

ИЗБОР НА ТРАНЗИСТОРИ ЗА КЛЮЧОВ ЕЛЕМЕНТ В РЕГУЛАТОР НА ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛ (SI MOSFET, SIC MOSFET) ОТ ГЛЕДНА ТОЧКА НА ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ

Ярослав Стефанов, Иван Миленов
Nibelung.2007@abv.bg, Milenov55@abv.bg

Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”
гр. София, ул. „Гео Милев” 158
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: Transistors, MOSFET, Si, SiC

Резюме: В доклада се разглежда избора на транзистори за регулатор на мотор от гледна точка на параметрите които подобряват работата му. Сравнени са параметрите на SI MOSFET и SIC MOSFET и влиянието им върху качествата на инвертора. Разгледани са загубите на мощност от проводимост R_{con} и при превключване P_{sw} , както и зависимостта им съответно от съпротивлението във включено състояние $R_{ds(on)}$ и входният и изходният капацитети C_{iss} C_{oss} на транзисторите. Виждат се предимствата на използването на SIC MOSFET транзистори в инвертори за електромобили – намаляване размерите и теглото им, намаляване на консумацията и увеличаване на пробега. По-високите температурни граници на SIC транзистори им дават предимство при използването им в инвертори на електромобили. Високата честота на превключване намалява загубите от разсейвана топлинна мощност и увеличава енергийната ефективност на инверторите използващи SIC транзистори. По-малките загуби на мощност намаляват отделената топлинна мощност и позволяват намаляването на размерите на радиаторите на ключовите елементи и по този начин увеличаване на плътността на монтажа и намаляване обема и теглото на инверторите използващи транзистори на силициев карбид.

В исторически план силиций (Si) се използва като полупроводникова основа за повечето приложения на силовата електроника. Силовите прибори на основата на силициев карбид (SiC) обаче предлагат редица предимства пред силиция.

- Компонентите на базата на SiC имат по-ниски токове на утечка в сравнение с техните аналози на Si. Това е така, защото двойките електрон-дупка се генерират по-бавно в SiC, отколкото в Si, което води до по-ниски загуби на ток на утечка, когато ключът е изключен.

- SiC има широка забранена зона от 3 електроволта (eV) и е в състояние да издържи градиент на напрежението над осем пъти по-голям от Si, без да претърпява лавинен пробив. Повишената критична якост на пробив на SiC позволява на компонентите да издържат на по-високо напрежение в същия корпус като Si. Поради

това, базирани на SiC компоненти като MOSFETs могат да бъдат създадени при максимални напрежения около 10 пъти по-високи в сравнение със Si. По този начин могат да бъдат създадени прибори с много високо напрежение и висока мощност. Тези прибори могат да бъдат поставени много близо един до друг, което позволява по-голяма плътност на опаковане на компонентите.

- По-високата топлопроводимост води до по-ефективен топлообмен. Освен това, по-ниското съпротивление във включено състояние $R_{ds(on)}$ при работа намалява проводящите загуби.

- Базираните на SiC прибори са способни на по-високи честоти на превключване. По-високата честота на превключване на SiC позволява постигането на максимална ефективност на преобразуване.

Както може да се види, хибридният подход, използващ SiC MOSFET, изисква по-малко компоненти, по-рентабилен и постига по-висока плътност на мощността. Това води до намаляване на размера, теглото и разходите на системата. Освен това, в допълнение към намаляването на общата консумация на енергия, постигнатата по-висока ефективност подобрява топлинните характеристики, което води до допълнително намаляване на размера и теглото на захранването.

При избор на транзистори като превключващи елементи в инвертор за мотор на електромобил се взимат под внимание като начало максимално допустимите електрически параметри като пробивно напрежение и максимален ток. Трифазните мотори за електромобили работят на напрежения от 70V до 400V, което означава че пробивното напрежение на транзисторите трябва да бъде по-високо от 600-650V. Максималният ток на транзисторите зависи от мощността на мотора и е от порядъка на 50-400A. Максималната разсейвана мощност също се избира в зависимост от мощността на мотора. Параметрите, които са важни за енергийната ефективност на инвертора са съпротивлението във включено състояние $R_{ds(on)}$ което определя загубата на мощност от проводимост [2]:

$$P_{con} = I_{rms}^2 \times R_{ds(on)} \quad (1)$$

Където P_{con} е загубата на мощност от проводимост, I_{rms} е ефективната стойност на тока, $R_{ds(on)}$ е съпротивлението във включено състояние.

Очевидно съпротивлението във включено състояние е определящо за загубата на мощност от проводимост.

Загубата на мощност при превключване P_{sw} зависи от много комплексни неща, като се разделя на загуби при включване и загуби при изключване, които зависят от времето на включване $t_{d(on)}$ и времето на изключване $t_{d(off)}$, които от своя страна зависят от входният и изходният капацитет на транзистора C_{iss} и C_{oss} [2]

$$P_{sw} = f(f_{sw}, V_{ds}, I_d, R_{ds(on)}, V_{gs(th)}, C_{iss}, C_{oss}) \quad (2)$$

Където f_{sw} е честотата на превключване, V_{ds} напрежението дрейн-сорс, I_d ток на дрейна, $V_{gs(th)}$ прагово напрежение.

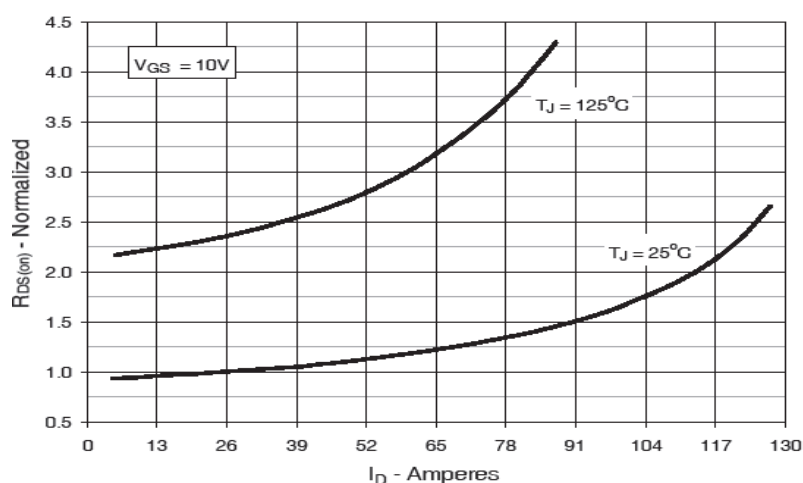
Загубата на мощност при превключване зависи право пропорционално от гореизброените параметри с изключение на $V_{gs(th)}$, което означава, че колкото са по-големи входния и изходния капацитет на транзистора, толкова повече се увеличават загубите от превключване. В таблица 1 са сравнени параметрите на Si MOSFET и на SiC MOSFET [3]

Таблица 1

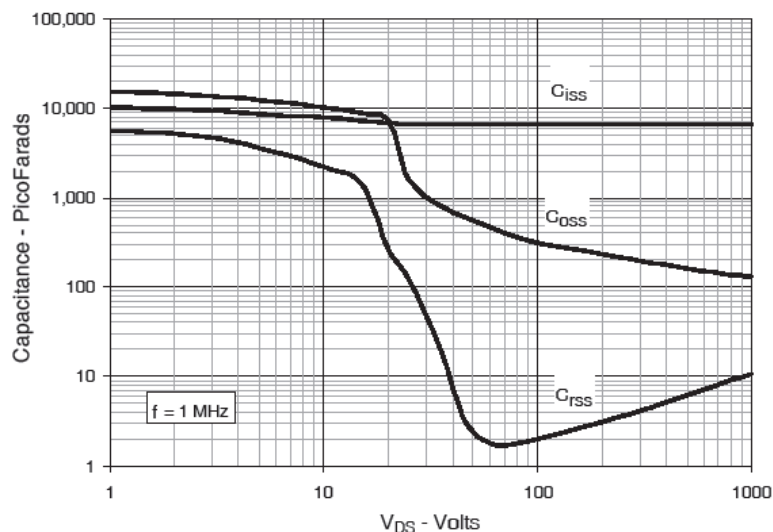
Параметър	SI MOSFET [4]	SIC MOSFET [5]
V_{dsmax}	1000V	1200V
I_{dmax}	52A	90A

$R_{ds(on)}$	125m Ω	25m Ω
C_{iss}	6725pF	2788pF
C_{oss}	1620pF	220pF
t_{don}	34ns	14ns
t_r	13ns	32ns
t_{doff}	107ns	29ns

На фиг. 1 е показана графиката на зависимостта на нормализираното съпротивление във включено състояние на Si MOSFET 1000V/52A от тока на дрейна а на фиг. 2 зависимостта на входният и изходният капацитет от напрежението на дрейна.

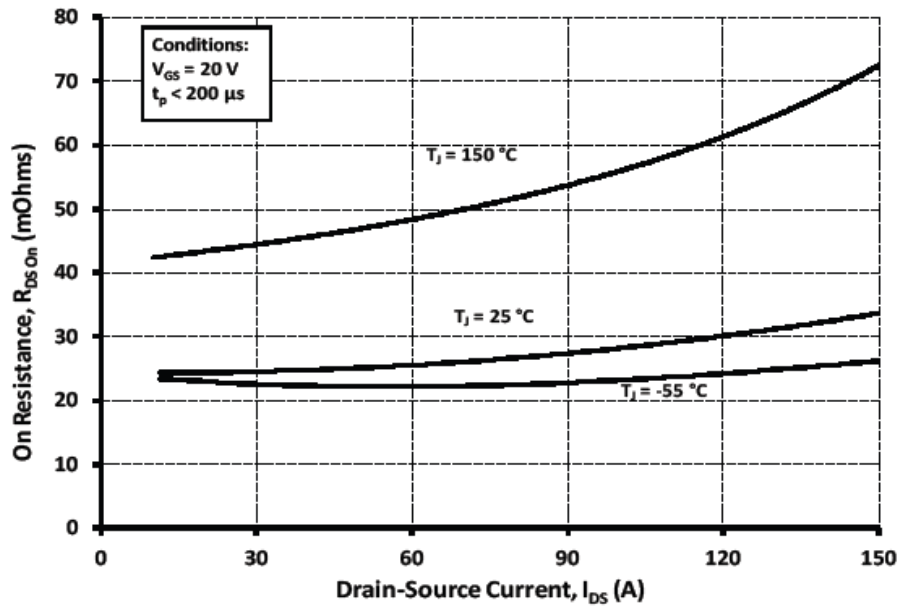


Фиг. 1 [4]Зависимост на нормализираното съпротивление във включено състояние на Si MOSFET от тока на дрейна.

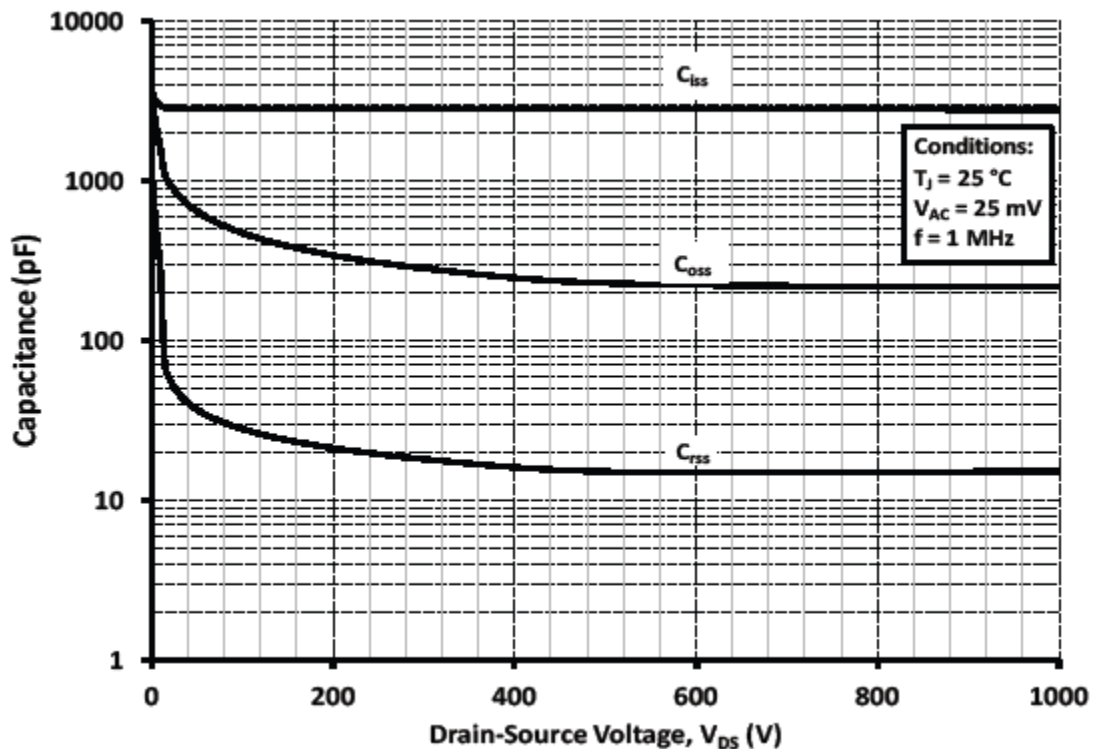


Фиг. 2 [4]Зависимост на входния и изходния капацитет на Si MOSFET от напрежението дрейн-сорс.

На фиг. 3 е показана зависимостта на съпротивлението във включено състояние на SiC MOSFET 1200V/90A от тока на дрейна, а на фиг. 4 зависимостта на входният и изходният капацитет от напрежението на дрейна.



Фиг.3[5]Зависимост на съпротивлението във включено състояние на SiC MOSFET от тока на дрейна.



Фиг.4[5]Зависимост на входния и изходния капацитет на SiC MOSFET от напрежението дрейн-сорс.

От таблицата и графиките се вижда по-ниското съпротивление във включено състояние на SiC MOSFET и по-малкият входен капацитет в сравнение с тези на Si MOSFET. От таблицата се вижда също и по-малките времена на превключване на SiC MOSFET. Ниското съпротивление и високото бързодействие намаляват загубите от проводимост и от превключване на транзистора, което води и до намаляване на разсейваната от транзистора топлина, което позволява по-малка необходима охлаждаща площ на радиатора и по-голяма компактност на инвертора на мотора.

Както може да се види, новият подход, използващ SiC MOSFET, изисква по-малко компоненти, по-рентабилен и постига по-висока плътност на мощността. Това води до намаляване на размера, теглото и разходите на системата. Освен това, в допълнение към намаляването на общата консумация на енергия, постигнатата по-висока ефективност подобрява топлинните характеристики, което води до допълнително намаляване на размера и теглото на захранването.

Обобщените предимства на приборите на силициев карбид са показани на фиг. 5 [1]



Фиг.5

Три характеристики - плътност на мощността, топлинна ефективност и ефективност на преобразуване - са сред най-големите предизвикателства при разработването на инверторни регулатори на мотори за електромобили. В допълнение, конструкторите трябва да се справят с тези предизвикателства, като същевременно минимизират общите системни разходи.

Литература

- [1] Skinner Dave Improving energy efficiency in industrial applications with silicon carbide, CREE 2019.
- [2] Xiaofeng Ding, Min Du, Tong Zhou, Hong Guo, Chengming Zhang, Feida Chen Comprehensive comparison between sic-mosfets and si-igbt based electric vehicle traction systems under low speed and light load, CUE2015 Applied energy symposium and summit 2015: Low carbon cities and urban energy systems.
- [3] Стефанов Ярослав, Миленов Иван. Сравнение и оценка на параметрите на MOSFET транзистори на силициев карбид и силиций, XXIV Международна научна конференция "Транспорт 2019", Боровец, хотел "Самоков", 3-5 октомври 2019 г.
- [4] IXIS Corporation 2008, IXFK52N100X Preliminary Technical Information
- [5] CREE Inc. 2014, C2M0025120D Silicon Carbide Power MOSFET

SELECTION OF TRANSISTORS FOR SWITCHING ELEMENT IN ELECTRIC MOTOR INVERTER (SI MOSFET, SIC MOSFET) FROM THE POINT OF VIEW OF ENERGY EFFICIENCY

Yaroslav Stefanov, Ivan Milenov

*Todor Kableshkov University of Transport
Sofia, 158 Geo Milev Str.
THE REPUBLIC OF BULGARIA*

Keywords: *Transistors, MOSFET, Si, SiC*

Summary: *The report considers the choice of transistors for a motor regulator in terms of parameters that improve its performance. The parameters of SI MOSFET and SIC MOSFET and their influence on the properties of the inverter are compared. The power losses from conductivity P_{con} and at switching P_{sw} , as well as their dependence on the resistance in the on state $R_{ds(on)}$ and the input and output capacitances C_{iss} C_{oss} on the transistors are considered. We can see the advantages of using SIC MOSFET transistors in inverters for electric vehicles - reducing their size and weight, reducing consumption and increasing mileage. The high temperature limits of SIC transistors give them an advantage when used in inverters of electric vehicles. The high switching frequency reduces the losses of heat dissipation and increases the energy efficiency of inverters using SIC transistors. The high switching frequency reduces heat dissipation losses and increases the energy efficiency of inverters using SIC transistors. The small power losses reduce the heat output and allow the reduction of the dimensions of the radiators of the key elements and thus increase the installation density and reduce the volume and weight of the inverters using silicon carbide transistors.*