VIRI IZGUB ENERGIJE PRI DOLOČANJU LETNEGA IZPLENA INTEGRACIJE SONČNIH ELEKTRARN (BIPV)

Tine ANDREJAŠIČ, Kristijan BRECL, Franko NEMAC, Marko TOPIČ

POVZETEK

Glede na visoko stopnjo sončnega sevanja na območju Slovenije, ki se giblje med 1150 in 1400 kWh/m^2 na horizontalno ravnino, je v referatu predstavljen potencial za postavitev razpršenih sončnih elektrarn v urbanih naseljih kot BIPV ter viri izgub pri pretvorbi sončne energije v električno. Primarno je na podlagi podatkov sončnega sevanja podano izhodišče z razpoložljivostjo sončnega sevanja glede na izbrano lokacijo. Nadalje so ocenjene vrednosti izgub zaradi neidealnega kota in orientacije fotonapetostnega generatorja ter vplivi delnega senčenja. Glede na tip integracije modulov v objekt so podani podatki o zvišanju nadtemperature modulov in s tem zmanjšanje letnega izplena energije. Nazadnje so predstavljene tudi izgube pri pretvorbi enosmerne napetosti v izmenično na razsmerniku in zaščitnih elementih.

ABSTRACT

Given a high degree of solar irradiation in Slovenia, which is between 1150 and 1400 kWh/m2 on a horizontal plane, the potential for installing solar power plants is high in fragmented urban areas as sources of BIPV. The paper is based on the database of solar irradiation, depending on the location. Quantification of losses is presented due to the non-ideal angle and orientation of photovoltaic generator and the effects of partial shading. Furthermore the influence of reduction of natural convection in BIPV is presented as temperature raise and consequent decrease of annual energy yield. Finally, losses in the process of voltage conversion in the inverter and protection elements are presented.

1. UVOD

Razcvet panoge ter posledica omejitve postavitve sončnih elektrarn v Španiji v letu 2009 sta drastično znižala ceno komponent za postavitev sončnih elektrarn [1]. Na drugi strani so sistemi za vzpodbujanje investicij za izgradnjo sončnih elektrarn poskrbeli za neverjetno rast. Poleg velikih samostoječih sončnih elektrarn, ki zahtevajo veliko površino za postavitev ter so rezervirane za velike igralce na trgu, so postale ekonomsko postale upravičene tudi manjše elektrarne ter elektrarne integrirane v objekte (BIPV). Fotonapetostni moduli tako poleg pretvorbe sončne energije v električno nosijo tudi vlogo ovoja stavbe. Tako pasivne komponente ovoja postanejo aktivne in pripomorejo k modernemu izgledu stavbe.

2. PREGLED BIPV MOŽNOSTI

Glede na tip postavitve sončne elektrarne razlikujemo tri osnovne principe. Kot prvega štejemo samostoječe sončne elektrarne, ki so postavljene na prostem in so lahko po svoji konstrukciji fiksne, t.i. stacionarni PV sistemi, ali imajo izvedeno sledenje trajektoriji sonca, t.i. sledilni PV sistemi. Drugi princip temelji na nadgradnji že obstoječih objektov s sončnimi elektrarnami – torej montaža na streho oz. drugo že obstoječo površino. Tretji princip pa so tako imenovani vgradni sistemi - BIPV, kjer so fotonapetostni moduli vgrejeni v ovoj stavbe. Slednja se uporablja predvsem pri novogradnji in obnovi stavb.

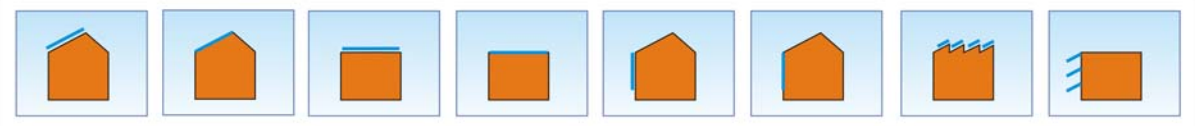
Uspešnost vgradnje BIPV je pogojen z estetskim izgledom ovoja stavbe, funkcionalnostjo ter izplena fotonapetostnega generatorja. S temi dodanimi funkcionalnostmi postane fasada kompleksen in hkrati večfunkcijski element stavbe. Nove napredne tehnologije dopuščajo radikalne spremembe na samem ovoju stavbe, tako na fasadi kot na strehi.

Pri oblikovanju zunanjosti stavbe moramo paziti na samo uporabnost PV sistema. Dober vgradni PV sistem mora poleg proizvodnje električne energije zadoščati tudi vsem ostalim funkcijam fasade, kot so: vremenska zaščita, toplotna izolacija, zaščita pred sončnim obsevanjem, protihrupna zaščita, varnost itd. Nekateri PV sistemi omogočajo tudi regulacijo vnosa sončne svetlobe (avtomatske žaluzije), ventilacijski sistem in celo pomožno razsvetljavo ob električnem mrku.

Poleg vsega naštetega pušča lastnik vgrajene PV elektrarne vtis ekološko ozaveščenega, in v prihodnost usmerjenega človeka.

Naš življenjski okoliš omogoča vrsto različnih aplikacij BIPV v različne segmente ovoja stavbe. Fotonapetostne generator lahko vgradimo v:

- Streho,
- Nadomestimo strešna okna,
- Fasado
- Svetlobno-prepustno fasado
- Nadomestimo sistem senčenja



Slika 1: Načini integracije BIPV

Strehe so idealne za integracijo BIPV. Zaradi višje lege je posledično manj senčenja bližnjih objektov, poleg tega pa streha predstavlja velik del neizkoriščene površine stavbe. Fotonapetostne module s pomočjo prilagojenih nosilnih okvirjev vgradimo v nagnjeno streho oz. izberemo strešno kritino na kateri je že integriran modul. Ta aplikacija je zaradi nizke cene se uporablja predvsem v stanovanjskih objektih.

Ravne strehe imajo poleg lahkega dostopa tudi možnost izbire orientacije ter naklona modulov. Pozornost velja posvetiti preučitvi statike nosilne konstrukcije zaradi dodatne obremenitve strehe ter načinu pritrditve v nosilno konstrukcijo zaradi vetra ter ohranitve vodotesnosti.

Moduli lahko služijo tudi kot zunanji elementi fasade stavbe in s tem izboljšajo zunanji izgled stavbe. Vodotesnost in izolacija sta lahko predmet integracije ali pa ju izvedemo za moduli zaradi boljšega hlajenja. Laminat izdelan iz stekla lahko služi namesto steklenih površin in je lahko izdelan točno po meri, vzorcu ali barvi, hkrati pa nudi vso potrebno vremensko zaščito.

Polprosojne fasade dosežemo z integracijo tankoslonih modulov, ki so posebej prilagojena za to aplikacijo ali uporabimo laminacijo kristalnih sončnih celic med dve plasti stekla. Prosojnost je regulirana glede na razmerje površine laminata s sončnimi celicami in površino brez njih. Uporabljamo lahko večslojni laminat in tako pripomoremo k dodatni toploti in zvočni izolaciji.

Strešna okna ali steklene strehe sodijo med najbolj primerne površine za izvedbo BIPV. Poleg razpršitve svetlobe nudijo neovirano površino za integracijo BIPV. Pri tem tipu nudi fotonapetostni element objektu svetlobo in elektriko. Pri izvedbi z laminacijo kristalnih celic dosežemo čudovito igranje in prehajanje svetlobe na površinah, ki jih strešna okna osvetljujejo.

Potreba po premišljenem načrtovanju PV sistemov za vgradnjo v ali na stavbe raste skupaj s trendom zahtev po velikih oknih, odprtosti in zračnosti prostorov v današnji arhitekturi.



Slika 2: Primeri integracije BIPV(vir: www.pvdatabase.org)

3. IZPLEN ENERGIJE BIPV

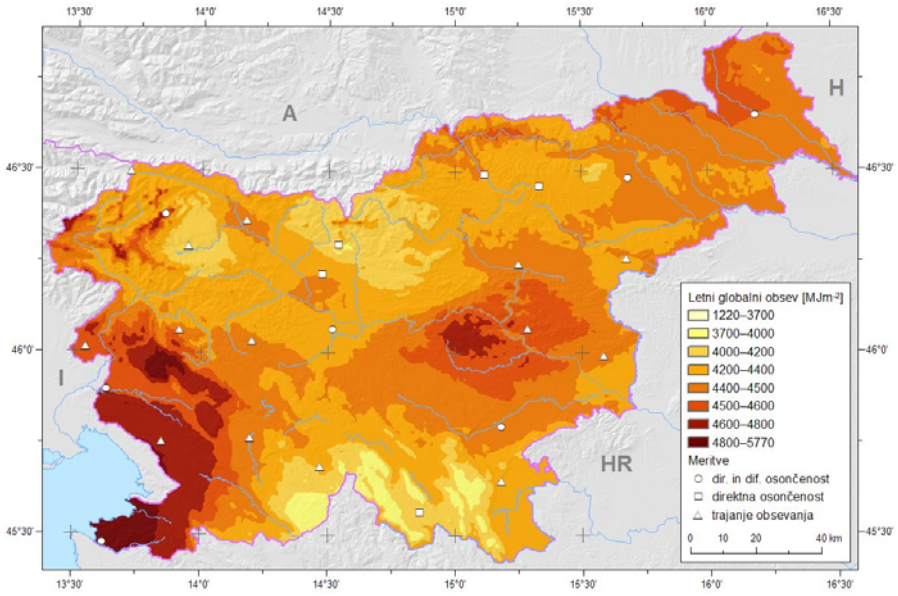
Letni izplen sončne elektrarne, ki je izražen s specifično proizvodnjo kWh/kW, je predvsem odvisen od naslednjih parametrov:

- lokacije postavitve elektrarne,
- orientacije in naklona,
- lokalnega ali medsebojnega senčenja,
- načina vgradnje in
- učinkovitosti pretvorbe enosmerne napetosti v izmenično.

Vloga učinkovitosti pretvorbe fotonapetostnih modulov na nivoju specifične proizvodnje je nepomembna. Za enako moč elektrarne potrebujemo pri slabši učinkovitosti le večjo površino fotonapetostnih modulov. V letni izplen pa so vključene izgube med moduli in el. omrežjem, ki zajemajo ohmske izgube na električnih vodnikih, zaščitnih elementih ter učinkovitost pretvorbe in učinkovitost sledenja točki največje moči razsmernika.

3.1 Lokacija postavitve

Lokacije z višjim globalnim obsevanjem v Sloveniji so omejene predvsem na primorsko regijo, vinorodna območja v zgornjem primorskem, štajerskem in v Posavju ter prisojna območja z visoko nadmorsko lego. Sl. 3 prikazuje globalno sončno obsevanje v Sloveniji. Podatki so modelirani na podlagi podatkov iz merilnih postaj s pomočjo modela terena in vremena. Podatki o sončnem obsevanju so izraženi v MJ/m^2. Za preračun v kWh/m^2 je potrebno podatke deliti s 3,6. Sicer pa se sončno obsevanje v Sloveniji razlikuje glede na horizontalo do 15% med kraji z najvišjim in najnižjim obsevanjem [2].

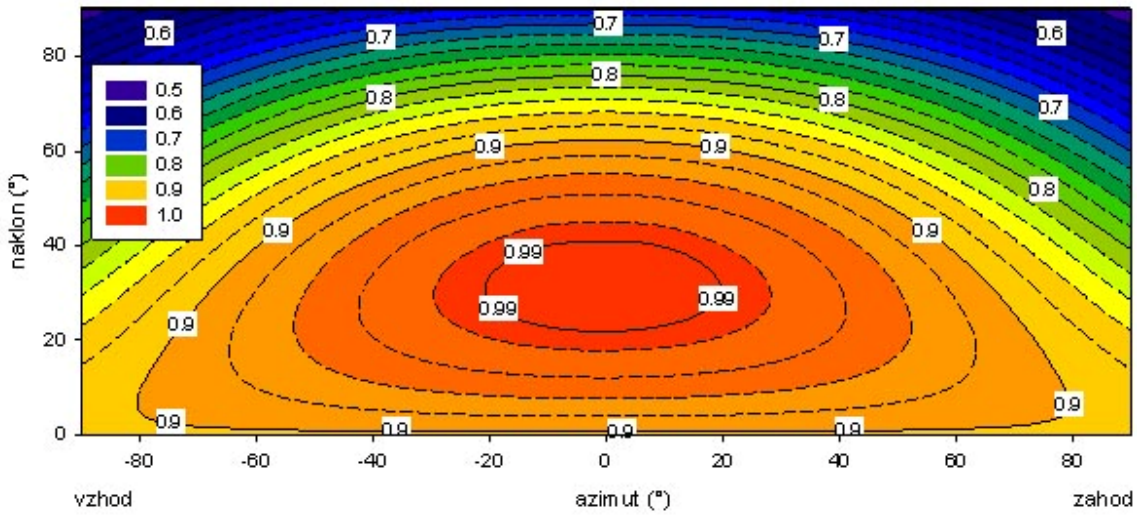


Slika 3: Globalno letno obsevanje na področju Slovenije (vir: K. Zakšek, J. Rakovec, at al.).

3.2 Vpliv orientacije in naklona

Najugodnejši kot naklona je predvsem pogojen z dvema dejavnikoma. Prvi je zemljepisna oz. geografska širina, drugi pa je cilj oz. namen sistema. V primeru, da gre za omrežni sistem, optimiramo delovanje na največji možni letni donos in je kot naklona izbran glede na največji letni integral sončnega obsevanja. V osrednji Evropi dosežemo največji letni izplen s fotonapetostnimi moduli s kotom nagiba 30° pri azimutu 5° (5° od juga proti zahodu). Optimalen kot naklona znaša v Sloveniji okoli 32° in je manjši, kot je povprečen sončni zenit (enakovreden 90° - zemljepisna širina), ker največji delež sončnega sevanja v srednjeevropskem podnebju vpada med toplejšimi šestimi meseci.

Odstopanja naklona in orientacije do 20° vodijo do zgolj petodstotnih izgub. Navpične površine, ki so usmerjene proti jugu (južne fasade) omogočajo izkoristke do 70% optimalne vrednosti. Takšna porazdelitev je značilna za celotno osrednjo Evropo. Sl.. 4 prikazuje relativno zmanjšanje obsevanja na letni ravni glede na optimalni azimut in naklon za Slovenijo.



Slika 4: Relativno zmanjšanje obsevanja na letni ravni glede na optimalni azimut in naklon za Slovenijo.

V primeru otočnih fotonapetostnih sistemov pa je optimalni kot naklona pogojen predvsem z bremenom in njegovim časovnimi intervalom potrebe oskrbe z električno energijo. Kot primer lahko predstavimo otočni sistem v visokogorskih kočah, ki delujejo predvsem v poletnih mesecih. Tukaj je optimalni kot nižji predvsem zaradi optimizacije glede na delovanje zgolj v poletnih mesecih. V primeru delovanja koče v času med začetkom maja in koncem septembra je optimalen kot 17°.

Na podlagi letnih meritev sončnega obsevanja na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani [3], je podana tabela z mesečnimi in letnimi vrednostmi sončnega obsevanja in optimalnimi koti naklona v smeri jug, na podlagi katerih lahko po enačbi 1 izračunamo optimalni kot glede na končno aplikacijo:

$$\alpha_{OPTIMALNI}(^\circ) = \frac{1}{\sum_{m=1}^{n} E^n_{TOT_MESEČNI}(\mathrm{kWh/m^2})} \cdot \sum_{m=1}^{n} \alpha^n_{OPT_MESEČNI}(^\circ) \cdot E^n_{TOT_MESEČNI}(\mathrm{kWh/m^2}), \quad (1)$$

kjer sta $\alpha_{OPTIMALNI}$ in $\alpha_{OPT_MESEČNI}$ optimalni kot naklona in mesečni optimalni kot naklona. $E_{TOT_MESEČNI}$ predstavlja mesečno energijo sončnega obsevanja in n število mesecev za izračun optimalnega kota. Potrebno je še opozoriti, da se optimalni kot naklona veča, ko se po azimutu oddaljujemo od smeri jug proti vzhodu ali zahodu.

Tabela1: Podatki za mesečno obsevanje in izračun optimalnih kotov za Ljubljano.

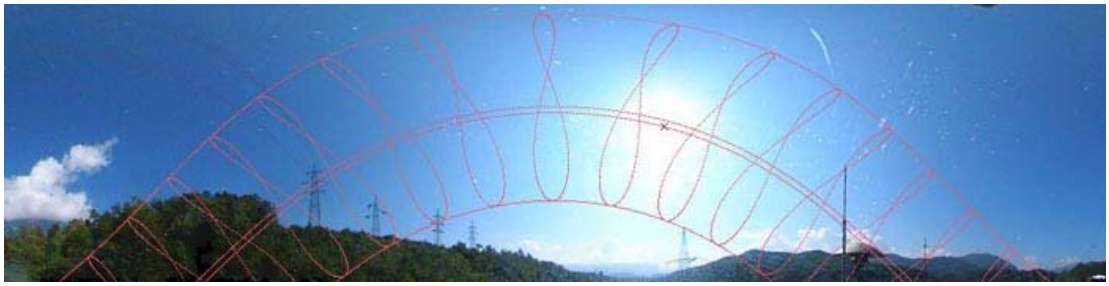
mesec	E_{TOTAL}**(kWh/m^2)**	**Optimalni kot (°)**
Januar	35,8	65
Februar	57,3	58
Marec	96,5	43
April	118,3	27
Maj	162,5	15
Junij	172,5	8
Julij	175,7	11
Avgust	155,7	23
September	107,8	37
Oktober	64,9	50
November	34	60
december	27,7	66
leto	**1208**	**32**

3.3 Senčenje

Pri postavitvi fotonapetostnih modulov prihaja tudi do pojava senčenja. Viri senčenja so objekti, ki se nahajajo med soncem in poljem fotonapetostnega generatorja, dvignjen horizont ter medsebojno senčenje modulov, če so le-ti postavljeni v vrste. Če je le možno, se je senčenju smiselno popolnoma izogniti. Problem senčenja je mnogokrat podcenjen. Najslabše je delno senčenje zaradi drogov ali dimnikov v neposredni bližini generatorja. Sončna celica z najmanjšim tokom določa količino toka, ki lahko teče skozi množico zaporedno vezanih celic. V primeru, da v modulu niso nameščene premostitvene diode to pomeni, da se izhodna moč zmanjša enako, če je delno senčena ena sama celica oziroma celotna vrsta zaporedno vezanih celic ali celo modulov. Senčenje, ki ga povzročijo drevesa in sosednje zgradbe kot tudi držala za ventilatorje, dimniki in podobno, omejuje in v najslabšem primeru celo ustavi proizvodnjo celotne verige zaporedno vezanih modulov.

Vpliv delnega senčenja je omiljen z dodajanjem premostitvenih diod v priključno ohišje fotonapetostnega modula. Diode premestijo delno senčene celice v modulu in s tem zmanjšajo vpliv senčenja. Kljub temu se zaradi senčenja zmanjša napetost točke največje moči in s tem razpoložljiva. Ob tem nastaneta na karakteristiki moči v odvisnosti od napetosti en lokalni in en globalni maksimum.

Analizo senčenja lahko opravimo ročno z indikatorjem sončne poti ali digitalnim posnetkom. Sl. 5 prikazuje posnetek okolice lokacije PV-generatorja z vrisanim evklidskim diagramom sonca (zgornja krivulja pomeni najvišjo pot sonca poleti, spodnja krivulja pa najnižjo pot pozimi). Jutranje senčenje stavbe na vzhodni strani je prisotno med celim letom. S simulatorji senčenja je mogoče vpliv takšnega senčenja energijsko ovrednotiti.

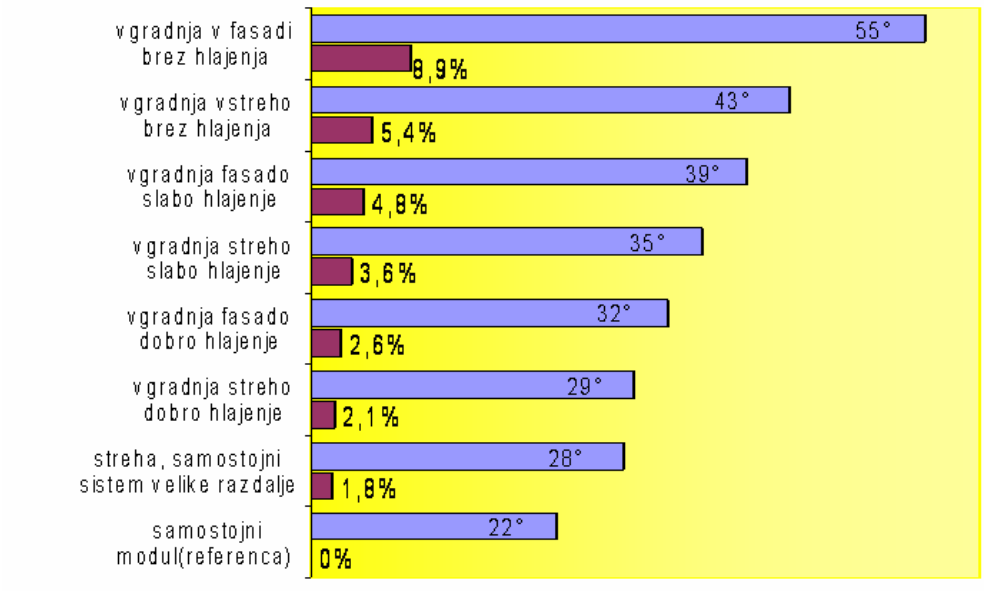


Slika 5: Evklidski diagram sonca za izračun senčenja.

3.4 Način vgradnje

Napetostno-tokovna karakteristika fotonapetostnega modula izkazuje nelinearno karakteristiko. Tok izkazuje linearno odvisnost z jakostjo sončnega sevanjem, napetost pa logaritmično odvisnost. Poleg odvisnosti od jakosti sončnega sevanja karakteristika izkazuje tudi temperaturno odvisnost. Kratkostični tok - I_{SC} izkazuje pozitivni temperaturni koeficient - α reda +0,06%/K, temperaturni koeficient napetosti - β pa okrog -0.3%/K. Temperaturni koeficient maksimalne moči se tipično giblje med -0,4 in - 0,5% /K.

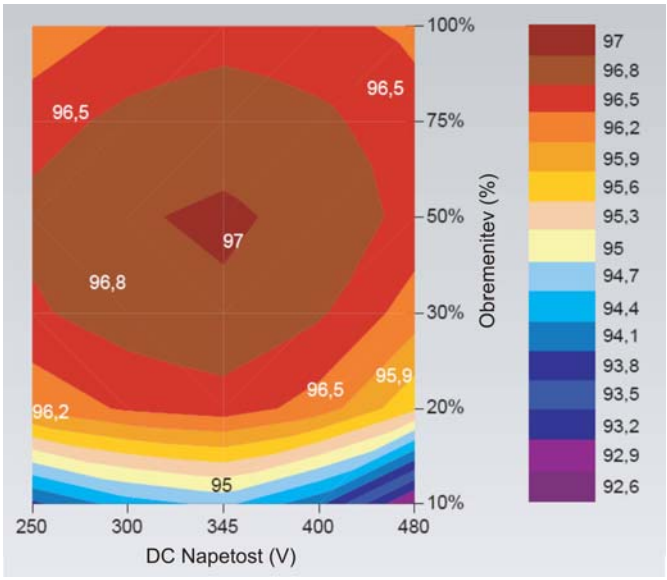
Sončne celice oziroma moduli se ob osvetljevanju segrevajo, kar je posledica absorpcije dela energije vpadne svetlobe. Zahteva po čim nižji temperaturi PV-modulov narekuje uporabo naravnega hlajenja modulov z zadnje strani po načelu naravne konvekcije. V primeru, da module termično izoliramo, na primer v fasadah z izolacijskim steklom, je temperatura celice v modulu lahko do 40 stopinj višja od modula z neovirano konvekcijo. Slika prikazuje temperaturo modula nad temperaturo okolice in relativne izgube glede na način vgradnje. Izgube lahko znašajo do 9 % največje izhodne moči prezračevanega PV-modula.



Slika 6: Nadtemperatura modula in pripadajoče izgube.

3.5 Pretvorbe enosmerne napetosti v izmenično

Za oddajanje energije v električno omrežje moramo enosmerno napetost, ki jo generirajo fotonapetostni moduli, pretvoriti v izmenično ter jo sinhronizirati z napetostjo omrežja. Napravo, ki poskrbi za pretvorbo, imenujemo razsmernik. Sestavljen je iz vrste polprevodnikov in integriranih vezij, ki opravljajo nalogo zaščite, prilagoditve napetostnih nivojev, iskanja maksimalne moči modulov, razsmerjanju enosmerne napetosti v izmenično ter komunikacijo z računalnikom. Seveda elementi, ki so uporabljeni v napravi, niso idealni in tako se na njih v fazi pretvorbe troši določen delež moči. Učinkovitost pretvorbe naprave je predvsem odvisen od razmerja med DC napetostjo na vhodu in izhodno AC napetostjo na izhodu ter obremenitvijo naprave. Sl. 7 prikazuje tipično karakteristiko razsmernika.



Slika 7: Učinkovitost pretvorbe razsmernika (vir: Power-one)

Tokokrog je na enosmerni in izmenični strani razsmernika je dodatno ščiten s prenapetostnimi in pretokovnimi zaščitnimi elementi, na katerih prav tako prihaja do ohmskih izgub.

4. PRIMERI DOBRE PRAKSE V SLOVENIJI

4.1 RTP Listostroj

Na objektu Razdelilna transformatorska postaja RTP110/20 kV Litostroj je zgrajena sončna elektrarna, ki je sestavljena iz treh fotonapetostnih generatorjev. Streho pokriva Trimo EcoSolar kritina, ki je sestavljena iz sendvič panelov z negorljivo mineralno volno in tovarniško vgrajenimi fotonapetostnimi moduli. Skupna moč generatorja na strehi je 6,80 kW. Na levi strani južne fasade so vgrajeni temni CIGS moduli podjetja Wurth Solar s skupno nazivno močjo 5,40 kW. Tretji generator je sestavljen iz modulov Kaneka, skupne moči 3,48 kW. Moč celotne elektrarne je 15,68 kW, letno bo proizvedla 13.000 kWh. Vsi trije generatorji so sestavni del ovoja stavbe v obliki strehe in fasade. Poleg tega so po pričevanju z namestitvijo fotonapetostnih modulov na fasadi investitorju v RTP prihranili približno 60 EUR/m², kar skupaj znaša 6.640 EUR. V primeru, da bi projektant izbral dražjo rešitev za fasado, na primer marmor, bi bili prihranki mnogo večji.



Slika 8: Južna fasada objekta RTP Litostroj.

4.2 Prodajalna pohištva Lido – Drenov grič

Podjetje z oblazinjenim pohištvom Lido na Drenovem griču je na novem objektu salona postavilo v lanskem letu sončno elektrarno, ki jo sestavljata dva generatorja. Prvi je integriran v stekleno fasado na južni strani s fotonapetostnimi moduli, kjer so sončne celice laminirane med dvema plastema stekla. Moduli imajo poleg pretvorbe sončne elektrarne v električno tudi nalogo senčenja. Drugi generator je postavljen na streho objekta v vrstah. Skupna moč elektrarne je 16 kW. Objekt je viden iz avtoceste na relaciji med izhodom za Vrhniko in Brezovico.



Slika 9: Vgradnja fotonapetostnih modulov v jekleno nosilno konstrukcijo.

4.3 Nova stolpnica Kristalna palača v BTC-ju

Izgradnja Kristalne palače, ki bo predvidoma zaključena do maja 2011, je prvi projekt v sklopu velikega urbanističnega projekta Partnerstvo Šmartinka, in v okviru katerega bo na novo opredeljeno in oblikovano 217 hektarov veliko območje med BTC CITY-jem, Šmartinsko cesto in železniško progo. 20-nadstropnegi nebotičnik, delo arhitektov Braneta Smoleja in Denisa Simčiča, bojo na južni fasadi nebotičnika in pritličja krasila tri fotonapetostna polja. Dve polji bosta nameščeni vzdolž vetikale na vsaki strani južne fasade

nebotičnika, tretji pa bo nameščen nad samim južnim vhodom v pritlični del kompleksa. Skupna predvidena moč elektrarne je okrog 100 kW.

5. ZAKLJUČEK

Fotonapetostni sistemi so dandanes že pripravljeni za različne načine integracije v stavbe in bodo z leti postali nepogrešljiv element pri načrtovanju stavb. Emocionalne debate v preteklosti okrog kratkoročnosti potenciala BIPV danes izrivajo dolgoročna načrti. Zamenjava pasivnih elementov ovoja stavbe z aktivnimi vodi od ideje o samooskrbi električne energije na nivoju stavbe do samooskrbe z el. energijo na nivoju mest, brez nepotrebnih izpustov toplogrednih plinov v okolje.

Še enkrat je potrebno poudariti potrebnost pravilnega načrtovanja BIPV že v fazi načrtovanja objektov. Letni izplen je sicer primarno pogojen z lokacijo in sončnim obsevanjem na tej lokaciji, vendar sta azimut in naklon modulov ključna za določitev deleža sončnega obsevanja, ki ga fotonapetostni generator prejme glede na idealno lego. Na zmanjšanje obsevanja vpliva tudi senčenje bližnjih objektov, horizonta in medsebojno senčenje modulov. Učinkovitost pretvorbe sončne energije v električno zmanjšuje temperatura modulov. Višja kot je temperatura, manjša je učinkovitost pretvorbe. Naslednji v verigi izgub pri pretvorbi so še polnilnik in akumulatorji, v primeru otočnega sistema, in razsmernik, v primeru omrežnega sistema. Vse te izgube moramo pri načrtovanju vgradnje ter nadalje v analizi letnega izplena in ekonomiki skrbno predvideti in preučiti.

6. REFERENCE

[1] Global Market Outlook for Photovoltaics Until 2013, internetna stran www.epia.org
[2] Kastelec, D., Rakovec, J., Zakšek, K., Sončno obsevanje v Sloveniji. Ljubljana, Založba ZRC, 2007
[3] Kurnik et al., "First measurement results of effective efficiency of different PV modules under field conditions", 22nd EuPVSEC, 2007, pp. 2731-2734.

NASLOV AVTORJEV

Tine Andrejašič, univ. dipl. inž. el.[1,2]
dr. Kristijan Brecl, univ. dipl. inž. el.[1]
Franko Nemac, univ. dipl. inž. el. [2]
prof. dr. Marko Topič, univ. dipl. inž. el.[1]

[1] Fakulteta za elektrotehniko Ljubljana,
Tržaška ulica 25, Ljubljana, Slovenija; Tel: +386 1 4768 723, Fax: +386 1 4768 276

[2] Agencija za prestrukturiranje energetike, d.o.o.
Litijska 45, Ljubljana, Slovenija; T: +386 1 5863870, Fax: +386 5863879

Elektronska pošta: tine.andrejasic@fe.uni-lj.si