

СЪЩНОСТ НА ТЯГОВИЯ ИНВЕРТОР И НЕГОВОТО ЗНАЧЕНИЕ ЗА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ ПРЕВОЗНИ СРЕДСТВА - ЧАСТ 2

Доц. д-р Даниела Марева
Бургаски свободен университет

ESSENCE OF THE TRACTION INVERTER AND ITS IMPORTANCE FOR ELECTRIC VEHICLES - PART 2

Assoc. prof. Daniela Mareva, PhD
Burgas Free University

Abstract: *The use of advanced technologies and solutions in the semiconductor industry allows automakers to reduce the cost of electric vehicles, extend range, improve comfort, and offer more electric motor options with a scalable approach. New innovations in microcontrollers, integrated power transistor drivers and key converters can significantly improve electric vehicle parameters such as battery cost, power density and efficiency, as well as offer additional safety features.*

Keywords: *traction inverter, electric vehicles, designing*

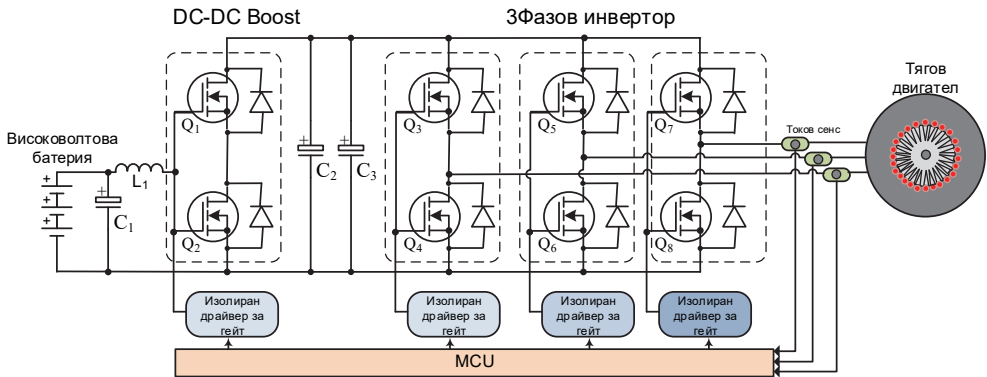
Инверторът за управление на силовата част на електрическите двигатели е основен компонент на съвременната технология при новите електрически превозни средства (EV). Той представлява междинно звено между батерията и електрическия двигател и управлява преобразуването на енергията от постоянен ток (DC) в променлив ток (AC), като по този начин подобрява цялостната ефективност и динамиката на движението на превозното средство. Инверторът също така контролира скоростта и въртящия момент на двигателя, улесняване регенеративното спиране и осигурява оптимално управление на температурата. Инверторното управление на електрическите превозни средства оказва пряко влияние върху тяхната производителност, пробег и безопасност.

Третото поколение инвертори за управление за електрически превозни средства за автомобилен клас въвежда серия от подобрения, базирани на силициев карбид (SiC) за 800 V. Дизайнът е фокусиран върху усъвършенстване на цялостната архитектура, с цел да отговори на развиващите се технологични нужди в сферата на електрическата мобилност.

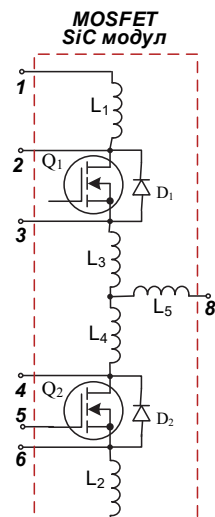


Фиг. 1. Тягов инвертор - външен вид

Силовата електроника, използвана в инверторите за тягови двигатели в електрически превозни средства, се развива бързо и се основава на технологии със SiC. При работа в режим на частично натоварване, SiC модулите демонстрират около 4% по-висока ефективност в сравнение със силициевите електронни компоненти. Най-удачно е едновременното използване на Si и SiC модули, тъй като всеки от тях има свои специфични предимства. Хибридно решение Si/SiC често се прилага както в тягови, така и във вторични инвертори, като SiC полупроводникови елементи се използват за задвижване на задните колела с цел увеличаване на пробега, а силициевите компоненти – за задвижване на предните колела, за да се оптимизират разходите.



Фиг. 2. Тягов инвертор – блок схема



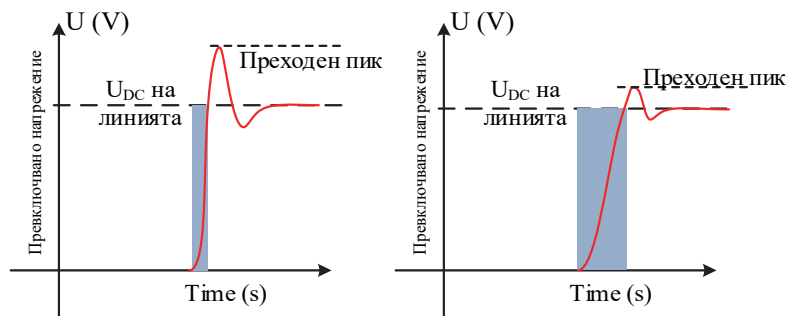
Фиг. 3. Интегрална схема на SiC MOSFET гейт драйвера

Тяговият инвертор работи с честота на превключване около 200 kHz при използване на IGBT, като тази честота нараства при прилагане на SiC и GaN компоненти, които се използват като силови превключватели. Те притежават подобрена енергийна ефективност при по-високи скорости на превключване. Това способства за намаляване размера, теглото, цената на двигателя, както и за увеличаване на пробега.

Тези инвертори осигуряват необходимия въртящ момент и ускорение. Реакцията на инвертора и управлението от него електродвигател е пряко свързана с характера на движение на превозното средство. Необходимата мощност за тази цел започва от 40 kW и повече, което изисква използването на изключително надеждни IGBT и силициево-карбидни (SiC) компоненти. Масшабируемостта, подобрените термични характеристики и ниска индуктивност на модулите позволяват на конструкторите на тягови инвертори да постигнат максимална ефективност, висока плътност на мощността и минимално време за реакция. Батерийните пакети с изходно напрежение от 400 V до 800 V осигуряват захранване на тяговите инвертори. Това налага използването на компоненти в инвертора с номинално напрежение от 600 V до 1200 V, които могат да работят с ток до 1000 A във всяка от фазите.

С тях може също така да се поддържа единичен шестфазен двигател с повишена надеждност – фактор, който е особено важен за електрически превозни средства с интензивен работен цикъл, като тези в търговските автопаркове.

Съвременните интегрални схеми, използвани като драйвери за гейтовете на транзисторите, включват и изключват транзисторите SiC FET за възможно най-кратко време. Това се постига чрез управление на скоростта на промяна на напрежението (du/dt), минимизирайки преходните токове (di/dt). Резултатът е намалена консумация на енергия при превключване, което води до по-ниски общи загуби.

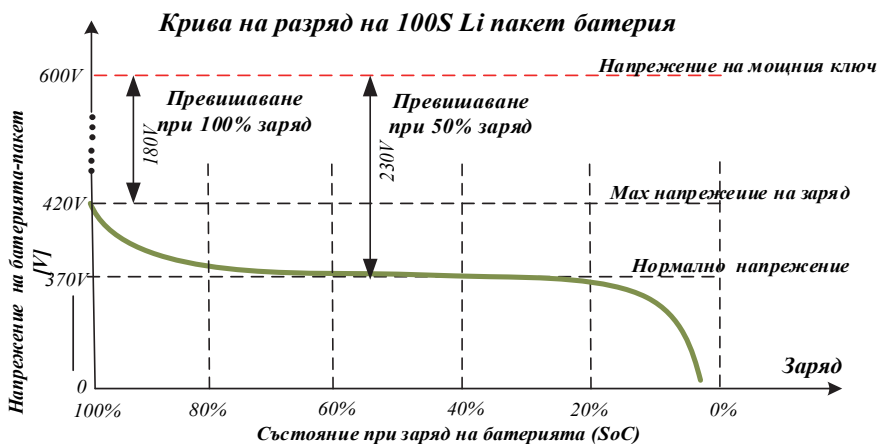


Фиг. 4. Управление на скоростта на нарастване на SiC чрез промяна на силата на управление на гейт драйвера

Способността за контрол и регулиране на тока на драйвера на гейта позволява значително намаляване на загубите при превключване, макар и за сметка на удължаване на времето на преходния процес при превключване, както е показано на фигура 4.

Променливият ток в задвижванията на електрически превозни средства (EV) при работа и самата реакция се извършват в реално време. Това изисква максимална гъвкавост при проектирането и оптимизиране на схемите и конструкциите на тяговите инвертори. По този начин се повишава ефективността и се ограничават пиковите (превишаванията) на напрежение при преходните процеси.

При анализ на цикъла на зареждане на батерията на електрическо превозно средство се наблюдава намаление на пренапреженията по време на преходния процес, което оптимизира процеса на зареждане за период от три четвърти на общия цикъл и допринася за повишаване на ефективността.

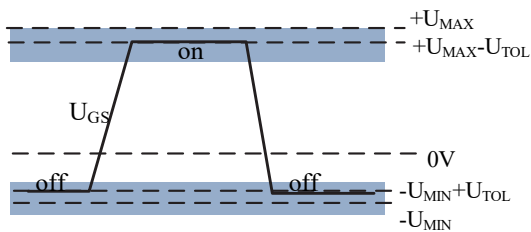


Фиг. 5. Зона на ефективност по време на пиково напрежение на батерията спрямо състоянието на зареждане

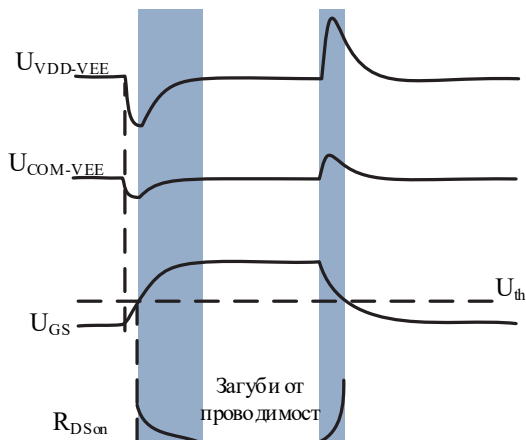
Електрическите превозни средства изискват ефективно преобразуване на мощността от тяговия инвертор, за да се осигури максимално дълго време на работа на батерията при всеки пълен цикъл на разреждане.

Драйверът за гейта на Q_1 поддържа функционалната безопасност, която отговаря на изискванията за автомобилна надеждност. Предлага подобрена ефективност, благодарение на двоен разделен изход на интегралния модул и конфигуриране на силата на променливия ток чрез двупосочна 4 MHz SPI (Serial Peripheral Interface) шина или чрез подаване на цифрови управляващи сигнали на няколко входа – за задаване на необходимото превключващо напрежение от захранването.

Използването на изолирано захранване за гейтовия драйвер позволява стабилно и безопасно подаване на напрежение за постигане на висока ефективност, като се минимизират загубите на проводимост в самите SiC модули. Настройването на напрежението към гейта на максимално допустимо ниво намалява съпротивлението между дрейн и сорс ($R_{DS(on)}$), което е от съществено значение, тъй като токовете в тяговите инвертори надвишават 400 А, а това прави загубите на проводимост неприемливо големи.



Фиг. 6. Граници на напрежението на SiC гейт-сорс



Фиг. 7. Загуби на проводимост по време на цикъл на превключване

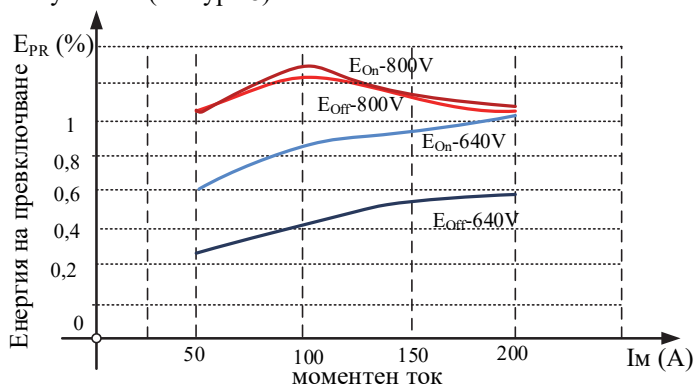
Изолираните DC/DC модули, използвани за управление на гейтовете, минимизират загубите от проводимост и превключване. Както положителните, така и отрицателните напрежения на драйверите за управление на гейта са лесно регулируеми, позволявайки оптимално настройване на напрежението на гейта за SiC или IGBT модули, използвани в задвижванията. Те осигуряват точност по-малка от 1,3% при пълни работни условия (напрежение, мощност в безопасна работна зона, температура и про-

цес). Обратната връзка в затворен контур осигурява високоточно регулиране на напрежението към гейта на SiC или биполярния транзисторен модул с изолиран гейт, максимизирайки тяхната безопасност и ефективност.

Изолираните DC/DC модули за управление осигуряват висока плътност на мощността, интегрирайки в себе си изолационния силов трансформатор, моста на инвертора от първичната страна, моста от вторичната страна и управляващата логика. Малкият размер на корпуса не пречи на ефективното и компактно управление в многофазни тягови инвертори. Постига се и по-малка площ на печатната платка – с до 30%.

Динамично напрежение на гейта

Възможността за регулиране на скоростта на включване и изключване на гейта има значителен положителен ефект върху батерията и електродвигателя. Превключвателните елементи на захранването са внимателно подбрани, но превозните средства се сблъскват с различни условия, които влияят на техните електрически характеристики. Това включва промени в тока на двигателя, напрежението на батерията/ шината и температурата на захранващото устройство. Настройката на тока на задвижване на гейта модулира енергията на превключване в зависимост от конкретните условия. Това е от съществено значение за максимизиране на ефективността при всички работни условия (Фигура 8).



Фиг. 8. Процентна разлика на превключваната енергия E_{ON}/E_{OFF} при динамична сила на гейта

Драйверът от определен тип предлага избор на ток за работа от 10A до 30A.

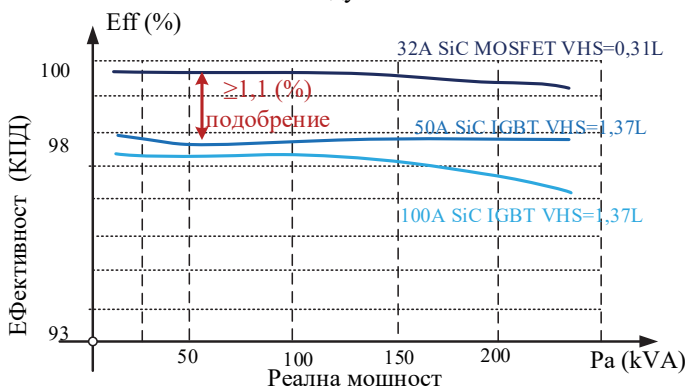
Напрежението на гейта може да се контролира през цифрови входове GPIO или SPI с команди. Широкият диапазон от възможни напрежения за управление на гейта осигурява необходимия ток. Това позволява управление на множество устройства или работа в паралелно свързване.

Ефективност

Силовите превключващи елементи могат да бъдат повредени от пиково (прекомерно) напрежение. Необходимо е да се ограничи термичното натоварване на автомобилните интегрални модули – схеми и да се усъвършенстват драйверите за гейтове.

Подобрието на ефективността се наблюдава не само при пикови натоварвания, но и при частични натоварвания. При някои частични натоварвания подобрието на ефективността е по-високо, което е пригодно за типичните профили на натоварване на тези машини. Тестваният силициево-карбиден модул има по-нисък номинален ток

и температура на прехода $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ при максимално натоварване. При 50 A IGBT модули значително надминават тази температура, а 100 A IGBT са малко над тази граница ($105\text{ }^{\circ}\text{C}$) при максимално натоварване. Тази горна граница е приета за $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ и се основава на обичайните системни изисквания за максимално допустими температури на прехода в такива системи за силови модули.



Фиг. 9. Графика на ефективността на тягов инвертор с различни полупроводникови модули и при различни мощности

За да се осигури функционираща и оптимизирана система, размерът на радиатора за IGBT се увеличава от $0,8\text{ L}$ на $1,37\text{ L}$. В същото време радиаторът за силициево-карбидния транзистор е намален с 61% , което води до намалени загуби на мощност и увеличена плътност на мощността. Това позволява постигане на 77% по-малък радиатор за силициево-карбидното решение в сравнение с IGBT. Въпреки тези модификации, 50 A за IGBT все още надвишава температурната граница от $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, докато 30 A и 100 A за IGBT достигат една и съща температура на прехода от около $129\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ефективността на силициево-карбидния инвертор се увеличава с $1,1\%$. Използването на намален и по-оптимизиран радиатор със силициев карбид в трифазна система с мощност 25 kW води до общо подобрене на ефективността с $2,4\%$ и намаление на загубите с 600 W , като същевременно се постигат стандартите за ефективност IE4 за интегриран двигател.

Определянето на големината на напрежението (в зависимост от резистора) за управление на гейтове се извършва при по-тежки условия на работа (напр. максимално натоварване, максимално напрежение). Целта е да се осигури необходимата защита, минимизирайки потенциалните щети. Динамична работа на гейта чрез настройки позволява работа с напрежението (силата) на гейта, като се набляга на по-типичните (по-леки) условия на работа на двигателя.

Системата непрекъснато оценява множество системни фактори (ток, напрежение, температура) и контролира сигнала (напрежението) към гейта на крайните силови компоненти. Тя работи при първоначална настройка, определена от производителя на оригинално оборудване (ОЕМ) като оптимална за типични условия. Автоматично се променят тези настройки, когато възникнат нетипични условия, и след това динамично се връща към нормалните настройки, когато условията се върнат към обичайните. Драйверът за гейт предоставя на системния интегратор по-голям контрол върху най-добрия начин за защита на хранящото устройство на двигателя. Повишаването на ефективността на работа в режими, по-подходящи при типични условия, може да бъде значително.

Международна научна конференция „Съвременни управленски практики XII“ РАЗВИТИЕТО И ОБУЧЕНИЕТО НА МЕНИДЖЪРИ И ПРЕДПРИЕМАЧИ В ИНДУСТРИЯ 5.0

Безопасност и надеждност

Тяговите инвертори са от съществено значение за безопасността на приложенията в електрическите превозни средства (EV) и обикновено отговарят на изискванията ASIL-D (Automotive Safety Integrity Level D) съгласно стандарта ISO 26262 за функционална безопасност на пътни превозни средства. Интегралните схеми на драйверите за гейтове трябва да осигуряват функционална безопасност на тяговия инвертор, отговарящ на изискванията по АЕС - Q100 степен 1, което гарантира тяхната надеждност при автомобилни условия.

Заклучение:

1. Замяната на традиционните силициевы IGBT транзистори със SiC (силициев карбид) може да доведе до подобрене на общата ефективност до 2,6% при работа с 25 kW индустриална система за задвижване на двигател с ниско напрежение.

2. Голямо подобрене на ефективността при по-високи мощности е възможно в целия диапазон на натоварване, което води до значителни икономии на енергия.

3. SiC предлага подобрена плътност на мощността за определен размер, благодарение на по-малките пасивни компоненти и радиатори, което позволява оптимизация на общите разходи и размери на цялата системата.

4. Високите температури на прехода и подобреното разсейване на топлината на SiC устройствата, заедно с по-ниските загуби, позволяват на проектантите да изградят по-компактни системи, което улеснява интеграцията на задвижвания и двигатели.

5. SiC представлява значителна стойност на системно ниво в индустриалните нисковолтови двигателни задвижвания. Въпреки че първоначалната цена на устройство от силициев карбид може да надвиши тази на традиционните силициевы IGBT транзистори, по-високата честота на превключване и по-ниските загуби означават по-малко инвестиции в пасивни компоненти и радиатори.

6. Оптимизираната система може да доведе до икономии до 600 W. Замяната на IGBT транзистори със SiC модули може да е по-скъпа, но когато се вземе предвид общата системна цена, по-високата цена на SiC се компенсира от намаляване на пасивните компоненти, като същевременно се постига ново ниво на ефективност за индустриалните двигателни задвижващи системи.

Литература:

1. <https://www.ti.com/lit/an/slua963b/slua963b.pdf?ts=1746960951118>
2. <https://www.electronicdesign.com/markets/automotive/article/21264341/nxp-semiconductors-the-anatomy-of-ev-traction-inverters>
3. <https://eepower.com/technical-articles/gate-drivers-with-dynamic-gate-strength-improve-ev-performance/>
4. <https://www.wolfspeed.com/knowledge-center/article/whats-under-the-hood-ev-architectures-inverters/>
5. <https://www.wolfspeed.com/knowledge-center/article/how-wolfspeed-power-modules-are-revolutionizing-3-phase-industrial-low-voltage-motor-drives/>
6. Радостин Долчинков, Камен Сейменлийски, Иван Попов, Безопасност на електрически автомобил. Сборник с доклади от Международна научна конференция „Черно море – Врата и много мостове“, 2022, Бургас, изд. БСУ, ISBN: 978-619-253-017-4, с. 533 - 540