

Semikron Danfoss: компактні та ефективні перетворювачі для електроприводів на основі модулів з карбідом кремнію

Carsten Schreiter (Карстен Шрайтер), Semikron Danfoss

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

E-mail: sp.tsdrive@gmail.com

Як було зазначено раніше, MOSFET з карбїду кремнію виявилися комерційно прийнятною альтернативою кремнієвим IGBT у сферах сонячної енергетики, систем зберігання енергії, зарядних пристроїв для електромобілів. Усі ці сфери застосування завдячуючи певним перевагам SiC модулів, а саме зменшенню розмірів та ваги пристроїв на їх основі, компенсують будь-яке збільшення вартості напівпровідникового матеріалу. Наряду з цим промислові моторні електроприводи, що масово використовуються, вимагають недорогих, надійних силових напівпровідників на рівні пристрою. Проте зростання глобальних витрат на електроенергію та нормативні вимоги не тільки до наявності гармонік, відмінних від основної як на вході, так і виході перетворювальних пристроїв мотивують розробників та проектувальників до пошуку більш ефек-

тивних рішень. Це, у поєднанні з появою модулів SiC з можливістю витримувати коротке замикання, означає, що модулі SiC займуть важливе місце в класичних моторних електроприводах. Саме цьому аспекту застосування модулів SiC присвячена ця стаття.

ПРИКЛАД ЗАСТОСУВАННЯ ІНВЕРТОРА ДЛЯ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА

Інверторна сторона стандартного електропривода, що з'єднується з двигуном, створює певні проблеми при впровадженні SiC. Тут, на відміну від прикладу з активним випрямлячем (*Active Front End, AFE*), необхідно враховувати кілька обмежень та ключових вимог:

- інвертор повинен витримувати короткі замикання;

- dv/dt повинен бути обмежений (наприклад, <5 кВ/мкс), щоб уникнути пошкодження двигуна;
- частоту перемикачів необхідно обмежити, щоб забезпечити прийнятний рівень втрат інвертра та уникати надмірних струмів витоку в екранованих кабелях двигуна.

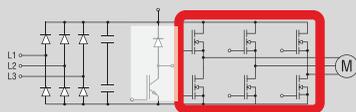
Здатність транзисторів SiC витримувати коротке замикання також є критично важливою умовою. Однак останні покоління SiC можуть забезпечити коротке замикання протягом кількох мікросекунд, що робить їх прийнятним варіантом для інверторів електроприводів. Як видно зі схеми на рисунку 6, тут відсутні елементи фільтра, які можна було б зменшити завдяки збільшенню частоти перемикачів. Однак у цьому варіанті застосування SiC транзистори також можуть надавати цінні переваги.

Це ілюструє зразковий моторний привод зі змінним крутним моментом потужністю 15 кВт (20 к.с.), який часто зустрічається на практиці, з наступними параметрами:

- напруга постійного струму: 560 В;
- вихідна напруга: 355 В;
- струм на виході: 26 А;
- перевантаження: 110%/1 хв.
- PF : 0.98 (двигун з постійними магнітами);
- вихідна частота: 50 Гц;
- частота модуляції: $S_i/S_iC=5$ кГц (dv/dt обмежено 5 кВ/мкс);
- $R_{th(c-q)}$: 0.31 К/Вт;
- температура радіатора: 50 °С.

Selected Power Modules:

- IGBT Module: SK35DGD12T7ETE2_HPTP, 35A, C1B
- SiC Module: SK50DMDL120RM04ETE2_HPTP, 18mΩ, C1B



Limitations for standard drive with unknown motor and cable length

- dv/dt cannot be increased to limit over voltage at motor terminals (reflected wave)
- $\rightarrow R_g$ adjusted to have 5kV/μs voltage rise time for both
- f_c cannot be increased to limit leakage current (shielded motor cable, etc)

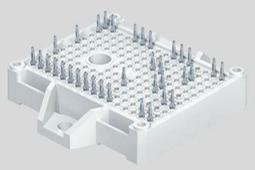


Рис. 6. Традиційна схема застосування інвертора для відцентрового насоса

* Закінчення. Початок див. CHIP NEWS, № 9, 2024.

Operating Conditions:

- Centrifugal Pump
- Motor: VEM PM motor, 356V, 15kW, 25.5A, cos(phi)=0.98, 50Hz
- Drive: $V_{DC}=560V$, $f_{sw}=5kHz$, $dv/dt=5kV/\mu s$, $T_a=50^\circ C$, $OL=110\%/1min$
- Load characteristics: quadratic torque, $T-I-n^2$ beyond approx. 20%

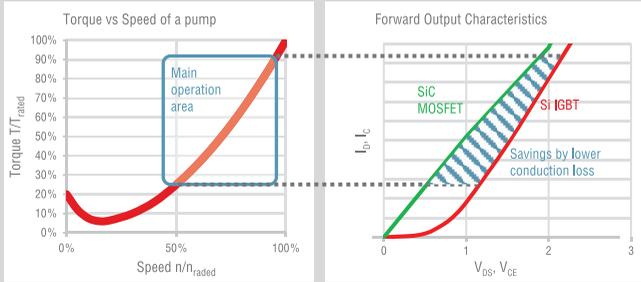


Рис. 7. Характеристика крутного моменту насоса та вольт-амперна характеристика силових модулів

Базовий модуль живлення Si IGBT для цього порівняння використовує останнє покоління (7-е) 1200 В/35 А IGBT у корпусі SEMITOP E2. Вибраний модуль SiC MOSFET використовує MOSFET з напругою 1200 В/18 мОм. Цей MOSFET є останнім 4-м поколінням (від ROHM Semiconductor) з номінальною можливістю короткого замикання 2 мкс ($V_G = 18 V$, $T_J = 150^\circ C$, $V_{DC} = 720 V$) при використанні в силових модулях Semikron Danfoss. Для обох прикладів модулів резистори затворів транзисторів було обрано таким чином, щоб обмежити dv/dt до 5 кВ/мкс. Навантаження – відцентровий насос з квадратичними характеристиками крутного моменту, як показано на рисунку 7. Реальні насоси працюють в основному в діапазоні швидкостей від 40% до 80%. Ця робоча зона відповідає діапазону струмів, де SiC MOSFET має менші втрати, ніж Si IGBT.

Оскільки швидкість перемикання MOSFET сповільнюється до 5 кВ/мкс, відмінність втрат на перемикання незначна в порівнянні з використанням IGBT. Однак, завдяки лінійним прямим характеристикам, MOSFET демонструє набагато менші втрати провідності. Втрати та ефективність для всього приводу потужністю 15 кВт при безпосередній заміні модуля Si на модуль SiC показано на рисунку 8 для Si IGBT (сірий) і SiC MOSFET (червоний). Результати показують явну перевагу у втратах для SiC у відповідному діапазоні швидкостей. Втрати в приводі, оснащеному SiC, на 0.7% менше, ніж у версії Si на низькій швидкості й на 22% менше на повній (рис. 8а). Це дорівнює збільшенню загальної ефективності на 0.6% на низькій швидкості та на 0.5% на високій швидкості. Рисунок 8б ілюструє потужність втрат та ККД перетворюю-

вача для електропривода при еквівалентних умовах використання модулів у перетворювачі Danfoss FC-102 (в тому числі втрати вхідного діодного прямопрячача, конденсаторів ланки постійного струму та інвертора). Ці значення можна прирівняти до реальної економії,

подивившись на час роботи, витрачений при різних робочих швидкостях приводу. Оцінка річного навантаження базується на типовому застосуванні приводу промислового насоса (рис. 9).

Якщо розрахувати втрати в кожній точці навантажувальної характерис-

- Replace Si losses with SiC losses from previous calculation

Result:

- Reduction of watt loss by up to 22%
- Up to 0.7%-points increase in drive efficiency

a)

Comparison:

- Identical switching speed, 5kHz and 5kV/μs
- Identical cooling
- Simulation Tool: [Semikron Danfoss SemiSel](#)

Result:

- Typical operation range of a pump 40-80% load
- More than 40% lower losses from 40% to 80% speed
- Up to 0.6 to 1% boost in efficiency between 40% and 80% of speed

b)

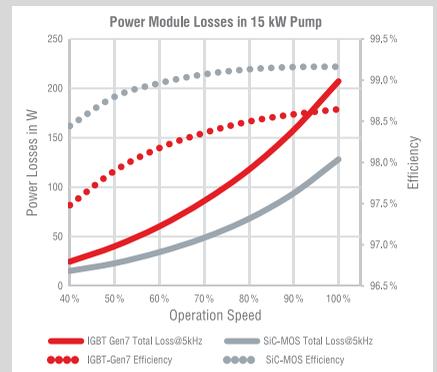
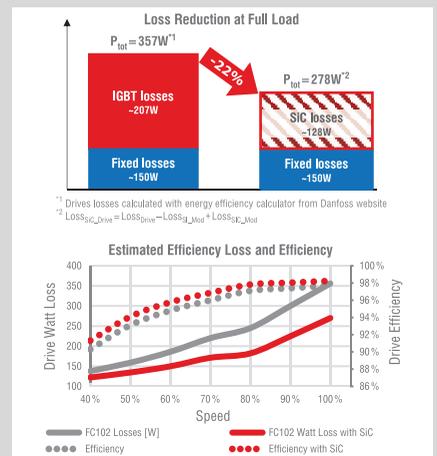


Рис. 8. Приклад застосування інвертора для відцентрового насоса – ККД та втрати потужності: прогнозовані втрати та ККД перетворювача при безпосередній заміні модуля Si на модуль SiC (а); потужність втрат та ККД перетворювача для електропривода при еквівалентних умовах використання модулів у перетворювачі Danfoss FC-102 (б)

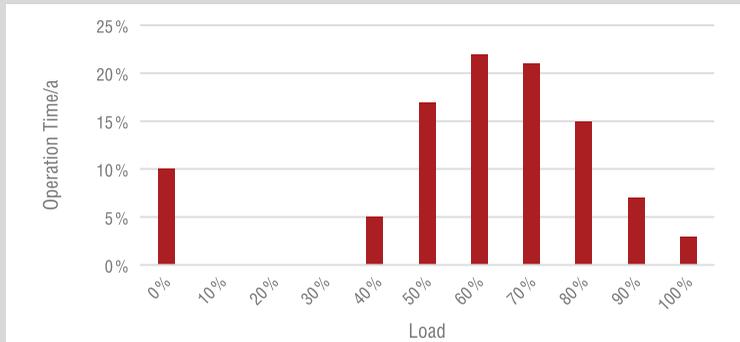


Рис. 9. Графік роботи привода промислового насоса

зичні переваги, оскільки за допомогою модулів SiC можна зменшити габарити при еквівалентній номінальній потужності. Подальше моделювання показало, що нижчі втрати потужності напівпровідників з SiC дозволяють зменшити об'єм радіатора до 71% при тому ж підвищенні температури. Для промислових приводів це означає, що потік повітря та кількість вентиляторів охолодження можна зменшити. Крім того, панель і корпус, в які встановлюється перетворювач, можуть бути меншими та легшими, що зменшує витрати на матеріали, логістику та встановлення. І навпаки, при збереженні однакової теплової конструкції вихідна потужність для даного розміру інвертора привода двигуна може бути збільшена до 25% (рис. 10).

СИЛОВІ МОДУЛІ SiC

Для задоволення потреб виробників приводів компанія Semikron Danfoss

тики, то сумарну енергію, втрачену за один рік, можна розрахувати для кожного електропривода відповідно.

Так, наприклад, за один рік перетворювач, оснащений SiC, має лише 377 кВт·год накопичених витрат енергії порівняно з приводом, оснащеним Si, що становлять 651 кВт·год. Таке скорочення споживання енергії на 42% має реальні екологічні та фінан-

сові наслідки. Викиди парникових газів щорічно скорочуються на 125 кг-CO₂ (Global Mix, 2023). Підвищена вартість приводу, оснащеного SiC, компенсується через рік у такій країні, як Німеччина (0.20 євро/кВт·год, 2023 рік), або менш ніж за три роки в такій країні, як Сполучені Штати Америки, які мають значно нижчі витрати на електроенергію. Нарешті, використання SiC має фі-

Identical power

IGBT (269cm²) → 71% Smaller → SiC MOSFET (78cm²)

Identical cooling

IGBT (25.5A) → 25% More Power → SiC MOSFET (33A)

Smaller Drives

- Lower losses reduce cooling demand
- Lower airflow, less fans, less contamination, lower audible noise
- Ideal for embedded or IP5x+ drives
- Benefits through complete supply chain by smaller packages, lower weight, storage etc.

More Power

- More power from same thermal design
- Lower design and test effort during development
- Scale effects by reusing same parts

Higher Carrier Frequency

- Increased motor efficiency
- Lower audible noise
- Smaller magnetics
- Efficient solution for high-speed applications (compressors, spindles, etc.)

Рис. 10. Переваги використання SiC модулів: зменшення втрат, компактність, якість та комфорт

- Latest Gen 4 SiC Trench MOSFET from ROHM
- Unipolar gate control (0/18Vdc)
- Short-circuit capability (2μs/150°C/720V/18V)
- Pin compatible to standard CIB/sixpacks in SEMITOP E and MiniSKiiP
- MiniSKiiP: Sintered and up to 175 °C T_{J,max} continuous operation
- Superior thermal performance

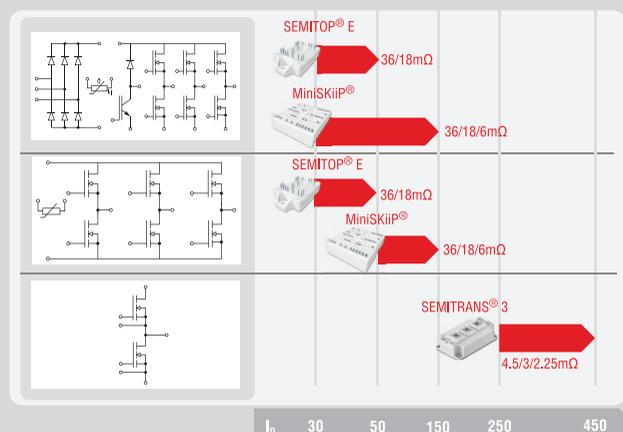


Рис. 11. Силлові модулі SiC для електроприводів

Selected Power Modules:

- IGBT Module: SK50GD12T7ETE1_HPTP, 50A
- SiC Module: SK50MD120RM04TE1_HPTP, 18mΩ
- Both selected to withstand a certain number of power cycles
- Same dv/dt, 8kHz, $V_{DC}=560V$
- Simulation Tool: [Semikron Danfoss SemiSel](#)



RESULT for a single axis

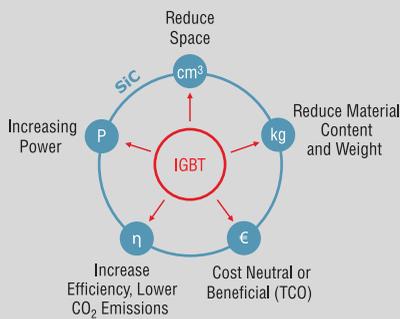
	Avg. Loss	Efficiency	Annual Energy cost savings*	Annual CO ₂ Reduction**
IGBT Gen7	86.7W	96.9%		
SiC	44.7W	98.4%		
Savings	48.4%	1.6%	35€	78kg

- Almost 50% lower power losses
- Smaller drives, less panel space, benefits in logistics, ...
- Less panel cooling required

* 250d/16h, 0.20€/kWh, Source: VDW-Bayern Studie (Prognos) – Internationaler Energiepreisvergleich Oktober 2023
 ** Emission factors from IEA



Рис. 12. Використання SiC у сервоприводах та роботизованих електроприводах



- SiC can provide cost neutrality or even advantage when looking at system and Total Cost of Ownership (TCO)
- SiC provides impressive benefits even at low switching speed and dv/dt
- Proven packages simplify implementation into production, service, etc.

SiC is THE choice for the next generation of motor drives!

Рис. 13. Перетворювачі для електроприводів на основі модулів з карбідом кремнію — нові ступені свободи в дизайні

ВИСНОВОК

Отже, наведені в статтях приклади застосування SiC додають розробникам нові можливості, завдяки яким при переході на SiC виграють як виробники, так і кінцеві користувачі.

Для спеціальних приводів (рис. 12), таких як високошвидкісні двигуни, що використовуються для турбокомпресорів, можна отримати ще більші переваги. В таких застосуваннях доречно не обмежуватися згаданими тут обмеженнями dv/dt та частотами перемикання. Зрозуміло, що порівняння вартості не має сенсу, якщо робити це на рівні модуля. Аналіз має бути розширений, щоб включити систему приводу та загальну вартість обладнання. У цьому випадку SiC приносить загальні переваги, які виправдовують більш високу вартість модуля. Завдяки високій продуктивності та новій надійності SiC є розумним вибором для наступних поколінь промислових моторних електроприводів (рис. 13).

пропонує силові модулі SiC в загальних топологіях і пакетах (рис. 11). SEMITOP E, MiniSKiiP та SEMITRANS Classic доступні з новітнім Gen. 4 SiC MOSFET від ROHM, що забезпечують можливість короткого замикання та уніполярне керування затвором. Ці пристрої сумісні з існуючими пристроями Si і доступні з

високопродуктивною попередньо нанесеною термопастою.

Для найвищої надійності термоциклів спечені чипи доступні в корпусі MiniSKiiP. Це дозволяє використовувати SiC у системах із значними піками перевантаження, таких як сервоприводи або роботизовані електроприводи (рис. 12).

Video Series: Motor Drive Myths

- [SiC Never Pays Back!](#)
- [SiC is Too Expensive!](#)
- [SiC Must Be Fast!](#)
- [SiC Is Not Robust!](#)
- [SiC Is Too Complicated!](#)



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,
 +38 (067) 463-46-62,
 +38 (095) 284-96-62,
 e-mail: sp.tsdrive@gmail.com,
semikron@ukr.net,
service_danfoss@ukr.net
www.semismart.com.ua**