

НЕКЕ МЕТОДЕ ЗА ПОВЕЋАЊЕ ЕФИКАСНОСТИ МИКРОИНВЕРТОРА SOME METHODS FOR IMPROVING EFFICIENCY OF MICRO-INVERTERS

Миломир Шоја, Слободан Лубура, Марко Икић, Срђан Лале, *ЕТФ Источно Сарајево*

Сажетак: У раду су приказане двије методе за повећање ефикасности микроинвертора који се користе у *PV* системима напајања. Прва се своди на градњу микроинвертора од два паралелно везана претварача са одговарајућом стратегијом укаучивања/искључивања, а друга на режим рада са изостављањем импулса при малим снагама. Свака од метода понаособ, а нарочито обједињене, доводе до значајног повећања ефикасности.

Abstract: The paper describes two methods for improving efficiency of micro-inverters used in the *PV* power systems. The first is to building micro-inverter by two parallel connected converters with appropriate ON/OFF strategy, and another is working with the pulse skipping at low powers. Each of the methods separately and in particular integrated, leading to a significant efficiency improving.

1. УВОД

PV (PhotoVoltaic) системи за напајање спојени директно на дистрибутивну мрежу чине око **85%** свих *PV* система [1]. Њихова велика предност у односу на друге системе је што не захтијевају постојање елемената за акумулацију енергије (нижа цијена система). Цијена струје добијене помоћу *PV* система износила је 2009. год. **21-38 €/kWh**, док је градња комплетног система коштала **\$5-\$9/W_p**. У цијени система *PV* модул учествује са **50%**, а инвертор са **10%**. Са друге стране, **63%** грешака у систему потичу од инвертора, а свега **10%** од *PV* модула. Индустриски лидер у производњи *PV* модула, фирма *First Solar*, прозвела је 2009. год. кадмијум телурид модул на бази танког филма са цијеном испод **1 \$/W**, док је у септембру 2010. год. цијена њихових панела пала на **76 €/W_p**. Почетком септембра 2010. год. фирма *Oerlikon* је отворила нову производну линију модула на бази танког филма од аморфног силицијума (*a-Si*), чија је ефикасност **10%**, а цијена испод **70 €/W_p**. [2]. Циљеви *DOE* (*U.S. Department of Energy*) су смањење цијене модула на **50 €/W_p** до 2015. год., уз слично смањење цијена за *BOS* (*Balance of System*) и инверторе [3]. Падом цијена модула све више долази до изражаја цијена и карактеристике инвертора који одређују развој и архитектуру *PV* система напајања. Тренутно тржиштем доминирају *PV* системи са стринг и мултистринг инверторима, али су се у задњих неколико година појавиле нове архитектуре засноване на микроинверторима (*AC PV* модулима).

Према извјештајима *IMS Research*, само у трећем кварталу 2009. год. продато је микроинвертора укупне снаге око **50 MW** [4], док се у наредних **5** година очекује испорука више од **16** милиона комада (порао од преко **100%** годишње) и профит од преко **1.5** милијарде \$ [5]. Основно тржиште микроинвертора представљају системи који се монтирају на кровове, као и слични системи код којих није лако остварити оптималну оријентацију *PV*

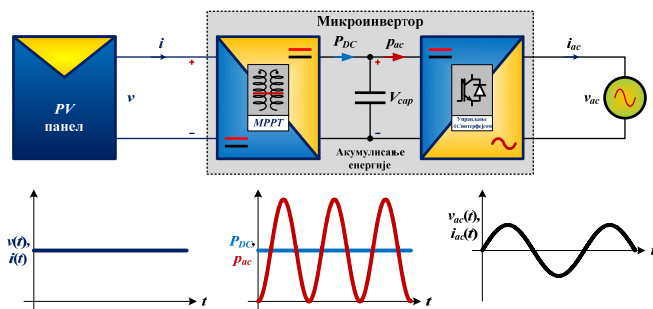
модула и код којих долази до значајног ефекта сјене, као и остали системи снага до **1 kW**. Сматра се да се употребом микроинвертора код таквих система износ прикупљене енергије може повећати и до **25%** [4], а према [1] чак за **50%** у присуству сјене.

Да би се могло оцијенити вријеме отплате оваквих система и њихова исплативост неопходно је познавати карактеристике *PV* модула и инвертора, при чему се ефикасност појављује као најважнија карактеристика, јер је директно повезана са цијеном. Инвертор који је за **4.1%** ефикаснији од средње ефикасног на тржишту, може бити за **41%** скупљи (**€/W**) уз претпостављену исту цијену генерисане *PV* електричне енергије [6]. Укупна ефикасност *PV* инвертора спојеног на мрежу мора узети у обзир и ефикасност претварања η и *MPPT* (*Maximum Power Point Tracker*) ефикасност η_{MPPT} и дефинише се као њихов производ, $\eta_{tot} = \eta \cdot \eta_{MPPT}$. Обје ефикасности зависе од тренутне снаге и *DC* напона. Међутим, у већини случајева купци „виде“ само максималну вриједност ефикасности, а веома ријетко им је представљена зависност η и η_{MPPT} од излазне *AC* снаге и при различитим *DC* напонима. Код већине комерцијалних *PV* инвертора η_{MPPT} је изнад **99%** у цијелом опсегу *AC* снаге и *DC* напона, па је уобичајено да се *PV* инвертори пореде на основу тзв. европске/америчке ефикасности, η_{EU}/η_{CES} , које представљају ефикасност претварања и рачунају се у облику суме производа тежинских коефицијената и ефикасности при различитим снагама оптерећења [7]. Средња ефикасност инвертора који се користе на њемачком тржишту (најзначајније на свијету) кретала се, последњих година од **93.1%** до **97.7%**, при чему су појединачна одступања унутар $\pm 3\%$ [6]. Микроинвертори се због ниског улазног напона, реализују са два степена претварања енергије и (*HF*) трансформатором па им је ефикасност мања за **1-2.5%** у односу на системе без трансформатора. Због тога се повећању њихове ефикасности мора посветити посебна пажња.

2. AC МОДУЛИ - МИКРОИНВЕРТОРИ

У зависности од броја и начина везивања PV модула, као и од снаге и положаја инвертора, постоје PV системи са централним, стринг и мултистринг инвертором, као и тзв. AC модули/хелије. Најсавременија рјешења заснована су на мултистринг технологији и AC модулима. AC модул представља јединствен електрични уређај састављен од (микро)инвертора и PV модула. Овакво рјешење обезбјеђује оптимално прикупљање енергије на сваком панелу, јер елиминира губитке због разлике у PV модулима и омогућава оптимално прилагођавање PV модула и инвертора, те индивидуални $MPPT$. Због модуларне структуре, прилагођавање и подешавање система је веома једноставно, па AC модули спадају у категорију “plug-and-play” уређаја које могу користити (и монтирати) особе без икаквог знања о електричним инсталацијама (корисници). Веома важне особине PV система напајања са AC модулима су и редувантност (не постоји тачка у систему чија би грешка била критична), велика сигурност (не постоји високи DC напон) и могућност једноставног проширења система. Сложена топологија микроинвертора, због неопходности појачавања напона, може смањити укупну ефикасност и повећати цијену по вату, док су, с друге стране, AC модули предодрђени за масовну производњу, што смањује малопродајну цијену. [1] [3] [8]

Блок структура AC модула, као и таласни облици напона, струја и снага који се јављају у оваквом систему, приказани су на Сл.1. Микроинвертор се, у општем случају, састоји од $DC-DC$ претварача са $MPPT$ функцијом, кондензатора за акумулацију енергије (изједначавање снага) и самог инвертора.



Сл.1. Напони, струје и снаге у PV систему са микроинвертором [2]

3. ЕФИКАСНОСТ PV ИНВЕРТОРА

PV инвертори спојени на мрежу се обично пореде на основу тзв. европске/америчке ефикасности η_{EU}/η_{CEC} , која представља ефикасност претварања добијену на основу тежинских коефицијената додијељених појединим радним тачкама. Њу користе и пројектанци и потрошачи, као користан алат за поређење система који раде у широком дијапазону промјене расположиве Сунчеве енергије, јер омогућава реалну процјену интегралне ефикасности инвертора у зависности од

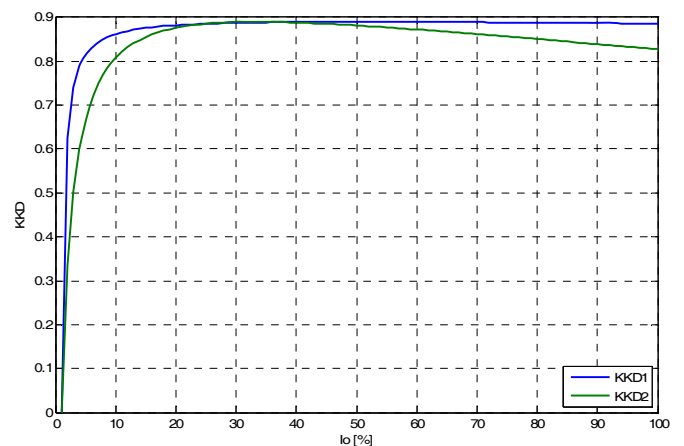
времена, током цијелог дана. Европска дефиниција ефикасности је дата са [7]:

$$\diamond \eta_{EU} = 0.03 \cdot \eta_{5\%} + 0.06 \cdot \eta_{10\%} + 0.13 \cdot \eta_{20\%} + 0.10 \cdot \eta_{30\%} + 0.48 \cdot \eta_{50\%} + 0.20 \cdot \eta_{100\%}, \quad (1)$$

док америчка варијанта, дефинисана од стране CEC (California Energy Commission) гласи:

$$\diamond \eta_{CEC} = 0.04 \cdot \eta_{10\%} + 0.05 \cdot \eta_{20\%} + 0.12 \cdot \eta_{30\%} + 0.21 \cdot \eta_{50\%} + 0.53 \cdot \eta_{75\%} + 0.05 \cdot \eta_{100\%}, \quad (2)$$

гдје је $\eta_{i\%}$ ефикасност претварача при $i\%$ номиналне излазне снаге инвертора. Криве ефикасности цртају се у функцији излазне снаге/струје. Утицај облика криве ефикасности на η_{EU} види се на примјеру са Сл.2. Иако обје криве имају исту максималну вриједност (**0.89**), разлика између $\eta_{EU,1} = 0.884$ и $\eta_{EU,2} = 0.86$ је већа од **2%**. Дешава се чак да крива која има већу максималну ефикасност за **1%**, има η_{EU} мању за **1.5%**. То је углавном последица смањене ефикасности при малим снагама. Јасно је да се облику криве ефикасности, који зависи од величине појединих типова губитака, мора посветити значајна пажња, са циљем оптимизације, тј. повећања интегралне ефикасности. η_{CEC} је практично увијек већа од η_{EU} , због веће снаге од које почиње рачунање.



Сл.2. Примјер за објашњење интегралне ефикасности

3.1 Моделирање ефикасности претварања

Ефикасност (микро)инвертора одређена је топологијом, прекидачима, прекидачком фреквенцијом, модулацијом, филтрирањем и DC напоном. Могуће је на више начина доћи до ефикасности (губитака) микроинвертора. Најбоља метода је мјерење улазне и излазне снаге у довољном броју тачака, али постоје и чисто математичке и комбиноване методе. Математичка метода се своди на рачунање губитака појединих компоненти на основу познатих једначина (у функцији наона, струје и фреквенције). У [1] је дат примјер оваквог одређивања ефикасности, са датим једначинама за рачунање губитака свих врста компоненти који се користе у микроинверторима, укључујући и SiC диоде. У задње вријеме се много користе комбиноване методе, код

којих се прво изврши минималан број мјерења (бар 3), па се на основу добијених резултата рачунају коефицијенти полинома који апроксимира криву ефикасности. Ова метода је једноставна, даје добре резултате, а не захтијева познавање специфичних особина компоненти. Осим тога, код употребе чисто математичког модела, потребно је при свакој измјени типа било које компоненте мијењати једначине и модел правити изнова. Комбинована метода не зависи од типа компоненти, с обзиром да је заснована на резултатима мјерења. Гибитке у функцији излазне АС струје i_o и DC напона v_{DC} , могуће је описати полиномом (3). $a_{0,0}, \dots, a_{2,2}$ су константни коефицијенти за дати DC напон v_{DC} [6]. Модел **НЕ ВАЖИ** за микроинверторе састављене од 2 (или више) претварача који се независно укључују/искључују.

$$P_{\text{loss}}(i_o, v_{DC}) = P_0(v_{DC}) + U_0(v_{DC}) \cdot i_o + R_0(v_{DC}) \cdot i_o^2 =$$

$$(a_{0,0} + a_{0,1} \cdot v_{DC} + a_{0,2} \cdot v_{DC}^2) +$$

$$(a_{1,0} + a_{1,1} \cdot v_{DC} + a_{1,2} \cdot v_{DC}^2) \cdot i_o +$$

$$(a_{2,0} + a_{2,1} \cdot v_{DC} + a_{2,2} \cdot v_{DC}^2) \cdot i_o^2 \quad (3)$$

P_0 [W] представља губитке неоптерећеног микроинвертора, губитке пропорционалне струји i_o описује U_0 [V], док омске губитке репрезентује R_0 [Ω]. Када је топологија микроинвертора оптимално одабрана, η_{EU} је приближно константна у цијелом опсегу DC напона и незнатно је испод η_{max} . Осим тога облик криве ефикасности остаје исти при разним DC напонима, па је за спровођење мјера за повећање ефикасности могуће користити и поједностављени модел који не узима у обзир зависност појединих губитака од DC напона [9] [10].

$$\eta(i_o) = \frac{v_o i_o}{v_o i_o + P_0 + U_0 i_o + R_0 i_o^2} \quad (4)$$

3.2 Оптимизација криве ефикасности

Криву ефикасности могуће је оптимизовати тако да η_{EU}/η_{CEC} буде максимална. То се најлакше постиже ако се максимална ефикасност дешава при струји која у дефиницији η_{EU}/η_{CEC} има највећу тежину. У [10] је показано да се η_{max} (4) дешава при струји $I_{o,\eta_{\text{max}}} = (P_0/R_0)^{1/2}$. Ако је $I_{o,\eta_{\text{max}}} = k_{CEC/EU} \cdot I_{o,nom}$, ($k_{CEC/EU} = 0.75$, $k_{EU} = 0.5$), добију се следеће вриједности коефицијената који одговарају оптималној кривој ефикасности (I_{nom} номинална струја, V_o излазни напон):

$$R_0 = \frac{P_0}{(k_{CEC/EU} \cdot I_{o,nom})^2}, U_0 = V_o \left(\frac{1 - \eta_{\text{max}}}{\eta_{\text{max}}} \right) - 2\sqrt{P_0 R_0} \quad (5)$$

P_0 треба бити што мањи, али не постоји препоручена вриједност за микроинверторе. У [11] је, за сличне типове и снаге уређаја, дато $P_0 \leq 0.5$. Из претходних једначина слиједи да је могуће оптимизовати ефикасност све док постоји могућност утицаја на вриједност P_0 и R_0 . С обзиром да од површине полупроводника (**MOSFET**)

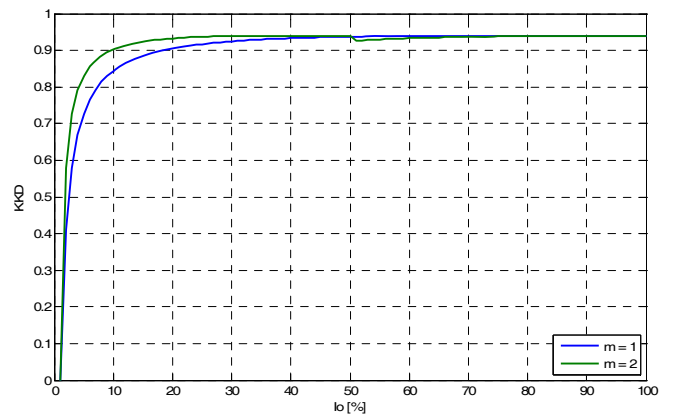
прекидача зависе и $R_{DS(on)}$ и C_{oss} (губици провођења и прекидачки губици), то је могуће избором прекидача извршити оптимизацију [10].

4. ПОВЕЋАЊЕ ЕФИКАСНОСТИ МИКРОИНВЕРТОРА

Ефикасност *PV* инвертора драматично опада при малој инсолацији, што има за последицу смањење η_{EU}/η_{CEC} . Због тога је један од основних задатака побољшање ефикасности при малим снагама. То је нарочито значајно код микроинвертора, који већи дио времена раде са малим снагама, а због двоструког процесирања снаге имају мању ефикасност од других типова *PV* инвертора. Овдје су предложена два начина како да се то постигне и провјерена на конкретном микроинвертору, **SMI-200/VDE**, произвођача **ENECYS** [12].

4.1 Повећање ефикасности паралелним везивањем претварача

У [13] је показано да се паралелним везивањем претварача и одговарајућом стратегијом њиховог укључивања може повећати ефикасност при малим снагама, али и расположивост/поузданост и животни вијек. Код микроинвертора има смисла користити два претварача, сваки са половином номиналне снаге. Ради илустрације предности предложеног приступа написан је **MATLAB** програм који црта могуће криве ефикасности и рачуна η_{EU} за **SMI-200/VDE** и предложено рјешење. Примјерена је стратегија укључивања следећег претварача пошто претходни буде номинално оптерећен. Резултати су приказани на Сл.3. Добијено повећање η_{EU} је значајних 1.24%.

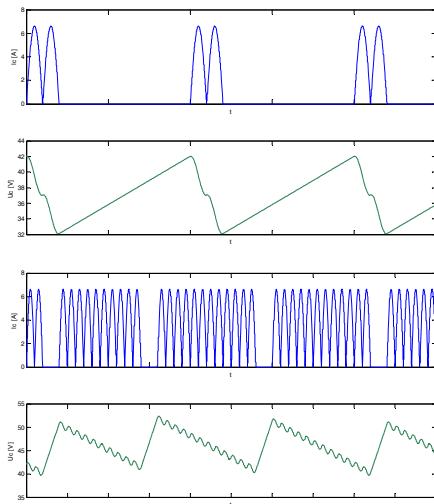


Сл.3. Повећање ефикасности паралелним везивањем 2 претварача

4.2 Повећање ефикасности изостављањем импулса

У [1] је показано како се иновативним управљачким приступом са изостављањем импулса (Сл.4.) може побољшати ефикасност микроинвертора на малим снагама (η_{CEC} повећано за 0.5-1%), без повећања цијене. Идеја се састоји у томе да се при малој инсолацији

енергија складишти у кондензатору, а да се у мрежу шаље у виду (ограниченог) броја струјних импулса.



Сл.4. Принцип управљања са изостављањем импулса

Да би изостављање импулса дало оптималне резултате неопходно је, на основу криве ефикасности, правилно изабрати амплитуду појединачног струјног импулса $I_{o,\eta,max}$ (треба да одговара снази при којој је ефикасност максимална - $P_{\eta,max}$) и ниво излазне снаге при коме почиње изостављање (снага при којој почиње значајно смањење ефикасности - $P_{\eta,<} \approx 40-50\% P_{nom}$). При снагама $\leq P_{\eta,<}$ треба престати са слањем енергије у мрежу и расположивом DC струјом PV модула напунити кондензатор до максималног радног напона $V_{DC,inv,max}$. Послије тога, синхронизовано са мрежом формирати струјни импулс амплитуде $I_{o,\eta,max}$, периода $T_{50Hz} = 20$ ms. Измјерити напон кондензатора на почетку $V_{DC}(k-1)$ и на крају периода $V_{DC}(k)$. Ако је $(V_{DC}(k-1) - V_{DC}(k)) \leq (V_{DC}(k) - V_{DC,inv,min})$, формирати следећи импулс, а ако није престати са формирањем импулса и напунити кондензатор до $V_{DC,inv,max}$. У овом режиму треба радити све до $P_{\eta,max}$, а на већим снагама формирати континуалну струју, водећи рачуна о једнакостима улазне и излазне снаге.

Најједноставније је функцију складиштења енергије повјерити постојећем кондензатору за изједначавање снага. Његов капацитет C_{imp} треба наћи из услова да може дати један импулс при максималном напону и при струји PV модула једнакој нули. Уз претпоставку да је кондензатор смјештен са стране PV модула, важи:

$$\diamond C_{imp} = \frac{k_{EU,CEC} \cdot P_{AC,o,max}}{\eta_{max} \cdot (V_{DC,inv,min} (V_{DC,inv,max} - V_{DC,inv,min}) / 2) \cdot \frac{T_{50Hz}}{V_{DC,inv,max} - V_{DC,inv,min}}} \quad (6)$$

За микроинвертор као **SMI-200/VDE** добије се $C_{imp} = 4300_{EU}$ (6400_{CEC}) μF . Кондензатор овако великог капацитета мора бити електролитски, што представља највеће ограничење на животно вијек PV инвертора, за који се очекује да буде око **25** год. Да би се добила мања вриједност капацитета и омогућила употреба филм

кондензатора потребно је или смјестити кондензатор у DC међуокругу (мањи капацитет готово **100** пута [8]) или усложнити топологију неком од активних метода за изједначавање снага. [14] [15]

4.3 Повећање ефикасности комбинованом методом

Комбинацијом претходне двије методе могуће је постићи даље повећање ефикасности микроинвертора. Нека је микроинвертор састављен од два идентична претварача, снаге $0.5 P_{nom}$, који имају максималну ефикасност $P_{\eta,max}$ у близини $0.5 P_{nom}$ (крива ефикасности оптимизована према η_{CEC}). При снагама које су мање или једнаке $P_{\eta,max}$, треба бити укључен један претварач и то у режиму са изостављањем импулса (са максималном ефикасношћу). Кад излазна снага микроинвертора порасте преко $P_{\eta,max}$, укључити други претварач у режиму са изостављањем импулса, и тако радити до $2 P_{\eta,max}$. За излазну снагу већу од $2 P_{\eta,max}$ постепено повећавати снагу једног, па другог претварача. На овај начин је обезбјеђено да микроинвертор већину времена ради са максималном ефикасношћу, а да при томе задржи повећану расположивост/поузданост и животно вијек кога обезбјеђује селективно укључивање појединачних претварача.

5. ЗАКЉУЧАК

Велика вриједност ефикасности η_{EU}/η_{CEC} постала је најважнија карактеристика PV система напајања, поготово ако је он заснован на микроинвертору. У раду је, послје спроведене детаљне анализе, показано да је иновативним методама у градњи и управљању микроинвертором могуће значајно повећање његове ефикасности, а такође је указано на методе и поступке који то омогућавају.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] N. Kutkut, "PV Energy Conversion and System Integration", University of Central Florida, September 2009.,
- [2] М. Шоја, Б. Блануша, "Коначни извјештај о раду на научно-истраживачком пројекту - Развој MPPT претварача за примјену у соларним системима напајања", ЕТФ Источно Сарајево, јануар, 2011.,
- [3] Erickson R. W., "Future of Power Electronics for Photovoltaic", (www.apec-conf.org/2010/...),
- [4] G. Jesmer, S. Writer, "Solar Power Optimizers Gaining Market Share. A quick look at the maximum power point tracking (MPPT) and micro-inverter markets", RenewableEnergyWorld.com, 20.11.2009.,
- [5] P. Buckley, "Solar microinverters and DC-DC power optimizers to generate USD 1.5 bn in next five years", EE Times Europe, August 23, 2010,
- [6] F.P. Baumgartner, H. Schmidt, B. Burger, R. Bründlinger, H. Häberlin, M. Zehner, "STATUS AND RELEVANCE OF THE DC VOLTRAGE DEPENDENCY OF THE INVERTER EFFICIENCY", 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and EXhibition, Fiera Milano, Session 4DO.4.6, 3-7 September 2007,

- [7] M. Valentini, A. Raducu, D. Sera, R. Teodorescu, “*PV Inverter Test Setup for European Efficiency, Static and Dynamic MPPT Efficiency Evaluation*”, 11th International Conference - OPTIM 2008, Brasov, 22-24 May 2008, pp. 433 – 438,
- [8] S. Baekhoej Kjaer, J. K. Pedersen, F. Blaabjerg, “*A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules*”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 41, NO. 5, SEPTEMBER/OCTOBER 2005.,
- [9] R. Kollman, “*Power Tip #11: Resolve Power Supply Circuit Losses*”, POWER MANAGEMENT Design Line, June 2009.,
- [10] R. Kollman, “*Power Tip 12: Maximize Power Supply Efficiency*”, POWER MANAGEMENT Design Line, June 2009.,
- [11] V. Biancomano, “*Energy Star update eases Active efficiency spec*”, POWER MANAGEMENT Design Line, March, 2008.,
- [12] www.enecsys.com, February 2011.,
- [13] M. Šoja, M. Ikić, M. Banjanin, M. Đ. Radmanović, “*Improving Efficiency of Power Electronics Converters*”, ELECTRONICS, VOL.14, No.2, Banja Luka, DECEMBER 2010., page 37-42,
- [14] P. T. Krein, R. S. Balog, “*Cost-Effective Hundred-Year Life for Single-Phase Inverters and Rectifiers in Solar and LED Lighting Applications Based on Minimum Capacitance Requirements and a Ripple Power Port*”, APEC 2009. pp. 620 – 625,
- [15] W. Bower, R. West, A. Dickerson, “*INNOVATIVE PV MICRO-INVERTER TOPOLOGY ELIMINATES ELECTROLYTIC CAPACITORS FOR LONGER LIFETIME*”, Photovoltaic Energy Conversion, 7-12 May 2006., pp. 2038 – 2041.