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 виміряних 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.

Обгрунтовано 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. компенсатора підтвердило точність Моделювання достатньо високу симетрування та фільтрування вищих гармонік.

При дослідженні процесу керування СТАТКОМ показано, що помилки симетрування та фільтрування вищих гармонік залежать від швидкості зміни навантаження. 3 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 3 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 реактивої 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 responce 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.

3MICT

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

3.4 Удосоконалення системи прямого керування струмом за істотного
рівня несиметрії
3.5 Висновки до розділу 3
РОЗДІЛ 4 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ
СТАТИЧНИХ КОМПЕНСАТОРІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В
МЕРЕЖАХ З ЗАЗЕМЛЕНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ
4.1 Моделювання розподільних СТАТКОМ в системі <i>pq</i> -координат
4.2 Моделювання розподільних СТАТКОМ в системі dq-координат 107
4.3 Моделювання розподільних СТАТКОМ на основі прямого керування
струмом
4.4 Моделювання системи прямого керування струмом за істотного рівня
несиметрії
ВИСНОВКИ
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 127
ДОДАТКИ140
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ
ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

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 неконвенційних підприємствах (потужні швидкозмінні навантажень нелінійними навантаження, часто 3 несиметричними та 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 установкок 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 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 обгрунтовано 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] – обгрунтовано вибір інформативних параметрів для керування симетрувальними пристроями; [86] – запропоновано підхід до побудови системи керування пристроями динамічної компенсації реактивної швидкозмінним потужності 3 несиметричним навантаженням; [88] систему керування пристроями динамічної компенсації запропоновано 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 y 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, XLVII, 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.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1 Статичні тиристорні компенсатори та їх система керування

За оцінками, наведеними в різних джерелах, середньостатистичні втрати електроенергії в розподільних мережах знаходяться в межах 10-15%. Однією з основних причин таких втрат є недостатній рівень компенсації реактивних навантажень, несиметрія струмів навантажень та наявність вищих гармонік.

До найбільш поширених засобів компенсації реактивної потужності є регульовані конденсаторні установки (КУ). Переваги даних засобів можна віднести низьку вартість та простоту обслуговування.

Однак на підприємствах з різко змінними, несиметричними та нелінійними навантаженнями використовувати КУ недоцільно внаслідок їх пошкоджуваності та низької щвидкодії. Тому на даних підприємствах застосовують установки динамічної компенсації реактивної потужності.

На рис. 1.1 приведено установку динамічної компенсації реактивної потужності на базі статичного тиристорного компенсатора (СТК), який забезпечує одночасну оптимізацію низки параметрів якості електроенергії (відхилення, коливання напруги та несиметрію навантажень) [1]–[7].



Рисунок 1.1 – Структурна схема СТК

В основі систем автоматичного керування СТК лежить метод керування з використанням обертової системи *dq*-координат [8], [9].

Фізичну сутність складових струму в обертовій системі *dq*-координат можна пояснити таким чином. Із застосуванням обертової системи *dq*-координат можуть бути визначені миттєві потужності за формулами:

$$p(t) = kU_1 i_d; \ q(t) = kU_1 i_q,$$
 (1.1)

де $k = \sqrt{3}$ – коефіцієнт пропорційності; U_1 – діюче значення напруги прямої послідовності; i_d , i_q – миттєві струми прямої послідовності в системі dq-координат:

$$i_{d} = i_{\alpha} \cos(\omega t - \pi/2) + i_{\beta} \sin(\omega t - \pi/2);$$

$$i_{q} = i_{\alpha} \sin(\omega t - \pi/2) - i_{\beta} \cos(\omega t - \pi/2).$$
(1.2)

Із застосуванням обертової системи *dq*-координат можуть бути визначені миттєві умовні потужності зворотної послідовності за формулами:

$$p_2(t) = kU_1 i_{d2}; q_2(t) = kU_1 i_{q2},$$
 (1.3)



Рисунок 1.2 – Структурна схема системи керування СТК

де i_{d2} , i_{q2} – миттєві струми прямої та зворотної послідовностей в системі dq-координат:

$$i_{d2} = i_{\alpha} \cos(\omega t - \pi/2) - i_{\beta} \sin(\omega t - \pi/2);$$

$$i_{d2} = i_{\alpha} \sin(\omega t - \pi/2) + i_{\beta} \cos(\omega t - \pi/2).$$
(1.4)

Система керування СТК фірми АВВ є комбінованою і включає в себе прямий і зворотний контур (рис. 1.2) [9].

У прямому контурі розраховуються ортогональні *d-q* складові струму прямої та зворотної послідовностей навантаження ДСП, на основі яких, використавши перетворення Штейнметца формуються провідності (потужності) фаз:

$$b_{BC} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U_1} [I_q - 2I_{q2}];$$

$$b_{CA} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U_1} [I_q + I_{q2} - \sqrt{3}I_{d2}];$$

$$b_{AB} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U_1} [I_q + I_{q2} + \sqrt{3}I_{d2}],$$
(1.5)

де U_1 – діюче значення напруги прямої послідовності; I_q – середнє значення уявного складника струму навантаження; I_{d2} , I_{q2} – середні значення дійсного та явного складників струму навантаження зворотної послідовності.

Для отримання ортогональні складові прямих i зворотних послідовностей струмів і напруг використовують блоки перетворення координат (ПК 1-4). Вихідні сигнали блоків ПК проходять через цифрові фільтри ковзного середнього (Ф1-Ф8), частота налаштування яких дорівнює 50 Гп. Блоки автопідстроювання фазового частоти (PLL 1-2) використовуються для коректної роботи перетворювачів ПК і СІФК в умовах постійної зміни фаз і спотворення форми напруги на шинах навантаження.

У прямому каналі здійснюється розрахунок необхідних значень реактивних провідностей фаз ТРГ (B_{AB1} , B_{BC1} , B_{CA1}) відповідно до поданими виразами. Обчислення цих провідностей проводиться в блоці Б1, на вхід якого надходять ортогональні складові прямої і зворотної послідовностей струму навантаження і ФКП. У блоці Б2 розраховується пряма послідовність фазної напруги U_1 , вона враховується при розрахунку провідностей в блоці Б1.

Сигнал на генерацію додаткової реактивної потужності реалізовано за допомогою зворотного зв'язку, де формується коригувальний сигнал по порівнянні фактичної і заданої реактивної потужностей. Канал зворотного зв'язку з пропорційно-інтегральним регулятором корегує задане значення реактивної потужності на вторинній стороні силового трансформатора як в напрямку споживання Q з мережі, так і в напрямку її генерування.

Другий канал зі зворотним зв'язком, включає в себе блок обчислення реактивної потужності за прямими послідовностям струмів і напруг (блок Б3) і ПІ-регулятор реактивної потужності. На виході регулятора формується додаткова складова реактивної провідності $B_{\text{ДОП}}$, яка підсумовується з вихідними сигналами блоку Б1. Величина $B_{\text{ДОП}}$ безпосередньо залежить від сигналу завдання (уставки) на реактивну потужність комплексу $Q_{3ал}$.

Сигнали сумарних реактивних провідностей $B_{\text{сумАВ,BC,CA}}$ проходять через блоки обмеження (БО1) з уставкою $B_{\text{ТРГmax}}$ і надходять на входи блоків нелінійностей (БН), в яких реалізована зворотна регулювальна характеристика ТРГ $\alpha = f(B)$. Сигнали завдання на кути відмикання тиристорів (α_{AB} , α_{BC} , α_{CA}) подаються на систему імпульсно-фазового керування (СІФК), що працює на основі вертикального принципу. На виході СІФК формуються керуючі імпульси, які подаються на входи управління тиристорних ключів ТРГ.

Однією з проблем зменшення впливу швидкозмінних навантажень на мережу є забезпечення бажаної швидкодії СТК.

1.2 Статичні синхронні компенсатори та силові активні фільтри

На початку 1990-х появились IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) транзистори з частотним діапазоном комутації до 8 кГц, які в області напруг від 600 В до 1700 В є найкращими ключовими елементами [10]. До недоліків IGBT відносять велике падіння напруги на відкритих транзисторах відносно тиристорів різного типу, але це компенсується високою стійкістю до коротких замикань, меншим часом перемикання, простішими снабберними колами та меншими комутаційними втратами енергії. При виконанні монтажу з малими індуктивностями, снабберні кола можуть бути відсутніми.

В останні роки появились транзистори IEGT (Injection Enchanced Insulated Gate Bipolar Transistor), які володіють усіма перевагами IGBT приладів, але на відміну від них мають менші падіння напруги у відкритому стані. Транзистори IEGT мають втричі менші розміри, ніж конкуруючі з ними GTO-тиристори, компенсатор на них має вдвічі менші втрати, ніж на GTO-тиристорах.

Пізніше появились також повністю керовані тиристори IGCT (Insulated Gate Controlled Thyristor), які знаходять широке застосування в області високовольтних перетворювачів великої потужності. Основна їх перевага полягає в тому, що вони мають мале падіння напруги у відкритому стані.

Нова елементна база дала можливість створити новий клас перетворювачів – автономних інверторів напруги і статичних синхронних компенсаторів на їх основі [11].

Структурну схему СТАТКОМ подано на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Структурна схема СТАТКОМ

На рис. 1.4 зображено принципову схему силових кіл СТАТКОМ на базі трифазного дворівневого мостового інвертора напруги. Елементами інвертора є конденсатор C_d на стороні постійного струму, силові транзистори $(V_1,...,V_6)$ зі зворотними діодами, реактори L_f на стороні змінного струму.



Рисунок 1.4 – Принципова схема силових кіл СТАТКОМ на базі трифазного мостового інвертора напруги

Принцип роботи СТАТКОМ оснований на формування трифазної змінної напруги за рахунок ємнісного накопичувача постійного струму та автономного інвертора напруги з широтно-імпульсної модуляцією. ШІМ створює імпульсні сигнали певної частоти із змінною щільністю, що дозволяє отримати на виході напругу будь-якої форми. Використання даної техніки модуляції в перетворювачі напруги дозволяє отримати практично синусоїдну криву напругу на стороні змінного струму за рахунок зміни коефіцієнта модуляції [12].

ШІМ повинна забезпечувати:

 плавну безударну зміну форми вихідної напруги інвертора в усьому діапазоні регулювання та лінійність регулювальної характеристики інвертора;

- підвищення швидкодії і точності обчислення параметрів модульованих сигналів, покращення динамічних властивостей систем.

Трирівневі інвертори з фіксованою нейтральною точкою (NPC) розроблені Nabae, Magi та Takahashi в 1981 році (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Схема СТАТКОМ на базі трирівневого NPC-інвертора

Формування додатних півхвиль фазних напруг на виході інвертора здійснюється одночасними комутаціями основних ключів верхніх плеч (V_{k1}) з відповідними допоміжними ключами нижніх плеч (V_{j2}) при цьому допоміжні ключі верхніх плеч (V_{k2}) увімкнені.

Формування від'ємних півхвиль фазних папруг на виході інвертора здійснюється одночасними комутаціями основних ключів нижніх плеч (V_{j1}) з відповідними допоміжними ключами верхніх плеч (V_{k2}) за увімкнених допоміжних ключів нижніх плеч (V_{j2}).

В [13] виконано порівняння дворівневої і трирівневої (NPC) схем СТАТКОМ з ШІМ. В результаті порівняння отримано наступне.

 виконаний аналіз втрат дозволяє оцінити їх на рівні близько 3% для перетворювача, виконаного за дворівневою схемою, і на рівні 2% для перетворювача, виконаного за трирівневою схемою;

- як показали розрахунки, оптимальна несуча частота ШІМ для дворівневої схеми вища, ніж для трирівневої;

- в трирівневому інверторі напруги відсутня частина комбінаційних гармонік порядку ($n f_{\min}/50+k$) за парних значень k, а також гармоніки, кратні частоті f_{\min} ;

- в трирівневому перетворювачі коефіцієнт гармонічного спотворення в ~1,7 рази менше, ніж в дворівневому за однакової частоти ШІМ.

Для промислових мереж з напругою до 10 кВ з несинусоїдним навантаженням доцільно дослідження і розробки СТАТКОМ виконувати на базі багаторівневих каскадних інверторів. Використання такого типу перетворювачів в СТАТКОМ має ряд переваг:

- більший діапазон використання за напругою, що складається з допустимих напруг окремих рівнів;

- мінімальні масогабаритні показники за рахунок вимкнення силового трансформатора;

- кращий гармонічний склад.

СТАТКОМ дуже схожий на СТК за функціональними можливостями компенсації реактивної потужності, але принципи роботи їх кардинально відрізняються. Тоді як СТК працює як паралельно приєднана регульована реактивна провідність, СТАТКОМ є паралельно приєднаним синхронним джерелом напруги з регульованою амплітудою і фазою. Головна властивість СТАТКОМ – здатність генерувати струм будь-якої фази щодо напруги мережі, причому незалежно від рівня і якості напруги мережі.

СТАТКОМ відрізняється від СТК збільшеним набором функцій і поліпшеними характеристиками. Він призначений для регулювання реактивної потужності в широких межах (плюс-мінус 100% від номінальної потужності). СТАТКОМ володіє високою швидкодією, малим вмістом вищих гармонік.

Швидкодія СТАТКОМа, яка характеризується тривалістю переходу компенсатора із режиму генерації в режим споживання реактивної потужності, складає 20 мс. Швидкодію СТАТКОМ можна охарактеризувати постійною часу комутації їх силових ключів. Цей показник становить близько близько 2,5 ÷ 5 мс для компенсатора першого покоління і 0,20 ÷ 0,35 мс для компенсатора другого покоління.

Важливою властивістю СТАТКОМ при вирішенні задач підтримання напруги на підстанціях в аварійних і післяаварійних режимах мережі є можливість форсування реактивної потужності.

Завдяки використанню ШІМ, вміст паразитних гармонік струмів дуже малий, що виключає необхідність додаткового використання потужних фільтрокомпенсувальних пристроїв.

Збільшення частоти комутації дозволяє поліпшити криву напруги на виході перетворювача і дає можливість використати менш потужний фільтр для компенсації вищих гармонік в області частоти комутації, Але при збільшення частоти комутації вентилів зростають втрати, що має враховуватися при виборі її вибору. Приблизно 80% електричних втрат в СТАТКОМ припадають на вентильній частині перетворювача.

Втрати в СТК ~ 0,7%. Заявлені втрати в пристроях СТАТКОМ, вироблених компаніями *SIEMENS* і *ABB*, складають ~ 2%. Рівень втрат в вентилях обраної схеми перетворювача також залежить від застосовуваного алгоритма ШІМ та його параметрами.

В СТАТКОМ транзисторний (тиристорний) комутатор здійснює обмін реактивної потужності між фазами, що значно знижує установлену потужність реакторів і конденсаторів. Так, потужність реакторів складає 15-20%, конденсаторів – близько 10 % потужності компенсатора. Відмітимо, що в традиційних СТК відбувається обмін електромагнітної енергії між мережею і реактивними елементами (конденсатором або реактором), що потребує рівності потужностей його елементів і потужностей компенсації.

СТАТКОМ володіє такою функціональною особливістю як векторне регулювання. Воно полягає в здатності компенсаторів одночасно змінювати амплітуду та фазовий зсув напруги, що надає ряд переваг даного пристрою над СТК.

Установка СТАТКОМ має меньші габаритні розміри ніж СТК. Це дозволяє більш раціонально використати територію підстанції, особливо в умовах міста.

Активні фільтри відрізняються від СТАТКОМ вибором більш високої несучої частоти (приблизно 10 кГц), що зумовлено необхідністю компенсувати високочастотні гармоніки.

Основні принципи роботи силових активних фільтрів (АФ) [14] – [16] сформульовані в 70-х роках минулого століття, коли увагу дослідників силової електроніки було привернуто до проблеми гармонічних спотворень в електроенергетичних системах. Поглиблення інтересу спеціалістів до питань активної фільтрації було зумовлено появою нових потужних та швидкодіючих напівпровідникових комутаційних пристроїв, таких як IGBT і MOS-транзистори.

Активні фільтри поділяють на чисті та гібридні. Схеми чистих фільтрів такі ж як і СТАТКОМ. Недоліком чистих активних фільтрів є велика встановлена потужність, яка близька до сумарної потужності компенсованих вищих гармонік. Більш перспективними є гібридні фільтри, потужність активної частини яких становить від 10 до 20% від потужності компенсованих гармонік [15]– [17].

У разі несиметричного навантаження АФ зі схемою зірки без виведення нейтралі принципово неможливо домогтися рівності фазних напруг. При використанні трифазного мостового інвертора в таких випадках ємнісний фільтр на стороні постійного струму виконується у вигляді двох послідовно увімнених конденсаторів, середня точка яких з'єднана з виводом нейтралі навантаження (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Схема активного фільтра з двома конденсаторами

Однак таке підключення призводить до значного погіршення гармонічного складу вихідної напруги, істотного збільшення витрат на

ємнісний фільтр; виникає і проблема стабілізації потенціалу в точці з'єднання конденсаторів.

Зазначені недоліки усувають при застосуванні трифазного інвертора з додатковим напівмостом (рис. 1.7). Принцип дії інвертора з додатковим напівмостом [18] полягає в тому, що потенціал середньої точки додаткового напівмоста (точка 0) підтримується рівним *E*/2 за рахунок формування в додатковому напівмості ШІМ-послідовності з нульовим коефіцієнтом модуляції. Формування вихідної напруги в кожній фазі здійснюється незалежно від інших фаз за рахунок прикладання до навантаження різниці напруг ШІМ-послідовності, що формується напівмостом даної фази, і ШІМ-послідовності додаткового напівмоста («нульової» фази).



Рисунок 1.7 – Схема активного фільтра з додатковим напівмостом

Застосування ШІМ з пасивною фазою дозволяє значно знизити втрати на комутацію як в симетричних, так і в несиметричних режимах. Причому комутаційні втрати слабо залежать від коефіцієнта модуляції. Застосування ШІМ з пасивною фазою дозволяє підвищити максимальне відношення вихідної напруги до напруги *E*. Для отримання тих же значень вихідної напруги можна знизити напругу джерела живлення на 15,5%, за рахунок цього забезпечується додаткове зниження на 25-35% втрат на комутацію.

В останні роки поширення набувають двочастотні активні фільтри з різними частотами модуляції, в яких високочастотний інвертор включається в роботу тільки у випадках, коли у основного (низькочастотного) інвертора з'являється велика похибка регулювання вихідного струму [10], [19] – [22] дозволяють зменшити втрати енергії у високочастотному інверторі, який має підвищені втрати через високу частоту перемикання. Таким чином, досягається якісна компенсація вищих гармонік струму при відносно низьких втратах енергії.

1.3 Системи керування розподільними СТАТКОМ та активними фільтрами

Методи керування розподільними СТАТКОМ поділяються на методи, що основані на *pq*-теорії миттєвої потужності, методи з використанням синхронної системи *dq*-координат, методи синхронного детектування.

Одними із найбільш поширених методів керування розподільними СТАТКОМ є методи, що основані на *pq*-теорії миттєвої потужності [23]–[31]. Структурну схему системи керування на основі *pq*-теорії миттєвої потужності зображено на рис. 1.9.

Перехід від фазних координат до ортогональних складників напруг і струмів в системі αβ0-координат здійснюється за формулами:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha}(t) \\ u_{\beta}(t) \\ u_{0}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & -\sqrt{1/6} & -\sqrt{1/6} \\ 0 & \sqrt{1/2} & -\sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{a}(t) \\ u_{b}(t) \\ u_{c}(t) \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \\ i_{0}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & -\sqrt{1/6} & -\sqrt{1/6} \\ 0 & \sqrt{1/2} & -\sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{a}(t) \\ i_{b}(t) \\ i_{c}(t) \end{bmatrix},$$
(1.6)



Рисунок 1.9 – Структурна схема системи керування на основі ра-теорії миттєвої потужності

де $\left[u_{\alpha}(t), u_{\beta}(t), u_{0}(t)\right]^{\mathrm{T}}$; $\left[i_{\alpha}(t), i_{\beta}(t), i_{0}(t)\right]^{\mathrm{T}}$ – вектори напруг і струмів в системі аβ0-координат; $\left[u_{a}(t), u_{b}(t), u_{c}(t)\right]^{\mathrm{T}}$; $\left[i_{a}(t), i_{b}(t), i_{c}(t)\right]^{\mathrm{T}}$ – вектори миттєвих фазних напруг і струмів.

Визначаються миттєві значення активної та реактивної потужностей:

$$p(t) = i_{\alpha}(t)u_{\alpha}(t) + i_{\beta}(t)u_{\beta}(t);$$

$$q(t) = i_{\alpha}(t)u_{\beta}(t) - i_{\beta}(t)u_{\alpha}(t),$$
(1.7)

активна та реактивна потужності навантаження

$$P(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^{t} p(t)dt; \quad Q(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^{t} q(t)dt, \quad (1.8)$$

потужності пульсацій активної та реактивної потужностей навантаження, які повинен генерувати СТАТКОМ для симетрування та фільтрування вищих гармонік:

$$n_p(t) = p(t) - P(t); \quad n_q(t) = q(t) - Q(t).$$
 (1.9)

Для підтримання на заданому рівні напруги в колі постійного струму в статичних і динамічних режимах шляхом регулювання активної потужності, яку повинен генерувати або споживати СТАТКОМ:

$$n_{p_{osc}}(t) = n_p(t) - \left(k_p + \frac{1}{p\tau_p}\right) U_d(t),$$
 (1.10)
де $k_p + \frac{1}{p\tau_p}$ – параметри ПІ-регулятора, який забезпечує підтримання

напруги на конденсаторі шляхом регулювання активної потужності.

Знаходження бажаної залежності компенсаційного струму СТАТКОМ в системі αβ-координат здійснюється за формулами :

$$i_{\alpha}^{*}(t) = \frac{n_{p_{osc}}(t)u_{\alpha}(t) + q(t)u_{\beta}(t)}{u_{\alpha}^{2}(t) + u_{\beta}^{2}(t)};$$
(1.11)

$$\dot{i}_{\beta}^{*}(t) = \frac{-q(t)u_{\alpha}(t) + n_{p_{osc}}(t)u_{\beta}(t)}{u_{\alpha}^{2}(t) + u_{\beta}^{2}(t)}$$
(1.12)

(у разі виконання функцій компенсації реактивної потужності, симетрування навантажень за зворотною та нульовою послідовностями і компенсації вищих гармонік);

Компенсаційні струми СТАТКОМ в системі фазних координат визначають за формулою

$$\begin{bmatrix} i_{a}^{*}(t) \\ i_{b}^{*}(t) \\ i_{c}^{*}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & 0 & \sqrt{1/3} \\ -\sqrt{1/6} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/3} \\ -\sqrt{1/6} & -\sqrt{1/2} & \sqrt{1/3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha}^{*}(t) \\ i_{\beta}^{*}(t) \\ i_{0}^{*}(t) \end{bmatrix}.$$
(1.12)

Система керування СТАТКОМ в системі dq-координат відрізняється тим, що замість перетворювача ПК1 використовується блок фазового автоналагоджування частоти PLL, на виході якого формуються сигнали sin ωt та cos ωt , які, відповідно, синфазні та квадратурні до напруги прямої послідовності мережі [32]-[36].

Перехід від фазних координат струмів до ортогональних складників струмів в системі αβ0-координат здійснюється за формулою (1.6).

Формування струмів навантаження в системі *d,q*-координат здійснюється за формулами:

$$i_{d}(t) = i_{\alpha}(t)\sin\omega t - i_{\beta}(t)\cos\omega t;$$

$$i_{q}(t) = -i_{\alpha}(t)\cos\omega t - i_{\beta}(t)\sin\omega t.$$
(1.13)

Визначення середнього значення струмів навантаження в системі *d,q*-координат виконується за формулами:

$$I_d(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t i_d(t)dt; \quad I_q(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t i_q(t)dt.$$
(1.14)

Визначення складників пульсацій струмів навантаження в системі *d*,*q*-координат, які повинен генерувати АФ для симетрування та фільтрування вищих гармонік:

$$\tilde{i}_{d}(t) = i_{d}(t) - I_{d}(t); \quad \tilde{i}_{q}(t) = i_{q}(t) - I_{q}(t).$$
(1.15)

В блоці обчислення фазних струмів СТАТКОМ здійснюється такі дії:

1) підтримання на заданому рівні напруги в колі постійного струму в статичних і динамічних режимах:

$$\tilde{i}_{d_{osc}}(t) = \tilde{i}_{d}(t) - \left(k_{i} + \frac{1}{p\tau_{i}}\right) U_{dc}(t), \qquad (1.16)$$

де $k_i + \frac{1}{p\tau_i}$ – параметри ПІ-регулятора, який забезпечує підтримання

напруги на конденсаторі шляхом регулювання активної складової струму;

 знаходження бажаної залежності компенсаційного струму СТАТКОМ в системі αβ-координат

$$i_{\alpha}^{*}(t) = \tilde{i}_{d}(t)\sin\omega t - \tilde{i}_{q}(t)\cos\omega t;$$

$$i_{\beta}^{*}(t) = -\tilde{i}_{d}(t)\cos\omega t - \tilde{i}_{q}(t)\sin\omega t;$$
(1.17)

та в системі фазних струмів за формулою (1.15).

Недоліком методів керування є неможливість розділення контурів керування фільтруванням вищих гармонік та симетруванням нелінійного несиметричного навантаження.

В [36] представлено систему керування синхронними компенсаторами СТАТКОМ з використанням системи *dq*-координат для компенсації реактивної потужності з урахуванням параметрів реактора. Таким чином, струм, що генерується в мережу опосередковано контролюється. Дана система для компенсації реактивної потужності представленна на рис. 1.10.



Рисунок 1.10 – Принципова схема системи керування СТАТКОМ з використанням системи *dq*-координат для компенсації реактивної потужності

Аналогічний підхід побудови системи керування [36] з компенсацією п'ятої гармоніки показано на рис. 1.11. Недоліком даних систем керування є інерційність та необхідність налаштування системи керування на певну гармоніку, перевагою є можливість компенсувати певну гармоніку.



Рисунок 1.11 – Принципова схема системи керування СТАТКОМ з використанням системи *dq*-координат для компенсації реактивної потужності та п'ятої гармоніки

В [37], [38] представлено системи керування з використанням *dq*-координат з урахуванням затримки цифрової обробки інформації. Принципова схема системи керування СТАТКОМ з використанням коректування динамічних помилок в системі *dq*-координат для симетрування навантаження показана на рис. 1.12 [39].



Рисунок 1.12 – Принципова схема системи керування СТАТКОМ з використанням коректування динамічних помилок в системі *dq*-координат

Дана система керування містить: вимірювальні канали струму та напруги, три блоки перетворення координат ПК abc/dq, два смугові фільтри Φ , налаштовані на частоту пульсацій 100 Гц, зумовлену несиметрією струмів, два масштабні перетворювачі ωL_F , два масштабні перетворювачі R_F (на схемі не показано), два регулятори K, що складаються з блоків підсилення K_p , K_i та двох блоків затримки T_s , блоку перетворення координат ПК dq/abc, пристроїв віднімання ПВ та додавання ПД, ШІМ-контроллера.

Перевагою даного підходу є можливість використовувати класичну широтно-імпульсну модуляцію та досить висока швидкодія. До недоліків можна віднести неможливість компенсувати вищі гармоніки.

Одним з перших методів керування СТАТКОМ та активних фільтрів був запропонований метод синхронного детектування. В [40] розроблено систему автоматичного керування з поточним визначенням еквівалентної активної провідності навантаження. Дана система керування (рис. 1.13) містить вимірювальні канали струму та напруги, три блоки обчислень Б1, фільтр виділення постійної складової Ф, налаштовані на пів періоду та ШІМконтроллер.



Рисунок 1.13 – Схема системи керування СТАТКОМ за Фрізе з використанням миттєвої провідності

В даній системі керування інформативним параметром для компенсації реактивної потужності, симетрування навантажень та компенсації вищих гармонік є еквівалентна провідність навантаження. Її можна визначити за формулою:

$$G_{e}(t) = \frac{u_{A}(t) \cdot i_{HAB}(t) + u_{B}(t) \cdot i_{HAB}(t) + u_{C}(t) \cdot i_{HAB}(t)}{u_{A}^{2}(t) + u_{B}^{2}(t) + u_{C}^{2}(t)}$$
(1.18)

де $i_{\text{нав }A}(t), i_{\text{нав }B}(t), i_{\text{нав }C}(t)$ – струми навантаження фаз; $u_A(t), u_B(t), u_C(t)$ – фазні напруги мережі.

Усереднене значення еквівалентної активної провідності використовують для визначення активних миттєвих струмів:

$$i_{sA}(t) = \overline{G}_{e}(t) \cdot u_{A}(t)$$

$$i_{sB}(t) = \overline{G}_{e}(t) \cdot u_{B}(t)$$

$$i_{sC}(t) = \overline{G}_{e}(t) \cdot u_{C}(t)$$
(1.19)

де $\overline{G}_{e}(t)$ – постійна складова сумарної миттєвої провідності фаз; i_{sA}, i_{sB}, i_{sC} – струми мережі після компенсації неактивної складової потужності.

Визначення компенсаційних струмів СТАТКОМ:

$$i_{a}^{*}(t) = i_{_{HAB} A}(t) - i_{_{SA}}(t)$$

$$i_{d}^{*}(t) = i_{_{HAB} B}(t) - i_{_{SB}}(t)$$

$$i_{C}^{*}(t) = i_{_{HAB} C}(t) - i_{_{SC}}(t)$$
(1.20)

де $i_a^*(t), i_d^*(t), i_c^*(t)$ – компенсаційні струми СТАТКОМ.

До переваг даної системи керування можна віднести простоту виконання на відміну від інших. До недоліків: мала швидкодія (≈20 мс); даний підхід компенсує неактивну складову потужності, що містить реактивну потужність, несиметрію та гармонічні спотворення і немає можливості їх розділення. Крім того, система некоректно працює за умов зовнішніх спотворень напруги живлення.

1.4 Висновки та основні задачі дослідження

1. 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.

2. 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.

3. Недоліком методів керування статичними компенсаторами, які основані на теорії миттєвої потужності, є те, що вміст вищих гармонік після компенсації є суттєвим.

4. Необхідно розробити систему прямого керування струмом СТАТКОМ в розподільних електричних мережах з ізольованою та заземленою нейтраллю з відокремленням миттєвих струмів зворотної та нульової послідовностей; проаналізувати точність фільтрування вищих гармонік та симетрування струмів навантажкнь.

Метою роботи є зменшення помилок 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.

РОЗДІЛ 2

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СТАТИЧНИМИ КОМПЕНСАТОРАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЗА НЕСИМЕТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

2.1 Вимірювання реактивної та пульсуючої потужностей в несиметричних несинусоїдних режимах трифазних електричних мереж

Вимірювання реактивної потужності є важливим моментом, від успішного вирішення якого залежить ефективність систем динамічної компенсації реактивної потужності. На сьогоднішній день існує низка визначень реактивної потужності [41], [42], однак рекомендації щодо їх застосування для вимірювань в умовах несиметрії та несинусоїдності режимів трифазних електричних мереж відсутні.

Активну і реактивну потужності вимірюють шляхом інтегрування миттєвих активної та реактивної потужностей періоді *T* напруги живлення [43]

$$P = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} p(t) dt; \quad Q = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} q(t) dt.$$
 (2.1)

Класичний підхід полягає у застосуванні миттєвих активної та реактивної потужностей як скалярного добутку векторів трифазних миттєвих напруг і струмів:

$$p = \left(\left| \mathbf{U} \cdot \mathbf{I} \right| \right) = \left(u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C \right); \tag{2.2}$$

$$q = \left(\mathbf{U'} \cdot \mathbf{I} \right) = \left(u'_A i_A + u'_B i_B + u'_C i_C \right), \qquad (2.3)$$

де U, I – вектори миттєвих фазних напруг і струмів U = $[u_A, u_B, u_C]^T$, I = $[i_A, i_B, i_C]^T$, U' – вектор миттєвих фазних напруг після їх зсуву на –90 ел. градусів U'= $[u'_A, u'_B, u'_C]^T$, штрихом тут і нижче позначено фазовий зсув миттєвих величин на –90 ел. градусів.

За допомогою перетворення Гільберта забезпечується фазовий зсув усіх гармонік напруги в умовах несинусоїдності. Однак реалізація такого перетворення аналоговими електронними засобами є достатнью складною [44]. Перспективним є застосування цифрових фільтрів [45].

Сучасний підхід до визначення потужностей полягає у використанні миттєвої повної потужності трифазної системи *s*(*t*) як базової величини, яку розкладають на ортогональні складники [46]. Вираз для квадрата миттєвої повної потужності можна подати у вигляді суми квадратів скалярного та векторного добутків векторів миттєвих напруг і струмів в системі фазних координат

$$s^{2} = p^{2} + q_{\Sigma}^{2} = \left(\left| \mathbf{I} \cdot \mathbf{U} \right| \right)^{2} + \left(\left| \mathbf{I} \times \mathbf{U} \right| \right)^{2}, \tag{2.4}$$

де $s^2 = u^2 \cdot i^2$ – квадрат миттєвої повної потужності, для визначення якої використовують квадрати миттєвих трифазних напруги та струму $u^2 = u_A^2 + u_B^2 + u_C^2$; $i^2 = i_A^2 + i_B^2 + i_C^2$; **I**, **U** – вектори миттєвих струмів і напруг в системі фазних координат $\mathbf{I} = [i_A, i_B, i_C]^{\mathrm{T}}$, $\mathbf{U} = [u_A, u_B, u_C]^{\mathrm{T}}$;

У разі застосування системи фазних координат миттєву активну потужність визначають за формулою (2.2), а вираз для миттєвої реактивної потужності має такий вигляд:

$$q_{\Sigma} = \left(\left| \mathbf{I} \times \mathbf{U} \right| \right) = \sqrt{\begin{vmatrix} i_A & i_B \\ u_A & u_B \end{vmatrix}^2} + \begin{vmatrix} i_B & i_C \\ u_B & u_C \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} i_C & i_A \\ u_C & u_A \end{vmatrix}^2.$$
(2.5)

У разі використання системи αβ0-координат вирази для миттєвих активної та реактивної потужностей відповідно будуть [46], [47]:

$$p = \left(\mathbf{I}_{p} \cdot \mathbf{U}_{p} \right) = \left(i_{\alpha} u_{\alpha} + i_{\beta} u_{\beta} + i_{0} u_{0} \right);$$
(2.6)

$$q_{\Sigma} = \left(\mathbf{I}_{p} \times \mathbf{U}_{p} \right) = \sqrt{\begin{vmatrix} i_{\alpha} & i_{\beta} \\ u_{\alpha} & u_{\beta} \end{vmatrix}^{2}} + \begin{vmatrix} i_{\beta} & i_{0} \\ u_{\beta} & u_{0} \end{vmatrix}^{2} + \begin{vmatrix} i_{0} & i_{\alpha} \\ u_{0} & u_{\alpha} \end{vmatrix}^{2}.$$
(2.7)

де \mathbf{I}_p , \mathbf{U}_p – вектори струмів і напруг в системі а β 0-координат $\mathbf{I}_p = [i_{\alpha}, i_{\beta}, i_0]^{\mathrm{T}}, \mathbf{U}_p = [u_{\alpha}, u_{\beta}, u_0]^{\mathrm{T}}.$

Реалізація переходу фазних координат до ортогональних складників можна здійснити за формулами:

$$i_{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{6}} (2i_A - i_B - i_C); i_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_B - i_C); i_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_A + i_B + i_C);$$

$$u_{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{6}} (2u_A - u_B - u_C); u_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} u_{BC}; u_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} (u_A + u_B + u_C).$$
(2.8)

З формули (2.7) випливає, що миттєва реактивна потужність q_{Σ} містить три складники:

$$q_0 = i_\alpha u_\beta - i_\beta u_\alpha \,; \tag{2.9}$$

$$q_{\alpha} = i_{\beta} u_0 - i_0 u_{\beta}; \ q_{\beta} = i_0 u_{\alpha} - i_{\alpha} u_0.$$
 (2.10)

Складник q₀ є миттєвою реактивною потужністю для мережі з ізольованою нейтраллю. Вираз для цієї потужності можна також подати в системі фазних координат [46]:

$$q_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(u_{BC} i_A + u_{CA} i_B + u_{AB} i_C \right). \tag{2.11}$$

Два інших складники (2.10) характеризують появу напруги та струму нульової послідовності в мережі із заземленою нейтраллю. Їх об'єднують в один показник $q_{\alpha\beta} = \sqrt{q_{\alpha}^2 + q_{\beta}^2}$, який характеризує незрівноваженість мережі [47].

Необхідно відмітити, що після усереднення $q_{\Sigma}(t)$ або $q_0(t)$ отримують реактивні потужності $Q_{\Sigma} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} q_{\Sigma}(t) dt$, $Q_0 = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} q_0(t) dt$, значення яких за несиметричної та несинусоїдної системи напруг і струмів можуть істотно відрізнятися від Q [48], [49].

Розглянемо несиметричний несинусоїдний режим [50], за якого до мережі приєднаний шестипульсний випрямляч, який у даному випадку моделюється джерелом струму, що містить першу, п'яту та сьому гармоніки, що становлять відповідно 20,13 % та 14,34 % від основної гармоніки, а напруги фаз крім першої гармоніки містять п'яту та сьому гармоніки, вміст кожної з яких становить 2 % від основної гармоніки (вказаний рівень напруги вищих гармонік відповідає відносному опору мережі, що визначається як відношення повних потужностей навантаження і короткого замикання, рівному 0,02), і одночасно напруга фази C менша на 10 % від значення напруг інших фаз.

Потужність навантаження окремих гармонік, що приведена до вторинних обмоток вимірювальних трансформаторів струму та напруги,

становить:
$$S_1 = 1405 \text{ e}^{j30^\circ} = 1217 + j702,5 \text{ B}\cdot\text{A}; \ \underline{S}_5 = -5,6 \text{ e}^{j30^\circ} = -4,9 - j2,8 \text{ B}\cdot\text{A};$$

<u>S</u>₇ = −4,0 е $j^{30^{\circ}}$ = −3,5 – j^{2} ,0В·А. Активна та реактивна потужності навантаження з урахуванням усіх гармонік відповідно будуть: $P \approx 1208$ Вт, $Q \approx 697,7$ вар.

На рис. 2.1 зображено залежності миттєвих величин p, q, q_0 , з якого видно, що частота коливань миттєвих потужностей в шість разів вища від частоти напруги мережі. Миттєві потужності p та q характеризуються змінним коливним процесом протягом пів періоду, що зумовлений несиметрією та несинусоїдністю. Миттєва потужність q_0 має рівномірний характер пульсацій, зумовлений несинусоїдністю.



Рисунок 2.1 – Залежності миттєвих активної та реактивних потужностей за малої несиметрії

Результати вимірювань реактивної потужності за формулами (2.3) та (2.9) з використанням (2.1) відповідно будуть $Q \approx 697,1$ вар та $Q_0 \approx 694,5$ вар.

Отже, методична похибка у другому випадку приблизно становить -0,4 %, що є припустимим.

Розглянемо несиметричний несинусоїдний режим у разі якщо залишкова напруга фази *C* становить 50 %. Для цього випадку на рис. 2.2 зображено залежності миттєвих величин p, q, q_0 . Тут також зображено залежність потужності $q_{\alpha\beta}$, що характеризує незрівноваженість режиму мережі. З рисунку видно, що миттєві потужності p та q характеризуються наростаючим коливним процесом протягом пів періоду. Обвідні цих отужностей характеризують пульсації, що зумовлені несиметрією режиму за зворотною послідовністю [51], [52]. Рівень цих пульсацій порівняно з рис. 2.1 істотно зріс. Характер пульсацій миттєвої потужності q_0 , незважаючи на зменшення її середнього значення, зберігся.



Рисунок 2.2 – Залежності миттєвих потужностей за істотної несиметрії

Результати вимірювань реактивної потужності за формулами (2.3) та (2.9) з використанням (2.1) відповідно будуть $Q \approx 558$ вар та $Q_0 \approx 496$ вар. Методична похибка у другому випадку становить –11 % і є неприпустимою.

Значення $Q_{\Sigma} \approx 526$ вар, отримане за формулою (2.7) теж свідчить про істотну методичну похибку використання цієї величини.

Основною причиною появи методичної похибки вимірювання є несиметрія напруг. За її відсутності (у випадку дуже малого відносного опору мережі) результати вимірювань Q та Q_0 за допомогою (2.3) та (2.9) в умовах несиметрії та нелінійності навантажень практично збігаються. Винятком є величина Q_{Σ} , яка і в цьому випадку містить недопустиму методичну похибку.

відсутності або незначної несиметрії Отже, за напруг можна використовувати будь-яку з реактивних потужностей. Найбільш просто реалізувати вимірювання з використанням виразів (2.9) або (2.11). Зі доцільно збільшенням несиметрії напруг застосовувати реактивну потужність Q за формулою (2.3) з використанням фазового зсуву напруг. Однак при цьому появляються похибки, ЩО зумовлені неточністю перетворювачів фазового зсуву. Значення цих похибок залежать від вмісту вищих гармонік. Якщо, наприклад, реактивна потужність вищих гармонік становить 0,7 % (для наведеного прикладу), то максимальне значення методичної похибки не перевищує 1,5 %. Таке значення похибки характерне у разі використання найпростішого алгоритму цифрової обробки інформації з затримкою напруг в часі на чверть періоду [53].

У разі симетричного джерела живлення, опорів елементів мережі та миттєві потужності не змінюються в часі. 3a ïx навантаження виникають пульсації потужностей, несиметричності миттєвих які характеризують за допомогою потужностей пульсацій [54]:

$$N(t) = -(p(t) - P); N'(t) = -(q(t) - Q), \qquad (2.12)$$

де Р – активна потужність трифазного навантаження.

Зауважимо, що потужність пульсацій N'(t) миттєвої реактивної потужності q однакова за амплітудним значенням з N(t) і зсунута відносно неї на кут —90 ел. градусів.

Потужність пульсацій $N_q(t)$ миттєвої реактивної потужності q_0 , яку можна визначити аналогічно (2.12):

$$N_q(t) = -(q_0(t) - Q_0), \qquad (2.13)$$

в різко несиметричних режимах відрізняється за амплітудою та фазою від потужності пульсацій N'(t).

Запишемо вирази для миттєвої активної потужності для трьох фаз за умов несиметрії:

$$p_{a} = u_{a}i_{a} = 2U_{a}I_{a}\sin(\omega t + \psi_{u_{a}})\sin(\omega t + \psi_{i_{a}}) =$$

$$= U_{a}I_{a}\cos(\psi_{u_{a}} - \psi_{i_{a}}) - \cos(2\omega t + \psi_{u_{a}} + \psi_{i_{a}}) =$$

$$= U_{a}I_{a}\cos\phi_{a} - U_{a}I_{a}\cos(2\omega t + \xi_{a});$$

$$p_{b} = u_{b}i_{b} = 2U_{b}I_{b}\sin(\omega t - 120^{\circ} + \psi_{u_{b}})\sin(\omega t - 120^{\circ} + \psi_{i_{b}}) =$$

$$= U_{b}I_{b}\cos\phi_{b} - U_{b}I_{b}\cos(2\omega t + 120^{\circ} + \xi_{b});$$

$$p_{c} = u_{c}i_{c} = 2U_{c}I_{c}\sin(\omega t + 120^{\circ} + \psi_{u_{c}})\sin(\omega t + 120^{\circ} + \psi_{i_{c}}) =$$

$$= U_{c}I_{c}\cos\phi_{c} - U_{c}I_{c}\cos(2\omega t - 120^{\circ} + \xi_{c}),$$

де $\xi_a = \psi_{u_a} + \psi_{i_a}$; $\xi_b = \psi_{u_b} + \psi_{i_b}$; $\xi_c = \psi_{u_c} + \psi_{i_c}$. Початкові фази напруг і струмів фаз *a*, *b*, *c* відраховують, відповідно, від 0[°], -120[°], 120[°].

Сумарне значення миттєвої активної потужності:

$$\begin{split} p &= p_a + p_b + p_c = U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c - \\ &- \left[U_a I_a \cos \xi_a + U_b I_b \cos(\xi_b + 120^\circ) + U_c I_c \cos(\xi_c - 120^\circ) \right] \cdot \cos 2\omega t + (2.14) \\ &+ \left[U_a I_a \sin \xi_a + U_b I_b \sin(\xi_b + 120^\circ) + U_c I_c \sin(\xi_c - 120^\circ) \right] \cdot \sin 2\omega t. \end{split}$$

За відсутності несиметрії по нульовій послідовності можна перейти до до системи α,β-координат:

$$p = U_{\alpha}I_{\alpha}\cos\varphi_{\alpha} + U_{\beta}I_{\beta}\cos\varphi_{\beta} - \left[U_{\alpha}I_{\alpha}\cos\xi_{\alpha} - U_{\beta}I_{\beta}\cos\xi_{\beta}\right] \cdot \cos 2\omega t + \left[U_{\alpha}I_{\alpha}\sin\xi_{\alpha} - U_{\beta}I_{\beta}\sin\xi_{\beta}\right] \cdot \sin 2\omega t, \qquad (2.15)$$

де $\xi_{\alpha} = \psi_{u_{\alpha}} + \psi_{i_{\alpha}}; \ \xi_{\beta} = \psi_{u_{\beta}} + \psi_{i_{\beta}}.$ Початкові фази напруг і струмів в системі а, β-координат відраховують, відповідно, від 0°, -90°.

3 цих виразів випливає:

$$p = P - (N_a \cos 2\omega t - N_r \sin 2\omega t), \qquad (2.16)$$

$$\mu = V_\alpha I_\alpha \cos \xi_\alpha - U_\beta I_\beta \cos \xi_\beta; N_r = U_\alpha I_\alpha \sin \xi_\alpha - U_\beta I_\beta \sin \xi_\beta.$$

Вирази для миттєвої реактивної потужності для трьох фаз за умов несиметрії:

$$\begin{aligned} q_{a} &= u'_{a} i_{a} = -2U_{a}I_{a}\cos(\omega t + \psi_{u_{a}})\sin(\omega t + \psi_{i_{a}}) = \\ &= U_{a}I_{a}\sin\phi_{a} - U_{a}I_{a}\sin(2\omega t + \xi_{a}); \\ q_{b} &= u'_{b}i_{b} = -2U_{b}I_{b}\cos(\omega t - 120^{\circ} + \psi_{u_{b}})\sin(\omega t - 120^{\circ} + \psi_{i_{b}}) = \\ &= U_{b}I_{b}\sin\phi_{b} - U_{b}I_{b}\sin(2\omega t + 120^{\circ} + \xi_{b}); \\ q_{c} &= u'_{c}i_{c} = -2U_{c}I_{c}\cos(\omega t + 120^{\circ} + \psi_{u_{c}})\sin(\omega t + 120^{\circ} + \psi_{i_{c}}) = \\ &= U_{c}I_{c}\sin\phi_{c} - U_{c}I_{c}\sin(2\omega t - 120^{\circ} + \xi_{c}). \end{aligned}$$

Сумарне значення миттєвої реактивної потужності:

$$q = q_{a} + q_{b} + q_{c} = U_{a}I_{a}\sin\varphi_{a} + U_{b}I_{b}\sin\varphi_{b} + U_{c}I_{c}\sin\varphi_{c} - \left[U_{a}I_{a}\sin\xi_{a} + U_{b}I_{b}\sin(\xi_{b} + 120^{\circ}) + U_{c}I_{c}\sin(\xi_{c} - 120^{\circ})\right] \cdot \cos 2\omega t - (2.17) - \left[U_{a}I_{a}\cos\xi_{a} + U_{b}I_{b}\cos(\xi_{b} + 120^{\circ}) + U_{c}I_{c}\cos(\xi_{c} - 120^{\circ})\right] \cdot \sin 2\omega t.$$

За відсутності несиметрії по нульовій послідовності:

$$q = U_{\alpha}I_{\alpha}\sin\varphi_{\alpha} + U_{\beta}I_{\beta}\sin\varphi_{\beta} - - [U_{\alpha}I_{\alpha}\sin\xi_{\alpha} - U_{\beta}I_{\beta}\sin\xi_{\beta}] \cdot \cos 2\omega t - (2.18) - [U_{\alpha}I_{\alpha}\cos\xi_{\alpha} - U_{\beta}I_{\beta}\cos\xi_{\beta}] \cdot \sin 2\omega t.$$

3 цих виразів випливає:

$$q = Q - (N_r \cos 2\omega t + N_a \sin 2\omega t).$$
(2.19)

Отже, за синусоїдного несиметричного режиму миттєві пульсуючі потужності N(t) та N'(t) є синусоїдними з частотою, яка вдвічі вища від частоти напруги та струму, мають однакові амплітуди і зсунуті на чверть періоду. Отже, тільки одна з цих двох пульсуючих потужностей є інформативною. Амплітуда пульсуючих потужностей дорівнює модулю комплексної пульсуючої потужності.

Таким чином, дійсно, за синусоїдних напруг і струмів миттєва активна та реактивна потужності

$$p = P - \operatorname{Re}\left(\underline{N} e^{j2\omega t}\right); \ q = Q - \operatorname{Im}\left(j\underline{N} e^{j2\omega t}\right),$$

де $\underline{N} = \dot{U}\dot{I} = Ne^{j(\psi_u + \psi_i)}$ – комплексна пульсуюча потужність.

За відсутності несиметрії напруг по зворотній послідовності пульсації реактивної потужності

$$q_{0} = U_{\beta}I_{\alpha}\sin(\psi_{u_{\beta}} - \psi_{i_{\alpha}}) + U_{\alpha}I_{\beta}\sin(\psi_{u_{\alpha}} - \psi_{i_{\beta}}) - \left[U_{\beta}I_{\alpha}\sin(\psi_{u_{\beta}} + \psi_{i_{\alpha}}) - U_{\alpha}I_{\beta}\sin(\psi_{u_{\alpha}} + \psi_{i_{\beta}})\right] \cdot \cos 2\omega t - \left[U_{\beta}I_{\alpha}\cos(\psi_{u_{\beta}} + \psi_{i_{\alpha}}) - U_{\alpha}I_{\beta}\cos(\psi_{u_{\alpha}} + \psi_{i_{\beta}})\right] \cdot \sin 2\omega t$$

збігаються з пульсаціями реактивної потужності q. За наявності несиметрії напруг за зворотною послідовністю пульсуюча потужність $N_q(t)$ відрізняється від пульсуючої потужності N'(t).

Несиметричні режими трифазних електричних мереж характеризують комплексними потужностями пульсацій, які можна подати через комплексні напруги і струми прямої та зворотної послідовностей [55], [56]:

$$\underline{N} = 3(\dot{U}_1\dot{I}_2 + \dot{U}_2\dot{I}_1); \ \underline{N}_q = 3(\dot{U}_1\dot{I}_2 - \dot{U}_2\dot{I}_1),$$
(2.20)

де $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ – комплексні напруги та струми відповідно прямої та зворотної послідовностей; $\overset{*}{I}_1, \overset{*}{I}_2$ – комплексні спряжені струми відповідних послідовностей.

3 (2.20) видно, що за симетричної системи напруг потужності пульсацій однакові за будь-якої несиметрії навантажень.

Комплексні потужності пульсацій можна записати в системі αβ0координат:

$$\underline{N} = \dot{U}_{\alpha}\dot{I}_{\alpha} + \dot{U}_{\beta}\dot{I}_{\beta}; \ \underline{N}_{q} = j(\dot{U}_{\beta}\dot{I}_{\alpha} - \dot{U}_{\alpha}\dot{I}_{\beta}), \tag{2.21}$$

де $\dot{U}_{\alpha}, \dot{U}_{\beta}, \dot{I}_{\alpha}, \dot{I}_{\beta}$ – комплексні напруги і струми в ортогональній системі $\alpha\beta$ -координат.

Слід відмітити, що за відсутності напруги та струму нульової послідовності модуль комплексної потужності пульсацій <u>N</u> дорівнює амплітудному значенню N(t) та N'(t) а модуль комплексної потужності пульсацій <u>N</u>_q – амплітудному значенню $N_q(t)$.

Для оцінки загального рівня пульсацій активної та реактивної потужностей $n_p = p - P$; $n_q = q - Q$ за несинусоїдних несиметричних режимів було запропоновано використати середньоквадратичні значення потужностей пульсацій на періоді *T* напруги живлення [57, 58]

$$N_p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_p^2(t) dt}; \ N_q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_q^2(t) dt}; \ N_s = \sqrt{N_p^2 + N_q^2}.$$
(2.22)

Ввівши поняття ефективних на періоді активної та реактивної потужностей

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} p^2(t) dt}; \quad Q_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} q^2(t) dt}, \quad (2.23)$$

їх можна використати для оцінювання загального рівня пульсацій шляхом визначення середньоквадратичні відхилення активної, реактивної та повної потужностей [57, 58]

$$\sigma_p = \sqrt{P_e^2 - P^2}; \ \sigma_q = \sqrt{Q_e^2 - Q^2}; \ \sigma_s = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_q^2}.$$
 (2.24)

Розраховані за формулами (2.22) значення потужностей пульсацій

активної, реактивної та повної потужностей для наведеного вище прикладу будуть: $N_p = 208,5 \,\mathrm{kBt}$; $N_q = 338,0 \,\mathrm{kBap}$. Значення середньоквадратичних відхилень активної, реактивної та повної потужностей (2.24) відповідають складникам потужності пульсацій: $\sigma_p = 208,4 \,\mathrm{kBt}$; $\sigma_q = 337,9 \,\mathrm{kBap}$.

Поряд з потужностями пульсацій доцільно також використовувати умовні потужності зворотної послідовності. Комплексна умовна потужність \underline{S}_2 [59] однозначно характеризує пульсації активної потужності p та реактивної потужності q, а \underline{S}_{2q} [56] – пульсації реактивної потужності q_0 :

$$\underline{S}_{2} = 3 \left(\dot{U}_{1} \overset{*}{I}_{2} + \dot{U}_{2} \overset{*}{I}_{1} \right); \ \underline{S}_{2q} = 3 \left(\dot{U}_{1} \overset{*}{I}_{2} - \dot{U}_{2} \overset{*}{I}_{1} \right), \tag{2.25}$$

де I_{1}, I_{2} – комплексні спряжені струми відповідних послідовностей.

Комплексні умовні потужності небалансу можна записати в системі αβкоординат:

$$\underline{S}_{2} = \dot{U}_{\alpha} \overset{*}{I}_{\alpha} - \dot{U}_{\beta} \overset{*}{I}_{\beta}; \ \underline{S}_{2q} = j(\dot{U}_{\alpha} \overset{*}{I}_{\beta} + \dot{U}_{\beta} \overset{*}{I}_{\alpha}), \qquad (2.26)$$

де I_{α}, I_{β} – комплексні спряжені струми в ортогональній системі $\alpha\beta$ -координат.

Комплексним потужностям відповідають миттєві потужності зворотної послідовності [58], [59]

$$p_{2} = u_{\alpha}i_{\alpha} - u'_{\beta}i'_{\beta}; \quad q_{2} = u'_{\alpha}i_{\alpha} + u_{\beta}i'_{\beta};$$

$$p_{2q} = u_{\alpha}i'_{\beta} - u'_{\beta}i_{\alpha}; \quad q_{2q} = u_{\beta}i_{\alpha} + u'_{\alpha}i'_{\beta},$$
(2.27)

які однозначно характеризують пульсації активної потужності *р* та реактивної потужності *q*₀.

За відсутності вищих гармонік коливання складників миттєвої умовної потужності зворотної послідовності за умов несиметрії струму навантаження відбувається з частотою 100 Гц (рис. 2.3).

Змінна складова p_2 збігається зі змінною складовою потужності p, а змінна складова q_2 близька до змінної складової потужності q_0 , змінна складова p_{2q} близька до змінної складової потужності p, а змінна складова q_{2q} збігається зі змінною складовою потужності q_0 .



Рисунок 2.3 – Часові функції миттєвих величин $p_2 \approx p_{2q}$ і $q_2 \approx q_{2q}$

Несинусоїдний характер залежностей потужностей зворотної послідовності (рис. 2.4) свідчить про наявність комбінаційних складників, зумовлених взаємовпливом основної та вищих гармонік різних послідовностей. Після усереднення отримано такі значення: $P_2 = 42$ квар, $Q_2 = 24$ квар.



Рисунок 2.4 – Залежності миттєвих умовної потужності несиметрії та потужності спотворення

2.2 Вибір інформативних параметрів для керування компенсаційними симетрувальними пристроями

Симетруванню використанням компенсаційних навантажень 3 симетрувальних пристроїв (СП) присвячені багаточисленні публікації. чинниками, які впливають швидкодію та точність Основними на симетрування, є вибір інформативних параметрів [61–80] і врахування статичних характеристик вузлів навантажень [81–84].

В [61–64] як інформативний параметр СП використано комплексну пульсуючу потужність. Формування вектора керування потужностей фаз СП, які забезпечують компенсацію струму зворотної послідовності, здійснюється за такими умовами:

$$Q_{BC} = \frac{2\operatorname{Im}\underline{N}}{3}; \quad Q_{CA} = \frac{-\operatorname{Im}\underline{N} - \sqrt{3}\operatorname{Re}\underline{N}}{3}; \quad Q_{AB} = \frac{-\operatorname{Im}\underline{N} + \sqrt{3}\operatorname{Re}\underline{N}}{3}. \quad (2.28)$$

В [76], [80] замість пульсуючої потужності <u>N</u> в пристроях СП

використано пульсуючу потужність $\underline{N}_2 = 3\dot{U}_1\dot{I}_2 = 0,5 \cdot (\dot{U}_{\alpha} + j\dot{U}_{\beta})(\dot{I}_{\alpha} - j\dot{I}_{\beta}),$ яка більш точно характеризує несиметрію навантажень.

В [73], [76], [70] для зрівноважених систем використано комплексну пульсуючу потужність N_q , яка є змінною складовою миттєвої реактивної потужності $q_0(t)$ трифазного зрівноваженого навантаження:

Недоліком використання пульсуючих потужностей є складність вимірювання їх дійсних та уявних складових. Більш зручним показником несиметричності режиму за зворотною послідовністю порівняно з пульсуючою потужністю з точки зору простоти та точності вимірювань є комплексна умовна потужність зворотної послідовності $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$ [76].

Формування вектора керування потужностей фаз компенсаційних СП здійснюється на основі виміряних значень умовної потужності зворотної послідовності $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$ за такими умовами [72], [76], [80]:

$$Q_{BC} = \frac{-2Q_2}{3}; \quad Q_{CA} = \frac{Q_2 - \sqrt{3}P_2}{3}; \quad Q_{AB} = \frac{Q_2 + \sqrt{3}P_2}{3}.$$
 (2.29)

Однак, як показують розрахунки, використання потужності $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$ не забезпечує швидкого повного симетрування навантажень. Крім того, на точність симетрування впливають статичні характеристики навантажень (залежності активної та реактивної потужностей навантажень від напруги у вузлі електричної мережі), що може призвести до зайвих перемикань ступенів секцій СП.

Значно кращим інформативним параметром є комплексна потужність зворотної послідовності навантаження $\underline{S}_{21} = 3U_1^2 \stackrel{*}{\underline{Y}}_{21}$ [79], [82], де \underline{Y}_{21} – комплексна провідність зворотної послідовності навантаження, яку можна методично достатньо точно визначити через ортогональні складники

трифазних напруги і струму в системі координат α, β [76]:

$$\underline{Y}_{21} \approx 0.5 \left(\frac{\dot{I}_{\alpha}}{\dot{U}_{\alpha}} - \frac{\dot{I}_{\beta}}{\dot{U}_{\beta}} \right), \tag{2.30}$$

однак з інструментальної точки зору реалізація такого пристрою є достатньо складною задачею.

Метою роботи [85] є пошук інформативного параметра, який підлягає більш простому вимірюванню та дозволить більш швидко і достатньо точно симетрувати навантаження за різних статичних характеристик вузлів навантажень від напруги. Як відомо [89], несиметричність режиму мережі можна також характеризувати комплексною умовною реактивною потужністю зворотної послідовності \underline{S}_{2q} .

Проведемо аналіз впливу на точність симетрування навантажень у випадку, якщо їх статичні характеристики апроксимувати степеневими залежностями [81–84]:

$$S_{BC}(k_P, k_Q) = P_{BC} \left(\frac{U_{BC}}{U_{HOM}} \right)^{k_P} + jQ_{BC} \left(\frac{U_{BC}}{U_{HOM}} \right)^{k_Q};$$

$$S_{CA}(k_P, k_Q) = P_{CA} \left(\frac{U_{CA}}{U_{HOM}} \right)^{k_P} + jQ_{CA} \left(\frac{U_{CA}}{U_{HOM}} \right)^{k_Q};$$

$$S_{AB}(k_P, k_Q) = P_{AB} \left(\frac{U_{AB}}{U_{HOM}} \right)^{k_P} + jQ_{AB} \left(\frac{U_{AB}}{U_{HOM}} \right)^{k_Q},$$
(2.31)

де P_{BC} , Q_{BC} , P_{CA} , Q_{CA} , P_{AB} , Q_{AB} – відповідні активні та реактивні міжфазні потужності навантажень *BC*, *CA*, *AB*; U_{BC} , U_{CA} , U_{AB} – фактичне значення міжфазних напруг *BC*, *CA*, *AB* у вузлі навантажень; k_P , k_Q –

характеристичні коефіцієнти, що визначають залежності потужностей навантаження від напруги (приймаємо діапазон їх зміни в таких межах: k_P =0...2, k_Q =0...4); U_{HOM} – номінальне значення напруги мережі.

На рис. 2.3 зображено залежності коефіцієнтів несиметрії струму та напруги за зворотною послідовністю у разі використання як інформативного параметра комплексної потужності зворотної послідовності <u>S</u>₂ навантаження з'єднаного в «трикутник» при різних статичних характеристик навантаження: <u>S</u>_{AB} = <u>S</u>_{CA} = 200 + *j*100, <u>S</u>_{BC} = 250 + *j*125 кВ·А. Залежності побудовано в функції характеристичних коефіцієнтів k_P , k_Q (цифрою 0 на графіках позначено залежності для k_P =0; 1 – для k_P =1; 2 – для k_P =2).



Рисунок 2.3 – Залежності коефіцієнтів несиметрії зворотною послідовністю струму та напруги у разі використання інформативного параметра потужності <u>S</u>2

На рис. 2.4 зображено аналогічні залежності коефіцієнтів несиметрії напруги та струму за зворотною послідовністю у разі використання як інформативного параметра комплексної потужності зворотної послідовності \underline{S}_{2q} .



Рисунок 2.4 – Залежності коефіцієнтів несиметрії зворотною послідовністю струму та напруги у разі використання інформативного параметра потужності <u>S</u>_{2a}

Як видно з наведених рисунків, використання в якості інформативного параметра комплексної потужності зворотної послідовності \underline{S}_{2q} забезпечує краще симетрування навантажень. За квадратичних статичних характеристик навантаження симетрування буде повним. Це пояснюється тим, що конденсаторні батареї СП самі мають квадратичні статичні характеристики. Якщо статичні характеристики навантажень відрізняються від квадратичних, то виникають помилки симетрування.

Розглянемо процес симетрування двох різнохарактерних навантажень, з'єднаного в «трикутник» з такими потужностями фаз: $\underline{S}_{AB} = \underline{S}_{CA} = 100 + j50$, $\underline{S}_{BC} = 150 + j75$ кВ·А, та з'єднаного в «зірку» з такими потужностями фаз: $\underline{S}_{A} = 100 + j50$, $\underline{S}_{B} = \underline{S}_{C} = 125 + j62,5$ кВ·А (режим *a*), $\underline{S}_{B} = 100 + j50$, $\underline{S}_{A} = \underline{S}_{C} = 125 + j62,5$ кВ·А (режим *b*), $\underline{S}_{C} = 100 + j50$, $\underline{S}_{A} = \underline{S}_{B} = 125 + j62,5$ кВ·А (режим *c*).

В табл. 2.1 наведені значення величин, які характеризують несиметрію навантажень в цих трьох режимах, причому під час розрахунків характеристичні коефіцієнти обох навантажень дорівнють одиниці.

Величина	Режим а	Режим b	Режим с
<u>N</u> , квар	-57,9+j38,7	-22,5+j9,7	-15,0+j42,9
\underline{N}_q , квар	-61,7+j40,9	-25,0+j9,7	-16,3+j45,1
<u>S</u> ₂₁ , квар	-61,6-j41,0	-25,0-j9,8	-16,1-j45,1
\underline{S}_2 , квар	-57,7-j39,0	-23,0-j8,7	-14,2-j44,1
\underline{S}_{2q} , квар	-61,7-j40,9	-24,5-j10,8	-16,8-j43,9

Таблиця 2.1 – Значення величин, які характеризують несиметрію навантажень

Для подальшого аналізу помилок симетрування за різних статичних характеристик навантаження, з'єднаного в «трикутник», спочатку виберемо режим *a* з найбільшою несиметрією (рис. 2.5). Характеристичні коефіцієнти навантаження, з'єднаного в «зірку», дорівнють одиниці.



Рисунок 2.5 – Залежності коефіцієнтів несиметрії струму та напруги за зворотною послідовністю за різнохарактерного навантаження (режим *a*) у разі використання як інформативного параметра потужності <u>S</u>₂*a*

В режимі b рівень несиметрії струмів та напруг залишається приблизно

таким же (рис. 2.6). Причому за характеристичних коефіцієнтів навантаження, що дорівнює одиниці та двом, неточність симетрування однакова.



Рисунок 2.6 – Залежності коефіцієнтів несиметрії струму та напруги за зворотною послідовністю за різнохарактерного навантаження (режим *b*) у разі використання як інформативного параметра потужності <u>S</u>_{2q}

Таким чином, використання в якості інформативного параметра комплексної потужності зворотної послідовності \underline{S}_{2q} забезпечує достатньо точне симетрування навантажень і у випадку різнохарактерного навантаження.

2.3 Моделювання статичного тиристорного компенсатора реактивної потужності за несиметричних різкозмінних навантажень

Несиметрія навантажень електротехнологічних установок спричинює виникнення несиметрії напруг у трифазній мережі, що негативно впливає на суміжних споживачів. Для таких установок передбачаються пристрої динамічної компенсації реактивної потужності на базі статичних тиристорних компенсаторів. В [86] пропонується алгоритм прямого керування СТК на основі виміряних поточних значень реактивної потужності, дійсної та уявної складових умовної потужності зворотної послідовності, за такими умовами:

$$Q_{BC}(t) = \frac{1}{3} [Q(t) - 2Q_2(t)];$$

$$Q_{CA}(t) = \frac{1}{3} [Q(t) + Q_2(t) - \sqrt{3}P_2(t)];$$

$$Q_{AB}(t) = \frac{1}{3} [Q(t) + Q_2(t) + \sqrt{3}P_2(t)],$$
(2.32)

де Q(t), $P_2(t)$, $Q_2(t)$ – поточні значення, відповідно, реактивної потужності, дійсного і уявного складників умовної потужності зворотної послідовності навантаження.

Для отримання інформації про активну та реактивну потужності, дійсну та уявну складові умовної потужності зворотної послідовності в [87], [88] використано підхід, що оснований на використанні інтегрування ортогональних миттєвих потужностей на ковзному інтервалі часу тривалістю пів періоду (*T*/2)

$$P(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^{t} p(t)dt; \quad Q(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^{t} q(t)dt; \quad (2.33)$$

$$P_2(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^{t} p_2(t)dt; \quad Q_2(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^{t} q_2(t)dt. \quad (2.34)$$

Складники миттєвих потужностей зворотної послідовності можуть бути визначені з використанням миттєвих умовних потужностей зворотної послідовності (2.27) [49].

Розглянуті вимірювальні перетворення покладено в основу системи керування розробленого в [86], [87] пристрою динамічної компенсації реактивної потужності на базі СТК. Пристрій динамічної компенсації реактивної потужності (рис. 2.8) складається з компенсатора (К), який містить приєднані до мережі паралельно навантаженню трифазні силові фільтри $(TC\Phi),$ кожен яких виконаний з послідовно з'єднаних 3 конденсаторів і фільтрових реакторів, увімкнених в зірку, та тиристорнореакторну групу (ТРГ), з'єднану в трикутник, а також із регулятора (Р), який складається з трьох датчиків напруги мережі (трансформатори напруги ТН), трьох датчиків струму мережі (трансформатори струму TC1), трьох датчиків струму навантаження (ТС2), блока суматорів (БС), до складу якого входять три суматори (С), чотирьох перетворювачів потужності (ПП), датчика зони керування (ДЗК), блока корекції (БКор) та блока керування (БКер), в кожен із трьох каналів якого входить синхронізатор (СР), що виконує функцію фазового підлаштування частоти, генератор функцій (ГФ), схема порівняння (СП) задає для фази тиристорно-реакторної групи зону керування, при якій діапазон зміни сигналу відповідає діапазону зміни потужності тиристорнореакторної групи, розподільник імпульсів (PI) та два вихідних каскади (ВК), мікроконтролера (МК).

Система містить два контури керування. В основі роботи першого контуру керування за збуренням покладено безітераційний алгоритм керування реактивною потужністю фаз у відповідності з формулами (2.48).

Другий контур керування за відхиленням базується на ітераційній процедурі корекції реактивної потужності з використанням значень:

$$\Delta Q_{BC} = \frac{1}{3} \left[-2Q_2 \right]; \ \Delta Q_{CA} = \frac{1}{3} \left[Q_2 - \sqrt{3}P_2 \right]; \ \Delta Q_{AB} = \frac{1}{3} \left[Q_2 + \sqrt{3}P_2 \right].$$
(2.35)



Рисунок 2.8 – Структурна схема пристрою динамічної компенсації реактивної потужності трифазного несиметричного навантаження

Пристрій працює з використанням трьох датчиків напруги мережі TH, трьох датчиків струму мережі TC1, трьох датчиків струму навантаження TC2 та блока суматорів БС формуються ортогональні напруги та струми

$$u_{\alpha}(t) = \frac{1}{3} (u_{AB}(t) - u_{CA}(t)); \quad u_{\beta}(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} u_{BC}(t);$$

$$i_{\alpha}(t) = i_{A}(t); \quad i_{\beta}(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{B}(t) - i_{C}(t)); \quad (2.36)$$

$$i_{\alpha}^{H}(t) = i_{A}^{H}(t); \quad i_{\beta}^{H}(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{B}^{H}(t) - i_{C}^{H}(t)),$$

де $u_{AB}(t)$; $u_{BC}(t)$; $u_{CA}(t)$ – лінійні напруги мережі (виміряні датчиками напруги мережі TH); – струми мережі (виміряні датчиками струму мережі TC1); $i_A^H(t)$; $i_B^H(t)$; $i_C^H(t)$ – струми навантаження, які вимірюють за допомогою датчиків струму навантаження TC2.

Керування пристроєм здійснюється згідно з інтегральними виразами реактивної потужності прямої послідовності навантаження та мережі, активної та реактивної умовних потужностей зворотної послідовності навантаження, які формуються на ковзному інтервалі часу тривалістю пів періоду напруги живлення. Формування активної та реактивної потужностей прямої послідовності, активної та реактивної умовних потужностей зворотної послідовності на ковзному інтервалі часу тривалістю пів періоду напруги живлення здійснюється перетворювачами потужності з використанням напруг і струмів ортогональної системи координат

$$P(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}i_{\alpha} + u_{\beta}i_{\beta})dt; \quad Q(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\beta}i_{\alpha} - u_{\alpha}i_{\beta})dt; \quad (2.37)$$

$$P_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\alpha}i_{\alpha} - u_{\beta}i_{\beta})dt; \quad Q_{2}(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^{t} (u_{\beta}i_{\alpha} + u_{\alpha}i_{\beta})dt. \quad (2.38)$$

Сигнал з трансформаторів напруги мережі ТН також надходить на синхронізатор СР та на перший вхід розподільника імпульсів РІ кожного з трьох каналів блока керування БКер. Вихід инхронізатор ра СР з'єднаний з першим входом генератора функцій ГФ, на другий вхід якого подається сигнал з блока корекції Бкор, вихід генератора функцій ГФ з'єднаний з першим входом схеми порівняння СП, сигнал з першого виходу якої подається на другий вхід розподільника імпульсів РІ, який через вихідні каскади ВК з'єднаний з відповідними керуючими електродами тиристорів ТРГ, сигнал з другого виходу схеми порівняння СП подається на датчик зони керування ДЗК, з якого надходить на другі входи блока корекції Бкор, перші входи якого з'єднані з виходами перетворювача потужності ПП мережі.

Кожний силовий фільтр ТСФ компенсатора К шунтує струми вищих гармонік зі спектру навантаження і тиристорно-реакторного кола ТРГ певної налаштованої частоти. Водночас здійснюється генерування реактивної потужності основної гармоніки Q_{FKU} .

В компенсаторі К на компенсуючий реактор кожної фази тиристорнореакторної групи ТРГ подається відповідна лінійна напруга при вмиканні відповідних тиристорів.

Реактивна потужність компенсатора залежить від кута керування α тиристорів. Аналітична залежність амплітудних значень першої гармоніки струму має такий вигляд:

$$I_{1m}(\gamma) \approx \frac{I_m(0)}{\pi} \cdot \left[\left(\pi - 2\alpha \right) - \sin(\pi - 2\alpha) \right].$$
(2.39)

Регулювальна характеристика СТК має такий вигляд [42]:

$$Q_K(\alpha) = Q_{FKU} - \frac{Q(\alpha = 0)}{\pi} [(\pi - 2\alpha) - \sin(\pi - 2\alpha)]. \qquad (2.40)$$

Для визначення швидкодії та аналізу стійкості процесу компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень за допомогою СТК, у середовищі *Simulink* пакету прикладних програм *Matlab*, виконано моделювання системи керування. Модель для дослідження з індуктивним несиметричним навантаженням подано на рис. 2.9.



Рисунок 2.9 – Схема дослідної моделі з несиметричним активно-індуктивним навантаженням

Модель складається з джерела живлення мережі (М), навантаження (Н), регулятора (Р), який складається з вимірювальних перетворювачів напруги та струму, блоку багатоканального вимірювального перетворення потужностей, блоку формування потужностей фаз, блоку Ш-регуляторів, системи

імпульсно-фазового керування, компенсатора (К), виконаного на основі тиристорно-регульованого силового блоку установки.

Графіки перехідних процесів активної та реактивної потужностей, дійсної та уявної складових умовної потужності зворотної послідовності у разі використання ПІ-регуляторів наведено, відповідно, на рис. 2.10 та рис. 2.11. Графіки перехідних процесів потужностей фаз симетрувального пристрою на виході і вході ПІ-регуляторів зображено на рис. 2.12.



Рисунок 2.10 – Графіки перехідних процесів активної та реактивної потужностей під час симетрування навантаження


Рисунок 2.11 – Графіки перехідних процесів складових умовної потужності



Рисунок 2.12 – Графіки перехідних процесів потужностей фаз симетрувального пристрою на виході і вході ПІ-регуляторів

Моделювання проводились при ввімкненні трифазного насиметричного навантаження в момент часу t=0, додатковому ввімкненні однофазного навантаження в момент часу t=0,1 с, вимкнення однофазного навантаження в момент часу t=0,25 с. Критерієм регулювання є мінімум умовної потужності зворотної послідовності $S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2}$.

Графіки перехідного процесу активної та реактивної потужностей при використання ПІ-регулятора для компенсації реактивної потужності за відхиленням наведено на рис. 2.13. Моделювання проводились при ввімкненні трифазного навантаження в момент часу t=0, ввімкненні додаткового трифазного навантаження в момент часу t=0,1 с, вимкнення додаткового навантаження в момент часу t=0,25 с. Критерієм регулювання є мінімум реактивної потужності.



Рисунок 2.13 – Графіки перехідних процесів під час регулювання реактивної потужності за відхиленням з використанням ПІ-регулятора

З графіків видно, що застосування ПІ-регуляторів забезпечує достатньо високу швидкодію регулювання. Однак наявність коливних процесів свідчить про необхідність блокування другого контуру системи керування на пів періоду напруги живлення при коротких замиканнях, різких накидах навантажень. Застосування такого блокування забезпечує процес регулювання із затримкою затримкою, яка незначно перевищує пів періоду напруги живлення.

З проведеного моделювання видно, що час запізнення пристрою компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень з керуванням за відхиленням приблизно становить 60 мс.

2.4 Аналіз помилок симетрування швидкозмінних навантажень за умов несинусоїдності

Одним з найкращих методів симетрування швидкозмінних навантажень є метод прямого формування реактивних потужностей фаз симетрувального пристрою на основі виміряних поточних значень дійсної та уявної складових комплексної умовної потужності зворотної послідовності, за умовами [86], [87], [88]:

$$b_{BC}(t) = \frac{1}{3 \cdot U^2} \left(-2Q_2(t) \right);$$

$$b_{CA}(t) = \frac{1}{3 \cdot U^2} \left(Q_2(t) - \sqrt{3}P_2(t) \right);$$

$$b_{AB}(t) = \frac{1}{3 \cdot U^2} \left(Q_2(t) + \sqrt{3}P_2(t) \right),$$

(2.41)

де *U* – діюче значення напруги, яке в залежності від способу керування може бути прийняте рівним номінальній або фактичній напрузі; *P*₂, *Q*₂ –

дійсний та уявний складники комплексної умовної потужності зворотної послідовності навантаження $\underline{S}_{i2} = P_{i2} + jQ_{i2} = 3\dot{U}_1 \overset{*}{I}_2$.

Для отримання інформації про складники $P_2(t)$, $Q_2(t)$ умовної потужності зворотної послідовності використано підхід, що оснований на інтегруванні миттєвих потужностей на ковзному інтервалі часу тривалістю пів періоду (T/2) [89], [90]:

$$P_2(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^{t} p_2 dt; \quad Q_2(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^{t} q_2(t) dt, \quad (2.42)$$

де $p_2(t), q_2(t)$ – миттєві складники умовної потужності зворотної послідовності.

За використання комплексної умовної потужності зворотної послідовності навантаження $\underline{S}_{i2} = P_{i2} + jQ_{i2} = 3\dot{U}_1 I_2$ як інформативного параметра систем керування вирази складників миттєвих потужностей можна записати як півсуми миттєвих умовних потужностей [91]:

$$p_{i2} = \frac{1}{2} \left(p_2 + p_{2q} \right); \ q_{i2} = \frac{1}{2} \left(q_2 + q_{2q} \right). \tag{2.43}$$

Остаточно вирази миттєвих потужностей можна записати у такому вигляді:

$$p_{i2} = \frac{1}{2} \left(u_{\alpha} - u'_{\beta} \right) \left(i_{\alpha} + i'_{\beta} \right); \ q_{i2} = \frac{1}{2} \left(u'_{\alpha} + u_{\beta} \right) \left(i_{\alpha} + i'_{\beta} \right).$$
(2.44)

Зважаючи на складність вимірювальних перетворень, необхідність застосування перетворення фазового зсуву на -90 електричних градусів

кожної гармоніки напруги та струму, похибки, що зумовлені несинусоїдністю, можуть суттєво впливати на точність симетрування швидкозмінних навантажень.

Спочатку проаналізуємо помилки симетрування навантажень за наявності вищих гармонік струму у разі, якщо струм навантаження містить п'яту (20%) та сьому (14%) гармоніки, а несиметрія струму за зворотною послідовністю складає 5,3%. які забезпечують стійкість систем керування.

На рис. 2.14 наведено залежності миттєвих активної та реактивної потужностей та складників миттєвих потужностей зворотної послідовності. З наведених залежностей випливає, що миттєві активна та реактивна потужності за умов несиметрії та несинусоїдності струму коливаються з частотою, що зумовлена вищими гармоніками, а їх обвідні, які мають синусоїдний характер, характеризують несиметрію навантажень.



Рисунок 2.14 – Залежності складників миттєвих потужностей зворотної послідовності

Інформативними є постійні складники миттєвих величин. Після усереднення миттєвих величин отримано такі значення: $P_2 = 37,52$ квар, $Q_2 = 21,64$ квар. Дійсне значення цих складників $P_2 = 37,50$ квар, $Q_2 = 21,65$ квар. У даному випадку похибки, що зумовлені несинусоїдністю струмів, малі. Порівняно з системами керування, принцип дії яких оснований на використанні струмів і напруг в системі dq-координат без виділення основних гармонік, похибки, що зумовлені несинусоїдністю, зменшуються приблизно на порядок (відповідно 0,05 % та 1 %).

Розглянемо несиметричний несинусоїдний режим, за якого п'ята та сьома гармоніки струму становлять відповідно 20 % та 14 % від основної гармоніки, а напруги фаз крім першої гармоніки містять п'яту та сьому гармоніки, вміст кожної з яких становить 2 % від основної гармоніки (вказаний рівень вищих гармонік напруги відповідає відносному опору мережі 0,02 щодо потужності навантаження), і одночасно напруга і струм фази C менші на 5 % від значення напруг і струмів інших фаз (коефіцієнти несиметрії напруг і струмів за зворотною та нульовою послідовностями рівні і становлять 1,7 %).

На рис. 2.15 наведено залежності складників миттєвих умовних потужностей зворотної послідовності з помітним впливом вищих гармонік. Тобто, за наявності вищих гармонік струму та напруги появляються комбінаційні складники, які спотворюють синусоїдну форму дійсного та уявного складників миттєвих умовних потужностей зворотної послідовності.

Усереднення миттєвих величин дає такі значення: $P_2 = 12,21$ квар, $Q_2 = -7,03$ квар. Задане значення цих складників $P_2 = 12,29$ квар, $Q_2 = -7,10$ квар. У даному випадку похибки, що зумовлені несинусоїдністю напруг і струмів, приблизно дорівнюють 1 %.



Рисунок 2.15 – Залежності складників миттєвих потужностей зворотної послідовності

Оскільки, згідно з умовами (2.41), помилки симетрування приблизно дорівнюють похибкам вимірювань, то вони теж будуть на рівні 1 %. За таких похибок вимірювальні перетворювачі умовних потужностей зворотної послідовності можна рекомендувати в системах керування симетрувальними пристроями за збуренням.

Однак необхідність виконання фазових зсувів на 90 електричних градусів усіх вищих гармонік ортогональних складників напруг і струмів вимагає додаткового аналізу похибок, що зумовлені неточністю перетворювачів фазового зсуву, які повинні в ідеальному випадку реалізовувати перетворення Гільберта. Значення цих похибок залежить від вмісту вищих гармонік як напруг, так і струмів.

Найбільші значення похибок будуть у разі використання найпростішого алгоритму цифрової обробки інформації з затримкою напруг в часі на чверть періоду [60] без урахування фазових зсувів вищих гармонік. Після усереднення миттєвих величин за вказаним алгоритмом отримано такі значення: $P_2 = 12,13$ квар, $Q_2 = -6,69$ квар. У даному випадку особливо

збільшується похибка вимірювання уявного складника умовної потужності зворотної послідовності навантаження. Похибка у цьому випадку приблизно становить 5,7 % відносно цього складника. Таке значення похибки вимірювань, що зумовлена невідповідністю фазових зсувів вищих гармонік напруг і струмів куту 90 електричних градусів, може вважатися допустимим лише для систем керування симетрувальними пристроями за відхиленням.

2.5 Висновки до розділу 2

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 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..

3. 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.

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...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.

РОЗДІЛ З

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПРЯМОГО КЕРУВАННЯ СТРУМОМ СТАТИЧНИХ СИНХРОННИХ КОМПЕНСАТОРІВ

3.1 Удосконалення системи *dq*-керування струмом розподільних СТАТКОМ

Умови симетрування струмів за синусоїдних напруг і струмів отримують з критеріїв повної або часткової компенсації реактивної складової струму прямої послідовності \dot{I}_1 та обох складових струмів зворотної \dot{I}_2 та нульової \dot{I}_0 послідовностей навантаження. Комплексні струми фаз компенсатора можуть бути визначені за однією з формул [72]:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a} \\ \dot{I}_{b} \\ \dot{I}_{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^{2} & a & 1 \\ a & a^{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -jk_{1}\operatorname{Im}\dot{I}_{1} \\ -k_{2}\dot{I}_{2} \\ -k_{0}\dot{I}_{0} \end{bmatrix};$$
(3.1)

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a} \\ \dot{I}_{b} \\ \dot{I}_{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{A} \\ \dot{I}_{B} \\ \dot{I}_{C} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^{2} & a & 1 \\ a & a^{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \operatorname{Re} \dot{I}_{1} + j(1-k_{1})\operatorname{Im} \dot{I}_{1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad (3.2)$$

де $a = e^{j120^{\circ}} - \phi$ азовий оператор; $k_1, k_2, k_0 -$ ступені компенсації, відповідно, реактивної потужності, струму зворотної та нульової послідовностей.

Визначення струмів компенсатора за формулою (3.1) відноситься до методу прямого керування струмом СТАТКОМ. Визначення струмів компенсатора за формулою (3.2) відноситься до опосередковано визначення струмів СТАТКОМ, що реалізовано, наприклад, в методі синхронного детектування.

Для отримання миттєвих струмів прямої та зворотної послідовностей можуть бути використані лінійні перетворення миттєвих синусоїдних струмів [93], [94], [95]:

$$i_p(t) = \frac{1}{3} (i_A(t) + i_B(t + T/3) + i_C(t + 2T/3));$$
(3.3)

$$i_n(t) = \frac{1}{3} \left(i_A(t) + i_B(t - T/3) + i_C(t - 2T/3) \right);$$
(3.4)

та

$$i_{1}(t) = \frac{1}{\sqrt{6}} \left(i_{\alpha}(t) - i'_{\beta}(t) \right);$$
(3.5)

$$i_{2}(t) = \frac{1}{\sqrt{6}} \left(i_{\alpha}(t) + i'_{\beta}(t) \right), \tag{3.6}$$

де
$$i_{\alpha}(t) = \frac{1}{\sqrt{6}} \left(2i_A(t) - i_B(t) - i_C(t) \right), \quad i'_{\beta}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(i'_B(t) - i'_C(t) \right) -$$
миттєві

струми в системі αβ-координат.

В [95] розглянуто несинусоїдний режим, за якого струм навантаження містить третю, п'яту та сьому гармоніки. В обох режимах струми $i_1(t)$ та $i_p(t)$ відрізняються незначно. Однак струм $i_1(t)$ містить першу та сьому гармоніки, а струм $i_p(t)$ – першу, п'яту та сьому гармоніки. Струм $i_2(t)$ в симетричному режимі містить п'яту гармоніку, а струм $i_n(t)$ – відсутній. За несиметричного режиму узагальнений миттєвий струм $i_2(t)$ містить струми першої та п'ятої гармоніки, а струм $i_n(t)$ – тільки струм першої гармоніки, що зумовлений несиметрією навантажень. Такий характер розподілення гармонік не дозволяє формувати компенсаційні струми безпосередньо без проміжного перетворення в синусоїдний несиметричний сигнал. Після останнього перетворення можна використати будь-яке з двох наведених перетворень.

Оскільки перетворення (3.5), (3.6) є достатньо складними в реалізації, то їх можна замінити наближеними виразами:

$$i_1(t) \approx \frac{1}{\sqrt{6}} (i_{\alpha}(t) - i_{\beta}(t - T/4));$$
 (3.7)

$$i_2(t) \approx \frac{1}{\sqrt{6}} (i_\alpha(t) + i_\beta(t - T/4)),$$
 (3.8)

де
$$i_{\beta}(t-T/4) = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_B(t-T/4) - i_C(t-T/4)).$$

Від струмів прямої та зворотної послідовностей можна перейти до системи *dq*-координат:

$$i_{d1}(t) = i_1(t) \cdot \sin \omega t; \ i_{q1}(t) = i_1(t) \cdot \cos \omega t;$$
 (3.9)

$$i_{d2}(t) = i_2(t) \cdot \sin \omega t; \ i_{q2}(t) = i_2(t) \cdot \cos \omega t.$$
 (3.10)

На рис. 3.1 зображена модель блока керування СТАТКОМ з використання i_{d2} та i_{q2} для симетрування синусоїдних струмів навантаження.



Рисунок 3.1 – Блок керування СТАТКОМ з використання *i*_{d2} та *i*_{q2} для симетрування синусоїдних струмів навантаження

Алгоритм формування миттєвих струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей зображено на рис. 3.2. В основу алгоритму покладено формули (3.6), (3.7).



Рисунок 3.2 – Алгоритм формування миттєвих струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей

В подальшому здійснюється визначення i_{d2} та i_{q2} , їх інтегрування на ковзному інтервалі часу тривалістю пів періода, виділення пульсуючого струму і зворотний перехід до системи $\alpha\beta$ -координат, а потім до системи *abc*-координат (див. рис. 3.1) за формулами (1.17),...,(1.20).

3.2 Розробка методу прямого керування струмом розподільних СТАТКОМ

Перевагою СТАТКОМ є здатність генерувати струм будь-якої фази відносно напруги мережі[96]. В результаті СТАТКОМ може одночасно виконувати такі функції:

- 1) компенсація вищих гармонік;
- 2) симетрування навантажень за зворотною послідовністю;
- 3) симетрування навантажень за нульовою послідовністю;
- 4) компенсація реактивної потужності.

Для компенсації вищих гармонік пропонується метод прямого формування струмів фаз СТАТКОМ, згідно з яким за фазними несинусоїдними струмами навантаження визнаються 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.

Реалізація методу прямого керування струмом СТАТКОМ зображена на рис. 3.3. На схемі позначено *PLL1* – блок однофазних фазочастотних автоналагоджувачів частоти; *RMS1* – блок однофазних перетворювачів дійсних значень. Крім того, на схемі позначено помножувач і підсумовувач.



Рисунок 3.3 – Реалізація методу прямого керування струмом СТАТКОМ для фільтрування вищих гармонік

В блоці *PLL*1 за фазними несинусоїдними струмами навантаження формуються синусоїдні одиничні сигнали з початковими фазами, які дорівнюють початковим фазам несинусоїдних струмів. В блоці *RMS*1 визнаються діючі значення несинусоїдних струмів навантаження. Після перемноження цих величин забезпечується формування синусоїдних сигналів, що дорівнюють основній гармоніці несинусоїдних струмів фаз навантаження. На виході формується різниця струмів навантаження і сформованих синусоїдних струмів. Цей сигнал використовується для компенсації вищих гармонік.

На рис. 3.4 зображено блок керування СТАТКОМ на основі прямого керування струмом для фільтрації вищих гармонік та використання i_{d2} та i_{q2} для симетрування навантаження.

На схемі позначено: PLL1 — блок трьох однофазних фазочастотних автоналагоджувачів частоти; RMS1 — блок трьох однофазних перетворювачів ефективних значень; перетворювачі координат «*a*,*b*,*c*/1,2,0», «1,2/*d*,*q*», «*d*,*q*/ $\alpha\beta$ », « $\alpha\beta0/a,b,c$ »; БО — блок обмеження; БІ — блок інтегрування; PLL2 — блок трифазного фазочастотного автоналагоджувача частоти; ШІМ-контролер.

В блоці PLL1 формуються синусоїдні одиничні сигнали. В блоці RMS1 визнаються діючі значення несинусоїдних струмів навантаження. Перемноження цих величин забезпечує формування синусоїдних сигналів, що дорівнюють основній гармоніці несинусоїдних струмів фаз навантаження. На виході формується сигнал для компенсації вищих гармонік.

Проміжний сигнал з виходу помножувача пропорційний основній гармоніці фазних струмів навантаження. Останній пропонується використати для симетрування навантажень за зворотною та нульовою послідовностями.

В подальшому виконуються такі дії:

1. Перетворення синусоїдних струмів в систему *d*,*q*-координат;

2. Інтегрування струмів прямої та зворотної послідовностей, представлених в системі *d*,*q*-координат;

3. Підтримання на заданому рівні напруги в колі постійного струму в статичних і динамічних режимах шляхом визначення активної потужності, яку повинен генерувати або споживати СТАТКОМ.

4. Знаходження бажаної залежності компенсаційного струму СТАТКОМ в системі αβ-координат та в системі фазних *a,b,c*-координат.

5. Формування імпульсів керування транзисторами інвертора напруги.



Рисунок 3.4 – Блок керування СТАТКОМ на основі прямого керування струмом для фільтрації вищих гармонік та використання *i*_{d2} та *i*_{q2} для симетрування навантаження

В табл. 3.1 наведено результати розрахунку несиметричного режиму мережі з заземленою нейтраллю, а також значення компенсаційних струмів, які повинні бути сформовані СТАТКОМ для симетрування навантажень за k=1 (повна компенсація реактивної потужності) та k=0 (відсутність компенсації реактивної потужності).

Струми	Струми	Розрахункові струми	Розрахункові струми
фаз	навантаження, А	СТАТКОМ (<i>k</i> =1), А	СТАТКОМ (<i>k</i> =0), А
Струм	87,0- <i>j</i> 43,5	13,6+ <i>j</i> 43,5	13,6– <i>j</i> 6,8
фази А			
Струм	$(110,1-i47,5) e^{-j120^{\circ}}$	$(-9,5+j47,5)e^{-j120^{\circ}}$	$(-9,5-j2,9)e^{-j120^{\circ}}$
фази В			
Струм	$(104.8-i60.0) e^{j120^{\circ}}$	$(-4,2+i60,0) e^{j120^{\circ}}$	$(-4,2+i9,7) e^{j120^{\circ}}$
фази С	(-)- J -) - / -	() J / -	

Таблиця 3.1 – Струми навантаження і СТАТКОМ

Моделювання роботи СТАТКОМ виконано з використанням схеми трирівневого трифазного мостового інвертора з частотою широтноімпульсної модуляції 10 кГц в режимі 180-градусної провідності вентилів.

Часові залежності струмів фаз СТАТКОМ для випадку повної компенсації реактивної потужності наведено на рис. 3.5, струму нульової послідовності – на рис. 3.6. Пікові значення струму нейтралі систематично досягають 3 А, що свідчить про недостатність такого виконання ШІМ, незважаючи на високу частоту сигнала модуляції. Створення більш досконалих ШІМ присвячені праці [98], [99], [100] [101] і не входить в задачі цього дослідження. Тому в подальшому розгляд обмежено гістерезисною системою керування.



Рисунок 3.6 – Часові залежності струму нульової послідовності

На рис. 3.7, рис. 3.8 представлені часові залежності струмів нелінійного навантаження та струмів мережі за наявності СТАТКОМ, реалізованого на основі прямого керування струмом.



Рисунок 3.7 – Струми нелінійного навантаження



Рисунок 3.8 – Струми мережі за несинусоїдного навантаження

В табл 3.2 наведено результати моделювання СТАТКОМ з прямим керуванням струмом в системі *dq*-координат.

Таблиця 3.2 – Характеристика результатів дослідження СТАТКОМ з прямим керуванням струмом в системі *dq*-координат

Значення фізичних величин для			
несиметричного режиму	I_A	I_B	I_C
Коефіцієнт нелінійного спотворення			
струмів навантаження (<i>THD</i> _I , %)	11,29	11,75	11,75
Коефіцієнт нелінійного спотворення			
струмів мережі (<i>THD</i> _I , %)	0,41	0,41	0,40

Як випливає з табл. 3.2, якість компенсації вищих гармонік СТАТКОМ з прямим керуванням струмом в системі *dq*-координат досить висока.

На рис. 3.9 зображено спрощену систему прямого керування струмом СТАТКОМ, яка рекомендується для практичного застосування.



Рисунок 3.9 – Блок керування СТАТКОМ на основі спрощеної системи

прямого керування струмом

3.3 Аналіз динамічних помилок розподільних СТАТКОМ у випадку коливань навантаження

Аналіз помилок статичного синхронного компенсатора, зумовлених неточністю формування задавальних струмів, проводиться у випадку збільшення та зменшення несиметричного активно-індуктивного нелінійного навантаження (рис. 3.10) [102].



Рисунок 3.10 – Часові залежності зміни активної та реактивної потужностей навантаження

Основними показниками ефективності роботи СТАТКОМ є мінімальні значення струмів зворотної та нульової послідовностей основної гармоніки, а також струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей вищих гармонік.

На рис. 3.11 показано залежності струмів зворотної та нульової послідовностей основної гармоніки: а) до увімкнення СТАТКОМ; б) після увімкнення СТАТКОМ, а на рис. 3.12 – струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей 3 гармоніки: а) – до увімкнення СТАТКОМ, б) після увімкнення СТАТКОМ.



Рисунок 3.11 – Залежності струмів зворотної та нульової послідовностей основної гармоніки: а) до увімкнення СТАТКОМ б) після увімкнення СТАТКОМ



Рисунок 3.12 – Залежності струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей 3-ї гармоніки: а) до увімкнення СТАТКОМ б) після увімкнення СТАТКОМ

3 наведених рисунків видно, ЩО помилки симетрування та фільтрування вищих гармонік є досить істотними і 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 навантаження. Причиною помилок є інерційність формування зміни потужностей. Помилки може характеризувати залишковий струм зворотної послідовності (рис. 3.13).



Рисунок 3.13 – Залишковий струм зворотної послідовності

Динамічні помилки відсутні у разі фіксування активної та реактивної потужностей на певних середніх значеннях, але при цьому СТАТКОМ повинен генерувати (споживати) активну і реактивну потужності.

На рис. 3.14 показано графіки необхідного споживання за малих навантажень і генерування за великих навантажень активної та реактивної потужностей в процесі кондиціонування якості електроенергії (симетрування навантажень та фільтрування вищих гармонік).



Рисунок 3.14 – Залежності споживаних та генерованих потужностей СТАТКОМ у разі фіксування активної та реактивної потужностей

Необхідність споживання та генерування активної та реактивної потужностей в процесі кондиціонування якості електроенергії приводить до необхідності збільшення потужності СТАТКОМ і, відповідно, додаткових матеріальних витрат.

3.4 Удосоконалення системи прямого керування струмом за істотного рівня несиметрії

В [103] було проаналізовано встановлення обмежень функціонування окремих фунцій СТАТКОМ і проаналізовано їх необхідність.

На відміну від систем керування, що базуються на *pq*- та *dq*-теоріях, в яких немає можливості розділити компенсаційні струми СТАТКОМ від несиметрії або несинусоїдності, внаслідок чого дані системи керування при значних рівнях несиметрії відключаються і не виконують своїх функцій. За деяких навантажень струми несиметрії можуть бути досить тривалими і тому актуальною задачею є необхідність їх обмежити за функціонування пристрою СТАТКОМ.

Запропонована система прямого керування струмом дозволяє в певних режимах обмежувати симетрування та компенсацію реактивної потужності.

На рис. 3.15 зображено структуру обмеження окремих функцій СТАТКОМ. На схемі: блок 1 – визначення синусоїдного струму фаз навантаження (див. рис. 3.3); блоки 2, 3 – визначення симетрувальних та реактивних струмів навантаження (див. рис. 3.1). Обмеження здійснюється блоками за допомогою введення коефіцієнтів підсилення в блоці обмежень (БО), за зворотною та нульовою послідовностями і відповідного зменшення компенсувально-симетрувальних струмів.



Рисунок 3.15 – Структура обмежень окремих функцій СТАТКОМ, основаного на методі прямого керування струмом

Діючі значення задавальних струмів СТАТКОМ порівнюється із номінальних струмом транзисторних перетворювачів і при перевищенні номінального струму розраховується коефіцієнти підсилення для обмеження функції симетрування (компенсації реактивної потужності). Це дозволяє ефективніше використовувати потужність СТАТКОМ.

3.5 Висновки до розділу 3

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

2. Обгрунтовано 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.

3. 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.

4. Динамічні помилки симетрування навантажень та фільтрування вищих гармонік за допомогою СТАТКОМ залежать від швидкості зміни навантаження. За великих швидкостей збільшення та зменшення навантажень помилки істотні. 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.

РОЗДІЛ 4

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СТАТИЧНИХ КОМПЕНСАТОРІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В МЕРЕЖАХ З ЗАЗЕМЛЕНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

4.1 Моделювання розподільних СТАТКОМ в системі рq-координат

В розподільних мережах із швидкозмінними несиметричними навантаженнями в останні роки знаходять застосування статичні синхронні компенсатори СТАТКОМ [104 – 106], які дозволяють в мережах із заземленою нейтраллю поряд з симетруванням струму зворотної послідовності забезпечити симетрування струму нульової послідовності, який може спричинювати різке збільшення напруги нульової послідовності та додаткових втрат електроенергії.

Характеристику моделі вузла навантажень розподільної мережі 0,38 кВ наведено в табл 4.1 та на рис. 4.1.

	Номінальна напруга, В	380	
Manaya	Частота, Гц	50	
Мережа	Опір ліній, мОм	18,4+ <i>j</i> 17,1	
	Опір нейтралі, мОм	10+ <i>j</i> 6	
Нелінійне навантаження	Опір навантаження постійного	12	
(випрямляч, схема Ларіонова)	струму, Ом		
Симетричне лінійне	оччне лінійне		
навантаження	Опр навантаження, Ом	10+55	
Несиметричне лінійне			
навантаження (увімкнення в		3+ <i>j</i> 3	
момент часу $t_1 = 0.06$ с,	Опір однофазного		
вимкнення в момент часу	навантаження (фаза А)		
<i>t</i> ₂ =0,14 c)			

	1	37			•	••	•
		Xon	O I/TOI	DIJOTIJIO		TIIOI	MOTOTI
таолиця ч		лар	aniu	UNCINKA	ЛОСЛІ	лног	модели
					-		



Рисунок 4.1 – Схема дослідної моделі вузла мережі

Під час моделювання розглянуто граничний несиметричний режим роботи СТАТКОМ для випадку, коли струм фази *A* більше ніж в чотири рази перевищує струми фаз *B* і *C*, кут зсуву фаз між напругами і струмами становить приблизно 45 градусів.

Критеріями ефективності системи керування прийнято: сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень струмів, несиметричність струмів. Якість перехідного режиму при зміні навантаження можна характеризувати коефіцієнтом перерегулювання та тривалістю перехідного процесу. Ще одним критерієм якості перехідного режиму є значення пульсуючих активної та реактивної потужностей, які інтегрально характеризують несиметрію та гармонічні спотворення струмів і напруг.

Розглянемо модель системи керування СТАТКОМ на основі *pq*-теорії миттєвої потужності в середовищі МАТLAB Simulink (рис. 4.2). Модель системи керування СТАТКОМ складається з таких основних блоків: блок вимірювання параметрів навантаження; блок обчислення струмів СТАТКОМ; блок гістерезисного керування.

На рис. 4.3 зображена модель блока вимірювання параметрів навантаження. На виході блока формуються миттєві активна та реактивна

потужності пульсацій, напруги в системі αβ-координат, струм нульової послідовності.

Вхідними змінними в роботі даної системи управління служать миттєві значення напруг мережі та фазних струмів навантаження.



Рисунок 4.2 – Модель СТАТКОМ на основі ра-теорії миттєвої потужності



Рисунок 4.3 – Блок вимірювання параметрів навантаження СТАТКОМ на основі рq-теорії миттєвої потужності

На рис. 4.4 зображена модель блока обчислення фазних струмів СТАТКОМ на основі *pq*-теорії миттєвої потужності.



Рисунок 4.4 – Модель блока обчислення фазних струмів СТАТКОМ на основі *pq*-теорії миттєвої потужності

В блоці обчислення фазних струмів СТАТКОМ виконуються такі дії.

1. Підтримання на заданому рівні напруги в колі постійного струму в статичних і динамічних режимах шляхом визначення активної потужності, яку повинен генерувати або споживати СТАТКОМ.

2. Знаходження бажаної залежності компенсаційного струму СТАТКОМ в системі αβ-координат та в системі фазних координат.

Активна та реактивна потужності мережі, навантаження та СТАТКОМ зображені на рис. 4.5. Реактивна потужність навантаження Q=25,8 кВ·Ар, мережі Q=0,4 кВ·Ар. Отже, точність компенсації реактивної потужності висока.



Рисунок 4.5 – Активна, реактивна потужність мережі, навантаження та СТАТКОМ

На рис. 4.6,...,4.8 представлені часові залежності струмів, відповідно, навантаження, мережі та СТАТКОМ, реалізованого на основі *pq*-теорії миттєвої потужності у разі виконання функцій компенсації реактивної потужності, симетрування навантажень за зворотною та нульовою послідовностями і компенсації вищих гармонік.



Рисунок 4.6 – Струми несиметричного несинусоїдного навантаження



Рисунок 4.7 – Струми мережі за несиметричного несинусоїдного навантаження



Рисунок 4.8 – Струми СТАТКОМ за несиметричного несинусоїдного навантаження

В залежності від моменту накиду навантаження струми мережі істотно відрізняються. Найбільшим є перерегулювання у разі накиду навантаження в момент, коли струм фази A переходить через нульове значення (рис. 4.7). Причому перерегулювання виникає по фазі B ($k_{\text{пер}}=1,05$).

У разі накиду навантаження в момент 0,1025 с (кут 45 град) (рис. 4.9) та 0,065 (кут 90 град) (рис. 4.10) перерегулювання зменшується. Однак при цьому збільшуються пульсації струмів і, відповідно, пульсації потужностей (рис. 4.11). Рівень пульсацій струмів мережі порівняно великий. Потужність пульсацій навантаження $N_p+jN_q=16,65+j16,75$ кВ·А, мережі $N_p+jN_q=2,8+j3,05$ кВ·А.



Рисунок 4.9 – Струми мережі за накиду несиметричного несинусоїдного навантаження тривалістю 4 періоди в момент часу 0,1025 с (кут 45 град)



Рисунок 4.10 – Струми мережі за накиду несиметричного несинусоїдного навантаження тривалістю 4 періоди в момент часу 0,105 (кут 90 град)



Рисунок 4.11 – Потужності пульсацій СТАТКОМ, реалізованого на основі *pq*-теорії

Струми нульового проводу фільтра, навантаження та мережі зображено на рис. 4.12. Максимальні значення струмів нульового проводу навантаження і СТАТКОМ досягають 60 А. Максимальні значення імпульсів струму в нульовому проводі мережі після накиду і скиду навантаження досягають 30 А. Значення імпульсних струмів залежать від швидкості зміни однофазного навантаження.



Рисунок 4.12 – Струми нульового проводу навантаження, СТАТКОМ та

мережі

В табл. 4.3 наведено результати моделювання СТАТКОМ, реалізованого на основі *pq*-теорії миттєвої потужності, у разі виконання функцій компенсації реактивної потужності, симетрування навантажень за зворотною та нульовою послідовностями і компенсації вищих гармонік.

Таблиця 4.3 – Характеристика результатів моделювання СТАТКОМ, реалізованого на основі *pq*-теорії миттєвої потужності

Значення фізичних величин для			
несиметричного режиму	I_A	I_B	I_C
Діючі значення струмів навантаження			
(I_L, \mathbf{A})	83,62 e ^{-j34,8}	41,15 e ^{j216,6}	41,15 e ^{j96,6}
Коефіцієнт нелінійного спотворення			
струмів навантаження (<i>THD</i> _I , %)	5,78	11,75	11,75
Діючі значення струмів мережі (<i>I_s</i> , A)	48,78 e ^{-j0,3}	48,77 e ^{j239,5}	48,56 e ^{j119,6}
Коефіцієнт нелінійного спотворення			
струмів мережі (<i>THD</i> _I , %)	0,83	0,83	0,88

Як випливає з наведеної таблиці, точність симетрування навантажень та якість компенсації вищих гармонік, яке характеризується значенням коефіцієнта нелінійних спотворень струмів фаз мережі *THD_I*, недостатні.

4.2 Моделювання розподільних СТАТКОМ в системі dq-координат

Модель системи керування СТАТКОМ в системі *dq*-координат (рис. 4.13) складається з таких же основних блоків: блок вимірювання параметрів навантаження; блок обчислення струмів СТАТКОМ; блок гістерезисного керування.



Рисунок 4.13 – Модель системи прямого керування струмом СТАТКОМ в системі *dq*-координат

На рис. 4.14 зображена модель блока вимірювання параметрів навантаження. На входи блока визначення параметрів навантаження подаються миттєві значення фазних напруг мережі і струмів навантаження.

Миттєві значення фазних напруг мережі подаються на блок PLL (фазової автопідстройки частоти), на виході якого формуються сигнали $u(t) = \sin(\omega t + \gamma), u'(t) = \cos(\omega t + \gamma), тут \gamma - помилка визначення за допомогою$ *PLL*моменту переходу напруги фази*A*через нульове значення. За допомогою цих сигналів на виході блока вимірювання параметрів навантаження формуються струми навантаження в системі*d*,*q*-координат, струм нульової послідовності.

На рисунку 4.15 зображена модель блока обчислення фазних струмів СТАТКОМ з керуванням в системі *dq*-координат.


Рисунок 4.14 – Блок вимірювання струмів навантаження СТАТКОМ з керуванням в системі *dq*-координат



Рисунок 4.15 – Модель блока обчислення фазних струмів СТАТКОМ з керуванням в системі *dq*-координат

Активна та реактивна потужності мережі, навантаження та СТАТКОМ зображені на рис. 4.16. Реактивна потужність навантаження Q=26,1 кВ·Ар, мережі Q=-1,7 кВ·Ар.



Рисунок 4.16 – Активна, реактивна потужність мережі, навантаження та активного фільтра відповідно

На рис. 4.17 представлені часові залежності струмів мережі за наявності СТАТКОМ, реалізованого з керуванням в системі dq-координат. Як і раніше, найбільшим є перерегулювання у разі накиду навантаження в момент, коли струм фази A має кут 0 град. Перерегулювання виникає по фазі B ($k_{пер}=1,05$).

В табл 4.4 наведено результати моделювання СТАТКОМ з керуванням в системі dq-координат у разі виконання функцій компенсації реактивної потужності, симетрування навантажень за зворотною та нульовою послідовностями і компенсації вищих гармонік. Розрахунки проведені для $\gamma = 0$.



Рисунок 4.17 – Струми мережі за несиметричного несинусоїдного навантаження

Таблиця 4.4 – Характеристика результатів дослідження СТАТКОМ в системі *dq*-координат для $\gamma = 0$

Значення фізичних величин для			
несиметричного режиму	I_A	I_B	I_C
Діючі значення струмів навантаження			
(I_L, \mathbf{A})	83,62 e ^{-j34,8}	41,15 e ^{j216,6}	41,15 e ^{j96,6}
Коефіцієнт нелінійного спотворення			
струмів навантаження (<i>THD</i> _I , %)	5,78	11,75	11,75
Діючі значення струмів мережі (<i>I</i> _S , A)	48,52 $e^{-j0,1}$	48,52 e ^{j239,9}	48,59 e ^{j119,9}
Коефіцієнт нелінійного спотворення			
струмів мережі (<i>THD</i> ₁ , %)	0,31	0,31	0,33

Як випливає з табл. 4.4, точність симетрування навантажень та якість компенсації вищих гармонік порівняно з попереднім варіантом значно кращі. Потужність пульсацій навантаження $(N_p + jN_q = 16,65 + j16,75 \text{ кB} \cdot \text{A}, \text{ мережі}$ $N_p + jN_q = 1,650 + j1,99 \text{ кB} \cdot \text{A}.$

У разі накиду навантаження в момент 0,1025 с (кут 45 град) (рис. 4.18) та 0,105 (кут 90 град) (рис. 4.19) перерегулювання зменшується. Однак при цьому дещо збільшуються пульсації струмів.



Рисунок 4.18 – Струми мережі за накиду несиметричного несинусоїдного навантаження тривалістю 4 періоди в момет часу 0,0625 с (кут 45 град)



Рисунок 4.19 – Струми мережі за накиду несиметричного несинусоїдного навантаження тривалістю 4 періоди в момети часу 0,065 с (кут 90 град)

В табл 4.5 наведено результати моделювання СТАТКОМ з керуванням в системі dq-координат у разі компенсації реактивної потужності, симетрування навантажень за зворотною та нульовою послідовностями і компенсації вищих гармонік для $\gamma = \pm 0,01 \cdot 2\pi$ рад. Таблиця 4.5 — Характеристика результатів дослідження СТАТКОМ з керуванням в системі dq-координат у разі компенсації реактивної потужності для $\gamma = \pm 0,01 \cdot 2\pi$ рад

Значення фізичних величин для			
несиметричного режиму	I_A	I_B	I_C
Комплексні значення струмів мережі	10.5		
для $\gamma = 0.01 \cdot 2\pi$ рад (I_S , A)	$47,06e^{J^{3,5}}$	47,06e ^{J243,5}	$47,13e^{123,5}$
Коефіцієнт нелінійного спотворення			
струмів мережі для $\gamma = 0.01 \cdot 2\pi$ рад			
$(THD_I, \%)$	0,34	0,32	0,36
Комплексні значення струмів мережі		100 6 0	
для $\gamma = -0.01 \cdot 2\pi$ рад (I_S , A)	$49,87e^{-13,7}$	49,87e ^{J236,3}	49,93e ^{J116,3}
Коефіцієнт нелінійного спотворення			
струмів мережі для $\gamma = -0.01 \cdot 2\pi$ рад			
$(THD_I, \%)$	0,31	0,31	0,34

Як випливає з табл. 4.5, точність симетрування навантажень та якість компенсації вищих гармонік достатні. Значення коефіцієнта нелінійних спотворень *THD*₁ мережі порівняно невеликі.

Пульсації струмів мережі і, відповідно, пульсації потужностей мережі в перехідних режимах порівняно невеликі (рис. 4.20).



Рисунок 4.20 – Потужності пульсацій СТАТКОМ з керуванням в системі *dq*-координат

4.3 Моделювання розподільних СТАТКОМ на основі прямого керування струмом

Розглянемо модель СТАТКОМ, призначеного для компенсації вищих гармонік та симетрування навантажень на основі методу прямого керування струмом в середовищі МАТLAB Simulink. Модель СТАТКОМ складається з таких основних блоків (див. рис. 4.14): блок вимірювання параметрів навантаження, блок визначення струмів СТАТКОМ; блок керування, інвертор напруги. До виходів 4 і 5 інвертора напруги приєднані один (за відсутності струму нульової послідовності) або два конденсатори з заземленою спільною точкою (за наявності струму нульової послідовності).

На рис. 4.21 зображена модель блока вимірювання параметрів навантаження та визначення струмів СТАТКОМ на основі прямого керування струмом в системі *dq*-координат.



Рисунок 4.21 – Блок вимірювання параметрів навантаження СТАТКОМ на основі прямого керування струмом в системі *dq*-координат

Алгоритм формування миттєвих струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей наведено на рис. 4.22. В основу покладено формули (3.7), (3.8).

На рис. 4.23 зображена модель блока обчислення фазних струмів СТАТКОМ на основі прямого керування з використанням струмів зворотної послідовності в системі *dq*-координат.



Рисунок 4.22 – Алгоритм формування миттєвих струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей



Рисунок 4.23 – Модель блока обчислення фазних струмів СТАТКОМ на основі прямого нерування струмом в системі *dq*-координат

Активна та реактивна потужності мережі, навантаження та СТАТКОМ зображені на рис. 4.24. На рис. 4.25 та рис. 4.26 представлені часові залежності струмів мережі за наявності СТАТКОМ. В табл. 4.7 наведені значення фізичних величин в режимі несиметричного несинусоїдного навантаження, що визначені на інтервалі часу 0,14-0,18 с.



Рисунок 4.24 – Активна, реактивна потужність мережі, навантаження та СТАТКОМ



Рисунок 4.25 – Струми мережі у разі компенсації реактивної потужності



Рисунок 4.26 – Струми мережі за відсутності компенсації реактивної потужності

Таблиця 4.7 – Значення фізичних величин за несиметричного несинусоїдного навантаження

Значення фізичних величин для несиметричного режиму	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Діючі значення струмів навантаження (<i>I_L</i> , A)	83,64 e ^{-j34,7}	41,16 e ^{j216,7}	41,16 e ^{j97,7}
Коефіцієнт нелінійного спотворення струмів навантаження (<i>THD</i> ₁ , %)	5,78	12,8	11,75
Діючі значення струмів мережі у разі компенсації реактивної потужності (<i>I_s</i> , A)	47,08 e ^{j0}	47,08 e ^{j240}	47,13 e ^{j120}
Коефіцієнт нелінійного спотворення струмів мережі у разі компенсації реактивної потужності (<i>THD</i> ₁ , %)	0,34	0,44	0,34
Діючі значення струмів мережі за відсутності компенсації реактивної потужності (<i>I_s</i> , A)	55,68 e ^{-j32,1}	55,67 e ^{j209,9}	55,68 e ^{j87,9}
Коефіцієнт нелінійного спотворення струмів мережі за відсутності компенсації реактивної потужності (<i>THD</i> ₁ , %)	0,25	0,25	0,25

Як випливає з табл. 4.7, точність симетрування навантажень та якість компенсації вищих гармонік СТАТКОМ з прямим керуванням струмом в системі *dq*-координат достатньо високі.

На рис. 4.27 зображено залежності пульсуючих активної та реактивної потужностей мережі за наявності СТАТКОМ у разі компенсації реактивної потужності.



Рисунок 4.27 – Пульсуючі потужності мережі у разі компенсації реактивної потужності

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.

На рис. 4.28 зображено блоки вимірювання параметрів навантаження та обчислення струмів СТАТКОМ на основі спрощеної системи прямого керування струмом, яка рекомендується для практичного застосування.



Рисунок 4.28 – Блоки вимірювання параметрів навантаження та обчислення струмів СТАТКОМ на основі спрощеної системи прямого керування струмом



Рисунок 4.29 – Струми мережі з використанням спрощеної системи прямого керування струмом

4.4 Моделювання системи прямого керування струмом за істотного рівня несиметрії

Для перевірки системи керування за умов істотного рівня несиметрії було встановлено обмеження діючого значення струму СТАТКОМ на рівні 50 A (рис. 4.30).



Рисунок 4.29 – Реалізація обмеження по струму

	37	• ••	•
I аблиця 4.8—	Характеристика	дослідноі моде	ЭЛ1
,	1 1 '		

	Номінальна напруга, В	380
Manayra	Частота, Гц	50
Мережа	Опір ліній, мОм	18,4+ <i>j</i> 17,1
	Опір нейтралі, мОм	10+ <i>j</i> 6
Нелінійне навантаження	Опір навантаження	12
(випрямляч, схема Ларіонова)	постійного струму, Ом	
Симетричне лінійне навантаження	Опір навантаження, Ом	10+j5
Несиметричне лінійне навантаження (увімкнення в момент часу <i>t</i> ₁ =0,06 с, вимкнення в	Опір однофазного навантаження (фаза A)	3+ <i>j</i> 3
момент часу $t_2=0,26$ с)		
Несиметричне лінійне навантаження (увімкнення в момент часу <i>t</i> ₁ =0,12 с, вимкнення в момент часу <i>t</i> ₂ =0,26 с)	Опір додаткового однофазного навантаження (фаза <i>A</i>)	3+ <i>j</i> 3
Несиметричне лінійне навантаження (увімкнення в момент часу t ₁ =0,18 с, вимкнення в момент часу t ₂ =0,26 с)	Опір додаткового однофазного навантаження (фаза A)	3+j3



Рисунок 4.30 – Струми мережі та струми навантаження за умов істотної несиметрії



Рисунок 4.31 – Струми зворотної та нульової послідовностей мережі та навантаження



Рисунок 4.32 – Струми СТАТКОМ у при встановленому обмежені по струму

З рис. 4.31 видно, на проміжку часу 0,06 до 0,12 СТАТОМ працює в нормальному режимі. При накиді навантаження збільшується несиметрія і СТАТКОМ встановлює обмеження по симетрувальному струмові.

3 рис. 4.32 видно, що амплітудне значення синусоїди струму фази *A* СТАТКОМ в усталеному режимі, за умов значної несиметрії, рівний 70 A (діюче значення 50 A).

4.5 Висновки до розділу 4

1. Точність симетрування навантажень та якість компенсації вищих гармонік СТАТКОМ, реалізованого на основі *pq*-теорії миттєвої потужності, недостатні. Значення коефіцієнта нелінійних спотворень струмів фаз мережі *THD*₁ та рівень пульсацій струмів мережі порівняно великі.

2. У разі застосування СТАТКОМ з керуванням в системі *dq*-координат точність симетрування навантажень та якість компенсації вищих гармонік достатні.

3. 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.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній 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 дисертаційній 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 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.

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...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 пере регулювання у разі симетрування синусоїдних струмів навантаження

7. Обгрунтовано 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 СТАТКОМ залежать від швидкості зміни навантаження. За великих швидкостей збільшення та зменшення навантажень помилки істотні. 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.

10. На основі моделювання несиметричних несинусоїдних режимів встановлено, що точність симетрування навантажень та якість компенсації вищих гармонік СТАТКОМ, реалізованого на основі pq-теорії миттєвої потужності, недостатні. Значення коефіцієнта нелінійних спотворень струмів фаз мережі *THD*₁ 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. Порівняльний аналіз систем керування СТАТКОМ показав, що найкращими з точки зору фільтрування вищих гармонік та симетрування струмів є система керування СТАТКОМ з прямим керуванням струмом в системі dq-координат.

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

Результати теоретичного дослідження підтверджуються отриманими результатами експериментального дослідження в межах допустимої розбіжності.

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. Варецький, «Компенсація несиметрії статичними компенсаторами в мережах живлення змінних навантажень», *Технічна* електродинаміка, № 2, с. 66–70, 1998.

[6] Ю.О. Варецький, «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 внутризаводского 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 НЦ 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. Р. 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 уравновешевания)»; 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*, Willy-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», *Компютерно-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 Н 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», Энергетика и электрификация, №6, с.29-33., 2001.

[71] М.Й. Бурбело, «Квазікомпенсаційні вимірювальні перетворювачі для пристроїв симетрування трифазних навантажень», Энергетика и электрификация, №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», Энергетика и электрификация, № 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 крефіцієнта потужності трифазної системи: Пат. 64831 Україна. МКИ Н02Ј 3/26(Україна)», Пат. 64831 Україна. МКИ Н02Ј 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 крефіцієнта потужності трифазної системи: Пат. 81482. Україна. МКИ Н02Ј 3/26», Пат. 81482. Україна. МКИ Н02Ј 3/26. Україна. МКИ Н02Ј 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 багатократної несиметрії навантажень в розподільних мережах», автореф. дис. канд. техн. наук 05.14.02, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2011.

«Підвищення [84] Ю. П. Войтюк, ефективності компенсації потужності різкозмінними розподільних реактивної В мережах 3 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 № а201001785; 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. Наукововиробничий 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», Электричество, №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. додатки

Додаток А

Результати впровадження дисертаційного дослідження

атперджую ТОВ «Українські технологічні продукти» E JL IIIANO 06.02.2020 p. AKT

впровалження кандидатської дисертаційної роботи Лободи Юрія Васильовича

Комісія у складі Підгорець С. В.– заступник директора, Зеленюк О. А.начальник технічного відділу, Сідоренко В. Ю. – інженер-енергетик, склали пей акт про наступне:

6 грудня 2020 року, згідно з пропозицією аспіранта кафедри «Електротехнічних систем електроспоживання та епергетичного менеджменту» Вішицького паціонального технічного університету Лободи Юрія Васильовича було запропоновано для компенсації вищих гармонік – метод прямого формування струмів фаз СТАТКОМ, згідно з яким за фазними несинусоїдними струмами павантаження визначаються їх діючі значення і формуються сипусоїдні одиничні сигнали з початковими фазами, які дорівнюють почитковим фазам несинусоїдних струмів, Добуток цих величин забезпечує формування синусоїдних струмів, що дорівнюють основній гармоніці несинусоїдних струмів фаз павантаження. Різниця струмів навантаження і сформованих сипусоїдних струмів компенсується СТАТКОМ.

Моделювания компенсатора підтвердило достатнью високу точність симетрування та фільтрування вищих гармонік.

На підставі дослідного випробовування комісія рекомендує впровалити даний метод в промислову реалізацію.

Заступник директора

Начальник технічного відлілу

Провідний інженер

С. В. Підгорець фило. А. Зелешок В. Ю. Сідоренко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор з науковопедагогічної роботи по організації павчального

процесу та його науковокотолично забезпечешия условно в М. Васілевський 107» 02 2020 р.

нпровалжения результали днеертаційної роботи Лободи Юрія Васильовича «Система керування статичними компенсаторами реактивної потужності в несиметричних несинусоїдних режимах розподільних мереж»

HITH MARK

у навчальний процес

Члепи комісії у складі: декана факультету електроснергетики та електромсханіки. професора Леонтьсва В. О., допента кафедри електротехнічних систем слежтроспоживання та енергетичного менеджменту Терепкенича Л. Б., доцента кафедри електротехнічних систем слектросноживания та енергетичного менедокменту Бабенка О. В., склали цей акт про те, що для винчения дисциплін: «Електромагнітна сумісність і керування якістю електроепергії в системах електропостачання» для студентів напряму підготовки 141 «Електроепергетика, слектротехніка та електромсканіка» впроваджено результати, розроблені в дисертаційній роботі Лободи Ю. В., а саме: обгрунтовано метод прямого керувания струмом СТАТКОМ, эгідно з яким за фазними иссинусоїдними струмами навантажения визначаються їх діючі значення і формуються синусоїдні одиничні сигнали з початковими фазами, які дорівнюють початковим фазам несинусоїдних струмів. Добуток цих величин забезпечус формувания синусоїдних струмів, що дорівнюють основній гармоніці несинусоїдних струмів фаз навантаження. Ріллиця струмів навантаження і сформованих синусоїдних струмів компенсується СТАТКОМ і забезпечує фльтрування вищих гармоніх. Для отримания миттелих струмів зворотної послідовності в системах прямого керувания струмом СТАТКОМ використані лінійні перетворення миттених струмів фаз навантаження. Моделювання компенсатора підтвердило достатньо високу точність симетрування та фільтрування пищих гармонік.

Впроваджені результати дисертаційної роботи значно підвищили якість навчання студентів ВПТУ.

Декан факультету ЕБЕМ

Доцент каф. ЕСЕЕМ

Доцент каф. ЕСЕЕМ

B. O. JICONTLOB Л. Б. Терешкевич О. В. Бабенкс

142

Додаток Б

Математичне моделювання



$$\begin{split} y &:= (0) \\ D(t,y) &:= \left[\frac{200}{1 - \left(a \sinh\left(\frac{y_0}{100}\right) \right)^2} \cdot \left(U_B(t) - R \cdot y_0 \right) \right] \\ Z &:= rkfixed(y,0,1,10000,D) \qquad n := 0...10000 \\ t &:= Z^{(0)} \qquad i_B := Z^{(1)} \qquad I_B(t) := i_B \end{split}$$

 $U_{C}(t) := 310 \cdot sin(\omega t + 120 \cdot deg) \cdot 1.1 \cdot sin(0.025\omega t)$ R := 3.5



Розвязок диференційних рівнянь
















$$\begin{array}{cccc} q1 := & q1_{11} \leftarrow 0 & q2 := & q2_{11} \leftarrow 0 \\ for & i \in 1 \dots m & for & i \in 1 \dots m \\ & q1_i \leftarrow q1_{i-1} + C1_i & q2_i \leftarrow q2_{i-1} + B1_i \\ & q1 & q2 \end{array}$$

Змінюється q 11 := 200 1 := 201 (крок зміни п) m := 4000 (кількість q)



$$\begin{split} \text{Змінюється q} & \textbf{n} \coloneqq 1000 \quad \textbf{m} \coloneqq 1200 \\ & V_{\alpha_{1}} \coloneqq 1\cos(0.0001 \cdot \omega i) \quad V_{\beta_{1}} \coloneqq 1 \cdot \sin(0.0001 \cdot \omega i) \\ & \textbf{q} l \coloneqq \left[\begin{array}{c} \textbf{q} l_{n} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in \textbf{n} \dots \textbf{m} \\ & \textbf{q} l_{i+1} \leftarrow \textbf{q} l_{i} + i \textbf{A}_{i} \cdot V_{\alpha_{1}} \\ & 0.01 \cdot \textbf{q} l \end{array} \right] \\ & \textbf{a} l \coloneqq \textbf{q} l_{m} \\ & \frac{\textbf{a} l}{\sqrt{2}} = -22.923 \\ & \textbf{atam} \left(\begin{array}{c} \textbf{a} l \\ \textbf{b} l \end{array} \right) = -24.316 \cdot \textbf{deg} \\ \end{split}$$

$$\begin{array}{ll} a2 := q3_{m} & b2 := q4_{m} \\ \hline \frac{a2}{\sqrt{2}} = 1.106 & \frac{b2}{\sqrt{2}} = -1.54 \\ atam\left(\frac{a2}{b2}\right) = 180 \cdot deg = -215.685 \cdot deg & \sqrt{a2^{2} + b2^{2}} \\ q5 := & \left| q5_{n} \leftarrow 0 & q6 := \\ for \ i \in n..m & q5_{i+1} \leftarrow q5_{i} + iC_{i} \cdot V\alpha_{i} & 0 \\ for \ i \in n..m & q5_{i+1} \leftarrow q5_{i} + iC_{i} \cdot V\alpha_{i} & 0.01 \cdot q6 \\ a3 := q5_{m} & b3 := q6_{m} \\ \frac{a3}{\sqrt{2}} = 0.495 & \frac{b3}{\sqrt{2}} = -2.247 \\ atam\left(\frac{a3}{b3}\right) = 180 \cdot deg = -192.426 \cdot deg & \sqrt{a3^{2} + b3^{2}} \\ q5 := & \left| 1.06 & \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}}$$

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ 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, Випуск 165 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України», с. 54 – 56. 2015.

[2] 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.

[3] 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

[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, 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, 2016.

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

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[1] Бурбело М. Й., та Ю. В. Лобода, «Керування установками динамічної компенсації реактивної потужності за різкозмінних навантажень», *Ш 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, та М. Й. Бурбело, «Застосування статком для підвищення якості електроенергії», *Матеріали XLIX науковотехнічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 27-28 квітня 2020 р.

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