

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Крилов Денис Сергійович

УДК 621.314.26

**НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЗМІННОЇ НАПРУГИ В ПОСТІЙНУ
З БЛИЗЬКИМ ДО ОДИНИЦІ КОЕФІЦІЄНТОМ ПОТУЖНОСТІ**

Спеціальність 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор,
Жемеров Георгій Георгійович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри
промислової та біомедичної електроніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Щербак Яків Васильович,
Українська державна академія
залізничного транспорту,
завідувач кафедри
систем електричної тяги

кандидат технічних наук,
Бахнов Леонід Євгенович,
Державне підприємство
“Науково дослідний інститут “ХЕМЗ””,
завідувач відділом

Провідна установа – Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”
Міністерства освіти і науки України,
кафедра промислової електроніки, м. Київ

Захист відбудеться 03.07. 2003 р. о 12-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий 02.06. 2003 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Осічев О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Усе більш гостро виникаюча в останні роки проблема енергозбереження вимагає створення напівпровідникових перетворювачів, у тому числі - перетворювачів змінної напруги в постійну, електромагнітно сумісних (ЕМС) з мережею живлення й обладаючих високим коефіцієнтом корисної дії (ККД).

Тому що традиційні шестипульсні і двонадцятипульсні схеми керованих випрямлячів (КВ), виконані на одноопераційних тиристорах з фазовим регулюванням, не відповідають сучасним вимогам ЕМС, їх необхідно обладувати додатковими пристроями, що дозволяють компенсувати реактивну потужність і вищі гармоніки струму, генеруємі такими перетворювачами в мережу живлення. Одним з рішень може бути включення на боці мережі пасивних L-C фільтрів, налагоджених у резонанс із найбільшими по величині гармоніками струму. Паралельно їм можливо також включення послідовно з'єднаних тиристорного регулятора напруги (ТРН) і реактора, що забезпечують споживання надлишкової реактивної потужності. Таке рішення не може забезпечити автоматичної підтримки заданих величин реактивної потужності і коефіцієнта несинусоїдальності струму мережі у всьому діапазоні регулювання випрямленої напруги.

Застосування силових активних фільтрів (САФ), виконаних на основі автономного інвертора напруги, дозволяє якісно вирішити проблему ЕМС у перетворювальній системі з КВ. Недоліком такого рішення є необхідність компенсації засобами САФ реактивної потужності на стороні мережі живлення, що, у деяких режимах роботи силової схеми, може бути порівнянна з номінальною потужністю навантаження. Це приводить до необхідності проектувати САФ на ту ж потужність, що й КВ, у такий спосіб збільшуючи втрати в цілком керованих ключах фільтра і, в остаточному підсумку, знижуючи коефіцієнт корисної дії всієї перетворювальної системи.

У дисертаційній роботі запропонована перетворювальна система з близьким до одиниці коефіцієнтом потужності (ПОКМ), виконана на основі компенсованого керованого випрямляча (ККВ) і силового активного фільтра. Її істотною відмінністю від розглянутих систем є можливість компенсації реактивної потужності на стороні мережі живлення засобами силової частини ККВ, у той час, як на САФ лягає лише функція компенсації вищих гармонік струму в мережі живлення.

Як показано в дисертаційній роботі, застосування таких систем дозволяє одержати близький за формою до синусоїди струм мережі у всіх режимах роботи, а величину реактивної потужності - рівної нулю чи іншому заданому значенню. Також мінімізується потужність втрат в елементах силової схеми за рахунок виключення реактивної складової струму у вентильних і мережних обмотках перетворювального трансформатора и за рахунок того, що комутація ключів у САФ здійснюється при струмах на порядок менших, чим номінальний струм навантаження, що

дозволяє істотно зменшити динамічні втрати у вентилях. У зв'язку з перерахованими вище перевагами нового класу ПОКМ на основі ККВ, дослідження його характеристик є актуальною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Науково-дослідна робота щодо теми дисертації проводилася відповідно договорів кафедри промислової та біомедичної електроніки НТУ “ХПІ”, що фінансувались з джерел держбюджету Міністерства освіти і науки України за номерами М7810 “Розробка та дослідження алгоритмів адаптивного керування напівпровідниковими перетворювачами частоти”, КН7811 “Розробка та дослідження активних енергетичних фільтрів для поліпшення якості електричної енергії”; відповідно до НДР з НДІ НВО “ХЕМЗ” за номером 78697 “Дослідження вентильного перетворювача з близьким до одиниці коефіцієнтом потужності”, де здобувач був виконавцем.

Мета і задачі дослідження

Метою дисертаційної роботи є дослідження електромагнітних процесів і робочих характеристик перетворювальних систем із близьким до одиниці коефіцієнтом потужності, виконаних на основі компенсованих керованих випрямлячів а також вироблення рекомендацій із практичної реалізації таких схем.

Для досягнення поставленої мети в дисертації вирішувались наступні основні задачі:

- створення методу розрахунку й одержання розрахункових формул і графіків для визначення величини комутаційної активної потужності, рекуперуємої у мережу в компенсованому керованому випрямлячі;
- аналіз закономірностей зміни величин гармонік у струмі мережі і випрямленій напрузі в компенсованому керованому випрямлячі, одержання розрахункових співвідношень;
- розробка системи керування і дослідження робочих характеристик ККВ у режимі повної компенсації реактивної потужності;
- вибір методу керування ключами силового активного фільтра і вироблення практичних рекомендацій із проектування системи керування САФ;
- створення комп'ютерних моделей схем ПОКМ на основі ККВ для перевірки отриманих розрахункових співвідношень і побудови характеристик схеми в квазіусталених і перехідних режимах роботи.

Об'єктом дослідження є перетворювальні системи з близьким до одиниці коефіцієнтом потужності, виконані на основі компенсованих керованих випрямлячів.

Предметом дослідження в роботі є перетворювач із близьким до одиниці коефіцієнтом потужності, виконаний на основі послідовної двонадцятипульсної схеми компенсованого керованого випрямляча.

Методи дослідження. При рішенні поставлених задач використовувалися: рішення систем диференціальних і алгебраїчних рівнянь при аналізі електромагнітних процесів і

характеристик; ряди Фур'є для визначення величини гармонік випрямленої напруги і струму мережі; метод узагальненого вектора і перетворення Кларка при аналізі струмів мережі і напруг; теорія миттєвої реактивної потужності, а також різні пакети комп'ютерних програм при моделюванні і розробці систем керування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- запропоновано нові схеми перетворювачів із близьким до одиниці коефіцієнтом потужності, виконані на основі компенсованих керованих випрямлячів, що мають більш високий ККД у порівнянні з відомими перетворювачами інших типів;
- розроблено метод визначення величин гармонік випрямленої напруги ККВ у режимі повної компенсації реактивної потужності;
- уперше досліджені гармоніки мережного струму ККВ у режимі повної компенсації реактивної потужності, уточнені раніше відомі формули для гармонік струму мережі двонадцятипульсного керованого випрямляча;
- визначено величину комутаційної активної потужності, рекуперуємої у мережу в компенсованому керованому випрямлячі, що дозволило показати більшу ефективність використання силового активного фільтра в ПОКМ у порівнянні з раніше відомими перетворювальними системами;
- вперше отримані співвідношення для визначення граничних кутів керування і комутації ККВ у режимі повної компенсації реактивної потужності, що дозволило визначити залежності граничних кутів керування обох мостів у функції струму навантаження у випрямному і інверторному режимах роботи схеми;
- при створенні системи керування силовим активним фільтром знайдений спосіб використання перетворень Кларка, що дозволив підтримувати постійним напругу на конденсаторі САФ засобами самого САФ.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- створено ряд схем з поліпшеними енергетичними характеристиками на основі ККВ, застосування яких можливо в різних областях промисловості;
- отримано залежності граничних кутів керування мостів ККВ у функції струму навантаження в режимі повної компенсації реактивної потужності, дані практичні рекомендації синтезу системи керування ключами ККВ, що дозволяють більш ефективно використовувати діапазон регулювання;
- визначено величину комутаційної активної потужності, рекуперуємої у мережу в компенсованому керованому випрямлячі, що дозволяє розрахувати встановлену потужність силового активного фільтра;
- розроблено принципи побудови системи керування САФ і мостів ККВ на основі теорії миттєвої реактивної потужності і перетворень Кларка;

- створено комп'ютерну модель перетворювальної системи, що дозволила перевірити працездатність силової схеми, систем керування й авторегулювання, досліджувати робочі характеристики схеми;

- з використанням прийомів і методів моделювання компенсованих керованих випрямлячів розроблений віртуальний лабораторний стенд для дослідження електромагнітних процесів і характеристик шостипульсного керованого випрямляча, застосовуваний на кафедрі “Промислова та біомедична електроніка” НТУ “ХПІ” для навчання студентів по трьох дисциплінах.

Особистий внесок здобувача

Наукові положення і результати, приведені в дисертації, отримані автором особисто. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить:

- методика визначення величин гармонік випрямленої напруги ККВ, одержання розрахункових формул і співвідношень;
- методика визначення величин гармонік мережного струму ККВ, одержання розрахункових формул і співвідношень;
- одержання розрахункових формул для визначення величини комутаційної активної потужності, рекуперуємої ККВ у мережу живлення;
- уточнення формул і співвідношень для визначення величин гармонік струму мережі двонадцятипульсного КВ при деяких значеннях кутів комутації;
- одержання розрахункових формул для визначення граничних кутів керування і комутації ККВ;
- методика створення комп'ютерних моделей ККВ і побудова самих моделей;
- створення моделі ВЛС, її тестування і налагодження.

Апробація результатів дисертації

Матеріали дисертації доповідалися й обговорювалися на міжнародних конференціях: Міжнародної науково-технічної конференції “Силова електроніка і енергоефективність”, м. Алушта, 2000, 2001, 2002 р.; Міжнародної конференції “Проблеми сучасної електротехніки”, м. Київ, 2000, 2002 р.; Міжнародної науково-технічної конференції “Проблеми автоматизованого електропривода”, м. Алушта, 2002 р.; 10-й Міжнародної конференції “Power electronics & motion control” EPЕ-PEMC 2002, м. Кавтат і м. Дубровник, 2002 р..

Публікації

Основний зміст дисертації викладений у 12 публікаціях, з них 11 статей у фахових наукових виданнях, 1 патент України.

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається зі вступу, 4-х розділів, висновків і додатка. Повний обсяг дисертації становить 154 сторінки, з них 50 ілюстрацій по тексту, 12 ілюстрацій на 12 сторінках;

1 таблиці на 1 сторінці; 1 додатку на 6 сторінках та 95 найменувань використаних літературних джерел на 9 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В вступі обґрунтовані актуальність і необхідність роботи, сформульовані мета і задачі наукового дослідження, приведені дані про зв'язок роботи з науковими програмами, показана наукова новизна, практичне значення і реалізація результатів дисертаційних досліджень, приведені дані про їхню апробацію, публікацію і впровадження.

У першому розділі розглянуті сучасні тенденції розвитку перетворювачів змінної напруги в постійну. Показано, що керовані випрямлячі на основі шостипульсної мостової схеми з одноопераційними тиристорами не задовольняють сучасним вимогам в області енергозбереження й електромагнітної сумісності з мережею живлення. Комплектування таких схем пристроями компенсації реактивної потужності і вищих гармонік струму мережі або малоефективно за умови глибокого регулювання напруги навантаження, або приводить до зниження ККД перетворювальної системи. Обґрунтовано актуальність застосування нового класу перетворювачів змінної напруги в постійну з близьким до одиниці коефіцієнтом потужності на основі компенсованих керованих випрямлячів і силового активного фільтра.

Сформульовано основні принципи побудови ПОКМ на основі ККВ, відповідно до яких силова частина ККВ містить дві вентиляльні групи, одна з яких виконується на одноопераційних тиристорах, а інша – на цілком керованих вентилях, наприклад, на GTO тиристорах, причому вентиля обох вентиляльних груп переключуються з частотою мережі живлення; вентиляльна група на одноопераційних тиристорах працює з позитивними кутами керування, відлічуваними у бік відставання від моменту природного включення вентилів; вентиляльна група на GTO тиристорах працює з негативними кутами керування, відлічуваними у бік випередження від того ж моменту природного включення вентилів; паралельно електродам анод і катод GTO тиристорів включаються допоміжні діоди, навантажені на конденсатор САФ, що виконаний у виді автономного інвертора напруги, клеми перемінного струму якого підключаються до мережі живлення; через допоміжні діоди в конденсатор САФ виводиться енергія, що накопичується в індуктивностях вентиляльних обмоток перетворювального трансформатора до моментів запирання GTO тиристорів; напруга на конденсаторі САФ підтримується незмінною. САФ виконує дві функції: 1) вивід у мережу живлення енергії, що накопичується в індуктивностях вентиляльних обмоток і 2) корекцію форми струму мережі перетворювальної системи, інакше – подавлення гармонік струму мережі.

Зазначені зв'язки і розподіл функцій між складовими частинами перетворювальної системи забезпечують декілька її важливих характеристик. По-перше, у всіх режимах роботи струм мережі близький за формою до синусоїди, а величина реактивної потужності підтримується рівної нулю чи іншому заданому значенню. По-друге, мінімізується потужність

втрат в елементах силової схеми за рахунок виключення реактивної складової струму у вентильних і мережних обмотках перетворювального трансформатора і за рахунок відсутності широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) ГТО тиристорів. ШІМ у САФ, необхідна для корекції форми струму мережі, здійснюється при струмах значно менших за номінальний струм навантаження, що дозволяє істотно зменшити динамічні втрати у вентилях. По-третє, поліпшуються динамічні властивості перетворювальної системи за рахунок того, що стрибкоподібна зміна завдання по напрузі на її вході наполовину відпрацьовується миттєво і тільки друга половина стрибка відпрацьовується по синусоїді анодної напруги.

Сформульовано загальне правило повної компенсації реактивної потужності на стороні мережі живлення ККВ, відповідно до якого повинно підтримуватися рівність по модулі кутів зрушення перших гармонік струмів мережі двох вентильних груп на одноопераційних і ГТО тиристорах, що зміщуються в протилежні сторони в процесі регулювання напруги навантаження. З достатнім ступенем точності це можна представити наступним вираженням:

$$|\alpha_G| - \frac{\gamma_G}{2} = \alpha_T + \frac{\gamma_T}{2}, \quad (1)$$

де α_T , γ_T , α_G , γ_G – відповідно, кути керування і комутації струму у вентильних групах на одноопераційних і ГТО тиристорах.

Докладно розглянутий принцип роботи шости- і двонадцятипульсної послідовних схем ККВ. Для подальшого дослідження прийнята схема ПОКМ на основі двонадцятипульсної послідовної схеми ККВ, приведена на рис.1.

Отримані при дослідженні результати можна поширити і на інші схеми ККВ з прийняттям особливостей їхньої роботи.

Проведено порівняння потужності втрат у різних схемах ПОКМ, з якого можна зробити висновок: перетворювачі нового класу мають більш високий ККД, чим інші типи перетворювачів, причому їхня перевага особлива істотна при зниженій випрямленої напрузі і при великих довжинах сполучних кабелів, що пояснюється відсутністю реактивної складової струму в обмотках перетворювального трансформатора і зміною активної складової струму пропорційно величині напруги навантаження.

В другому розділі розглянутий принцип побудови системи керування (СК) ККВ, функціональна схема якої представлена на рис.2, що дозволяє підтримувати нульове чи задане значення реактивної потужності на стороні мережі живлення. Принцип її дії заснований на використанні двох регуляторів: струму навантаження, що виробляє сигнал e_u , і реактивної потужності, що виробляє сигнал Δe_u . Подаючи сигнал Δe_u з різними знаками на СІФУ двох вентильних груп можна забезпечити підтримку заданої величини реактивної потужності.

Отримано формули для визначення максимальних і мінімальних кутів керування і комутації вентильних груп у залежності від величини струму навантаження, що дозволяє

максимально використовувати діапазон регулювання випрямленої напруги. Залежності максимальних кутів керування для схеми рис.1 при допущенні запасу по куту керування в 10 ел.град. приведені на рис.3.

Проведений аналіз величини комутаційної активної потужності, рекуперуємої у мережу в компенсованому керованому випрямлячі дозволив одержати наступне вираження для її визначення:

$$P_{C*} = \frac{P_C}{U_{d0} I_{dH}} = \frac{1}{4} I_{d*}^2 e_K + \frac{3}{2\pi} U_{AB*} I_{d*} \gamma_G, \quad (2)$$

де γ_G – кут комутації струму у вентильній групі на GTO тиристорах;

e_K – напруга короткого перемикавання перетворювального трансформатора ККВ;

U_{AB} - миттєве значення лінійної напруги мережі живлення в середині інтервала комутації.

З (2) випливає, що величина комутаційної активної потужності, що обумовлена індуктивностями розсіювання обмоток перетворювального трансформатора й індуктивностями кабелів, пропорційна квадрату струму навантаження ККВ а також добутку кута комутації моста на GTO тиристорах і миттєвого значення лінійної напруги мережі живлення в середині інтервала комутації (рис.4). Вона збільшується при наближенні кута керування GTO тиристорами до значення $-\frac{\pi}{2}$, що пояснюється максимальними величинами кута комутації і миттєвого значення лінійної напруги мережі живлення в середині інтервала комутації при цьому куті керування.

Аналіз гармонійного складу кривої випрямленої напруги ККВ дозволяє говорити про інтегральне зменшення амплітуд вищих гармонік у ньому в порівнянні з шостипульсними некомпенсованими випрямлячами (рис.5). У роботі приведені три способи визначення величини вищих гармонік випрямленої напруги ККВ, що дають однакові результати. Одним зі способів є інтегрування кривої випрямленої напруги, генеруємої у комп'ютерній моделі. Аналітичні методи засновані на знаходженні синусних і косинусних складових випрямленої напруги ККВ з використанням відомого співвідношення $u_d(\alpha, \gamma) = [u_d(\alpha, 0) + u_d(\alpha + \gamma, 0)]/2$.

У третьому розділі були розглянуті особливості характеристик схеми в режимі повної компенсації реактивної потужності.

Перш ніж приступити до гармонійного аналізу мережного струму ККВ, необхідно було уточнити відомі раніше формули для визначення величин вищих гармонік у струмі мережі шостипульсного мостового і двонадцятипульсного керованих випрямлячів у частині знаків коефіцієнтів рядів Фур'є струмів мережі і величини діючого значення струму мережі в діапазоні кутів комутації $\pi/6 \leq \gamma \leq \pi/3$.

Миттєве значення мережних фазних струмів ККВ є сумою миттєвих значень струмів кожного з двох мостів за винятком струму, формованого пристроєм виводу комутаційної енергії:

$$i_{1\Sigma} = i_{1T} + i_{1G} - i_{1C}, \quad (3)$$

де i_{1T} , i_{1G} і i_{1C} – відповідно миттєві значення мережних фазних струмів мостів на одноопераційних і GTO тиристорах і фазний струм, формований пристроєм виводу комутаційної енергії (див. рис.1). При аналізі гармонійного складу мережного струму ККВ покладалося, що силовий активний фільтр ПОКМ працює тільки в режимі виводу комутаційної активної потужності, формуючи в мережі живлення синусоїдальний комутаційний струм i_{1C} , що знаходиться в протифазі з фазною напругою мережі живлення. Облік комутаційної складової при аналізі гармонійного складу мережного струму ККВ необхідний для дотримання балансу потужностей у перетворювачі. Косинусний і синусний ряди Фур'є для вищих гармонік мережного струму ККВ були визначені як суми косинусних і синусних рядів складових струму мережі, обумовлених двома послідовно включеними мостами. У зв'язку з тим, що комутаційна складова струму мережі синусоїдальна, вона не робить впливу на склад і величини вищих гармонік струму ККВ. Її необхідно враховувати тільки при визначенні величини основної гармоніки і діючого значення струму мережі. Виходячи з вищесказаного, діюче значення k -ї гармоніки мережного струму ККВ знаходимо по вираженню:

$$I_{1k*} = \frac{I_{1k} K_{TP.Э}}{I_{dH}} = \sqrt{A_{k*}^2 + B_{k*}^2} = \sqrt{(A_{kT*} + A_{kG*})^2 + (B_{kT*} + B_{kG*})^2}, \quad (4)$$

де A_{k*} , B_{k*} , A_{kT*} , B_{kT*} , A_{kG*} і B_{kG*} – відповідно відносні значення коефіцієнтів при k -ї гармоніці косинусного і синусного рядів Фур'є сумарного струму мережі і його складових.

На рис.6 приведені залежності діючого значення п'ятої гармоніки мережного струму ККВ від струму навантаження. Суцільною жирною лінією на ньому показана залежність при $\alpha = \pi/6$ діючого значення п'ятої гармоніки струму мережі шостипульсного мостового керованого випрямляча, потужність якого дорівнює потужності ККВ. З рис.6 видно, що в ККВ відбувається інтегральне ослаблення гармонік струму мережі внаслідок їхнього взаємного зсуву по фазі при зміні кутів керування і комутації.

Зовнішні характеристики ККВ розраховуються по наступному вираженню:

$$U_{d*} = \frac{U_d}{U_{d0}} = \frac{\cos \alpha_T + \cos \alpha_G - e_K I_{d*}}{2}, \quad (5)$$

де U_{d*} - відносне значення випрямленої напруги ККВ.

Побудовані в режимі повної компенсації реактивної потужності з використанням (1), вони приведені на рис.7. У якості базового прийнятий кут керування моста на GTO тиристорах α_G . Як видно з рис.7, у режимі повної компенсації реактивної потужності зовнішні характеристики ККВ мають у кілька разів менший нахил, чим зовнішні характеристики шостипульсних і дванадцятипульсних керованих випрямлячів. Статизм зовнішніх характеристик ККВ може бути як позитивним, так і негативним. У такий спосіб при роботі в режимі повної компенсації

реактивної потужності ККВ має властивість стабілізації зовнішніх характеристик.

Запропоновано функціональну схему системи автоматичного керування перетворювальною системою, представлена на рис.8, що має чотири замкнуті контури авторегулювання: струму навантаження; реактивної потужності; виводу комутаційної активної потужності; підтримки постійної напруги на конденсаторі САФ. Система дозволяє поменшити взаємний вплив різних контурів регулювання один на одного і забезпечити усталену роботу схеми у всьому діапазоні зміни випрямленої напруги. Система керування силовим активним фільтром виконана з використанням теорії миттєвої реактивної потужності і з використанням перетворень Кларка.

Четвертий розділ присвячений експериментальній перевірці отриманих у попередніх розділах результатів. Для цієї мети були створені комп'ютерні моделі для перевірки роботи системи в квазіусталеному і перехідному режимах роботи.

Комп'ютерна модель для перевірки роботи системи в квазіусталеному режимі генерує аналітично задану форму кривої струму мережі і випрямленої напруги з урахуванням кутів керування і комутації в режимі повної компенсації реактивної потужності (1). Чисельним інтегруванням цих кривих у заданих межах підтверджена правильність аналітичних залежностей, побудованим по отриманим у дисертаційній роботі вираженням.

Комп'ютерна модель для перевірки роботи перетворювача в квазіусталених і перехідних режимах роботи побудована в програмному середовищі, що має стандартні бібліотечні елементи, у тому числі – силовій електроніки, з параметрами, що задаються користувачем. Модель цілком реалізує функції і взаємозв'язок елементів ПОКМ, зображеного на рис.8, дозволяючи візуально, за допомогою віртуального осцилографа, спостерігати динаміку роботи схеми в будь-якій точці підключення при обліку нюансів конструкції перетворювача і фізичних параметрів його елементів.

На рис.9 приведені осцилограми, отримані за допомогою комп'ютерної моделі, що демонструють реакцію системи авторегулювання ПОКМ на два стрибки напруги завдання по струму (див. рис.9б). З рис.9 видно, що перехідні процеси в системі носять характер, що сходиться, струм навантаження відпрацьовується відповідно до завдання, струм мережі синусоїдальний і знаходиться у фазі з напругою мережі, що свідчить про правильну роботу регулятора реактивної потужності і силового активного фільтра. Напруга на конденсаторі САФ у квазіусталеному режимі підтримується незмінною. Приведені осцилограми свідчать про працездатність схем ПОКМ на основі ККВ, коректність представленої на рис.8 системи керування ПОКМ і точності роботи програмного забезпечення, що враховує при моделюванні самі дрібні деталі фізичної моделі схеми.

Також можна відзначити, що з застосуванням принципів моделювання ПОКМ був створений і впроваджений у навчальний процес віртуальний лабораторний стенд

шостипульсного мостового керованого випрямляча, що дозволяє студентам проводити дослідження електромагнітних процесів схеми в широкому діапазоні потужностей з можливістю варіювання конфігурації схеми.

У рамках практичного дослідження схем ПОКМ був створений фізичний макет на базі мікроконтролера TMS320 LF2407, що реалізує алгоритм роботи системи імпульсно-фазового керування мостами на одноопераційних і GTO тиристорах а також регулятора струму навантаження, у точній відповідності з алгоритмом, запропонованим у комп'ютерній моделі. У такий спосіб була показана можливість реалізація результатів комп'ютерного моделювання в реальному фізичному зразку.

ВИСНОВКИ

Отримані в дисертаційній роботі наукові результати дозволяють розраховувати параметри і робочі характеристики перетворювальних систем на основі компенсованих керованих випрямлячів, а також синтезувати їхню систему автоматичного керування. Вони складають у сукупності істотний внесок у розвиток теорії вентильних перетворювачів з поліпшеними енергетичними показниками.

1. Запропоновані в дисертаційній роботі перетворювальні системи на основі компенсованих керованих випрямлячів і силових активних фільтрів не тільки мають близький до одиниці коефіцієнт потужності, але і мають більш високий коефіцієнт корисної дії, чим інші відомі перетворювальні системи.

2. Установлено закон регулювання кутів керування вентильними групами компенсованими керованими випрямлячами, що забезпечує режим повної компенсації реактивної потужності: різниця модуля кута керування вентильною групою на цілком керованих вентилях і половини кута комутації струму в цій вентильній групі повинна дорівнювати сумі кута керування вентильною групою на одноопераційних тиристорах і половини кута комутації в цій вентильній групі, тобто $|\alpha_G| - \frac{\gamma_G}{2} = \alpha_T + \frac{\gamma_T}{2}$.

3. У режимі повної компенсації реактивної потужності амплітуди вищих гармонік випрямленої напруги компенсованого керованого випрямляча збільшуються з ростом кутів комутації і при деяких сполученнях кутів керування можуть перевищувати амплітуди гармонік напруги некомпенсованого керованого випрямляча на 5 – 15%. Однак інтегрально величини вищих гармонік напруги на виході ККВ у всьому діапазоні регулювання значно менші, ніж в аналогічного шостипульсного мостового УВ. Нахил зовнішніх характеристик ККВ у режимі повної компенсації реактивної потужності при безперервному струмі навантаження значно менший, ніж у шостипульсного і двонадцятипульсного керованих випрямлячів. Статизм зовнішніх характеристик може бути як позитивним, так і негативним.

4. У компенсованому керованому випрямлячі завдяки змінюємому у функції кутів

керування зсуву по фазі між гармоніками струму мережі того самого порядку, створеними різними вентиляними групами, має місце ефект інтегрального зменшення величі вищих гармонік і коефіцієнта несинусоїдальності струму мережі. Отримано аналітичні співвідношення і криві, що дозволяють розраховувати величини вищих гармонік струму мережі у всіх робочих режимах.

5. Величина комутаційної активної потужності, рекуперуємої у мережу в компенсованому керованому випрямлячі, пропорційна квадрату струму навантаження ККВ а також добутку кута комутації моста на ГТО тиристорах і миттєвому значенні лінійної напруги мережі живлення в інтервалі комутації і досягає максимуму при кутах керування ГТО тиристорами $\alpha_G = -\pi/2$. Для зменшення величини рекуперуємої комутаційної потужності рекомендується знижувати напругу короткого перемикачання перетворювального трансформатора.

6. Отримано розрахункові співвідношення і криві для визначення граничних кутів керування і комутації ККВ у режимі повної компенсації реактивної потужності, необхідні при проектуванні промислових систем імпульсно - фазового керування тиристорами ККВ для ефективного використання діапазону регулювання такими.

7. Розроблено функціональну схему системи автоматичного керування перетворювальною системою, що дозволяє поменшити взаємний вплив різних контурів регулювання один на одного і забезпечити роботу схеми у всьому діапазоні випрямленої напруги. Система керування силовим активним фільтром виконана з використанням теорії миттєвої реактивної потужності і з використанням перетворень Кларка.

8. Створено комп'ютерну модель перетворювальної системи з ККВ у якій закладена можливість обліку реальних параметрів силової схеми ККВ, мережі живлення, навантаження і системи автоматичного керування. Розроблену модель можна розглядати як віртуальний дослідно – промисловий зразок перетворювальної системи.

9. Теоретичні результати роботи підтвержені експериментальними даними на віртуальному зразку перетворювальної системи. Створено фізичний макет на базі мікроконтролера фірми Texas Instrument серії TMS320 LF2407, що реалізує алгоритм роботи СІФУ мостів на одноопераційних і ГТО тиристорах а також виконує функції регулятора струму навантаження, запропонованого і випробуваного на моделі ККВ у програмному середовищі.

10. Сформульовані в дисертації наукові положення, рекомендації і висновки базуються на теоретичному аналізі, коректній постановці розв'язуваних задач, погодженості розрахунків з експериментальними даними і відомими з літературних джерел результатами, на апробації основних положень і результатів на наукових конференціях.

Результати дисертаційної роботи були впроваджені у виробничий процес на підприємствах ДП “НДІ “ХЕМЗ” та НВП “ЕОС”, а також у навчальний процес на кафедрі промислової та біомедичної електроніки Національного технічного університету “Харківський

політехнічний інститут”.

Список опублікованих праць за темою дисертації:

1. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Крылов Д.С. Преобразователь с единичным коэффициентом мощности // Технічна електродинаміка. – Київ, 2000. - Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. - Ч. 4. - С. 70-75.

Здобувачу належить аналіз характеристик струму мережі.

2. Жемеров Г.Г., Крылов Д.С. Гармоники в выпрямленном напряжении компенсированного управляемого выпрямителя // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. - 2000. – Вып. 127. - С. 130-141.

Здобувачу належить розробка методики визначення величин гармонік випрямленої напруги ККВ, одержання розрахункових формул і співвідношень.

3. Жемеров Г.Г., Крылов Д.С. Определение величины коммутационной активной мощности, рекуперированной в сеть в компенсированном управляемом выпрямителе // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. - 2000. – Вып. 112. - С.110-115.

Здобувачем одержано розрахункові формули для визначення величини комутаційної активної потужності, рекуперуємої ККВ в мережу живлення.

4. Жемеров Г.Г., Крылов Д.С. Сетевые токи шестипульсного мостового и эквивалентного двенадцатипульсного управляемых выпрямителей // Технічна електродинаміка. – Київ, 2001. - №1. - С. 39-43.

Здобувачем виконані уточнення формул і співвідношень для знаходження величин гармонік струму мережі двонадцятипульсного КВ при деяких значеннях кутів комутації.

5. Жемеров Г.Г., Крылов Д.С. Гармоники в сетевом токе компенсированного управляемого выпрямителя // Технічна електродинаміка. – Київ, 2001. - №6. - С. 26-31.

Здобувачу належить методика визначення величин гармонік мережного струму ККВ, одержання розрахункових формул та співвідношень.

6. Жемеров Г.Г., Сокол Е.И., Крылов Д.С., Бару А.Ю., Шинднес Ю.Л. Новые класс преобразователей переменного напряжения в постоянное, электромагнитно совместимых с питающей сетью // Технічна електродинаміка. – Київ, 2001. - Тематичний випуск “Силовая електроніка та енергоефективність”. - Ч.1. - С. 3-8.

Здобувачем виконано аналіз потужності втрат в різних типах перетворювальних систем.

7. Жемеров Г.Г., Крылов Д.С., Ограничение углов управления в компенсированном управляемом выпрямителе // Технічна електродинаміка. – Київ, 2001. - Тематичний випуск “Силовая електроніка та енергоефективність”. - Ч.1. - С. 65-68.

Здобувачу належить одержання розрахункових формул для визначення граничних кутів керування і комутації ККВ.

8. Жемеров Г.Г., Крылов Д.С. Виртуальный лабораторный стенд для обучения по дисциплине “Силовая электроника” // Технічна електродинаміка. – Київ, 2002. - Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. - Ч.6. - С. 71-74.

Здобувачем створено модель ВЛС а також виконано її тестування і налагодження.

9. Жемеров Г.Г., Крылов Д.С. Характеристики управляемого выпрямителя в режиме полной компенсации реактивной мощности // Электричество. – 2002. - №11. - С. 40-46.

Здобувачу належить розробка функціональної схеми системи керування ККВ а також отримання зовнішньої характеристики ККВ в режимі повної компенсації реактивної потужності.

10. Жемеров Г.Г., Сокол Е.И., Крылов Д.С., Бару А.Ю., Шинднес Ю.Л. Компьютерное моделирование преобразовательной системы с компенсированным управляемым выпрямителем // Технічна електродинаміка. – Київ, 2002. - Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. - Ч.4. - С. 59-62.

Здобувачу належить методика створення комп'ютерної моделі ККВ а також побудова самої моделі.

11. Zhemerov. G., Piinya N., Krylov D., Sokol E. A novel near unity power factor converter system based on compensated controlled rectifier // Proceedings 10th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2002. - Cuvtat and Dubrovnik, Croatia, 9-11 sept. 2002. - Full paper T1-009 on CD. - P.153.

Здобувачем створено структурну схему системи керування ПОКМ, її комп'ютерну модель а також отриманні робочі осцилограми.

12. Декларацийний патент 47631А Україна, МКІ H02M7/12. Перетворювач змінної напруги в постійну з близьким до одиниці коефіцієнтом потужності / Бару О.Ю., Жемеров Г.Г., Ільїна Н.О., Крилов Д.С., Шинднес Ю.Л.; №2001053667; Заявл. 30.05.2001; Опубл. 15.07.2002, Бюл.№7; НКІ 7/145. – 10 с.

Здобувачем виконано з рівною участю здобувача та співавторів.

АНОТАЦІЇ

Крилов Д.С. Напівпровідникові перетворювачі змінної напруги в постійну з близьким до одиниці коефіцієнтом потужності. – Рукопис.

Дисертація на здобуття ученого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут” – Харків - 2003.

Дисертація присвячена дослідженню електромагнітних процесів і характеристик нового класу перетворювачів змінної напруги в постійну, електромагнітно сумісних з мережею живлення, виконаних на основі компенсованих керованих випрямлячів і силового активного фільтра.

Розроблені нові схеми перетворювачів із близьким до одиниці коефіцієнтом потужності

на основі компенсованого керованого випрямляча.

Запропоновано закон регулювання компенсованих керованих випрямлячів, що забезпечує режим повної компенсації реактивної потужності.

Отримано розрахункові формули і залежності для визначення величини комутаційної активної потужності, рекуперуємої у мережу живлення з моста на GTO тиристорах.

Проведено гармонійний аналіз струму мережі і випрямленої напруги ККВ, а також отримані зовнішні характеристики ККВ.

Запропоновано функціональну схему системи автоматичного керування перетворювальною системою.

Доведено можливість практичної реалізації схем ПОКМ на основі ККВ шляхом побудови комп'ютерної моделі для перевірки роботи схеми в квазіусталеному і перехідному режимах, створеної відповідно до запропонованої функціональної схеми.

Обґрунтованість і вірогідність приведених у роботі положень і рекомендацій підтверджена близькістю результатів теоретичних і експериментальних досліджень.

Ключові слова: компенсований керований випрямляч, силовий активний фільтр, компенсація реактивної потужності, корекція форми струму мережі.

Крылов Д.С. Полупроводниковые преобразователи переменного напряжения в постоянное с близким к единице коэффициентом мощности. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – полупроводниковые преобразователи электроэнергии. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”- Харьков- 2003.

Диссертация посвящена исследованию электромагнитных процессов и характеристик нового класса преобразователей переменного напряжения в постоянное, электромагнитно совместимых с питающей сетью, выполненных на основе компенсированных управляемых выпрямителей и силового активного фильтра.

Предложены новые схемы преобразователей с близким к единице коэффициентом мощности на основе компенсированного управляемого выпрямителя. Показано, что эффект энергосбережения и компенсации реактивной мощности преобразователя может быть достигнут за счёт последовательного или параллельного включения вентильных групп, выполненных на однооперационных и запираемых тиристорах, работающих соответственно с положительными и отрицательными углами управления.

Сформулирован закон регулирования компенсированных управляемых выпрямителей, обеспечивающий режим полной компенсации реактивной мощности в соответствии с которым разность модуля угла управления вентильной группой на полностью управляемых вентилях и половины угла коммутации тока в этой вентильной группе должна быть равна сумме угла

управления вентильной группой на однооперационных тиристорах и половины угла коммутации в этой вентильной группе.

Предложен способ регулирования вентильными группами КУВ, обеспечивающий режим полной компенсации реактивной мощности или поддержания постоянного значения реактивной мощности, при котором на входы системы импульсно-фазового управления мостов на однооперационных и GTO тиристорах подаётся с противоположным знаком дополнительный сигнал напряжения управления с выхода регулятора реактивной мощности.

Получены расчётные формулы и кривые, для определения предельных значений углов управления в выпрямительном и инверторном режимах работы КУВ, позволяющие расширить диапазон регулирования выпрямленного напряжения.

Получены расчётные формулы и зависимости для определения величины коммутационной активной мощности, рекуперированной в питающую сеть из моста на GTO тиристорах.

Проведен гармонический анализ сетевого тока и выпрямленного напряжения КУВ. Показано, что содержание высших гармоник в кривой сетевого тока и выпрямленного напряжения КУВ интегрально существенно ниже, чем в некомпенсированном управляемом выпрямителе за счёт взаимной компенсации гармоник двух мостов КУВ, сдвигающихся в противоположные стороны в процессе регулирования.

Показано, что в режиме полной компенсации реактивной мощности внешние характеристики КУВ имеют в несколько раз меньший наклон, чем внешние характеристики шестипульсных и двенадцатипульсных управляемых выпрямителей. Статизм внешних характеристик КУВ может быть как положительным, так и отрицательным.

Доказано, что предложенный закон регулирования КУВ обеспечивает режим практически полной компенсации реактивной мощности на стороне питающей сети во всём диапазоне изменения тока нагрузки КУВ.

Предложена функциональная схема системы автоматического управления преобразовательной системой. Система управления силовым активным фильтром выполнена с использованием теории мгновенной реактивной мощности и с использованием преобразований Кларка, что позволило решить проблему вывода коммутационной активной мощности из моста на GTO тиристорах в питающую сеть средствами САФ.

Доказана возможность практической реализации схем ПЕКМ на основе КУВ путём построения компьютерной модели для проверки работы схемы в квазиустановившемся и переходном режимах, созданной в соответствии с предложенной функциональной схемой. Приведены осциллограммы, показывающие корректность работы контуров авторегулирования и сходимость переходных процессов в разных режимах работы схемы.

Создан физический макет на базе микроконтроллера фирмы Texas Instrument серии

TMS320 LF2407, реализующий алгоритм работы регулятора тока нагрузки и СИФУ мостов на однооперационных и GTO тиристорах, предложенный и опробованный ранее на модели КУВ.

Обоснованность и достоверность приведенных в работе положений и рекомендаций подтверждена близостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: компенсированный управляемый выпрямитель, силовой активный фильтр, компенсация реактивной мощности, коррекция формы сетевого тока.

Krylov D.S. Semiconductor AC to DC Converters With Near Unity Power Factor. – manuscript.

Thesis for candidate degree of technical sciences of speciality 05.09.12 – Semiconductor converters of electric energy – National Technical University “Kharkov Politechnical Institute” – Kharkov - 2003.

The thesis is dedicated to investigation of electromagnetic processes and characteristics of the novel compensated controlled AC to DC converters comprising compensated controlled rectifier (CCR) and power active filter.

New converters with near unity power factor based on compensated controlled rectifier are worked out.

The principles of compensated controlled rectifier control providing total reactive power compensation is proposed.

Equations for calculation of active power value generated to utility network by the GTO bridge were obtained.

Fourier analysis of the CCR network current and output voltage is fulfilled.

Computer simulation of compensated controlled rectifier system in steady state and transient regimes have corroborated the feasibility of the proposed CCR.

Key words: compensated controlled rectifier, power active filter, reactive power compensation, network current form correction, power factor.

Відповідальний за випуск к.т.н., доц. Єресько О.В.

Підписано до друку 21.05.2003 р. Формат видання 145×215.
Формат паперу 60 × 90/16. Папір офсетний. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Замовлення № 1736.

Надруковано в типографії інформаційно – правового центру “Ксилон”

Реєстраційне свідоцтво ВК № 1002 від 13.10.1994 р.

61002, м. Харків, вул. Сумська, 76-а.