

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Ільїна Ольга Володимирівна

УДК 621.314.2: 621.316.727

**ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ
КОМУНАЛЬНИХ МЕРЕЖ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

Спеціальність 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2008

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі промислової і біомедичної електроніки Національного технічного університету “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 і біомедичної електроніки

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

кандидат технічних наук,
Бахнов Леонід Євгенович,
ДП НДІ “ХЕМЗ”,
завідувач відділом
тиристорних перетворювачів

Захист відбудеться 9 жовтня 2008 р. о 14:30 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” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

Автореферат розісланий 3 вересня 2008 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Осичев О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Галузі застосування силових напівпровідникових перетворювачів безупинно розширюються. За останні десятиліття завдяки розробці й освоєнню виробництва широкої гами доступних за ціною силових транзисторів, близьких по характеристиках до ідеальних ключів, запропоновані схеми силових активних фільтрів (САФ), активних керованих випрямлячів і активних компенсаторів (АК) з накопичувачами енергії, що мають високий, близький до одиниці, коефіцієнт корисної дії (ККД). З розвитком нових, сучасних теорій потужності а також швидкодіючих мікропроцесорних і мікроконтролерних систем керування з'явилася можливість розробляти нові, більш досконалі принципи керування такими силовими напівпровідниковими перетворювачами.

Однією з перспективних галузей застосування енергозберігаючих напівпровідникових перетворювачів є комунальні мережі електропостачання. Електричні мережі напругою 10 / 0.38 кВ є останньою ланкою в ланцюзі передачі і розподілу електроенергії від мережі електростанцій до споживачів, від надійності роботи й завантаженості якої вирішальним чином залежать надійність, якість і економічність електропостачання споживачів. Втрати електроенергії в мережах електропостачання досягають 12–17 % від обсягу виробництва. Тому, якщо застосування АК, що має власний ККД 97–98,5 %, дозволяє збільшити ККД всієї системи електропостачання (СЕ) на кілька відсотків, енергозберігаючий ефект і економічна ефективність використання перетворювача будуть досить високими.

У сучасних комунальних мережах електропостачання актуальною проблемою є забезпечення якості електроенергії. Серед показників якості електроенергії, що істотно впливають на роботу всієї системи комунального електропостачання, можна особливо виділити асиметрію напруг і струмів і викривлення форми напруги, викликані гармонійними складовими струму, що споживає нелінійне навантаження.

Питанням енергозбереження та поліпшення якісних показників електроенергії за допомогою напівпровідникових перетворювачів присвячені роботи відомих вчених Буткевича О.Ф., Волкова І.В., Денисова О.І., Долбні В.Т., Жежеленка І.В., Жуйкова В.Я., Кириленка О.В., Ковальова Ф.І., Липківського К.О., Петергері Ю.С., Сокола Є.І., Харитонова С.О., Шидловського А.К., Щербака Я.В., Юрченка М.М.

У дисертаційній роботі обґрунтована доцільність застосування в системах комунального електропостачання енергозберігаючих АК, виконаних на основі паралельних САФ. Застосування АК дозволяє істотно підвищити ККД системи комунального електропостачання за рахунок компенсації миттєвого значення реактивної потужності і

вищих гармонік струмів мережі, усунення пофазної асиметрії струмів навантаження, компенсації струму в нульовому проводі, а також компенсації пульсацій миттєвої активної потужності з періодом, що не перевищує декількох секунд.

Тому тема дисертаційної роботи, присвяченій розробці САФ і АК для комунальних мереж електропостачання, застосування яких дозволяє істотно підвищити сумарний ККД системи електропостачання й одночасно поліпшити її якісні параметри, актуальна.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота проводилася на кафедрі промислової і біомедичної електроніки НТУ “ХП” згідно з держбюджетними темами Міністерства освіти і науки України: “Розробка теоретичних основ і дослідження компенсованих випрямлячів” (№ДР 0103Н000159), “Розробка і дослідження компенсованих керованих випрямлячів” (№ДР 0103Н007473), “Розробка системи та алгоритмів керування напівпровідниковим фільтрокомпенсатором” (№ДР 01060001517); згідно з технічним завданням Управління паливно-енергетичного комплексу Харківської обласної адміністрації, де здобувачка була виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методів зниження втрат електроенергії в комунальних системах електропостачання при одночасному поліпшенні її якості за рахунок застосування енергозберігаючих напівпровідникових перетворювачів, розробка методів розрахунку і способів керування такими перетворювачами.

Для досягнення поставленої мети в дисертації вирішувались наступні основні задачі:

- виявлення та аналіз усіх складових втрат електроенергії в комунальних системах електропостачання, їхньої залежності від параметрів системи і від форми графіків навантаження;
- розробка методик розрахунку еквівалентних параметрів системи електропостачання та ступеню зменшення втрат електроенергії при введенні в роботу активного компенсатора;
- синтез систем керування активним компенсатором на основі різних теорій миттєвих активної і реактивної потужностей, вибір оптимального алгоритму керування;
- уточнення співвідношень для перетворень координат узагальнених векторів напруг і струмів при описі процесів у трифазних чотирипровідних системах електропостачання;
- порівняльний аналіз можливості використання різних накопичувачів і альтернативних джерел електроенергії в системах електропостачання з активними компенсаторами;
- комп'ютерне моделювання електромагнітних процесів у системах комунального електропостачання з активними компенсаторами при використанні додатка Simulink програмного пакета Matlab.

Об'єктом дослідження є процеси передачі, накопичення, кондиціонування

електроенергії в системах комунального електропостачання з активними напівпровідниковими компенсаторами.

Предметом дослідження в роботі є режими роботи й алгоритми керування активними напівпровідниковими компенсаторами і накопичувачами енергії.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених задач використовувалися: методи розв'язання систем диференціальних і алгебраїчних рівнянь при аналізі електромагнітних процесів і характеристик схем системи комунального електропостачання й активного компенсатора; перетворення координат і сучасні теорії потужності для аналізу роботи систем електропостачання і побудови алгоритмів керування перетворювальними системами; розкладання в ряди Фур'є для визначення величини гармонік струму мережі; моделювання за допомогою прикладних пакетів комп'ютерних програм при синтезі систем керування перетворювачами, дослідженні режимів роботи й одержанні робочих характеристик системи комунального електропостачання з компенсатором.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- на основі аналізу складових втрат електроенергії в комунальних мережах електропостачання показано, що додаткові втрати виникають унаслідок наступних факторів: фазового зсуву між просторовими векторами напруги й струму трифазної системи, несинусоїдальності струмів навантаження, пофазної асиметрії струмів, пульсацій миттєвої активної потужності, пульсацій миттєвої реактивної потужності;
- вперше дана комплексна оцінка ступеня зниження сумарного ККД системи електропостачання в залежності від відносної амплітуди пульсацій миттєвої активної потужності і потужності резистивного короткого замикання системи;
- показано, що можливості підвищення ККД системи електропостачання шляхом компенсації пульсацій миттєвої активної потужності можуть бути не меншими, ніж при компенсації реактивної потужності;
- показана принципова можливість поліпшення показників якості електропостачання комунальних споживачів при одночасному підвищенні ККД системи електропостачання, для чого ККД активного компенсатора, що підключається паралельно навантаженню, повинний бути не меншим 97 - 98.5%;
- розроблений метод розрахунку параметрів накопичувачів енергії, що використовуються в активних компенсаторах при компенсації пульсацій у графіку миттєвої активної потужності;
- при створенні системи керування активним компенсатором запропонований новий спосіб розрахунку сигналів завдання струмів компенсатора, заснований на крос-векторній теорії потужності.

Практичне значення одержаних результатів для галузей напівпровідникової техніки та електроенергетики полягає в наступному:

- запропонована методика розрахунку еквівалентних параметрів системи електропостачання і ступеня зменшення втрат електроенергії при введенні в роботу активного компенсатора, що дозволяє оцінити доцільність установки активного компенсатора в конкретній системі електропостачання;
- розроблені принципи побудови системи керування активним компенсатором на основі крос-векторної і p-q-r теорій миттєвих активної і реактивної потужностей, які дозволяють забезпечити синусоїдальні симетричні струми мережі, співпадаючі за фазою з напругами мережі в усіх режимах роботи системи енергопостачання;
- створена комп'ютерна модель системи комунального електропостачання з активним компенсатором, у якій зроблена оптимізація силових ланцюгів і систем керування активним компенсатором для системи електропостачання комунальних споживачів;
- розроблені рекомендації з об'єднання в одну систему електропостачання розподільної мережі, навантаження, активного компенсатора, накопичувача енергії й альтернативних джерел енергії, що дозволить підвищити ККД усієї системи за рахунок зменшення кількості перетворювальних ланок і вирівнювання графіка активної потужності системи електропостачання.

Результати дисертаційної роботи були впроваджені у виробничий процес на підприємствах ДП “НДІ “ХЕМЗ” (м. Харків), та НВП “ЕОС”(м. Харків), АК “Харківобленерго”, а також у навчальний процес на кафедрі промислової та біомедичної електроніки Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення і результати, приведені в дисертації, отримані здобувачем особисто. Серед них:

- методика визначення частоти пульсацій миттєвих активної та реактивної потужностей у залежності від виду асиметрії, одержання залежностей амплітуд пульсацій миттєвих потужностей від коефіцієнта несиметрії за нульовою послідовністю;
- визначення уточнених коефіцієнтів у матриці модифікованого перетворення Парку, експериментальна перевірка уточнених співвідношень на Matlab-моделі;
- математичні співвідношення для визначення залежності ККД СЕ від відносних значень миттєвих активної і реактивної потужностей, доказ її інваріантності до частоти пульсацій миттєвої активної потужності;
- одержання залежності ККД СЕ від відносної амплітуди пульсацій активної потужності при накладенні пульсацій різних частот;
- аналіз протиріч співвідношень теорії потужності Фрізе, доказ ідентичності співвідношень

Фрізе при устремлінні до нуля інтервалу усереднення і співвідношень крос-векторної теорії потужності;

- одержання залежностей величини енергоємності конденсаторного накопичувача АК від параметрів графіка активної потужності, визначення ККД СЕ з АК і ємнісним накопичувачем;
- одержання залежностей миттєвого ККД від миттєвого коефіцієнта потужності.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на: Міжнародній науково-технічній конференції “Силовая електроніка та енергоефективність” (м. Алушта, 2005, 2006, 2007 рр.), Міжнародній конференції “Проблеми сучасної електротехніки” (м. Київ, 2006, 2008 рр.), семінарах Національної академії наук України з комплексної проблеми “Наукові основи електроенергетики” (м. Харків, 2006 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації викладений у 10 публікаціях у фахових наукових виданнях ВАК України.

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається зі вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації становить 199 сторінок, з них 37 ілюстрацій по тексту, 15 ілюстрацій на 12 окремих сторінках; 16 таблиць по тексту, 6 таблиць на 6 окремих сторінках; 2 додатки на 13 сторінках та 83 найменувань використаних літературних джерел на 9 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовані актуальність і доцільність виконаної роботи, сформульовано мету і задачі наукового дослідження, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, викладено наукову новизну, практичне значення та реалізацію результатів дисертаційних досліджень, наведено відомості про їхню апробацію, публікацію та впровадження.

У першому розділі проведений аналіз мереж систем комунального електропостачання напругою 10 / 0.38 кВ, за результатами якого виявлено, що такі мережі мають відносно низький ККД, а отже, значний резерв енергозбереження. Показано, що втрати електроенергії, які виникають у СЕ при передачі енергії споживачу, мають декілька причин, усунення яких дозволить одержати економічний ефект: фазовий зсув основної гармоніки струму джерела відносно напруги; асиметрія основних гармонік фазних струмів; вищі гармоніки струму навантаження, у тому числі кратні трьом; пульсації величини миттєвої реактивної потужності; пульсації величини миттєвої активної потужності; струми в

нульовому проводі. Застосування сучасних засобів силової електроніки, а саме САФ і АК, дозволяє усунути всі перераховані вище причини зниження ККД комунальних мереж електропостачання, одночасно поліпшуючи якісні показники електроенергії, що поставляється споживачу.

Розглянуто різні схеми САФ, які класифікуються за способом підключення до мережі на паралельні, послідовні та гібридні, за топологією – на автономний інвертор напруги з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) і автономний інвертор струму з ШІМ, і за способом підключення нульового проводу. В комунальних системах електропостачання застосування паралельного САФ на базі автономного інвертора напруги з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), схема якого приведена на рис. 1, є оптимальним, тому що в більшості випадків навантаження носить активно-індуктивний характер. При цьому у випадку виходу САФ з ладу він може бути відключений без перебою в роботі СЕ.

Проаналізовані теорії миттєвих потужностей, які визнані найкращими з погляду їхнього застосування для побудови систем керування САФ й АК. Вони засновані на аналізі миттєвих значень напруг і струмів системи й оперують миттєвими значеннями активної і реактивної потужностей. Миттєві значення напруг і струмів трифазної системи представлені як просторові вектори в просторовій декартовій системі координат, показаній на рис. 2.

Рис. 1. Схема САФ на базі автономного інвертора напруги з ШІМ

Миттєва активна потужність трифазної системи визначається як скалярний добуток векторів напруги та струму. Вектор миттєвої реактивної

потужності теорії визначають як векторний добуток просторових векторів напруги і струму. Миттєва реактивна потужність визначається як модуль вектора.

Через те що навантаження системи комунального електропостачання може змінюватися довільно в будь-який момент часу, для ефективної роботи АК необхідно оперувати миттєвими значеннями активної і реактивної потужностей. Показано, що з розглянутих у розділі трьох теорій активної потужності, – р-q, крос-векторної і р-q-г, – найкращий ефект варто очікувати при використанні р-q-г теорії, яка дозволяє ввести три

Рис. 2. Вектори напруг, струмів і реактивної потужності в декартовій системі координат

незалежних регулятори складових потужності по трьох осях.

Проаналізована структура комунальних СЕ з САФ, накопичувачами енергії й альтернативними джерелами енергії. Використання розподілених електростанцій паралельно з централізованою електромережею підвищує надійність і гарантує безперебійність електропостачання, значно зменшує втрати на транспортування електроенергії. Режим

роботи СЕ також може бути поліпшений за рахунок згладжування піків у графіках споживання потужності навантаженням. У розглянутих у дисертації комунальних мережах електропостачання з'являється можливість сполучити функції АК й інвертора напруги в одному перетворювачі, що дозволить альтернативній електростанції працювати з максимальним ККД, запасаючи не витрачаєму в даний момент часу енергію в накопичувачі; підвищити ККД усієї системи за рахунок зменшення кількості перетворювальних ланок і вирівнювання графіка активної потужності СЕ.

У другому розділі докладно розглянуті причини виникнення й ефект компенсації пульсацій у графіках миттєвих активної і реактивної потужностей у СЕ. Виявлено, що ефект енергозбереження при використанні АК досягається завдяки зменшенню діючих значень струмів у фазних кабелях лінії 0.38 кВ і 10 кВ, а також у трансформаторах 10 /0.38 кВ і 110(35)/10 кВ і повної компенсації струму в нульовому проводі лінії 0.38 кВ. Симетрування струмів мережі також дає додатковий ефект енергозбереження.

В трифазній чотирипровідній системі з симетричними напругами мережі несиметрія навантаження приводить до пульсацій миттєвих значень активних і реактивних потужностей, а також до виникнення реактивної потужності в ланцюзі з чисто активним навантаженням і миттєвої активної потужності в ланцюзі з чисто реактивним навантаженням. Несиметрія напруг мережі при симетричному навантаженні викликає пульсації активної потужності в схемі з чисто активним навантаженням, миттєву активну потужність у ланцюзі з реактивним навантаженням, а також пульсації миттєвої активної і миттєвий реактивної потужностей. Амплітуди змінних складових активної і реактивної потужностей у першому наближенні пропорційні коефіцієнту несиметрії за нульовою послідовністю. Для змішаного навантаження амплітуда змінної складової потужності залежить також від коефіцієнта зсуву навантаження.

У системах комунального електропостачання графік миттєвої активної потужності має складові з періодами повторюваності, що відрізняються між собою на кілька порядків: доба, години, хвилини, секунди. Пульсації активної потужності різної частоти викликають додаткові втрати електроенергії в СЕ, що раніше не враховувалися. Причому величина цих втрат не залежить від періоду пульсацій активної потужності. Наявність декількох пульсацій миттєвої активної потужності з різними періодами повторюваності приводить до додаткового зниження ККД СЕ в порівнянні з випадком пульсації тільки однієї частоти.

Показано можливість значного збільшення ККД СЕ за рахунок компенсації змінної складової миттєвої активної потужності одночасно з компенсацією миттєвої реактивної потужності. При значеннях параметра відношення потужності резистивного короткого замикання системи, що визначається за формулою

$$P_{K3} = \frac{U_s^2}{R_s}, \quad (1)$$

де U_s – модуль просторового вектору напруги в СЕ, R_s – внутрішній опір СЕ, до номінальної активної потужності навантаження P_{usf} в межах $10 < P_{K3}/P_{usf} < 20$, характерних для комунальних мереж електропостачання, сумарний ККД СЕ теоретично може бути підвищений на 10-15%.

Запропоновано спрощений метод розрахунку ККД СЕ, що дає прийнятну точність результатів при $P_{K3}/P_{usf} > 12$, а також точний метод розрахунку ККД із використанням Matlab-моделі симетричної СЕ з можливістю завдання циклічних графіків миттєвих активної і реактивної потужностей навантаження за формулами:

$$p_L = P_{usf} \left(1 + \Delta \sin \frac{2\pi}{T} t \right), \quad (2)$$

$$0 \leq \Delta \leq 1,$$

$$q_L = \nu \cdot P_{usf} \left(1 + \Delta \sin \frac{2\pi}{T} t \right), \quad (3)$$

$$0 \leq \nu \leq 1,$$

де T – період пульсацій потужності навантаження.

Отримані на Matlab-моделі експериментальні результати, приведені на рис. 3, дозволяють судити про розширення меж можливого збільшення ККД.

Показано, що для ефективної компенсації реактивної потужності необхідне застосування АК, система керування якого реалізується на базі сучасних теорій миттєвої активної і реактивної потужностей, і який виконує наступні функції: повна компенсація миттєвого значення реактивної потужності (тобто, компенсується як середня реактивна потужність так і її пульсації) і вищих гармонік струмів мережі, в результаті чого струми мережі синусоїдальні, а фазовий зсув між струмом і напругою в кожній фазі близький до нуля; усунення пофазної асиметрії струмів навантаження; компенсація струму в нульовому проводі; компенсація пульсацій миттєвої активної потужності з періодом, що не перевищує декількох секунд. Використання пасивних конденсаторних компенсаторів, налаштованих на середню реактивну потужність навантаження, при наявності пульсацій миттєвої реактивної потужності не дає повного енергозберігаючого ефекту.

Рис. 3. Залежність ККД СЕ від параметрів Δ і ν при фіксованих значеннях P_{K3}/P_{usf}
 $P_{K3}/P_{usf}=50$

У третьому розділі розглянуті силові схеми й системи керування АК та накопичувачами електроенергії. Показано, що компенсація пульсацій активної потужності в СЕ комунальних споживачів принципово може бути реалізована шляхом підключення паралельно навантаженню напівпровідникових компенсаторів на основі автономних інверторів напруги з ємнісним накопичувачем енергії, на основі інвертора струму із ШІМ і зі надпровідним індуктивним накопичувачем (НПН) енергії, а також на основі компенсованого керованого випрямляча зі надпровідним індуктивним і ємнісним накопичувачами.

Отримано співвідношення для розрахунку параметрів ємнісних та індуктивних накопичувачів енергії, що враховують корисну середню потужність СЕ, відносну амплітуду пульсацій і припустимі межі зміни енергії накопичувача.

Розрахункова величина ємності батареї конденсаторів АК на основі автономного інвертора напруги з ємнісним накопичувачем енергії:

$$C_d = \frac{\Delta \cdot P_{usf} \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot U_{CAV}^2}, \quad (4)$$

де k – коефіцієнт, що визначає межі зміни робочої напруги батареї конденсаторів, U_{CAV} – середнє значення напруги на конденсаторі.

Розрахункова формула для визначення індуктивності НПН АК на основі автономного інвертора струму:

$$L_d = \frac{9 \cdot \Delta \cdot T \cdot U_s^2 \cdot (1 - k^2)}{4 \cdot \pi \cdot k \cdot P_{usf}}. \quad (5)$$

де U_s – діюче значення фазної напруги джерела, $k \leq 0.20$ – коефіцієнт.

Середнє значення струму НПН АК на основі автономного інвертора струму:

$$I_{dAV} = \frac{\sqrt{2} \cdot P_{usf}}{3 \cdot U_s \cdot (1 - k^2)}. \quad (6)$$

Розрахункова формула для визначення індуктивності НПН АК на основі компенсованого керованого випрямляча:

$$L_d = (1 + \gamma) \cdot \frac{\Delta \cdot T \cdot P_{usf}}{I_{dnom}^2 \cdot \pi}. \quad (7)$$

де γ – відносне значення мінімального запасу енергії в НППН у частках амплітуди змінної складової енергії,

$$I_{dnom} = \frac{\Delta \cdot P_{usf} \cdot \sqrt{3}}{K_U \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot U_S} \quad (8)$$

– номінальний струм НППН, K_U – коефіцієнт, який враховує відхилення напруги мережі.

Виявлено, що компенсатор пульсацій активної потужності на основі компенсованого керованого випрямляча дозволяє істотно зменшити величину струму в надпровідній котушці в порівнянні зі схемою компенсатора на основі інвертора струму із ШІМ, однак схема компенсованого керованого випрямляча вимагає включення спеціального триобмотувального трансформатора.

Параметри накопичувача електроенергії, а саме, потужність втрат в ньому, визначають енергетичну доцільність компенсації пульсацій миттєвої активної потужності навантаження. Проведені в дисертації розрахунки показали, що потужність втрат в накопичувачі енергії не повинна перевищувати 1...1.5% від номінальної середньої потужності СЕ. Умова енергетичної доцільності компенсації пульсацій миттєвої активної потужності навантаження за допомогою компенсатора з ємнісним накопичувачем енергії при номінальній потужності СЕ 100 кВА виконується навіть при періоді повторюваності, що дорівнює десяти секундам. Однак габарити і маса батареї конденсаторів при цьому надмірно великі.

Отримано нові співвідношення для модифікованих перетворень Парка і їхнього окремого випадку – модифікованих перетворень Кларка, що прив'язані до уніфікованої координатної структури, знімають протиріччя при визначенні миттєвої активної потужності до й після перетворень і забезпечують "стикування" чотирьох просторових систем координат, використовуваних у силовій електроніці, із трьома плоскими системами координат, використання яких доцільно при аналізі урівноважених трифазних СЕ.

Запропоновано структуру системи автоматичного керування АК на основі крос-векторної теорії потужності, розроблену за принципами безпосереднього керування за струмом, що приведена на рис. 4. Така система керування АК значно спрощує алгоритм обчислення струмів завдання компенсатора за рахунок виключення достатньо складних блоків векторного перемноження, що застосовуються при обчисленні миттєвої реактивної потужності і струмів компенсатора.

Рис. 4. Крос-векторна система керування АК з завданням за струмами

На основі р-q-г теорії потужності розроблена система автоматичного керування АК, представлена на рис. 5, що забезпечує повну компенсацію миттєвої реактивної потужності

при будь-яких видах навантаження. В р-q-г системі керування АК використана нова форма перетворення з координат pqr у координати $\alpha\beta 0$.

Рис. 5. р-q-г система керування АК

Перетворювання струмів завдання $i_{Cp}^*, i_{Cq}^*, i_{Cr}^*$ з координат pqr у координати $\alpha\beta 0$ здійснюється по співвідношеннях:

$$\begin{bmatrix} i_{C\alpha}^* \\ i_{C\beta}^* \\ i_{C0}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 & -\sin \theta_1 & -\cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \\ \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 & \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{Cp}^* \\ i_{Cq}^* \\ i_{Cr}^* \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де:

$$\Theta_1 = \arctg \frac{u_\beta}{u_\alpha}, \quad (10)$$

$$\Theta_2 = \arctg \frac{u_0}{u_{\alpha\beta}} = \arctg \frac{u_0}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}}, \quad (11)$$

u_α, u_β, u_0 – проекції вектора напруги на осі $\alpha, \beta, 0$.

Четвертий розділ присвячений комп'ютерному моделюванню СЕ з АК, експериментальним дослідженням систем комунального електропостачання і техніко-економічному аналізу СЕ з напівпровідниковими компенсаторами.

Створена і ретельно досліджена Matlab-модель системи електропостачання з АК номінальною потужністю 320 кВА, в якій були враховані всі елементи СЕ. Системи керування в моделі АК були синтезовані на базі співвідношень крос-векторної теорії потужності з використанням принципу безпосереднього керування за струмом та на базі співвідношень р-q-г теорії потужності. Результати моделювання показали працездатність і ефективність АК при широкому діапазоні змін параметрів навантаження. При цьому характер роботи моделі СЕ із системою автоматичного керування на основі р-q-г теорії потужності не змінюється при будь-якому ступені асиметрії навантаження, наприклад, при повному обриві однієї фази навантаження, що проілюстровано рис. 4, або навіть двох фаз навантаження, тоді як активний компенсатор із крос-векторною системою керування не може цілком компенсувати асиметрію при обриві однієї фази СЕ.

Рис. 4. Машинограми струмів і напруг мережі, ККД і миттєвих потужностей СЕ до і після підключення АК ($t=0.3s$) з р-q-г системою керування при обриві фази С навантаження

В усіх випадках підключення АК паралельно навантаженням у комунальних мережах електропостачання дозволяє одночасно

збільшити на кілька відсотків ККД системи й істотно зменшити відхилення напруги в споживачів електроенергії.

Розроблено метод розрахунку параметрів СЕ, що враховує при визначенні еквівалентного внутрішнього опору системи омичні опори обмоток трансформатора 10 / 0.38 кВ, кабелів ліній 10 кВ, обмоток трансформатора 110(35)/10 кВ, а також паралельні навантаження кабелів і трансформаторів шляхом уведення коефіцієнтів, що залежать від співвідношення потужностей навантажень.

Проаналізовані дані моніторингу мереж електропостачання м. Дергачі, який виконувався разом з АК "Харківобленерго", зроблені виміри графіків навантаження, пофазної асиметрії і реактивної потужності навантаження Дергачівської обласної районної лікарні. Результати моніторингу і вимірів послужили основою для обґрунтування можливості зменшення втрат енергії в системах електропостачання.

Зроблено оціночний розрахунок економічного ефекту від впровадження АК в СЕ, який показав, що строк окупності витрат на виготовлення й установку дослідно-промислового зразка АК складає для розглянутого випадку біля двох років.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішені науково-практичні задачі обґрунтованого зниження втрат електроенергії в комунальних системах електропостачання при одночасному поліпшенні її якості за рахунок застосування енергозберігаючих напівпровідникових перетворювачів, а також розробки методів розрахунку і способів керування такими перетворювачами. При цьому отримані наступні наукові результати:

1. Показано адекватність сучасного уявлення про миттєві активну і реактивну потужності. Миттєва активна потужність дорівнює скалярному добутку просторових векторів напруги і струму і характеризує швидкість передачі енергії в трифазній системі електропостачання. Вектор миттєвої реактивної потужності дорівнює векторному добутку просторових векторів напруги і струму і характеризує додаткові втрати енергії в системі електропостачання. Рівність нулю модуля вектора реактивної потужності відповідає мінімуму додаткових втрат енергії.

2. Надано якісні і кількісні оцінки ефекту підвищення сумарного ККД системи електропостачання за рахунок компенсації пульсацій у графіках миттєвої активної потужності навантаження. Показано, що цей ефект у ряді випадків може бути не меншим за ефект від повної компенсації реактивної потужності. У комунальних мережах електропостачання теоретична можливість підвищення ККД складає 4–12%.

3. Розроблено методику розрахунку еквівалентних опорів мережі комунального електропостачання, що враховує опір високовольтних і низьковольтних кабелів і обмоток трансформатора, а також методику обробки результатів моніторингу добових і тижневих графіків навантажень. Обидві методики випробувані при дослідженнях режимів роботи на ТП 18 у м. Дергачі, що виконувалися разом з АК "Харківобленерго" за допомогою цифрового приладу "Енергомонитор ЭМ 33".

4. Сформульовано вимоги до активного компенсатора для комунальних мереж електропостачання: максимальна швидкодія, можливість підключення паралельно навантаженню, наявність накопичувача енергії, – принаймні, – невеликої енергоємності, достатньої для компенсації пульсацій активної потужності з подвійною частотою мережі і більш високими частотами. Як основну схему активного компенсатора обрано схему автономного інвертора напруги з ємнісним накопичувачем енергії.

5. Розроблено систему керування активним компенсатором, що забезпечує компенсацію високочастотних пульсацій миттєвої активної потужності (з частотою 100 Гц і вище) і повну компенсацію реактивної потужності. Показано, що найкращі якісні показники має система керування, синтезована на основі p - q - r теорії потужності.

6. Показано, що традиційні перетворення Парка - Горєва з просторових декартових координат abc у координати $\alpha\beta 0$ або $dq0$ при описі трифазної чотирипровідної системи дають погрішність, що полягає у відсутності рівності миттєвої активної потужності до і після перетворення, тобто в порушенні закону збереження енергії. Запропоновано модифікацію перетворень, що усуває цю погрішність.

7. Отримано альтернативну форму прямих і зворотних перетворень координат з $\alpha\beta 0$ у pqr через косинуси кутів повороту осей, які спрощують алгоритм роботи системи керування.

8. Виконано порівняння трьох систем активних компенсаторів: на основі інвертора напруги і конденсаторного накопичувача; на основі інвертора струму і НППН; на основі компенсованого керованого випрямляча і НППН. Показано, що в даний час у схемі автономного інвертора напруги з конденсаторним накопичувачем енергії можлива ефективна, – при підвищенні сумарного ККД, – компенсація пульсацій активної потужності з періодом повторюваності в декілька секунд.

9. Розроблено Matlab-модель системи електропостачання житлового будинку з АК,

підключеним паралельно навантаженню, системи керування яким виконані на основі кросс-векторної і p-q-r теорій потужності. Результати дослідження Matlab-моделі цілком підтвердили отримані в дисертації теоретичні висновки і показали працездатність схеми при будь-яких типах асиметричних навантажень фаз, аж до обриву одного чи навіть двох фазних кабелів. В усіх випадках підключення активного компенсатора цілком симетрує систему так, що струми мережі стають синусоїдальними, співпадаючими за фазою з напругами мережі, сумарний ККД зростає на кілька відсотків і підвищується напруга на навантаженні.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г. Ильина О.В. Активные и реактивные мощности в трехфазных четырехпроводных сетях с асимметричной нагрузкой // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕДНАНУ. – 2005. – Тематичний вип., ч. 4. – С. 44-49.

Здобувачем виконано визначення частоти пульсацій миттєвих активної і реактивної потужностей у залежності від виду асиметрії, одержання залежностей амплітуд пульсацій миттєвих потужностей від коефіцієнта несиметрії по нульовій послідовності.

2. Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Тугай Д.В. Преобразования координат в электроприводе и силовой электронике // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕДНАНУ. – 2006. – Тематичний вип., ч. 1. – С. 81-88.

Здобувачем визначені нові коефіцієнти у матриці модифікованого перетворення Парку, експериментально перевірені нові співвідношення на Matlab-моделі.

3. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Тугай Д.В. Компенсация пульсаций мгновенной активной мощности в цепях с резистивной нагрузкой // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕДНАНУ. – 2006. – Тематичний вип., ч. 6. – С. 36-41.

Здобувачем виведені математичні залежності для визначення ККД системи електропостачання, доказана її інваріантність до частоти пульсацій миттєвої активної потужності.

4. Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Тугай Д.В. Энергосберегающий эффект компенсации пульсаций мгновенной активной мощности // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕДНАНУ. – 2006. – Тематичний вип., ч. 4. – С. 22-27.

Здобувачем одержані залежності ККД системи електропостачання від відносної амплітуди пульсацій активної потужності при накладенні пульсацій різних частот.

5 Жемеров Г.Г., Домнин И.Ф., Ильина О.В., Тугай Д.В. Энергоэффективность коррекции фазы тока и компенсации пульсаций активной и реактивной мощностей в трехфазной системе электроснабжения // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕДНАНУ. –

2007. – №1. – С. 52-57.

Здобувачем визначені залежності ККД системи електропостачання від відносних значень миттєвих активної і реактивної потужностей.

6. Жемеров Г.Г., Сокол Е.И., Ильина Н.А., Ильина О.В. О понятиях «мгновенная активная мощность» и «мгновенная реактивная мощность» // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕДНАНУ. – 2007. – Тематичний вип., ч. 1. – С. 33-44.

Здобувачу належить доказ ідентичності співвідношень Фрізе при устремлінні до нуля інтервалу усереднення і співвідношень крос-векторної теорії потужності.

7. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Накопители энергии компенсаторов пульсаций мгновенной активной мощности // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕДНАНУ. – 2007. – Тематичний вип., ч. 3. – С. 23-28.

Здобувачем одержано залежності величини електроємності конденсаторного накопичувача АК від параметрів графіка активної потужності.

8. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Теория мощности Фризе и современные теории мощности // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2007. – №6. – С. 63-65.

Здобувачем виконаний аналіз протиріч співвідношень теорії потужності Фрізе.

9. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Расчет параметров емкостного накопителя энергии компенсатора пульсаций мгновенной активной мощности // Электричество. – М., 2008. – №1. – С. 54-59.

Здобувачу належить визначення ККД системи електропостачання з АК і ємнісним накопичувачем.

10. Жемеров Г. Г., Ильина Н. А., Ильина О.В. Взаимосвязь между модулем мгновенной реактивной мощности и КПД системы электроснабжения // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕДНАНУ. – 2008. – Тематичний вип., ч. 4. – С. 31-36.

Здобувачем одержано залежності миттєвого ККД від миттєвого коефіцієнта потужності.

АНОТАЦІЇ

Ільїна О.В. Енергозберігаючі напівпровідникові перетворювачі для комунальних мереж електропостачання. – Рукопис.

Дисертація на здобуття ученого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут” – Харків - 2008.

Дисертація присвячена розробці методів зниження втрат електроенергії в комунальних системах електропостачання при одночасному поліпшенні її якості за рахунок

застосування енергозберігаючих напівпровідникових перетворювачів, розробці методів розрахунку і способів керування такими перетворювачами. Показано можливість значного збільшення ККД систем електропостачання за рахунок компенсації змінної складовий миттєвої активної потужності одночасно з компенсацією миттєвої реактивної потужності за допомогою активного компенсатора, що підключається паралельно навантаженню і має накопичувач енергії. Отримано співвідношення для розрахунку параметрів ємнісних і індуктивних накопичувачів енергії активних компенсаторів на базі перетворювачів різних типів. Запропоновано нові функціональні схеми систем автоматичного керування активним компенсатором на основі крос-векторної та p-q-r теорій потужності, що забезпечують повну компенсацію миттєвої реактивної потужності при будь-яких видах навантаження.

Ключові слова: активний компенсатор, силовий активний фільтр, система електропостачання, компенсація миттєвої реактивної потужності, корекція форми струму мережі.

Ильина О.В. Энергосберегающие полупроводниковые преобразователи для коммунальных сетей электроснабжения. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – полупроводниковые преобразователи электроэнергии. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”- Харьков- 2008.

Диссертация посвящена исследованию возможностей и разработке методов снижения потерь электроэнергии в коммунальных системах электроснабжения при одновременном улучшении ее качества за счет применения энергосберегающих полупроводниковых преобразователей, разработке методов расчета и способов управления такими преобразователями.

Произведен анализ составляющих потерь электроэнергии в коммунальных сетях электроснабжения, показавший, что дополнительные потери возникают вследствие следующих факторов: фазового сдвига между пространственными векторами напряжения и тока трехфазной системы, несинусоидальности токов нагрузки, пофазной асимметрии токов, пульсаций мгновенной активной мощности, пульсаций мгновенной реактивной мощности. Выявлено, что в системах коммунального электроснабжения график мгновенной активной мощности имеет составляющие с периодами повторяемости, отличающимися между собой на несколько порядков: сутки, часы, минуты, секунды. Наличие пульсаций мгновенной активной мощности с разными периодами повторяемости приводит к дополнительному снижению КПД системы электроснабжения.

Показана возможность значительного увеличения КПД систем электроснабжения за счет компенсации переменной составляющей мгновенной активной мощности одновременно с компенсацией мгновенной реактивной мощности при помощи активного компенсатора, подключаемого параллельно нагрузке и снабженного накопителем энергии. Получены соотношения для расчета параметров емкостных и индуктивных накопителей энергии активных компенсаторов на базе преобразователей различных типов, учитывающие полезную среднюю мощность системы электроснабжения, относительную амплитуду пульсаций активной мощности и допустимые пределы изменения энергии накопителя.

Получены новые соотношения для модифицированных преобразований Парка и их частного случая – модифицированных преобразований Кларка, привязанные к унифицированной координатной структуре, снимающие противоречия при определении мгновенной активной мощности до и после преобразований и обеспечивающие “стыковку” четырех пространственных систем координат, используемых в силовой электронике, с тремя плоскими системами координат, использование которых целесообразно при анализе уравновешенных трехфазных систем электроснабжения.

Предложены новые функциональные схемы системы автоматического управления активным компенсатором: схемы на основе кросс-векторной теории мощности, значительно упрощающая алгоритм вычисления токов задания компенсатора, и схемы на основе p - q - r теории мощности, в которой использована новая форма преобразования из координат pqr в координаты $\alpha\beta 0$, обеспечивающая полную компенсацию мгновенной реактивной мощности при любых видах нагрузки.

Разработана компьютерная модель системы электроснабжения с активным компенсатором, исследование которой показало его работоспособность и эффективность при широком диапазоне изменений параметров нагрузки, например, при полном обрыве одной или двух фаз нагрузки. Подключение активного компенсатора делает фазные сетевые токи системы симметричными синусоидальными, совпадающими по фазе с фазными напряжениями сети, а ток в нулевом проводе – близким к нулю. Показано, что установка активного компенсатора параллельно нагрузкам в коммунальных сетях электроснабжения позволяет одновременно увеличить на несколько процентов КПД системы и существенно уменьшить отклонения напряжения у потребителей электроэнергии.

Разработан метод расчета параметров системы электроснабжения, учитывающий при определении эквивалентного внутреннего сопротивления системы омические сопротивления обмоток трансформатора 10 / 0.38 кВ, кабелей линий 10 кВ, обмоток трансформатора 110(35) / 10 кВ, а также параллельные нагрузки кабелей и трансформаторов путем введения коэффициентов, зависящих от соотношения мощностей нагрузок.

Произведен оценочный расчет экономического эффекта от внедрения активного компенсатора в систему электроснабжения, показавший, что срок окупаемости затрат на изготовление и установку опытно-промышленного образца активного компенсатора составляет для рассматриваемого случая около двух лет.

Ключевые слова: активный компенсатор, силовой активный фильтр, система электроснабжения, компенсация мгновенной реактивной мощности, коррекция формы сетевого тока.

Ilna O.V. Energy-saving semiconductor converters for public electric supply. – Manuscript.

Thesis for a candidate of technical sciences degree in the speciality 05.09.12 – Semiconductor converters of electric energy – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” – Kharkiv – 2008.

The Thesis is devoted to the development of methods of the energy losses reduction and power quality improvement in public electric supply by using energy-saving semiconductor converters, development of the calculation methods and control strategies for such converters. The analysis that disclosed the reasons for extra electric power losses appearing in power-supply systems have been held. Active compensator have been proposed to set in parallel with the load of power-supply systems for the energy losses reduction and power quality improvement. The new control strategies for active compensator based on cross-vector and p-q-r instantaneous power theories are offered. New correlations for modified Park transformations and modified Clarke transformations are received. The computer model of energy-supply system with active compensator have been developed.

Keywords: active compensator, power active filter, power-supply system, instantaneous reactive power compensation, network current form correction.

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

Підписано до друку 1.09.2008 р. Формат паперу 60 × 90/16.

Папір офсетний. Друк-ризографія. Ум. друк. арк. 0,9.

Наклад 100 прим. Замовлення № 262648.

Надруковано в СПДФО Ізрайлев Є.М.

Свідоцтво № 248 017 0000 040432 від 21.03.2001 р.

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16.