

ЗАСТОСУВАННЯ НОВІТНІХ СИЛОВИХ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ У РЕГУЛЬОВАНОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ

Регульований електропривод при роботі впливає на мережу електропостачання, що виражається в зниженні коефіцієнта потужності на вході перетворювача, коливаннях напруги в мережі і спотворенні синусоїдальної форми напруги. Силкові напівпровідникові перетворювачі з керуванням випрямлячем за своїми енергетичними властивостями мають ряд особливостей [1].

Процеси перетворення і регулювання електроенергії в них відбуваються за рахунок роботи напівпровідникових приладів у ключовому режимі, що є причиною виникнення вищих гармонічних струмів і напруг на вході і виході перетворювачів. Генерація вищих гармонічних струму і напруги викликає спотворення напруги в мережах живлення і підвищені втрати в каналі передачі електроенергії, а також негативно позначається на працездатності електричної машини.

Інша їх особливість обумовлена фазовим способом регулювання вихідної напруги. Це регулювання здійснюється за рахунок затримки моменту вмикання тиристорів відносно напруги мережі. У результаті цього перша гармонічна складова струму, обумовлена частотою мережі, виявляється зсунутою на деякий кут щодо напруги мережі. Тому перетворювачі споживають реактивну потуж-

ність не тільки на частотах вищих гармонічних, але і на частоті мережі.

Вибір силового ключового елемента відіграє вирішальну роль у конструюванні перетворювача для регульованого електроприводу. Перетворення електроенергії має стати потребою в ідеальному ключі. Ці ідеали в розробці приладів реалізуються двома шляхами: через структуру транзистора і через структуру тиристора, при цьому основною перевагою тиристора є низькі статичні втрати, а транзистора - його добра здатність до вимикання.

Протягом ряду десятиліть, з моменту промислового освоєння в 60-х роках минулого століття, тиристор SCR залишався практично єдиним напівпровідниковим приладом для перетворювальних пристроїв. Незмінність функціональних можливостей базових приладів призвела до того, що основні схемні рішення на їх основі тривалий час також залишалися незмінними.

Ситуація в силовій електроніці кардинально змінилася наприкінці 80-х років із промисловим освоєнням силових тиристорів, що запираються, (GTO - Gate turn off). На сьогодні основні статичні параметри GTO сумірні з такими для звичайних тиристорів. Головний недолік GTO - значні струми керування, що

приводять до необхідності створення громіздких і потужних блоків керування та систем передачі енергії на керуючий електрод тиристорів. Саме ця обставина стримує широке використання GTO у перетворювачах.

До середини 90-х років з'явилися інші напівпровідникові прилади ключового типу - потужні біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor). Поступаючись GTO статичними параметрами, вони принципово перевершують їх за динамікою (насамперед, за часом вмикання і вимикання). Крім того, IGBT, що має в складі свого електрода керування польовий транзистор, не вимагає великих струмів для запуску процесів вмикання і вимикання, що спрощує систему керування.

Тиристорна структура переважає за кількістю пропонуємих приладів, оскільки вони мають здатність проводити великі струми з мінімальними втратами. Однак до сьогоднішнього дня було лише кілька серйозних кандидатів на високовольтне застосування: GTO (тиристор) з його громіздким снаббером і IGBT (транзистор) із властивими йому великими втратами.

Саме останнім часом з'явилася зовсім нова розробка. Це тиристор, що комутується по електроду керування (Gate Commutated Thyristor - GCT) і має вбудований інтегрований блок керування - тиристор IGCT (Integrated GCT). У цих приладах комплексно реалізовані вимоги до силового ключового елемента. GCT одночасно поєднує в собі

симетричну таблеткову конструкцію з двостороннім тепловідводом, має мінімальне падіння напруги у ввімкненому стані, не вимагає високоенергоємних ланцюгів живлення блоків керування, має достатню завадостійкість при невисоких динамічних втратах. Крім того, у IGCT є інтегрований на одному кристалі з GCT обернений швидко відновлюваний діод.

У результаті майже на порядок зменшується (порівняно з GTO) час комутації, знижуються комутаційні втрати. GCT можуть працювати без снабберної ємності (швидкість наростання струму до 3000 А/мкс, швидкість наростання напруги 5000 В/мкс). Тиристори IGCT відкривають практичну можливість для створення цілком керованих високовольтних перетворювачів потужністю 1 ... 100 МВ·А.

На світовому ринку представлена широка і швидко змінювана номенклатура силових напівпровідникових приладів. Основною тенденцією є зниження розмірів кристалу та зменшення вартості виробництва при одночасному збільшенні густини потужності. Параметри потужних напівпровідникових силових приладів різних типів наведено в табл. 1 [2, 3].

Порівняння споживчих характеристик вибраних електронних ключів наведено в табл. 2.

В даний час основними приладами силової електроніки є:

- біполярні транзистори (BPT - Bipolar Power Transistor) та силові модулі на їх основі;

Таблиця 1

Тип приладу	Фірма-виготовлювач	Марка	I, А	U _{DRM} , В	U _{RRM} , В	ΔU, В
Традиційний тиристор SCR	«ABB Semiconductors»	SSTP 34N5200	3350	4400	4200	2,54
GTO	«ABB Semiconductors»	SSGT 30J6004	3000	6000	17	3,35
IGCT	«ABB Semiconductors»	SSHY 35L4502	4000	6000	19	2,65
GCT	«Mitsubishi»	PGC4000AX-90DS	4000	4500	19	2,65
IGBT (PP HV IGBT)	«Toshiba Semiconductor Group»	ST1200FXF21	1200	3300	20	4,5

Примітки:

1. Струм I для традиційного тиристора - номінальний середній струм; для інших (повністю керованих) приладів - максимальний повторюваний струм, що комутується.
2. ΔU для традиційного тиристора визначається при амплітудному струмі I_m=I. Значення ΔU для інших (повністю керованих) приладів визначаються при максимальному повторюваному струмі I, що комутується.
3. Позначення U_{DRM}, U_{RRM} для IGBT слід розуміти як UCES, UGES відповідно.

- польові транзистори з ізолюваним затвором (MOSFET - Metal Semiconductor Field Effect Transistor);
- силові інтегральні схеми (Power IC);
- інтелектуальні силові інтегральні схеми (Smart Power IC);
- силові модулі на базі IGBT;
- тиристори SCR;
- тиристори, що запираються, GTO;
- тиристори, що комутуються, GCT;
- тиристори, що комутуються, з інтегрованим керуванням IGCT.

Щорічний обсяг продажу силових напівпровідникових приладів перевищує десятки млрд. дол. США. Структура світового ринку приладів сигової електроніки зображена на рис. 1: а - прилади до 50 А (1 - силові IC; 2 - інтелектуальні IC; 3 - біполярні транзистори; 4 - MOSFET; 5 - IGBT; 6 - тиристори; 7 - діоди); б - прилади понад 50 А (1 - біполярні модулі; 2 - IGBT модулі; 3 - тиристори; 4 - GTO; 5 - IGCT) [1-3].

Таблиця 2

Тип приладу	Переваги	Недоліки	Ціна, у. о. 1 у.о.=250 €
Традиційний тиристор SCR	Найнижчі втрати у ввімкненому стані. Найвища перевантажна спроможність. Висока надійність. Легко сполучаються паралельно і послідовно.	Не здатний до примусового запирання по керуючому електроду. Низька робоча частота.	≈ 0,5
GTO	Здатність до керованого запирання. Порівняно висока перевантажна спроможність. Можливість послідовного сполучення. Робочі частоти до 250 Гц при напрузі до 4 кВ.	Високі втрати у ввімкненому стані. Складні системи керування і передачі енергії на тиристор. Дуже великі втрати в системі керування. Великі втрати на перемикання.	≈ 1
IGCT	Здатність до керованого запирання. Перевантажна спроможність та сама, що й у GTO. Низькі втрати у ввімкненому стані на перемикання. Робоча частота - до одиниць кГц. Вбудований блок керування. Можливість послідовного сполучення.	Не виявлені через відсутність достатнього досвіду експлуатації.	≈ 1,5
IGBT (PP HV IGBT)	Здатність до керованого запирання. Найвища робоча частота (до 10 кГц). Проста неенергоємна система керування. Вбудований драйвер.	Дуже високі втрати у ввімкненому стані.	≈ 2

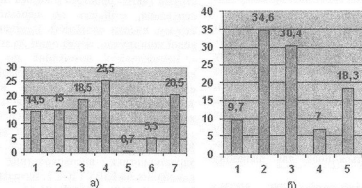


Рис. 1.

Значну частку ринку приладів у діапазоні до 50 А складають силові польові транзистори з ізольованим затвором - MOSFET (25,5%). Ці прилади, маючи малі статичні та динамічні втрати, незначний час перемикання (частота до 1 МГц), практично цілком витіснили з низьковольтних пристроїв всі інші типи силових напівпровідникових приладів. Маючи всі переваги по високих швидкостях комутації, низьких статичних і динамічних втратах, малій потужності керування, високій стійкості до перевантажень MOSFET є і будуть головними компонентами для низьковольтних застосувань і використання в інтелектуальних силових інтегральних схемах Smart IC.

Істотну частку ринку займають силові інтегральні схеми (14,5%) та інтелектуальні силові інтегральні схеми (15%). Щорічний обсяг виробництва останніх перевищує 1,5 млрд. дол. США і продовжує зростати.

МОП - керовані прилади дозволили реалізувати силові інтегральні схеми, у яких на одному кристалі технологічно виготовляються силові ключові елементи, схеми їх запуску і захисту, пристрої керування, регулювання і діагностики. Через наявність в їх складі елементів, що виконують логічні операції й автоматично забезпечують визначені режими роботи навантажень, такі пристрої одержали назву інтелектуальних (Smart Intelligent) схем.

Наявність вбудованої діагностики забезпечує підвищення надійності устаткування, що збільшується також через зменшення кількості дискретних елементів і монтажних з'єднань. Можливість роботи безпосередньо від мікроконтролерів розширює функціональні можливості силових інтегральних схем. Якщо однокристалні силові інтегральні схеми випускають, головним чином, на низькі напруги, то гібридні схеми виготовляються практично на всі необхідні рівні напруги. Щорічне зростання продажу цих елементів сягає 30%.

Силові біполярні транзистори в діапазоні до 50 А складають 18,5% ринку і застосовуються головним чином в масовому і дешевому устаткуванні. Біполярні транзистори ВРТ через складність і велику вартість схем керування, низьку швидкодію і стійкість до перевантажень - на сьогодні вже застарілий компонент. Однак швидкодіючі ВРТ поки мають важливу перевагу над MOSFET по показнику «потужність, що комутується/ціна» для діапазону напруг понад 400 В.

В діапазоні середніх напруг (500 ... 600 В і вище) найкращими для застосування є

біполярні транзистори з ізольованим затвором IGBT. Однак в діапазоні I<50 А частка IGBT у загальних обсягах продажу складає лише 0,7%. Це пояснюється великою вартістю IGBT порівняно з ВРТ.

В області з великої потужності (I > 50 А) найпоширенішими приладами є IGBT і силові модулі на їх основі (34,6% ринку). За обсягами продажу цей клас приладів перевищив навіть сектор тиристорів (30,4%). Частка силових модулів на базі ВРТ складає лише 7% загальних обсягів і продовжує зменшуватися. В даний час IGBT забезпечують комутацію струмів до 1,8 кА і напруг до 4,5 кВ. При цьому час перемикання біполярних транзисторів з ізольованим затвором лежить у діапазоні 200 ... 400 нс. Поява в останні роки IGBT з напругою понад 1,2 кВ призвела до витіснення тиристорів, що запираються (GTO), у пристроях потужністю до 1МВт і напругою до 3,5 кВ.

Модулі IGBT SEMIX [4] на основі новітніх кристалів мають унікальні поєднання малих втрат провідності та швидкого перемикання. Робоча температура складає - 175°C, що означає збільшення запасу по граничному струмові на 20...30%. Швидкість змінювання di/dt досягає 5600А/мкс. Нова технологія має ще одну унікальну властивість: кристали SPT+ здатні до самообмеження напруги на колекторі. Таким чином, SPT+ є першими IGBT, спроможними поглинати енергію лавинного пробою. До цього часу така спроможність була властива лише технологіям MOSFET.

Незважаючи на очевидні переваги тиристора SCR : низьке падіння напруги (1,2 ... 1,5 В для середнього діапазону напруг і дещо більше для високовольтного діапазону), висока густина струму, найвище значення показника «потужність, що комутується/площа кремнію», високі напруги (до 8 кВ), що комутуються, і струми (4кА), простота і низька вартість схем керування, стійкість до перевантажень по струму, висока надійність притисної таблеткової конструкції, через один істотний недолік - неможливість вимикання по керуючому електроду, цей клас приладів силових електроніки сьогодні можна віднести до застарілого. Цей прилад витісняється повністю керованими приладами IGBT і IGCT.

Межі області переважного використання IGBT і IGCT показані на рис.2. Порівняльні характеристики високовольтних інверторів, виконаних на IGBT і IGCT, наведені на рис. 3 і в табл. 3 (3 МВ·А, 600 Гц) [1-3].

На рис.4 показані фазові плечі IGCT, IGBT

і GTO інверторів напруги, звідки видно число основних компонентів в інверторі [5]. У цьому відношенні IGCT і IGBT пропонують найбільш витончене рішення, оскільки є можливість використання мінімальної кількості елементів, керуючі блоки є частиною цих модулів. Прилад IGCT - ідеальне рішення для застосування в галузі силової електроніки середньої і високої напруги і практично не залишає місця для GTO і SCR.

Масове виробництво перетворювачів для електроприводу на основі сучасних двоопераційних приладів освоєно практично усіма провідними електротехнічними компаніями світу. При всій різноманітності існуючих перетворювачів їм властиве використання силової схеми однієї і тієї ж класичної структури (табл.4): трифазний мостовий некерований випрямляч НВ, LC - фільтр ланки постійного струму, трифазний мостовий інвертор напруги (ІН) із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

Розмаїтість силових схем зводиться лише до розбіжності типів і способів увімкнення комутаційних і захисних апаратів (електромагнітні пускачі, автоматичні вимикачі, запобіжники, струмообмежувальні реактори), датчиків струму і напруги, пристроїв гальмування (мережний інвертор для рекуперації, ключ електродинамічного гальмування). Акцент

розробки силової частини перетворювачів змістився з галузі схемотехніки (істотної для тиристорних пристроїв) в програмну частину та галузь оптимізації конструкторсько-компонувальних рішень і теплофізичних розрахунків, підвищення стійкості до аварійних режимів.

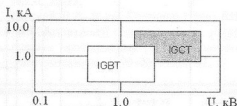


Рис.2.



Рис.3

Таблиця 3

Параметр	GTO	IGBT	IGCT
Число відмовлень за 10 ⁹ год	7000	13000	2300
Втрати, кВт	72	45	26
Маса, кг	190	70	60
Об'єм, л	456	200	80
Термоцикли ($\Delta T = 80^{\circ}\text{C}$)	200	80	200
Модульність <i>тк</i>	36x5	18x2,5	1x32

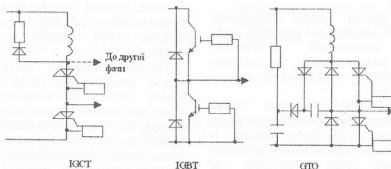

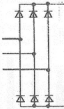
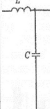
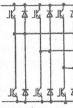











Рис. 4

Таблиця 4

Комутаційний елемент	Перетворювач			Двигун		Параметри, що регулюються	Назва приводу
	Некерований випрямляч	Фільтр	Інвертор напруги	Позначення	Назва		
					АД	$\frac{U}{f} = const$	Частотно-регульований привод (ЧРП)
					СД		
					СД	$U = var$	Вентильний двигун (ВД) і Вентильно-індукторний двигун (ВІД)
	ДІП						
					ДПС	$U = var$	Вентильний привод (ВП)

Недоліком таких схем є те, що форма фазної напруги відрізняється від синусоїди. Крім цього, двигун працює на різних частотах обертання. У результаті енергетичні характеристики двигуна погіршуються. Для поліпшення енергетичних характеристик приводу використовуються різні програмні способи широтно-імпульсної модуляції: синусоїдальні, лінійні і їх різні модифікації з частотою комутації до 20 кГц.

Висновки

Розвиток якісної силової напівпровідникової техніки вирішує ряд важливих задач підвищення енергетичної ефективності регульованого електроприводу, що особливо актуально у зв'язку з реалізацією програм енергозбереження.

По-перше, повністю керована техніка дозволяє радикально вирішити питання якості споживаної енергії. У перетворювачах із широтно-імпульсним регулюванням застосовують некеровані входні випрямлячі, що забезпечує коефіцієнт зсуву першої гармоніки

струму щодо напруги мережі близький до одиниці та значне зниження генерування гармонік струму і напруги.

По-друге, застосування техніки, що забирається, призводить до істотного зниження витрат на електротехнічне устаткування - енергопостачальні мережі, трансформаторне і розподільне устаткування. Використання регульованого електроприводу з некерованим випрямлячем з коефіцієнтом зсуву, що дорівнює 1,0 у всьому діапазоні регулювання, дозволить знизити розрахункову потужність узгоджувального трансформатора залежно від реальних умов роботи технологічного механізму.

По-третє, повністю керована техніка дозволяє створити принципово нові технічні рішення систем електроприводу змінного струму, що за своїми характеристиками істотно перевищують показники приводів постійного струму. Це - частотно-регульований привод з асинхронними короткозамкненими двигунами, вентильно-індукторний двигун, позбавлення труднощів пуску вентильного двигуна, зняття

питань обмеження di/dt і dv/dt у ланцюгах вентилів, відсутність громіздких снабберів для захисту від перенапруг і т.ін.

Література

1. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електроприводу: Навчальний посібник.-К:Кондор, 2005.-408 с.
2. Флоренцев С.Н. Состояние и перспективы развития приборов силовой электроники на рубеже столетий// Электротехника.-1999.-№4. С.2-7.
3. Галанов В.И. и др. Современные мощные полупроводниковые приборы и их функциональные особенности// Электротехника.-1998.-№3. С.48-52.
4. Каневский Г. SEMIX S2. Новая серия модулей IGBT с кристаллами SPT+ (Semikron)// Новости электроники.-2006.-№7.-С.22-23.
5. Барский В.А. и др. Создание серии IGBT преобразователей частоты для регулируемых асинхронных электроприводов// Электротехника.-1999.-№7.-С.38-41.