

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Колесник Віктор Юрійович

УДК 621.314.261:666.1.037.4

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНО СУМІСНІ З МЕРЕЖЕЮ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ СИСТЕМ
ПУСКУ АСИНХРОННИХ МАШИН**

Спеціальність 05.09.12 - напівпровідникові перетворювачі електроенергії

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2009

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі промислової і біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківській політехнічний інститут»

Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Жемеров Георгій Георгійович,
Національний технічний університет
«Харківській 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
Рожественський Сергій Васильович,
ДП «НДІ «ХЕМЗ»,
провідний науковий співробітник
відділу тиристорних перетворювачів
постійного струму

Захист відбудеться 21 січня 2010 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 в Національному технічному університеті «Харківській політехнічний інститут» за адресою:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківській політехнічний інститут» за адресою:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

Автореферат розісланий 10 грудня 2009 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Осичев О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Найчастіше в промисловості застосовуються пускові пристрої, виконані на базі тиристорних регуляторів напруги (ТРН), що відрізняються простотою силової схеми та системи керування. Перевагою систем пуску на основі ТРН є їх низька вартість і властивість природної синхронізації напруги статора машини з напругою живлячої мережі в кінцевій стадії пуску. Разом з цим застосування ТРН в системах пуску пов'язане з декількома істотними недоліками: неможливістю пуску при великому моменті навантаження на валу; великими пусковими струмами; високим рівнем спотворень напруги мережі при пуску. Тому потрібне застосування напівпро-відникових перетворювачів інших типів, що забезпечують електромагнітну сумісність з живлячою мережею та знімають перелічені недоліки. Як такі перетворювачі принципово можуть бути використані безпосередні перетворювачі частоти (БПЧ), силові активні фільтри, а також численні схеми автономних інверторів струму та напруги. При цьому виникає ряд проблем, пов'язаних з роботою БПЧ в неприродному для нього діапазоні робочих частот, з електромагнітною сумісністю вибраних схем перетворювачів з живлячою мережею, з синхронізацією напруги статора машини та напруги мережі в кінцевій стадії пуску, з демпфуванням резонансних явищ в схемах інверторів, зі зменшенням втрат енергії при пуску. Від рішення перелічених і ряду інших проблем залежить вибір типу перетворювача, що відповідає по своїм характеристикам і параметрам вимогам до системи пуску.

У дисертаційній роботі розглядаються доцільність і ефективність застосування перетворювачів різних типів в системах пуску асинхронних машин, що забезпечують вимоги по пусковому моменту на валу машини на початку пуску й обмеження величини пускових струмів при повній електромагнітній сумісності перетворювача та живлячої мережі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами Дисертаційна робота виконана на кафедрі промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХПІ» згідно держбюджетній темі МОН України: «Розробка системи та алгоритмів керування напівпровідниковим фільтрокомпенсатором» (№ ДР 0106U001517), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є обґрунтування доцільності застосування в системах пуску асинхронних машин напівпровідникових перетворювачів різних типів, що забезпечують, з одного боку, вимоги до параметрів пуску та, з іншого боку, енергозбереження та повну електромагнітну сумісність перетворювача з живлячою мережею.

Для досягнення мети в дисертаційній роботі вирішувалися наступні задачі:

– дослідження алгоритму роботи, аналіз і уточнення характеристик системи пуску на основі трифазно-трифазного трьохпульсного нульового безпосереднього перетворювача час-

тоти, що переходить в режим тиристорного регулятора напруги в завершальній стадії пуску;

- використання силового активного фільтру, що підключається паралельно обмотці статора машини, для зниження струму мережі та втрат енергії, підвищення моменту на початку пуску і для зниження втрат енергії при тривалій роботі машини;

- аналіз електромагнітних процесів в схемі трифазного мостового активного керованого випрямляча джерела струму (АКВДС) при постійній частоті перемикання ключів, дослідження впливу індуктивності мережі на електромагнітні процеси в АКВДС, оцінка форми вихідної напруги, отримання регульовальної характеристики АКВДС;

- зменшення діапазону зміни частоти перемикання ключів в схемі трифазного мостового активного керованого випрямляча джерела напруги (АКВДН) в періоді повторення напруги мережі при релейному керуванні за рахунок змінного гістерезису в елементах порівняння струмів;

- синтез алгоритму синхронізації вихідної напруги автономного інвертора з напругою живлячої мережі для перемикання машини від інвертора до мережі або від мережі до інвертора, при якому протягом деякого інтервалу часу інвертор і мережа включені паралельно;

- розробка комп'ютерних моделей напівпровідникових перетворювачів для аналізу електромагнітних процесів при пуску асинхронних машин;

- аналіз характеристик систем пуску – максимального моменту на валу, пульсацій моменту, втрат енергії при пуску, провалів напруги мережі при використанні перетворювачів різних типів для вироблення рекомендації щодо їх застосування.

Об'єктом дослідження є електромагнітні процеси в напівпровідникових перетворювачах, що використовуються в системах пуску асинхронних машин.

Предметом дослідження є схемотехнічні рішення, алгоритми керування, режими роботи та характеристики напівпровідникових перетворювачів, які забезпечують електромагнітну сумісність з живлячою мережею, мінімізацію пульсацій електромагнітного моменту на валу машини й енергозбереження.

Методи дослідження. Всі основні теоретичні розробки дисертації базуються на фундаментальних положеннях теорії електричних систем, теорії векторного керування електроприводом, сучасної теорії потужності. Для побудови математичних моделей електромагнітних процесів в перетворювачах для систем пуску асинхронних машин використано метод результуючого вектору, що обертається. При аналізі електромагнітних процесів в напівпровідникових перетворювачах використовувались численні методи вирішення диференціальних рівнянь (метод Рунге-Куты). При побудові систем керування перетворювачами використано матричні перетворення координат. Для моделювання електромагнітних процесів в перетворювачах розроблені комп'ютерні математичні моделі за допомогою пакету моделювання

Matlab 7.3.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- вперше запропоновано структуру системи керування й алгоритм примусового переводу безпосереднього перетворювача частоти в режим роботи тиристорного регулятора напруги в кінцевій стадії пуску для подальшої автоматичної синхронізації з мережею, перехід, заснований на зміні логіки роботи системи керування при незмінній силовій схемі перетворювача;
- запропоновано компенсовану асинхронну машину, що являє собою асинхронну машину до обмотки статора якої підключений силовий активний фільтр з системою керування;
- отримано вирази для розрахунку вхідної та вихідної напруги комутатора АКВДС з ШІМ, виконаного за мостовою схемою;
- запропоновано алгоритм керування АКВДН, заснований на змінному значенні гістерезису в елементах порівняння струмів, що дозволяє істотно зменшити діапазон зміни частоти високочастотної модуляції струму мережі в періоді повторення незалежно від миттєвого значення напруги мережі;
- розроблено спосіб синхронізації вихідної напруги інвертора з напругою живлячої мережі, при якому є інтервал паралельної роботи інвертора та мережі.

Практичне значення одержаних результатів дослідження для електротехнічної галузі полягає в наступному:

- обґрунтовано істотне поліпшення пускових та експлуатаційних характеристик при підключенні силового активного фільтра паралельно обмоткам статора асинхронної машини, за рахунок компенсації реактивного струму статора, що дає змогу покращити якість напруги в мережі;
- для моделювання електромагнітних процесів при пуску асинхронної машини з використанням тиристорного регулятора напруги, трьохпульсного безпосереднього перетворювача частоти, силового активного фільтра, активних керованих випрямлячів і автономних інверторів напруги та струму розроблено комп'ютерні математичні моделі в пакеті Matlab 7.3, які можна використувати в конструкторських бюро при проектуванні систем пуску;
- вироблено рекомендації по застосуванню напівпровідникових перетворювачів для пуску асинхронних машин залежно від характеристик живлячої мережі та навантаження, що забезпечують досягнення електромагнітної сумісності з мережею та істотне зниження пульсації електромагнітного моменту.

Результати дисертаційних досліджень впроваджено в навчальний процес на кафедрі промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХП» в дисциплінах «Перетворювачі для електроприводу» та «Спеціальні питання перетворювальної техніки» та на виробництві в ДП «НДІ

ХЕМЗ» (м. Харків) та НВП «ЕОС» (м. Харків) для освоєння випуску систем пуску асинхронних машин з силовими активними фільтрами та безпосередніми перетворювачами частоти.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення та результати, приведені в дисертації, отримані здобувачем особисто. Серед них: експериментальна перевірка умов симетрії вихідної напруги трифазно-трифазного трьохпульсного безпосереднього перетворювача частоти; розробка алгоритму трансформації трьохпульсного безпосереднього перетворювача частоти в тиристорний регулятор напруги та розробка комп'ютерної моделі комбінованої системи пуску на основі трьохпульсного безпосереднього перетворювача частоти, моделювання пуску машини в комбінованій системі пуску; отримання співвідношення для визначення середнього значення вихідної напруги АКВДС з ШІМ, розробка комп'ютерної моделі, моделювання роботи АКВДС в системі пуску на основі автономного інвертора струму; отримання розрахункових формул залежності частоти модуляції струму мережі АКВДН від часу, синтез алгоритму керування АКВДН, що дозволяє істотно зменшити діапазон зміни частоти модуляції струму мережі за рахунок змінного гістерезису в елементах порівняння струмів; розробка алгоритму перемикання асинхронної машини від інвертора до мережі та комп'ютерної моделі системи пуску на основі автономного інвертора напруги, моделювання процесу пуску та переключення асинхронної машини до мережі.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідались і обговорювались на: XVI -XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків 2008, 2009 рр.); Міжнародної науково-технічної конференції «Силова електроніка та енергоефективність» (м. Алушта, 2006-2008 рр.) і Міжнародної конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2008 р); щорічного семінару «Силова та біомедична електроніка» кафедри промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХП» в рамках роботи Наукової ради з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики» НАН України (м. Харків 2007-2009 рр.);

Публікації. Основний зміст дисертації викладений в 9 наукових працях, опублікованих у фахових наукових виданнях ВАК України.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, 4-х розділів, висновків, додатку, списку використаних літературних джерел. Повний обсяг дисертації становить 165 сторінок, з них 46 ілюстрації по тексту та 29 ілюстрації на 17 сторінках; 9 таблиць по тексту та 1 таблиця на 4 сторінках; 1 додаток на 4 сторінках та список використаних літературних джерел з 87 найменувань на 9 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовані актуальність і доцільність виконаної роботи, сформульовано

мету та завдання 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 проведено огляд силових схем систем пуску асинхронних машин (АМ) на основі напівпровідникових перетворювачів п'яти типів, розглянуто особливості побудови системи керування перетворювачами.

Наведено вивід системи рівнянь, що описують електромагнітні процеси в АМ у системі координат dq у відносних одиницях згідно з векторною теорією керування. Описано принцип побудови векторної системи керування пусковим перетворювачем.

Визначені переваги та недоліки таких способів зменшення струму мережі при прямому пуску АМ, як перемикання обмотки статора в трикутник та вмикання послідовно з обмоткою статора ректорів, що обмежують струм. Ці заходи дозволяють зменшити струм мережі та провали напруги мережі при пуску машини, але при цьому істотно зменшується момент на валу в початковому інтервалі пуску. Амплітуда коливань електромагнітного моменту при прямому пуску в 1,5...2 рази перевищує номінальну величину моменту.

Проаналізовано електромагнітні процеси в схемі заміщення системи пуску АМ на основі тиристорного регулятора напруги (ТРН), що досліджені в роботах Епштейна І.І. Якщо потужність мережі значно більше потужності машини, для пуску з номінальним моментом навантаження від ТРН необхідний більш ніж п'ятикратний струм статора. При пуску з двократним струмом максимальний момент на початку інтервалу пуску становить лише 0,15 від номінального.

В системах пуску асинхронних машин на основі ТРН забезпечується автоматична синхронізація вихідної напруги перетворювача з напругою мережі наприкінці пуску, але ТРН не дозволяє провести пуск з моментом навантаження близьким до номінального значення та не забезпечує електромагнітну сумісність з мережею.

Серед відомих схем безпосередніх перетворювачів частоти (БПЧ) для пуску АМ доцільно використовувати БПЧ, виконаний за трьохпульсною трифазно-трифазною схемою. Перевагою такого перетворювача є синхронізація з мережею наприкінці пуску внаслідок автоматичного переходу до режиму роботи ТРН. Відомі комп'ютерні моделі БПЧ не забезпечують стабільного пуску, тому що при частоті вихідного струму приблизно 35...40 Гц спостерігаються значні пульсації електромагнітного моменту на валу машини та можливий зрив пуску. Для покращення характеристик систем пуску на основі БПЧ запропоновано застосування шестипульсного БПЧ, або примусовий перевід трьохпульсного БПЧ до режиму роботи ТРН в середині інтервалу пуску.

При використанні для пуску АМ ТРН або БПЧ електромагнітна сумісність з мережею

може бути досягнена за рахунок застосування окремих компенсаторів. Для досягнення електромагнітної сумісності пускового перетворювача з мережею необхідно застосовувати схеми автономних інверторів.

Принципово можливо використання компенсованої асинхронної машини (КАМ) для компенсації реактивного струму мережі. Силова схема силового активного фільтру (САФ) та структура системи керування в складі КАМ запропоновані в літературних джерелах, в дисертації визначаються пускові й експлуатаційні характеристики КАМ.

Перетворювачі на основі автономних інверторів дозволяють забезпечити потрібні пускові характеристики без істотних пульсацій електромагнітного моменту та струму мережі. Для систем пуску на основі автономних інверторів актуальні задачі перемикання обмотки статора машини від інвертора до мережі та від мережі до інвертора і забезпечення електромагнітної сумісності з мережею. Один з варіантів вирішення першої задачі для інверторів струму наведено в роботах Гончарова Ю.П. Це розгін валу машини до швидкості обертання більше номінальної, відключення від інвертора та підключення до мережі в момент часу, коли швидкість обертання близька до номінального значення. Але є й інший спосіб синхронізації, при якому має місце інтервал паралельної роботи інвертора та мережі.

Проблема електромагнітної сумісності з мережею вирішується шляхом живлення інверторів від перетворювачів, що споживають з мережі струм, який співпадає за фазою з напругою мережі. В роботі для назви таких перетворювачів прийнято термін «активний керований випрямляч» (АКВ). Залежно від типу інвертора розрізняють АКВ джерело струму (АКВДС), що зібраний по трифазній мостовій схемі з ШІМ в системі керування, та АКВ джерело напруги (АКВДН), що зібраний за трифазною мостовою схемою з релейною системою керування.

В літературі наведено опис алгоритмів керування АКВДС, але недостатньо досліджені вирази для розрахунку вхідної та вихідної напруги комутатора в залежності від параметрів мережі.

Для АКВДН найбільш поширено використання релейної системи керування. Але при цьому частота модуляції струму мережі істотно змінюється за період повторення (20 мс). Заслуговує уваги визначення аналітичного виразу для залежності частоти від параметрів АКВДН і мережі та розробка такого алгоритму керування, при якому діапазон коливань частоти модуляції струму мережі істотно зменшується.

У другому розділі розглянуто засоби покращення характеристик систем пуску асинхронних машин на основі БПЧ. Досліджено умови симетрії вихідної напруги трифазно-трифазного трьохпульсного та шестипульсного БПЧ для зменшення пульсацій електромагнітного моменту на валу та величини струму статора при пуску АМ. Запропоновано алгоритм

трансформації БПЧ у ТРН. При цьому синхронізація з мережею наприкінці пуску відбувається автоматично, а електромагнітна сумісність з мережею, якщо це необхідно, забезпечується окремими компенсаторами.

При частоті вихідного струму БПЧ вище ніж 25 Гц у вихідній напрузі присутні субгармоніки, які можуть приводити до зриву пуску. Існує ряд фіксованих частот, при яких фазні вихідні напруги трифазно-трифазного трьохпульсного БПЧ симетричні та конгруентні. Розглянуто 5 умов симетрії вихідної напруги, коли в періоді вихідної напруги міститься, відповідно, від одного до п'яти напівперіодів напруги мережі. Додана шоста умова конгруентності вихідних напруг БПЧ, коли середнє значення напруги в кожній фазі дорівнює нулю. Для розрахованих частот за допомогою комп'ютерної Matlab-моделі отримані значення коефіцієнтів несинусоїдальності вихідного струму БПЧ. Показано, що при вихідних частотах вище 30 Гц коефіцієнт несинусоїдальності вихідного струму трифазно-трифазного трьохпульсного БПЧ перевищує 0,25.

Проведено аналіз умов симетрії вихідної напруги шестипульсного трифазно-трифазного БПЧ. Показано, що при вихідних частотах вище 40 Гц коефіцієнт несинусоїдальності вихідного струму трифазно-трифазного шестипульсного БПЧ знаходиться в діапазоні 0,15...0,2.

Недоліком шестипульсного БПЧ є те, що при частотах вихідного струму 45...50 Гц автоматичної синхронізації з мережею не відбувається і спостерігається істотне спотворення вихідної напруги. До того ж в системі пуску з шестипульсним БПЧ необхідно використовувати перетворювальний трансформатор великої потужності, що зменшує ККД системи.

Запропоновано комбіновану систему пуску, в якій відбувається транс-формація БПЧ у ТРН шляхом зміни алгоритму роботи системи керування. У БПЧ у кожній фазі навантаження працюють всі 6 тиристорів, а в ТРН лише 2. Тому трансформація полягає в подачі імпульсів керування лише на ті тиристоры, що становлять силову схему ТРН, за певних умов, а саме: фаза напруги мережі не відрізняється від фази протиЕРС статора більш ніж на 5 ел. град.; швидкість обертання валу машини досягає певної величини (приблизно 0,6 від номінальної швидкості); системи керування ТРН і БПЧ виробляють імпульси керування для тих же самих тиристорів силової схеми. Розроблено структуру системи керування, що дозволяє здійснити трансформацію БПЧ в ТРН при вищезгаданих умовах, в якій пропонується порівняння узагальнених векторів напруги мережі та протиЕРС статора машини, що дозволяє підвищити точність синхронізації та зменшити вплив несиметрії напруг.

У третьому розділі розглянуто схеми електромагнітно сумісних з мережею перетворювачів на основі автономних інверторів.

Рис. 1. Структурна схема системи електроспоживання
 Запропоновано використання САФ зі спеціальною системою керування для компенсації реактивного струму статора машини. Розраховано електромагнітні процеси в схемах активних випрямлячів напруги та струму. Розроблено перспективний алгоритм перемикання машини від інвертора до мережі та від мережі до інвертора.

Типова схема електроспоживання, для аналізу електромагнітних процесів при пуску та тривалій роботі компенсованої асинхронної машини приведена на рис. 1. КАМ підключена до трансформаторної підстанції (ТП) з трансформатором Т2, до якої також можуть бути підключені інші навантаження.

Складено схему заміщення системи за рис.1 та проведено розрахунки електромагнітних процесів в системі для початкового інтервалу пуску. Побудовано векторні діаграми для випадків: коли до ТП підключена лише АМ, коли підключена АМ та активне навантаження, коли підключена АМ та активно-індуктивне навантаження. Аналогічні діаграми побудовано для КАМ. Проаналізовано графіки залежності зміни напруги на статорі машини та напруги на шинах ТП від довжини кабелів між ТП та КАМ та між ТП та трансформатором Т1 (рис. 1). При відсутності інших навантажень використання КАМ дозволяє зменшити провал напруги на шинах ТП при пуску з 9% до 2%. При пуску КАМ провал напруги статора машини на 8...10% менший, ніж при прямому пуску. Електромагнітний момент на валу машини в початковій стадії пуску КАМ практично не залежить від довжини кабелів.

Розраховано втрати енергії в силових кабелях та трансформаторі Т2 при постійній роботі КАМ. В залежності від потужності інших навантажень теоретичне зменшення потужності втрат енергії без урахування зміни потужності втрат в машині складає 0,37... 2,6% від номінальної потужності асинхронної машини.

Розглянуто структурну схему системи пуску асинхронних машин на основі АКВДС та АІС з відсікаючими діодами (АІС ВД), що приведена на рис. 2.

Векторна система керування асинхронною машиною (СК АМ) виробляє сигнали завдання по струму статора

Рис. 2. Структурна схема системи пуску асинхронних машин на основі АІС і АКВДС

машини, за допомогою АІС змінюється частота струму, а за допомогою АКВДС змінюється його амплітуда. В системі керування АКВДС застосовано ШІМ з постійною частотою.

Недоліком АКВДС є випередження струмом мережі напруги мережі на деякий кут, що залежить від величини струму навантаження. Досліджено залежності напруги на конденсаторах вхідного фільтра АКВДС від кута здвигу між напругою та струмом мережі. Отримано вираз для визначення регулювальної характеристики АКВДС з ШІМ з урахуванням інду-

ктивності мережі та пульсації напруги на конденсаторах внаслідок струму навантаження. Проаналізовано відповідні графіки при різних значеннях напруги короткого замикання мережі.

Запропоновано схему АКВДН на основі трифазного мостового інвертора напруги (рис. 3). Сигнали завдання для систем керування релейного типу розраховуються згідно з рqr теорією. Отримано вираз для визначення відносного значення частоти перемикавання ключів АКВДН

Рис. 3. Схема силової частини АКВДН

$$\omega_* = \frac{\pi}{k_{\Delta} k e_{k_{nom}}} (k^2 - v^2), \quad (1)$$

де $\omega_* = 2\pi f / \omega_s$ – відносна кругова частота; f – частота перемикавання ключів; ω_s – частота напруги мережі; $k_{\Delta} = 2\Delta i / I_{\max nom}$; Δi – гістерезис струму; $I_{\max nom}$ – амплітуда номінального струму мережі; k – відношення середнього значення вихідної напруги АКВДН до амплітуди фазної напруги мережі; $e_{k_{nom}}$ – напруга короткого замикання мережі; $v = \sin \omega_s t - g \cos \omega_s t$; $g = e_{k_{nom}} i_*$; i_* – відносне значення струму мережі.

Запропоновано структуру системи керування АКВДН, в якій величина гістерезису в елементах порівняння струмів змінюється згідно з такою залежністю

$$\Delta i = k_i (k^2 - v^2), \quad (2)$$

де k_i – коефіцієнт, що залежить від відносного миттєвого значення струму, та визначає несинусоїдальність струму мережі.

Якщо $k > 1,7$, частота модуляції струму мережі практично не залежить від миттєвого значення напруги мережі. При $k = 1,2$, $e_{k_{nom}} = 0,32$ і коефіцієнті несинусоїдальності струму мережі $0,05$ частота модуляції струму мережі змінюється за період повторюваності від $3,5$ кГц до $14,5$ кГц. Якщо підтримувати $(k^2 - v^2) / \Delta i = const$, то частота перемикавання ключів АКВДН майже постійна незалежно від миттєвого значення напруги мережі і становить приблизно 9 кГц.

Запропоновано систему векторної синхронізації вихідної напруги інвертора з напругою мережі, в якій при досягненні певної швидкості обертання валу машини (приблизно $0,9$ від номінальної) система керування переходить від режиму підтримки моменту до режиму підтримки швидкості обертання. Регулятор підтримує швидкість в межах $\pm 5\%$ від номінальної, розраховуються амплітуди та фази узагальнених векторів вихідної напруги інвертора та напруги мережі. Якщо ці амплітуди та фази відрізняються не більш ніж на 5% , то подається сигнал керування на контактор, що підключає АМ до мережі, та, з затримкою приблизно 50

мс, подається сигнал на контактор, що відключає АМ від інвертора. На вхід системи керування автономним інвертором при цьому подається сигнал, пропорційний напрузі мережі. Наведено схему заміщення системи пуску на інтервалі паралельної роботи інвертора напруги та мережі.

Для перемикання машини з інвертора на мережу спочатку замикається контактор, що підключає обмотку статора до інвертора, а потім, з затримкою приблизно 50 мс, розмикається контактор, що відключає обмотку статора від мережі.

Для системи пуску з інвертором струму пропонується такий самий алгоритм перемикання машини до мережі. При паралельній роботі інвертора та мережі струм в контурі не встигає значно зрости внаслідок значної індуктивності реактора в колі постійного струму.

Четвертий розділ присвячено комп'ютерному моделюванню систем пуску асинхронних машин на основі ТРН, БПЧ, САФ, інверторів і активних випрямлячів напруги та струму для перевірки отриманих теоретичних результатів. Розроблені комп'ютерні моделі систем пуску з цими перетворювачами за допомогою пакету програм Matlab 7.3 та бібліотеки Simulink. В результаті зіставлення перетворювачів вироблено рекомендації щодо доцільності їх застосування для пуску асинхронних машин на промислових об'єктах.

За допомогою комп'ютерної моделі досліджено електромагнітні процеси при пуску машини типу 5AM280M8 з паралельно підключеним САФ при різних параметрах елементів системи. Отримано залежності моменту на валу на початку пуску АМ і КАМ від відношення номінальної потужності машини до потужності короткого замикання мережі, що збігаються з результатами, отриманими при теоретичних дослідженнях. Показано, що струм мережі при пуску КАМ практично збігається з напругою мережі за фазою. Модуль вектора миттєвої реактивної потужності в процесі пуску не перевищує 0,06 від номінальної потужності машини. ККД системи при тривалій роботі КАМ підвищується на 0,8...2,2% порівняно з ККД системи при тривалій роботі АМ.

Розроблена модель системи пуску машини типу ВАО2-560-630-4У2 від тиристорного регулятора напруги. Досліджено зміну електромагнітного моменту на валу та швидкості обертання валу при різних значеннях пускового струму, різних моментах навантаження та різних потужностях мережі, проаналізовано відповідні графіки. При моделюванні підтверджені та доповнені теоретичні результати, отримані за припущенням необмежено великої потужності мережі. Якщо потужність мережі значно перевищує потужність машини та струм статора в 4 рази перевищує номінальний струм, то момент на валу на початку пуску становить 0,375 від номінального моменту, що співпадає з теоретичними висновками. Якщо потужність мережі в 10 разів більше номінальної потужності машини, чотирьохкратний струм статора забезпечує момент на початку пуску лише 0,1 від номінального.

На комп'ютерній моделі досліджені процеси при пуску машини типу ВАО2-560-630-4У2 від БПЧ, що трансформується в ТРН так, як описано в розділі 3, при різних потужностях мережі та різних законах зміни моменту навантаження. Показано, що при будь-якому моменті навантаження забезпечується пуск машини без зривів. Але при вихідних частотах БПЧ 30...35 Гц струм статора в 5...6 разів перевищує номінальне значення та спостерігаються істотні пульсації моменту на валу машини. При пуску в режимі БПЧ модуль вектора миттєвої реактивної потужності мережі постійний та приблизно в 2 рази перевищує номінальну потужність машини.

Проведено моделювання пуску машини типу ВАО2-560-630-4У2 від АІС з відсікаючими діодами та перемикання від інвертора до мережі при різних потужностях мережі та різних моментах навантаження. Здійснено моделювання пуску, перемикання на мережу, роботи від мережі, перемикання на інвертор та зупинки АМ в системі пуску з АІС ВД і АКВДС. Моделювання показало, що електромагнітний момент при пуску практично дорівнює моменту завдання, коефіцієнт несинусоїдальності струму мережі не перевищує 0,07, але струм мережі випереджує напругу мережі на кут до 20 електричних градусів. Підтверджені теоретичні висновки про підвищення напруги на конденсаторах вхідного фільтру АКВДС на 10...15%.

Досліджені процеси при пуску машини типу 5АМ280М8 від АІН з АКВДН при різних моментах навантаження та потужностях мережі. Показано, що струм статора при пуску не перевищує 1,25 від номінального (за винятком початкового майже двократного струму), пульсації електромагнітного моменту на валу АМ майже відсутні. Модуль вектора миттєвої реактивної потужності мережі не перевищує 0,17 від номінальної потужності машини. Частота модуляції струму мережі при постійному гістерезісі в елементах порівняння струмів системи керування АКВДН змінюється від 3 кГц до 6,5 кГц, а при використанні елементів порівняння зі змінним гістерезісом, згідно запропонованому алгоритму керування, змінюється з 4,5 кГц до 6 кГц ($k=1,15$). Отримана при моделюванні величина діапазону зміни частоти збігається з величиною діапазону, що розрахована теоретично.

В результаті теоретичних висновків та зіставлення результатів моделювання вироблено рекомендації щодо застосування розглянутих перетворювачів в системах пуску асинхронних машин, а саме:

- тиристорні регулятори напруги доцільно використовувати для пуску машин в приводі потужних вентиляторів;
- безпосередні перетворювачі частоти можна застосовувати для пуску потужних високовольтних машин в приводі шарових млинів, конвеєрів; компенсовані асинхронні машини рекомендується застосовувати у складі приводу, нечутливого для пульсації моменту;
- автономні інвертори струму з активними випрямлячами струму пропонуються для

пуску потужних машин в приводі насосів на станціях перекачування нафти;

– автономні інвертори напруги з активними випрямлячами напруги рекомендуються для пуску низьковольтних машин від мережі з великою індуктивністю.

ВИСНОВКИ

Виконані в дисертаційній роботі дослідження обґрунтували доцільність застосування в системах пуску та зупинки асинхронних машин сучасних напівпровідникових перетворювачів різних типів – безпосереднього перетворювача частоти, що трансформується в тиристорний регулятор напруги, силового активного фільтра, активних випрямлячів напруги та струму, які забезпечують, вимоги до параметрів пуску та, енергозбереження та повну електромагнітну сумісність перетворювача з живлячою мережею.

1. Розроблена комбінована система пуску асинхронних машин, що являє собою трифазно-трифазний трьохпульсний безпосередній перетворювач частоти, який примусово трансформується на завершальному етапі пуску в тиристорний регулятор напруги. Алгоритм трансформації враховує частоту обертання валу та забезпечує перехід від безпосереднього перетворювача частоти до тиристорного регулятора напруги, у момент часу, коли в них повинні бути включені ті ж самі тиристори.

2. Запропонована компенсована асинхронна машина, що являє собою паралельно включені асинхронну машину та силовий активний фільтр з системою керування. Розглянуто типовий приклад схеми електроспоживання, показано, що використання компенсованої асинхронної машини в цій схемі дозволяє: зменшити струм мережі при пуску в 2...3 рази; обмежити провали напруги при пуску до величини не більшої ніж 0,95 від номінальної напруги мережі; зменшити потужність втрат електроенергії при тривалій роботі на 0,5...2,5% від номінальної потужності машини.

3. Отримані вирази для визначення вхідної та вихідної напруги комутатора активного випрямляча джерела струму, що дозволяє здійснити вибір напівпровідникових приладів на етапі проектування систем пуску.

4. Запропоновано алгоритм керування активним випрямлячем джерелом напруги з релейною системою керування при якому в 2...3 рази зменшується діапазон пульсації частоти високочастотної модуляції струму мережі, що запобігає виникненню резонансних явищ в мережі та підвищує якість напруги.

5. Розроблено алгоритм перемикання машини від інвертора до мережі та від мережі до інвертора, який відрізняється наявністю інтервалу паралельної роботи інвертора та мережі.

6. Результати моделювання тиристорного регулятора напруги, безпосереднього пере-

творювача частоти, силового активного фільтра, автономних інверторів і активних випрямлячів напруги та струму, отримані за допомогою розроблених комп'ютерні Matlab-моделі, збігаються з результатами теоретичних досліджень (похибки не більше 2%).

7. На основі проведених досліджень щодо застосування розглянутих перетворювачів в системах пуску асинхронних машин вироблені наступні рекомендації: ТРН доцільно використовувати при пуску машин з вентилятор-ною характеристикою навантаження – вентиляторів, насосів; безпосередній перетворювач частоти можна використовувати в комбінованій системі пуску з примусовим переходом до тиристорного регулятора напруги; компенсовану асинхронну машину доцільно використовувати в низьковольтному приводі, в якому допустимі значні пульсації моменту на валу при пуску; автономний інвертор струму і активний випрямляч джерело струму можна використовувати для пуску двигунів від потужної мережі, наприклад на станціях перекачки нафти; автономний інвертор напруги і активний випрямляч джерело напруги доцільно використовувати для пуску низьковольтних машин за жорстких умов до якості підтримки пускового струму, моменту на валу й електромагнітній сумісності з мережею.

8. Результати досліджень впроваджені на виробництві в ДП «НДІ «ХЕМЗ» і НВП «ЕОС» та у навчальний процес на кафедрі промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХПІ» в дисциплінах «Перетворювачі для електроприводу» та «Спеціальні питання перетворювальної техніки».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Колесник В.Ю. Улучшение формы выходного напряжения непосредственного преобразователя частоты в системах пуска асинхронных машин / Г.Г. Жемеров, В.Ю. Колесник, Д.С. Крылов // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2004. – Ч. 1, Тематичний вип. – С 27-32.

Здобувачем проведена експериментальна перевірка умов симетрії вихідної напруги трифазно-трифазного трьохпульсного безпосереднього перетворювача частоти; моделювання процесів при пуску асинхронної машини від трифазно-трифазного трьохпульсного безпосереднього перетворювача частоти при різних законах зміни моменту навантаження на валу.

2. Колесник В.Ю. Системы пуска асинхронных машин на основе не-посредственных преобразователей частоты / Г.Г. Жемеров, В.Ю. Колесник, Д.С. Крылов // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2006. – Ч. 4, Тематичний вип. – С. 3-7.

Здобувачем виконана комп'ютерна модель системи пуску асинхронної машини на основі шестипульсного безпосереднього перетворювача частоти. Проведено моделювання пуску.

3. Колесник В.Ю. Комбинированная система пуска асинхронных машин / Г.Г. Жемеров, В.Ю. Колесник, Д.С. Крылов // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2007. – Ч. 1, Тематичний вип. – С. 50-55.

Здобувачем обґрунтовано умови трансформації безпосереднього перетворювача частоти в режим тиристорного регулятора напруги, розроблена комп'ютерна модель комбінованої системи пуску на основі трьохпульсного трифазно-трифазного безпосереднього перетворювача частоти, проведено моделювання пуску в комбінованій системі.

4. Колесник В.Ю. Пуск асинхронной машины от автономного инвертора напряжения с синхронизацией вращения обобщенных векторов напряжения инвертора и сети в системе координат $\alpha\beta$ / Г.Г. Жемеров, В.Ю. Колесник // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2008. – Ч. 2, Тематичний вип. – С. 103-108.

Здобувачем запропоновано векторний алгоритм перемикання машини від інвертора до мережі, заснований на порівнянні узагальнених векторів напруг інвертора та мережі. Розроблена комп'ютерна модель системи пуску на основі автономного інвертора напруги, проведено моделювання процесів при перемиканні машини від інвертора до мережі.

5. Колесник В.Ю. Пуск асинхронной машины от автономного инвертора напряжения с ШИМ с синхронизацией напряжения инвертора и сети / Г.Г. Жемеров, В.Ю. Колесник // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – №3. – С. 10-16.

Здобувачем вдосконалено алгоритм переключення асинхронної машини від інвертора до мережі, заснований на порівнянні миттєвих значень вихідної напруги інвертора та мережі. Розроблена комп'ютерна модель системи пуску на основі автономного інвертора напруги, проведено моделювання процесів при перемиканні машини від інвертора до мережі.

6. Колесник В.Ю. Частота модуляции сетевого тока в активном управляемом выпрямителе – источнике напряжения с гистерезисной системой управления / Г.Г. Жемеров, В.Ю. Колесник // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2008. – Ч. 3, Тематичний вип. С. 79-84.

Здобувачу належить отримання розрахункових формул для визначення частоти модуляції струму мережі АКВДН, розробка алгоритму керування АКВДН, що дозволяє істотно зменшити діапазон зміни частоти за рахунок змінного гістерезису в елементах порівняння струмів, складання комп'ютерної моделі АКВДН, моделювання роботи АКВДН при різних законах керування.

7. Колесник В.Ю. Анализ процессов в активном управляемом выпрямителе – источнике тока в системе пуска асинхронных машин / Г.Г. Жемеров, В.Ю. Колесник // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – №6. – С. 19-25.

Здобувачем отримані розрахункові співвідношення для визначення середнього значення

вихідної напруги АКВДС з ШІМ, розроблена комп'ютерна модель, проведено моделювання АКВДС в системі пуску на основі автономного інвертора струму.

8. Колесник В.Ю. Уточненная модель тиристора для моделирования вентиляных преобразователей в Matlab 7.0 / Г.Г. Жемеров, В.Ю. Колесник // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – №1. – С. 37-41.

Здобувачем розроблена комп'ютерна модель одноопераційного тиристора, що враховує заряд зворотного відновлення. Виконані розрахунки зворотного струму тиристора для керованого випрямляча.

9. Колесник В.Ю. Компенсированная асинхронная машина с короткозамкнутым ротором / Г.Г. Жемеров, В.Ю. Колесник // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – №3. – С. 20-24.

Здобувачем складені схеми заміщення системи енергоспоживання з компенсованою асинхронною машиною. Проведені розрахунки провалів напруги в мережі при пуску. Складена комп'ютерна модель, проведено моделювання пуску та тривалої роботи компенсованої асинхронної машини.

АНОТАЦІЇ

Колесник В.Ю. Електромагнітно сумісні з мережею перетворювачі для систем пуску асинхронних машин. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» – Харків – 2009.

Дисертація присвячена питанням доцільності й ефективності застосування перетворювачів різних типів в системах пуску асинхронних машин, що забезпечують вимоги по пусковому моменту на валу машини й обмеженню величини пускових струмів при повній електромагнітній сумісності перетворювача та живлячої мережі. Запропонована комбінована система пуску на основі безпосереднього перетворювача частоти з трансформацією в режим роботи тиристорного регулятора напруги. Запропоновано підключення паралельно обмотці статора асинхронної машини силового активного фільтра, та проведені розрахунки пускових характеристик та зниження втрат енергії в такій системі. Досліджено електромагнітні процеси в схемах активних випрямлячів напруги та струму. Запропоновано алгоритм керування активним випрямлячем напруги зі змінним гістерезисом в елементах порівняння струмів для стабілізації частоти модуляції струму мережі. Вироблено рекомендації щодо застосування певного типу перетворювачів в певних випадках.

Ключові слова: компенсатор з частотним перетворенням, безпосередній перетворювач частоти, компенсована асинхронна машина, активний керований випрямляч, синхроніза-

ція напруг, перемикання до мережі.

Колесник В.Ю. Электромагнитно совместимые с сетью преобразователи для пуска асинхронных машин. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – полупроводниковые преобразователи электро-энергии. – Национальный технический университет «Харьковский политех-нический институт» – Харьков – 2009.

Диссертация посвящена вопросам целесообразности и эффективности применения преобразователей разных типов в системах пуска асинхронных машин, обеспечивающих требования по пусковому моменту на валу машины и ограничению величины пусковых токов при полной электромагнитной совместимости преобразователя с сетью.

При анализе используется система уравнений асинхронной машины во вращающихся координатах dq . Рассмотрены способы снижения тока сети при прямом пуске. Показано, что при пуске от тиристорного регулятора напряжения максимальное значение момента на валу машины в начальном интервале пуска составляет не более 0,15 от номинального значения момента.

Проведен анализ шести условий симметрии выходных напряжений трёх-фазно-трёхфазного трёхпульсного и шестипульсного непосредственного пре-образователя частоты. Путем компьютерного моделирования показано, что ко-эффициент несинусоидальности выходного тока трёхпульсного непосред-ственного преобразователя частоты при выходной частоте 35...45 Гц превышает 0,3. Предложена комбинированная система пуска асинхронной машины с трансформацией непосредственного преобразователя частоты в тиристорный регулятор напряжения во второй половине пуска посредством изменения алгоритма работы системы управления.

Предложена компенсированная асинхронная машина, представляющая собой параллельно включенные асинхронную машину и силовой активный фильтр с системой управления. Проведен расчет пусковых характеристик ком-пенсированной асинхронной машины, выполнено их сравнение с характерис-тиками прямого пуска. Оценена степень экономии электро-энергии при ис-пользовании компенсированной машины в режиме длительной работы от сети.

Получено выражение для расчета входного и выходного напряжения коммутатора активного управляемого выпрямителя источника тока, собранного по мостовой схеме с широтно-импульсной модуляцией.

Получено соотношение для расчета частоты модуляции сетевого тока активного управляемого выпрямителя источника напряжения в зависимости от мгновенного значения напряжения сети. Разработана система управления релейного типа, которая позволяет поддерживать

частоту модуляции сетевого тока практически постоянной независимо от величины мгновенного напряжения сети за счет переменного гистерезиса в элементах сравнения по токам.

Предложен способ синхронизации выходного напряжения инвертора с напряжением сети для осуществления переключения асинхронной машины с инвертора на сеть и от сети на инвертор. Особенностью переключения является наличие интервала параллельной работы сети и инвертора.

При построении систем управления преобразователями использована современная теория мощности и преобразования координат обобщенных векторов напряжений и токов из системы координат abc в систему координат pqr . Предложена новая промежуточная система координат $a'b'c'$, которая позволяет получить новую форму записи расчетных соотношений преобразований координат для построения систем управления с использованием современных теорий мощности.

Разработаны компьютерные модели тиристорного регулятора напряжения, трёхпульсного трёхфазно-трёхфазного непосредственного преобразователя частоты, силового активного фильтра в составе компенсированной асинхронной машины, автономных инверторов и активных управляемых выпрямителей напряжения и тока. При моделировании проведено сопоставление преобразователей и проверка полученных теоретических выводов.

В результате моделирования подтверждены все теоретические выводы и выработаны рекомендации по применению преобразователей различных типов в зависимости от параметров сети, нагрузки, требований к моменту на валу и требований к электромагнитной совместимости с сетью.

Ключевые слова: компенсатор с частотным преобразованием, непосредственный преобразователь частоты, компенсированная асинхронная машина, активный управляемый выпрямитель, синхронизация напряжений, переключение к сети.

Kolesnik V.J. Network compatible converters for asynchronous machines star-stop systems. – Manuscript.

Thesis for a candidate of technical sciences degree in the specialty 05.09.12 – Semiconductor converters of electric energy. – National technical university “Kharkiv polytechnic institute” – Kharkiv – 2009.

The Thesis is devoted to the questions of expedience and efficiency of application of converters of different types in the systems of starting of asynchronous machines that provide requirements on a starting torque on the spindle of machine and limitation of starting currents at complete electromagnetic compatibility of converter and network. The combined system of starting is offered on the basis of cycloconverter with transformation in the mode of work of thyristor controlled in-

ductance. Connecting is offered parallel AM of power active filter, the calculations of starting descriptions and declines of losses of energies are conducted. Explored electromagnetic processes in the charts of voltage source and current source active rectifiers. The algorithm of management of voltage source active rectifier is offered with the variable width of area of surveillance for stabilization frequency of switching of the keys in the period of current of network. Produced recommendation on application of converters.

Keywords: compensator with frequency transformation, cycloconverter, compensated asynchronous machine, active rectifier, synchronization of voltage, commutation on network.

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

Підписано до друку 19.11. 2009 р. Формат 60x90/16
Папір офсетний. Друк – ризографія. Умовн. друк. арк. 0,9.
Наклад 100 прим.

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.
Свідоцтво про державну реєстрацію № 2 480 017 0000 040432 від 21.03.2001 р.
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16