

## ИНВЕРТОРИ СА СИЛИЦИЈУМ – КАРБИДНИМ ТРАНЗИСТОРИМА SILICON-CARBIDE TRANSISTOR INVERTERS

Никола Плавшић, Факултет техничких наука, Нови Сад

### Област – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО

**Кратак садржај** – Дати су општи појмови о новим типовима полупроводника заснованим на материјалима са широким опсегом, а посебно су обрађени силицијум-карбидни (SiC) транзистори. Дато је њихово поређење са силицијумским компонентама и представљена примена у енергетској електроници. Урађен је модел SiC инвертора и низ симулација у MATLAB – у. Дат је преглед стања на тржишту, као и будући правци развоја.

**Кључне речи:** Инвертори, компоненте са широким опсегом, SiC

**Abstract**– General concepts about new types of semiconductors based on wide-band gap materials are given, and silicon carbide (SiC) transistors are specifically addressed. A comparison with silicon components is given and applications in power electronics are presented. A model of SiC inverters and a series of simulations in MATLAB have been developed. The market situation as well as future directions of development are given.

**Keywords:** Invertors, semiconductors based on wide-band gap materials, SiC

### 1. УВОД

У протеклој деценији у енергетској електроници се све чешће користе нови материјали за израду полупроводника као што су силицијум-карбид (SiC), галијум-нитрат (GaN) и многи други који су познати под називом полупроводници са широким опсегом (*wide-band gap*). Најбитније карактеристике ових полупроводника су побољшања у диелектричној чврстоћи, напону пробоја, ширини опсега, температурној издржљивости и др. у поређењу са стандардним силицијумским материјалима [1].

У овом раду је дат детаљан опис полупроводних компонената састављених од нових материјала (SiC), а нарочито њихова примена у уређајима енергетске електронике, конкретно у SiC инверторима.

### 2. КОМПОНЕНТЕ СА ШИРОКИМ ОПСЕГОМ (WIDEBAND GAP)

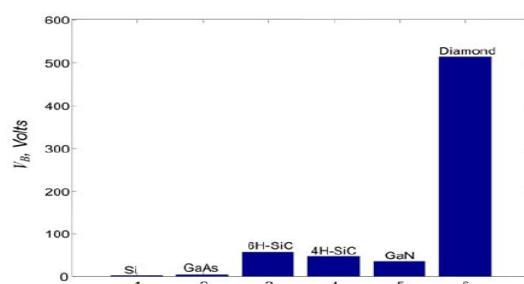
Полупроводнички материјали са широким опсегом могу се дефинисати као они чији енергетски процеп је већи од 2.2 eV. Полупроводничке компоненте са широким опсегом омогућавају побољшање ефикасности постојећих електричних кола са релативно једноставним контролним шемама [2].

#### НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био проф др Владимир Катић.

Према недавним истраживањима предвиђено је да се ови уређаји користе на средњем напону, а такође се процењује да би могли наћи примене и у енергетским претварачима на високом напону [2]. На слици 1 приказане су вредности пробојних напона за различите материјале, што указује на већу напонску издржљивост.

Око 45% произведене електричне енергије троши се на електричне моторе. Процењује се да би се коришћењем компонената, тј. прекидачких елемената са широким опсегом, уместо доступних силицијумских IGBT, ефикасност електромоторних погона могла повећати за 20% - 30% [2].

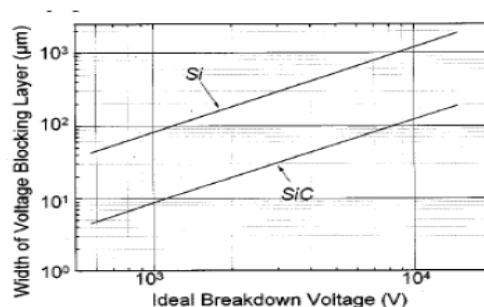


Сл. 1. Вредности пробојних напона за различите материјале. [2]

Издржљивост електричног поља полупроводника зависи од дебљине PN споја. Најмања дебљина PN споја се може одредити преко следеће једначине:

$$W \geq \frac{2V_b}{E_{max}} \quad (1)$$

где је  $V_b$  пробојни напон,  $E$  електрично поље, а  $W$  је дебљина p-n споја. Са слике 2 се примећује да SiC компоненте имају 10 пута већу вредност електричног поља  $E_{max}$  од Si компонената. Стога се закључује да SiC компоненте за исти напонски ниво имају 10 пута мању дебљину PN споја од силицијумских компонената.

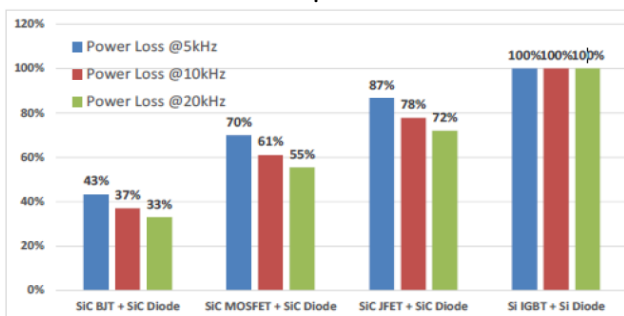


Сл. 2. Напон пробоја за SiC и за Si компоненте. [2]

Такође, ове компоненте имају скоро 10 пута већу диелектричну чврстоћу и око 5 пута већу топлотну проводљивост од силицијумских компонента. SiC компоненте имају пробојни напон реда kV, а Si компоненте су ограничене од 500V до 1000V [2].

### 3. КАРАКТЕРИСТИЧНЕ ПРИМЕНЕ КОМПОНЕНАТА СА ШИРОКИМ ОПСЕГОМ

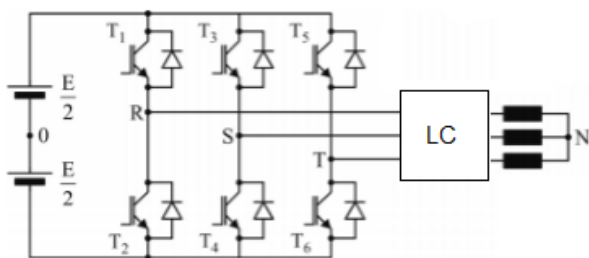
Карактеристичне примене компонента са широким опсегом су звучни системи, извори напајања, електрична возила, корекција фактора снаге. Своју примену све чешће налазе и у претварачима за повезивање обновљивих извора енергије (соларне или ветро електране) на мрежу. У јапанској компанији *MITSUBISHI* је установљено да се применом претварача са SiC компонентама укупни губици смањују за око 30 % [2].



Сл. 3. Поређење губитака за Si и SiC компоненте [2]

### 4. ИНВЕРТОРИ – ОПИС РАДА И ВРСТЕ

Из обновљивих извора електричне енергије добија се једносмерни напон (на пр. код соларних) или се он појављује у процесу претварања у једносмерном међуколу (на пр. код ветроелектрана). За прикључење на дистрибутивну наизменичну (AC) мрежу потребно га је претворити у мрежни напон одговарајуће учестаности (50 Hz или 60 Hz). Слична ситуација је и у електромоторним погонима код фреквентних претварача, када једносмерни напон међукола треба претворити у наизменични варијабилне учестаности. У таквим случајевима користе се инвертори (DC/AC) [3,4]. У зависности од области примене инвертори могу бити мрежни (*grid-tied*) и моторски, а примену налазе у соларним електранама, за конверзију при преносу електричне енергије једносмерном струјом и високим напонем – HVDC (High-Voltage Direct Current) [3,5]. Могу бити са два нивоа излазног напона, три нивоа и инвертори са више напонских нивоа (*Multi level inverters*) [6]. На слици 4 приказана је шема трофазног напонског инвертора.

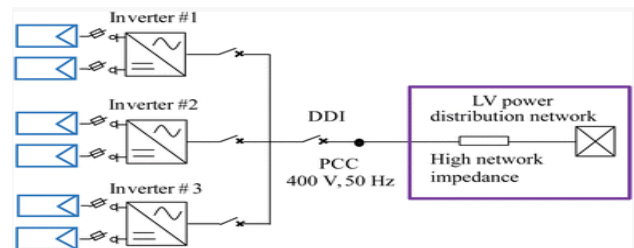


Сл. 4. Трофазни напонски инвертор [4]

Инвертор је преко LC филтера за сузбијање виших хармоника (блок LC) повезан на електричну мрежу или на неки други потрошач, нпр. електро мотор.

На слици 5 дат је пример примене у соларним електранама, где је приказана шема три паралелно везана низа фотонапонских (ФН) панела који су преко одговарајућих инвертора спрегнути са нисконапонском мрежом [7,8]. Могуће је и решење са једним, централним инвертором, који би покривао све ФН панеле. Снага инвертора бира се спрам снаге на излазу из ФН панела умањене за 10% до 15%.

На слици 6, приказана је примена инвертора у електромоторном погону АС асинхроног мотора, где се он налази у другом степену и директно врши регулацију брзине и момента овог мотора [9].

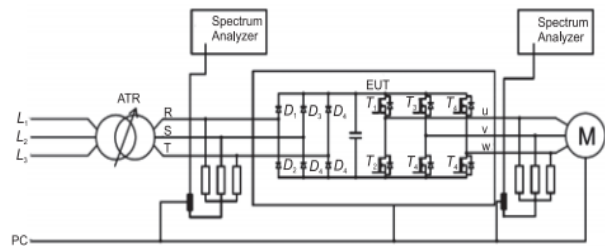


Сл. 5. Повезивање ФН панела на постојећу електричну мрежу [7]

### 5. ИНВЕРТОРИ СА SiC ТРАНЗИСТОРИМА

Компоненте засноване на SiC омогућавају да се развијају склопови енергетске електронике (у овом случају инвертори) који у поређењу са традиционалним претварачима са Si компонентама нуде већу ефикасност (мање губитке на транзисторима), мање димензије, већи праг толеранције у погледу загревања [10]. Обзиром на то да толеришу већи улазни напон (1200V до 1500V) од класичних инвертора базираних на силицијумским компонентама, ови инвертори се све чешће користе на средњем и високом напону. Повећањем напона приликом преноса електричне енергије смањује се јачина струје а самим тим и топлотни губици.

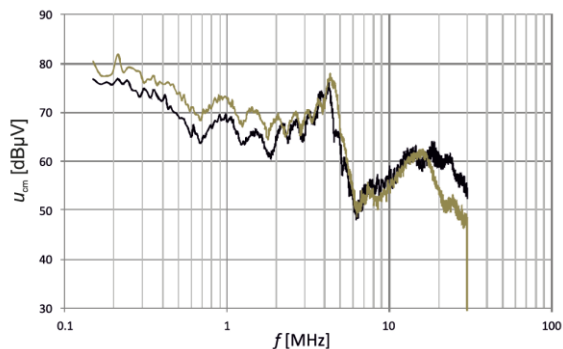
За тестирање SiC инвертора коришћена је шема погона са кавезним асинхроним мотором. Мерења су вршена помоћу осилоскопа. На слици 6 је приказана шема мерења [10]. Посматран је поремећај напона.



Сл. 6. Шема за мерење струје, напона и учестаности у погону са асинхроним мотором

Поремећај напона на излазу из претварача настаје услед изобличења (утицаја виших хармоника) мрежног напона, тј. напона на улазу у сам претварач.

На поремећај напона такође утичу и паразитивне индуктивности и капацитивности, електромагнетне сметње, рад транзистора на високим прекидачким учестаностима итд. На слици 7 приказан је поремећај напона за инверторе са Si и са SiC компонентама. Виде се мале разлике. Поред тога, таласни облик напона зависи и од алгоритма управљања претварачем. Поремећаји напона зависе и од врсте потрошача. На пример, при стартовању мотора долази до пропада напона (када напон у кратком временском интервалу падне испод називне вредности).



Сл. 7. Поремећај напона на излазу претварача са Si (црна линија) и са SiC (зелена) транзисторима [10]

Поред наведених предности, постоје и недостаци претварача са SiC компонентама што се тиче електромагнетне компатибилности. Ови уређаји имају већи утицај на окружење у погледу електромагнетних сметњи. Тестирањем ових склопова енергетске електронике установљено је да су нивои електромагнетних сметњи знатно виши, посебно у случајевима када је носећа учестаност повећана и када се користи контрола помоћу импулсно-ширинске модулације. Ови недостаци негативно утичу на опрему која је прикључена на исту мрежу. Електромагнетне сметње се могу смањити коришћењем филтера на улазу и излазу из претварача [10].

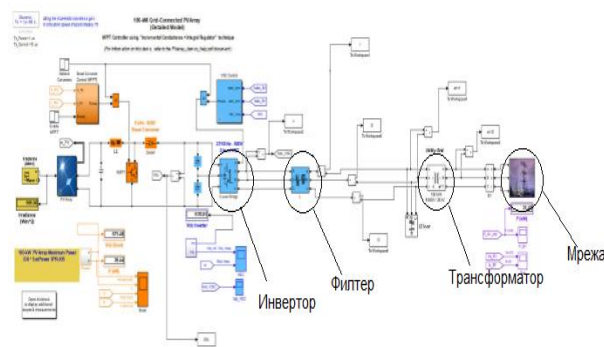
## 5. СИМУЛАЦИЈА РАДА SiC ИНВЕРТОРА

У овом поглављу биће представљена симулација рада инвертора са SiC транзисторима по шеми са слике 5. Са улазне стране на инвертор прикључени су соларни ФН панели, а са друге, излазне стране инвертор је преко трансформатора прикључен на постојећи електроенергетски систем. За симулацију је коришћен програмски пакет MATLAB/Simulink 2011. На слици 8 приказан је MATLAB/Simulink модел инвертора прикљученог на мрежу.

Максимални излазни напон једне ФН ћелије се креће у опсегу од 600 до 700 mV. Спајањем на ред више ФН ћелија добија се жељени излазни напон једног модула. Соларни панел је састављен од више ФН модула везаних редно или паралелно у зависности од потребног излазног напона.

За симулацију је коришћена таква конфигурација соларног панела која се састоји од 17 редно везаних модула у једном низу и 19 паралелно везаних низова. Излазни напон је око 600 V. Укупна излазна снага панела је око 35 kWp. Напон на излазу из соларног панела се преко подизача напона доводи до самог

инвертора. На излазу из инвертора повезан је филтер за сузбијање виших хармоника. Затим се напон помоћу енергетског трансформатора повећава на одговарајући напонски ниво погодан за прикључење на постојећи електроенергетски систем.

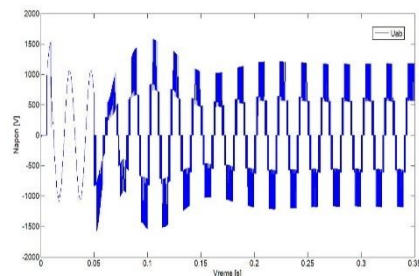


Сл. 8. Simulink модел инвертора прикљученог на електроенергетски систем

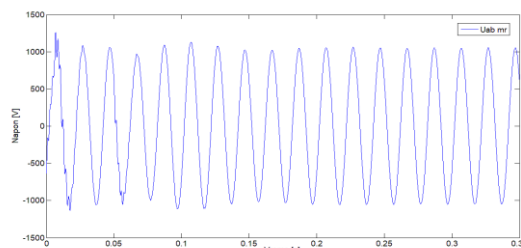
Са слике 9 може се приметити да напон на излазу из инвертора нема у потпуности синусни облик, а то је због утицаја виших хармоника. Са слике се такође може уочити да је амплитуда излазног међуфазног напона око 1250 V, што омогућава прикључења и на неке средње-напонске мреже. Поређења ради, на основу обрасца (2) може се узрачунати амплитуда излазног међуфазног напона:

$$U_{abm} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U_{DC} = 1,1 \cdot 1.175,01 = 1.292,6 \text{ V} \quad (2)$$

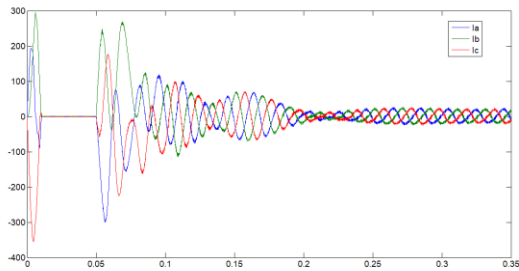
Филтрирањем напона са слике 9, тј. увођењем додатног склопа са LC филтером (слике 4 или 8), може се добити жељени квалитет излазног напона, што је приказано на слици 10. Излазна струја инвертора зависи од рада комплетног погона, а на слици 11 приказана је струја примара мрежног трансформатора при процесу укључивања на мрежу.



Сл. 9. Међуфазни напон на излазу инвертора



Сл. 10. Таласни облик међуфазног напона на излазу из филтера



Сл. 11. Таласни облик струје у све три фазе на нисконапонској страни трансформатора

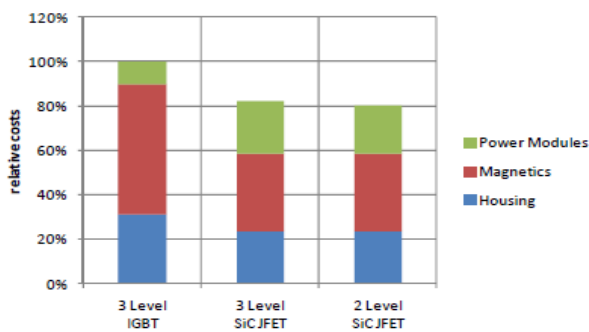
Проблем су укупни губици у инвертору, који се могу израчунати на основу следећег обрасца:

$$P_g = 3 \cdot (P_{\text{con-t}} + P_{\text{con-d}}) + P_{\text{sw}} \quad (3)$$

где су:  $P_{\text{con-t}}$  – губици током провођења транзистора,  $P_{\text{con-d}}$  – губици током провођења диоде и  $P_{\text{sw}}$  – прекидачки губици. Због виших фреквенција рада, прекидачки губици су доминантни.

## 6. ТРЖИШТЕ SiC ИНВЕРТОРА - ЦЕНЕ И БУДУЋИ РАЗВОЈ

Трошкови SiC инвертора анализирани су за три главне компоненте, модуле за напајање, магнетне компоненте и хладњак. Ово су компоненте које су технички повезане са самим модулом за напајање и они претежно доприносе у структури трошкова соларног претварача [2]. На слици 12 приказана је структура трошкова с обзиром на ове три главне компоненте. Види се да су трошкови магнетних компоненти доминантни. Даље, на основу испитивања тржишта, утврђено је да су они обрнуто сразмерни повећањем прекидачке учестаности. На пример, повећањем прекидачке учестаности са 16 kHz на 32 kHz трошкови се смањују за око 70 % [2]. Ако се узме инвертор са три напонска нивоа са IGBT транзисторима као референтно решење, уочава се да се употребом SiC транзистора трошкови смањују за 20% [2].



Сл. 12. Трошкови добијени анализом претварача са различитим прекидачким елементима [2]

## 7. ЗАКЉУЧАК

У овом раду разматране су новије полупроводничке компоненте, компоненте са широким опсегом, а посебно оне базиране на силицијум–карбиду. SiC компоненте осим у енергетској електроници своје

место проналазе и у телекомуникационим системима, савременој LED расвети итд.

С обзиром на то да су се компоненте са широким опсегом релативно скоро појавиле на тржишту као и да су њихове карактеристике знатно боље од класичних Si компонента, самим тим је и њихова цена на тржишту знатно већа.

## 8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] <http://mikroelektronika.elfak.ni.ac.rs/files/materijali-za-elektroniku/7-poluprovodnici.pdf>, Електронски факултет Ниш, 2017.
- [2] B. Ahmad, „Wide Band Gap Power Semiconductor Devices and their Applications“, M.Sc. Thesis, Aalto University, Espoo, Finland, 2015.
- [3] N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins, “Power Electronics”, 3<sup>rd</sup> Ed., John Wiley and Sons, 2003.
- [4] М. Недељковић, С. Срђић, „Енергетски претварачи 1 - Основне топологије енергетских претварача“, Електротехнички факултет, Београд, 2016.
- [5] J. Arillaga, Y.H. Liu, N.R. Watson, „Flexible Power Transmission – The HVDC Options“, John Wiley and Sons, 2007.
- [6] A. Nordvall „Multilevel Inverter Topology Survey“ Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2011.
- [7] E. Ghiani, F. Pilo “Smart inverter operation in distribution networks with high penetration of photovoltaic system”, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Vol.3, pp.504-511, 2015.
- [8] R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodriguez, „Grid converters for photovoltaic and wind power system“, John Wiley and Sons, 2011.
- [9] J.A. Alves, G. da Cunha, P. Torri, „Medium voltage industrial variable speed drives“, Brazil, 2009. <https://pdfs.semanticscholar.org/7df6/86b0e46280824d6f39ec313acc2fb5a7b9a1.pdf>.
- [10] W. Czuchra, W. Mysinski, B. Woszczyna, „Analysis of the use of transistors based on SiC technology in inverters in the context of electromagnetic compatibility“, Technical Transaction, Electrical Eng., Vol.1-E, 2016, doi: 10.4467/2353737XCT.16.027.5289.

## Кратка биографија:



Никола Плавшић рођен је 21.05.1992. у Сомбору. Основну школу завршио је у Сивцу. Средњу Техничку школу завршио је у Сомбору 2011. године и исте године уписује Факултет техничких наука у Новом Саду, судијски програм Енергетика, електроника и телекомуникације. На студијама се определио за смер Електроенергетика – енергетска електроника и електричне машине и дипломирао је 2016. године на тему „Симулација рада система тракастих транспортера угља у термоелектрани „Никола Тесла – А“ у Обреновцу“. Мастер рад одбранио је у октобру 2019. године. Живи и ради у Београду.