенко М. В., Вимірювальні канали для установок динамічної компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень. *Вісник НУ "Львівська політехніка" Електроенергетичні та електромеханічні системи*, 2010, № 666. С. 14-18.

31. Пат. 94181. Україна. МПК Н 02 J 3/00. Пристрій для компенсації реактивної потужності трифазного навантаження / М. Й. Бурбело, М. В. Никитенко (Україна). Заявлено 19.02.10. № а201001785; Опубл. 11.04.2011. Бюл. № 7.

32. Керування пристроями динамічної компенсації реактивної потужності за несиметричних швидкозмінних навантажень / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, М. В. Никитенко, Ю. В. Лобода. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Науково-виробничий журнал Кременчуцького державного політехнічного університету*. 2013. Вип. 2. С. 37-43.

33. Керування установками динамічної компенсації реактивної потужності за несиметричних навантажень / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, Ю. П. Войтюк, Ю. В. Лобода. *Наукові праці ВНТУ*. 2016. № 4. 7 с.

<https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/486/485>

34. Бурбело М. Й., Мельничук С. М., Ільчук Ю. В., Роздільне вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Науково-виробничий журнал Кременчуцького державного політехнічного університету*, № 1, 2011, с. 44-46.

35. Бурбело М. Й., Войтюк Ю. П., Лобода Ю. В., Аналіз помилок симетрування швидкозмінних навантажень за умов несинусоїдності. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4. 2016, с. 47-50.

36. Hingorani N. G., Gyugyi L. Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. *IEEE Press book*, 2000. 432 p.

37. Load Balancing and Harmonic Elimination Using Distribution Static Synchronous Compensator (DSTATCOM) / A. Gheewala, J. Chanawala, N. Jadav, M. Rishit, C. Machhi, J. Rana, *International Journal of Engineering and Techniques*, Volume 2, Issue 2, Mar – Apr 2016.

38. Mathematical Modeling and Control Algorithms of STATCOMs / B. Blažič, L. Herman, A. Božiček and I. Papič // Static compensators (STATCOMs) in power Systems, Chapter 4 / F. Shahnia, S. Rajakaruna, A. Ghosh (eds.). Springer Science+Business Media Singapore 2015.

DOI 10.1007/978-981-287-281-4-4

39. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems / F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, *IEEE transactions on industrial electronics*, 2006, vol. 53, no. 5.

40. Ana Rodríguez, Emilio J. Bueno, Álgvar Mayor, Francisco J. Rodríguez and Aurelio García-Cerrada, Voltage Support Provided by STATCOM in Unbalanced Power Systems, *Energies* 2014, 7, p. 1003-1026; doi:10.3390/en7021003

41. Circulating current derivation and comprehensive compensation of cascaded STATCOM under asymmetrical voltage conditions / He Zhixing, Ma Fujun, Luo An, Xu Qianming, Chen Yandong, Xiao Huagen, Jin Guobin // *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2016, Vol. 10, Iss. 12, pp. 2924–2932. ISSN 1751-8687 Received on 13th November 2015 Revised on 11th April 2016 Accepted on 26th April 2016 doi: 10.1049/iet-gtd.2015.1374.

42. Oghenewvogaga Oghorada, Modular Multilevel Cascaded Flying Capacitor Statcom for Balanced and Unbalanced Load Compensation / Submitted in accordance with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. The University of Leeds School of Electronic and Electrical Engineering. August, 2017.

43. Takaaki Tanaka, Ke Ma, Huai Wang, Frede Blaabjerg, Asymmetrical Reactive Power Capability of Modular Multilevel Cascade Converter (MMCC) based STATCOMs for Offshore Wind Farm. *IEEE TRANSACTION ON*

POWER ELECTRONICS, 2019, 34(6), P. 5147-5164. Article 8443113.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2866398>

44. Y. Gui, C. Kim, Y. Han and C. C. Chung, Chapter 6. Robust Nonlinear Control of STATCOMs // Static compensators (STATCOMs) in power Systems / F. Shahnia, S. Rajakaruna, A. Ghosh (eds.). Springer Science+Business Media Singapore 2015. DOI 10.1007/978-981-287-281-4-6

45. Мисак Т. В. Аналіз стійкості системи стабілізації напруги на накопичувальному конденсаторі трифазного паралельного активного фільтра, Технічна електродинаміка, 2023, 1. С. 12-17.

46. Yazdani A. Energy and voltage management methods for multilevel converters for bulk power system power quality improvement. PhD dissertation, Missouri University of Science and Technology. 2014.

47. Modeling and design of the improved D-STATCOM control for power distribution grid / K. D. E. Kerrouche, E. Lodhi, M. B. Kerrouche, L. Wang, F. Zhu, G. Xiong. Received: Accepted: 7 August 2020 / Published online: © Springer Nature Switzerland AG 2020.

48. Бурбело М. Й., Лобода Ю. В., Система прямого керування струмом статичного синхронного компенсатора, *SCIENCE, RESEARCH, DEVELOPMENT #26, TECHNICS AND TECHNOLOGY*, Познань/Poznan, 27.02.2020 – 28.02.2020 р.

49. Tenti P., Willems J. L., Mattavelli P. and Tedeschi E., Generalized Symmetrical Components for Periodic Non-Sinusoidal Three-Phase Signals, *Electrical Power Quality and Utilization*, vol. XIII. 2007, no 1, pp. 9-15.

50. Бурбело М. Й., Степура О. В., Застосування узагальнених симетричних складових для виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії, *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Енергетика: надійність та енергоефективність, 2019, № 14(1339). С. 78-82.

51. Бурбело М. Й., Степура О. В., Виявлення та оцінювання джерел спотворень якості електроенергії в розподільчих електричних мережах : монографія [Електронний ресурс]. Вінниця : ВНТУ, 2021. 96 с.

52. Ginn III H. L. A Hybrid Reference Signal Generator for Active Compensators, *Electrical Power Quality and Utilization*, Journal. Vol XIII, No 1, pp. 51-57. 2007.

53. Valderrama G. E., Mattavelli P., & Stankovic A. M., Reactive Power and Unbalance Compensation Using STATCOM with Dissipativity-Based Control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 9(5), 2001. P. 718-727.

54. El-Moursi M. S., & Sharaf A. M., Novel controllers for the 48-pulse VSC STATCOM and SSSC for voltage regulation and reactive power compensation. *IEEE Transactions on Power systems*, 20(4), 2005. P. 1985-1997.

55. Mahyavanshi A., Mulla M. A., & Chudamani R., Reactive power compensation by controlling the DSTATCOM. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(11), 2012. P. 212-218.
56. Singh B., Sabha R. A., Design and control of a DSTATCOM for power quality improvement using cross correlation function approach, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2012. Vol. 4. No. 1. – P. 74-86.
57. Ertay M. M., & Zengin A., Analysis of the discontinuous PWM controlled D-STATCOM for reactive power compensation applications. *Tehnički vjesnik*, 21(4), 2014. P. 825-833.
58. Rohouma W., Balog R. S., Peerzada A. A., & Begovic M. M., Capacitor-less D-STATCOM for reactive power compensation. In 2018 IEEE 12th international conference on compatibility, power electronics and power engineering (CPE-POWERENG 2018). 2018, April (pp. 1-6). IEEE.
59. Qi J., Zhao W., & Bian X., Comparative study of SVC and STATCOM reactive power compensation for prosumer microgrids with DFIG-based wind farm integration. *IEEE Access*, 8, 209878-209885. 2020.
60. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A., Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components, *IEEE Trans, Ind. Appl.*, 1984, Vol. IA-20, No. 3, pp. 625-630.
61. Akagi H., Nabae A., Atoh S., Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters, *IEEE transactions on industry applications*, 1986, Vol. 22. No. 3, p. 460-465.
62. Akagi H., Nabae A., The p-q theory in three-phase systems under non-sinusoidal conditions, *European Transactions on Electrical Power*, T. 3, № 1. C. 27-31.
63. Akagi H., Trends in Active Power Line Conditioners. *IEEE Trans. on PELS*. 1994, Vol. 9. No. 3. Pp. 263-268.
64. Aredes M., Watanabe E. H., New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Power Filters, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995, vol. 10, no. 3, pp. 1649-1656.
65. Instantaneous p-q Power Theory for Control of Compensators in Micro-Grids / E. H. Watanabe, J. L. Afonso, J. G. Pinto, L. F. C. Monteiro, M. Aredes and H. Akagi, *IEEE ISNCC - INTERNATIONAL SCHOOL ON NONSINUSOIDAL CURRENTS AND COMPENSATION*, 2010, JUNE 15-18, ŁAGÓW, POLAND, p. 10. ISBN: 978-1-4244-5435-8
66. Firlit A., Current's physical components theory and pq power theory in the control of the three-phase shunt active power filter. *7th Int. Workshop on Power Definitions and Measurement under Non-Sinusoidal Conditions*, Cagliari, Italy. 2006.

67. Firlit A., Currents Physical Components Theory and p-q Power Theory in the Control of the Three-phase Shunt Active Power Filter, *Electrical Power Quality and Utilization, Journal*. 2007. Vol XIII, No 1, pp. 59-66.
68. Takeda M., Ikeda K., Tominaga Y., Harmonic Current Compensation with Active Filter, *IEEE '87 IAS Annual Meeting*, 1987, pp. 808.
69. Bhattacharya S., Divan D. M., Banerjee B., Synchronous Reference Frame Harmonic Isolator Using Series Active Filters, *Proc. EPE*, Florence (IT). 1991, Vol. 3, pp. 30-35.
70. Soares V., Verdelho P., Marques G., Active Power Filters Control Circuit Based on the Instantaneous Active and Reactive Current i_d - i_q Method, *Proc. IEEE-PESC*, 1997, June, pp. 1096-1108.
71. Kazmierkowski M. P., Krishnan R., Blaabjerg F., Control in Power Electronics. Selected Problems. *Academic Press*. 2002. 518 p.

Наукове видання

**Михайло Йосипович Бурбело,
Юрій Васильович Лобода**

**КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ
В НЕСИМЕТРИЧНИХ І НЕСИНУСОЇДНИХ РЕЖИМАХ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ**

Монографія

Видається в авторській редакції

Рукопис оформив *Ю. В. Лобода*

Оригінал-макет виготовлено у РВВ ВНТУ

Підписано до друку 12.11.2025 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 6,6.
Наклад 30 прим. Зам. 2025-034.

Видавець та виготовлювач –
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114
press.vntu.edu.ua
E-mail: rvv.vntu@gmail.com
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.