СЪЩНОСТ НА ТЯГОВИЯ ИНВЕРТОР И НЕГОВОТО ЗНАЧЕНИЕ ЗА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ ПРЕВОЗНИ СРЕДСТВА - ЧАСТ 1

Доц. д-р Даниела Марева
Бургаски свободен университет

ESSENCE OF THE TRACTION INVERTER AND ITS IMPORTANCE FOR ELECTRIC VEHICLES - PART 1

Assoc. prof. Daniela Mareva, PhD
Burgas Free University

Abstract: *Engineers and designers of electric and hybrid vehicles are faced with the important question of how to adequately configure the necessary powertrain components to achieve the required performance and operational goals. The main technical parameters of an electric vehicle (EV) are its battery and electric traction motor. But the link between them is a third equally important element - the power inverter. This inverter converts the high-voltage direct current from the battery into alternating current, usually three-phase, for the needs of the electric motor. This so-called traction inverter affects several parameters: the speed and torque of the traction motor. The efficiency of the inverter is also essential, influencing the power, the thermal dissipation of the inverter and the maximum range of the electric vehicle.*

Keywords: *traction inverter, electric vehicles, designing*

Архитектурата на превозното средство описва ключовите му елементи, особено как са разположени и свързани помежду си. Съвременните електрически превозни средства имат механични архитектури, проектирани за електрически задвижвания, които изискват по-голям обем. За различните видове електрически превозни средства са необходими напълно различни архитектури:

- електрически превозни средства с батерии (BEV);
- хибридни електрически превозни средства (HEV);
- електрически превозни средства с горивни клетки (FCEV).

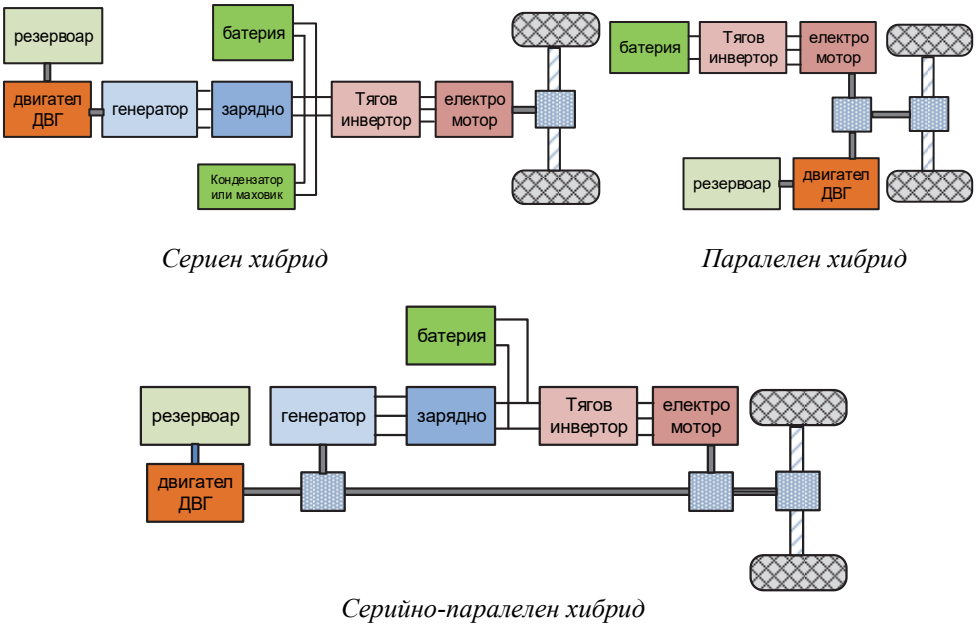
Архитектурата не само влияе върху производителността и функционалността на превозното средство, но и оказва голямо влияние върху начина, по който се произвежда, като архитектурите са оптимизирани за масово производство. Електронните и софтуерните системи стават все по-важни при определянето на архитектурата на превозното средство, като концепцията за софтуерно дефинирано превозно средство е все по-разпространена.

BEV имат ефективност около 90%, което означава около 1/6 от необходимото охлаждане. Подобрени са топлинните характеристики спрямо ДВГ. Освен това, компонентите на силовото предаване на BEV изискват много малко поддръжка. По-

голямата част от обема в силовото предаване на BEV се заема от батерийния пакет, който може да бъде пригоден в почти всякаква форма.

Други ключови компоненти на силовото предаване като инверторът (конверторът) и двигателят са много по-малки. Двигателят често може да бъде монтиран на оста или дори в колелата.

Съвременните електрически превозни средства използват високоскоростни двигатели, комбинирани с редукторна скоростна кутия, осигурявайки необходимия въртящ момент в много по-лек корпус. Двигателите в колелата трябва да бъдат или много по-тежки двигатели с директно задвижване, или да имат отделни редуктори, вградени във всяко колело. Тези скоростни кутии също биха били подложени на вибрации от пътя.

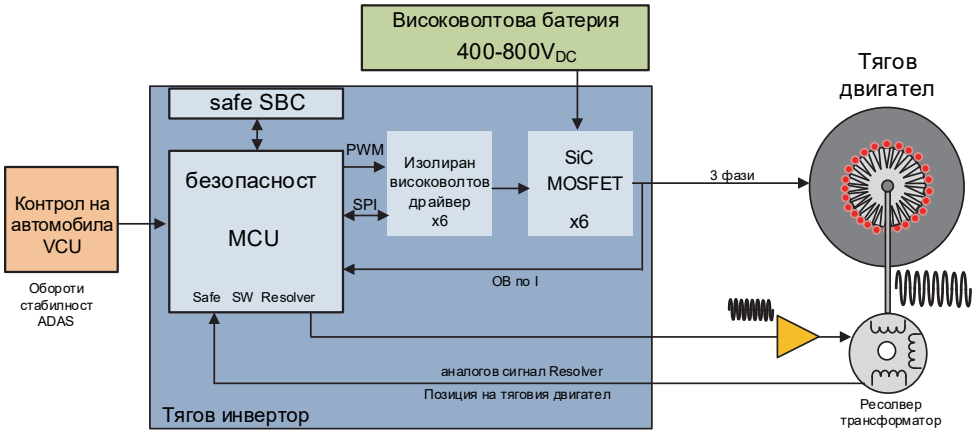


Фиг. 1. Различните видове архитектури, използвани за хибридни електрически превозни средства

Тяговият инвертор е критичен компонент в силовия агрегат на електрическия автомобил и е отговорен за управлението на електрическия двигател, като подобрява пробега, възприемчивостта, плавността на движение, сцеплението и управлението. Тяговите инвертори интегрират много технологии за интерпретиране на команди за въртящ момент от блок за управление на превозното средство (VCU) и безопасно управление на електрическия мотор, когато е необходимо.

Подобренията в производителността, надеждността и безопасността на електрическите превозни средства стимулира напредъка на автомобилната индустрия. Преди основното внимание е било насочено към технологията на батериите и двигателите, но отскоро са въведени драйвери (интегрални модули), управляващи гейтовете на силовите транзистори, прилагани в тяговите инвертори. Те могат да превключват една избрана от множество предварително зададени стойности на тока в зависимост от работните условия на електрическия автомобил, тоест драйверите определят динамич-

ната сила към гейта на силовите транзистори. Такава иновация също така предоставя решение за функционална безопасност, като същевременно подобрява типичните критерии за хардуерен дизайн за защита на захранващите по мощност устройства.



Фиг. 2. Блокова схема на основните блокове на електрически автомобил

Структура на тяговия инвертор

Движението на превозното средство зависи от множество входни данни за въртящия момент, като например състоянието на педалите на газта и спирачката, електронния контрол на стабилността и функциите на ADAS като автоматично аварийно спиране и адаптивен круиз контрол.

Въз основа на тези входни данни VCU (контрол на автомобила) изчислява и изпраща избраните стойности за въртящия момент към инвертора чрез CAN или Ethernet интерфейс към обезопасен микроконтролер (MCU). В електрически превозни средства с множество електрически двигатели VCU може да осигури векторизиране на въртящия момент, за да регулира интелигентно и точно въртящия момент на всеки двигател за подобрено управление и сцепление.

Безопасният и високопроизводителен микроконтролер (MCU) е основата на управлението на електрическия двигател, изпълнявайки математически интензивно ориентирано към полето управление (FOC) за ефективен контрол на въртящия момент въз основа на позицията на ротора и състоянието на трите (или шестте) фази на променливия ток.

Безопасен софтуерен ресолвер точно определя позицията и скоростта на ротора, интелигентно декодирайки синусоидалните и косинусоидалните сигнали, генерирани от ресолверния трансформатор, който се върти заедно с ротора.

Трите фази на променливия ток се отчитат и подават към аналогово-цифрови преобразуватели (ADC) на MCU. С тази информация MCU изчислява управляващи сигнали с импулсно-ширинна модулация (PWM), съответстващи на изискванията за въртящ момент и ги изпраща към изолирани драйвери за високоволтови гейтове, които управляват силовите ключови транзистори, за да преобразуват постояннотоковото захранване на батерията в променливо захранване към двигателя.

Шест изолирани драйвери за високоволтови гейтове, един за страната с високо напрежение и един за страната с ниско напрежение за всяка от трите фази на промен-

лив ток, осигуряват безопасно управление, наблюдение и защита на транзисторите, работещи в ключов режим, за да се увеличи максимално ефективността и надеждността.

За безопасност драйверите осигуряват галванична изолация от страната на нисковолтовото управление и страната на високоволтовото превключване и разреждат кондензатора на постояннотоковия канал, когато превозното средство е изключено или има предпоставка за катастрофира, за да се предотврати токов удар. Интелигентните драйвери за гейтове предлагат функции, които подобряват енергийната ефективност и включват схеми за наблюдение и защита за бързо откриване на повреди и повишена безопасност.

Полупроводниковите ключове, които обикновено се използват днес, са биполярни транзистори с изолиран гейт (IGBT). Въпреки това, широколентовите (WBG) силови превключватели, като например нововъзникващите силициев карбид (SiC) и галиев нитрид (GaN), могат да осигурят значителни предимства с по-високи честоти на превключване, което води до по-висока ефективност и плътност на мощността, както и по-малки поддържащи компоненти за намаляване на размера на електрическия двигател. Тъй като честотите на превключване се увеличават от десетки килохерци с IGBT до повече от 200 kHz с WBG силови превключватели, това ще изисква по-високопроизводителни микроконтролери.

Първият основен компонент на тяговия инвертор е микроконтролерът (MCU) за управление в реално време. Намаляването едновременно на размера и теглото на инвертора за електрически превозни средства е необходимо, за да се увеличи пробегът и да се намалят разходите. Това поставя нови изисквания към микроконтролера, използван за управление на инвертора, специализиран за такова приложение. Един от начините за постигане на тези изисквания е увеличаването на оборотите на двигателя над 25 kRPM. Това се постига чрез оптимизиране на статичността и инертността на управлението на цялостната схема, включително процеса на четене от аналогово-цифровия преобразувател (ADC) и последващите изчисления, реализирани с полево-ориентирано управление (FOC). Резултатите от тези изчисления се записват в памет и след това се използват при импулсно-широчинната модулация (PWM) за управление на гейтовите драйвери.

Такива ускорители в микроконтролера са: преобразувателят за решения и анализ в цифров вид – сигнал (RDC) и тригонометричният математически блок (TMU).

RDC блокът преобразува синусоидалния или косинусоидалния сигнал от обратна връзка, идващ от сензора за скорост и позиция и ги анализира. Това изчисление се извършва в специализиран за тази цел хардуер. По този начин се ускорява процесът на преобразуване и се разтоварват основните ядра на процесора или контролера от тази функция. Друга диагностична функция, която допълнително е вградена в MCU е проверката на условието $\sin^2 + \cos^2 = 1$.

Комбинирането на диагностични функции от този вид, с два резервирани анализатора RDC, създава оптимизирано решение за тягови инвертори. Те трябва да отговарят и на определено ниво на цялостност на автомобилната безопасност Automotive Safety Integrity Level - D (ASIL).

Копроцесорът TMU работи паралелно с всяко ядро и разтоварва тригонометричните математически функции от основните ядра. Също така осигурява и подобрения – до 8 пъти по-висока скорост при изчисление на тези функции. В повечето управляващи контури на тяговите инвертори се използват FOC алгоритми, реализиращи транс-

формации на Кларк и Парк, които изискват тригонометрични математически функции. Такава увеличена скорост осигурява значителни предимства за управляващите контури на тяговите инвертори.

Ускорителите RDC и TMU, включително и подсистемата за управление, водят до инертност на управлението в реално време, по-малка от 3 µs. Това позволява управление на високоскоростни тягови инверторни двигатели много над 25 kRPM. По този начин се дава възможност за намаляване на размера и теглото на цялата система.

Вторият основен компонент на тяговия инвертор е гейтовият драйвер, който играе ключова роля в ефективността, безопасността и компактността на системата.

Мощността на тяговите инвертори вече достига до 500 kW. Намаляването на загубите на енергия през време на целия цикъл на задвижване е най-важното съображение при проектирането на драйвера за гейта на силовия MOS транзистор. Това означава подобряване на неговата ефективност – КПД. Другите специфични изисквания при проектирането са: повишаване плътността на мощността, намаляване на габаритите и теглото, както и неговата функционална безопасност, и не на последно място цената му.

За да се повиши ефективността на гейтовите драйвери, производителите използват най-вече силициево-карбидни (SiC) полеви транзистори (FET). Галванично изолираните драйвери на гейта, захранващи тези ключове, са по-усъвършенствани и включват:

- изолирано аналогово-цифрово (ADC) чувствително отчитане;
- режими на защита от свръхток (големи стойности на тока);
- наблюдение за отклонение на захранващото напрежение;
- наблюдение на гейта;
- програмируеми безопасни състояния;
- вграден self-test;
- нова функция, променлива сила на гейта в реално време.

В зависимост от изискванията за безопасност на системата, наличието на интегрална схема (ИС) за драйвер на гейт е необходимо да е съвместима с функционалната безопасност в съответствие на системата със стандарт 26262. Драйверът, управляващ гейта, може да открие сам повреди по ASIL-D повече от 99% за единични повреди и повече от 90% за статични повреди.

Промяната на големината на управляващия сигнал позволява на алгоритъма за управление на инвертора да оптимизира скоростта на превключване на захранващото устройство на инвертора за текущото състояние на двигателя. Примери за това са ситуации, в които температурата на околната среда е много ниска (което може да повлияе на скоростта на превключване на захранващото устройство) или по време на регенеративно спиране (което може да увеличи напрежението на шината и да причини натоварване на устройството от превишаване) при превозни средства, които предлагат тази функция.

Решения за тягови инвертори

Усъвършенстваните програмируеми функции за защита се управляват автономно като повреди, а състоянието на захранващото устройство и драйвера за гейтове се отчита чрез пиновете за прекъсване и SPI.

Системното решение предлага богат набор от софтуерни пакети за управление на двигатели, които съпътстват оптимизирания хардуер. Системата за тягови инвертори за електрически превозни средства осигурява прецизен контрол, мониторинг и

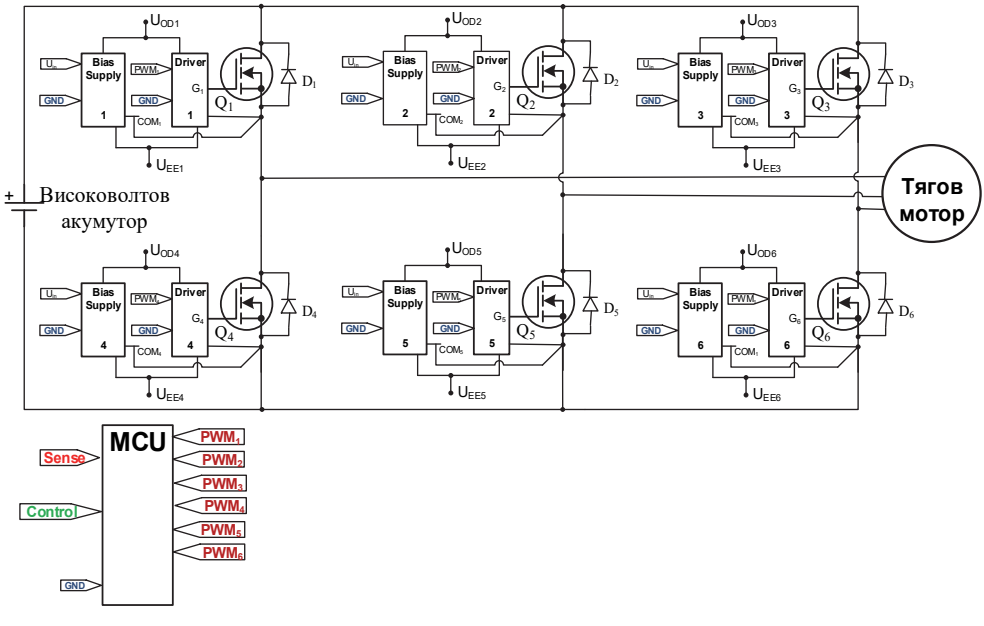
защита на високомощни ключове за енергийна ефективност и надеждност. Системата осигурява точен и ефикасен контрол на скоростта и въртящия момент на двигателя, което позволява съответствие на ASIL D с изискванията на ISO 26262.

Функцията за динамично управление на гейта осигурява оптимална производителност на превключване за усъвършенствани устройства с превключватели на захранването (напр. SiC, GaN) във все по-широки работни диапазони. Динамичният режим на гейта му осигурява енергийната якост и това повишава ефективността на инвертора, предоставя надеждно решение за функционална безопасност и подобрява типичните критерии за хардуерен дизайн, за да защити захранващото устройство.

Драйверите за гейтовете в тяговите инвертори управляват захранващите устройства на инвертора, традиционно силициеви IGBT, но все по-често силициево-карбидни (SiC) MOSFET. Захранващите устройства са ключове, които преобразуват постоянния ток от батерията в променлив ток за двигателя.

Драйверът на гейтовете директно управлява захранващото устройство – IGBT или силициево-карбиден (SiC) MOSFET, който превключва постояннотоковото захранване от батерията към променливотоково захранване за двигателя. Драйверите за гейтовете обикновено задават скоростта на превключване на една специфична стойност. Въпреки това, драйвер за гейтовете с динамична сила на гейта може да променя скоростта на превключване в отговор на условията на двигателя.

Фигура 3 показва някои от най-важните компоненти на тяговия инвертор: микроконтролер (MCU), галванично изолиран драйвер за гейта на транзистора, изолиран модул захранващ с напрежение драйвера.



Фиг. 3. Блокова схема на тяговия инвертор
за електрически превозни средства

Тяговият инвертор на електрическо превозно средство обикновено включва шест дискретни интегрални схеми за драйвери на гейтове и шест захранващи устройства, по две за всяка фаза в трифазен променливотоков двигател. Командите за сила на гейтовете се управляват от микроконтролера на тяговия инвертор. Включени са резистори, за да ограничат пиковия ток за зареждане или разреждане на гейтовете. Традиционно специфичната стойност е фиксирана, за да се предпази от пренапрежение, оставяйки потенциални икономии на енергия на масата при номинални условия.

Тяговият инвертор на едно електрическо превозно средство трябва да осигурява високи нива на мощност, вариращи от 80 kW до над 200 kW. Също така да издържа на високи температури и да бъде лек.

За да се увеличи максимално надеждността и ефективността на тяговите инвертори трябва да се преодолеят конструктивните предизвикателства на всеки един от тези три компонента.

Изводи:

1. Тяговите инвертори от следващо поколение могат да работят:
   - с до 5% по-висока ефективност;
   - постигат по-високи скорости;
   - по-висока плътност на мощността;
   - по-малка височина;
   - по-ниско тегло;
   - по-ниски системни разходи.
2. Много подобрения могат да бъдат направени с иновации в микроконтролерите (MCU), драйверите на гейтовете и превключвателите за захранване, които могат директно да повлияят на живота на батерията и шофирането. Поддръжката на нови технологии е ключова за по-бързото мащабиране на електрическите превозни средства, като се използва софтуерно дефинираната инфраструктура на превозните средства, която се разработва от автомобилната индустрия.
3. По-високопроизводителната обработка ще може да поддържа нови иновации в управлението на двигателите, като например безсензорно управление с обратна електродвижеща сила (EMC) за по-нататъшно намаляване на разходите.
4. Проектите на тягови инвертори също могат да бъдат разширени, за да поддържат нови зонални архитектури на електрически превозни средства и софтуерно дефинирани превозни средства, управлявани от данни, които водят до „софтуерно дефиниран двигател“.
5. Тяговите инвертори продължават да се развиват в тези области, тъй като пазарът на електрически превозни средства се ускорява с новите производители, които пускат нови модели, за да вземат пазарен дял от утвърдените лидери.

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. Радостин Долчинков, Камен Сейменлийски, Иван Попов, Безопастност 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

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