

Optimalno napajanje potrošnje korišćenjem autonomnog hibridnog sistema sa obnovljivim izvorima i skladištenjem energije

Milica Bogdanović
Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
milica.milicabogdan.bogdanovic@gmail.com

Jovan Mikulović
Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
mikulovic@etf.rs

Sažetak— U radu je razmatran autonomni hibridni sistem za optimalno napajanje potrošnje koji se sastoji iz fotonaponskog panela, vetroagregata i akumulatorskih baterija za skladištenje energije. Da bi se pokazala prednost hibridnog sistema, razmatran je slučaj kada potrošnju napaja fotonaponski panel sa sistemom za skladištenje energije, a zatim i slučaj kada potrošnju napaja vetroagregat sa sistemom za skladištenje energije. Optimalno dimenzionisanje hibridnog sistema je izvršeno prema kriterijumu najmanje cene sistema, uz uslov da potrošnja bude snabdevena u pogledu snage i energije. Karakteristični dijagram potrošnje je definisan na osnovu merenja aktivne snage u transformatorskoj stanici Vitanovac koja napaja seoski konzum. Za proračun proizvodnje fotonaponskog sistema i vetroagregata korišćeni su podaci o izmerenoj horizontalnoj solarnoj iradijaciji, temperaturi vazduha i brzini vetra za širi region Beograda.

Ključne reči— *autonomni fotonaponski sistem; autonomni sistem sa vetroagregatom; hibridni sistem; ekonomska isplativost sistema*

I. UVOD

Danas postoji tendencija za što većim učešćem obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije, pre svega fotonaponskih sistema i vetroagregata. Razvoj energetske elektronike, korišćenje savremenih materijala i sve veća potreba i zahtevi za korišćenjem čistih izvora energije rezultovali su naglim razvojem solarne i vetro-energetike u svetu. U zavisnosti od načina rada, fotonaponski (PV-photovoltaic) sistemi mogu biti autonomni (*off-grid*) ili mogu funkcionisati kao mrežno povezani sistemi (*on-grid*) [1]-[3]. Autonomni (samostalni) PV sistemi su obično udaljeni od elektroenergetske mreže pa je potrebno da na neki način skladište energiju. Da bi se obezbedila energija u toku noći ili u periodima sa malim intenzitetom Sunčevog zračenja, mora postojati sistem za skladištenje energije (najčešće su to akumulatorske baterije). Vetrogeneratorski sistemi, takođe, mogu raditi povezani na mrežu (*on-grid*) ili kao autonomni sistemi (*off-grid*). Autonomni vetroagregati, kao i autonomni PV sistemi, se uglavnom koriste za napajanje potrošača udaljenih od mreže, tako da su i kod njih neophodni sistemi za skladištenje energije. Sistemi za skladištenje energije se mogu koristiti i kod mrežno povezanih fotonaponskih i

vetrogeneratorskih sistema da bi se prevazišli problemi pri njihovoj integraciji u elektroenergetski sistem. Najveći nedostatak ovakvih izvora energije pri njihovoj integraciji u elektroenergetski sistem je promenjiva snaga proizvodnje zbog njihove zavisnosti od dostupnosti primarnog resursa (solarnog zračenja, odnosno vetra). U cilju povećanja sigurnosti i raspoloživosti isporuke električne energije, uvode se hibridni sistemi koji se formiraju korišćenjem dva ili više izvora energije, kao što su fotonaponski paneli, vetro turbine, hidrogenatori i dizel agregati. Prednost hibridnih sistema posebno dolazi do izražaja kod autonomnih sistema. Samostalni fotonaponski i vetrogeneratorski sistemi se dimenzionišu prema kritičnom mesecu u pogledu dostupnosti potencijala. Za fotonaponske sisteme decembar je mesec sa najmanjom insolacijom, dok se za vetrogeneratore može usvojiti jun kao mesec sa najmanjim vetropotencijalom. Dimenzionisanje autonomnih sistema prema kritičnom mesecu u pogledu dostupnosti potencijala ima za posledicu da će ovakvi sistemi biti predimenzionisani tokom većeg dela godine. U junu, koji je kritičan mesec u pogledu proizvodnje za vetroagregat, moguća je velika proizvodnja iz fotonaponskog sistema. U decembru, koji je kritičan mesec u pogledu proizvodnje za fotonaponski sistem, moguća je velika proizvodnja iz vetrogeneratora. Komplementarnost proizvodnje električne energije iz fotonaponskih i vetrogeneratorskih sistema na sezonskom nivou (leto-zima) čini kombinaciju fotonaponskog sistema i vetrogeneratora pogodnom za hibridni sistem. U slučaju autonomnih hibridnih sistema, neophodan je i sistem za skladištenje energije.

U ovom radu je razmatran autonomni hibridni sistem koga čine fotonaponski panel, vetroagregat i akumulatorske baterije i izvršeno je optimalno dimenzionisanje takvog sistema prema kriterijumu najmanje cene sistema. U postupku optimizacije sistema su korišćeni realni merni podaci o snagama potrošnje, solarom zračenju, brzini vetra i temperaturi vazduha

II. DIMENZIONISANJE AUTONOMNOG PV SISTEMA

Za dimenzionisanje autonomnog PV sistema od interesa je zimski period, pošto je u tom periodu velika potrošnja, a

insolacija je mala. Zbog toga su za dimenzionisanje ovog sistema korišćeni desetominutni meri podaci za horizontalnu iradijaciju i temperaturu za mesec decembar. Snaga i energija potrošnje koju je neophodno snabdeti su dobijene na osnovu merenja aktivne snage u transformatorskoj stanici Vitanovac koja napaja seoski konzum. Ukupna potrošnja je podeljena sa brojem potrošača tako da su dobijeni dnevni dijagrami potrošnje jednog tipičnog domaćinstva.

Iradijacija predstavlja snagu Sunčevog zračenja po jedinici površine, a insolacija predstavlja energiju Sunčevog zračenja po jedinici površine. Solarno zračenje stiže do solarnog panela u vidu direktnog, difuznog i reflektovanog zračenja. Da bi se meri rezultati o ukupnoj horizontalnoj iradijaciji I_H , koji su prikupljeni za određeni period, ekstrapolirali na proizvoljno orijentisan solarni modul, potrebno je dekomponovati ukupnu horizontalnu iradijaciju na odgovarajuću direktnu komponentu I_{BH} i difuznu komponentu I_{DH} [2],[4]:

$$I_H = I_{BH} + I_{DH} \quad (1)$$

Za izračunavanje difuzione komponente potrebno je najpre izračunati faktor vedrine K_T . Faktor vedrine se definiše kao odnos srednje horizontalne insolacije na mernom mestu I_H i srednje horizontalne ekstraterestričke insolacije na površini Zemljine atmosfere I_0 na koordinatama koje odgovaraju mernom mestu:

$$K_T = \frac{I_H}{I_0} \quad (2)$$

Veći indeks znači da nebo nije oblačno i da je atmosfera čista i obrnuto. Srednja horizontalna dnevna insolacija ekstraterestričkog zračenja može se dobiti kao:

$$\bar{I}_0 = \left(\frac{24}{\pi}\right) SC \left[1 + 0,034 \cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right] (\cos L \cos \delta \sin H_{SR} + H_{SR} \sin L \sin \delta) \quad (3)$$

gde su:

L - odgovarajuća geografska širina, za Beograd geografska širina je 44,48

SC - solarna konstanta ekstraterestričkog zračenja koja iznosi 1370 W/m²

n - redni broj posmatranog dana u godini, u ovom proračunu uzeta je vrednost 370

δ - solarna deklinacija koja se za posmatrani dan računa prema relaciji:

$$\delta = 23,4 \sin\left(\frac{360}{365}(n-81)\right) \quad (4)$$

H_{SR} - satni ugao zalaska sunca koji se, za zadatau geografsku širinu i ugao deklinacije izračunava na sledeći način:

$$H_{SR} = \arccos(-\operatorname{tg} L \cdot \operatorname{tg} \delta) \quad (5)$$

Liu-Jordan-ova empirijska relacija za dekompoziciju ukupnog horizontalnog zračenja na direktnu i difuznu komponentu daje vezu između difuzne komponente zračenja na horizontalnu površinu i indeksa vedrosti [4]:

$$\frac{\bar{I}_{DH}}{I_H} = 1,39 - 4,027K_T + 5,531K_T^2 - 3,108K_T^3 \quad (6)$$

Indeks vedrosti K_T se može primeniti za izračunavanje direktne i difuzne komponente insolacije, ali takođe i za izračunavanje direktne komponente iradijacije I_{BH} i difuzne komponente iradijacije I_{DH} . Direktna komponenta iradijacije na PV panel se izračunava na osnovu:

$$I_{BC} = R_B I_{BH} \quad (7)$$

gde je R_B faktor kosine, čija srednja vrednost za decembar pri optimalnom nagibnom uglu panela iznosi 3,4. Za nagibni ugao panela Σ , difuzna i reflektovana komponenta iradijacije na površinu panela se mogu izračunati prema relacijama (8) i (9):

$$I_{DC} = I_{DH} \cdot \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2}\right) \quad (8)$$

$$I_{RC} = \rho (I_{BH} + I_{DH}) \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2}\right) \quad (9)$$

gde su: $\Sigma=67^0$ optimalni nagibni ugao panela za decembar, a $\rho=0,2$ koeficijent refleksije Sunčevog zračenja od površine Zemlje.

U proračunu je dobijeno da je srednja dnevna insolacija na panel za prosečan dan u decembru 1,323 kWh/m², a za svaki desetominutni interval izračunata je ukupna iradijacija na panel. Srednja dnevna insolacija na panel po brojnoj vrednosti je jednaka srednjem broju sati "zenita Sunca" u toku dana, odnosno ekvivalentnom broju sati koji odgovara istoj dnevnoj insolaciji pri standardnoj vrednosti iradijacije od 1000 W/m². Broj sati "zenita Sunca" u toku dana je polazna vrednost za dimenzionisanje autonomnih PV sistema. Kod invertora koji se koristi kod PV sistema jedna od najvažnijih karakteristika je ulazni napon, tako da je potrebno na početku proračuna odrediti i napon DC sistema. Smernica za njegovo određivanje je da struja ne prelazi 100 A da bi se mogla koristiti standardna rasklopna oprema. Zbog toga se napon jednosmernog sistema bira na osnovu maksimalne naizmenične snage potrošnje. Proračunom je dobijeno da je maksimalna snaga potrošnje u decembru $P_{ACmax}=1789,1$ W pa je prema preporuci usvojen napon sistema $U_S=24$ V. U tabeli I su za glavne elemente PV sistema date tehničke karakteristike. Iz tabele se vidi da je snaga invertora koja može kontinuirano da se predaje dovoljno velika da u svakom trenutku zadovolji zahteve potrošnje.

Kao što je već napomenuto, samostalni PV sistemi moraju imati sistem za skladištenje energije. U tu svrhu se koriste akumulatorske baterije. Akumulatorske baterije, osim što daju energiju u periodima kada proizvodnja modula nije dovoljna ili je nema, obezbeđuju udarnu struju pri eventualnom uključanju potrošača velike snage. Baterije se u sistemu mogu vezivati redno, da bi se postigao zahtevani napon i paralelno, da bi se postigao željeni kapacitet [5]. Pri određivanju tipa i broja baterija potrebno je prvo proračunati ukupnu jednosmernu potrošnju kao zbir jednosmerne, W_{DC} i svedene naizmenične potrošnje (naizmenične potrošnje W_{AC} korigovane stepenom iskorišćenja invertora η_{im}) odnosno:

$$W_{DCtot} = W_{DC} + \frac{W_{AC}}{\eta_{inv}} \quad (10)$$

Ovako dobijena potrošnja se može izraziti u amper-satima prema relaciji:

$$Ah_{total\ load} = \frac{W_{DCtot}}{U_S} \quad (11)$$

Usvaja se da baterije ispunjavaju zahteve potrošnje u 95% vremena, pa se broj dana potrebnih za skladištenje računa na osnovu približne formule [4]:

$$n_{stor} = 9,43 - 1,9n_{hz} + 0,11n_{hz}^2 \quad (12)$$

gde su:

n_{stor} - broj dana potrebnih za skladištenje

n_{hz} - broj sati zenita sunca, $n_{hz}=1,323$.

Proračunom je dobijeno $n_{stor} = 7,11$ dana. Znajući broj dana potrebnih za skladištenje energije koju zahteva potrošnja i ukupnu potrošnju u Ah za karakterističan dan, moguće je odrediti kapacitet baterije koji mora biti raspoloživ:

$$Ah_{useable\ storage} = Ah_{total\ load}n_{stor} \quad (13)$$

TABELA I. PARAMETRI ELEMENATA PV SISTEMA

Element	Karakteristike	
Invertor	Nominalni jednosmerni napon	24 V
	Kontinuirana snaga	2000 W
	Efikasnost	90 %
Baterija	Napon	6 V
	Kapacitet (C/20)	225 Ah
PV modul	Snaga	260 W
	Napon u tački maksimalne snage	31 V
	Struja u tački maksimalne snage	8,39 A

U proračunu su korišćene baterije Trojan T-105 i paneli proizvođača Kyocera i tipa KU260-6MCA, čije se kompletne specifikacije mogu naći na sajtovima proizvođača.

Pošto kapacitet baterije zavisi od brzine pražnjenja i temperature okoline to je za proračun ukupnog kapaciteta baterije potrebno uvažiti koeficijente koji određuju dubinu pražnjenja i zavisnost od temperature pa je ukupni kapacitet baterije:

$$Ah_{total\ storage} = \frac{Ah_{useable\ storage}}{MODD \cdot (T, DR)} \quad (14)$$

gde su:

$MODD$ - maksimalna dubina pražnjenja, u proračunu je korišćena vrednost 0,7

(T, DR) - dostupni kapacitet u funkciji temperature; zbog minimalne temperature od $-18,8^\circ\text{C}$ usvojena je vrednost 0,65.

Ukupni kapacitet baterija koji je potreban iznosi 14646 Ah, pa shodno naponu sistema i potrebnom kapacitetu baterija dobija se da je potrebno 66 grana, na kojima su vezane po 4 baterije na red, dakle, ukupno 260 baterija instalisane snage 14850 Ah. Broj amper-sati koji se dobija iz odabranog modula je:

$$Ah_{modula} = I_m n_{hz} \eta_c \eta \quad (15)$$

gde su:

η_c - Kulonova efikasnost; usvaja se vrednost 0,9

η - smanjenje efikasnosti usled zaprljanja i starenja modula usvaja se vrednost 0,94

I_m - struja panela u tački maksimalne snage.

Dobijena je proizvodnja modula od 9,399 Ah.

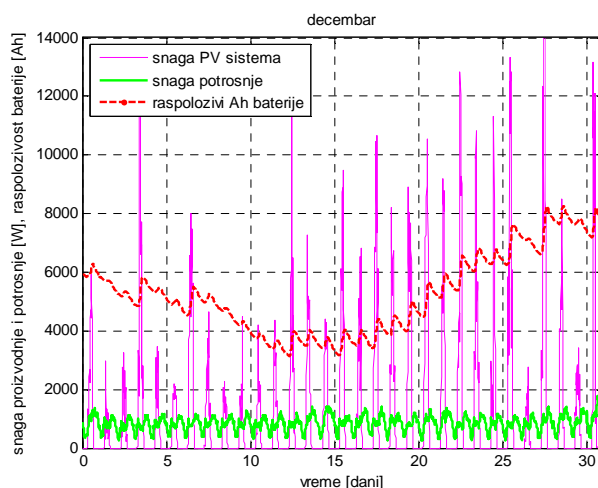
Na kraju, potreban broj redno vezanih modula u grani (N_R) i broj grana (N_P) dobija se prema formulama:

$$N_R \geq \frac{U_S}{U_m} \quad (16)$$

$$N_P \geq \frac{Ah_{total\ load}}{Ah_{modula}} \quad (17)$$

gde je U_m napon panela u tački maksimalne snage.

Dobijeno je da je potrebno ukupno 100 PV modula, instalisane snage 26000 W. Ovaj broj modula je veliki i njihova ukupna površina iznosi oko 165 m², a i sama ekonomska analiza pokazuje ovo rešenje najskupljim. Naime ukupna cena investicije sa izabranim panelima, baterijama i invertorima iznosi 59570 evra. Na slici 1 je prikazana snaga proizvodnje iz PV sistema (ljubičastom bojom), snaga potrošnje (zelenom bojom) i raspoloživi kapacitet baterija (crvenom bojom) tokom meseca decembra.



Slika 1. Snaga proizvodnje PV sistema [W], snaga potrošnje sistema [W] i raspoloživi kapacitet baterija tokom meseca decembra [Ah]

III. PROJEKTOVANJE SAMOSTALNOG VETROAGREGATA

Za dimenzionisanje autonomnog vetroagregata koriste se podaci o brzinama vetra, temperaturi i potrošnji za mesec jun, pošto su u tom mesecu izmerene najmanje brzine vetra na godišnjem nivou. Izbor i dimenzionisanje baterija za skladištenje energije vrši se tako da baterije obezbeđuju energiju u danima bez vetra. Kao kriterijum da je dan bez vetra usvaja se dan u kome je srednja dnevna gustina snage vetra manja od 10% srednje godišnje gustine snage vetra:

$$\bar{P}_d < 0,1 \bar{P}_g = 11,2 \text{ W/m}^2 \quad (18)$$

Dobijeno je 6 dana bez vetra, tako da je potrebno baterije dimenzionisati prema tom broju dana. Pošto se iz podataka o potrošnji dobija da je očekivana dnevna potrošnja u mesecu junu 18,401 kWh, instalisana snaga baterija mora biti 110,408 kWh. Za minimalnu temperaturu u junu od 8,4 °C, koeficijent (T, DR) koji ukazuje na dostupan kapacitet u funkciji temperature iznosi 0,9, pa instalisana snaga baterije mora biti najmanje 122,675 kWh.

Pri izboru vetragregata treba voditi računa da njegova proizvodnja mora biti veća ili jednaka potrošnji u mesecu junu koja iznosi 552,04 kWh. Snaga vetra koji struji brzinom v kroz površinu prečnika D koju pri rotaciji prebrišu lopatice je:

$$P = 0,5 \cdot \rho \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot v^3 \cdot K_A \cdot K_T \quad (19)$$

gde su:

$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ - gustina vazduha pri 15° C i nadmorskoj visini $H=0 \text{ m}$ (1 bar)

$K_A = e^{-1,185 \cdot 10^{-4} H}$ - korekcionni faktor koji uvažava promenu pritiska sa nadmorskom visinom H

$K_T = 288,15 / (288,15 + T_a)$ - korekcionni faktor koji uvažava promenu temperature ambijenta u odnosu na referentnu temperaturu od 15° C.

U ovom proračunu uvažava se logaritamski zakon promene brzine vetra sa visinom:

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\ln\left(\frac{H}{z}\right)}{\ln\left(\frac{H_0}{z}\right)} \quad (20)$$

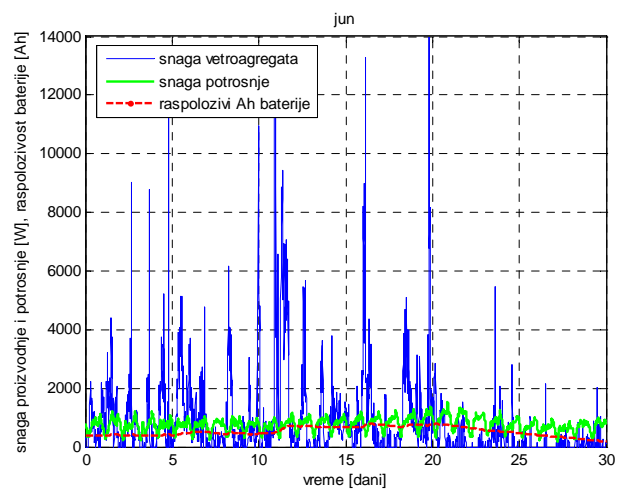
gde su: v_0 brzina vetra na visini H_0 , v brzina vetra na visini H i $z=0,1$ usvojena dužina hrapavosti terena.

Snaga vetroturbina je:

$$P_T = C_p \cdot P \quad (21)$$

gde je $C_p < 59,3$. Za svaki vetrogenerator proizvođač definiše krivu snage vetroturbine koja za svaku brzinu vetra daje izlaznu snagu vetrogeneratora. Izračunavanjem brzine vetra na visini vetragregata, linernom interpolacijom faktora C_p za svaku brzinu i korišćenjem formula (19) i (21), dobija se snaga proizvodnje vetrogeneratora za svaki desetominutni interval.

Na osnovu svih desetominutnih snaga proizvodnje dobija se mesečna proizvodnja u mesecu junu. Ponavljanjem proračuna sa više vetragregata ponuđenih od proizvođača, dolazi se do vetroagregata koji ekonomski i energetski najbolje odgovara. Kao rešenje, predložen je vetrogregat Hummer H9.0 nazivne snage 20 kW. Njegov stub je već specificiran od strane proizvođača i iznosi 16 metara. Prečnik rotora je 9 metara. Za turbine manje nazivne snage za date resurse vetra u mesecu junu, ne dobija se dovoljna mesečna proizvodnja za pokrivanje potreba potrošača. Proizvođač je specificirao šemu povezivanja vetroturbine u off-grid sistemu i zadao da napon skladišta energije bude jednosmerni napon od 240 V. Dakle, neophodno je da broj redno vezanih baterija Trojan T-105 u jednoj grani bude 40. Iz podataka se dobija da su potrebne 3 grane sa 40 redno vezanih baterija ukupne snage 625 Ah. Na osnovu prethodnih podataka izračunate su desetominutne snaga i prikazane su grafički. Na slici 2 je prikazana snaga proizvodnje iz vetrogeneratora, snaga potrošnje i raspoloživi kapacitet akumulatorskih baterija tokom meseca juna.



Slika 2. Snaga proizvodnje vetrogregata [W], snaga potrošnje sistema [W] i raspoloživi kapacitet baterija tokom meseca juna

Faktor iskorišćenja kapaciteta vetrogeneratora je:

$$CPF = \frac{W}{T \cdot P_n} \quad (22)$$

gde su: W ukupna proizvodnja u mesecu junu, $T=720 \text{ h}$ broj sati u mesecu junu, $P_n=20000 \text{ W}$ nominalna snaga.

Za faktor CPF dobija se vrednost 4,07 %, pa se dolazi do zaključka da je sistem predimenzionisan. Ukupna investicija u ovaj sistem iznosi 56550 evra, što ga čini jeftinijim rešenjem od samostalnog PV sistema

IV. PROJEKTOVANJE HIBRIDNOG SISTEMA SA VETROAGREGATOM I PV SISTEMOM

U ovom delu rada projektovan je hibridni sistem sa vetroagregatom i PV sistemom koji bi snabdevao potrošnju i u decembru i u junu. Uslov za dimenzionisanje vetroagregata i PV sistema je da energetske potrebe potrošača budu jednake zbiru proizvodnje ova dva sistema. Proračun je rađen tako što je za više vetragregata izračunata njihova proizvodnja u junu i

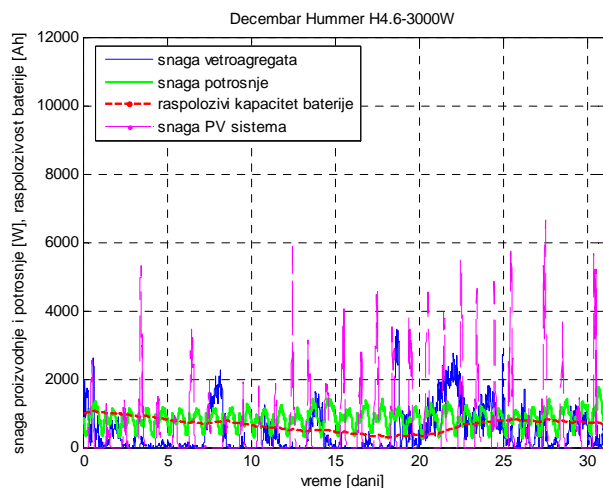
decembru, pa je sračunat broj modula koji je potreban da bi se energetske potrebe potrošača zadovoljile u oba meseca. Koristišćeni su isti moduli kao u proračunu za samostalni PV sistem Kyocera KU260-6MCA. Baterije su u svakom od proračuna dimenzionisane tako što je za dobijeno rešenje proizvodnje PV sistema i vetragregata izračunat uzastopan broj dana u kome je potrošnja sistema veća od ukupne proizvodnje PV i vetrogeneratorskog sistema, i te uzastopne energetske razlike su sumirane. Prema tim energetskim razlikama dimenzionisane su baterije, s tim što je uzeta veća vrednost od energetskih razlika u decembru i junu. Simulacije su vršene za više vetroagregata proizvođača Hummer različitih naznačenih snaga i za odgovarajući broj fotonaponskih modula tipa Kyocera KU260-6MCA, nazivne snage 260 W. Optimalno rešenje je traženo na osnovu kriterijuma da se zadovolje energetske zahteve potrošnje u junu i decembru, a da cena sistema bude minimalna.

Najpre je razmatran vetroagregat Hummer H4.6 nazivne snage 3000 W za koji potreban broj fotonaponskih modula iznosi 43. Rešenje hibridnog sistema je dobijeno na osnovu kriterijuma da se zadovolje energetske zahteve potrošnje u decembru, koji se za slučaj vetroagregata relativno male snage i relativnog velikog broja PV modula pokazao kao teži uslov u odnosu na mesec jun. Ukupan broj dana u decembru u kome je potrošnja veća od proizvodnje je 6, a zbir energetskih razlika u tih 6 dana je 55,856 kWh. Dimenzionisanje baterija je izvršeno na osnovu uslova:

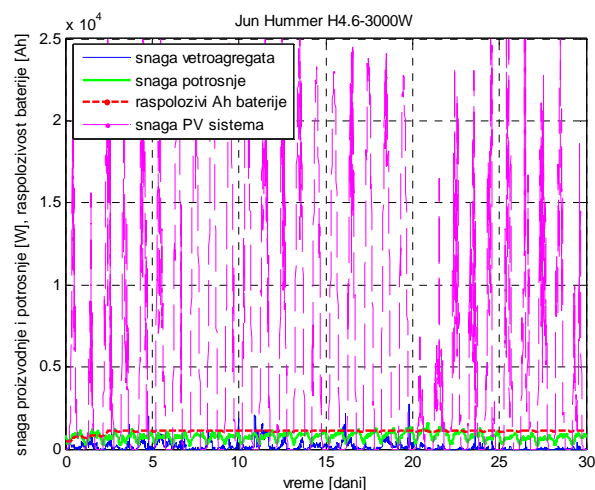
$$(Ah)_{bat} \geq \frac{W_{energ.razlike}}{0,75 \cdot MODD \cdot (T, DR) \cdot V_{DC}} \quad (23)$$

gdje su $MODD=0,7$ i $(T, DR)=0,65$.

Potreban broj amper-sati baterija je $(Ah)_{bat} \geq 909,402$, jer je $V_{DC}=180$ V. Potrebno je 5 grana sa po 30 redno vezanih baterija Trojan T-105, ukupne instalisane snage 1125 Ah. Na slikama 3 i 4 je prikazana snaga proizvodnje iz vetrogeneratorskog sistema, snaga potrošnje, snaga proizvodnje iz fotonaponskog sistema i raspoloživi kapacitet akumulatorskih baterija tokom meseca decembra i juna.



Slika 3. Snaga proizvodnje vetrogeneratorskog sistema snage 3 kW, snaga proizvodnje PV sistema, snaga potrošnje sistema i raspoloživi kapacitet baterija tokom meseca decembra za hibridni sistem



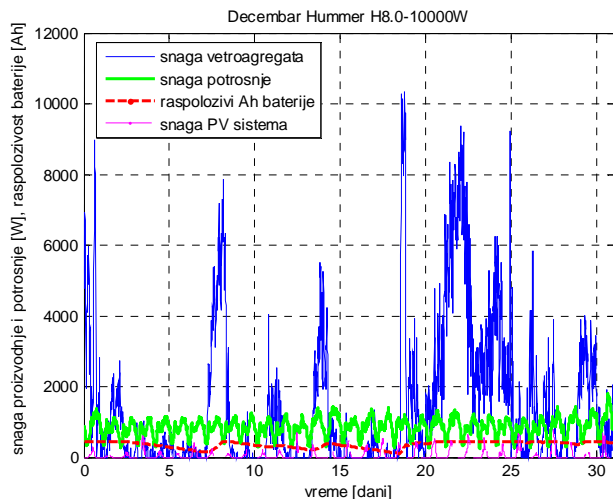
Slika 4. Snaga proizvodnje vetrogeneratorskog sistema snage 3 kW, snaga proizvodnje PV sistema, snaga potrošnje sistema i raspoloživi kapacitet baterija tokom meseca juna za hibridni sistem

Dimenzionisani hibridni sistem zadovoljava zahteve potrošnje u decembru, međutim u junu PV moduli proizvode mnogo energije pa dolazi do viška energije od 3550,2 kWh. Skladištenje te energije je skupo, pa se višak energije može koristiti u druge svrhe. Neke od mogućnosti su grejanje vode, isporuka energije susednim domaćinstvima (prodaja) i slično. Cena vetroagregata nazivne snage 3000 W iznosi 8711 evra, cena 43 PV modula iznosi 9666 evra, cena 12 invertora je 2412 evra, a cena 150 akumulatorskih baterija je 21285 evra. Ukupna cena ovakvog hibridnog sistema je oko 42000 evra.

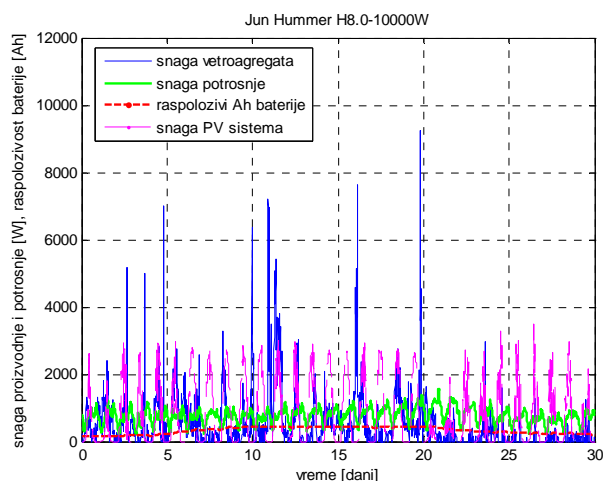
Zatim je po istom postupku razmatrano drugo rešenje hibridnog sistema sa vetroagregatom Hummer H6.4 nazivne snage 5000 W, sa 21-nim PV modulom i 160 akumulatorskih baterija. Cena vetroagregata nazivne snage 5000 W iznosi 12113 evra, cena 21-nog PV modula iznosi 4720 evra, cena potrebnih 7 invertora je 1407 evra, a cena 160 akumulatorskih baterija je 22704 evra. Ukupna cena ovakvog hibridnog sistema je oko 41000 evra. Međutim, prvo rešenje hibridnog sistema sa vetroagregatom manje snage i većom snagom PV sistema može da bude ekonomski isplativije ako postoji mogućnost korišćenja (ili prodaje) viška električne energije, jer je proizvodnja takvog hibridnog sistema znatno veća u junu u odnosu na drugo rešenje.

Kao treće rešenje hibridnog sistema razmatran je vetroagregat Hummer H8.0, nazivne snage 10000 W, sa tri PV modula i 120 akumulatorskih baterija. Rešenje ovog hibridnog sistema je dobijeno na osnovu kriterijuma da se zadovolje energetske zahteve potrošnje u junu, koji se za slučaj vetroagregata relativno veće snage i malog broja PV modula pokazao kao teži uslov u odnosu na decembar. Ukupan broj dana u junu u kome je potrošnja veća od proizvodnje je 10. Potrebne su 3 grane sa po 40 redno vezanih baterija Trojan T-105, ukupnog kapaciteta 675 Ah. Ova konfiguracija zadovoljava zahteve potrošnje u junu, a u decembru sistem proizvodi višak energije od 362,64 kWh. S obzirom da je cena vetroagregata nazivne snage 10000 W 19733 evra, investicije u ovakav sistem iznose oko 38000 evra, tako da je hibridni sistem sa vetroagregatom relativno veće snage i malim brojem PV modula sa stanovišta investicija povoljnije rešenje.

Ipak, kao ekonomski najpovoljnije rešenje se pokazalo rešenje sa vetroagregatom Hummer H8.0, nazivne snage 10000 W i sa pet PV modula. Ovakav sistem ima veću proizvodnju nego što zahteva potrošnja, međutim, sistem predstavlja ekonomičnije rešenje jer je broj akumulatorskih baterija smanjen na 80 (dve grane sa po 40 redno vezanih baterija, ukupnog kapaciteta 450 Ah). Sistem proizvodi u junu višak energije od 232,92 kWh i u decembru višak energije od 377,84 kWh. Ukupna cena ovakvog hibridnog sistema je oko 32000 evra. Kod ovakvog hibridnog sistema takođe postoji mogućnost korišćenja u druge svrhe (ili prodaje) viška električne energije. Na slikama 5 i 6 je prikazana snaga proizvodnje iz vetrogeneratora, snaga potrošnje, snaga proizvodnje iz fotonaponskog sistema i raspoloživi kapacitet akumulatorskih baterija tokom meseca decembra i juna.



Slika 5. Snaga proizvodnje vetrogeneratora snage 10 kW, snaga proizvodnje PV sistema, snaga potrošnje sistema i raspoloživi kapacitet baterija tokom meseca decembra za hibridni sistem



Slika 6. Snaga proizvodnje vetrogeneratora snage 10 kW, snaga proizvodnje PV sistema, snaga potrošnje sistema i raspoloživi kapacitet baterija tokom meseca juna za hibridni sistem

Prethodno optimalno rešenje hibridnog sistema je za iste ulazne podatke potvrđeno primenom komercijalnog programa „Homer“ koji uzima u obzir i operativne troškove na godišnjem nivou (20 \$ za vetroagregat i 4 \$ za akumulatorske baterije). Svedeni troškovi na početnu godinu iznose 36352 evra sa usvojenom godišnjom interesnom stopom od 12%.

V. ZAKLJUČAK

U radu je pokazano da je autonomni fotonaponski sistem, koji ispunjava zahteve potrošnje u decembru, za preostali period godine predimenzionisan i ekonomski neisplativ. Slično, ako se analizira autonomni vetroagregat, koji se dimenzioniše prema letnjem periodu kada su brzine vetra najmanje, pokazuje se da je takav vetroagregat za preostali deo godine predimenzionisan i ekonomski neisplativ. Kao bolje rešenje nameće se optimalno dimenzionisani autonomni hibridni sistem sa PV modulima i vetroagregatom zbog boljeg iskorišćenja potencijala obnovljivih izvora energije i zbog veće ekonomske isplativosti sistema.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije za finansijsku podršku ovom radu u okviru tehnoloških projekata TR-33037 .

LITERATURA

- [1] Sandia National Laboratories (1995). Stand-Alone Photovoltaic Systems Handbook of Recommended Design Practices, U.S. Department of Energy, Albuquerque, NM.
- [2] O. Perpinan, E. Lorenzo, M. A. Castro, "On the calculation of energy produced by PV grid-connected system", Progress in Photovoltaics Research and Applications (2007), Volume: 15, Issue: 3, Publisher: Wiley Online Library, Pages: 265-274.
- [3] A. Luque, S. Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science", John Wiley & Sons, UK 2003.
- [4] Gilbert M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, Stanford University
- [5] M. Žarković, J. Mikulović, "Dimenzionisanje baterije u izolovanom fotonaponskom sistemu", Infoteh Jahorina, Mart 2012

ABSTRACT

In this paper, the stand-alone hybrid system for optimal load supplying which consists of PV panel, wind generator and batteries for energy storage has been considered. In order to show the advantage of the hybrid system, the stand-alone PV and wind system with energy storage have been considered separately. Optimum sizing of the hybrid system is performed according to criterion of minimum system cost, under the condition of supplying the load with power and energy. The characteristic load diagram is defined according to power measurements in transformer substation Vitanovac which supply the rural load. For the calculation of PV and wind system production, the data of measured horizontal irradiation, air temperature and wind speed for wider Belgrade region have been used.

OPTIMAL LOAD SUPPLYING BY USING STAND-ALONE HYBRID SYSTEM WITH RENEWABLE SOURCES AND ENERGY STORAGE

Milica Bogdanović, Jovan Mikulović