ПОВЕЋАЊЕ ЕФИКАСНОСТИ ПРЕТВАРАЧА ЕНЕРГЕТСКЕ ЕЛЕКТРОНИКЕ - I дио *
IMPROVING EFFICIENCY OF POWER ELECTRONICS CONVERTERS - PART I

Миломир Шоја, Марко Икић, Младен Бањанин, *ЕТФ Источно Сарајево*
Милан Радмановић, *ЕФ Ниш*

Садржај - *У овом раду су дати основни поступци и методе за повећање ефикасности претварача енергетске електронике (избор оптималне топологије, оптимизовано пројектовање, примјена дигиталног управљања). Посебна пажња посвећена је избору прекидачке фреквенције и новим типовима снажних прекидача.*

Abstract - *This paper presents the basic procedures and methods for increasing the efficiency of power electronics converters (optimal topology selection, optimized design, application of digital control). Particular attention was paid to selecting switching frequencies and new types of power switches.*

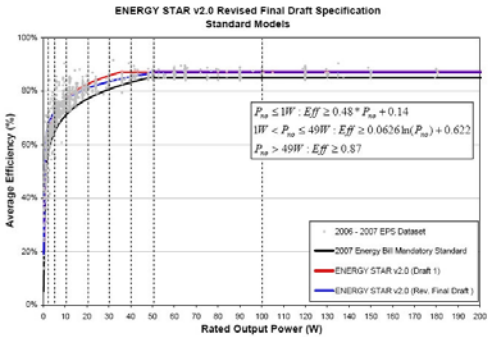
1. УВОД

Најважније особине претварача енергетске електронике (Ее) су: ниска цијена, велика поузданост и ефикасност, мале димензије, дуг животни вијек, ***EMC***. Редослијед важности зависи од конкретне примјене. С обзиром на противрјечност захтјева, код пројектовања је неопходно постићи одређене компромисе. У последње вријеме се велика пажња посвећује методама за повећање ефикасности претварача.

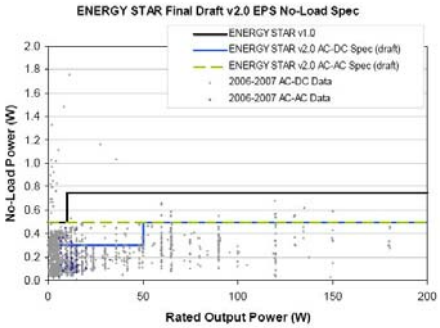
2. ЗНАЧАЈ ПОВЕЋАЊА ЕФИКАСНОСТИ

Електрична енергија представља око **40 %** укупне енергије која се троши. Процјене ***CPES*** и ***EPRI***, за **2010**.г., су да ће се у **САД** преко уређаја Ее снабдјевати око **80 %** потрошача [1]. Правилном употребом нове генерације уређаја Ее, могуће је уштедити око **30 %** електричне енергије [2]. Сваки постотак повећања ефикасности претварача има позитивне економске, еколошке и друге ефекте. Највећи ефекти од повећања ефикасности претварача могући су у: управљању електричним моторима, освјетљавању, напајању електронских уређаја (***PFC***), обновљивим изворима. Ради распознавања и популаризације ефикасних уређаја појавиле су се спецификације чије испуњавање дозвољава додјељивање уређајима одговарајуће квалификацију. За напојне уређаје **≤250 W** са ***AC*** улазом, додјељује се ***ENERGY STAR*** квалификација ако задовољавају критеријуме ***ENERGY STAR*** **v2.0** спецификације у активном режиму рада (оптерећен), раду без оптерећења и по питању фактора снаге [3]. На **Сл.1.** су дати захтјеви за уређаје **≤200 W**, у активном режиму рада. За номиналне снаге **≥49 W**, средња ефикасност мора бити **≥0.87**. Она се рачуна као аритметичка вриједност ефикасности, измјерених за све испитне напоне при **100**, **75**, **50**, и **25 %** номиналне струје. У раду без оптерећења дефинише се (**Сл.2.**) максимална ***AC*** струја уређаја. Осим тога, сви уређаји улазне снаге **≥100 W** морају имати улазни фактор снаге **≥0.9**, при номиналној струји.

Постоје и друге спецификације (на пр. **80*PLUS*** [4]), за друге врсте уређаја за напајање.



Сл.1. ***Energy Star v2.0 коначна спецификација, стандардни модел, до*** **200 W** [3]



Сл.2. ***Energy Star v2.0 коначна спецификација, неоптерећен уређај*** [3]

3. НАЧИНИ ПОВЕЋАЊА ЕФИКАСНОСТИ

Основне методе и поступци, које треба спровести ради повећања ефикасности претварача Ее су:

- Избор оптималне топологије,
- Оптимизација пројектовања,
- Оптимизација ефикасности (дигиталним) управљањем,
- Паралелно везивање претварача са правилном стратегијом укључивања/искључивања.

3.1 Избор оптималне топологије

Топологију претварача опредјељују специфична функција коју обавља, техничке карактеристике и услови рада. Захтјеве конкретне примјене може задовољити велики број топологија, али за проналажење најбољег рјешења треба одредити како избор топологије утиче на кључне параметре: цијену, величину, ***EMC***, сложеност монтаже и сервисирања, поузданост и ефикасност. Њихова важност се мијења од примјене до примјене и налажење компромиса има пресудан утицај на избор топологије. На пр., рјешење које има минималну цијену може се значајно разликовати од најефикаснијег, као што рјешење које има највећу густину снаге (мале димензије) не мора имати и најмање губитке. Оптимални избор тражи одређивање јасних критеријума, додјељивањем степена важности свакој карактеристици, а затим вредновање могућих топологија према успјешности задовољавања постављених захтјева (на пр. оцјенама од **1-5**). Слиједи поређење додијељених оцјена, од најважнијих карактеристика ка мање важним, и елиминација типологија које су лошије оцијењене. [5]
Нове топологије, које доносе значајне предности у погледу најважнијих карактеристика, па и ефикасности, појављују се у свим областима примјене претварача Ее. Тако је у [5] приказан ***AC-DC NV*** претварач снаге око **300 W** са улазним напоном **90-260 V** (***ZVS*** модификовани ***LLC*** са промјењивом прекидачком фреквенцијом и самоокидајућим синхроним исправљачем), у [6] флајбек ***PFC***+флајбек ***DC-DC*** претварач за снаге реда **100 W** и инвертор за примјену у ***PV*** (*Photo Voltage*) системима реда **kW**, са високофреквентним трансформатором и смањеним прекидачким губицима; ***ZVZCT*** модуларни трофазни инвертор/исправљач са **4** гране, намијењен за повезивање извора промјењиве снаге реда **100 kW** са несиметричним (нелинеарним) оптерећењем у [7], и тд.

3.2 Оптимизација пројектовања

Оптимизација пројектовања претварача своди се на дефинисање циљне функције (ефикасност, цијена и тд., или комбинација више њих) и на проналажење њеног максимума/минимума. Дефинисање циљне функције значи налажење математичке зависности (ефикасности) од свих релевантних промјењивих у систему [8], док налажење екстрема тражи развој сложених софтверских алата способних да у кратком времену ријеше постављени задатак и омогуће квантитативну анализу утицаја појединих захтјева и радних стања на вриједност циљне функције. Употреба техника оптимизације доноси значајне предности, и то: [9]

- Могуће је развити алате за потпуно аутоматско пројектовање...
- …који доносе побољшана рјешења у односу на традиционалне методе, јер омогућавају анализу сложених утицаја,…
- ...уз скраћење времена пројектовања, једном када се специфицира циљна функција и развију алати.
- Брзо налажење оптималног рјешења при различитим захтјевима, анализа осјетљивости циљне функције на варијације појединих радних услова и параметара.
- Едукативни значај, јер оптимизациони алати наглашавају критичне дијелове сваког пројектовања, дозвољавајући кориснику алата да фокусира пажњу на те дијелове, са циљем бољег разумијевања система.
- Пројектантски тим заједнички рјешава проблеме са јасном и строгом дефиницијом проблема и методологијом за његово рјешавање. То омогућава и побољшање пројктовања у будућим ревизијама. Пројектовање је јасно документован.

Постоје и озбиљни изазови за побољшање практичности оптимизационих техника:

- Мора бити развијен ефикасан и тачан модел цијене система, ефикасности и тд., довољно тачан и брз за оптимизациони процес који тражи стотине еволуционих корака.
- Каталози компоненти не садрже увијек све неопходне информације, а постоје и значајне разлике у подацима које дају различити произвођачи. Одређена стандардизација помогла би примјену оптимизационих техника.
- Формулисање проблема оптимизације и развој алата за његово рјешавање траже одређено вријеме, које се значајно скраћује послије рјешавања неколико пројектантских проблема (формирају се базе и дефинишу параметри компоненти, модели и тд.).
- Практично пројектовање је сложено због тешкоће при идентификацији и квантитативном одређивању појединих елемената.

У [9] је дат примјер оптимизованог пројектовања ***PFC*** подизача, снаге **1 kW**, са цијеном као циљном функцијом, при чему је укупна цијена смањена за читавих **58 %** у односу не рјешење добијено примјеном традиционалног пројектовања, заснованог на интуитивном одређивању прекидачке фреквенције и таласности струје пригушнице. Примјена технике оптимизације се посебно препоручује у ситуацијама када је потребно велико побољшање одређене карактеристике при пројектовању, али и у случајевима када су битна и мала побољшања, или се ради о великој серији. Постоје ситуације у којима је овај приступ мање ефикасан са становишта времена и цијене пројектовања, и тада је боље да пројектовање обави експерт, јер су резултати довољно добри, а до њих се долази брже.

На ефикасност претварача пресудно утичу прекидачка фреквенција и карактеристике полупроводничких прекидача, због чега им је посвећена посебна пажња.

3.2.1 Оптимална прекидачка фреквенција

Енергија свих губитака у претварачу, на једном прекидачком периоду, за вријеме промјене стања износи:

$$W_{tot} = W_{on} + W_{off} + W_D + W_C + W_L + ... \quad (1)$$

Средња вриједност прекидачких губитака:

$$P_{sw} = W_{tot} \cdot f_{sw} \quad (2)$$

Укупни губици претварача:

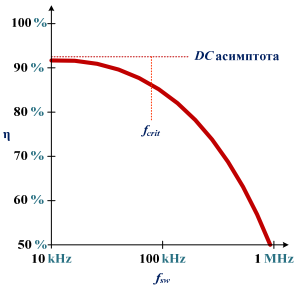
$$P_{loss} = P_{cond} + P_{fixed} + W_{tot} \cdot f_{sw} \quad (3)$$

- P_{cond}: губици провођења,
- P_{fixed}: губици независни од оптерећења и f_{sw}.

На критичној фреквенцији (f_{crit}), прекидачки губици су једнаки осталим губицима:

$$f_{crit} = \frac{P_{cond} + P_{fixed}}{W_{tot}} \quad (4)$$

То је ограничење прекидачке фреквенције практичних претварача, јер са повећањем фреквенције изнад f_{crit} ефикасност претварача нагло опада (**Сл.3.**).

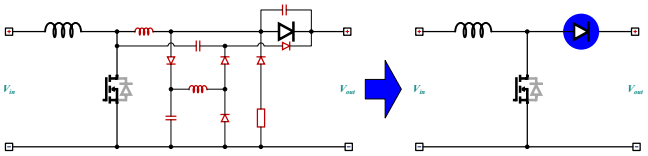


Сл.3. ***Зависност ефикасности претварача од прекидачке фреквенције*** [8]

Други критеријум за избор прекидачке фреквенције везан је за постизање ***EMC***. Постоји скуп фреквенција при којима су ***EMC*** ограничења најмања [10], па рад на некој од њих омогућава коришћење мањег ***EMC*** филтра и већу слободу код избора критичних компоненти. Оптималну прекидачку фреквенцију треба изабрати из поменутог скупа, уз услов $f_{sw}<f_{crit}$.

3.2.2 Нове снажне полупроводничке компоненте

Пресудан утицај на ефикасност претварача Ее имају снажни полупроводнички прекидачи. Стално побољшање карактеристика окидања прекидача, те смањење прекидачких и губитака провођења, омогућава повећање прекидачке фреквенције уз истовремено смањење величине претварача, без смањења ефикасности (или повећање ефикасности). Послије вишедеценијског развоја, карактеристике снажних полупроводничких прекидача, заснованих на ***Si*** технологији, приближиле су се крајњим границама. Срећом, нове технологије и материјали обећавају израду компоненти са драматично побољшаним карактеристикама, које ће омогућити даљи убрзани развој претварача Ее. Једна од тих технологија заснована је на ***SiC*** (*Silicon Carbide*), који има неке јединствене карактеристике што га чине готово идеалним материјалом за високонапонске или операције при високој температури. Прво, термичка проводност ***SiC*** је неколико пута већа него код ***GaAs*** и више него три пута већа него код ***Si***, што омогућава производњу компоненти које раде са већим струјама. Такође, пробојни напон ***SiC*** је око десет пута већи него код ***Si***, па је могуће направити високонапонску Шотки диоду која има занемариву реверзну струју у односу на класичне ***Si PiN*** диоде, независну од температуре, радне струје и прекидачког *di/dt*. Њихов напон опоравка једнак је нули и имају готово тренутно гашење, због чега су им прекидачки губици практично елиминисани, што драстично смањује губитке укључења ***MOSFET***-*а* (***IGBT***-*а*), а у добром дијелу елиминише и ***EMI***. Ефикасност претварача је значајно повећана, а у многим случајевима долази и до поједностављења енергетске шеме. На **Сл.4.** је, са лијеве стране, приказан дио ***PFC*** подизача са ***Si PiN***, а на десној страни са ***SiC*** диодом. Код ***SiC*** диоде нема потребе за комутационим кругом, па је шема много једноставнија и ефикаснија. [11]



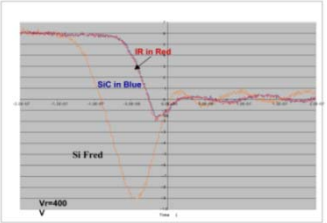
Сл.4. ***Подизач са стандардном Si PiN и са SiC диодом***

Слични ефекти постижу се коришћењем ***SiC*** диода у инверторима, гдје је средња ефикасност достигла **97.5 %** (рекорд **>99 %**, ***Si*** **96 %**), као последица смањених губитака за **25 %**. Примјењен код ***PV*** система, такав инвертор омогућава претварање више соларне енергије у електричну, што, узимајући у обзир да ***PV*** системи треба да раде бар **30** година, представља велико унапређење у чувању енергије, значи бржи поврат уложеног новца и, због ниже радне температуре, продужен животни вијек.

Први снажни модул са свим ***SiC*** компонентама је Хондин ***ROHM***, који се састоји од једнофазног претварача и трофазног инвертора у једном кућишту, има називне вриједности **1200 V**, **230 A** (**289 kVA**) и намијењен је за (***H***)***EV*** ((*Hybrid*) *Elecric Vehicle*) [12]. Због смањених губитака потребни су му мањи хладњаци, а могуће је четвероструко повећање прекидачке фреквенције (са **20** на **80 kHz**), што доводи до значајног смањења димензија. Губици у модулу су смањени на око једну четвртину у односу на конвенционалне ***Si*** уређаје, док је укупно смањење губитака око **46%**. *Powerex* такође нуди ***SiC MOSFET*** модуле (***QJD*1210006** и ***QJD*1210007**) који раде на знатно већим температурама него ***Si IGBT*** модули и имају за **38 %** мање проводне и **60 %** мање прекидачке губитке, уз укупно смањење губитака од **54 %** на **20 kHz**. Дизајнирани су за системе који захтијевају мале губитке, велику ефикасност, високу прекидачку фреквенција и/или високу радну температуру. Основни проблеми ***SiC*** технологије су висока цијена и ограничена понуда.

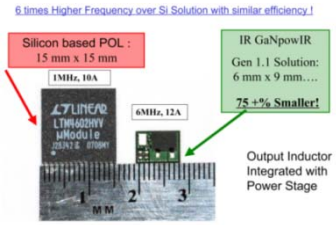
Друга, револуционарно нова технологија развијена од стране *International Rectifier Corporation* (***IR***), је ***GaN***-на-***Si*** (*Gallium Nitride on Silicon*), која обећава израду компоненти са бар десет пута бољим карактеристикама, по прихватљивој цијени, што би требало омогућити драматично повећање ефикасности уређаја Ее. ***GaN*** транзистор са великом мобилношћу електрона (*High Electron Mobility Transistors*-***HEMT***) доноси велико побољшање кључних карактеристика ($R_{DS(on)}\times Q_{sw}$ је **33 %** мање него код последње генерације ***Si MOSFET***) и омогућава реализацију претварача код којих је **ефикасност×густоћа снаге/цијена** за ред величине боља од постојећих ***Si*** и ***SiC FET***-ова [13]. Карактеристика реверзног опоравка (Q_{rr}) високонапонске ***GaN*** диоде суштински је иста као код комерецијално доступних ***SiC*** диода, и знатно је боља од карактеристике најбоље ***Si*** брзе диоде (***FRED***) (**Сл.5.**). „Мека“ карактеристика је последица одсуства шупљина у ***GaN HEMT*** структури, нема ефекта споредних носилаца у набоју реверзног опоравка Q_{rr}, ни потребе за филтерским и заштитним круговима. Тако се смањује величина уређаја, цијена и тежина. Очекује се масовна примјена у ***PFC*** круговима

који користе скупе ***SiC*** диоде. Природно брза и „мека“ прекидачка карактеристика погодна је и за значајно смањење прекидачких губитака када се примјењује као антипаралелна диода у инверторима.



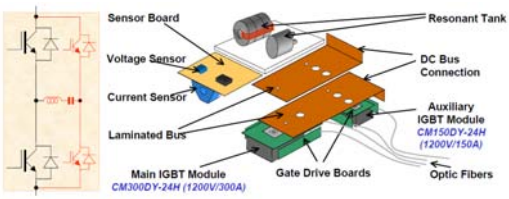
Сл.5. ***Карактеристика реверзног опоравка*** **(Q_{rr}) 600 V** ***GaN, SiC и Si FREDдиоде*** [13]

Демонстрација предности нових ***GaN***-на-***Si*** компоненти, приказана је на **Сл.6**. Нисконапонски претварач (*point-of-load-**POL***), са улазом **12 V** и излазом **1.2 V/12 A**, који ради на **6 MHz**, има упоредиву ефикасност као ***Si*** претварач на **1 MHz (85 %)**, али са мање од једном трећином величине. Од компоненти на бази ***GaNpowIR*** технологије се у блиској будућности очекује ефикасно претварање на преко **50 MHz** по фази. На тако високим фреквенцијама елиминише се потреба за значајним бројем вањских компоненти, па је могуће велико смањење губитака везаних за паразитне компоненте.



Сл.6. ***Поређење претварача заснованих на Si и GaN технологији*** [13]

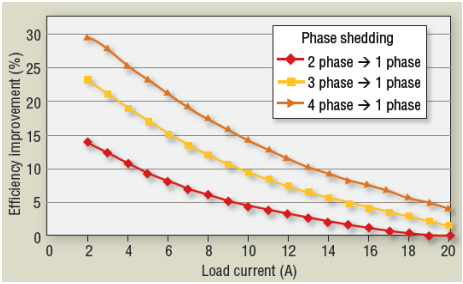
Велики напредак у смањењу димензија и повећању ефикасности претварача Ее постиже се и интеграцијом појединих функционалних дијелова претварача у једну цјелину и примјеном интегрисаних интелигентних прекидачких модула (*Integrated Power Electronics Module-**IPEM***, *Power Electronics Building Block-**PEBB*** [7]), који осим снажних прекидача садрже и електронске модуле за укључење/искључење, заштиту, мјерење и тд. Интеграција омогућава минимизацију или чак елиминисање паразитних компоненти, што повољно утиче на поузданост и повећање ефикасности претварача. Употреба нових полупроводничких снажних компоненти на бази ***SiC*** и ***GaN*** даље ће унаприједити карактеристике интегрисаних прекидачких модула. Примјер интегрисаног прекидачког модула са „меким“ прекидањем, који обавља функцију једне гране инвертора, дат је на **Сл.7**.



Сл.7. ***ZVZCT интегрисани модул*** **(*PEBB*)** [7]

3.3 ОПТИМИЗАЦИЈА ЕФИКАСНОСТИ (ДИГИТАЛНИМ) УПРАВЉАЊЕМ

Примјена дигиталних система за управљање претварачима Ее донијела је нове могућности за повећање њихове ефикасности. Посебно интересантно за примјену дигиталних система је тзв. вишефазно управљање, које се масовно примјењује код претварача за напајања микропроцесора, ***FPGA*** и сл. компоненти, које раде са напоном реда **1 V** и (релативно) великим струјама (реда **100 A**), као и код ***PFC*** кругова. Укључивање/искључивање појединих фаза (*phase shedding*) и други облици управљања фазама (редослијед, компензација, уравнотеживање) омогућују оптимизацију ефикасности претварача у широком дијапазону радних услова, без деградације осталих карактеристика. Суштина технике своди се на смањење прекидачких губитака укључивањем онолико фаза колико је потребно за поједини ниво оптерећења. На **Сл.8.** је приказана зависност ефикасности четверофазног синхроног спуштача (**V_{in}=10 V**, **V_{out}=1 V**, **500 kHz**) од броја укључених фаза. [14]

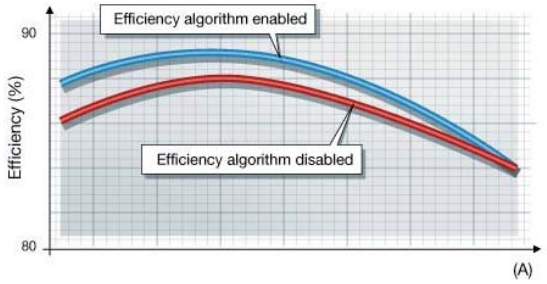


Сл.8. ***Утицај управљања фазама на ефикасност четверофазног синхроног спуштача***

Чак и код преласка са двије фазе на једну, при малим оптерећењима, долази до повећања ефикасности за око **15 %**. Код максималног оптерећења прелаз са двије фазе на четири повећава ефикасност за **5 %**. Осим укључења/искључења појединих фаза, дигитална управљачка електроника може да запамти радне параметре у појединим карактеристичним тачкама, олакшавајући контролеру посао око одлучивања о укључењу/искључењу фаза у поједим ситуацијама. На пр., нека фаза може имати и више од **1 %** различите губитке провођења, због разлике у загријавању.

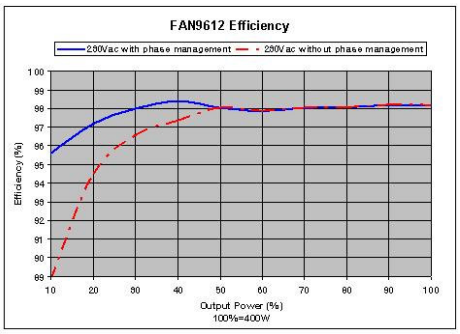
Дигитално управљање може даље повећати ефикасности синхроног спуштача контролом „мртвог времена“ (*dead time*) ***MOSFET*** прекидача. Код овог типа претварача до губитака долази у случају да су оба ***MOSFET*** укључена или искључена. Таква ситуација се назива „мртво вријеме“ јер не долази до предаје снаге оптерећењу. У идеалном случају, један ***MOSFET*** би требао бити укључен, а други искључен, па би „мртво вријеме“ било једнако нули. Оптимизација прекидања ***MOSFET*** прекидача и минимизација „мртвог вријемена“ може повећати ефикасности за **1 %** до **2 %**, зависно од примјене (**Сл.9.**). [15]

Одличан примјер повећања ефикасности примјеном дигиталног управљања дат је у [17]. Ту је приказан **400 W *BCM*** (*Boundary Conduction Mode*) ***PFC*** двофазни претварач, управљан са ***FAN*9612**. Ефикасност је повећана и при малим и при номиналним оптерећењима.



Сл. 9. ***Зависност ефикасности синхроног спуштача од оптимизације „мртвог времена“*** [16]

Дио синхронизационог круга ***FAN*9612** користи ограничење максималне фреквенције у циљу смањења фреквентно-зависних C_{oss} ***MOSFET*** прекидачких губитака при малим оптерећењима и проласку ***AC*** улазног напона кроз нулу. Када је мрежни напон V_{IN} већи од $V_{OUT}/2$, C_{oss} капацитивни прекидачки губици се даље смањују употребом технике прекидања при минималној струји (*valley-switching technique*) ради постизања оптималног времена укључења ***MOSFET***. Када је V_{IN} мањи од $V_{OUT}/2$, ***MOSFET*** се укључује при нултом напону (*zero voltage switching* - ***ZVS***). ***ZVS***, заједно са прекидањем при нултој струји (*zero current switching* - ***ZCS***), због ***BCM*** рада, елиминише губитке укључења ***MOSFET*** и губитке реверзног опоравка у излазној диоди. ***FAN*9612** аутоматски искључује једну фазу при **30 %**, а поново је укључује при **40 %** струје оптерећења (подесиво на одговарајућем улазу ***FAN*9612**). **Сл.10.** показују измјерено повећање ефикасности при малим оптерећењима **6.5 %** при V_{IN} = **230 V$_{AC}$**.



Сл.10. ***Повећање ефикасности FAN*9612 *EVB* укључивањем/искључивањем фаза*** [17]

4. ЗАКЉУЧАК

Спровођењем одговарајућих пројектантских поступака и метода, те коришћењем модерних снажних прекидача у енергетском и дигиталних компоненти у управљачком дијелу, могуће је значајно повећати ефикасност претварача Ее са великим позитивним ефектима.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Lee F. C., “*Power Electronics System - Introduction*”, Virginia Tech, 2005.,

[2] “*Power Electronics System-A Joint Course*”, taught by Virginia Polytechnic Institute and ..., 2005.,

[3] Vince Biancomano, “*Energy Star update eases Active efficiency spec*”, POWER MANAGEMENT Design Line, March, 2008.,

[4] John Chiem, ”*How to boost your embedded design's power supply efficiency*”, POWER MANAGEMENT Design Line, February 2009.,

[5] Andrew Skinner, ”*Choosing the right power supply topology*”, POWER MANAGEMENT Design Line, April 2009., (www.powermanagementdesignline.com),

[6] Issa Batarseh, “*Research Activities in Power Electronics at UCF*”, Florida Power Electronics Center Orlando, Florida USA (batarseh@mail.ucf.edu), 2003.

[7] Dushan Boroyevich, “*Power Electronic Converters for Advanced Electric Power Systems: The DOE Workshop on Systems Driven Approach to Inverter R&D*”, Center for Power Electronics Systems, ..., April 2003.,

[8] Erickson R. W., Maksimovic D., “*Fundamental of Power Electronic-second edition*“, Springer Science+Business Media, LLC, 2001.,

[9] Sergio Busquets-Monge, ”*Application of Optimization Techniques to the Design of a Boost Power Factor Correction Converter*”, Master thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2001.,

[10] Erik Hertz, “*Thermal and EMI Modeling and Analysis of a Boost PFC Circuit Designed Using a Genetic-based Optimization Algorithm*”, Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.,

[11] Alfred Hesener, ”*How a power switch can save the world*”, Embedded Europe, August 2009**.,** (www.embedded-europe.com),

[12] Sam Davis, ”*SiC and GaN Vie for Slice of the Electric Vehicle Pie*”, Power Electronics Technology, November, 2009., (www.powerelectronics.com),

[13] Michael A. Briere, “*GaN-based power devices offer game-changing potential in power-conversion electronics*”, INDUSTRIAL CONTROL Design Line, December 2008., (industrialcontroldesignline.com),

[14] *Dave Freeman*, ”*Digital Power Control Improves Multiphase Performance*”, Power Electronics Technology, December 2007., (www.powerelectronics.com),

[15] Marty Pandola, “*Explore the Lesser-Known Benefi ts of Digital Power*”, Power Electronics Technology, November 2006.,

[16] Ericsson, “*Power supplies go digital.Digital techniques in power conversion*”, 2009., (www.ericsson.com),

[17] Steve Mappus, “*Intelligent Interleaving: improving energy efficiency in AC-DC power supplies*”, POWER MANAGEMENT Design Line, March, 2008., (www.fairchildsemi.com/pf/FA/FAN9612.html),

* Рад је настао у оквиру пројекта **„РАЗВОЈ МРРТ ПРЕТВАРАЧА ЗА ПРИМЈЕНУ У СОЛАРНИМ СИСТЕМИМА НАПАЈАЊА“**, Министарство науке и технологије у Влади РС (Рјешење број: 19/6-020/961-174/09 од 31.12.2009. год.)