

Фотонапонски емулятори засновани на DC-DC претварачима

Раде Пелемиш
Братунац, Босна и Херцеговина
radepelemis@outlook.com

Срђан Лале, Слободан Лубура, Миломир Шоја
Електротехнички факултет, Универзитет у Источном Сарајеву
Источно Сарајево, Босна и Херцеговина
srdjan.lale@etf.ues.rs.ba, slobodan.lubura@etf.ues.rs.ba,
milomir.soja@etf.ues.rs.ba

Сажетак— Фотонапонски емулятори су веома актуелни у области енергетске електронике. Данас се све више користе различити хардверски симулатори (емулатори) који са великом тачношћу oponaшају електричне карактеристике фотонапонских модула. Фотонапонски емулятори могу у потпуности замијенити праве фотонапонске модуле приликом експерименталног тестирања различитих фотонапонских система, чиме се избјегава утицај атмосферских услова на лабораторијска испитивања, омогућава поновљивост резултата у контролисаним лабораторијским условима, смањује цијена тестирања итд. У овом раду је извршена анализа, симулација и експериментална верификација фотонапонског емулятора заснованог на спуштачу напона са струјним управљањем.

Кључне ријечи— фотонапонски емулятори; DC-DC претварачи; спуштач напона; струјно управљање;

I. УВОД

Фотонапонски (енг. *Photovoltaic* – PV) модули претварају енергију Сунца у електричну енергију, тј. дјеловањем фотона, који носе Сунчеву енергију, на електроне у полупроводничким компонентама ствара се једносмјерна струја. PV модул или соларни панел је сачињен од више соларних (PV) ћелија. PV модули се даље могу повезивати серијски или паралелно да би се остварили жељени напон или струја, респективно [1]. Перформансе PV модула се мјере при стандардним тестним условима (енг. *Standard Test Conditions* – STC). STC подразумевају да је PV модул изложен осунчаности или инсолацији која износи 1000 W/m^2 и температуре од 25°C (298 K). У општем случају напон, струја и снага PV модула се мијењају при промјени осунчаности, температуре, амбијенталних услова (прашина, запрљања и слично) или при промјени оптерећења.

PV емулятор је нелинеарна напојна јединица која може да oponaша струјно-напонску (I-V) или карактеристику снаге (P-V) PV модула. PV емулятори омогућавају поуздано контролисање, односно имитацију промјена атмосферских услова, као и понављање истих услова у процесу испитивања, чиме се постиже брже и ефикасније тестирање цјелокупног система који користи PV модуле као изворе напајања. PV емулятори могу да oponaшају карактеристике

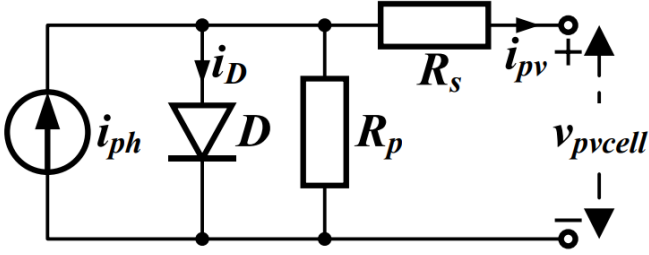
једног PV модула или читавог низа PV модула (енг. *Solar Array Simulator* – SAS) [2]. На тржишту се најчешће могу наћи PV емулятори који су израђени као програмабилне напојне јединице, у којима је могуће, преко корисничког интерфејса, подесити све потребне параметре за испитивање. Иако имају широк спектар различитих функција, уз могућност рада са великим напонима и струјама карактеристичним за PV низ, главни недостатак комерцијално доступних PV емулятора је веома висока цијена. Због тога се развијају јефтинија рјешења којима би се опонашале струјно-напонска и карактеристика снаге PV модула.

Прекидачки претварачи енергетске електронике (енг. *Switched-mode Power Supply* – SMPS) су веома заступљени у изради PV емулятора. Пошто транзистори у прекидачком режиму имају мање губитке, PV емулятори реализовани помоћу прекидачких претварача су ефикаснији. Излазни напон претварача се лако регулише подешавајући фактор испуне D . Спуштач напона (енг. *Buck Converter*) је најпогоднији за израду PV емулятора, јер може да покрије велики дио I-V карактеристике PV модула уколико је улазни напон спуштача већи од напона празног хода PV модула, једноставан је за пројектовање и потребан је мали број компоненти за имплементацију. Због ових особина у многим научним радовима, као нпр. у [3] и [4] користе се баш спуштачи напона за израду PV емулятора. Посебно треба обратити пажњу да претварач ради у режиму континуалне струје и да њена таласност има што мањи утицај на излазни напон и струју [2].

У овом раду је описан, симулиран и експериментално испитан PV емулятор заснован на спуштачу напона са струјним управљањем. Рад је организован на следећи начин. У поглављу II описан је математички модел PV модула који се користи за рачунање референтне струје у процесу управљања PV емулятором. У поглављу III је представљена општа идејна реализација PV емулятора заснованог на DC-DC претварачима, са струјним управљањем. Реализација PV емулятора заснованог на спуштачу напона са струјним управљањем је представљена у поглављу IV. Симулациони и експериментални резултати дати су у поглављима V и VI, респективно. Закључак је дат у поглављу VII.

II. МОДЕЛ PV МОДУЛА

Да би се реализовао PV емулятор, мора се добро познавати математички модел PV модула, јер модел даје референтну струју или напон модула. Математички модел PV модула се добија из добро познатог једнодиодног еквивалентног кола PV ћелије, са паралелном и серијском отпорношћу, као што је приказано на Сл. 1 [5].



Слика 1. Једнодиодно еквивалентно коло PV ћелије [5].

Коло са Сл. 1 се може описати следећим једначинама, које су дате у [6]:

$$i_{pv} = i_{ph} - I_r \left(e^{\frac{q(v_{pvcell} + R_s i_{pv})}{\eta k T}} - 1 \right) - \frac{(v_{pvcell} + R_s i_{pv})}{R_p} \quad (1)$$

$$i_{ph} = [I_{sc} + \alpha(T - T_0)] \frac{I_{ins}}{1000} \quad (2)$$

$$I_r = I_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 e^{\frac{q E_g \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)}{\eta k}} \quad (3)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc} - \frac{V_{occell}}{R_p}}{e^{\frac{q V_{occell}}{\eta k T_0}} - 1} \quad (4)$$

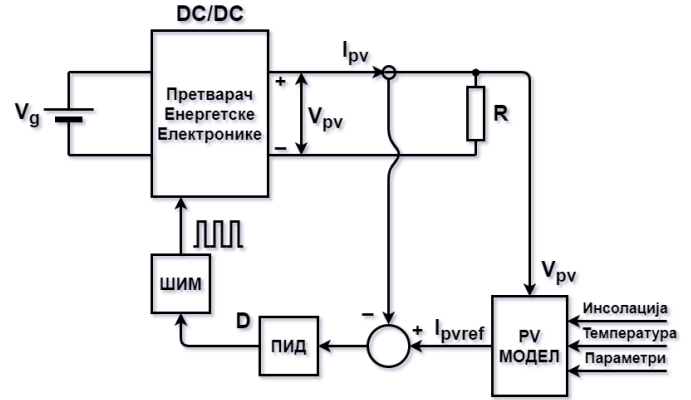
$$v_{pvcell} = \frac{v_{pv}}{N_s}, V_{occell} = \frac{V_{oc}}{N_s} \quad (5)$$

гдје v_{pv} и i_{pv} означавају напон и струју PV модула, респективно, v_{pvcell} је напон PV ћелије, i_{ph} је фотоструја, I_{sc} је струја кратког споја PV модула при STC, V_{oc} и V_{occell} су напони празног хода PV модула и PV ћелије, респективно, при STC, R_p и R_s су паралелна и серијска отпорност, I_r је инверзна струја засићења диоде, I_0 је инверзна струја засићења диоде при STC, I_{ins} је интензитет Сунчевог зрачења, T је атмосферска температура, T_0 је температура при STC ($T_0 = 298$ K), α је температурни коефицијент ($\alpha = 6$ mA/°C), q је наелектрисање електрона ($q = 1.6 \times 10^{-19}$ C), η је фактор идеалности p-n споја ($\eta = 1.101$), k је Болцманова константа ($k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K), E_g је енергетски процјеп ($E_g = 1.1$ eV), и N_s представља број PV ћелија повезаних у серију. Из једначина (1)-(5) се јасно види да модел има три улаза: напон PV модула v_{pv} , инсолацију I_{ins} и температуру T и један излаз: струју PV

модула i_{pv} . Параметри модела као што су I_{sc} и V_{oc} су параметри који се читавају из каталога PV модула [5].

III. PV ЕМУЛАТОРИ ЗАСНОВАНИ НА DC-DC ПРЕТВАРАЧИМА

На Сл. 2 је приказана структурна блок шема PV емулятора заснованог на DC-DC претварачу, са струјним управљањем.



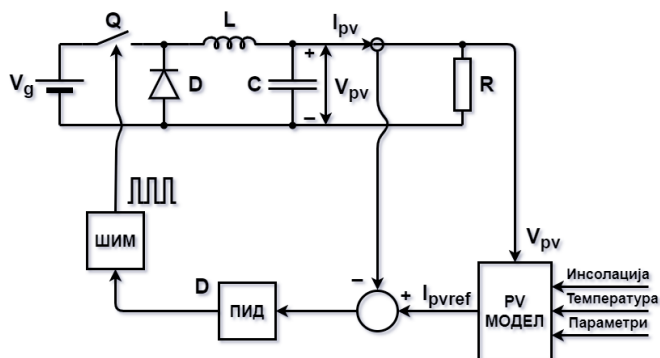
Слика 2. Структурна блок шема PV емулятора заснованог на DC-DC претварачу, са струјним управљањем.

Са слике се види да структурну шему чине четири градивна блока. Први и најважнији градивни блок је DC-DC претварач енергетске електронике, који чини енергетски дио емулятора. Управљачки дио система чине модел PV модула, описан у поглављу II, пропорционално-интегрално-диференцијални (ПИД) регулатор и ширинско-импулсни модулатор (ШИМ). Хардверска имплементација модела PV модула, заједно са ПИД регулатором и ШИМ генератором, тј. цјелокупан управљачки дио система, се најчешће у литератури реализује помоћу микроконтролера [7],[8]. Поред микроконтролера, заступљена су и FPGA (енг. *Field Programmable Gate Arrays*) кола [9], [10], а због лакше израде прототипа и честих измјена услова испитивања све се чешће, за управљање PV емуляторима, користе аквизиционе картице уграђене у рачунар, као нпр. *Humusoft* или *dSpace*, које се програмирају у графичком окружењу помоћу софтверског алата MATLAB/Simulink [11], [5].

IV. PV ЕМУЛАТОР ЗАСНОВАН НА СПУШТАЧУ НАПОНА СА СТРУЈНИМ УПРАВЉАЊЕМ

Као што је већ речено у уводном дијелу овог рада, спуштач напона је веома заступљен у изради PV емулятора из разлога што има мањи број компоненти од осталих DC-DC претварача, па је самим тим јефтинији и једноставнији за пројектовање и имплементацију. Посебна предност спуштача напона у односу на остале DC-DC претвараче енергетске електронике је рад у режиму континуалне излазне струје. У стационарном стању је средња вриједност струје завојнице једнака излазној струји претварача.

На Сл. 3 дата је шема PV емулятора који је реализован у овом раду.



Слика 3. PV емулятор са спуштачем напона и струјним управљањем.

Једначине које описују излазни напон и струју спуштача напона у стационарном стању су:

$$V_0 = V_{PV} = DV_g \quad (6)$$

$$I_0 = I_{PV} = I_L = \frac{V_{PV}}{R} \quad (7)$$

Из претходних једначина се види да је излазни напон спуштача једнак излазном напону PV емулятора, а средња вриједност струје завојнице, тј. излазна струја претварача једнака је излазној струји PV емулятора. Управо је због ове особине спуштача напона, управљање PV емулятором по излазној струји најпогодније за примјену.

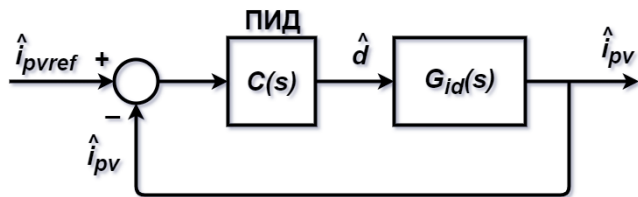
А. Процедура пројектовања ПИД регулатора

Да би се пројектовао ПИД регулатор за управљање претварачем енергетске електронике, потребно је познавати функцију преноса претварача. Функција преноса спуштача напона од фактора испуне ка излазној струји се може добити примјеном тзв. „small-signal“ анализе, као што је показано у [12].

Функција преноса спуштача напона од фактора испуне ка излазној струји је дата једначином:

$$G_{id}(s) = \frac{i_{pv}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{\frac{V_g}{R}}{1 + \frac{L}{R}s + LCs^2}. \quad (8)$$

На Сл. 4 је дата структурна блок шема управљања PV емулятором.



Слика 4. Структурна блок шема управљања PV емулятором.

ПИД регулатор се састоји од пропорционалног појачања k_p , интегралног појачања k_i и диференцијалног појачања k_d , као што је приказано у (9).

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s = \frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{s} \quad (9)$$

$$W_p(s) = C(s) \cdot G_{id}(s) \quad (10)$$

$$D(s) = 1 + W_p(s) = 0 \quad (11)$$

Користећи једначине (8)-(11) и методу подешавања полова, за изабране вриједности параметара спуштача напона, добијамо појачања ПИД регулатора:

$$k_p = 0.06928571431,$$

$$k_i = 106.0714286,$$

$$k_d = 0.0001335714286.$$

В. СИМУЛАЦИОНИ РЕЗУЛТАТИ

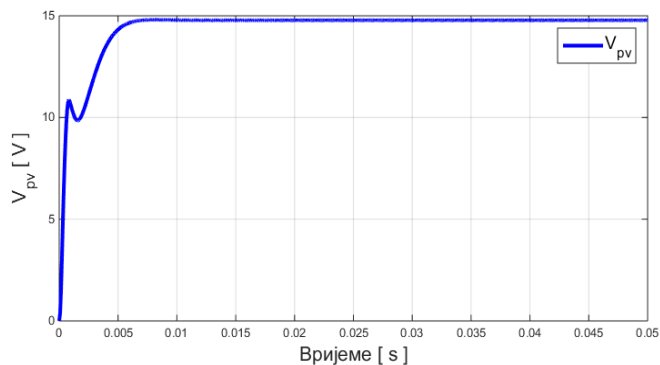
Вриједности параметара који су коришћени у симулацијама су приказане у табели I.

ТАБЕЛА I. ПАРАМЕТРИ СИМУЛАЦИЈЕ

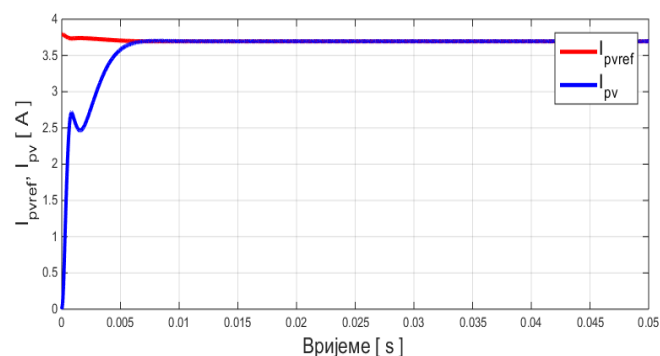
Параметри	Опис	Вриједности
Спуштач напона		
V_g	Улазни напон	28 V
L	Индуктивност завојнице	220 μ N
C	Капацитивност кондензатора	1000 μ F
R	Отпорност оптерећења	4 Ω
f_s	Прекидачка фреквенција	20 kHz
ПИД регулатор		
k_p	Пропорционално појачање	0.06928571431
k_i	Интегрално појачање	106.0714286
k_d	Диференцијално појачање	0.0001335714286
PV модел		
I_{sc}	Струја кратког споја PV модула при STC	3.8 A
V_{oc}	Напон празног хода PV модула при STC	21.1 V
V_{mpp}	Напон у тачки максималне снаге PV модула при STC	17.1 V
I_{mpp}	Струја у тачки максималне снаге PV модула при STC	3.5 A
N_s	Број PV ћелија повезаних у серију	36
R_s	Серијска отпорност PV ћелије	0.0102 Ω
R_p	Паралелна отпорност PV ћелије	5.2022 Ω

Симулације су урађене у програмском окружењу MATLAB/Simulink. Посматрано је неколико тестних случајева.

На Сл. 5 и Сл. 6 су приказани излазни напон и струја PV емулятора у стационарном стању, респективно.



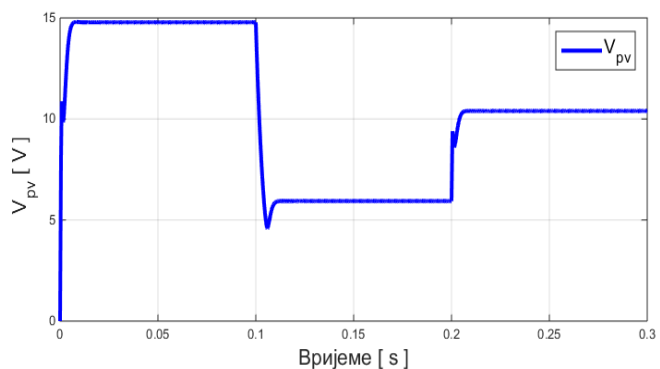
Слика 5. Излазни напон PV емулятора.



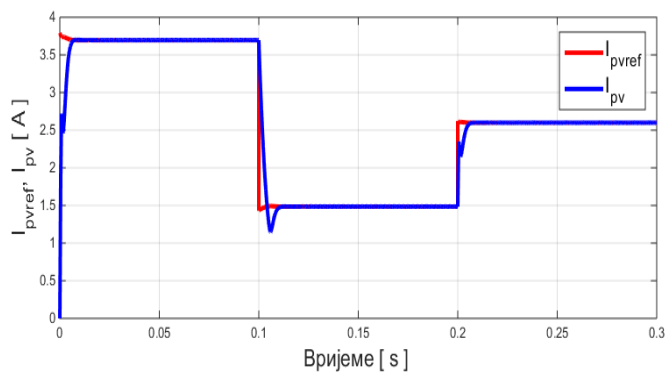
Слика 6. Референтна и излазна струја PV емулятора.

Са Сл. 6 се види да излазна струја прецизно прати референтну струју.

На Сл. 7 и Сл. 8 су приказани излазни напон и излазна струја PV емулятора при скоковитим промјенама инсолације од $1000 \rightarrow 400 \rightarrow 700 \text{ W/m}^2$.



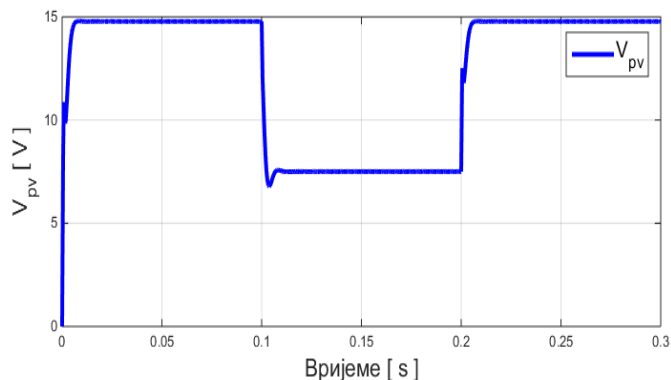
Слика 7. Излазни напон PV емулятора при промјени инсолације.



Слика 8. Референтна и излазна струја PV емулятора при промјени инсолације.

Са Сл. 7 и Сл. 8 се може видјети да излазни напон и струја PV емулятора брзо улазе у ново стационарно стање за око 20 ms, као и да излазна струја прецизно прати референтну струју у стационарном стању.

На Сл. 9 је приказан таласни облик излазног напона PV емулятора при скоковитој промјени оптерећења од $4 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \Omega$.



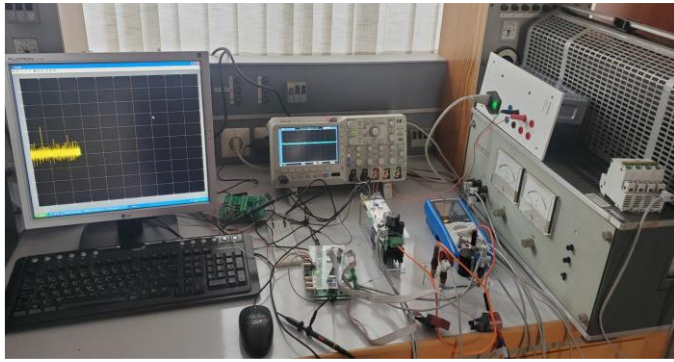
Слика 9. Излазни напон PV емулятора при промјени оптерећења од $4 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \Omega$, при константној инсолацији и температури.

Као и у претходним случајевима, вријеме прелаза у ново стационарно стање је отприлике 20 ms.

VI. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

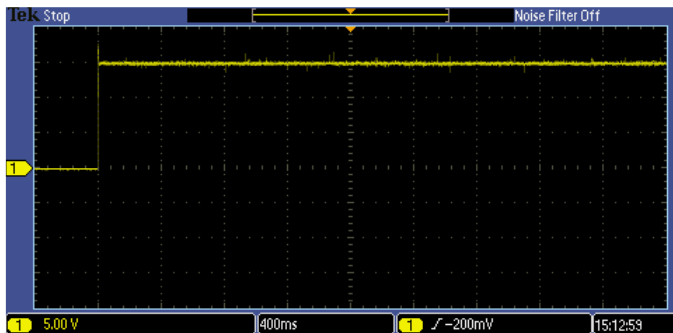
На Сл. 10 је приказана практична реализација PV емулятора, заснованог на спуштачу напона са струјним управљањем, који је описан у поглављу IV овог рада.

Спуштач напона је реализован помоћу тзв. SPM (енг. *Series of Power Modules*) модуларних блокова. За реализацију је коришћен полумосни синхрони SiC DC-DC претварач SPM-HB [13], са својим драјверским (побудним) модулом GDC-2A2S1 [14]. За аквизицију измјерених вриједности излазног напона и струје спуштача напона и имплементацију математичког модела PV модула, ПИД регулатора и ШИМ генератора коришћена је аквизициона картица MF 624 [15]. Аквизиционом картицом се управља помоћу програма MATLAB/Simulink у реалном времену.

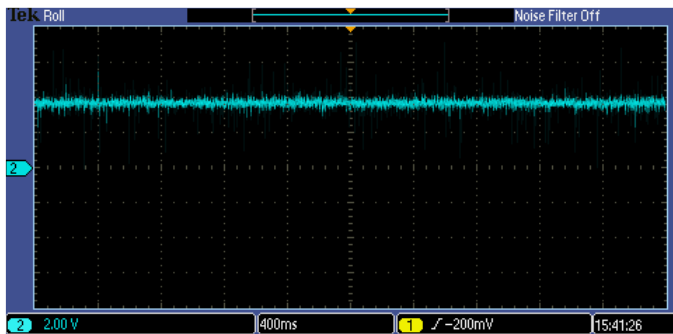


Слика 10. Практична реализација PV емулятора, заснованог на спуштачу напона са струјним управљањем.

На Сл. 11 и Сл. 12 су приказани излазни напон и струја реализованог PV емулятора, у стационарном стању.



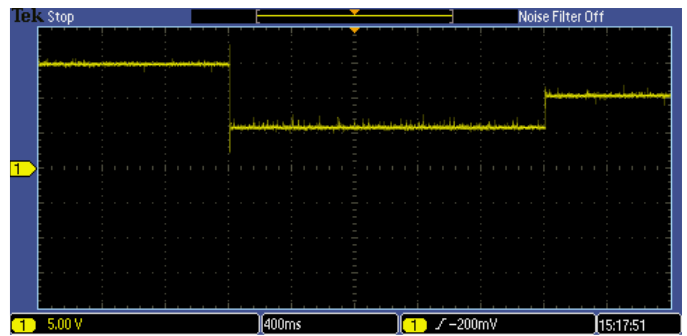
Слика 11. Излазни напон PV емулятора при STC и $R = 4 \Omega$.



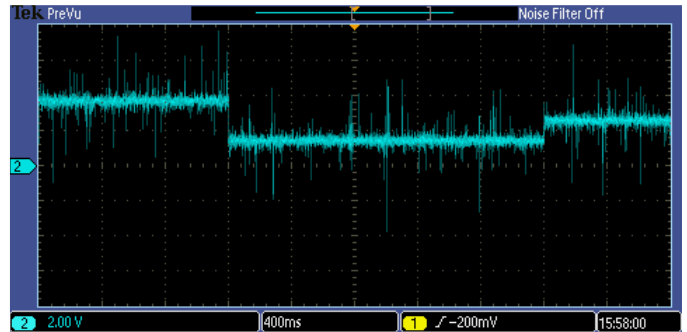
Слика 12. Излазна струја PV емулятора при STC и $R = 4 \Omega$.

Са Сл. 11 и Сл. 12 се види да у стационарном стању излазни напон и излазна струја PV емулятора имају стабилне и очекиване вриједности, као што је показано и симулацијама на Сл. 5 и Сл. 6, респективно.

На Сл. 13 и Сл. 14 су приказани таласни облици излазног напона и струје реализованог PV емулятора при скоковитим промјенама инсолације од $1000 \rightarrow 400 \rightarrow 700 \text{ W/m}^2$.



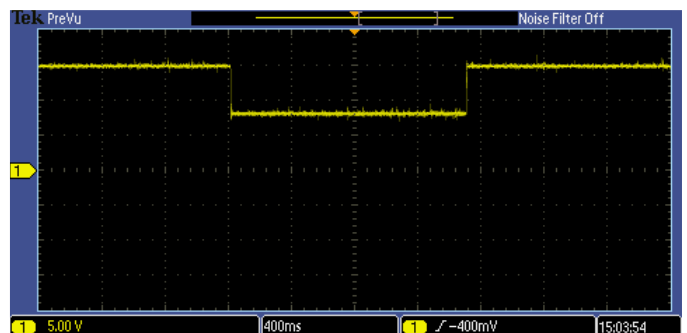
Слика 13. Излазни напон реализованог PV емулятора при промјени инсолације.



Слика 14. Излазна струја реализованог PV емулятора при промјени инсолације.

Са Сл. 13 и Сл. 14 се види да излазни напон и струја веома брзо улазе у ново стационарно стање, као што је такође показано у симулацијама на Сл. 7 и Сл. 8, респективно.

На Сл. 15 је приказан излазни напон реализованог PV емулятора при скоковитој промјени оптерећења од $4 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \Omega$. Излазни напон веома брзо улази у ново стационарно стање, слично као у симулацији (Сл. 9).



Слика 15. Излазни напон реализованог PV емулятора при промјени оптерећења.

У табели II су приказане процентуалне грешке напона и струје реализованог PV емулятора, за различите вриједности инсолације и температуре при $R = 4 \Omega$. Грешке су израчунате у односу на симулационе резултате.

ТАБЕЛА II. ПРОЦЕНТУАЛНЕ ГРЕШКЕ

I_{ins} [W/m ²]	T [K]	Грешка напона [%]	Грешка струје [%]
1000	298	0.321	0.392
700	293	0.337	0.05
400	288	0.222	0.568

Из табеле II се види да се измјерене експерименталне вриједности незнатно разликују од оних добијених симулацијама. Грешке при мјерењу се јављају услед несавршености мјерних инструмената и коришћених компоненти, као и због појаве шума.

VII. ЗАКЉУЧАК

У овом раду је дат опис PV емулятора заснованих на DC-DC претварањима. Представљена је градивна блок структура PV емулятора која се састоји од енергетског дијела – DC-DC претварача, и управљачког дијела који се састоји од модела PV модула, ПИД регулатора и ШИМ генератора. Описан је спуштач напона као енергетски дио PV емулятора, са својим предностима у односу на остале DC-DC претвараоче, а посебно је истакнут рад у режиму континуалне излазне струје. Представљена је процедура пројектовања ПИД регулатора за случај управљања спуштачем по излазној струји. Након тога, извршене су симулације рада PV емулятора заснованог на спуштачу напона са струјним управљањем, у програмском окружењу MATLAB/Simulink. Приказани су резултати симулација за различите тестне услове.

Након симулационе анализе извршена је практична реализација и експериментална верификација PV емулятора заснованог на спуштачу напона са струјним управљањем. Дати су резултати експеримената и упоређени са резултатима добијеним у симулацијама. Добијени симулациони и експериментални резултати потврђују одличне особине развијеног PV емулятора, као што су изузетна прецизност праћења карактеристика модела PV модула, одлична динамика и робусност емулятора приликом промјена радних услова. Предложени PV емулятор се може користити прије свега у едукативне сврхе, посебно из области енергетске електронике и обновљивих извора енергије, али и као основа у будућем истраживању и развоју PV емулятора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Plante, Russel H., „Solar Energy, Photovoltaics, and Domestic Hot Water“, Academic Press, 2014.
- [2] Ayop, R., Tan, C. W., „A comprehensive review on photovoltaic emulator“, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017.
- [3] S Mohammed Azharuddin, Vysakh M, Harshal Vilas Thakur, Nishant B, Sudhakar Babu, Muralidhar K, Don Paul, Basil Jacob, Karthik Balasubramanian, N Rajasekar, „A near accurate solar PV emulator using

dSPACE controller for real-time control“, The 6th International Conference on Applied Energy – ICAE2014, 2014.

- [4] C.H. Balakishan, N. Sandeep, „Development of Microcontroller Based PV Emulator with Current Controlled DC-DC Buck Converter“, International Journal of Renewable Energy Research, vol. 4, no. 4, 2014.
- [5] Srđan Lale, Milomir Šoja, Slobodan Lubura, Marko Ikić, „Educational Experimental Platform for Emulation of Photovoltaic Modules“, International Journal of Electrical Engineering and Computing, vol. 2, no.2, 2018.
- [6] Leonardo Poltronieri Sampaio, Sergio Augusto Oliveira da Silva, „Graphic computational platform integrated with an electronic emulator dedicated to photovoltaic systems teaching“, IET Power Electronics, 2017.
- [7] Atoche AC, Castillo JV, Ortégón-Aguilar J, Carrasco-Alvarez R, Gío JS, ColliMenchi A., „A high-accuracy photovoltaic emulator system using arm processors“, Sol Energy, 2015.
- [8] Jesus Gonzales-Llorente, Andres Rambal-Vecino, Luciano A. Garcia-Rodriguez, Juan C. Balda, Eduardo I. Ortiz-Rivera, „Simple and Efficient Low Power Photovoltaic Emulator for Evaluation of Power Conditioning Systems“, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2016.
- [9] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, V. Tzitzionis, „Development of FPGA-based system for real-time simulation of photovoltaic modules“, Microelectronics Journal, 2008.
- [10] H. Mekki, A. Mellit, S.A. Kalogirou, A. Messai, G. Furlan, „FPGA-based implementation of a real time photovoltaic module simulator“, Progress in Photovoltaics: Research and applications, 2010.
- [11] S Mohammed Azharuddin, Vysakh M, Harshal Vilas Thakur, Nishant B, Sudhakar Babu, Muralidhar K, Don Paul, Basil Jacob, Karthik Balasubramanian, N Rajasekar, „A near accurate solar PV emulator using dSPACE controller for real-time control“, The 6th International Conference on Applied Energy – ICAE2014, 2014.
- [12] R.W. Erickson, D. Maksimović, „AC Equivalent Circuit Modeling“, Fundamentals of Power Electronics, 187-263, 2001.
- [13] <https://www.taraztechnologies.com/Downloads/Datasheets/SPM-HB.pdf>, Новембар 2020.
- [14] <https://www.taraztechnologies.com/Downloads/Datasheets/GDC-2A2S1.pdf>, Новембар 2020.
- [15] <https://www.humusoft.cz/datacq/mf624/>, Новембар 2020.

ABSTRACT

Photovoltaic emulators are very popular in the field of power electronics. Today, various hardware simulators (emulators) are being increasingly used for imitating the electrical characteristics of photovoltaic modules with excellent accuracy. Photovoltaic emulators can completely replace real photovoltaic modules during experimental tests of different photovoltaic systems, thus avoiding the influence of atmospheric conditions on laboratory verification process, enabling repeatability of results in controlled laboratory conditions, reducing the cost of testing etc. In this paper, the analysis, simulation and experimental verification of the photovoltaic emulator based on the buck converter with current control mode, is performed.

PHOTOVOLTAIC EMULATORS BASED ON DC-DC CONVERTERS

Rade Pelemiš, Srđan Lale, Slobodan Lubura, Milomir Šoja