

Силлові модулі SiC на 2 кВ трансформують системи перетворювачів на 1500 В

Пол Дрексхейдж (Paul Drexhage), Semikron Danfoss

Переклад та редагування: Володимир Павловський, к.т.н, с.н.с.,
Інститут електродинаміки (ІЕД) НАН України

Новітній клас напруги для силових модулів з карбіду кремнію дозволяє змінити топологію схем для інверторів класу 1500 В. Завдяки перевірненій технології виготовлення чипів, низьким втратам на перемикання та стандартним корпусам силові модулі SiC на 2 кВ здатні вдихнути нове життя у відновлювану енергетику і не тільки в неї.

Силлові модулі з карбіду кремнію на напругу блокування до 1700 В стали дуже розповсюдженими у промисловому перетворенні електроенергії завдяки постійному покращенню надійності, вартості та їх значущості на системному рівні. Завдяки збільшенню напруги блокування до 2000 В для останнього покоління чипів на SiC з'являються нові можливості. Напруги у ланці постійного струму, для яких раніше були необхідні додаткові пристрої середньої напруги або багаторівневі топології, тепер можна обробляти легше.

ПРИСТРОЇ ДЛЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА 1500 В

Щоб зменшити постійний струм i , відповідно, площу поперечного перерізу провідників, у багатьох випадках підвищували напругу в ланці постійного струму. Дослідження показало, що на сонячних електростанціях промислового масштабу підвищення напруги на 500 В може зменшити втрати у колах постійного струму на 0.4%. Це призводить до значної економії коштів впродовж усього терміну експлуатації такої електростанції. Системи зберігання енергії (*Energy Storage Systems, ESS*), тісно пов'язані з генерацією електроенергії, також отримали переваги від нових технологій виробництва акумуляторів з підвищеною напругою. У Європі та Північній Америці верхня межа цього підвищення становить

1500 В, як це передбачено стандартами та директивами ЄС/IEC/UL.

Для створення надійного 2-рівневого перетворювача, здатного підтримувати таку напругу ланки постійного струму, потрібні пристрої з напругою блокування вищою, ніж загальнодоступна напруга 1700 В. Впродовж багатьох років були доступні кремнієві IGBT середнього класу напруги, наприклад, $V_{CES} = 3300$ В. Однак сучасні варіанти застосування у галузі відновлюваних джерел енергії характеризуються надзвичайно високими вимогами до ефективності. Разом з тим кремнієві пристрої середньої напруги мають відносно високі втрати на комутацію через товщину чипа, яка необхідна для безпечної роботи з такою напругою

блокування. Це призвело до поширеності 3-рівневих перетворювачів, що використовують кремнієві IGBT з напругою блокування від 950 до 1200 В.

І навпаки, висока стійкість карбіду кремнію до електричного пробою дозволяє виготовляти MOH-транзистор товщим, ніж кремнієвий IGBT на таку саму напругу. Це підтверджується загальновідомим фактом, що пристрої на основі карбіду кремнію мають значно нижчі втрати при перемиканні, ніж їх аналоги з кремнію. Перемикання транзисторів SiC MOSFET настільки швидке, що збільшення напруги блокування з 1200 до 2000 В призводить лише до незначного збільшення втрат при перемиканні. Це важливо, оскільки частота пульсацій у вихідному струмі, що створюється 3-рівневим перетворювачем, може досягати подвійної частоти перемикання напівпровідникового ключа. Таким чином, 2-рівневий інвертор, що використовує SiC модулі на 2 кВ, повинен перемикатися на подвійній частоті інверторів з кремнієвими модулями на 1200 В, які використовуються в 3-рівневному рішенні (рис. 1).

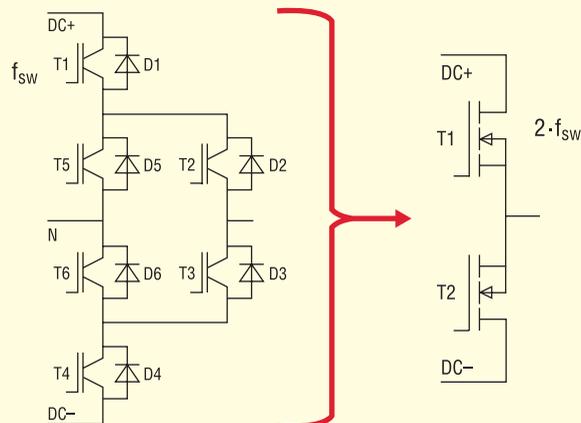


Рис. 1. Схема стійки 3-рівневого інвертора 1200 В на основі кремнію і схема стійки 2-рівневого інвертора 2000 В на основі карбіду кремнію

ПЕРЕВАГИ МОДУЛІВ 2000 В НА ОСНОВІ КАРБІДУ КРЕМНІЮ

Розглядаючи перетворювач потужністю 1 МВт, можна легко помітити зменшення займаної ним площі при застосуванні силових модулів 2 кВ на основі карбіду кремнію. Наприклад 3-фазний інвертор ANPC потужністю 1 МВт на напруги 1500 В постійного струму та 690 В змінного струму можна сконструювати з дев'яти напівмостових модулів IGBT 1400 А/1200 В (наприклад типу SEMITRANS 20). Разом із застосуванням водяного охолодження та частоти перемикання 2.5 кГц такі модулі потребують радіатор загальною площею 2000 см² (рис. 2, ліворуч).

Перетворювач на таку саму потужність можна побудувати лише із трьох напівмостових модулів SiC на 2 кВ, які перемикаються на частоті 5 кГц. Ця частота перемикання дає таку саму частоту пульсацій струму на виході, як у 3-рівневих перетворювачів. Перехід від схеми з дев'ятьма до схеми з трьома модулями дає суттєве зменшення необхідної площі радіатора на 66% (рис. 2, праворуч).

Таке зменшення площі означає меншу вагу для транспортування та зменшення витрат матеріалів. Крім того, воно також супроводжується підвищенням ефективності — загальні втрати у напівпровідниках зменшуються на 40%. Для наведеного вище прикладу це означає, що ефективність перетворювача на 0.4% краща, ніж у 3-рівневого рішення — понад 99% як у режимі заряджання, та як і в режимі розряджання.

Хоча 3-рівневі перетворювачі довели свою надійність у реальних умовах застосування, повернення до 2-рівневих перетворювачів дає змогу зменшити значення розрахункової інтенсивності відмов (Failures In Time, FIT) залежно від кількості електричних компонентів у системі. Зокрема, це стосується таких випадків, коли розглядається зменшення каналів

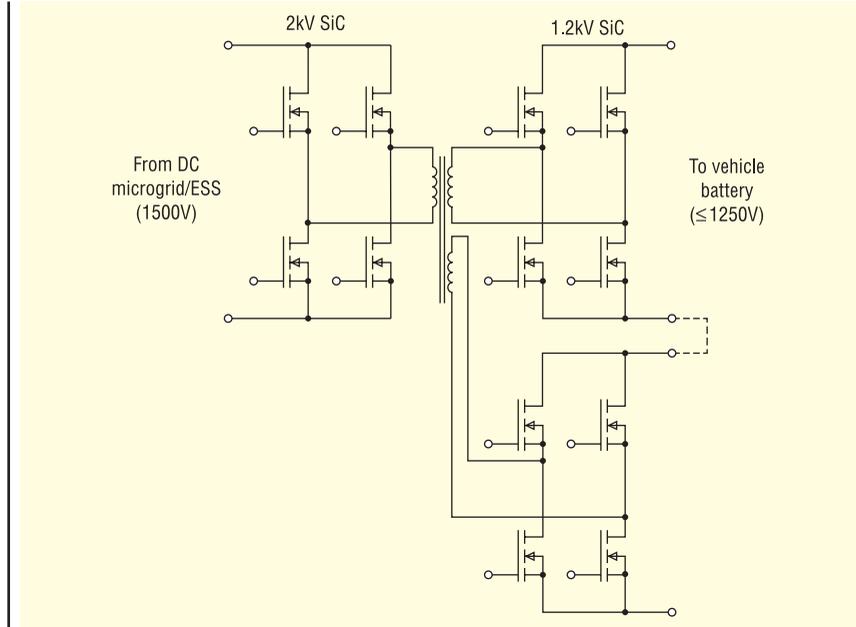


Рис. 3. Схема ізолизованого подвійного моста

драйвера затвора з 18 (3-рівневий) до шести (2-рівневий). Схема керування також спрощується, оскільки не потрібно використовувати алгоритм балансування напруги на шині електроживлення.

НОВІ ЗАСТОСУВАННЯ

На додаток до заміни наявних топологій з напругою 1500 В в автономних ESS, силові модулі на 2 кВ відкривають нові можливості для потужних зарядних пристроїв електромобілів. Вантажівки та позашляховики вже переходять на акумулятори з напругою понад 1000 В. Щоб скоротити час заряджання, потрібна потужність, яка часто перевищує можливості електромережі. У цих випадках має сенс застосувати ESS на 1500 В. Ця система забезпечує запас енергії, яку можна швидко передати на акумулятор автомобіля за допомогою DC/DC перетворювача. Топології DC/DC можуть

становити проблему, коли потрібна посиленна ізоляція через високу частоту, на якій працюють трансформатори. У поєднанні з високою напругою це означає, що сучасні технічні рішення використовують на первинному перетворювачі 3-рівневу топологію SiC. Силові модулі SiC на 2 кВ спрощують повернення до 2-рівневого мостового перетворювача (рис. 3). Щоб забезпечити універсальність застосування зарядних пристроїв для електромобілів (висока напруга або великий струм), на виході таких перетворювачів використовують добре відому конфігурацію з подвійним мостом H-типу.

ПОРТФОЛІО ДОСТУПНИХ СИЛОВИХ МОДУЛІВ

Компанія Semikron Danfoss обладнала ряд силових модулів карбідом кремнію останнього покоління ROHM Gen. 4 2 кВ (рис. 4). Ці пристрої відрізняються надійністю та простотою керування, характерною для чипів SiC 1200 В Gen. 4, але мають підвищену напругу блокування.

Комплект SEMITOP E2 без базової плати містить напівмостову схему з RDS(on)_{25C}, що дорівнює 6.5 мОм або 4.3 мОм. Останню схему можна використовувати — з розрахунку один модуль на фазу — для створення 3-фазних перетворювачів на понад 200 кВт із використанням водяного охолодження. Конструкції з повітряним охолодженням та одним модулем на фазу можуть віддавати близько 150 кВт. Ретельно продумана схема розташування виводів з клемми

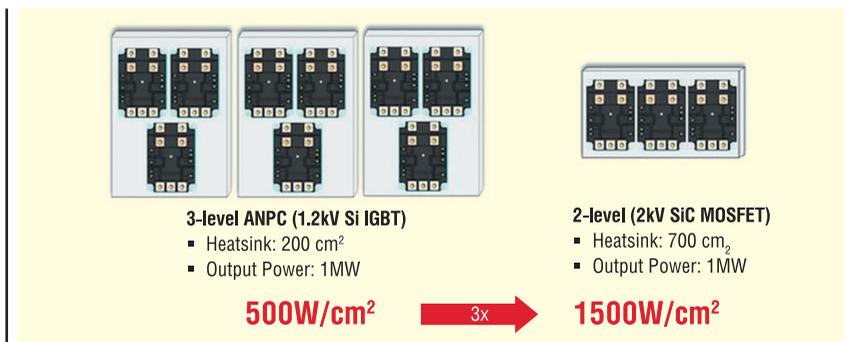


Рис. 2. Зменшення займаної площі при застосуванні силових модулів на 2 кВ на основі карбіду кремнію

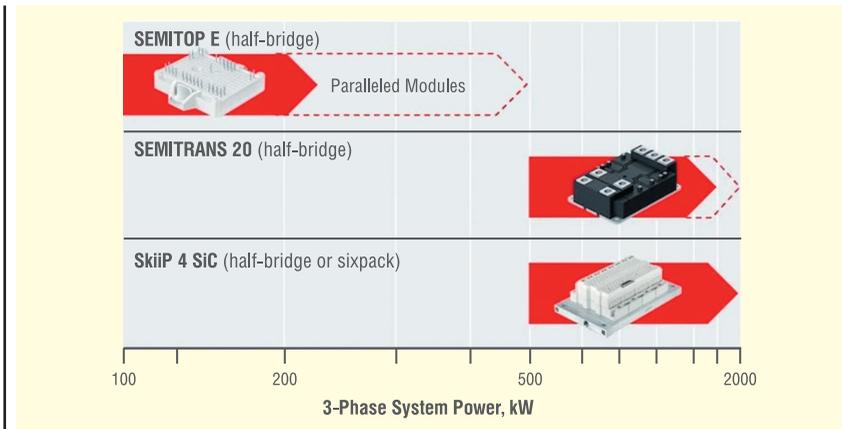


Рис. 4. Лінійка силових модулів на 2 кВ

постійного та змінного струму на протилежних сторонах перетворювача полегшує паралельне підключення. За допомогою такої жорстко паралельної (або почергової) схеми можна сконструювати 3-фазні перетворювачі з водняним охолодженням потужністю до 500 кВт. Модуль SEMITOP E2 для монтажу на друковану плату ідеально підходить для модульних конструкцій, таких як системи безперебійного електроживлення і модульні ESS. Мережа штирів зменшує площу контуру, завдяки чому його паразитна індуктивність становить всього 6 нГ. Усі готові модулі тестуються на електричну міцність ізоляції прикладанням напруги 3800 В змінного струму в провідж 1 с.

Для конструкцій понад 500 кВт і в межах кількох МВт хорошим рішенням є силові модулі SEMITRANS 20 нового промислового стандарту. Маючи всього чотири монтажні гвинти та велику внутрішню площу для мікросхем, один SEMITRANS 20 містить напівмостовий MOSFET на 2 кВ з $R_{DS(on)_{25C}} = 1 \text{ мОм}$. Незважаючи на великий розмір, модуль SEMITRANS 20 відзначається типовим значенням комутаційної індуктивності, яке складає лише 10 нГн завдяки симетричному внутрішньому монтажу його компонентів. Компанія Semikron Danfoss спирається на свій багаторічний досвід у галузі спікання срібла, щоб забезпечити надійне з'єднання між чипом та підкладкою без паяння. Таке з'єднання суттєво збільшує тривалість експлуатації з циклами «скид-накид навантаження». Проектування пристроїв на основі карбіду кремнію вимагає певних спеціальних знань. Жорсткі вимоги до напруги затвора та високі швидкості перемикачів вимагають ретельного проектування драйвера, щоб уникнути паразитних коливань, електромагнітних завод і прямого пошкодження силового модуля. Проектування ще більше ускладнюється при високих рівнях потужності, коли пе-

ремикаються струми силою тисячі ампер. Semikron Danfoss надає детальні вказівки щодо застосування та зразки проєктів, щоб полегшити розробнику процес проєктування. Але для найшвидшого виходу на ринок існує кваліфікований і перевіреним інтелектуальний силовий модуль, який об'єднує драйвер, SiC MOSFET і радіатор. Модуль типу SKiiP 4 SiC IPM має таку саму структуру та набір функцій, що й добре відомий модуль SKiiP 4 IPM із кремнієвими IGBT, але перший зі згаданих модулів оснащений найновішими SiC MOSFET на 2 кВ. Він дозволяє користувачеві зразу скористатися перевагами нового чипа без необхідності тривалого навчання. Завдяки напівмостовим конфігураціям, розрахованим на струми понад 1800 А та 900 А, цей IPM має достатню потужність для створення компактних потужних перетворювачів. Крім того, модуль SKiiP 4 SiC IPM сприяє надійності ланцюга постачання підтримуючи конфігурації на 2 кВ від різних постачальників. Цифровий драйвер підтримує різні напруги керування затвором, необхідні для різних модифікацій SiC модулів. Завдяки технології спікання у з'єднаннях з чипом і алюмінієво-мідним проводам, модуль SKiiP продовжує бути стандартом у питаннях щодо тривалості експлуатації модулів з циклами «скид-накид навантаження».

Більш детальну інформацію щодо продукції Semikron Danfoss можна отримати, звернувшись до офіційного дистриб'ютора в Україні — ТОВ НВП «Техносервіс-привід»:

**03057, м. Київ,
пр-т Берестейський, 56,
офіс 335,
тел. +38 (044) 458-47-66,
e-mail: sp.tsdrive@gmail.com,
www.tsdrive.com.ua,
www.semismart.com.ua**

CN

НОВЕ ДОСЯГНЕННЯ ФІЗИКІВ МОЖЕ ЗМІНИТИ СПОСІБ СТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

Китайські фізики створили двовимірні металеві листи товщиною всього в кілька атомів за допомогою нового методу. Ці листи, створені з вісмуту, галію, індію, олова і свинцю, в сотні тисяч разів тонші за людську волосину. Розроблені вченими з Китайської академії фізики надтонкі металеві листи мають винятково високу електропровідність.

Вчені виявили, що після того, як метали стають дуже тонкими, завтовшки всього в один або кілька атомів, їхні властивості різко змінюються через явище, відоме як квантове обмеження. За словами фізиків, отримані властивості потенційно корисні, але такі двовимірні метали важко стабілізувати за мікрометрових розмірів, оскільки атоми мають тенденцію набувати своїх природних тривимірних конфігурацій і легко окислюються на повітрі.

Вчені давно знають, що двовимірні матеріали можуть демонструвати зовсім інші властивості, ніж їхні тривимірні аналоги, навіть за однакового хімічного складу. Наприклад, шар вуглецю товщиною в один атом, відомий як графен, набагато міцніший і більш провідний, ніж графіт в олівцях.

У той час як графен можна легко відокремити від кристалічного вуглецю, який утворює природно складені шари, метали мають щільно запаковану атомну структуру, що значно ускладнює їх поділ на тонкі листи товщиною з атом.

Фізики створили пару сапфірових пластин, кожна з яких покрита дисульфідом молібдену, матеріалом, який допомагає стабілізувати надтонкий метал. Потім вони нагріли крихтну краплю металу на одній пластині і притиснули її іншою пластинкою. У міру охолодження метал розтікався в надтонкий лист із шарами дисульфиду молібдену, що запобігають окисленню і допомагають витягувати надтонкий метал.

Вченим вдалося створити листи з п'яти різних металів завтовшки всього в кілька атомів і завширшки в пару сотень мікрометрів. Автори дослідження кажуть, що цей метод можна застосовувати до будь-якого металу з низькою температурою плавлення.

www.nature.com