

Анализа техно-економских услова изградње соларне електране на крову пословне зграде Електротехничког института „Никола Тесла”

Маја Грбић^{1,2}, Радослав Антић^{1,2}, Јелена Поноћко^{1,2},
Јован Микуловић², Жељко Ђуришић²

¹ Електротехнички институт „Никола Тесла”, Косте Главинића 8а,
11000 Београд, Србија
maja.grbic@ieent.org, radoslav.antic@ieent.org, jelena.ponocko@ieent.org

² Електротехнички факултет, Универзитет у Београду,
Булевар краља Александра 73, 11120 Београд, Србија
mikulovic@etf.bg.ac.rs, djurisic@etf.bg.ac.rs

Кратак садржај: У раду је приказана анализа техно-економских услова изградње соларне електране на крову пословне зграде Електротехничког института „Никола Тесла” у Београду. Извршен је прорачун инсолације и дато је идејно решење распореда панела на крову зграде и њиховог повезивања на инверторе. Проверени су услови за прикључење електране на дистрибутивну мрежу и извршена је економска анализа пројекта.

Кључне речи: соларна електрана, фотонапонски систем, обновљиви извори енергије.

1. Увод

Ограниченост резерви фосилних горива и еколошки проблеми изазвани њиховом експлоатацијом довели су последњих година до повећаног интересовања за обновљиве изворе енергије, и то првенствено за соларну енергију и енергију ветра. О актуелности и значају обновљивих извора енергије говори и Директива 2009/28/ЕС [1]. Соларна енергетика је област која се последњих година интензивно развија у погледу технологије и инсталисаног капацитета.

У Закону о енергетици [2] и Стратегији развоја енергетике Републике Србије до 2015. године [3] се као један од приоритета наводи коришћење обновљивих извора енергије и енергетски ефикасних технологија,

првенствено са циљем смањења увоза енергената и смањења негативног утицаја на околину. У циљу стимулације већег коришћења ових извора уведене су повлашћене тарифе за производњу електричне енергије из обновљивих извора (тзв. Feed-in-Tariff).

У укупном искористивом енергетском потенцијалу обновљивих извора у Републици Србији соларна енергија учествује са 16,7% и налази се на другом месту, после биомасе чије учешће износи 63%.

Из наведених разлога је извршена анализа техно-економских услова изградње соларне електране на крову пословне зграде Електротехничког института „Никола Тесла“ у Београду, која је у раду детаљно описана.

2. Карактеристике фотонапонских система

Фотонапонски системи имају низ предности због којих су последњих година све више у употреби. Једна од предности је модуларна конструкција која омогућава лако проширење система у зависности од финансијских могућности и енергетских потреба и олакшава транспорт ових система [4].

Фотонапонски модули се пројектују за животног век од 30 и више година, уз минимално сервисирање и веома малу вероватноћу отказа [4].

У току свог рада фотонапонски панели не емитују никакве штетне материје и представљају нечујан локални извор енергије.

2.1. Фотонапонски системи интегрисани у кровове и фасаде зграда

Кровови и фасаде зграда представљају погодно место за монтажу фотонапонских панела. Са архитектонског, техничког и финансијског аспекта, као и аспекта очувања животне средине, фотонапонски системи интегрисани у грађевинске елементе имају следеће карактеристике [4]:

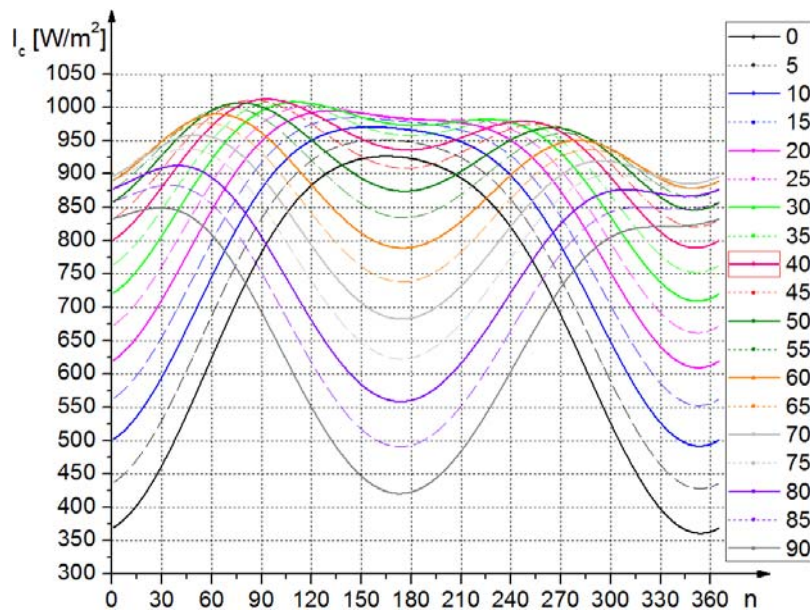
- не захтевају додатно земљиште и могу се користити у густо насељеним урбаним срединама,
- не захтевају додатне инфраструктурне инсталације,
- обезбеђују електричну енергију у току највеће потражње и на тај начин смањују оптерећење електричне мреже,
- могу у потпуности или делимично да обезбеде електричну енергију за одговарајућу зграду,
- могу да замене конвенционалне грађевинске материјале и на тај начин обезбеде додатну уштеду, пошто постоје фотонапонски материјали који се могу уградити уместо прозора, светларника, фасадних и кровних елемената.

Концепт фотонапонских система интегрисаних у кровове и фасаде зграда се у свету доста користи, што се види из примера [5,6].

3. Прорачун енергетског потенцијала сунца на локацији Електротехничког института „Никола Тесла”

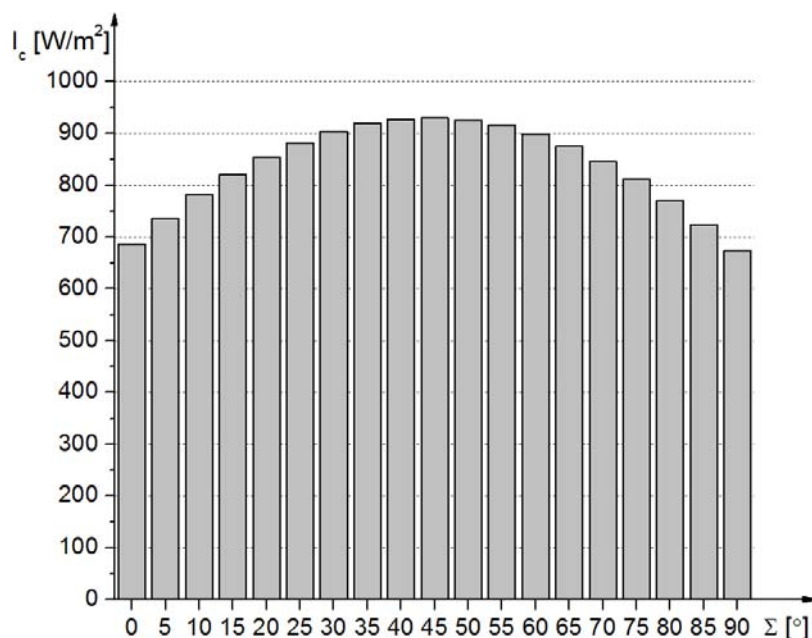
3.1. Прорачун укупне соларне ирадијације која пада на соларне панеле током ведрога дана

Прорачун укупне соларне ирадијације извршен је за сваки дан у години, у соларно подне, према методи која је детаљно описана у [7,8]. Претпостављено је да се соларни панели налазе на крову пословне зграде Електротехничког института „Никола Тесла” (N 44,795149°, E 20,440700°) и да су окренути према југу. Приликом овог прорачуна пошло се од претпоставке да је небо ведро и да коефицијент рефлексије износи 0,1. Прорачун ирадијације је извршен за различите вредности нагибног угла соларних панела Σ , што је приказано на сликама 1 и 2. На слици 1 је приказана соларна ирадијација рачуната за сваки дан у години, у соларно подне, за различите вредности нагибног угла.



Слика 1. Вредности соларне ирадијације током године, рачунате у соларно подне, при различитим вредностима нагибног угла панела

На слици 2 су дате вредности средње годишње соларне ирадијације које се добијају при различитим нагибним угловима панела. Вредности средње годишње соларне ирадијације добијене су као аритметичка средина дневних ирадијација израчунатих за сваки дан у години у соларно подне.



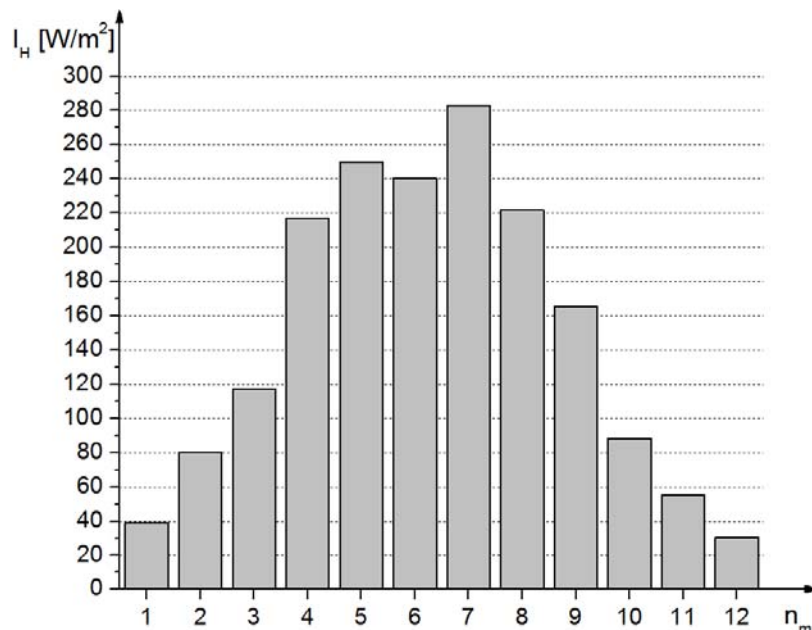
Слика 2. Вредности средње годишње соларне ирадијације рачунате у соларно подне, при различитим вредностима нагибног угла панела

Приказане вредности су рачунске и оне могу да одступају од стварних вредности, јер су прорачуни вршени под претпоставком да је небо ведро, што у току појединих зимских, пролећних и јесењих дана није чест случај.

3.2. Прорачун укупне инсолације на соларним панелима на основу мерења хоризонталне ирадијације у Баваништу

У претходном случају вршени су прорачуни за услове ведрога дана. Међутим, у реалним условима због облачности, локалне загађености атмосфере и сличних утицаја неопходно је вршити мерење ирадијације како би се коректно одредио соларни потенцијал. У овом поглављу је дат прорачун инсолације који је заснован на резултатима мерења хоризонталне ирадијације, која су вршена у Баваништу током једне године. Иако мерења нису извршена на микролокацији на којој се планира изградња соларне електране овако добијени резултати се могу користити за прелиминарну процену соларног потенцијала, пошто се Београд и Баваниште, према резултатима датим у [9], налазе у истом појасу који карактерише годишњи просек дневне енергије глобалног зрачења на хоризонталну површину од 3,8 до 4 kWh/m².

Мерења су вршена са интервалом од 10 минута, тако да за сваки дан у години постоје 144 измерене вредности соларне ирадијације. Усредњавањем ових вредности на дневном нивоу добијају се средње дневне вредности хоризонталне ирадијације. Усредњавање се може извршити и на месечном нивоу, што је графички приказано на слици 3. Ознака n_m на овој слици се односи на редни број месеца у години.

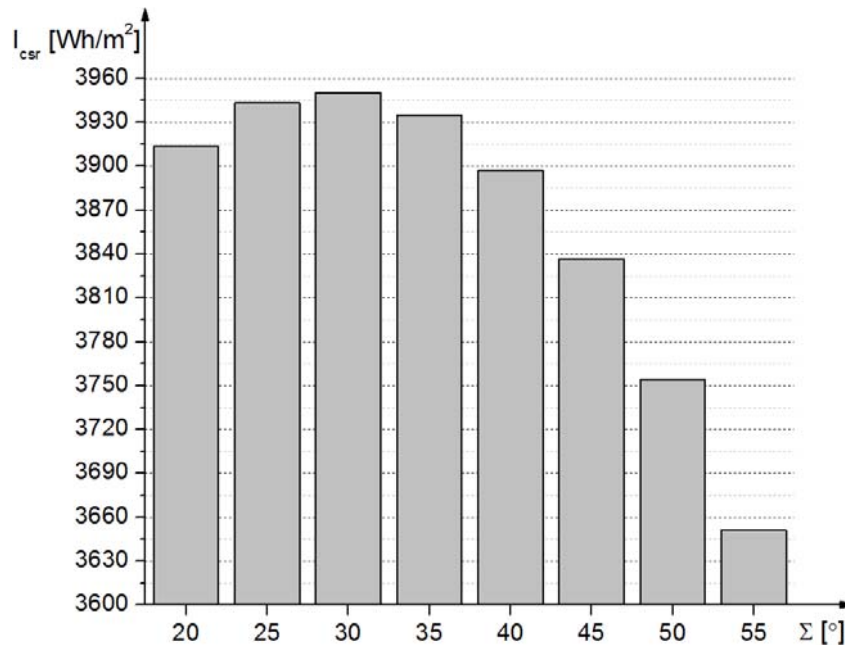


Слика 3. Вредности средње месечне хоризонталне ирадијације добијене мерењем

Израчунавање инсолације на колектору извршено је према поступку који је описан у [7,8]. Да би се утврдило под којим нагибним углом је најповољније поставити соларне панеле израчуната је средња годишња инсолација на колектору, за различите нагибне углове Σ , што је приказано на слици 4.

Са слике 4 се види да се највећа вредност средње годишње инсолације на колектору добија при нагибном углу од 30° . Како би се вредност оптималног нагибног угла прецизније одредила поновљен је прорачун са нагибним углом у интервалу од 25° до 45° са кораком од 1° .

На тај начин је утврђено да се највећа вредност средње годишње инсолације на колектору добија при нагибном углу од 29° , па је ова вредност коришћена у даљем прорачуну. При нагибном углу који износи 29° добијена је вредност средње годишње инсолације на колектору од $3.950,505 \text{ Wh/m}^2$.



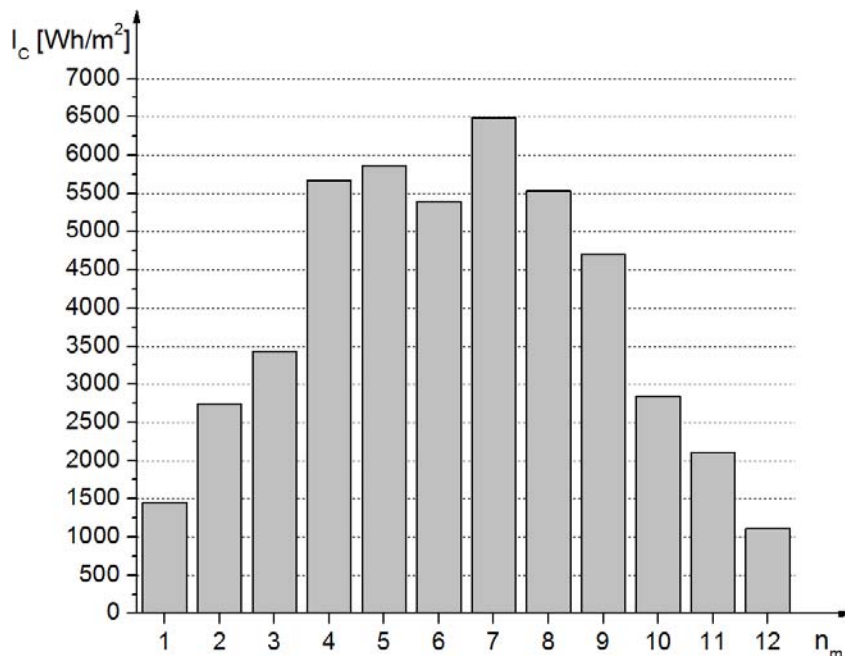
Слика 4. Вредности средње годишње инсолације на колектору при различитим нагибним угловима соларног панела

Вредности средњих месечних инсолација на колектору који је постављен под углом од 29° приказане су у табели 1 и на слици 5.

Табела 1. Вредности средње месечне инсолације на колектору који је постављен под нагибним углом од 29°

Месец	I_c [Wh/m ²]	Месец	I_c [Wh/m ²]
Јануар	1453,124	Јул	6488,910
Фебруар	2749,331	Август	5529,677
Март	3433,986	Септембар	4707,860
Април	5670,181	Октобар	2841,807
Мај	5864,806	Новембар	2107,244
Јун	5391,582	Децембар	1118,240

Користећи мерне податке у анализи потенцијала сунца добијају се реални резултати. Највеће вредности средње инсолације добијају се у периоду од априла до септембра, док се мање вредности добијају од октобра до марта, као што се и очекивало.

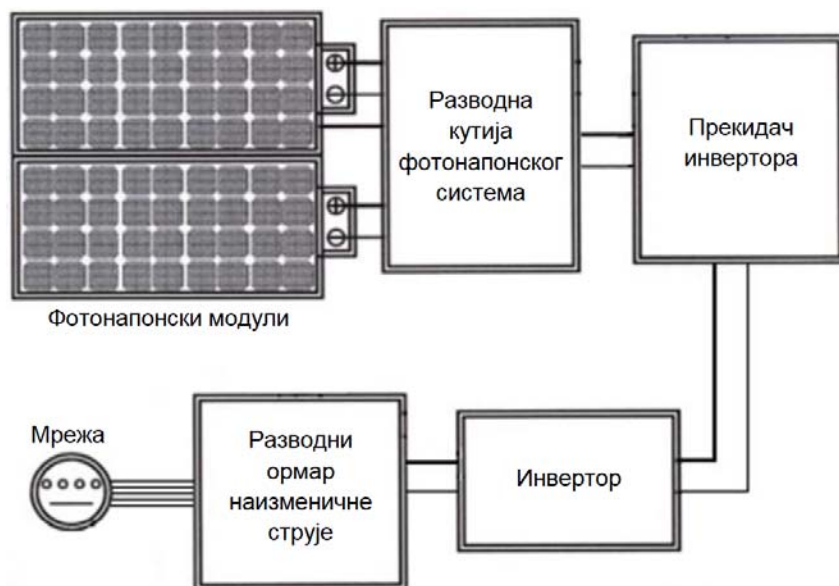


Слика 5. Вредности средње месечне инсолације на колектору који је постављен под нагибним углом од 29°

4. Идејно решење соларне електране

Идејним пројектом [8] предвиђено је прикључење соларне електране на дистрибутивну мрежу, према шеми приказаној на слици 6. Соларна електрана прикључена на дистрибутивну мрежу има низ предности у односу на електрану која ради изоловано од мреже. Предност мрежно повезане електране је у томе што се она прикључује на стандардну инсталацију зграде, при чему су једине додатне компоненте фотонапонски модули и инвертор [4]. Такође, локално складиштење енергије није потребно, јер се у случају смањене осветљености енергија добија из дистрибутивне мреже. Када енергија произведена у соларној електрани превазилази тренутну потрошњу, мрежа преузима вишак произведене електричне енергије.

Једносмерна струја добијена у соларним модулима претвара се у наизменичну струју помоћу инвертора и преко разводног ормана и електричне инсталације напаја потрошаче у згради [4].



Слика 6. Фотонапонски систем прикључен на електродистрибутивну мрежу

4.1. Избор фотонапонских панела

За формирање фотонапонског система изабран је фотонапонски модул произвођача Sharp, модел ND 220 E1F, чије су основне техничке карактеристике приказане у табели 2.

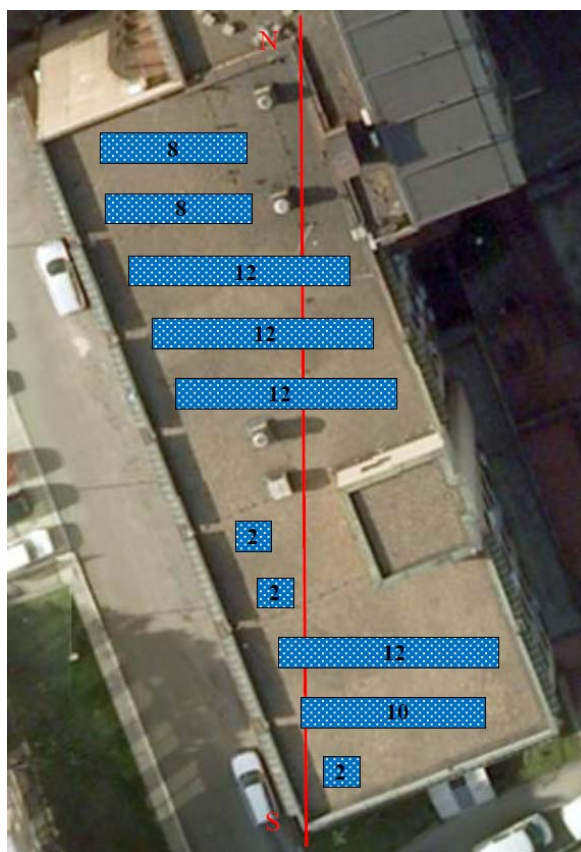
Табела 2. Основне техничке карактеристике соларног модула ND 220 E1F

Назначена снага (W)	220	Напон отвореног кола, V_{oc} (V)	36,5
Ефикасност модула (%)	13,4	Струја кратког споја, I_{sc} (A)	8,20
Димензије (mm)	1652×994×46	Максимални радни напон, V_{pm} (V)	29,2
Маса (kg)	21	Максимална радна струја, I_{pm} (A)	7,54

Панел поседује гаранције да излазна снага током првих 10 година експлоатације неће бити мања од 90%, као и да у наредних 25 година неће бити мања од 80% назначене снаге.

4.2. Распоред панела

За постављање фотонапонског система предвиђена је кровна површина зграде Института. Постављање фотонапонских система на кровове објеката повољно је са аспекта површине, поготово у урбаним крајевима, јер није потребно обезбедити посебну површину за монтажу панела. Међутим, због постојања просторије за лифт и четири вентилациона отвора део кровне површине није расположив. Због присуства ових објеката, као и сенке коју они стварају, овај део крова се неће користити за постављање соларних модула. Идејно решење распореда соларних панела приказано је на слици 7.



Слика 7. Распоред соларних панела

Фотонапонски систем чини укупно 80 соларних модула снаге 220 W, тако да инсталисана снага електране износи 17,6 kW. Предност овог решења је у томе што фотонапонски систем чини мањи број соларних

модула који су распоређени тако да се минимизирају губици услед сенке коју стварају просторија за лифт и вентилациони отвори.

Друга могућност подразумева већи број соларних модула који су распоређени по целој површини крова. У овом случају фотонапонски систем чини укупно 112 соларних модула, па је укупна инсталисана снага система 24,64 kW. У том случају би цела површина крова била максимално искоришћена, повећала би се инсталисана снага електране, али би се зато повећали и губици услед сенке [8].

Велику предност фотонапонских система представља њихова модуларност, што значи да се у случају већ изграђеног фотонапонског система нови модули могу једноставно додавати. Даљи прорачуни су спроведени за соларну електрану инсталисане снаге 17,6 kW, приказану на слици 7, с тим што увек преостаје могућност да се нови соларни модули накнадно додају према потреби.

4.3. Избор инвертора

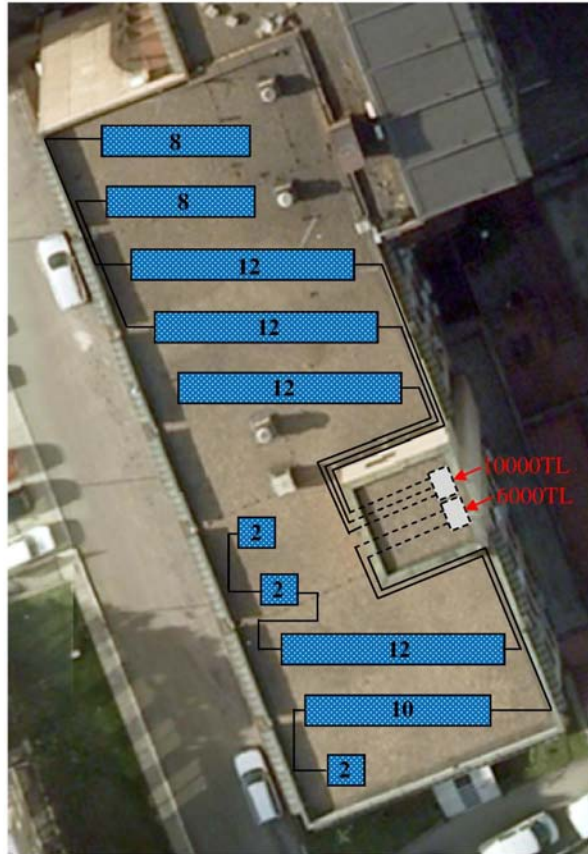
Инвертори у соларној електрани изабрани су тако да буду прилагођени раду са фотонапонским модулима и намењени су за мрежно повезивање фотонапонског система. На основу распореда соларних панела, процењено је да би било оптимално користити два инвертора, снага 6 kW и 10 kW. Иако инвертори имају могућност спољашње уградње, ипак је предвиђена њихова унутрашња уградња ради лакшег надгледања рада соларне електране. На слици 8 је приказана шема повезивања соларних панела са инверторима, као и место уградње инвертора.

Изабрана су два трофазна инвертора произвођача SMA Solar Technology AG: Sunny Tripower 6000TL, снаге 6 kW и Sunny Tripower 10000TL, снаге 10 kW.

Инвертор Sunny Tripower 6000TL, има два дигитална улаза, А и В, од којих на сваки може да се повеже по два низа са истим бројем панела. Ови улази имају максимални улазни напон од 1000 V, док је минимални дозвољени напон 150 V. Максимална улазна струја улаза А износи 11 A, док је на улазу В струја ограничена на 10 A.

Инвертор Sunny Tripower 10000TL, такође има два дигитална улаза, А и В, при чему на улаз А могу да се повежу четири низа са истим бројем панела, док на улаз В може да се прикључи само један низ панела. Ови улази имају максимални улазни напон од 1000 V, док је минимални дозвољени напон 150 V. Максимална улазна струја улаза А износи 22 A, док је на улазу В струја ограничена на 11 A.

Провера услова прикључења соларних панела на изабране инверторе у погледу максималних улазних напона и струја инвертора показала је да су сви услови испуњени и да су панели оптимално повезани [8].



Слика 8. Шема повезивања соларних панела и инвертора

4.4. Инсталисана снага соларне електране

У табели 3 приказана је снага панела повезаних на сваки инвертор појединачно, као и укупна инсталисана снага електране. Вредности у табели 3 представљају снагу при стандардним условима тестирања панела (*STC – Standard Test Conditions*). Стандардни услови тестирања подразумевају следеће:

- модул је чист (без прашине и других нечистоћа које се јављају у реалним условима);
- температура панела је 25°C;
- соларна ирадијација на површини панела је 1000 W/m² (једно сунце);
- соларни спектар одговара ваздушној маси AM=1,5.

Табела 3. Број модула по инвертору и њихова инсталисана снага

Инвертор	Број соларних модула	Инсталисана снага [kW]
Sunny Tripower 6000TL	28	6,16
Sunny Tripower 10000TL	52	11,44
Укупно	80	17,60

Реални услови рада обично одступају од стандардних тако да се ефикасност панела и остали технички параметри у реалним експлоатационим условима у мањој или већој мери разликују од стандардних. Излазна снага P_{AC} тада ће се рачунати на основу следећег израза који представља производ инсталисане снаге електране при стандардним условима P_{DC-STC} и укупног степена искоришћења η :

$$P_{AC} = P_{DC-STC} \cdot \eta \quad (1)$$

Један од битних параметара који утичу на ефикасност панела представља његова температура. Повећање температуре панела изнад стандардне вредности (25°C) узрокује пад ефикасности панела, јер се смањује напон отвореног кола. Губици услед повећања температуре у случају изабраног панела износе $-0,485\%/^{\circ}\text{C}$.

Поред температуре, на ефикасност електране утичу и неупареност карактеристика панела, запрљаност њихове активне површине, као и губици у инвертору. Губици услед запрљања могу се проценити на око 4%, док губици услед неупарености панела у добро пројектованој електрани не прелазе 3%. Губици у инвертору су дефинисани у спецификацији инвертора, при чему се узима податак о европској ефикасности која за инвертор Sunny Tripower 6000TL износи 97,4%, док за инвертор Sunny Tripower 10000TL износи 97,7%. На основу познавања временских услова на датој локацији, може се проценити да температурни губици неће бити већи од 8%.

Ако се наведене претпоставке о губицима уврсте у прорачун добија се да снага на излазу инвертора Sunny Tripower 6000TL износи 5,14 kW, а на излазу инвертора Sunny Tripower 10000TL 9,57 kW. Укупна снага електране са урачунатим губицима износи 14,71 kW.

5. Анализа услова прикључења соларне електране на дистрибутивну мрежу

Основни технички захтеви за прикључење малих електрана на дистрибутивну мрежу дефинисани су у Техничкој препоруци Електропривреде Србије бр. 16 [10]. Препорука се односи на прикључење малих електрана снаге до 10 MW на дистрибутивни систем називног напона 0,4 kV (1 kV, НН мрежа), 10 kV, 20 kV или 35 kV.

За прикључење и безбедан паралелан рад мале електране са дистрибутивном мрежом, мала електрана мора да задовољи 4 основна критеријума:

- 1) критеријум дозвољене снаге мале електране,
- 2) критеријум фликера,
- 3) критеријум дозвољених струја виших хармоника и
- 4) критеријум снаге кратког споја.

5.1. Критеријум дозвољене снаге мале електране

Критеријум дозвољене снаге мале електране гарантује да у прелазном режиму (укључење и искључење генератора), промена напона (напонски удар) на месту прикључења на дистрибутивну мрежу неће прекорачити вредност $\Delta u_m=2\%$.

Мала електрана укупне инсталисане снаге свих генератора $S_{MEL}=\sum S_{ng}$ може да се прикључи на дистрибутивну мрежу без штетног деловања, ако испуњава услов:

$$S_{MEL} = \sum S_{ng} \leq \frac{S_{ks}}{500} \quad (2)$$

и у том случају није битан начин (редослед) прикључења појединих генератора на мрежу, нити је потребан доказ да су задовољени критеријуми фликера и дозвољених струја виших хармоника [10].

Привидна снага електране $S_{MEL}=25 \text{ kVA}$ изабрана је из стандардног низа назначених снага генератора који је дат у [10].

Пошто податак о стварној вредности снаге кратког споја није познат, усвојена је максимална вредност снаге трофазног кратког споја према [10] за мрежу напонског нивоа 10 kV: $S_{ks}=250 \text{ MVA}$.

Пошто је $S_{MEL}=25 \text{ kVA} < 500 \text{ kVA}$ види се да је претходни критеријум задовољен. Због тога није потребно проверавати испуњеност критеријума фликера и дозвољених струја виших хармоника.

5.2. Критеријум снаге кратког споја

Пошто мале електране инсталисане снаге до 1 MVA не могу знатније да повећају снагу кратког споја у дистрибутивној мрежи, провера овог критеријума је обавезна само ако снага мале електране прелази 1 MVA, што овде није случај.

6. Економска анализа пројекта

За реализацију пројекта соларне електране на крову зграде Института „Никола Тесла” потребно је издвојити око 30.000 € (2 € по 1 W инсталисане снаге). При томе цене основне опреме за соларну електрану износе:

- соларни модули Sharp ND 220 E1F: 80×140 €=11.200 €,
- инвертор Sunny Tripower 6000TL: 1.950 €,
- инвертор Sunny Tripower 10000TL: 2.860 €.

Уредбом Владе Републике Србије, почетком 2013. године одређена је нова Feed-in тарифа према којој цена електричне енергије произведене у соларним електранама снаге до 30 kW износи 20,66 с€/kWh. Под претпоставком да се целокупна произведена енергија продаје по овој цени годишња добит би износила приближно 4.650 €. Време повраћаја инвестиције од 30.000 € би у том случају износило 6,5 година. Поменуто време повраћаја инвестиције представља прост период повраћаја, пошто не узима у обзир друге финансијске утицаје као што су трошкови одржавања, промена цене опреме током експлоатације и др. Загарантовани период Feed-in тарифе у Србији је 12 година, што значи да је ово исплатива инвестиција.

7. Закључак

У раду су анализирани техно-економске могућности изградње соларне електране на крову пословне зграде Електротехничког института „Никола Тесла”. Прорачуном инсолације на колекторима, који су постављени под оптималним углом од 29°, добијена је вредност средње годишње инсолације од 3.950,5 Wh/m². Идејно решење соларне електране приказано у раду подразумева 80 соларних модула назначене снаге 220 W, тако да инсталисана снага електране износи 17,6 kW. Снага електране са урачунатим губицима износи 14,71 kW. Пошто је у раду препоручено прикључење соларне електране на дистрибутивну мрежу, извршена је провера услова за прикључење и установљено је да су сви услови испуњени. Сprovedена економска анализа потврдила је финансијску оправданост пројекта.

Захвалница

Рад је настао као резултат истраживања у оквиру пројекта „Интелигентне енергетске мреже” бр. 42009 који је финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.
- [2] *Закон о енергетици*, Службени гласник Републике Србије бр. 84/2004.
- [3] „Стратегија развоја енергетике Републике Србије до 2015. године”, Министарство рударства и енергетике Владе Републике Србије, Београд, 2004. година.
- [4] Др Миленко Б. Ђурић, Др Александар Р. Чукарић, Жељко Ђуришић, „Електране”, Београд, 2004. година.
- [5] T. Erge, V. U. Hoffmann, K. Kiefer: “The German Experience with Grid-Connected PV-Systems”, *Solar Energy*, Vol. 70, No. 6, pp.479-487, 2001.
- [6] Tony J. N. Schoen, “Building-Integrated PV Installations in The Netherlands: Examples and Operational Experiences”, *Solar Energy*, Vol. 70, No. 6, pp.467-477, 2001.
- [7] Gilbert Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, Stanford University, John Wiley and Sons, New Jersey, 2004.
- [8] Маја Грбић, Радослав Антић: „Идејни пројекат фотонапонског система на крову зграде Електротехничког института Никола Тесла”, Семинарски рад, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду, 2013.
- [9] Студија о процени укупног соларног потенцијала – Соларни атлас и могућности производње и коришћења соларне енергије на територији АП Војводине, Универзитет у Новом Саду, Технички факултет „Михајло Пупин” Зрењанин, Нови Сад, септембар 2011.
- [10] Техничка препорука бр. 16: „Основни технички захтеви за прикључење малих електрана на дистрибутивни систем”, ЈП ЕПС – Дирекција за дистрибуцију електричне енергије, Република Србија, Београд, 2003. година.

Abstract: This paper presents an analysis of the technical-economic requirements for the construction of a solar power plant on the roof of the business building of the Electrical Engineering Institute “Nikola Tesla” in Belgrade. Calculation of solar irradiation is performed and the conceptual design of the disposition of solar panels on the roof of the building is shown as well as their connections to the inverters. Conditions for connecting the plant to the distribution network are checked and an economic analysis of the project is performed.

Key words: solar power plant, photovoltaic system, renewable energy sources.

Analysis of Technical-Economic Requirements for the Construction of a Solar Power Plant on the Roof of the Business Building of the Electrical Engineering Institute “Nikola Tesla”

Рад примљен у уредништво 18.11.2013. године
Рад прихваћен 02.10 2014. године