

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

КРИВОРУЧКО ДМИТРО ВІКТОРОВИЧ



УДК 621.311:621.314

РЕГУЛЬОВАНИЙ КОМПЕНСАТОР
НЕАКТИВНИХ СКЛАДОВИХ ПОВНОЇ ПОТУЖНОСТІ
В СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ
З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Чернігів – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

кандидат технічних наук, доцент
Жук Дмитро Олександрович
Національний університет
кораблебудування ім. адм. Макарова,
завідувач кафедри суднових
електроенергетичних систем,

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Тугай Дмитро Васильович
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
завідувач кафедри альтернативної
електроенергетики та електротехніки

кандидат технічних наук, доцент
Клен Катерина Сергіївна,
Національний технічний університет
України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри
електронних пристроїв та систем

Захист відбудеться «29» квітня 2021 р. О 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 79.051.03 в Національному університеті «Чернігівська політехніка», за адресою: 14035, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95, Україна, аудиторія 1-224.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Чернігівська політехніка», за адресою: 14035, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95, Україна.

Автореферат розісланий «23» березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 79.051.03



В.П. Войтенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Теоретичним аспектам вирішення проблем електромагнітної сумісності (ЕМС) та якості електроенергії (ЯЕ) в електричних системах з напівпровідниковими перетворювачами (НП) присвячені числені роботи таких відомих вітчизняних та зарубіжних вчених як А.К. Шидловський, І.В. Волков, Я.Ф. Анісімов, Г.С. Векслер, І.В. Жежеленко, В.О. Новський, Г.М. Мустафа, Ю.К. Розанов, В.Н. Івакін, В.В. Худяков, Л.А. Добрусін, М.В. Ольшванг, В.С. Богров, М.В. Рябчицький, А.Б. Буре, В.С. Федій, С.Г. Наместник, Ю.М. Биков, Н. Akagi, W.M. Grandi, J.W. Dixon, A. Nabae, S. Bhattacharya, D.M. Divan, F.Z. Peng, D. Casadei, U. Reggiani, H. Fujita, J. van der Weem, M. Lindgren, M. Levin.

Надзвичайно актуальними ці проблеми є для суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) з потужними напівпровідниковими перетворювачами у складі гребних електроустановок, підрулюючих пристроїв, технологічних електроприводів, сумірних за потужністю з автономними джерелами – синхронними генераторами (СГ). Широке розповсюдження в найпотужніших (десятки МВт) електроприводах СЕЕС набули тиристорні перетворювачі: керовані випрямлячі та перетворювачі частоти за схемою «керований випрямляч – інвертор струму, ведений навантаженням (синхронним двигуном)». Порушення умов ЕМС та зниження ЯЕ в таких ЕЕС обумовлено двома факторами: наявністю вищих гармонік у струмі, споживаному НП від СГ, та фазовим зсувом основної гармоніки цього струму відносно напруги мережі. У свою чергу, наслідком дії першого фактору є спотворення форми напруги мережі, а другого – відхилення і коливання її основної гармоніки. У кінцевому результаті, внаслідок обох зазначених факторів, енергетичні процеси в СЕЕС з НП характеризуються крім «корисної» активної потужності також, відповідно, потужністю спотворення (ПС) та реактивною потужністю (РП). Поняття ПС і РП узагальнюються терміном «неактивні складові повної потужності», який використовується в роботах О.О. Маєвського, Г.Г. Жемерова, Д.В. Тугая, в яких досліджено енергетичні режими в системах з напівпровідниковими перетворювачами. Низька якість електроенергії, обумовлена РП та ПС в СЕЕС є причиною завищення встановленої потужності генераторів, виникнення збоїв та відмов у роботі відповідальних споживачів, створення загрози для безпеки автономного морського об'єкта в цілому.

Таким чином, розвиток теорії регульованих фільтрокомпенсуючих пристроїв (РФКП), що одночасно забезпечують керовану компенсацію як РП, так і ПС, є актуальною науково-практичною задачею.

Відомі засоби забезпечення ЕМС є малоефективними щодо комплексної компенсації неактивних складових повної потужності. Наприклад, відомі з робіт Н. Akagi, Г.Г. Жемерова, І.Ф. Домніна та ін., силові активні фільтри на базі автономних інверторів напруги з ємнісним навантаженням і ШІМ-керуванням малоприсадибні для компенсації значної РП. Крім того, вони самі є джерелами вищих гармонік у високочастотній області. Потужні пасивні фільтрокомпенсуючі пристрої забезпечують лише ступінчасте керування РП. Очевидно, що підвищення

ефективності РФКП слід очікувати при використанні гібридних рішень, які б поєднували переваги як активних, так і пасивних структур.

Зазначене підтверджує необхідність подальшого системного розвитку теорії і дослідження напрямів удосконалення засобів керованої компенсації неактивних складових потужності з урахуванням особливостей СЕЕС з потужними НП.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати дослідження шляхів виникнення, методів та засобів зниження впливу неактивних складових повної потужності в суднових СЕЕС з потужними НП, що наведені в дисертаційній роботі, отримані автором при виконанні на правах виконавця робіт за науково-дослідними темами:

55.02.17.0839/0117U000346. «Розробка енергоефективних суднових систем автоматизації процесів генерування й перетворення електроенергії та їх моделей для покращення якості електроенергії та електромагнітної сумісності». – Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. 12.2018;

45.03.19.0327/0119U002104. «Розробка засобів покращення енергоефективності, якості електроенергії та електромагнітної сумісності в суднових електроенергетичних системах з напівпровідниковими перетворювачами електроенергії». – Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. 12.2020.

Особистий внесок автора полягає у розробці принципів побудови і практичної реалізації силових частин і систем керування, моделей та методів визначення характеристик удосконалених РФКП у складі СЕЕС з потужними НП.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є забезпечення умов електромагнітної сумісності і якості електроенергії в СЕЕС з потужними НП за рахунок удосконалення гібридної структури, розробки принципів побудови і керування засобів компенсації неактивних складових повної потужності, а також подальшого розвитку математичних моделей та методів розрахунку зазначених засобів у статичних та динамічних режимах.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

1. Розробка принципів побудови, пошук удосконалених гібридних структур силової частини і обґрунтування способу керування швидкодіючих РФКП з урахуванням особливостей СЕЕС з НП.

2. Аналіз частотних характеристик еквівалентного опору і коефіцієнта фільтрації СЕЕС з РФКП та визначення умов уникнення резонансного підвищення гармонік.

3. Удосконалення математичних моделей та методів розрахунку РФКП як об'єкта керування компенсацією реактивної потужності та потужності спотворення в статичних і динамічних режимах СЕЕС з НП.

4. Оптимізація параметрів регулятора РФКП з метою досягнення заданої якості перехідних процесів при компенсації реактивної потужності.

Об'єкт дослідження. Електромагнітні процеси, умови електромагнітної сумісності та показники якості електроенергії в суднових електроенергетичних системах з потужними напівпровідниковими перетворювачами та регульованим фільтрокомпенсуючим пристроєм.

Предмет дослідження. Засоби компенсації неактивних складових повної потужності, їх моделі, методи розрахунку та характеристики.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених в дисертації задач при математичному моделюванні СЕЕС з НП та РФКП були використані методи теорії електричних кіл (метод частотних характеристик, операторний метод окремих складових, метод гармонічного аналізу, метод змінних стану). Одержані в роботі основні теоретичні положення та результати аналітичних розрахунків підтверджені шляхом комп'ютерного і фізичного моделювання. Розрахунки виконувались на персональному комп'ютері з використанням математичного пакету Mathcad, моделювання процесів в СЕЕС з НП та РФКП проводилося з використанням програмного пакету Matlab, а також відповідних пакетів розгалуження Matlab Simulink.

Наукова новизна одержаних результатів. В дисертаційній роботі отримані наступні наукові результати:

- вперше створена і теоретично обґрунтована нова удосконалена структура гібридного РФКП, яка складається з некерованого силового резонансного LC-фільтра (РФ) та реакторного компенсатора (РК) з широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) на високій частоті, що дозволяє збільшити швидкодію РФКП та виключити генерування ним в мережу низькочастотних гармонік;

- вперше одержано аналітичну умову узгодження частотних характеристик еквівалентного опору СЕЕС з РФКП зі спектрами гармонік, генерованих НП та РК, яка виключає резонансне підвищення гармонік в системі;

- вперше запропоновано нове топологічне рішення удосконаленого РФКП, при якому силовий РФ одночасно є перешкодозахисним фільтром (ПФ) по відношенню до РК з ШІР та виключається можливість резонансу струмів на вищих гармоніках;

- вперше на основі аналізу схем заміщення СЕЕС з НП та РФКП, з використанням операторного методу окремих складових, гармонічного аналізу та рівності Парсеваля отримані аналітичні вирази для знаходження коефіцієнта несинусоїдальності напруги мережі K_U в скінченній формі, які враховують весь гармонічний спектр та особливості електромагнітних процесів в системі і забезпечують підвищену точність результатів аналітичних розрахунків;

- визначено умови повної компенсації РП, запропоновано та удосконалено структурно-функціональну схему системи автоматичного регулювання (САР) РФКП в СЕЕС з НП, яка містить датчики напруг і струмів генератора, стандартний блок обчислення та фільтр нижніх частот для визначення РП, регулятор та широтно-імпульсний модулятор;

- отримали подальший розвиток методи побудови математичних моделей РФКП в СЕЕС з НП, на основі яких розроблено систему керування РФКП з урахуванням збурюючих факторів, що забезпечує покращення показників ЯЕ в статичних і динамічних режимах у порівнянні з існуючими аналогами;

- вперше створено оптимізаційну модель параметрів регулятора з використанням бібліотеки Simulink Design Optimization з блоком Check Step Response Characteristics

і заданням критеріїв якості перехідних процесів, зокрема вимоги скорочення тривалості перехідних процесів до 0,15 с.

Практичне значення одержаних результатів. Основні положення, висновки та рекомендації, що викладені в дисертаційній роботі, використовуються у навчальному процесі НУК ім. адм. Макарова (кафедра суднових електроенергетичних систем) при підготовці студентів за спеціальностями 141 – «Електроенергетика, електротехніка, та електромеханіка» і 271 – «Річковий та морський транспорт», зокрема при викладанні дисциплін «Дисципліни спеціальної підготовки за темою досліджень», «Електроніка, схемотехніка, силова електроніка та перетворювальна техніка», «Електромагнітна сумісність і керування якістю електроенергії в електроенергетичних системах». Розроблені в дисертаційній роботі методи і моделі впроваджено на підприємствах ТОВ «Інтерелектро», компанії «Електрім – 2000», ТОВ «SMG», науково-дослідній установі ІППТ НАН України.

Особистий внесок здобувача. В роботах [1-11, 16-18] автором розглянуто структури, режими роботи, електромагнітні процеси та питання підвищення якості електроенергії в СЕЕС з НП морських суден та платформ; в роботах [1-3, 9-11] досліджено причини виникнення ЕМП в електросистемах з КВ і ПЧ та можливі способи їх пасивної фільтрації; в роботах [1-18] виконано моделювання СЕЕС з трифазним мостовим КВ та отримані універсальні розрахункові моделі (аналітичні вирази) для дослідження показників несинусоїдальності напруги із врахуванням комутаційних ВЧ коливань в таких системах [4-8]; запропоновано метод розрахунку параметрів схеми заміщення; в роботах [1-3, 9-11, 16-20] запропоновано схема і аналітичні вирази для розрахунку гібридного силового фільтрокомпенсуючого пристрою.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні положення, результати і висновки дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на конференціях: Інновації в суднобудуванні (в 2015 р. і 2016 р.); 2nd International Conference Intelligent Energy and Power Systems-2016; XIV Міжнародна науково-технічна конференція Проблеми Сучасної Електротехніки-2016; Силова електроніка и енергоефективність-2016; IX Міжнародна науково-практична конференція Сучасні Інформаційні та Інноваційні Технології на Транспорті 2017; Сучасні проблеми автоматики та електротехніки (в 2017 р. і 2018 р.); 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology-2018; XV Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної електротехніки-2018».

Публікації. За результатами виконаних досліджень отримано 2 патенти України на корисні моделі, опубліковано 18 наукових праць, з яких 3 статті у фахових виданнях України, віднесених до категорії «А», 5 публікацій включено до наукометричної бази даних Scopus, 1 наукова праця опубліковано самостійно.

Структура дисертації. Дисертація складається з вступу, 4 розділів, 1 додатку та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації складає 144 сторінок, обсяг основного тексту – 112 сторінок, додатків – 6 сторінок. Дисертація містить 65 рисунків, 10 таблиць та посилання на 144 літературних джерела.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність напряму досліджень, наведено зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано мету і завдання дослідження, відображено наукову новизну, практичну цінність роботи та особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію, публікації та використання результатів дослідження.

У першому розділі розглянуті питання покращення умов електромагнітної сумісності та якості електроенергії в суднових СЕЕС з потужними НП. Складено класифікацію електромагнітних перешкод в суднових СЕЕС з НП, проаналізовано існуючі стандарти, що регламентують рівень вищих гармонік струму і напруги в мережі живлення, виявлено фактори впливу вищих гармонік струму і напруги на всі елементи СЕЕС.

Встановлено, що найбільш поширеним джерелом кондуктивних ЕМП в СЕЕС є напівпровідникові перетворювачі, які розглядаються як споживачі активної і реактивної потужності та потужності спотворення. Перші дві складові викликають відхилення та коливання частоти і напруги, що за умови їх обмеження рівнем $\pm 5\%$ (згідно із стандартами ІЕС, Lloyd і т.і.) призводить лише до економічних збитків. Наслідком дії спотворень і вищих гармонік, обумовлених ПС, можуть бути тяжкі аварії.

В розділі проаналізовано способи і засоби зниження рівня вищих гармонік струму і напруги в СЕЕС з НП, складено їх класифікацію. Проаналізовано традиційні джерела, умови і способи компенсації, типи компенсаторів РП. Доведено, що для забезпечення ЕМС і ЯЕ в СЕЕС з потужними НП необхідний подальший розвиток РФКП, які здатні компенсувати як реактивну потужність, так і гармоніки напруги і струму.

У другому розділі з метою визначення схемних та режимних особливостей суднових СЕЕС з потужними НП розглянуто їх основні структури та складено еквівалентні схеми, які в подальшому використано при дослідженні електромагнітних процесів та враховано при удосконаленні РФКП.

На рис. 1,а,б синхронний генератор (СГ), представлено синусоїдальною ЕРС e_s з амплітудою E_m і опором короткого замкнення X_s . Трансформатор (Тр) або вхідний реактор тиристорного перетворювача (ТП) за трифазною мостовою схемою враховано опором X_{II} . Зниження показників ЯЕ в таких СЕЕС обумовлено двома чинниками: фазовим зсувом основної гармоніки споживаного струму відносно напруги мережі і наявністю вищих гармонік у складі струму.

Зазначені чинники викликані споживанням НП відповідно РП та ПС. Реактивна потужність НП обумовлює необхідність завищення встановленої потужності та масогабаритних параметрів СГ і ТР, що веде до зниження техніко-економічних показників СЕЕС в цілому. Негативний вплив ПС полягає у суттєвому спотворенні форми напруги в мережі живлення, порушенні роботи відповідальних споживачів, додаткових втратах в елементах СЕЕС та передчасному виходу їх з ладу внаслідок прискореного старіння ізоляції.

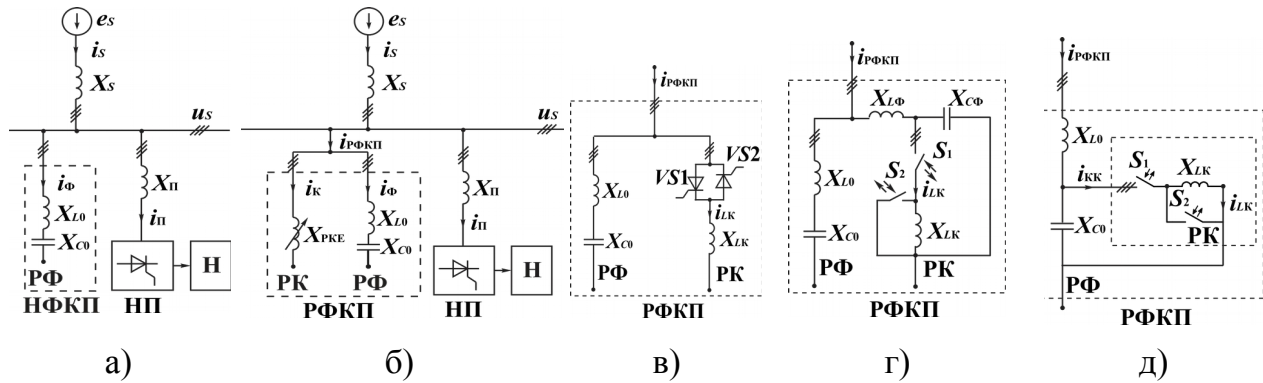


Рисунок 1 – Структури СЕЕС з НП та ФКП: а) з некерованим ФКП; б) з РФКП та керованим РК в) РФКП1 з фазовим регулюванням РК; г) РФКП2 з ШПР РК і додатковим перешкодозахисним фільтром; д) удосконалений РФКП3 – з ШПР РК і використанням РФ як перешкодозахисного

Активні фільтри також застосовуються в СЕЕС, проте в порівнянні з гібридними РФКП значно рідше, оскільки вони мають меншу потужність, нижчу надійність і більш складні в обслуговуванні.

Як основний засіб забезпечення показників ЯЕ на рівні припустимих норм в СЕЕС з потужними НП, зокрема ТП, використовуються порівняно прості і дешеві нерегульовані ФКП (НФКП) на базі резонансних фільтрів (РФ) (рис. 1,а). В режимах, близьких до статичних, НФКП забезпечують як поліпшення форми напруги мережі живлення, так і компенсацію реактивної потужності (РП). Порядок частоти налаштування РФ відповідає нулю частотної характеристики опору системи і, як правило, обирається за умовою $\xi = \omega_0 / \omega = \sqrt{X_{C0} / X_{P0}} \leq m - 1$, де ω_0 – резонансна частота фільтра, ω – частота мережі, m – пульсність НП.

РФ є генератором РП на основній гармоніці:

$$Q_{\text{РФ}} = 3 U_{\text{Ф}} / (X_{C0} - X_{L0}). \quad (1)$$

де $U_{\text{Ф}}$ – діюче значення фазної напруги мережі ($U_{\text{Ф}} = U_m / \sqrt{2}$).

Основним недоліком НФКП з фіксованими параметрами елементів є виникнення режимів неповної компенсації РП при широкому діапазоні зміни режимів навантажень НП. Зазначеного недоліку можна уникнути при використанні РФКП, які, крім РФ, містять керований РК (рис. 1,б).

РК умовно представлений у вигляді індуктивного елемента з регульованим еквівалентним опором на основній гармоніці $X_{\text{РКЕ}}$. Компенсатор, фази якого підключені у «зірку», споживає реактивну потужність

$$Q_{\text{РК}} = 3 U_{\text{Ф}}^2 / X_{\text{РКЕ}}. \quad (2)$$

Найбільше поширення отримала схема РК з фазовим регулюванням (рис. 1,в). Втім, така схема має суттєві недоліки: генерування низькочастотних гармонік струму в джерело живлення, а також істотний час затримки регулювання, що становить половину періоду напруги мережі живлення.

Подібних вад позбавлені схеми РФКП, що наведені на рис. 1,г,д. В схемах використані РК з широтно-імпульсним регулюванням (ШПР) за допомогою

напівпровідникових двоопераційних діодно-транзисторних ключів змінного струму (на базі IGBT, GTO, IGCT).

Кутова частота комутації ключів ω_K у багато разів перевищує частоту мережі ω ($\omega_K \gg \omega$). Величина $f_K = \omega_K / 2\pi$ для сучасних силових напівпровідникових ключів досягає 10-20 кГц.

Еквівалентний опір фази РК $X_{PKE} = X_{LKE} / s^2$, де s – шпаруватість ШПР.

Для виключення постійних складових в струмах РК частота комутації ключів ШПР повинна відповідати умові $f_K = n_K f = 6kf$, де f – частота мережі, $k = 1, 2, 3, \dots$. У такому випадку криві напруги і струмів будуть періодичними, а їх спектри матимуть дискретний характер. Протягом кожного періоду комутації $T_K = 1/\omega_K$ обидва ключі кожної фази РК керуються у протифазі: на інтервалі t_1 ключ $S1$ замкнений, а ключ $S2$ – розімкнений. На інтервалі t_2 стан ключів змінюється на протилежний, причому $t_1 + t_2 = T$.

Кожна вітка РК з індуктивним елементом L_K і відповідною парою протифазних ключів по відношенню до зовнішнього кола може бути розглянута, як джерело імпульсного квазісинусоїдального струму i_{KK} . Крім основної гармоніки $i_{KK(1)}$ цей струм містить також імпульсну спотворюючу складову (перешкоду), спектр якої зміщений у високочастотну область з гармоніками, що мають порядки $v = kn_K \pm 1$, де $k = 1, 2, 3$. Діючі значення гармонік фазних струмів і напруг реакторів, форми яких в схемах РФКП2 і РФКП3 є однаковими, розраховуються згідно з виразом (3).

$$I_{KK(v)} = \frac{2\sqrt{2} s U_\phi \sin(v\pi s)}{X_{LK} v\pi} \quad (3)$$

Для захисту мережі живлення від ВЧ перешкод, що створюються ШПР з РК, в схемі РФКП2 передбачено включення на вході РК Г-подібного перешкодозахисного фільтра низьких частот (ПФ НЧ), утвореного елементами $X_{L\phi}$, $X_{C\phi}$ (рис. 1,г). Рекомендується вибирати $X_{L\phi} \ll X_{LK}$. Величина $X_{C\phi}$ визначається з умови забезпечення необхідного коефіцієнта фільтрації K_ϕ (4).

$$K_\phi = (2\pi f_K)^2 / \omega_{P\phi 0}^2 \quad (4)$$

де $\omega_{P\phi 0} = \sqrt{1/L_\phi C_\phi}$ – власна резонансна частота перешкодозахисного фільтра.

Завдяки наявності перешкодозахисного фільтра вхідний струм РК i_{PK} має практично синусоїдальну форму.

На рис. 1,д зображено удосконалений РФКП3, до складу якого входить нерегульований РФ і керований РК, який підключено у точку з'єднання індуктивності і ємності основного силового РФ. У такій структурі усувається необхідність у додатковому ПФ, оскільки РФ виконує функцію низькочастотного ПФ по відношенню до ВЧ перешкод, генерованих РК з ШПР.

Реактивна потужність, споживана РК $Q_{PK} = 3U_\phi I_{PK} = 3s^2 U_\phi^2 / X_{LK}$ та генерована РФ, обираються, виходячи з одночасного виконання двох умов: компенсації РП НП і обмеження несинусоїдальності напруги мережі. Умовою повної компенсації РП для

будь-якого режиму системи НП-РФКП є співвідношення

$$Q_{\text{РФ}} - Q_{\text{РК}} - Q_{\text{НП}} = 0. \quad (5)$$

Реактивна потужність, споживана НП

$$Q_{\text{НП}} = I_d \sqrt{U_{d0}^2 - U_d^2}, \quad (6)$$

де U_{d0} – максимальна випрямлена; U_d, I_d – поточні значення випрямленої напруги і струму.

В цьому випадку необхідні РП РФ і РК визначаються із співвідношення

$$Q_{\text{РФmax}} = Q_{\text{РКmax}} = Q_{\text{НПmax}}. \quad (7)$$

Може виявитися, що умова (7), необхідна для компенсації реактивної потужності, буде недостатньою для обмеження K_U . В цьому випадку, на наступному етапі розрахунку як початкові приймаються значення

$$Q_{\text{РФmax}} = Q_{\text{РКmax}} = Q_{\text{НПmax}} + \Delta Q, \quad (8)$$

де ΔQ – крок ітерації.

Остаточні значення параметрів РФ і РК повинні забезпечувати обмеження K_U системи на припустимому рівні, тобто повинна виконуватися умова $K_U \leq K_{U \text{ доп}}$.

Необхідний індуктивний опір РК визначається зі співвідношення

$$X_{LK} = 3 U_{\Phi}^2 / (Q_{\text{РФ}} - Q_{\text{НПmin}}), \quad (9)$$

де $Q_{\text{НПmin}}$ – мінімальна реактивна потужність, споживана НП в режимі холостого ходу ($Q_{\text{НПmin}} = Q_{\text{ХХ}}$).

Для вироблення рекомендацій по вибору кращого варіанту схеми засобу компенсації неактивних складових потужності в СЕЕС з НП (РФКП2 або РФКП3) виконано порівняння відповідних частотних характеристик опорів системи. Виходячи з принципу накладення, виконано аналіз окремих схем заміщення СЕЕС з НП та РФКП, приведених до входів НП та РФКП, які показані як джерела вищих гармонік струмів $I_{\text{Пv}}$ і $I_{\text{Кv}}$ (рис. 2). Частотні характеристики відповідних еквівалентних реактивних опорів для системи з РФКП2 (схеми 2,а,в) визначаються виразами (10) і (11):

$$X_{\text{ЕПv}} = ((v X_S)^{-1} + (v X_{L0} - X_{C0}/v)^{-1} + (v X_{L\Phi} + ((v X_{\text{РКЕ}})^{-1} - v/X_{C\Phi})^{-1})^{-1}), \quad (10)$$

$$X_{\text{ЕКv}} = (((v X_S)^{-1} + (X_{L0} - v/X_{C0})^{-1})^{-1} + v X_{L\Phi})^{-1} - v/X_{C\Phi}). \quad (11)$$

Частотні характеристики мають нулі і полюси, що відповідають режимам резонансів напруг і струмів на відповідних частотах.. Аналіз показує, що порядки частот двох полюсів μ_1 і μ_2 які має кожна з характеристик $X_{\text{ЕПv}}$ і $X_{\text{ЕКv}}$ виявляються однаковими і слабо залежать від величини еквівалентного опору РК. Найменші порядки вищих гармонік, генерованих НП і РК відповідно дорівнюють

$$v_{\text{Пmin}} = p - 1; \quad v_{\text{Кmin}} = n_K - 1 \quad (12)$$

Для запобігання резонансного підвищення гармонік напруги в системі має виконуватись наступна умова узгодження частотних характеристик еквівалентних опорів зі спектрами гармонік НП та РФКП

$$(\mu_1 \& \mu_2) < (v_{\text{Пmin}} \& v_{\text{Кmin}}) \quad (13)$$

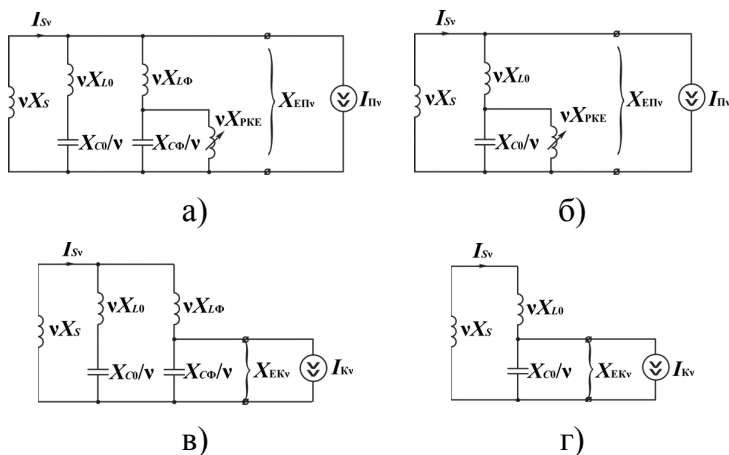


Рисунок 2 – Еквівалентні схеми заміщення системи СГ-НП-РФКП, приведені до входів НП і РК: а), в) для системи з РФКП2; б), г) з РФКП3

метод визначення основних параметрів РФКП може застосовуватись при розрахунку обох видів схем.

Частотні характеристики еквівалентних реактивних опорів системи з вдосконалим РФКП відносно НП і РК визначаються відповідно до схем заміщення (рис. 2,б,г) з виразів

$$X_{ЕПv} = ((v X_S)^{-1} + (v X_{L0} - X_{C0}/v)^{-1} + (v X_{LФ} + ((v X_{РКЕ})^{-1} - v/X_{CФ})^{-1})^{-1}), \quad (14)$$

$$X_{ЕКv} = (((v X_S)^{-1} + (X_{L0} - v/X_{C0})^{-1})^{-1} + v X_{LФ})^{-1} - v/X_{CФ}). \quad (15)$$

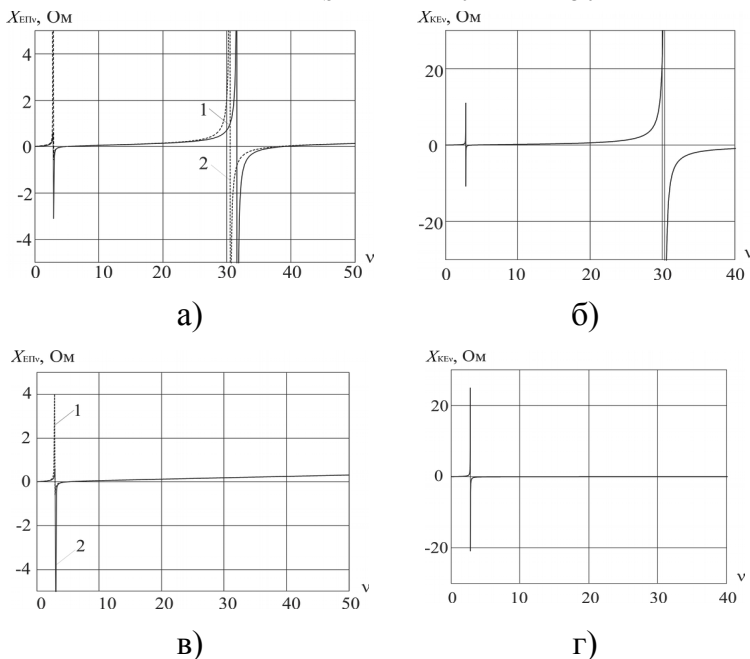


Рисунок 3 – Частотні характеристики еквівалентних опорів $X_{ЕПv}$ і $X_{ЕКv}$: а), б) з РФКП2 ; в), г) з РФКП3

Аналіз показує, що при переході від РФКП2 до РФКП3 і незмінних параметрах РФ, виходячи з умови повної компенсації РП, величина X_{LK} має бути зменшена в $v_{РФ0}^2 / (v_{РФ0}^2 - 1)$ разів (на 4%). При цьому порядок частоти нуля характеристики опору системи збільшується в порівнянні з $v_{РФ0}$ у $\sqrt{1 + 1/v_{РФ0}^2}$ раз (на 2%), що практично не впливає на ефективність зниження вищих гармонік. Тому, викладений вище

Розрахункові частотні характеристики еквівалентних реактивних опорів для СЕЕС потужністю 1000 кВА з РФКП2 з додатковим перешкодозахисним фільтром і РФКП3 представлені на рис. 3,а,б і рис. 3,в,г відповідно.

Частотні залежності коефіцієнтів зниження гармонік струмів НП наведені на рис. 4. Показані граничні положення характеристик (криві 1,2), що відповідають значенням $X_{РКЕ1} = X_{LK}$ і $X_{РКЕ2} = \infty$. Для системи з РФКП2 характеристика $X_{ЕПv}$ має 2 полюси: $\mu_1 = 2,8$ і

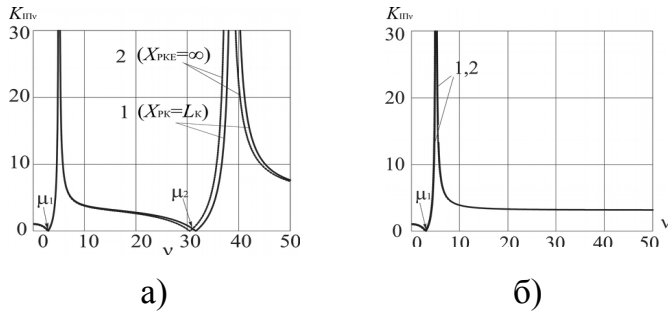


Рисунок 4 – Частотні характеристики коефіцієнтів зниження гармонік струмів K_{Hv} : а) для РФКП2 ; б) для удосконаленого РФКП3

$30,65 \leq \mu_2 \leq 31,75$, а коефіцієнт зниження гармонік $K_{Hv} < 1$ у діапазоні $27,9 \leq \nu \leq 33,3$.

Отже, при використанні РФКП2 з додатковим перешкодозахисним фільтром можливе резонансне підвищення гармонік 29 і 31 порядків, генерованих НП. У системі з РФКП3 єдиний полюс характеристики X_{EPv} $\mu_1 \approx 2,8$

знаходиться лівіше $\nu_{Hmin} = 5$ Тому для цього варіанту резонансне підвищення гармонік неможливе.

З рис. 4,б витікає, що при $\nu = 5$ $K_{Hv} \rightarrow \infty$ в діапазоні $5 < \nu < \infty$ $K_{Hv} \geq 3,33$, тобто удосконалений РФКП, повністю усуваючи 5-у гармоніку, забезпечує ефективне зниження усіх інших вищих гармонік, генерованих НП. Розрахунок K_{IKv} показує, що РФКП3 також забезпечує зниження високочастотних гармонік, генерованих РК, більш ніж в 20000 разів. Отримані висновки підтверджені результатами імітаційного моделювання, представленими на рис 5.

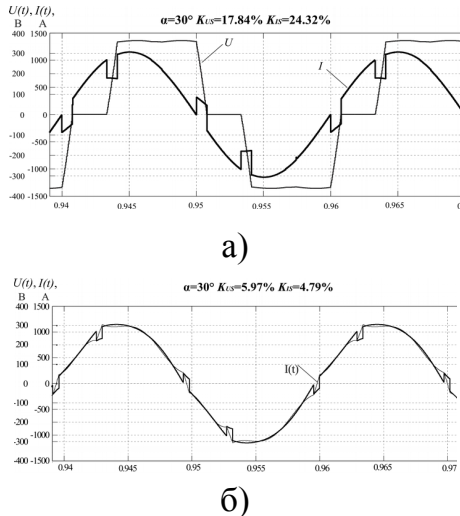


Рисунок 5 – Результати моделювання системи: а) без РФКП; б) з РФКП3

В розділі розвинуто аналітичний метод визначення коефіцієнта несинусоїдальності K_U .

Припущення лінійного характеру комутації струму не викликає суттєвих похибок, але дозволяє визначити миттєве значення напруги мережі u_{SA} з використанням операторного методу окремих складових, розглядаючи струм $i_{ПА}$ як відоме збурення. На основі принципу накладення, значення u_{SA} може бути отримано як різниця двох складових, перша з яких (синусоїдальна) обумовлена джерелом ЕРС e_A , а друга (спотворююча) – джерелом струму $i_{ПА}$

$$U_{SA} = K_E E_m \sin \Theta - \Delta u_{SA} \quad (16)$$

$$\text{де } K_E = X_{L0} (\xi^2 + 1) / ((X_{L0} + X_S)(\mu^2 + 1)) .$$

У відповідності з методом окремих складових у усталеному режимі значення Δu_{SA} на кожному N -му інтервалі неперервності струму $i_{ПА}$ визначається згідно з виразом

$$\Delta u_{SA}^{(N)} = \sum_{pz, pi} \text{Res} [Z_{a0}(p) I_{ПАан}^{(N)}(p) e^{pt}] - \sum_{pz} \text{Res} [Z_{a0}(p) I_{ПАТ}^{(N)}(p) e^{pt}] , \quad (17)$$

де $I_{\text{ПАН}}^{(N)}(p)$, $I_{\text{ПАТ}}^{(N)}(p)$ – операторні зображення струму $i_{\text{ПА}}$ на даному інтервалі як аналітичної і як періодичної функції відповідно; $Z_{a0}(p)$ – еквівалентний операторний опір системи, визначений через індуктивності і ємності її елементів відносно вузлів a і 0 .

На підставі рівності Парсеваля

$$K_U = \sqrt{\Delta U_S^2 - \Delta U_{S(1)}^2} / U_{S(1)} \cdot 100\%, \quad (18)$$

де ΔU_S – повне діюче значення основної гармоніки напруги і $\Delta U_{S(1)}$ – діюче значення напруги на першій гармоніці.

З урахуванням кусково-неперервних функцій за половину періоду значення ΔU_S має вигляд

$$\Delta U_S^2 = \frac{X_S^2 I_{d\Pi}^2}{\pi \gamma^2} a^2 \left[2\gamma - 4 \frac{M}{\mu} \sin \mu \gamma + M^2 \left[\gamma + \frac{1}{2\mu} \sin 2\mu \gamma - 2 N_2 \left[\gamma - \frac{1}{\mu} \sin \mu \gamma \times \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \times \left[\sin \mu \frac{\gamma}{2} + 2 \left[\pi/3 (N_1^2 + 2 N_2^2) + \frac{1}{\mu} \cos \mu \gamma \right] N_1^2 \sin \mu \frac{\pi}{3} - N_2^2 \sin 2 \frac{\pi}{3} \right] \right] \right] \right]. \quad (19)$$

де $a = (X_{L0} + X_{PK}) / (X_S + X_{L0} + X_{PK})$; $M = 1 - \mu^2 / \xi^2$;

$N_1 = \sin(\mu \gamma / 2) \cdot \sin(\mu \pi / 3) / \cos(\mu \pi / 2)$; $N_2 = \sin(\mu \gamma / 2) \cdot \cos(\mu \pi / 6) / \cos(\mu \pi / 2)$.

Діючі значення основних гармонік напруги мережі та її спотворюючої складової визначаються наступним чином

$$U_{S(1)} = K_E \left[\left[E - X_S I_{\Pi(1)} \sin \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \right]^2 + \left[X_S I_{\Pi(1)} \cos \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \right]^2 \right]^{1/2}, \quad (20)$$

$$\Delta U_{S(1)} = K_E X_S I_{\Pi(1)}, \quad (21)$$

де $I_{\Pi(1)} = (\sqrt{6} / \pi) I_{d\Pi} \sin(\gamma / 2) / (\gamma / 2)$; $E = E_m / \sqrt{2}$ – відповідно діючі значення основної гармоніки струму, споживаного НП і ЕРС джерела.

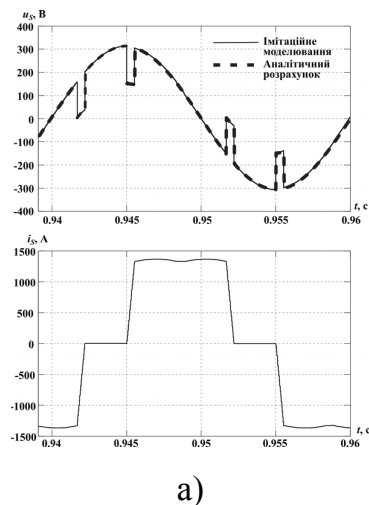
Одержані вище вирази (16-21) слушні також і для СЕЕС без РФКП. У такому випадку $X_{L0} \rightarrow \infty$; $X_{C0} \rightarrow \infty$; $X_{PK} \rightarrow \infty$ і в зазначених виразах $a = 1$, $K_E = 1$, $\mu / \xi = 1$, $M = 0$.

З використанням наведених вище співвідношень розраховано коефіцієнт несинусоїдальності напруги K_U і побудовано криві напруги для одного періоду в СЕЕС без засобів підвищення показників ЯЕ та з удосконаленим РФКПЗ для однакових режимах ТП. Рис. 6 та табл. 1 свідчать, що отримані результати аналітичних розрахунків та імітаційного моделювання практично співпадають.

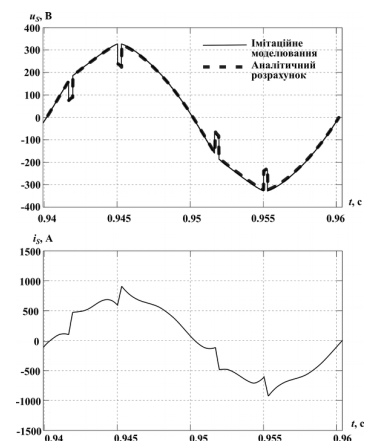
Таблиця 1.

	Розрах.	Мод. експ.	Розрах.	Мод. експ.
Без РФКП	22,56	23,47	5,97	5,93
З РФКПЗ	8,61	8,68	8,61	8,68

Для розрахунку параметрів РФКП враховуються дві умови. Перша – компенсація РП $Q_{\text{НП}}$ і друга – необхідне обмеження коефіцієнта спотворення напруги K_U .



а)



б)

Рисунок 6 – Діаграми струмів і напруг в СЕЕС: а) без ФКП; б) з РФКПЗ

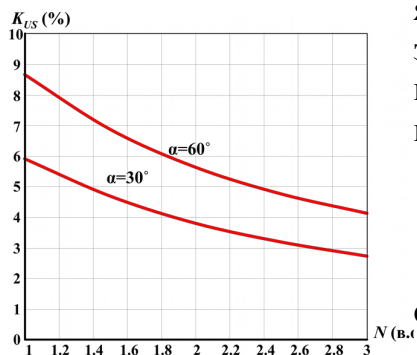


Рисунок 7 – Залежність коефіцієнта K_{US} від кратності резерву компенсації N

Повна компенсація РП можлива вже при $N=1$. Проте, іноді, підвищення коефіцієнта резерву компенсації необхідне, щоб обмежити максимальне значення коефіцієнта несинусоїдальності K_U .

Якщо у всьому діапазоні регулювання НП випрямлений струм дорівнює номінальному ($I_{dНП} = I_{dНПном}$), тоді

$$Q_{НПmax} = I_{dНПmax} \sqrt{U_{d0}^2 - U_{dmin}^2}, \quad (22)$$

де U_{d0} і U_{dmin} – максимальне і мінімальне значення випрямленої напруги при кутах керування $\alpha_{min}=0$ і α_{max} відповідно. Отже, параметри елементів РФ можуть бути знайдені з виразу

$$X_{L0} = 3 U_S^2 / ((v_0^2 - 1) N Q_{НПmax}), \quad (23)$$

$$X_{C0} = X_{L0} v_0^2. \quad (24)$$

Необхідна індуктивність РК з врахуванням коефіцієнта резерву компенсації

$$X_{LK} = 3 s^2 U_S^2 / N Q_{НПmax}. \quad (25)$$

На рис. 7 побудовано криві залежності K_U від N для режимів при кутах керування НП рівними $\alpha_1=30^\circ$, $\alpha_2=60^\circ$. Залежності свідчать про ефективне зниження коефіцієнту несинусоїдальності зі збільшенням N . Збільшення коефіцієнта резерву компенсації до 3 призводить до зменшення коефіцієнта несинусоїдальності K_U майже вдвічі.

У третьому розділі розвинено методи побудови математичних моделей РФКП в СЕЕС з НП, на основі яких розроблено систему керування РФКП з урахуванням збурюючих факторів, що забезпечує покращення показників ЯЕ в статичних і динамічних режимах у порівнянні з існуючими аналогами.

Згідно з принципом суперпозиції, струм генератора \dot{I}_S зручно розглядати як векторну суму двох складових \dot{I}'_S та \dot{I}''_S , обумовлених відповідно ЕРС \dot{E}_S СГ та струмом \dot{I}_{Π} , споживаним НП. Відомо, що $\dot{I}_{\Pi} = I_{\Pi} e^{-j\alpha}$, де $I_{\Pi} = \sqrt{6} I_d / \pi$, I_d і α – відповідно випрямлений струм та кут керування НП.

Відповідно до цього, схемі, зображеній на рис. 8,а відповідають дві часткові схеми заміщення (рис. 8,б,в).

Векторна діаграма для комплексних діючих значень основних гармонік напруги \dot{U}_S та струму \dot{I}_S СГ зображена на рис. 9.

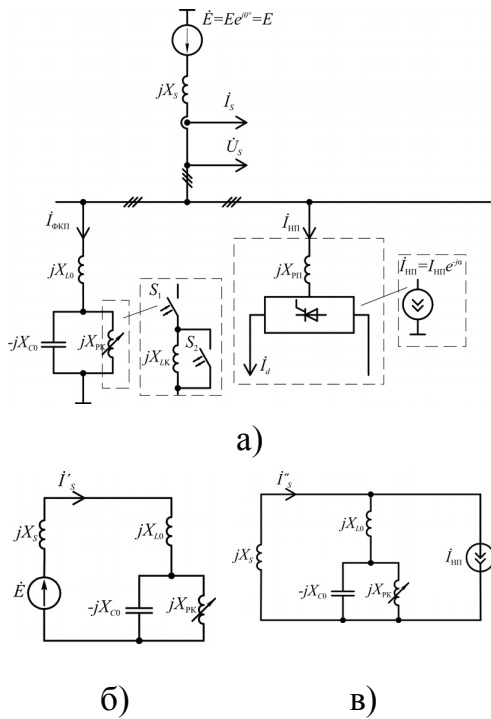


Рисунок 8 – Структура СЕЕС з НП та РФКП: узагальнена еквівалентна схема (а), часткові схеми заміщення (б, в)

З аналізу часткових схем (рис. 8,б,в) випливає, що

$$\dot{I}'_S = j K_1(s) \dot{E}; \quad (26)$$

$$\dot{I}''_S = j K_2(s) \dot{I}_{НП}; \quad (27)$$

де

$$K_1(s) = 1 / X_{C0} / (1 - s^2 X_{C0} / X_{LK}) - (X_S + X_{L0}); \quad (28)$$

$$K_2(s) = \frac{X_{C0} / (1 - s^2 X_{C0} / X_{LK} - X_{L0})}{X_{C0} / (1 - s^2 X_{C0} / X_{LK}) - (X_S + X_{L0})}; \quad (29)$$

Зазначені функції шпаруватості приймають дійсні додатні значення. $K_1(s)$ має розмірність провідності і змінюється від 0 до $1 / [X_{C0} - (X_S + X_{L0})]$. $K_2(s)$ – безрозмірна функція, яка досить слабо залежить від шпаруватості і незначно зростає від 1 до $[X_{C0} - X_{L0}] / [X_{C0} - (X_S + X_{L0})]$. Складова \dot{I}'_S має емнісний характер відносно \dot{E}_S , а \dot{I}''_S відстає від \dot{E}_S на кут α , співпадаючи по фазі зі споживаним струмом перетворювача $\dot{I}_{П}$. Складова \dot{I}'_S незначно більше від нього за модулем.

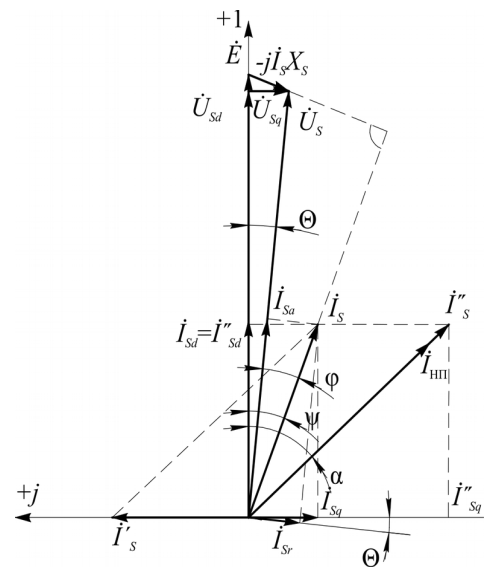


Рисунок 9 – Векторна діаграма комплексів основних гармонік напруги і струмів системи

Оскільки РП, споживана системою НП-РФКП від СГ $Q = 3 U_S I_{Sr}$ де $I_{Sr} = I_S \sin \varphi$ – реактивна складова струму СГ; φ – кут відставання \dot{I}_S від \dot{U}_S , то умова повної компенсації реактивної потужності в СЕЕС визначається виразом

$$\varphi = \psi - \Theta = 0 \Rightarrow \psi = \Theta. \quad (30)$$

Структурна схема САР РФКП, яка реалізує умову (30) з урахуванням виразів (26-29) працює за принципом компенсації та містить датчики випрямленого струму I_d і кута керування α НП. При наявності декількох навантажень структура такої САР ускладнюється за рахунок збільшення кількості відповідних датчиків та каналів керування.

Зазначеного недоліку можна уникнути, якщо використати в структурі САР датчики напруги і

струму лише генератора спільно з програмним цифровим пристроєм визначення РП

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{SA}u_{SBC} + i_{SB}u_{SAC} + i_{SC}u_{SAB}). \quad (31)$$

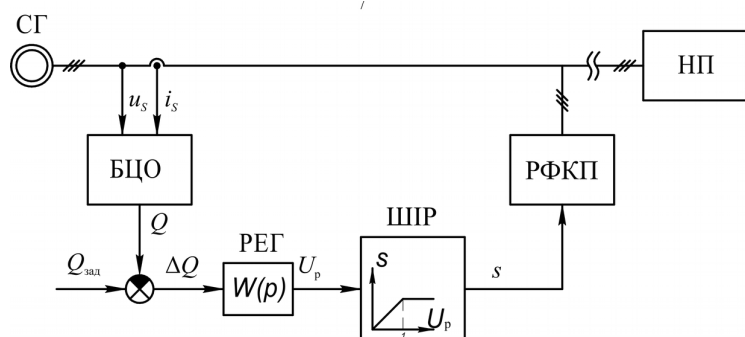


Рисунок 10 – Структурно-функціональна схема САР РФКП

До складу пристрою входять стандартний трифазний блок обчислення РП за (31) та фільтр нижніх частот для виділення постійної складової у сигналі Q (рис. 10). Таке удосконалення структури забезпечує також більшу точність компенсації РП за рахунок безпосереднього обчислення останньої.

У четвертому розділі приведено розроблені імітаційні

моделі СЕЕС з НП та РФКП, шляхом імітаційного, математичного та фізичного експерименту підтверджено практичну ефективність РФКП. Досліджено і проаналізовано статичні і динамічні режими СЕЕС при різних схемних і режимних варіантах системи

Для побудови імітаційної моделі обрано параметри елементів схеми, які відповідають судновій електроенергетичній системі малого судна.

Схемні і режимні параметри моделювання в *Matlab*: синхронний генератор: встановлена повна потужність $S_{CG}=1000$ кВА, номінальна напруга $U_{CG}=220$ В, надперехідний опір $\bar{X}_{CG}=0,15$ в.о.; НП – тиристорний перетворювач; повна встановлена потужність $S_{ТП}=950$ кВА, споживана активна потужність $P_{ТП}=600$ кВт, кут керування в першому режимі $\alpha_1=30^\circ$, в другому – $\alpha_2=60^\circ$, випрямлений струм $I_{d1}=I_{d2}=1400$ А; трансформатор: напруга короткого замикання трансформатора НП $u_{к.з.}=0,05$ в.о. За приведеною методикою розраховані параметри РФКП. Приведені параметри використані в приведених часових діаграмах.

Імітаційну модель СЕЕС з удосконаленим РФКП3 та тиристорним перетворювачем приведено на рис. 11. На рис. 11 блок СГ представлений трифазною системою ЕРС з відповідними активним і індуктивним опором. Трансформатор (Тр) імітовано еквівалентним індуктивним опором. Блок НП являє собою модель шестипульсного ТП, навантаженого на кероване джерело постійного струму. Блок САР включає удосконалену САР РФКП. Блок РФКП складається з силового РФ та РК з ШПР, який підключений до точки з'єднання індуктивності і ємності силового РФ.

Визначено ПЯЕ – коефіцієнти несинусоїдальності напруги та струму СГ в усталених режимах для: 1) СЕЕС без РФКП; 2) СЕЕС з РФКП1; 3) СЕЕС з РФКП2; 4) СЕЕС з РФКП3. Дослідження проводилось в двох режимах роботи навантаження:

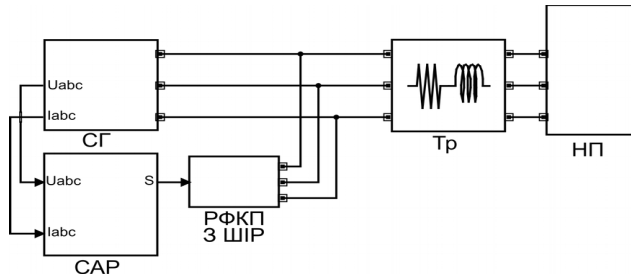


Рисунок 11 – Імітаційна модель СЕЕС з фазовим керуванням ТП і РФКП

режим 1 – $\alpha=30^\circ$, $I_{dП}=1400$ А; режим 2 – $\alpha=60^\circ$, $I_{dП}=1400$ А. Результати досліджень наведені в табл. 2. Вони показують, що при використанні РФКП1 і РФКП3 різниця в інтегральних показниках несинусоїдальності напруг і струмів несуттєва. Проте, РФКП1 з затримку керування і, відповідно, нижчу швидкодію.

Таблиця 2

Режим перетворювача	Досліджені схеми							
	Без РФКП		з РФКП1		з РФКП2		з РФКП3	
	$K_U, \%$	$K_I, \%$	$K_U, \%$	$K_I, \%$	$K_U, \%$	$K_I, \%$	$K_U, \%$	$K_I, \%$
$\alpha_1=30^\circ$	17.84	24.32	6.29	4.99	27.74	11.39	5.97	4.79
$\alpha_2=60^\circ$	23.47	26.55	8.96	9.95	34.28	24.06	8.61	9.54

СЕЕС з НП і РФКП3 досліджено в динамічних режимах. Для дослідження в динамічних режимах використовувалась удосконалена САР, котра використовує тільки два датчики напруг і струмів генератора (рис. 11). Для покращення перехідних процесів були оптимізовані параметри регуляторів. Оптимізація виконувалась з застосуванням вбудованої утиліти MATLAB – бібліотеки Design Optimization з блоком Check Step Response Characteristics. Блок Check Step Response Characteristics надає інструменти для аналізу і налаштування будь-яких параметрів моделі.

Оптимізація параметрів виконувалась для ПІ-регулятора, який надає системі значно кращі динамічні характеристики у порівнянні з І та ПІД-регуляторами.

Результати дослідження перехідних процесів показують, що максимальне відхилення напруги при нахвості струму не перевищує 13%. При цьому час перехідного процесу не перевищує 0,15 с, а сплески реактивної потужності обмежені величиною 25% від встановленої потужності СГ.

ВИСНОВКИ

Розвиток теорії засобів компенсації неактивних складових потужності в СЕЕС з НП є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої становить значний практичний інтерес як шлях забезпечення ЕМС та ЯЕ.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Створена і теоретично обґрунтована нова удосконалена структура гібридного РФКП з підключенням РК ШІР до точки з'єднання індуктивності і ємності основного силового РФ. Гібридний РФКП дозволяє усунути необхідність в додатковому перешкодозахисному фільтрі, збільшити швидкодію РФКП, виключити генерування ним в мережу низькочастотних гармонік, виключити резонансне підвищення гармонік струму на вищих гармоніках

2. Одержано аналітичну умову узгодження частотних характеристик еквівалентного опору СЕЕС з РФКП зі спектрами гармонік, генерованих НП та РК, яка виключає резонансне підвищення гармонік в системі;

3. На основі аналізу схем заміщення СЕЕС з НП та РФКП, з використанням операторного методу окремих складових, гармонічного аналізу та рівності Парсеваля отримані аналітичні вирази для знаходження коефіцієнта несинусоїдальності напруги мережі в кінцевій формі, які враховують весь гармонічний спектр та взаємний вплив елементів системи на електромагнітні процеси і забезпечують незначну розбіжність розрахунків з реальними результатами;

4. Визначено умови компенсації РП, запропоновано та реалізовано структурно-функціональну схему САР РФКП в СЕЕС з НП, яка містить датчики напруг і струмів СГ, стандартний блок обчислення для визначення РП, регулятор та широтно-імпульсний модулятор. Отримали подальший розвиток методи побудови математичних моделей РФКП в СЕЕС з НП, на основі яких розроблено систему керування РФКП з урахуванням збурюючих факторів.

5. Створено оптимізаційну модель параметрів регулятора з використанням бібліотеки Simulink Design Optimization з блоком Check Step Response Characteristics і заданням критеріїв якості перехідних процесів, зокрема вимоги скорочення тривалості перехідних процесів до 0,15 с.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. An improvement of compensators of complete power non-active components in autonomous electric power systems / O.Zhuk, D. Zhuk, D. Kryvoruchko, S. Stepenko. // 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kyiv. – 2016. – С. 1–5 (включена до науко-метричної бази *Scopus*).

Досліджено причини виникнення ЕМП в СЕЕС з НП, проведено аналіз існуючих методів підвищення ЯЕ.

2. Управляемое фильтрокомпенсирующее устройство для автономной электроэнергетической системы с мощными преобразователями / А. К.Жук, Д. А. Жук, Д. В. Криворучко, С. А. Степенко. // Технічна електродинаміка. – 2016. – №4. – С. 32–34.

Проведено аналіз схем заміщення СЕЕС з потужними НП та РФКП.

3. Фильтрокомпенсирующее устройство с широтно-импульсным регулированием реакторного компенсатора / А. К. Жук, Д. А. Жук, Д. В. Криворучко. // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – №4. – С. 59–66.

Проведено математичне моделювання частотних характеристик схем заміщення СЕЕС з потужними НП та РФКП.

4. Control of Improved Hybrid Power Line Conditioner / O. K.Zhuk, D. O. Zhuk, D. V. Kryvoruchko, O. S. D'yakonov. // 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – 2018. – С. 605–610 (включена до науко-метричної бази *Scopus*).

Запропонована САР фільтрокомпенсуючим пристроєм що використовує датчики струму і напруги на шинах СГ.

5. Zhuk O. K. Voltage Harmonic Distortion in Autonomous Electric Power System with an Adjustable Power Line Conditioner / O. K. Zhuk, D. O. Zhuk, D. V. Kryvoruchko. // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – 2018. – С. 33–38 (включена до науко-метричної бази **Scopus**).

Проведено дослідження ПЯЕ в СЕЕС з НП та РФКП при відхиленні значень параметрів елементів фільтрокомпенсуючого пристрою.

6. Жук О. К. Несинусоїдальність напруги в автономній електроенергетичній системі з керованим фільтрокомпенсуючим пристроєм / О. К. Жук, Д. О. Жук, Д. В. Криворучко. // Технічна електродинаміка. – 2018. – №5. – С. 26–30.

Отримані універсальні аналітичні вирази для дослідження показників несинусоїдальності напруги із врахуванням схемотехнічних параметрів системи.

7. Керування високовольтними передачами постійного струму на базі повністю керованих напівпровідникових перетворювачів / [О. К. Жук, Д. О. Жук, Д. В. Криворучко та ін.]. // Кораблебудування і морська інфраструктура. Миколаїв, НУК. – 2018. – №1. – С. 69–75.

Проведено аналіз існуючих САР НП.

8. Модельне дослідження системи управління фільтрокомпенсуючим приладом з реакторним компенсатором / [О. К. Жук, Д. О. Жук, Д. В. Криворучко та ін.]. // Кораблебудування і морська інфраструктура. Миколаїв, НУК. – 2018. – №1. – С. 76–81.

Проведено симуляційне моделювання СЕЕС з ТП та РФКП при застосуванні удосконаленої САР РФКП.

Наукові праці апробаційного характеру та праці, в яких опубліковані додаткові наукові результати

9. Жук А. К. Моделирование электроэнергетической системы с тиристорным преобразователем и фильтрокомпенсирующим устройством / А. К. Жук, Д. А. Жук, Д. В. Криворучко. // Матеріали V Міжнародної наук.-техн. Конф. «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» – м. Полтава. – 2014. – С. 76–82.

10. Криворучко Д. В. Дослідження автономної (суднової) електроенергетичної системи з потужним тиристорним перетворювачем та удосконаленим гібридним фільтрокомпенсуючим пристроєм / Д. В. Криворучко. // Програма та матеріали VII Підсумкової наук.-практ. Конф. Всеукр. конкурсу студ. Наук. робіт з природничих, технічних і гуманітарних наук. – 2015. – С. 26.

11. Навчально-дослідницька лабораторія для підготовки електромеханіків суднових / [В. С. Блінцов, О. К. Жук, Д. О. Жук та ін.]. // Матеріали всеукр. наук.-техн. Конф. з міжнародною уч. «Сучасні проблеми автоматики та електротехніки». – 2015. – С. 60–63. Проблема качества электроэнергии в электроэнергетических системах морских подвижных объектов и направления ее решения / А. К. Жук, Д. А. Жук, Е. А. Воскобоенко, Д. В. Криворучко // Матеріали VII Міжнародної науково-

технічної конференції. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці Миколаїв, НУК. – 2016.

12. Высоковольтные передачи постоянного тока / [А. К. Жук, Д. А. Жук, Д. В. Криворучко та ін.]. // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці VII Міжнародна науково-технічна конференція. Миколаїв, НУК. – 2016. – С. 43–45.

13. Вибір регуляторів у системі керування сучасними високовольтними передачами постійного струму / [Д. О. Жук, О. К. Жук, Д. В. Криворучко та ін.]. // Матеріали всеукр. наук.-техн. конф. «Сучасні проблеми автоматики та електротехніки – 2017» – Миколаїв, НУК. – 2017. – С. 43–47.

14. Принципи керування сучасними високовольтними передачами постійного струму / [Д. О. Жук, О. К. Жук, Д. В. Криворучко та ін.]. // Матеріали всеукр. наук.-техн. конф. «Сучасні проблеми автоматики та електротехніки – 2017» – Миколаїв, НУК. – 2017. – С. 47–50.

15. Управление фильтрокомпенсирующим устройством с реакторным компенсатором / А. К.Жук, Д. А. Жук, Д. В. Криворучко, Е. А. Воскобоев. // Матеріали всеукр. наук.-техн. конф. «Сучасні проблеми автоматики та електротехніки – 2017» – Миколаїв, НУК. – 2017. – С. 50–53.

16. Тренажер для навчально-практичної підготовки судових електромеханіків / [О. К. Жук, Д. О. Жук, С. О. Рожков та ін.]. // Матеріали IX Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017)». – Херсон, ХДМА. – 2017. – С. 45–51.

17. Оцінка спотворень в автономній електроенергетичній системі з гібридним фільтрокомпенсуючим пристроєм / О. К.Жук, Д. О. Жук, Д. В. Криворучко, О. В. Савченко. // Матеріали всеукр. наук.-техн. Конф. з міжнародною уч. «Сучасні проблеми автоматики та електротехніки». – 2018. – С. 64–66.

18. Керування удосконаленим гібридним фільтрокомпенсуючим пристроєм / Д.О. Жук, Д.В. Криворучко, О.К. Жук, Ю.В. Осадченко. // Матеріали 9-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування». – м. Херсон, ХДМА, 2018. – №1. – С. 136–140.

Патенти

19. Патент на корисну модель 120790 України, МПК H03B 1/04. Керований гібридний фільтрокомпенсуючий пристрій / О.К. Жук, Д.О. Жук, Д.В. Криворучко (Україна); заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – No u201606148; заявл. 06.06.2016; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22/2017.

20. Патент на корисну модель 133503 України, МПК G05B 13/02. Удосконалена система широтно-імпульсного регулювання двигуном постійного струму / О.В. Савченко, О.К. Жук, Д.О. Жук, Д.В. Криворучко (Україна); заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – No u201810878; заявл. 02.11.2018; опубл. 10.04.2019, Бюл. № 7/2019.

АНОТАЦІЯ

Криворучко Д.В. Регульований компенсатор неактивних складових повної потужності в судових електроенергетичних системах з напівпровідниковими перетворювачами.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні системи і комплекси». – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв; Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, 2021.

Дисертаційну роботу присвячено подальшому розвитку теорії електромагнітної сумісності і якості електроенергії в судових електроенергетичних системах (СЕЕС) з потужними напівпровідниковими перетворювачами (НП) та регульованими фільтрокомпенсуючими пристроями (РФКП), які призначені для забезпечення компенсації реактивної потужності з одночасним зниженнями рівня вищих гармонік.

Створена і теоретично обґрунтована нова удосконалена структура гібридного РФКП з підключенням реакторного компенсатора (РК) ШІР до точки з'єднання індуктивності і ємності силового резонансного фільтра (РФ). Одержано аналітичну умову узгодження частотних характеристик еквівалентного опору СЕЕС з РФКП зі спектрами гармонік, генерованих НП та РК. Отримані аналітичні вирази для знаходження коефіцієнта несинусоїдальності напруги в кінцевій формі, які враховують весь гармонічний спектр та взаємний вплив елементів системи на електромагнітні процеси. Визначено умови компенсації реактивної потужності (РП), запропоновано та реалізовано структурно-функціональну схему САР РФКП в СЕЕС з НП, яка містить датчики напруг і струмів СГ, стандартний блок обчислення для визначення РП, регулятор та широтно-імпульсний модулятор.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, якість електроенергії, неактивні складові повної потужності, регульований фільтрокомпенсуючий пристрій, коефіцієнт несинусоїдальності напруги, реактивна потужність, активна потужність.

АННОТАЦИЯ

Криворучко Д.В. Регулируемый компенсатор неактивных составляющих полной мощности в судовых электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.09.03 «Электротехнические системы и комплексы». – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев. Национальный университет «Черниговская политехника», г. Чернигов, 2021.

Диссертационная работа посвящена дальнейшему развитию теории электромагнитной совместимости и качества электроэнергии в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) с мощными полупроводниковыми преобразователями (ПП) и регулируемые фильтрокомпенсирующими устройствами (РФКУ), которые предназначены для обеспечения компенсации реактивной мощности с одновременным снижением уровня высших гармоник.

Создана и теоретически обоснована новая усовершенствованная структура гибридного РФКУ с подключением реакторного компенсатора (РК) с ШИР к точке соединения индуктивности и емкости силового резонансного фильтра (РФ). Получены аналитическую условие согласования частотных характеристик эквивалентного сопротивления СЭЭС с РФКУ со спектрами гармоник, генерируемых ПП и РК. Получены аналитические выражения для нахождения коэффициента несинусоидальности напряжения в конечной форме, учитывающих весь гармоничный спектр и взаимное влияние элементов системы на электромагнитные процессы. Определены условия компенсации реактивной мощности (РМ), предложено и реализовано структурно-функциональную схему САР РФКУ в СЭЭС с ЧП, содержит датчики напряжений и токов СГ, стандартный блок вычисления для определения РМ, регулятор и широтно-импульсный модулятор.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, неактивные составляющие полной мощности, регулируемый фильтрокомпенсирующие устройства, коэффициент несинусоидальности напряжения, реактивная мощность, активная мощность.

ABSTRACT

Kryvoruchko D.V. An adjustable compensator of complete power non-active components in ship electric power systems with semiconductor converters.

Dissertation for Candidate degree (Ph.D.) in specialty 05.09.03 – «Electrical complexes and systems». The admiral Makarov National university of shipbuilding, Mikolayv city; National university «Chernihivska politekhnik», Chernigov city, 2021.

Dissertation is intended for further investigation of the theory of electromagnetic compatibility and electric power quality in the ship electric power systems (EPS) with powerful semiconductor converters (SC) and adjustable power line conditioners (APLC). The APLCs provide compensation of reactive power with simultaneous decreasing high harmonics.

The new improved structure of hybrid APLC which consists of the uncontrolled power resonant LC-filter (RF) and the reactor compensator (RC) with pulse-width regulation (PWD) is created and theoretically proved. An analytical condition for adjusting of the frequency characteristics of the equivalent resistance of the EPS with APLC and SC with the spectra of harmonics generated by SC and RC is obtained. To calculate the non-sinusoidality factor of the voltage, on the basis of the analysis of EPS with APLC and SC analytical expression in final form is obtained. The expression takes into account the entire harmonic spectrum and the mutual impact of the system elements on electromagnetic. The conditions of full reactive power (RP) compensation are determined, the structural-functional scheme of the automatic control system (ACS) of APLC in AEPS with SC is offered and implemented. The ACS contains sensors of generator voltages and currents, standard calculation unit and low-pass filter for RP determination, regulator and PWD.

Keywords: electromagnetic compatibility, electric power quality, complete power non-active components, adjustable power line conditioner, total harmonics distortion factor, reactive power, active-power.