

Primjena sistema za skladištenje energije kod autonomnog hibridnog vjetar-solar sistema

Nedeljko Pribilović, Jovan Mikulović

Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
nedeljko_92@hotmail.com, mikulovic@etf.rs

Miodrag Simović

JU Institut za urbanizam, građevinarstvo i ekologiju
Banja Luka, Republika Srpska
miodrag.simovic@iugers.com

Sažetak— U radu je prikazan način projektovanja, dimenzionisanja i izbora opreme za slučaj autonomnog hibridnog vjetar-solar sistema. Dijagram snage potrošnje je definisan na osnovu mjerenja snage potrošnje u transformatorskoj stanici 10/0,4 kV/kV. Za proračun proizvodnje fotonaponskog sistema i vjetroagregata korišćeni su podaci o izmjerenoj horizontalnoj solarnoj iradijaciji, temperaturi vazduha i brzini vjetra za širi region Beograda. Pošto se radi o autonomnom sistemu, za njegovo adekvatno funkcionisanje i neprekidno snabdijevanje potrošača neophodno je obezbijediti odgovarajući sistem za skladištenje energije. Analizirana su tri različita sistema za skladištenje: skladištenje energije korištenjem baterija, skladištenje bazirano na korištenju potencijalne energije vode i skladištenje bazirano na korištenju gorivnih ćelija [3],[4],[7],[8]. Takođe, izvršen je proračun troškova realizacije svakog od sistema i izvršeno njihovo međusobno poređenje.

Ključne reči—autonomni hibridni vjetar-solar sistem; skladištenje energije; uporedna analiza; investicioni troškovi

I. UVOD

Savremeni elektroenergetski sistemi uglavnom su razvijeni tokom poslednjih 50 godina. Razvoj je slijedio ideju vodilju prema kojoj je sva proizvodnja locirana u velikim generatorskim jedinicama. Te velike generatorske jedinice procentualno najviše su locirane u termoelektranama. Jedna velika termoelektrana u svom radu spali više miliona tona uglja godišnje. Pri tome se iz ložišta, putem dimnjaka u atmosferu oslobađa velika količina čađi. Pored toga, kao negativni produkti sagorijevanja javljaju se CO₂ i SO₂. U poslednjih nekoliko godina sa povećanjem svijesti o očuvanju životne sredine, smanjenju emisije CO₂, povećanju energetske efikasnosti i racionalnom korištenju energije, sve veći značaj dobijaju obnovljivi izvori energije. Uticaj na životnu sredinu postaje jedan je od značajnih faktora u razmatranju priključenja novih proizvodnih objekata na mrežu.

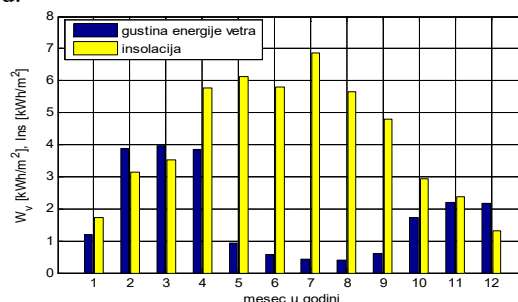
U ovom radu je dat primjer projektovanja hibridnog vjetar-solar sistema, prema stvarnim potrebama potrošnje, izražene sa desetominutnom rezolucijom. Takođe, podaci o horizontalnoj iradijaciji, brzini vjetra, ambijentalnoj temperaturi su dati sa desetominutnom rezolucijom. Svi podaci su dobijeni mjerenjem, korišćenjem odgovarajuće opreme, na područje Beograda 2009 godine. Pošto se radi o autonomnom hibridnom sistemu, za njegovo adekvatno funkcionisanje i obezbjeđivanje neprekidnog napajanja

potrošača neophodan je i sistem za skladištenje energije. Analizirana su tri slučaja:

- Hibridni vjetar-solar sistem sa sistemom za skladištenje realizovanim putem baterija
- Hibridni vjetar-solar sistem sa sistemom za skladištenje bazirano na korištenju potencijalne energije vode
- Hibridni vjetar-solar sistem sa sistemom za skladištenje realizovanim putem gorivnih ćelija

II. ODREĐIVANJE KRITIČNOG MJESECA I DIJAGRAMA POTROŠNJE

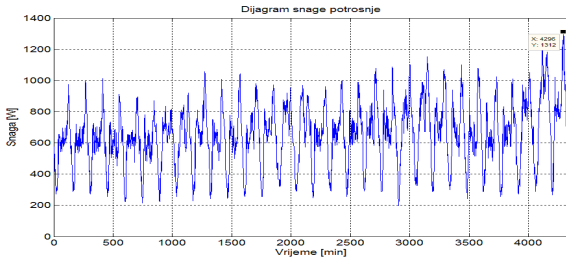
Dimenzionisanje autonomnih sistema za napajanje potrošača koji nisu priključeni na distributivnu mrežu se vrši na osnovu kritičnog mjeseca u kome je najnepovoljniji odnos proizvodnje i potrošnje električne energije. Na sl.1 su za svaki mjesec u toku godine prikazane srednje dnevne gustine energije vjetra i srednje dnevne insolacije koje su izračunate na osnovu mjernih podataka o brzini vjetra i iradijaciji za 2009. godinu. Na osnovu podataka za 2009. godinu, najkritičniji mjesec na godišnjem nivou u pogledu potencijala vjetra i solarnog zračenja za hibridni sistem je januar. Međutim, u radu je usvojena pretpostavka da će se sistem koristiti u ljetnjem periodu (mart-septembar), tako da je dimenzionisanje hibridnog sistema izvršeno na osnovu podataka za septembar koji je najkritičniji mjesec u ljetnjem period.



Slika 1. Srednje dnevne gustine energije vjetra i srednje dnevne insolacije

Potrošnja je modelovana tako što su izmjerene petnaestominutne snage potrošnje na izvodu transformatorske stanice 10/0,4 kV/kV u septembru 2009. godine i skalirane su na snage potrošnje prosječnog domaćinstva. Skaliranje je izvršeno tako da dijagram potrošnje ima prosječnu dnevnu

potrošnju električne energije jednog domaćinstva u Srbiji koja je za 2009. godinu iznosila 15.8 kWh. Izmjerene snage potrošnje sa petnaestominutnom rezolucijom su ekstrapolirane na desetominutne vrijednosti da bi se snage potrošnje usaglasile sa izmjerenim vrijednostima solarne iradijacije i brzine vjetrova. Na taj način je dobijen dijagram snage potrošnje sa desetominutnom vrednostima koji je prikazan na sl.2.



Slika 2. Dijagram snage potrošnje

III. PRORAČUN SNAGE PROIZVODNJE FOTONAPONSKIH MODULA

U cilju dobijanja odgovarajućih podataka neophodnih za proračun snage proizvodnje fotonaponskih panela, a radi jednostavnijeg proračuna, potrebno je izvršiti odgovarajuće usrednjavanje mjernih podataka, odnosno bazu od 4320 mjernih podataka predstaviti jednim karakterističnim danom. Nakon toga se može odrediti snaga proizvodnje fotonaponskih modula za cijeli analizirani mjesec. Fotonaponski panel je južno orijentisan i postavljen pod nagibnim uglom od 39° u odnosu na horizontalu.

Horizontalna iradijacija I_h može se dekomponovati na direktnu komponentu I_{bh} i difuzionu komponentu I_{dh} :

$$I_h = I_{bh} + I_{dh} \quad (1)$$

Za proračun komponenti ukupne horizontalne insolacije neophodno je proračunati indeks vedrosti (čistoće) koji se definiše kao odnos horizontalne insolacije na površini zemlje I_h prema horizontalnoj ekstraterestričkoj insolaciji I_0 koja se računa na površini atmosfere na geografskoj širini i dužini koja odgovara mjernom mjestu na Zemlji:

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

Srednja dnevna horizontalna insolacija ekstraterestričkog zračenja I_0 se računa za srednji dan u mjesecu prema izrazu:

$$I_0 = \frac{24}{\pi} SC \left(1 + 0.034 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) (\cos L \cos \delta \sin H_{SR} + H_{SR} \sin L \sin \delta) \quad (3)$$

gdje SC predstavlja solarnu konstantu (1.377 kW/m^2), n predstavlja redni broj dana u godini ($n=240$ jer je usvojen 12. septembar kao referentni dan u mesecu), L predstavlja geografsku širinu na kojoj se nalazi posmatrani objekat

(usvaja se 44°), δ predstavlja solarnu deklinaciju za analizirani dan u mjesecu i H_{SR} predstavlja satni ugao izlaska Sunca.

Solarna deklinacija i satni ugao izlaska Sunca se izračunavaju na osnovu sledećih izraza:

$$\delta = 24.45 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] \quad (4)$$

$$H_{SR} = \arccos(-\tan L \tan \delta) \quad (5)$$

Primjena Liu-Jourdan-ove jednačine omogućava izračunavanje difuzione komponentu iradijacije za svaku od desetominutnih vrijednosti posmatranog perioda (6) [8]:

$$\frac{I_{DH}}{I_H} = 1.39 - 4.027 K_T + 5.531 K_T^2 - 3.108 K_T^3 \quad (6)$$

Ukupno zračenje na modul koji je postavljen pod nagibnim uglom $\Sigma=39^\circ$ se sastoji iz direktne komponente I_{bc} , difuzione komponente I_{dc} i reflektovane komponente I_{rc} :

$$I_C = I_{bc} + I_{dc} + I_{rc} \quad (7)$$

pri čemu su:

$$I_{bc} = I_{bh} R_b \quad (8)$$

$$I_{dc} = I_{dh} \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \quad (9)$$

$$I_{rc} = \rho I_h \frac{1 - \cos \Sigma}{2} \quad (10)$$

gdje je R_b srednji faktor kosine u septembru ($R_b=1.35$), a ρ predstavlja koeficijent refleksije (usvaja se 0.2).

U ovom slučaju je izabran fotonaponski modul proizvođača MODULTEQ, izlaznog napona 24 V i snage 300 W [1]. Snaga proizvodnje izabranog modula određuje se na osnovu sledećeg izraza:

$$P_{dc_i} = I_{PV_i} \cdot P_n \cdot \mu_t \cdot \mu_n \cdot \mu_z \quad (11)$$

gdje su:

P_{dc_i} – snaga na izlazu modula u i -tom trenutku,

I_{PV_i} – ukupna iradijacija na modul u i -tom trenutku,

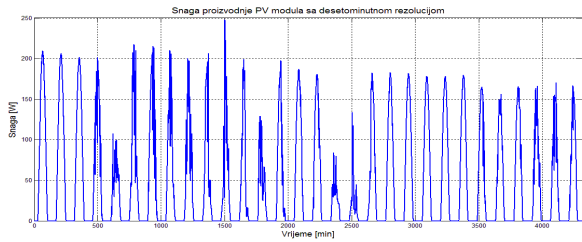
P_n – nominalna snaga modula ($P_n=300 \text{ W}$),

μ_t – koeficijent smanjenja efikasnosti usled povećanja temperature modula ($\mu_t=0.84$),

μ_n – koeficijent smanjenja efikasnosti usled neuparenosti modula ($\mu_n=0.96$),

μ_z – koeficijent smanjenja efikasnosti usled zaprljanosti modula ($\mu_z=0.96$).

Snaga proizvodnje fotonaponskog modula je prikazana na sl.3.



Slika 3. Snaga proizvodnje PV modula

IV. PRORAČUN SNAGE PROIZVODNJE VJETROAGREGATA

Analizom potrošnje ustanovljeno je da je maksimalna vrijednost potrošnje za mjesec septempar $P_{pmax}=1313$ W. Taj podatak je poslužio kao grubo orijentir pri izboru odgovarajuće vjetroturbine. Vjetroturbine malih snaga, reda do 3 kW obično se koriste u kombinaciji sa stubovima visine od 9 do 12 m. Analizirajući podatke o brzini vjetra na visini 10 m za datu lokaciju, dobijena je srednja brzina vjetra od 2.69 m/s, što je veoma niska vrijednost imajući u vidu to da se većina vjetroturbina počinje obrtati tek pri brzini vjetra od 3 m/s. Sa porastom udaljenosti od tla, brzina vjetra se povećava. Tako na primjer na visini od 24 m srednja brzina vjetra iznosi 3.71 m/s. Imajući u vidu sve navedene pokazatelje izabrana je vjetroturbina FORTIS Passat snage 1.4 kW, u kombinaciji sa 24 m visokim stubom sa 4 zatezna užeta [2].

S obzirom da su podaci o brzinama vjetra dati za visine od 10 m i 40 m, potrebno je svesti brzinu vjetra na visinu osovine vjetroturbine, odnosno u konkretnom slučaju na 24 m. Brzina vjetra na visini od 24 m, prema logaritamskom zakonu povećanja brzine vjetra sa visinom je:

$$v_{i24} = v_{i40} \cdot \frac{\ln\left(\frac{24}{z_{0i}}\right)}{\ln\left(\frac{40}{z_{0i}}\right)} \quad (12)$$

gdje je z_{0i} dužina hrapavosti terena:

$$\ln(z_{0i}) = \frac{v_{i40} \cdot \ln 10 - v_{i10} \cdot \ln 40}{v_{i40} - v_{i10}} \quad (13)$$

Kada je poznata brzina vjetra na visini vjetroturbine moguće je odrediti snagu proizvodnje vjetroatregata na osnovu:

$$P_{e24i} = \frac{1}{2} \cdot C_{pi} \cdot \rho K_{ti} K_a v_{i80}^3 \quad (14)$$

gdje P_{e24i} predstavlja električnu snagu u i -tom desetominutnom intervalu, C_{pi} je koeficent snage vjetroturbine, K_{ti} i K_a su korekcionni koeficijenti.

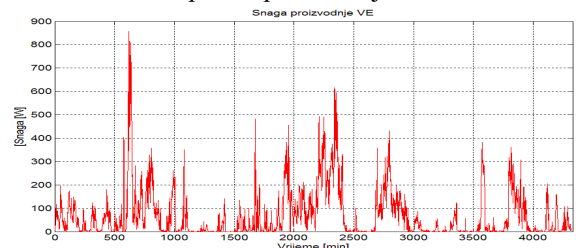
Korekcija gustine vazduha na nadmorskoj visini $h=124$ m u odnosu na referentnu vrijednost je uvažena preko sledećeg koeficijenta (100 m nadmorska visina na lokaciji mjerenja+24 m visina stuba vjetroturbine):

$$K_a = e^{-1.185 \cdot 10^{-4} \cdot h} = 0.985 \quad (15)$$

Temperatura se tokom godine mijenja, pa je za svaku mjernu vrijednost proračunat korekcionni koeficijent gustine vazduha sa promjenom temperature:

$$K_{ti} = \frac{288.15}{273.15 + t_i (\text{°C})} \quad (16)$$

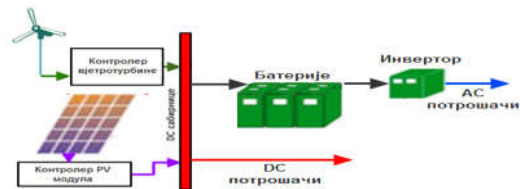
Za analiziranu lokaciju, snaga proizvodnje vjetroturbine za svaki desetominutni period prikazana je na sl.4.



Slika 4. Snaga proizvodnje vjetroturbine sa desetominutnom rezolucijom

V. HIBRIDNI VJETAR-SOLAR SISTEM SA SISTEMOM ZA SKLADIŠTENJE ENERGIJE REALIZOVANIM PUTEM BATERIJA

Blok šema hibridnog sistema sa osnovnim komponentama prikazana je na sl.5.



Slika 5. Komponente hibridnog sistema

Veza između DC sistema sabirnica, na koje su na osnovu šeme na slici 5 povezani vjetroturbina, fotonaponski paneli i baterije za skladištenje, i napajanje AC potrošača ostvaruje se putem invertora. Izabran je inverter EL-1500P(E), firme E-Lion napona 24 V, izlazne snage 1500 W čistog sinusnog izlaza a vršne vrijednosti 3000 W.

A. Proračun potrebnog broja paralelno vezanih fotonaponskih modula

Broj potrebnih paralelno vezanih fotonaponskih modula određuje se na osnovu jednačine stanja napunjenosti baterije SOC (State of Charge) [3]:

$$SOC(t_T) = SOC(t_0) + \sum_{t=t_0}^{t_T} \frac{N_{wind} \cdot P_{wind}(t) + N_{pv} \cdot P_s(t) - P_L(t)}{V_b C_b} \quad (17)$$

gdje su:

- N_{wind} , N_{PV} – broj vjetroagregata i PV modula, respektivno
- $P_{wind}(t)$ – snaga proizvodnje vjetroagregata u trenutku t ($t=1...720$),
- $P_S(t)$ – snaga proizvodnje jednog PV modula u trenutku t ,
- $P_L(t)$ – DC snaga potrošnje u trenutku t (AC snaga potrošnje podjeljena sa efikasnosti invertora),
- V_b , C_b – napon baterije i kapacitet baterije, respektivno.

Ovde se uvodi pretpostavka da je stanje napunjenosti baterija za skladištenje energije isto na kraju mjeseca kao i na početku mjeseca. Nakon uvođenja ove pretpostavke jednačina (17) se može napisati u sledećem obliku:

$$\sum_{t=t_1}^{t_r} (N_{wind} \cdot P_{wind}(t) + N_{PV} \cdot P_S(t) - P_L(t)) = 0 \quad (18)$$

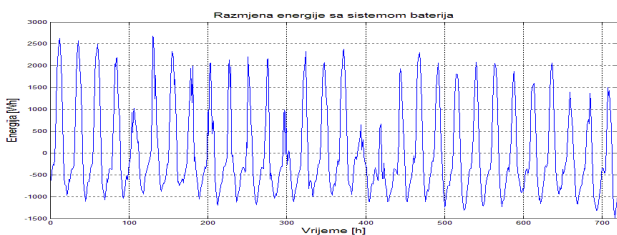
Iz jednačine (18) moguće je odrediti broj potrebnih paralelno vezanih modula, koji u konkretnom slučaju iznosi 16.

B. Dimenzionisanje sistema za skladištenje i izbor baterija

Kada je energija generisana od strane vjetroturbin i PV modula veća od potrošnje energije, baterije skladište taj višak proizvedene energije. U slučaju da je generisana energija manja od potrošnje energije, baterije se ponašaju kao izvori i predaju višak uskladištene energije u cilju zadovoljavanja potreba potrošnje. Energija koja se predaje ili preuzima od sistema za skladištenje može se odrediti na osnovu:

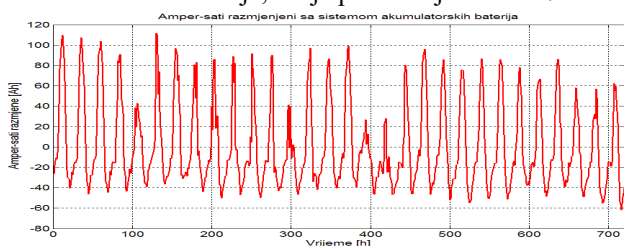
$$W_b(t) = N_{wind} \cdot P_{wind}(t) + N_{PV} \cdot P_S(t) - P_L(t) \quad (19)$$

Razmjena energije sa sistemom za skladištenje energije je prikazana na sl.6.



Slika 6. Razmjena energije sa sistemom za skladištenje

Dijeljenjem vrijednosti W_b sa naponom DC sistema sabirnica (24 V) dobijaju se amper-sati razmijenjeni sa sistemom za skladištenje, što je predstavljeno na sl.7.

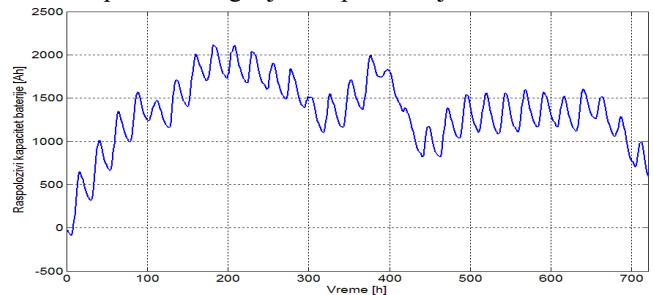


Slika 7. Amper-sati sa sistemom baterija

Raspoloživi kapacitet baterije u trenutku t ($AEC(t)$) može se odrediti na osnovu:

$$AEC(t) = AEC(t_0) + \sum_{t=t_1}^{t_r} \frac{W_b(t)}{V_b} \quad (20)$$

gdje je $AEC(t_0)=0$ početni uslov koji označava da je baterija na početku posmatranog perioda prazna, što u praksi nije moguće jer baterija ima određenu dubinu pražnjenja, ali se u ovom slučaju usvaja radi određivanja kapaciteta baterija pri najnepovoljnijem slučaju. Raspoloživi kapacitet baterije za svaki sat posmatranog mjeseca prikazan je na sl.8.



Slika 8: Raspoloživi kapacitet baterije pri $AEC(t_0)=0$

Potreban kapacitet baterije se određuje na osnovu sledeće jednakosti [3]:

$$C_b = \max \left(AEC_{\max} - AEC_{\min}, \frac{W_b(t)}{V_b} \right) / DOD \quad (21)$$

gdje DOD predstavlja dozvoljenu dubinu pražnjenja baterije.

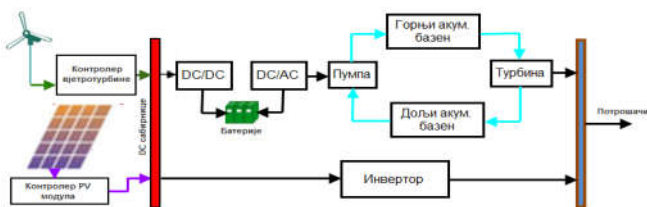
U konkretnom slučaju, uz pomoć proračuna realizovanog u programskom paketu MATLAB dobijeno je da potrebni kapacitet iznosi 2751 Ah. Na osnovu potrebnog kapaciteta izvršen je izbor odgovarajućih baterija. Izabrana je baterija proizvođača VARTA serije PROMOTIVE BLACK kapaciteta 135 Ah, napona 12 V i cijene 160 €. Broj potrebnih redno vezanih baterija u cilju obezbjeđivanja željenog napona je 2, dok je broj potrebnih paralelno vezanih grana u cilju obezbjeđivanja potrebne snage 21. Dakle, sistem za skladištenje čine ukupno 42 baterije.

Cijene pojedinih komponenti kao i ukupni investicioni troškovi sistema su dati u tab.1:

TABELA I. INVESTICIONI TROŠKOVI SISTEMA BROJ 1		
ELEMENT	KOLIČINA	CIJENA (€)
Invertor EL-1500P(E), firme E-Lion	1	106
Baterija VARTA serije PB	42	160*42=6720
PV modul MTS300-24V MODULTEQ	16	16*217=3472
Vjetroturbina FORTIS Passat 1.4 kW.	1	3655
Cjevasti stub visine 24 m	1	2751
UKUPNO		16704 €

VI. HIBRIDNI VJETAR-SOLAR SISTEM SA SISTEMOM ZA SKLADIŠTENJE ENERGIJE BAZIRANIM NA KORIŠTENJU POTENCIJALNE ENERGIJE VODE

Blok šema pomenutog sistema je prikazana na sl.9 [4]:



Slika 9. Blok šema hibridnog sistema sa sistemom za skladištenje baziranom na korištenju potencijalne energije vode

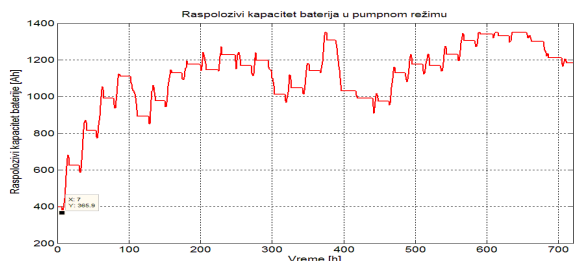
U periodu kada je proizvodnja energije veća od potrošnje, višak energije se predaje sistemu za skladištenje koji u tom slučaju radi u pumpnom režimu, te vodu iz donjeg akumulacionog bazena prebacuje u gornji akumulacioni bazen. U obrnutom slučaju nedostatak potrebne energije se nadoknađuje propuštanjem vode iz gornjeg akumulacionog bazena kroz turbinu. Dimenzionisanje turbine vrši se na osnovu minimalne negativne vrijednosti sa dijagrama na slici 6, koja iznosi 1543 W. Izabrana je turbina kineskog proizvođača NENGYAN, nazivne snage generatora 2 kW, protoka 300 l/min čija je cijena 1375 € [5].

Izbor pumpe za vodu vrši se na osnovu maksimalne pozitivne vrijednosti sa dijagrama 6, koja u konkretnom slučaju iznosi 3136 W. Međutim, dimenzionisanje pumpe za vodu prema ovoj vrijednosti nije opravdano iz sledećih razloga:

- Korištenje trofaznih pumpi i trofaznih invertora povećava investicione troškove
- Pri radu pumpe sa snagama manjim od nominalne značajno smanjenje efikasnosti

Iz navedenih razloga je u ovom slučaju izvršeno dimenzionisanje pumpe prema srednjoj vrijednosti snage u pumpnom režimu. Proračunom je utvrđena vrijednost ove snage koja iznosi 1053 W. Izabrana je pumpa PEDROLLO, model CPm170M snage 1100 W, protoka 160 l/min, cijene 138 € [6].

Za obezbjeđivanje rada pumpe pri konstantnoj snazi zadužen je nezavisni sistem baterija. U slučaju kada je energija koja se predaje pumpi u pumpnom režimu veća od energije koju pumpa može da potroši pri radu sa naznačenom snagom, taj višak energije preuzimaju baterije. U obrnutom slučaju, nedostatak energije za rad pumpe pri nominalnoj snazi se preuzima iz sistema baterija. Dimenzionisanje baterija se vrši na osnovu dijagrama razmjene energije sa sistemom baterija u pumpnom režimu, na osnovu koga se formira dijagram raspoloživog kapaciteta baterija. Pomenuti dijagram je prikazan na sl.10.



Slika 10: Promjena stanja napunjenosti baterija u pumpnom režimu

Potreban kapacitet baterija u pumpnom režimu, dobijen uz pomoć proračuna realizovanog u programskom paketu MATLAB iznosi 1327 Ah.

Snaga potrošnje baterija je zapravo nominalna snaga pumpe pa je moguće korištenje baterija pri vrijednosti DC napona od 12 V. U koliko se izaberu iste baterije kao u slučaju prethodnog sistema, broj potrebnih paralelno vezanih ovakvih baterija je 10. Ove baterije se povezuju sa DC sistemom sabirnicama napona 24 V. Stoga je vezu između pomenutih elemenata potrebno ostvariti putem odgovarajućeg DC/DC pretvarača, spuštača napona. U tu svrhu je izabran pretvarač proizvođača DOXIN, snage 600 W, čija je cijena 25 €. Broj potrebnih paralelno vezanih ovakvih pretvarača je 3. Pumpa za vodu je napajana putem pomenutog sistema baterija. Međutim, ulazni napon pumpe je AC napon 220 V. Stoga je vezu između pomenutih elemenata potrebno ostvariti putem odgovarajućeg invertora. Izabran je inverter proizvođača POWER BRIGHT, snage 1100 W. Korištenje DC pumpi u cilju eliminisanja potrebe korištenja invertora nije opravdano, jer su pumpe ulaznog napona 12 V male snage, pa je potrebno korištenje više pumpi u paralelnom radu, čime se povećavaju investicioni troškovi, a takođe se smanjuje efikasnost pumpnog režima usled paralelnog rada većeg broja pumpi. Cijena DC pumpe snage 80 W je 20 €, u ovom slučaju je potrebno koristiti 14 paralelno vezanih pumpi. Cijena takvog sistema je 280 €, što je više od cijene AC pumpe i invertora koja iznosi 243 €. Ova razlika u cijeni je neznatna, ali je ovde akcentat stavljen na efikasnost, te je stoga usvojeno rješenje sa AC pompom i inverterom.

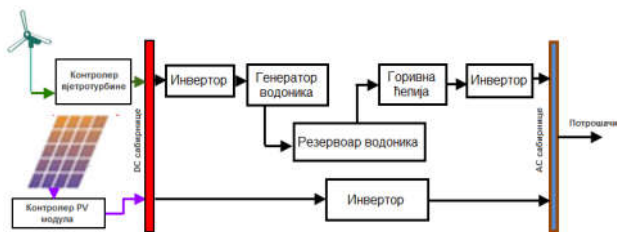
Ukupni investicioni troškovi realizacije ovog sistema iznose dati su u tab.2:

TABELA II. INVESTICIONI TROŠKOVI SISTEMA BROJ 2

ELEMENT	KOLIČINA	CIJENA (€)
PV modul MTS300-24V MODULTEQ	16	16*217=3472
Vjetroturbina FORTIS Passat 1.4 kW.	1	3655
Cjevasti stub visine 24 m	1	2751
Turbina NENGYAN NYRF2	1	1375
Pumpa PEDROLLO CPm170M	1	138
Baterija VARTA serije PB	10	160*10=1600
Inverter POWER BRIGHT 1100 W	1	105
DC/DC DOXIN 600 W	3	3*25=75
Inverter EL-1500P(E), firme E-Lion	1	106
Akumulacioni bazeni SUN RO-1000I	2	2*7340=14680
UKUPNO		27957 €

VII. HIBRIDNI VJETAR-SOLAR SISTEM SA SISTEMOM ZA SKLADIŠTENJE ENERGIJE SA GORIVNIM ČELIJAMA

Blok šema pomenutog sistema je prikazana na sl.11 [7]. U periodu kada je proizvodnja veća od potrošnje, višak proizvedene energije se predaje sistemu za skladištenje. Pomenutu energiju preuzima generator vodonika, koji putem reakcije elektrolize vode proizvodi vodonik. Vodonik, dobijen na ovaj način se skladišti u rezervoaru vodonika. U periodima kada je proizvodnja manja od potrošnje, manjak energije se nadoknađuje iz sistema za skladištenje. U ovom slučaju vodonik, uskladišten u rezervoaru vodonika, služi kao gorivo za gorivne ćelije čija je uloga konverzije energije vodonika kao goriva u električnu energiju koja se predaje sistemu na AC sabirnicama.



Slika 11. Blok šema hibridnog sistema sa sistemom za skladištenje baziranom na korištenju gorivnih ćelija

Na osnovu maksimalne pozitivne vrijednosti sa dijagrama 6 izvršen je izbor generatora vodonika. Izabran je generator vodonika snage 1600 W, model APM-MS-300A4-L, čija je cijena 1989 €. Broj potrebnih paralelno vezanih generatora vodonika je 2. Vezu između generatora vodonika i DC sistema sabirnica je potrebno ostvariti putem odgovarajućeg invertora. U tu svrhu je izabran inverter HUANGXIANG, model HXI-3K02-M2, naznačene snage 3000 W, cijene 110 €. Na osnovu minimalne negativne vrijednosti izvršen je izbor gorivne ćelije. Izabrana je gorivna ćelija snage 2000 W, model H-2000, čija je cijena 9929 €. Izlazni napon gorivne ćelije je DC napon, a gorivna ćelija se povezuje sa potrošačima na AC strani. Stoga je vezu pomenutih elemenata potrebno takođe ostvariti putem invertora. Izabran je inverter EL-1500P(E), firme E-Lion, snage 1500 W.

Praćenjem dijagrama razmjene energije sa sistemom za skladištenje, te uvažavanjem potrošnje i proizvodnje vodonika od strane gorivne ćelije i generatora vodonika izvršena je simulacija stanja napunjenosti, čiji je rezultat potrebna zapremina rezervoara vodonika koja iznosi 14.51 m³. Izabran je rezervoar vodonika PLL, zapremine 15 m³.

Ukupni investicioni troškovi sistema su dati u tab.3:

TABELA III. INVESTICIONI TROŠKOVI SISTEMA BROJ 3

ELEMENT	KOLIČINA	CIJENA (€)
PV modul MTS300-24V MODULTEQ	16	16*217=3472
Vjetroturbina FORTIS Passat 1.4 kW.	1	3655
Cjevasti stub visine 24 m	1	2751
Generator vodonika 1600 W	2	2*1989=3978
Inverter 3000 W HUANGXIANG	1	110
Gorivna ćelija H-2000 2000 W	1	9929
Rezervoar vodonika PLL 15 m ³	1	5436
Inverter EL-1500P(E), firme E-Lion	2	2*106=212
Troškovi goriva		
Gorivo	Potrebna količina [l]	Cijena po litru [€/l]
Vodonik	14250	0.43
UKUPNO 35670 €		

VIII. ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazan način projektovanja, dimenzionisanja i izbora opreme za potrebe autonomnog hibridnog vjetar-solar sistema. Analizirani su sistemi za skladištenje energije bazirani na korištenju akumulatorskih baterija, na korištenju potencijalne energije vode i na korištenju gorivnih ćelija. Investicioni troškovi realizacije sistema su najčešće ključni pri odlučivanju, pa se iz tog razloga prednost daje prvom sistemu. U koliko se u cijeni sistemu sa skladištenjem baziranom na korištenju potencijalne

energije vode isključe troškovi akumulacionih bazena usled postojanja prirodnih ili vještačkih jezera u funkciji akumulacionih bazena, ovaj sistem postaje konkurentan sistemu sa baterijskim skladištenjem u pogledu cijene. Najskuplji od analiziranih sistema je hibridni sistem sa sistemom za skladištenje sa gorivnim ćelijama. Međutim, ovo je sistem koji je još uvijek u fazi razvoja, te se intenzivno traga za novim i efikasnijim načinima proizvodnje vodonika. Očekuje se da će komercijalnom upotrebom ovih sistema doći do značajnog smanjenja njihove cijene, te će postati konkurentan u odnosu druga dva sistema. Važno je istaći da svaki od analiziranih sistema karakteriše nulta emisija štetnih gasova u atmosferu odnosno potpuna ekološka prihvatljivost na čemu se sve više insistira u novije vrijeme, te je za očekivati da će ovakvi sistemi u budućnosti imati široku primjenu.

ZAHVALNICA

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

LITERATURA

- [1] http://www.modulreq.com/pdf/solar_module/cat_pv_engl.pdf
- [2] http://fortiswindenergy.com/wpcontent/uploads/2015/08/Manual_Passat_IM_1305_V3.3.pdf
- [3] J. Li, W. Wei, J. Xiang. A Simple Sizing Algorithm for Stand-Alone PV/Wind/Battery Hybrid Microgrids. *Energies* 2012, 5, 5307-5323
- [4] R. Li, B. Wu, X. Li, F. Zhou, Y. LI. Design of wind-solar and pumped-storage hybrid power supply system. IEEE International Conference on Computer science and Information Technologies, July 2012
- [5] http://www.chinaseniorsupplier.com/Electrical_Equipment_Supplies/Generators/60325239974/2kw_hydro_electric_generator_hydro_electric_generators_mini_hydro_turbine.html
- [6] <http://www.pedrollo.co.uk/water-pumps/full-catalogue>
- [7] A. Menshary, M. Ghiemy, M. M. Mousavi, H. A. Bagal. Optimal design of hybrid water-wind-solar system based on hydrogen storage and evaluation of reliability index of system using ant colony algorithm. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, Vol. 4, pp 3582-3600, september 2013
- [8] M. Dilparic, J. Mikulovic, I. Petrović. Dimenzionisanje hibridnog fotonaponskog sistema sa dizel generatorom. *Infoteh*, Vol 13, pp 321-326, March 2014.

ABSTRACT

In this paper the stand-alone hybrid wind-solar system which consists of PV panel, wind generator, and system for energy storage has been considered. Three types of energy storage have been analyzed: storage system based on batteries, storage system based on the potential energy of water, and storage system based on fuel cell and hydrogen generator. The characteristic load diagram is defined according to power measurements. For the calculation of PV and wind system production, the measurement data of horizontal irradiation, air temperature and wind speed for the wider Belgrade region have been used. A methodology for the selection of appropriate system components is presented. Investment costs of components and entire system were compared.

APPLICATION OF ENERGY STORAGE SYSTEMS TO AUTONOMOUS HYBRID WIND-SOLAR SYSTEM

Nedeljko Pribilović, Jovan Mikulović, Miodrag Simović

