

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет



Дипломски рад
Упоредна анализа основних алгоритама за
проналажење тачке максималне снаге
фотонапонских система

Студент: Катарина Ђеранић 16/552 Ментор: проф. др Слободан Вукосавић

Београд, септембар 2021

Захвалница

Највећој подршци – оцу Жељку и мајци Далиборки

Садржај

1. Увод	4
2. Фотонапонски панели	5
2.1. Фотонапонски ефекат и $P-N$ спој	5
2.2. Карактеристике фотонапонских ћелија	6
3. <i>MPPT</i> алгоритми.....	8
3.1. <i>Perturb and Observe MPPT</i> алгоритам.....	8
3.2. <i>Incremental Conductance MPPT</i> алгоритам	10
4. Критеријуми упоредне анализе.....	12
5. Резултати симулација	13
5.1. Способност лоцирања тачке максималне снаге	13
5.2. Успостављање одзива и пропусни опсег.....	14
5.3. Робусност на промене ирадијације	15
5.4. Губици снаге услед осцилација око тачке максималне снаге.....	18
5.5. Имплементација на реалном систему	19
6. Закључак	20
7. Литература	21

1. Увод

Последњих неколико деценија окарактерисано је све већом употребом обновљивих извора енергије [1][2]. Овоме је понајвише допринело смањење расположивих залиха традиционалних извора енергије, најчешће фосилних горива. Такође, сагоревање фосилних горива ради производње електричне енергије доприноси загађењу ваздуха, воде и земље, као и глобалном загревању, једном од највећих проблема модерног друштва.

Са аспекта одрживости представници академије и индустрије су посебно заинтересовани за енергију Сунца и ветра. Неопходно је изучавати технологије које се баве експлоатацијом оба типа извора услед комплементарности њиховог деловања – лети ће се у великој мери користити енергија Сунца због њеног изобиља, а у јесен и зиму ће услед активности ветра више електричне енергије бити добијено радом ветротурбина. Главни проблем који постоји је непредвидивост ових извора, што доводи до неоптималог искоришћења расположивих капацитета. То заједно са децентрализацијом производног система захтева нова решења како са хардверске, тако и са софтверске стране.

Један од начина искоришћења сунчеве енергије је коришћење независних фотонапонских (ФН) система у сеоским домаћинствима или објектима на изолованим локацијама услед потенцијалне недоступности преносне мреже [3]. Ови системи се такође могу користити и као помоћни системи нпр. за загревање воде. Сходно томе, неопходно је обезбедити поуздане и робусне уређаје који ће посредовати између ФН панела и потрошача са највећим могућим искоришћењем расположиве снаге. Такав уређај и по својој цени мора бити конкурентан, те је произвођачу циљ да се исти произведе користећи што јефтиније компоненте и сировине.

На пољу највећег искоришћења расположивог сунчевог зрачења од софтверског алата су развијени *MPPT (Maximum Power Point Tracking)* алгоритми тј. алгоритми који лоцирају радну тачку највеће снаге чиме омогућавају највећу експлоатацију. Током година су развијена различита решења, са аспекта једноставности примене и рачунарске снаге коју захтевају.

Овај рад представља упоредну анализу основних *MPPT* алгоритама по питању перформанси у нормалним условима, као и при променама осветљења. Дат је теоријски увод у начин рада разматраних алгоритама, као и њихове очекиване предности и мане. Поређење перформанси извршено је коришћењем софтверског пакета *MATLAB-Simulink*.

2. Фотонапонски панели

Фотонапонски или соларни модули представљају скуп фотонапонских ћелија повезаних редно или паралелно. Када се модули међусобно повежу у редове тј. стрингове, добијају се панели. Фотонапонски панели користе енергију Сунца тј. фотоне које оно емитује како би генерисали једносмерну струју преко фотонапонског ефекта. Овај ефекат карактерише екситација електрона и раздвајање наелектрисања у оквиру материјала. Тај процес се још назива и дифузија [4].

Прву соларну ћелију је конструисао Чарлс Фриц 1884. године од селена пресвученог танким слојем злата. Међутим, она је имала јако малу ефикасност. Данас се фотонапонске ћелије махом производе од силицијума, али и других материјала. Материјали од којих се праве фотонапонске ћелије су или дебелослојни силицијум, изведен као поликристални или монокристални, или танкослојни хомоспојни и хетероспојни материјали на бази силицијума и галијума. Од поменутих типова, најчешће се користи монокристални силицијум због својих добрих карактеристика – ефикасности и дебљине слоја у којем се може извести.

2.1. Фотонапонски ефекат и $P-N$ спој

Фотонапонски ефекат се дешава када сунчева или нека друга светлост са довољном енергијом падне на фото-ћелију побуђујући тако електроне који се налазе у валентном појасу атома. Ови побуђени електрони се одвајају од матичног електрона и постају слободни. Поред електрона, тј. електронегативног носиоца, битно је и одсуство негативног наелектрисања, које се назива шупљина и посматра као позитивни носилац. Кретање поменутих носилаца кроз полупроводничку фотонапонску ћелију је основни разлог постојања фотонапонског ефекта [5].

Ћелија је састављена из два дела – P (позитивног) и N (негативног) типа полупроводника. Електропозитивни односно P тип се добија допирањем силицијума са атомима бора чиме се добија електрон-позитивна средина обилата шупљинама. Тај тип се зове акцептор, јер прима слободне електроне. Електронегативни N тип полупроводника назива се још и донор јер одаје електроне. Добија се допирањем силицијума елементима, попут фосфора.

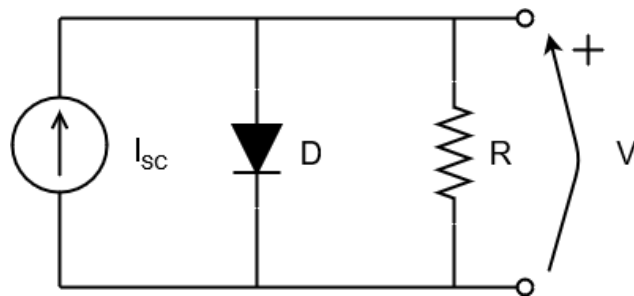
Макроскопски посматрано, $P-N$ спој је електронеутралан, али омогућава да електрична струја тече само у једном правцу. Услед таквог понашања, $P-N$ спој се користи као основа за многобројне полупроводничке уређаје попут диода, транзистора, фотонапонских ћелија, LED диода и интегрисаних кола.

На месту додире две средине, појављује се област просторног товара услед дифузије и рекомбинације носилаца. Тада настају непокретни јони који спречавају даљу дифузију. Побуђивањем носилаца дешава се њихово раздвајање, чиме се прави поље супротног смера од смера поља просторног товара. Ако су спољашњи прикључци ћелије

отворени, напон на њима ће расти све до оне вредности која је довољна да поништи поље просторног товара. Даљи пораст напона не може да се оствари и вишак енергије се дисипира у виду топлотних губитака [6].

2.2. Карактеристике фотонапонских ћелија

Фотонапонска ћелија се, за потребе макроскопске анализе, моделује као паралелна веза идеалног струјног извора, диоде и отпорности као што је приказано на Слици 1 [6].

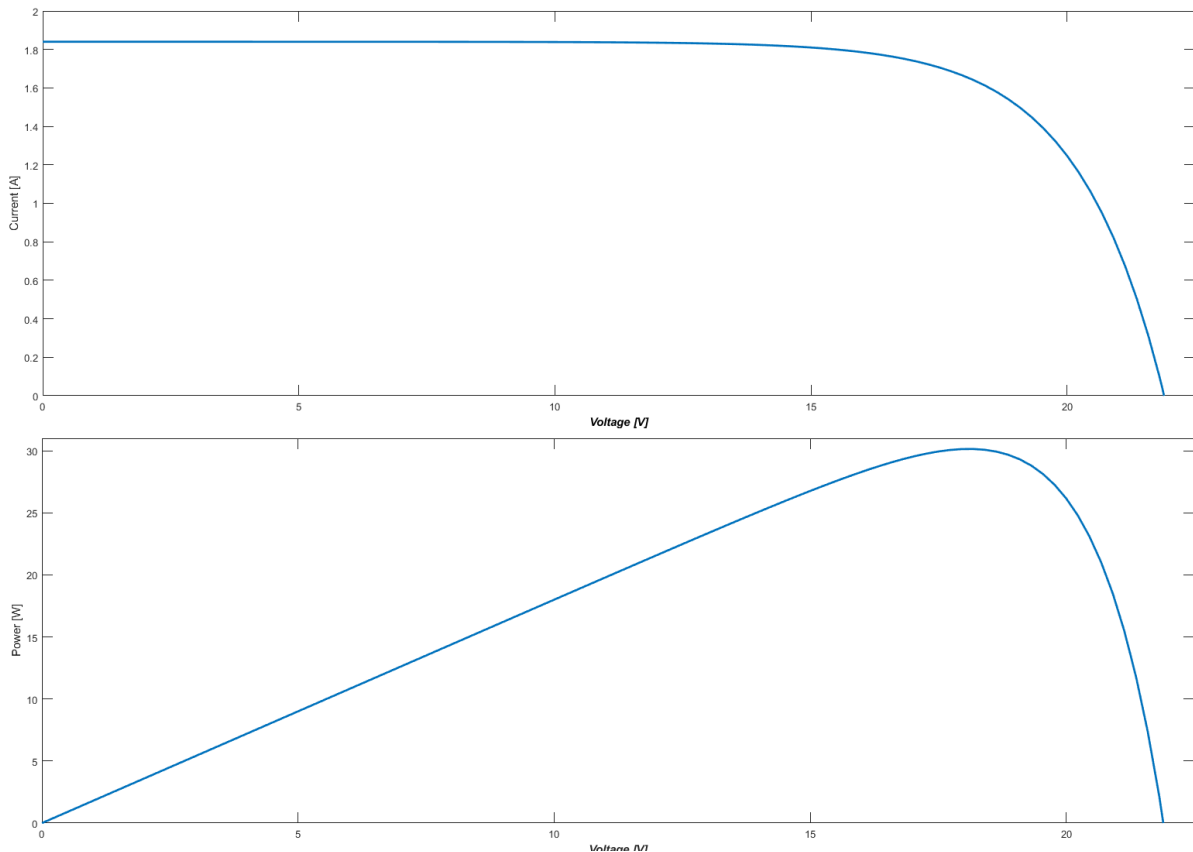


Слика 1 . Модел соларне ћелије

Струја коју ћелија генерише директно је пропорционална ирадијацији тј. количини Сунчеве енергије која падне на њену површину [3].

Диода моделује понашање $P-N$ споја и његово опирање протицању струје супротног смера кроз полупроводник, услед поларизације. Отпорност ћелије се односи на унутрашњу отпорност полупроводника на којој ће се дисипирати вишак енергије. Како се струја из система не би у било којој ситуацији враћала у панеле и тако их оштећивала, додају се *bypass* диоде. Оне проводе уколико се деси да сет модула или ћелија које преошћавају не ради исправно услед оштећења или прљавштине на њима. Ово доводи до више значајних одступања, односно пикова на карактеристици снаге и отежава проналажење глобалног пика карактеристике.

Због оваквог понашања самог материјала, струјно-напонска карактеристика ћелије није линеарна и приказана је на Слици 2. Одавде се види и да снага није квадратна функција зависности струје или напона као што би то био случај код резистивног оптерећења. Оптерећење које је прикључено на панел неће диктирати промену потрошње, већ ће дефинисати једну радну тачку у зависности од сопствене карактеристике. Параметри који ће активно утицати на промену радне тачке у систему су ирадијација и температура које зависе искључиво од временских прилика. У овом раду, фокус је на утицају ирадијације на производњу фотонапонског система.



Слика 1. Карактеристике панела функција струје у зависности од напона и снага

Омогућавање максимума снаге у сваком тренутку може бити остварено искључиво уколико између панела и прикључака потрошача постоји хардверски степен који може да се контролише. Тако ће импеданса коју панел види бити пролагођена што ће даље прилагодити производњу. Тај степен је најчешће DC/DC претварач снаге, а контролише се употребом већ представљеног *MPPT* алгоритма [7][8].

Са стране искоришћења производње панела најбитније су следеће величине:

- V_{OC} – напон отвореног кола,
- I_{SC} – струја кратког споја,
- V_{MPP} – напон панела у тачки максималне снаге,
- I_{MPP} – струја панела у тачки максималне снаге,
- P_{MPP} – максимална снага панела.

3. MPPT алгоритми

Као што је већ поменуто, техника експлоатације највеће снаге се развила у виду различитих алгоритама. Врло често се ради о примени базичних алгоритама који су оптимизовани за рад на специфичном претварачу у појединачном систему [9]. Међутим, постоје решења дизајнирана за велике централизоване експлоатационе јединице у виду соларних електрана. Овде су у фокусу многобројни стрингови који, неминовно, морају имати више *bypass* диода чиме се и алгоритми за тражење радне тачке максималне снаге фотонапонског система усложњавају. Овакви системи изискују микроконтролере веће рачунске моћи, повећавајући тако комплексност и цену уређаја.

Основни MPPT алгоритми су следећи:

- *Perturb and observe*
- *Incremental conductance*
- *Current sweep*
- *Constant voltage*.

Стратегија ових алгоритама је махом „пењање уз криву”. Сви они мере напоне и струје у систему, па потом прорачунавају снагу у свакој радној тачки у којој се нађу. Померање у следећу радну тачку врши се фиксним кораком, па се и за нову радну тачку прорачунава снага и упоређује са претходном. Циљ је лоцирати тачку са максималном снагом и ту се задржати до наредне промене временских услова [8]. Већа пажња прва два наведена алгоритма је посвећена у поглављима 2.1. и 2.2.

Current sweep метода или метода пребрисавања струје ажурира струјно-напонску карактеристику у фиксним временским интервалима. Напон максималне тачке снаге тада се може израчунати из карактеристичне криве у датом интервалу.

Constant voltage захтева да се испоручивање снаге при сваком пролазу прекине како би се измерио напон V_{OC} за сваки циклус. Жељени напон се задаје као део напона отвореног кола. Главни недостатак овог поступка је неминовни прекид испоруке снаге у сваком циклусу.

Од компликованијих алгоритама, битно је истаћи *Particle Swarm Optimization* метод [10]. Он подразумева да се струја и напон посматрају као независне променљиве чиме се постиже претрага по две димензије. Користан је за решавање поменутог проблема тражења максималне снаге за веће стрингове.

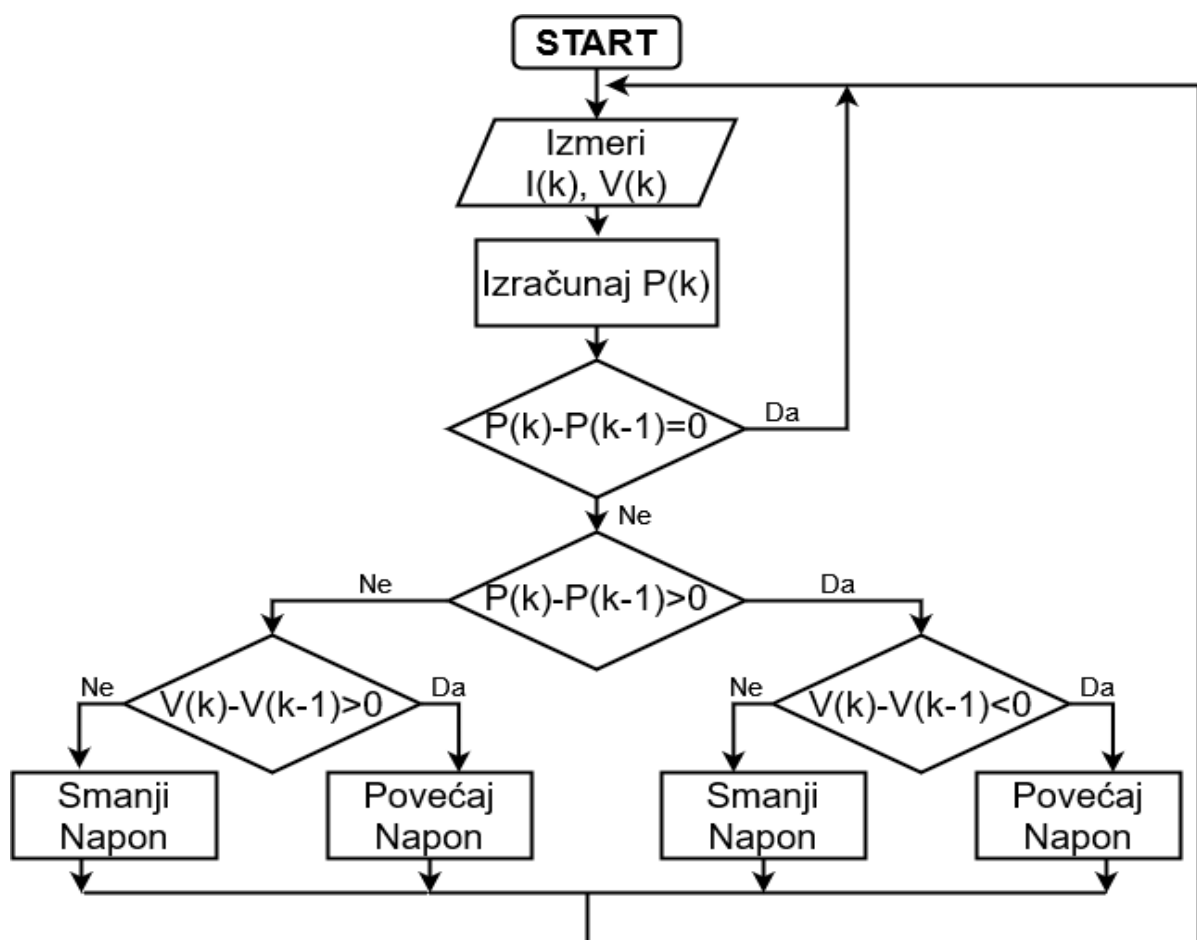
3.1. *Perturb and Observe* MPPT алгоритам

Perturb and Observe (P&O) алгоритам је најједноставнији за имплементацију [11]. Као што је већ напоменуто, реч је о интуитивном алгоритму који се пење уз нагиб криве

зависности снаге од напона како би пронашао тачку максималне снаге. За сваку радну тачку снага се рачуна као:

$$P_A = V_A \cdot I_A \quad (1)$$

Снага те тачке се упоређује са снагом радне тачке из претходног циклуса. Уколико је остварено повећање снаге трагач ће наставити да се креће у том смеру, у супротном онда се усмерава на другу страну криве. Визуелни приказ овог алгоритма дат је на Слици 3.



Слика 3 . Визуелни приказ алгоритма *Perturb and Observe*

У имплементацији, претрага криве снаге се остварује променом дужине трајања активног сигнала који долази на управљачко коло транзистора претвараача са којим се ради.

Иако $P\&O$ има доста добрих особина попут једноставности и разумљивости као и малих рачунарских капацитета које захтева, овај алгоритам има и мана. Главни проблем се своди на начин рада овог алгоритма – чак и када је у тачки максималне снаге, овај алгоритам неће мировати у тој радној тачки. Стога ће у околини тачке максималне снаге имати осцилације снаге. Поред тога, овај алгоритам не постиже најбрже пењање на врх криве [11].

3.2. *Incremental Conductance MPPT* алгоритам

Incremental Conductance (IC) алгоритам, је такође приступачно и елегантно решење проблема разматраног у овом раду. Као и $P\&O$ алгоритам, и он се пење по криви снаге, али нешто другачије. Функционише по принципу осматрања нагиба криве на којој се налази [12]. Уколико је апсолутна разлика добијених снага у некој тачки A и њој претходне A_{-1} већа од нуле, то је сигнал да треба да се настави кретање у једном или другом смеру. Ако је та разлика једнака нули, алгоритам се зауставља у тој тачки све док се струја панела не промени, а то ће се десити при промени амбијенталних услова. Име је добио по томе што упоређује инкременталну кондуктансу тј. кондуктансу која се мења променом стања са тренутном еквивалентном кондуктансом стринга.

Следи теоријско објашњење горе наведене логике. Полази се од жеље да нагиб у радној тачки буде нула.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (2)$$

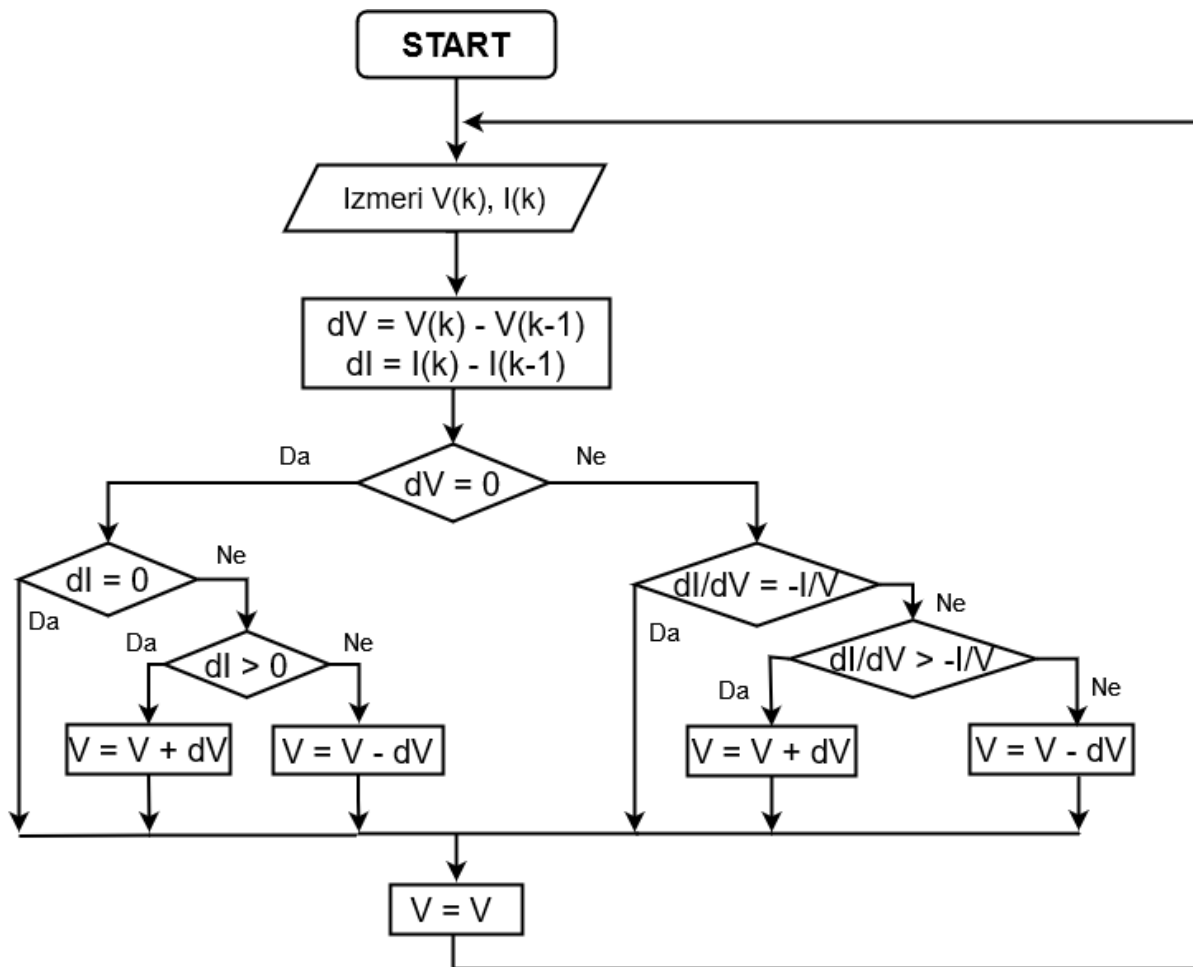
$$P = VI = VI(V) \quad (3)$$

$$\frac{dP}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I(V) \quad (4)$$

Максимум криве снаге добићемо изједначењем израза (2) и (4) и тада се добија:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I(V)}{V} \quad (5)$$

Визуелни приказ овог алгоритма је дат на Слици 4 испод.



Слика 4 . Визуелни приказ алгоритма *Incremental Conductance*

Теоријски, предности овог алгоритма су могућност лоцирања стварне тачке максималне снаге и останак у тим условима рада без генерисања малих осцилација. Мана је недостатак робусности на поремећаје.

4. Критеријуми упоредне анализе

Како би се испитало понашање посматраних алгоритама, битно је дефинисати критеријуме по којима се оцењују њихове перформансе [13]. Први и основни критеријум јесте способност лоцирања тачке максималне снаге за нормалне радне услове будући да је то њихов главни задатак. Поред тога, битна је и прилагодљивост на промене проузроковане флукуацијама у ирадијацији. Овај критеријум се још може назвати и робусност.

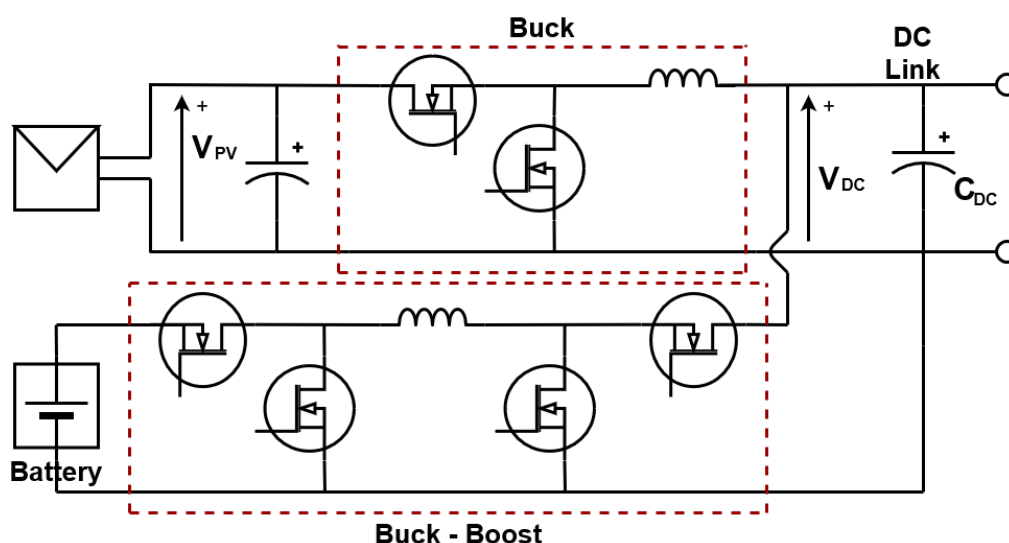
При развоју сваког уређаја тежи се што бољем искоришћењу расположивих ресурса што се најпре огледа у ефикасности. Теоријски се сумња на мању способност *P&O* алгорита да се ефикасно задржи у тачки максималне снаге [13]. Сходно томе, променљив принос снаге, који подразумева непотпуно искоришћење капацитета, ефективно се може сматрати за губитке у систему.

Један од најбитнијих параметара било ког контролера је време за које ће се успоставити устаљен одзив (*rise time, енг.*) који је у директној корелацији са пропусним опсегом. Такође, потребно је имати у виду и време извршавања алгорита и цену њене имплементације.

У поглављу 4. ће бити таксативно наведене испитане перформансе алгоритама у односу на сваки критеријум.

5. Резултати симулација

Контролни алгоритми су тестирани над системом приказаном на Слици 5. Систем чине два чопера спуштача напона који повезују два улаза за фотонапонске панеле са заједничким једносмерним међуколом. На исто међуколо повезани је и бидирекциони спуштач и подизач који је везан на батерију. У овој апликацији напон на заједничком једносмерном међуколу контролисан је спољашњом контролном петљом по напону са бидирекционог претварача одговорног за пуњење батерије. Како контрола батерије није тема овог рада, у наставку ће бити изостављена.



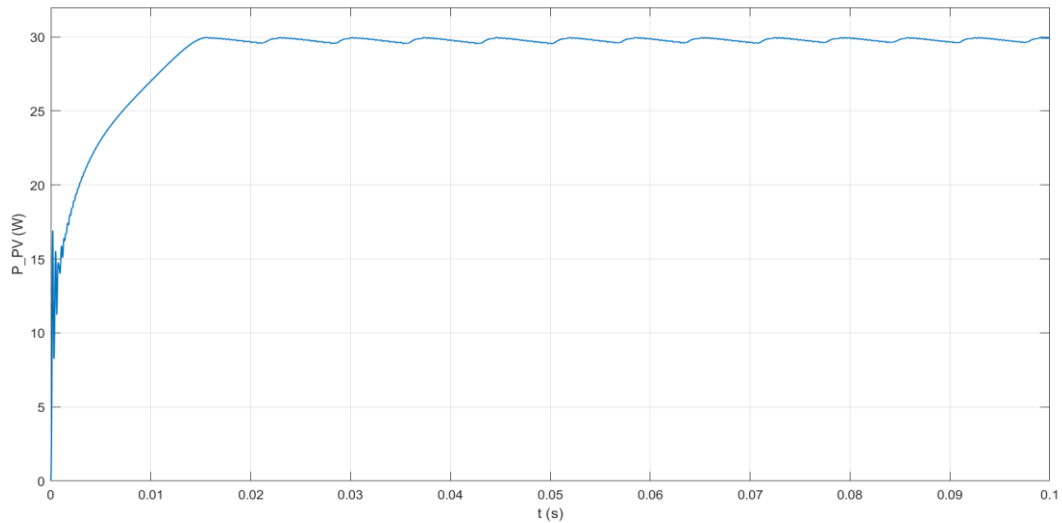
Слика 5. Систем са једним стрингом у паралели на заједничком једносмерном међуколу са батеријом

5.1. Способност лоцирања тачке максималне снаге

У симулацијама главни параметар који се мења је ирадијација тј. снага сунчевог зрачења у јединици површине. За *STC* (*Standard Test Conditions*, енг.) [14] у којима је произвођач тестирао и дао вредност параметара за систем, теоријски би максимална генерисана снага износила

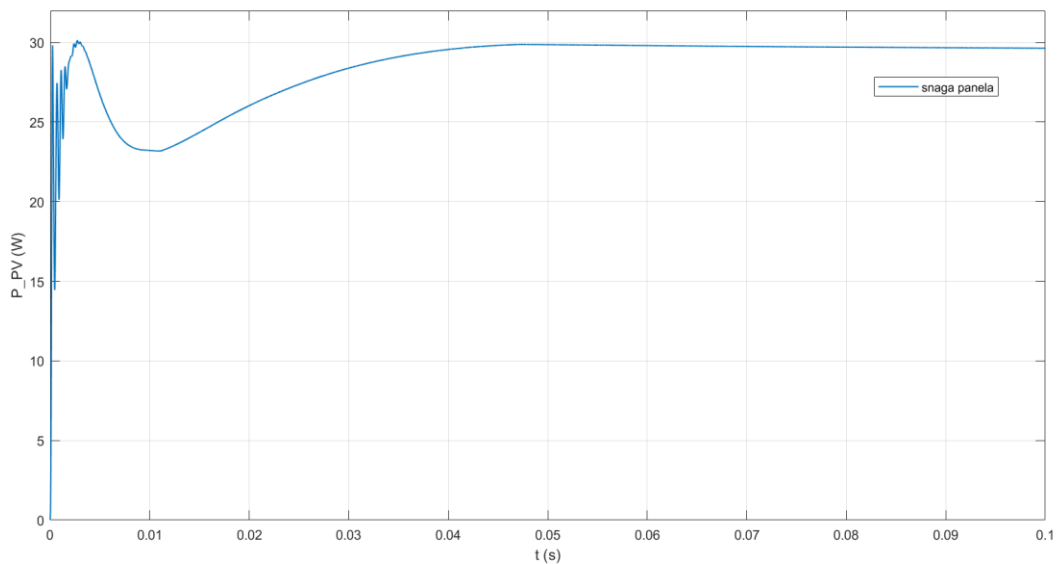
$$P_{MAX} = V_{MPP} \cdot I_{MPP} = 17.6 \cdot 1.7 = 29.92W \quad (6)$$

Параметри који се прослеђују су амбијентална температура од 25°C и ирадијација у вредности једног сунца тј. 1000 W/m². На Слици 6. приказан је одзив алгоритма на константну ирадијацију, код примене алгоритма *Perturb and Observe*.



Слика 6 . Одзив на константну ирадијацију, *Perturb and Observe*

Може се приметити да од тренутка када се успостави устаљен одзив постоје осцилације снаге од око 1 W. Овакво понашање овог алгоритма је теоријски поткрепљено и, самим тим, очекивано. Даље на Слици 7. приказан је одзив на константну ирадијацију код примене алгоритма *Incremental Conductance*.



Слика 7 . Одзив на константну ирадијацију, *Incremental Conductance*

За *IC* уочава се да када се успостави устаљен одзив не постоје драстичне осцилације у снази која се генерише са панела. Ово је, такође, очекиван резултат ако се узме у обзир теоријски увод дат у поглављу 2.2.

5.2. Успостављање одзива и пропусни опсег

На основу поглавља 4.1. анализира се време за које се постиже устаљен одзив. Сматра се да је одзив устаљеног стања онда када вредност снаге панела достигне 90% максималне вредности што у бројним вредностима износи 26.93 W. Са Сlike 5. види се да је за *P&O* потребно време 0.01s, док се за *IC* са Сlike 6. види да је време успостављања његовог устаљеног одзива 0.02 s.

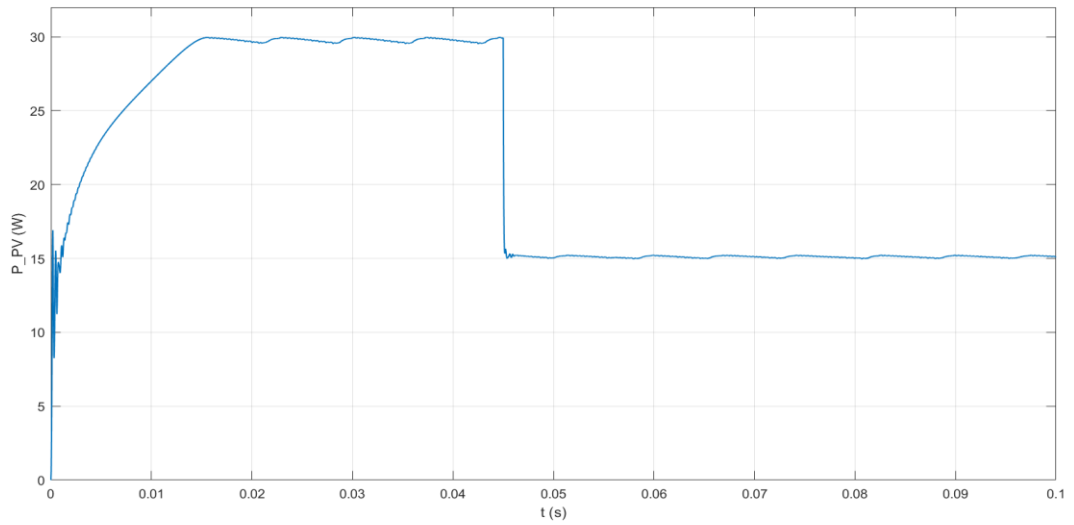
Следећа формула показује, под претпоставком да се систем може посматрати као систем првог реда, на који начин се може естимирати пропусни опсег ових алгоритама за одређену вредност времена успона t_{RISE} [15].

$$R = \frac{0.35}{t_{RISE}} \quad (7)$$

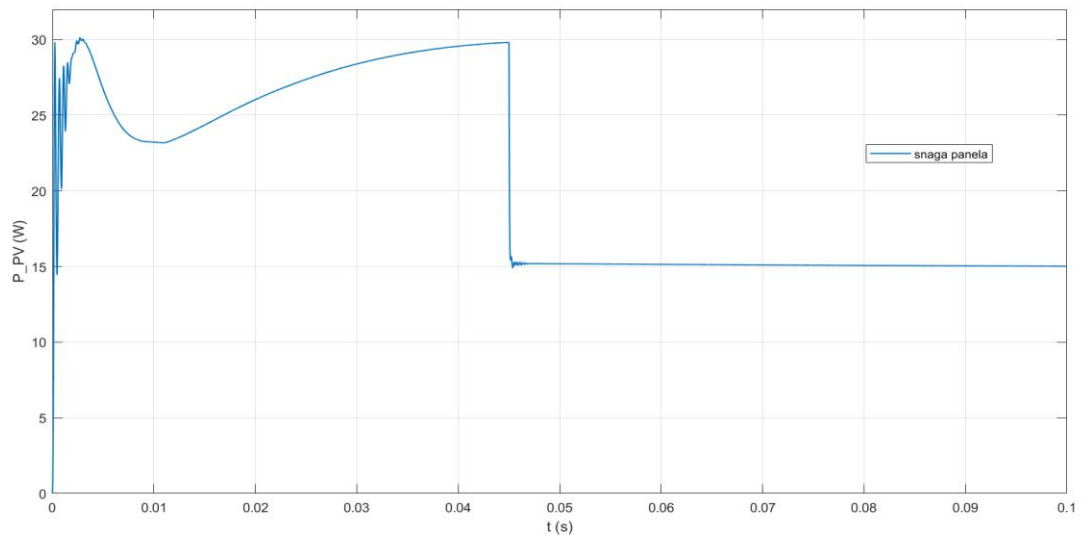
Горњом естимацијом се добија да је пропусни опсег за *P&O* 35 dB (25Hz), док се за *IC* добија 17.5 dB (150Hz). Ипак, због нелинеарне природе система, пропусни опсег нема смисла дефинисати у трајном раду већ само при иницијалном успостављању такве максималне снаге.

5.3. Робусност на промене ирадијације

Биће разматрана два типа промена – нагли пораст и смањење ирадијације. Обе симулације су започете под истим условима за сваку од промена. Разматра се понашање система за амбијенталну температуру од 25°C, а вредност ирадијације се драстично мења из једног у друго стање. Оволико брзе промене практично нису оствариве у природи, међутим представљају тест најгорих могућих услова рада и као такве су на страни сигурности и могу показати колико се алгоритми који су предмет ове анализе добро сналазе у екстремним условима.

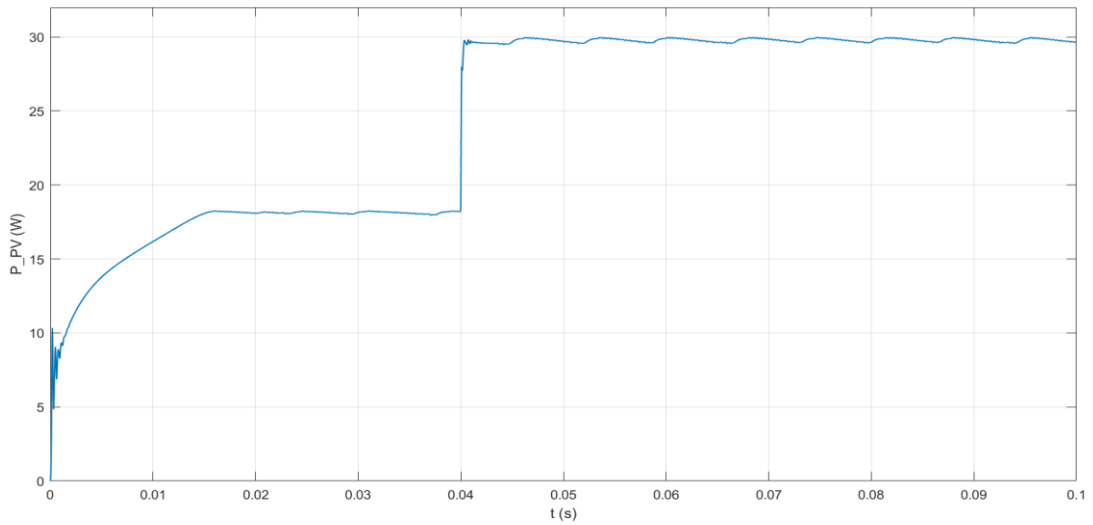


Слика 7. Одзив на смањење ирадијације, *Perturb and Observe*

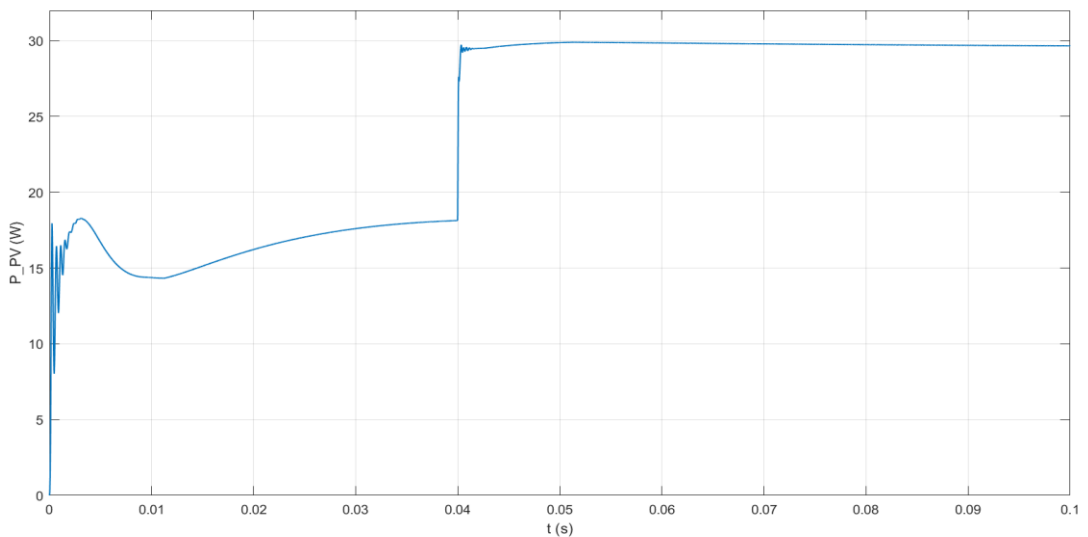


Слика 8. Одзив на смањење ирадијације, *Incremental Conductance*

Са претходних слика може се видети да су оба алгоритма способна да се прилагоде промени амбијенталних услова, али ће нешто мање времена, како би се умирио након промене, бити потребно *IC* алгоритму.



Слика 9. Одзив на повећање ирадијације, *Perturb and Observe*

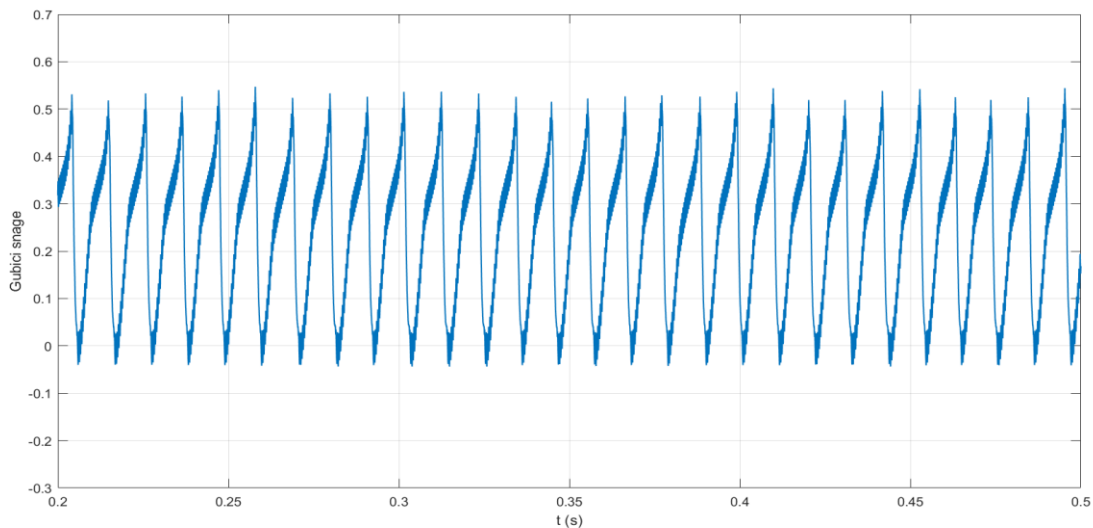


Слика 10. Одзив на повећање ирадијације, *Incremental Conductance*

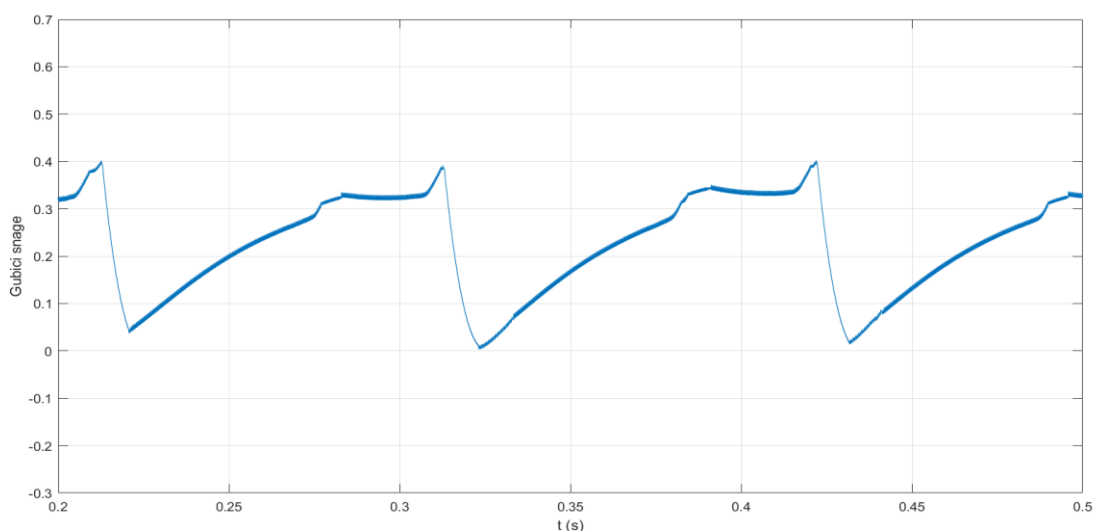
Слична је ситуација и са одзивом приликом промене ирадијације на већу вредност са Слика 9. и 10. Прескок који се јавља за оба алгоритма је прилично мали, али нешто мање времена за устаљен одзив треба алгоритму *IC*. Ипак, јасно се могу уочити осцилације снаге код алгоритма *Perturb and Observe* које не постоје код алгоритма *IC*.

5.4. Губици снаге услед осцилација око тачке максималне снаге

Због природе употребе оба анализирана алгоритма, пожељно је видети колико се сваки од њих исплати са стране губитака снаге. Ова симулација је вршена за амбијенталне услове од 25°C и при ирадијацији у вредности од једног сунца за оба алгоритма.



Слика 11. Рипл при усталеном одзиву, *Perturb and Observe*



Слика 12. Рипл при усталеном одзиву, *Incremental Conductance*

Резултати симулације који су овде наведени за први алгоритам су очекивани, Слика 11. У околини максималне вредности, P&O не мирује. Овим путем генерише се незнатна вредност губитака, када се посматра *peak-to-peak* вредност, као осцилације веће учестаности. Исто тако и симулација губитака при коришћењу IC алгоритма потврђује оно што се из познавања теоријских принципа очекивало – губици су мањи, а пропади снаге су мање учестани, Слика 12.

Како би се проценило колико енергије ови алгоритми не искористе у току свог рада, вредности сигнала са слика из ове тачке ће бити усредњене. За P&O средња вредност губитака износи 0.2564 W, док се за IC та вредност добија на околу 0.2258 W.

5.5. Имплементација на реалном систему

Реални систем подразумева и реалне компоненте које подразумевају одређена физичка ограничења. Ово се пре свега односи на процесор на којем ће контрола бити имплементирана. Уколико се анализира број операција који треба да се изврши при сваком проласку, како за једну, тако и за другу методу, увиђа се да је број наредби за IC већи. Како свака наредба захтева одређено време да се изврши, то значи да је IC спорији. Услед више рачунских операција, процесор ће бити мање расположив за неке друге операције.

Међутим, број операција које подразумева било која од ове две методе је занемарљив ако се узме у обзир брзина савремених процесора за овакве примене.

6. Закључак

Принцип рада фотонапонске конверзије јасно показује значај коришћења алгоритма за тражење тачке максималне снаге (*MPPT*). Постоји велики број алгоритама различите комплексности где сваки решава одређену врсту проблема. Разлике у имплементацији два најједноставнија алгорита – *Incremental Conductance (IC)* и *Perturb and Observe (P&O)* се пре свега свде на то да *IC* не генерише мале осцилације у околини стварне тачке максималне снаге, док код *P&O* то није случај. Ови алгоритми су посебно интересантни за апликације које се баве малим снагама где је циљ да свеукупна цена уређаја буде што нижа. Из тог разлога су изабрани за детаљнију упоредну анализу.

Главни критеријуми за оцену ових алгоритама били су способност праћења тачке максималне снаге и губици снаге које узрокују. Симулације спроведене у *MATLAB-Simulink* софтверском пакету показују да се на овим тестовима боље показала метода *Incremental Conductance (IC)*.

7. Литература

- [1] S. Krauter, "Greenhouse gas reduction by PV," 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of, 2003, pp. 2610-2613 Vol.3
- [2] Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- [3] Ferdous, S.M.; Mohammad, Mahir Asif; Nasrullah, Farhan; Saleque, Ahmed Mortuza; Muttalib, A.Z.M.Shahriar (2012). 2012 7th International Conference on Electrical and Computer Engineering. *iee.org*. pp. 908–911
- [4] Guarnieri, M. (2015). "More light on information". *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 9: 58–61. doi:10.1109/MIE.2015.2485182. S2CID 13343534
- [5] The photovoltaic effect. *Scienzagiovane.unibo.it* (2006-12-01). Retrieved on 2010-12-12.
- [6] Жељко Р. Ђуришић, Јован Микуловић, Соларна Енергетика, Академска Мисао, 2019
- [7] Patil S.N. and R. C. Prasad, "Design and development of MPPT algorithm for high efficient DC-DC converter for solar energy system connected to grid," 2015 International Conference on Energy Systems and Applications, 2015, pp. 228-233
- [8] R. W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, Nowell, MA: Kluwer, 2001
- [9] Bodur, Mehmet; Ermis, M. (1994). "Maximum power point tracking for low power photovoltaic solar panels". *Proceedings of the 7th Mediterranean Electrotechnical Conference*: 758–761
- [10] Y. Liu, D. Xia and Z. He, "MPPT of a PV system based on the particle swarm optimization," 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011, pp. 1094-1096
- [11] T. Esum and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439 -449, June 2007
- [12] Hlaili, M., & Mechergui, H. (2016). Comparison of Different MPPT Algorithms with a Proposed One Using a Power Estimator for Grid Connected PV Systems. *International Journal of Photoenergy*, 2016, 1–10

[13] A. S. Ahmed, B. A. Abdullah and W. G. A. Abdelaal, "MPPT algorithms: Performance and evaluation," 2016 11th International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES), 2016, pp. 461-467

[14] Köntges, Marc; Oreski, Gernot; Jahn, Ulrike; Herz, Magnus; Hacke, Peter; Weiß, Karl-Anders (2017). Assessment of photovoltaic module failures in the field: International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme: IEA PVPS Task 13, Subtask 3: report IEA-PVPS T13-09:2017. Paris: International Energy Agency. p. 117. ISBN 978-3-906042-54-1. Retrieved 24 June 2020.

[15] M. Vidyasagar, Nonlinear Systems Analysis, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002