

ИЗБОР НА ТРАНЗИСТОРИ В ЗАВИСИМОСТ ОТ ПРИЛОЖЕНИЕТО ИМ В СИЛОВИТЕ СХЕМИ

Даниела Марева
Бургаски свободен университет

THE CHOICE OF TRANSISTORS AS POWER SWITCHES IN THE SCHEMES DEPENDING ON THEIR APPLICATION

Daniela Mareva
Burgas Free University

Abstract: През последните години секторът от компоненти за силовата електроника е във възход. Елементите, изграждащи устройствата за управление при големи мощности са силовите ключове. Техните основни параметри са граничните напрежения и ток, както и бързодействието и ефективността на прехвърлянето на енергия. Като мощни ключови елементи са използвани предимно MOSFET и IGBT транзисторите. В тези области, където е необходимо съчетаването на високи работни напрежения и токове се прави внимателен и обоснован избор. Транзисторите могат да се използват като отделни полупроводникови прибори, безкорпусни кристали в хибридните силови модули и интелигентни модули с различно предназначение.

Keywords: transistors MOSFETs, IGBTs, power switches, application.

С разпространението на новите поколения силови транзистори MOSFETs и IGBTs, изборът за конкретно приложение става все по-труден.

Биполярният транзистор изисква висок базов ток за да се включи и има относително бавни характеристики при изключване (известни като текущата опашка). Това се дължи на отрицателния температурен коефициент, реализиращ загуби от топлина, на ниското достижимо напрежение, осъществяващо загуба на проводимост, определяща се от напрежението на насищане колектор-емитер $V_{CE(SAT)}$.

MOSFET транзисторът е полупроводников прибор, управляващ се от напрежение, а не от ток. Притежава положителен температурен коефициент и способност да задържа по-добре топлината. Вътрешното съпротивление няма теоретична граница, следователно загубите могат да бъдат достатъчно по-ниски. MOSFET има вътрешно вграден дрейнов диод, който е особено полезен при намаляне на големи токове.

Всички тези предимства, а също така и сравнителното премахване на текущата опашка на закъснение в характеристиката, водят до заключението, че MOSFET транзисторът е по-подходящ от биполярния при избор за силови ключове в схеми за захиранване и преобразуване.

IGBT е комбинация между биполярни и MOSFET транзистори.

В IGBT има изходни и преходни характеристики за превключване на биполярен транзистор, но се управлява по напрежение като MOSFET. Като цяло, това означава,

че има предимствата на силнотоковите способности на биполярния транзистор и лесното управление на MOSFET. Въпреки това, IGBT все още има недостатъци, като сравнително голяма токова опашка и липса на вграден дрейнов диод. Друг потенциален проблем с някои видове IGBT е отрицателния температурен коефициент, което може да доведе до топлинно изтичане и прави паралелното включване на полупроводниковите прибори трудно и неефективно. Този проблем е решен в най-новите поколения на IGBTs, които се основават на „non-punch through“ (NPT) технология. Тази технология има същата основна структура на IGBT, но се базира на обемна дифузия на силиция, вместо епитаксиалния материал, който в миналото е използван както за IGBTs, така и MOSFETs.

Съвременните транзистори MOSFETs и IGBTs са много сходни. IGBT работи с напрежения над 1000V, докато MOSFET с напрежения под 250V. Изборът между IGBTs и MOSFET транзисторите става в зависимост от конкретно приложение, цена, размер, скорост на нарастване и превключване и термични изисквания.

IGBTs са предпочитан прибор при следните условия:

- нисък коефициент на запълване;
- ниска честота ($<20\text{kHz}$);
- малки флуктоации на натоварването и в шините;
- високоволтови приложения ($>1000\text{V}$).

Типични IGBT приложения:

- управление на електрически двигатели: при честота $<20\text{kHz}$, съществува момент на късо съединение/ограничение на пусковия ток и защита;
- непрекъсваеми и гарантирани захранвания (UPS): работят при константен товар и са нискочестотни;
- заваряване при висок среден ток с нискочестотна комутация ($<50\text{kHz}$) и прилагане на ZVS вериги;
- осветление с ниска мощност при нискочестотна комутация ($<100\text{kHz}$).

MOSFETs са предпочитани в:

- високочестотните приложения ($>200\text{kHz}$);
- големи вариации на товара и шините;
- дълъг коефициент на запълване;
- нисковолтови приложения ($<250\text{V}$);
- изходна мощност $< 500\text{W}$.

Типични MOSFET приложения:

- ключови мощни захранвания (SMPS): Твърдо превключване над 200kHz;
- ключови мощни захранвания (SMPS): ZVS под 1000W;
- заряд на батерии.

Целта на тази статия е да се покажат приложенията на транзисторите, работещи над 250V, с честота на превключване между 10 kHz и 200kHz и мощности над 500W. Крайният избор на силов полупроводников прибор се основава на различни фактори: топлинно съпротивление, токова топология, разпределение на проводимостта.

Схеми, използващи нулево напрежение на превключване (ZVS), корекция на фактора на мощността (PFC) попадат и при двата типа прибори IGBT / MOSFET.

Приложенията с твърда комутация ясно показват по-ниски загуби при MOSFET. Загубите в IGBT са приблизително равни на загубите в някои MOSFET от предни поколения, ако скоростта на превключване се намали до 50 kHz. Това позволява в някои приложения по-малки IGBT да заменят по-големите MOSFET.

Въпреки това, по-новите MOSFET транзистори вече притежават по-ниски загуби при високи честоти и доминират в приложения, използващи твърда комутация над 50kHz

Когато температурата се повишава до експлоатационни условия, загубите на проводимост при MOSFET по-бързо нарастват, отколкото загубите на превключване при IGBT. Загубите при повишена температура се увеличават до 60% за MOSFET, докато увеличението на общите загуби при IGBT е само 20%. При мощности до 300W използваните MOSFET транзистори са еквивалентни на приложения с IGBT с мощност 500W, като предимството е на IGBT.

Загубите при превключване са по-високи при по-висока честота. Това елиминира предимството на IGBT при висока температура и превключване на по-ниска честота.

В съревнованието между MOSFETs и IGBTs, осигуряването на предимство става в зависимост от условията на работа и относителната ефективност на всяко от устройствата. Данните, които избират дадено приложение са: най-висока честота на превключване, ширина на импулса или нисък ток, които дават превес на MOSFET пред IGBT. Например мощни захранвания, работещи при стайна температура с номинален товар и номинално линейно напрежение прави MOSFET по-приложим, в сравнение с IGBT. И обратното, ако захранването работи при максимална температура, максимално натоварване и минимално линейно напрежение, IGBT ще е по-предпочитан. В действителност почти никога не се работи при „номинални условия“. Вариациите на температурата на околната среда, мрежово напрежение и товара са по-реалистични и трябва да се съобразяват.

Най-новите IGBTs са конкурентни с предимствата си при нулево превключване на напрежението, PFCs при 1000 W и повече и са работещи при честоти 100kHz и нагоре. Въпреки това, във всички други приложения на електрозахранване MOSFET е за предпочитане.

MOSFET транзисторите реализират най-много нововъведения за подобряване на силиция, преодоляване на ограниченията на съществуващите технологии и са насочени към множество приложения: DC/DC преобразуватели, offline AC/DC, контрол на задвижвания, непрекъсваемо захранване (UPS), инвертори за PV вятърни системи, заваряване, рязане на стомана, мощни импулсни захранвания (SMPS), електрически превозни средства (EV), зарядни устройства и др. Търсенето на електроенергия се увеличава и в същото време, разходите за производство на енергия също вървят нагоре. Така производителите се принуждава да използват MOSFETs с уникални вариации на топологията.

Това води до нарастващо търсене на MOSFET транзисторите. Ако MOSFETs в различни топологии са оптимизирани, значително се подобрява ефективността.

Приложенията с висока честота на превключване изискват намаляване на паразитните капацитети в MOSFET структурата, за сметка на съпротивлението $R_{DS(on)}$. Приложенията за ниски честоти изискват намаляване на $R_{DS(on)}$, като най-висок приоритет. MOSFET с вграден антипаралелен диод не са приложими при еднотактни приложения, но са много важни при двутактните схеми. Те изискват ниски стойности на параметрите t_{RR} , Q_{RR} , и по-мекото възстановяване с такъв диод. При двутактните схеми

в режим на мека комутация тези изисквания са изключително важни за надеждността. При приложения в режим на твърда комутация, работното напрежение се увеличава, загубите при включване (turn-on) и изключване (turn-off) нарастват. За да се намалят загубите при изключване, вътрешните капацитети C_{RSS} и C_{OSS} са оптимизирани в обратна посока на стойността на съпротивлението $R_{DS(on)}$.

Транзисторите MOSFETs осигуряват схемотехника със ZVS (превключване при нулево напрежение) и ZCS (превключване при нулев ток), докато IGBTs може да осигури само ZCS. Като цяло, IGBTs се използват за силнотоккови схеми и ниска честота на превключване, докато MOSFET транзисторите се използват за слаботоккови схеми с висока честота на превключване. Напредъкът в технологиите за производство на MOSFET са намалили съпротивлението ($R_{DS(on)}$) и другите динамични паразитни капацитети, като същевременно се подобрили и вградения антипаралелен диод за възстановяване на MOSFET транзисторите.

DC/AC инверторите са широко използвани за управление на задвижване, UPS и при зелени енергийни системи. За високо напрежение и при високоенергийни системи се използват IGBTs; но за LV, MV, и HV (12V до 400V входно постоянно напрежение) обикновено се използват MOSFETs. В някои приложения с постоянно входно напрежение над 400V, HV MOSFET транзисторите се използват за маломощни приложения. MOSFETs, имащи вътрешен диод са с по-лоши характеристики на превключване, което допринася до нарастване на загубите при включване в комплиментарните MOSFET транзистори в рамото на инвертора. При единичните ключове или при еднотактните приложения, като PFC или правите и обратните преобразуватели, вграденият диод може да бъде игнориран. Токвият инвертор с ниска честота зависи от необходимия размер, теглото и цената на изходния филтър. Предимството на токвия инвертор с висока честота е по-малкият нискофреkwентен филтър и свързаните с него по-ниски разходи. MOSFET транзисторите са идеалният избор за тези инверторни приложения, защото те могат да работят при честа промяна на честотите. Това намалява радиочестотните смущения (RFI), тъй като токът с честота на превключване циркулира в инвертора и изходния филтър, като по този начин се елиминира протичане на тези токове навън.

Изисквания за MOSFET транзистори при инверторни приложения:

1. Специфичното съпротивление (R_{SP}) трябва да бъде ниско, за да се намали загубата на проводимост. Варирането на съпротивлението $R_{DS(on)}$ трябва да бъде ниско от едно устройство към друго устройство. Това цели:

а) постояннотоковата компонента на напрежението в изхода на инвертора е по-малка и тогава $R_{DS(on)}$ може да се използва за контрол на тока през транзистора с current sensing за наблюдение на необичайни условия (най-вече в нисковолтовите инвертори на напрежение);

б) Ниската стойност на съпротивлението R_{SP} води до намаляване на размера на същото $R_{DS(on)}$, а това до намаляване на разходите.

2. Непостоянното индуктивно превключване (UIS) е приемливо, когато размерът е относително намален. Модерните MOSFETs имат добро UIS за същия размер в сравнение с планарните MOSFET. Тънката структура редуцира термичното съпротивление ($R_{th(jc)}$). В този случай може да се реализира по-нисък показател на качеството (FOM).

3. Добра защитена работна площ (SOA) и по-ниска проводимост.

4. Нисък граничен капацитет гейт-дрейн C_{GD} , (Miller charge), но ниско съотношение C_{GD} / C_{GS} . При умерено висока стойност на C_{GD} се постига намаляване на ЕМИ. Много ниската стойност на C_{GD} увеличава dv/dt , а оттам и ЕМИ. Ниското съотношение C_{GD} / C_{GS} намалява шанса за пробив на прибора. Тези инвертори не работят при висока честота, така че може да се допусне известно увеличение на гейта E_{SR} . Работейки при средни честоти може да се разрешат по-високи стойности на C_{GD} и C_{GS} .

5. Ниската стойност на C_{OSS} редуцира загубите при превключване, въпреки че работната честота е сравнително ниска при това приложение. Някакво малко увеличение на стойността на C_{OSS} може да бъде приемливо.

6. Внезапни промени в стойността на C_{OSS} и C_{GD} през време на превключване може да предизвикат осцилации в гейта на транзистора и високоволтов пробив, което с течение на времето може да навреди на гейта. В такъв случай високото отношение на напрежението гейт-сорс dv/dt може да се превърне в проблем.

7. Високият праг на напрежението на гейта (threshold voltage $-V_{TH}$) служи за подобра шумоустойчивост и се използва при паралелното свързване на MOSFET транзисторите. Напрежението V_{TH} трябва да бъде по-голямо от 3V.

8. Вграденият антипаралелен диод за възстановяване води до по-мекко и по-бързо ниво на зареждане на (Q_{RR}), което трябва да е ниско, а времето за обратно-възстановяване (T_{RR}) е необходимо да е късо. В същото време факторът за мекота S (T_b/T_a) трябва да бъде по-голям от единица (1). Това намалява времето за възстановяване на диода и при голяма стръмност на импулса dv/dt и има вероятност за пробив в инвертора. Бързите вградени диоди могат да предизвикат пробив от пиковите с високо напрежение.

9. В някои случаи, високата стойност на пулсиращия дрейнов ток (I_{DM}) осигурява защита от висок ток на късо съединение (I_{SC}), висока стойност на зарядния ток през изходния филтър и висок пусков ток през електродвигателя.

10. Осигурява се контролирано включване turn-on и изключване turn-off, стръмност на импулса dv/dt , и di/dt на MOSFET за контрол на ЕМИ.

11. Намаляване на общата индуктивност на сорса чрез използване на повече връзки.

MOSFET с бърз антипаралелен диод намаляват T_{RR} и Q_{RR} и са отличен избор за високочестотни преобразуватели за различни приложения, включително и при соларни инвертори. В случай, когато такъв транзистор се използва в рамото на инвертор, този диод бързо провежда реактивния ток в права посока, което прави функцията му особено важна. Антипаралелният диод в MOSFET обикновено има дълго време за възстановяване и високо Q_{RR} . Ако той е проводим, когато товарният ток се комутира през него към MOSFET в рамото на инвертора, тогава токът нараства с голяма стойност за целия период на T_{RR} от подаване на захранването. Това увеличава разсейването на мощност в MOSFET транзисторите и води до намаляване на ефективността, която е много важна, особено в случаите при слънчевите инвертори. Обратният диод също може да предпази структурата от пробив при висока стръмност на импулса dv/dt и отново да се възстанови канала. Miller капацитета предизвиква изместване на тока и тогава може да се зарежда гейта до стойност по-висока от V_{TH} . Това става, когато комплиментарният MOSFET се опитва да се включи и да доведе до временно късо съединение в цялата напрежена шина, да увеличи разхода на мощност и причини дефектиране на MOSFET компонента. За да се избегне това, се поставя външен SiC диод или обикновен силициев диод, свързан антипаралелно към

MOSFET, тъй като вградения диод в MOSFET има ниско напрежение в права посока, а Шотки диода трябва да бъде свързан последователно на MOSFET. В допълнение този антипаралелен SiC диод трябва да бъде свързан през MOSFET, а Шотки диода да е комбинирано свързан. Този тип свързване е много популярен в соларните инвертори, с цел подобряване на ефективността.

Съществуват две версии MOSFET F-тип, FRFET с умерено добър вграден диод, и U-тип, FRFET с най-ниското Q_{RR} и T_{RR} . MOSFET тип U може да спести SiC и Шотки диоди в рамата на инвертора, като същевременно се постига същата ефективност. При сравняване на FRFET U-тип UniFET II и обикновен UniFET II- Q_{RR} е намален от 3100 nC до 260 nC и загубите при превключване намаляват драстично.

MOSFET PT7 имат около 30% по-ниски загуби при изключване в сравнение с най-добрите MOSFET на пазара и по-ниски T_{RR} и Q_{RR} . Ниското съотношение Q_{GD} / Q_{GS} подобрява надеждността на инвертора и е приложим при offline UPS инвертори.

Импулсните захранвания (SMPS) преживяват революционни промени при повишаване на плътността на мощността, ефективността и надеждността. Имат топологии и концепции в мощните схеми, които са комбинирани с подобрени полупроводникови прибори с ниска загуба на мощност. Фазово отместване (PS), широчинно-импулсна модулация (PWM), превключване при нулево напрежение (ZVS), мостови схеми (FB) и LLC резонансни инверторни топологии използват FRFET, като мощни силови ключове. Обикновено LLC резонансна схема се използва за по-ниски мощности, а PS-PWM-FB-ZVS за по-мощни приложения.

Тези топологии имат следните предимства:

- намаляване на загубата на превключване;
- намаляване на ЕМИ;
- намаляване на стреса на MOSFET в сравнение с квазирезонансни топологии;
- намален размер на радиатора и трансформатора, поради повишена честота на превключване, което увеличава плътността на мощността.

Литература:

1. Марева Д., Марев Е. „Силови полупроводникови елементи в схемите за индукционно нагряване на флуиди“, Годишник, том XXIV, ВФУ, 2011.
2. Марева Д., Марев Е. „Развитие на силовите полупроводникови елементи в схемите за индукционно нагряване на флуиди“, Годишник, том XXIV, ВФУ, 2011.
3. Don L. Loveless „An overview of solid state power supplies“.
4. Эраносян С., Ланцов В. Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания // Силовая электроника, 2006, № 2.
5. Ланцов В., Эраносян С. Успехи, трудности и проблемы на пути развития силовой электроники в России // Силовая электроника, 2007, № 4, 2008 № 1.
6. Машурян Э. Современная ситуация в силовой электронике // Электронные компоненты, 2005, № 6.
7. Шурыгина М. Дискретные силовые приборы. Расширение применения и специализация // Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2007, № 3.
8. Ланцов В., Эраносян С. Надежность силовых устройств: реалии, проблемы и пути решения. Часть 3 // Силовая электроника, 2009, № 1.