

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЛОБОДА ЮРІЙ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.316.1

ДИСЕРТАЦІЯ

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СТАТИЧНИМИ КОМПЕНСАТОРАМИ
РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В НЕСИМЕТРИЧНИХ
НЕСИНУСОЇДНИХ РЕЖИМАХ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Галузь знань 14 – «Електрична інженерія»

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____Ю. В. Лобода

Науковий керівник:

Бурбело Михайло Йосипович,
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2020

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...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

THD_I 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 нульові послідовностей, миттєві струми зворотної та нульові 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.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	15
ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ	21
Статичні тиристорні компенсатори та їх система керування	21
Статичні синхронні компенсатори та силові активні фільтри	26
Системи керування розподільними СТАТКОМ та активними фільтрами ..	34
Висновки та основні задачі дослідження.....	44
РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СТАТИЧНИМИ КОМПЕНСАТОРАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	45
ЗА НЕСИМЕТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	45
Вимірювання реактивної та пульсуючої потужностей в несиметричних несинусоїдних режимах трифазних електричних мереж.....	45
Вибір інформативних параметрів для керування компенсаційними симетрувальними пристроями.....	59
Аналіз помилок симетрування швидкозмінних навантажень за умов несинусоїдності	75
Висновки до розділу 2	80
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПРЯМОГО КЕРУВАННЯ СТРУМОМ СТАТИЧНИХ СИНХРОННИХ КОМПЕНСАТОРІВ	82
Удосконалення системи <i>dq</i> -керування струмом розподільних СТАТКОМ ..	82
Розробка методу прямого керування струмом розподільних СТАТКОМ...	85
Аналіз динамічних помилок розподільних СТАТКОМ у випадку коливань навантаження.....	93
Удосконалення системи прямого керування струмом за істотного рівня несиметрії.....	96

Висновки до розділу 3	14
РОЗДІЛ 4 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СТАТИЧНИХ КОМПЕНСАТОРІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В МЕРЕЖАХ З ЗАЗЕМЛЕНОЮ НЕЙТРАЛІЮ	97
Моделювання розподільних СТАТКОМ в системі pq -координат.....	99
Моделювання розподільних СТАТКОМ в системі dq -координат.....	107
Моделювання розподільних СТАТКОМ на основі прямого керування струмом 114	
Моделювання системи прямого керування струмом за істотного рівня несиметрії	120
ВИСНОВКИ	124
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	127
ДОДАТКИ	140
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	154

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АФ – активний фільтр
- БН – блок нелінійностей
- БО – блок обмеження
- ВГ – вищі гармоніки
- КУ – конденсаторна установка
- КН – коливання напруги
- КРП – компенсація реактивної потужності
- ЛЕП – лінія електропередачі
- ПК – блок перетворення координат
- ПФ – пасивний фільтр
- СІФК – система імпульсно-фазового керування
- СТАТКОМ – статичний синхронний компенсатор (*STATCOM – Static Synchronous Compensator*)
- СТК – статичний тиристорний компенсатор (*SVC – Static Var Compensator*)
- ТП – трансформаторна підстанція
- ТРГ – тиристорно регульована група
- ТРР – тиристорно регульований реактор
- ФКП – фільтро-компенсувальний пристрій
- ШІМ – широтно-імпульсна модуляція
- IGBT* – біполярні транзистори з ізольованим затвором (*Insulated Gate Bipolar Transistors*)
- IGCT* – керовані тиристори з ізольованим затвором (*Insulated Gate Controlled Thyristor*)
- IEGT* – інжекційний польовий транзистор (*Injection-Enhanced Gate Transistor*)
- NPC* – фіксована нейтраль (*Neutral-point clamped*)
- PLL* – блок фазового автопідстроювання частоти

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Наявність на промислових підприємствах неконвенційних навантажень (потужні швидкозмінні навантаження, часто з несиметричними та нелінійними параметрами) спричинює певні проблеми використання звичних пристроїв компенсацією реактивної потужності. Дані споживачі спричинюють утворення в електричних мережах коливання, несиметрію та несинусоїдність напруги. Тому на таких підприємствах не можна застосовувати традиційні конденсаторні установки, а необхідно вирішувати в комплексі проблему компенсації реактивної потужності та підвищення якості електроенергії.

Установки динамічної компенсації реактивної потужності на базі статичних тиристорних та синхронних компенсаторів забезпечують одночасну оптимізацію таких параметрів якості електроенергії як відхилення, коливання та несиметрії напруги. Розробці та дослідженні систем керування установок динамічної компенсації реактивної потужності присвячено велику кількість наукових праць, в яких увага акцентується на необхідності підвищення їх швидкодії. Ускладнює створення систем керування установками динамічної компенсації реактивної потужності з можливістю симетрування навантажень.

Незважаючи на велику кількість досліджень в області розробки та впровадження установок динамічної компенсації реактивної потужності на даний час відсутні чіткі рекомендації їх застосування в розподільних мережах.

Тому дослідження по підвищенню точності й швидкодії систем керування установками динамічної компенсації реактивної потужності з можливістю симетрування навантажень є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень які проводились відповідно до наукового напрямку кафедри „Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент” Вінницького національного технічного

університету (ВНТУ). Дисертаційна робота виконувалася відповідно до „Програми наукових досліджень і розробок Міністерства освіти і науки України за пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки” у рамках науково-дослідної роботи № 22 К1 „Теорія та практика оптимального керування режимами систем електропостачання за реактивною потужністю та якістю електроенергії”. Автор брав участь у виконанні науково-дослідної роботи як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метаю роботи є підвищення точності симетрування струмів зворотної та нульової послідовностей за наявності гармонічних спотворень в розподільних електричних мережах.

Для досягнення цієї мети необхідно розв’язати такі задачі:

1. Проаналізувати сучасні засоби підвищення якості електроенергії в розподільних електричних мережах та системи керування ними;
2. Удосконалити системи керування статичними тиристорними компенсаторами реактивної потужності за несиметричних навантажень;
3. Розробити систему прямого керування струмом статичних синхронних компенсаторів;
4. Виконати порівняльний аналіз систем керування статичних компенсаторів реактивної потужності в мережах з заземленою нейтраллю.

Об’єкт дослідження. Процес підвищення якості електроенергії в розподільних електричних мережах.

Предмет дослідження. Методи керування статичними компенсаторами реактивної потужності.

Методи дослідження. Під час роботи над дисертацією використовувались методи досліджень, які базувалися: на теорії електротехніки – під час моделювання СТАТКОМ в нелінійних і несиметричних режимах в розподільних електричних мережах; теорії автоматичного керування – при розробці систем керування СТАТКОМ.

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. Їх впровадження сприятиме покращенню якості електроенергії, зокрема зменшенню несинусоїдності та несиметрії напруги в розподільних мережах.

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.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві такий: [58] – показано можливі підходи до визначення трифазних потужностей навантажень в несинусоїдних та несиметричних режимах електричних мереж; [85] – обґрунтовано вибір інформативних параметрів для керування симетрувальними пристроями; [86] – запропоновано підхід до побудови системи керування пристроями динамічної компенсації реактивної потужності з несиметричним швидкозмінним навантаженням; [88] – запропоновано систему керування пристроями динамічної компенсації реактивної потужності за несиметричних навантажень; [91] – проаналізовано помилки симетрування навантажень; [92] – запропоновано умови симетрування електричних навантажень в розподільних мережах за допомогою СТАТКОМ; [96] – розробка методу прямого керування струмом розподільних СТАТКОМ; [102] – виконано аналіз динамічних помилок статичних синхронних компенсаторів, що зумовлені неточністю формування задавальних струмів. Результати теоретичних досліджень були отримані у Вінницькому національному технічному університеті (ВНТУ).

Апробація матеріалів дисертації. Викладені в дисертації результати досліджень були апробовані на таких наукових конференціях: *III міжнародна науково-технічна конференція Оптимальне керування електроустановками*, Вінниця, 2015; *міжнародна науково-технічна конференція «Science, Research, Development. Technics and technology»*, Poznan, 2020; *XLVI, XLVII, XLVIII, XLIX науково-технічні конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 2017, 2018, 2019, 2020.

Публікації. Результати дисертації опубліковано в 15 наукових працях, в тому числі 7 статей в наукових фахових виданнях України, 1 – у виданні, що індексується у SCOPUS, 7 – у матеріалах конференцій та семінарів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 156 сторінок, з яких основний зміст викладений на 110 сторінках друкованого тексту, містить 72 рисунки, 9 таблиць. Список використаних джерел складається з 106 найменування. Додатки містять акти впровадження результатів роботи, програми розрахунків, список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] R. M. Mathur, R.K. Varma, «Thyristor-based facts controllers for electrical transmission systems», *IEEE Press*, Piscataway, pp. 518, 2015.
- [2] Р. М. Матур, «Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности», *Энергоатомиздат*, с. 155, 1987.
- [3] В. А. Пономарёв, А. Л. Шитов, С. Н. Черевань, «Результаты внедрения тиристорного компенсатора реактивной мощности в систему электроснабжения металлургического предприятия», *Промышленная энергетика*, № 4, с. 51–54, 1987.
- [4] А. В. Жураховский, В. С. Перхач, В. Н. Стряпан и др., «Повышение экономичности электроснабжения угольных шахт при помощи статических тиристорных компенсаторов», *Промышленная энергетика*, № 8, с. 34–35, 1987.
- [5] Ю. О. Варецкий, «Компенсація несиметрії статичними компенсаторами в мережах живлення змінних навантажень», *Технічна електродинаміка*, № 2, с. 66–70, 1998.
- [6] Ю. О. Варецкий, «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.
- [7] И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров и Е. И. Сокол, «Перспективы применения полупроводниковых компенсаторов реактивной мощности в сетях электроснабжения», *Технічна електродинаміка*. № 1, с. 37–42, 2002.
- [8] А. А. Николаев, «Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи», автореф. дис. канд. техн. наук., Магнитогорск, с. 20, 2009.

[9] А. А. Николаев, Г. П. Корнилов, В. С. Ивекеев, И. А. Ложкин, В. Е. Котышев и М. М. Тухватуллин, «Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутриводского электроснабжения», *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*, №1 (Russian Internet Journal of Industrial Engineering), с.59–69, 2014.

[10] М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, и Е. А. Крутякова «Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет)», *СПб: «Электросила»*, с. 172, 2003.

[11] В. И. Кочкин, и О. П. Нечаев, «Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий», Москва, Изд-во НИЦ ЭНАС, с. 248, 2002.

[12] А. В. Николаев, «Разработка принципов управления статическим компенсатором (СТАТКОМ) и исследование его работы на подстанциях переменного и постоянного тока», автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, специальность 05.14.02, Санкт-Петербург, 2005.

[13] М. В. Пешков, «Разработка и исследование системы управления статическим компенсатором реактивной мощности типа СТАТКОМ для электроэнергетических систем», автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, специальности: 05.14.02, 05.09.12, Москва, ОАО «НТЦ электроэнергетики», 2009.

[14] H. Akagi, «Active harmonic filters», *Proceedings of the IEEE*, Vol. 93, no. 12, pp. 2128-2141, 2005.

[15] H. Akagi, «Modern Active Filters and Traditional Passive Filters», *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, Vol. 54, No. 3, 2006.

- [16] H. Akagi, «New Trends in Active Filters for Power Conditioning», *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol.32, no.6, pp.1312-1322, Nov./Dec.1996.
- [17] Ю. К. Розанов, Р. П. Гринберг, «Гибридные фильтры для снижения несинусоидальности тока и напряжения в системах электроснабжения», *Электротехника*, № 6, с. 55–60, 2010.
- [18] Е. Е. Чаплыгин, «Двухфазная широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения», *Электричество*, № 8, с. 56–59, 2009.
- [19] J. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez, R. Domke, «Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art» *Review IEEE Proc*, December, p. 2144 – 2164. 2005.
- [20] В. В. Бурлака, С. К. Поднебенная, М. Д. Дьяченко, «Обзор методов управления активными фильтрами» *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, №. 1, с. 51-54, 2011.
- [21] С. К. Поднебенна, «Підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу «нелінійне навантаження – силовий активний фільтр» в електричних мережах 0,4 кВ», автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2013.
- [22] В. В. Бурлака, С. К. Поднебенна, С. В. Гулаков, «Сучасні силові активні фільтри та імпульсні джерела живлення з корекцією коефіцієнта потужності», монографія, ПДТУ, Маріуполь, 196 с., 2015.
- [23] L. Gyugyi, E. C. Strycula, «Active AC power filters» *Conf. Rec.*, IEEE IAS, pp. 529-535, 1976.
- [24] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, «Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components», *IEEE Trans*, Ind. Appl., Vol. IA-20, No. 3, Pp. 625-630, 1984.

[25] H. Akagi, A. Nabae, S. Atoh, «Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters», *IEEE transactions on industry applications*, Vol. 22, No. 3, p.460-465, 1986.

[26] H. Akagi, A. Nabae, «The p-q theory in three-phase systems under non-sinusoidal conditions», *European Transactions on Electrical Power*, T.3, №1, c. 27-31.

[27] H. Akagi, «Trends in Active Power Line Conditioners», *IEEE Trans. on PELS*, Vol. 9, No. 3, Pp. 263-268, 1994.

[28] M. Aredes, and E. H. Watanabe, «New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Power Filters», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, no. 3, pp. 1649-1656, July 1995.

[29] E. H. Watanabe, J. L. Afonso, J. G. Pinto, L. F. C. Monteiro, M. Aredes, and H. Akagi, «Instantaneous p-q Power Theory for Control of Compensators in Micro-Grids,» *IEEE ISNCC - INTERNATIONAL SCHOOL ON NONSINUSOIDAL CURRENTS AND COMPENSATION*, JUNE 15-18, ŁAGÓW, POLAND, p. 10, 2010. ISBN: 978-1-4244-5435-8

[30] A. Firlit «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.

[31] A. Firlit, «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. Vol XIII, No 1, pp. 59–66, 2007.

[32] M. Takeda, K. Ikeda, and Y. Tominaga, «Harmonic Current Compensation with Active Filter», *IEEE '87 IAS Annual Meeting*, pp. 808, 1987.

[33] S. Bhattacharya, D. M. Divan, and B. Banerjee, «Synchronous Reference Frame Harmonic Isolator Using Series Active Filters», *Proc. EPE, Florence (IT)*, Vol. 3, pp. 30-35, 1991.

[34] V. Soares, P. Verdelho, and G. Marques, «Active Power Filters Control Circuit Based on the Instantaneous Active and Reactive Current i_d - i_q Method», *Proc. IEEE-PESC*, pp. 1096-1108, June 1997.

[35] M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg, «Control in Power Electronics. Selected Problems». *Academic Press*, 518 p. 2002.

[36] Frede Blaabjerg, Remus Teodorescu, Marco Liserre, and Adrian V. Timbus, «Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems», *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 53, no. 5, october, 2006.

[37] M. Salo, «A current-source active power filter with a new dc filter structure», *EPE Journal*, 16.1, p. 21-27, 2006.

[38] S. Pettersson, M. Salo, and H. Tuusa, «Optimal DC current control for four-wire current source active power filter», In: *2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. IEEE, p. 1163-1168, 2008.

[39] Алтунин Б. Ю., Карнавский И. А., и Кралин А. А. «Имитационная модель системы управления СТАТКОМ для симметрирования сетевых токов», *Труды Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева*, № 4(97). с. 232–236, 2012.

[40] Ankur Gheewala, Jay Chanawala, Nikhil Jadav, Modi Rishit, Chirag Machhi, Jenish Rana, «Load Balancing and Harmonic Elimination Using Distribution Static Synchronous Compensator (DSTATCOM)», *International Journal of Engineering and Techniques*, Volume 2, Issue 2, Mar – Apr 2016.

[41] А. Ф. Крогерис, К. К. Рашевиц, Э. П. Трейманис, та Я. К. Шинк, «Мощность переменного тока», Рига: Физ.-энерг. инст. Латв.АН, 1993.

[42] И. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, С. П. Денисюк и др. «Баланс энергий в электрических цепях», *Наукова Думка*, Київ, 1992.

[43] А. В. Нетушил, С. В. Страхов «Основы теории цепей [учебник для вузов]», *Энергоатомиздат*, Москва, 1989.

[44] Г. А. Штамбергер, «Измерения в цепях переменного тока (методы уравнивания)»; Под ред. К. Б. Карандеева, Наука, Новосибирск, с. 164, 1975.

[45] Е. А. Альтман, Д. А. Елизаров, и С. Н. Чижма, «Совершенствование алгоритма определения параметров гармоник сигналов в электрической сети для оценки качества электроэнергии», *Электротехнические комплексы и системы управления*, №4, с. 5-9, 2012.

[46] H. Akagi, E. Watanabe, and M. Aredes, «Instantaneous power theory and applications to power conditioning», *IEEE Press, Wiley-Interscience*, 379 p., 2007.

[47] F. Z. Peng, J.-S. Lai «Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems», *IEEE Trans. Inst. Meas*, Vol. 45, no. 1, Feb. – P. 293–297, 1996.

[48] М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, «Визначення потужностей трифазної несиметричної системи з ізольованою нейтраллю», *Технічна електродинаміка*, № 6, с. 66–70, 2013.

[49] М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, «Визначення потужностей за несиметричних режимів трифазних мереж із заземленою нейтраллю», *Технічна електродинаміка*, № 4, с. 71–75, 2015.

[50] M. J. Burbelo ; P. Pijarski ; 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», *Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 100311X 2016, <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2564860>

[51] М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко, та М. В. Никитенко, «Спосіб вимірювання параметрів несиметрії навантажень вузлів електричних мереж», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, С. 30–33, 2009.

[52] М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, та М. В. Никитенко, «Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень», *Технічна електродинаміка*, № 2, с. 54–56, 2011.

[53] М. Й. Бурбело, та В. І. Романовський, «Вимірювальний канал для установок динамічної компенсації реактивної потужності», *Електронний журнал Наукові праці ВНТУ*, № 3, с. 6, 2014.

[54] Н. А. Мельников, «Реактивная мощность в электрических сетях», *Энергия*, Москва, с. 128, 1975.

[55] А. К. Шидловский, и В. Г. Кузнецов, «Повышение качества энергии в электрических сетях», *Наукова думка*, 268 с., 1985.

[56] М. Й. Бурбело, «Квазізрівноважені частотно-варіаційні вимірювальні системи», *УНІВЕРСУМ-Вінниця*, с. 225, 2004.

[57] М. Й. Бурбело, и А. В. Гадай, «Визначення потужностей нелінійних навантажень трифазних електричних мереж», *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, № 24/25, с. 61–67, 2016.

[58] 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.

[59] Н. С. Маркушевич, и Л. А. Солдаткина, «Качество напряжения в городских электрических сетях», *Энергия*, Москва, с. 256, 1975.

[60] Ю. Железко, «Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии», *Руководство для практических расчетов*, 2018.

[61] А. Н. Милях, А. К. Шидловский, и В. Г. Кузнецов, «Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях», *Наукова думка*, Київ, с. 219, 1973.

[62] А. К. Шидловский, и В. Г. Кузнецов, «Повышение качества энергии в электрических сетях [Текст]», *Наукова думка*, Київ, с. 268, 1985.

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

[64] А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, Г. А. Москаленко, и А. Т. Лысенко, «Симметрирующее устройство для произвольной трехфазной несимметричной нагрузки», *Пат. 1330700 СССР. МКИ H02J 3/26 / – №3982935*; 1985.

[65] В. Г. Аввакумов, «Вопросы качества электрической энергии тяговых подстанций», *ОИИЖТ*, Омск, с. 68, 1970.

[66] Ю. Е. Варецкий, М. С. Сегеда, и Ю. А. Кенс (СССР), «Система электропитания нагрузки», *Пат. № 3888536/24-07*, 1985.

[67] А. Л. Шитов, и С. Н. Черевань, «Устройство для компенсации реактивной мощности», *Авторское свидетельство 1347118 СССР, МКИ⁴ H 02 J 3/18*, 1987.

[68] А. Г. Баталов, О. Г. Гриб, и Г. А. Сендерович и др., «Качество электрической энергии в системах электроснабжения», (Учебное пособие) под ред. О. Г. Гриба, Харьков: ХНАГХ, с. 272, 2006.

[69] М. Я. Минц, В. Н. Чинков, А. Л. Савицкий, и А. В. Нидзий, «Устройство для симметрирования трехфазных сетей: Пат. 1737621 СССР. МКИ H02J 3/26», *Пат. 1737621 СССР. МКИ H02J 3/26*, 30.05.92.

[70] М.Й. Бурбело, Б.С. Рогальський, В.М. Непийвода, та С.І. Вознюк, «Квазікомпенсаційні вимірювальні пристрої для регуляторів реактивної потужності», *Енергетика и електрифікація*, №6, с.29-33., 2001.

[71] М.Й. Бурбело, «Квазікомпенсаційні вимірювальні перетворювачі для пристроїв симетрування трифазних навантажень», *Енергетика и електрифікація*, №12, с.26-28, 2001.

[72] М.Й. Бурбело, О.О. Бірюков, О.В. Бабенко, «Вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування трифазних навантажень»,

Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, №2, с.92 – 95, 2002.

[73] М. Бурбело, та О. Бабенко, «Вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування швидкозмінних навантажень трифазних споживачів», *Промислова електроенергетика та електротехніка*, №5, с. 25 – 27, 2003.

[74] М. Й. Бурбело, та О. В. Бабенко, «Квазізрівноважена вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування трифазних навантажень», *Енергетика и електрифікація*, № 9-10, с. 52-54, 2003.

[75] М. Й. Бурбело, Б. С. Рогальський, В. О. Іванков, та В. Ф. Сайченко, «Пристрій для автоматичного симетрування струмів і стабілізації заданого крєфіцієнта потужності трифазної системи: Пат. 64831 Україна. МКИ H02J 3/26(Україна)», *Пат. 64831 Україна. МКИ H02J 3/26. Бюл. №3. – 4 с.*, 15.03.04.

[76] М. Й. Бурбело, «Квазізрівноважені частотно-варіаційні вимірювальні системи», *УНІВЕРСУМ-Вінниця*, Вінниця, с.225, 2004.

[77] М. Й. Бурбело, та О. В. Бабенко, «Аналіз похибок вимірювання швидкодіючих систем компенсаційних установок симетрування навантажень за умов несинусоїдності», *Вісник НУ «Львівська політехніка»*, *Вимірювання та керування*, №530, с. 124–130, 2005.

[78] М. Й. Бурбело, Л. Б. Терешкевич, та О. В. Бабенко, «Пристрій для автоматичного симетрування струмів і стабілізації заданого крєфіцієнта потужності трифазної системи: Пат. 81482. Україна. МКИ H02J 3/26», *Пат. 81482. Україна. МКИ H02J 3/26. Україна. МКИ H02J 3/26. Україна* № а200510891; Заявлено 17.11.05. Опубл. 10.01.08. Бюл. №1.

[79] М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко, О. О. Бірюков, О. та М. Кінзерська, «Симетрування навантажень вузлів електричних мереж з використанням двофазних симетрувальних установок», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 35–38, 2008.

[80] М. Й. Бурбело, та О. В. Бабенко, «Квазізрівноважені вимірювальні канали для симетрувальних установок», *УНІВЕРСУМ-Вінниця*, Вінниця, 96 с. 2009.

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

[82] М. Й. Бурбело, та М. В. Кузьменко, «Аналіз умов симетрування навантажень з використанням компенсаційних симетрувальних установок», *Енергетика та електрифікація*, № 5, с. 3–6, 2009.

[83] М. В. Девятко, «Керування компенсаційно-симетрувальними пристроями за багатократною несиметрії навантажень в розподільних мережах», автореф. дис. канд. техн. наук 05.14.02, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2011.

[84] Ю. П. Войтюк, «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.

[85] 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, Випуск 165 "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України"*, с. 54 – 56. 2015.

[86] М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, М. В. Никитенко, та Ю. В. Лобода, «Керування пристроями динамічної компенсації реактивної потужності за несиметричних швидкозмінних навантажень», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Науково-виробничий журнал Кременчуцького державного політехнічного університету*. Вип. 2, с. 37–43, 2013.

[87] М. Й. Бурбело, та М. В. Никитенко, «Пристрій для компенсації реактивної потужності трифазного навантаження: Пат. 94181. Україна. МПК H02J 3/00. / (Україна)», Пат. 94181. Україна. МПК H02J 3/00 № a201001785; Бюл. № 7, 11.04.11.

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

[89] М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко, та М. В. Никитенко, «Спосіб вимірювання параметрів несиметрії навантажень вузлів електричних мереж», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 30–33, 2009.

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

[91] 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.

[92] 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.

[93] А. И. Важнов, «Переходные процессы в машинах переменного тока», *Энергия*, Ленинград, СССР., 1980.

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

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

[96] 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.

[97] Н.М. Колмаков, И.А. Баховцев, и А.Г. Гарганеев, «Анализ гистерезисного управления по напряжению автономного инвертора напряжения,» *Доклады ТУСУРа*, том 19, № 2, с. 84-89. 2016.

[98] В. Олещук, и В. Ермуратский, «Синхронное сбалансированное регулирование многофазной системы на базе ШИМ-инверторов с фиксированной нейтральной точкой», *Технічна електродинаміка*, №5, с. 27-35, 2019.

[99] И. А. Баховцев, и Г. С. Зиновьев, «Анализ качества преобразования энергии в АИН с ШИМ», *Силовые тиристорные преобразователи*, с. 3-11, 1987.

[100] И. А. Баховцев, «Сравнительный анализ способов управления двухуровневым АИН с ШИМ», *Актуальные проблемы электронного приборостроения*, с. 30-34, 2008.

[101] В. М. Иванов, «Алгоритмические особенности способов формирования симметричных выходных напряжений инверторов с ШИМ», *Електричество*, №6. – С. 51–56. 2011.

[102] 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.

[103] H. L. Ginn III, «A Hybrid Reference Signal Generator for Active Compensators», *Electrical Power Quality and Utilization*, Journal. Vol XIII, No 1, pp. 51–57. 2007.

[104] А. Б. Лоскутов, Б. Ю. Алтунин, и И. А. Карнавский, «Модель многоуровневого каскадного инвертора для компенсации реактивной мощности и мощности искажений в сетях с выпрямительной нагрузкой», *PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE*, 2(16), с. 32–38, 2011.

[105] С. В. Кузьмин «Принцип построения и математическое моделирование статического компенсатора реактивной мощности в тяговой сети переменного тока», *Известия ПГУПС*. № 3, с. 70–77, 2011.

[106] B. Singh, and R. A. Sabha, «Design and control of a DSTATCOM for power quality improvement using cross correlation function approach», *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 4, No. 1. – P. 74–86, 2012.

