

OPTIMALNO UPRAVLJANJE POTROŠNOM I SKLADIŠTENJEM ENERGIJE U PAMETNIM SISTEMIMA SA DISTRIBUIRANIM IZVORIMA ENERGIJE

D. KOTUR, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Srbija
J. MIKULOVIĆ, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Srbija

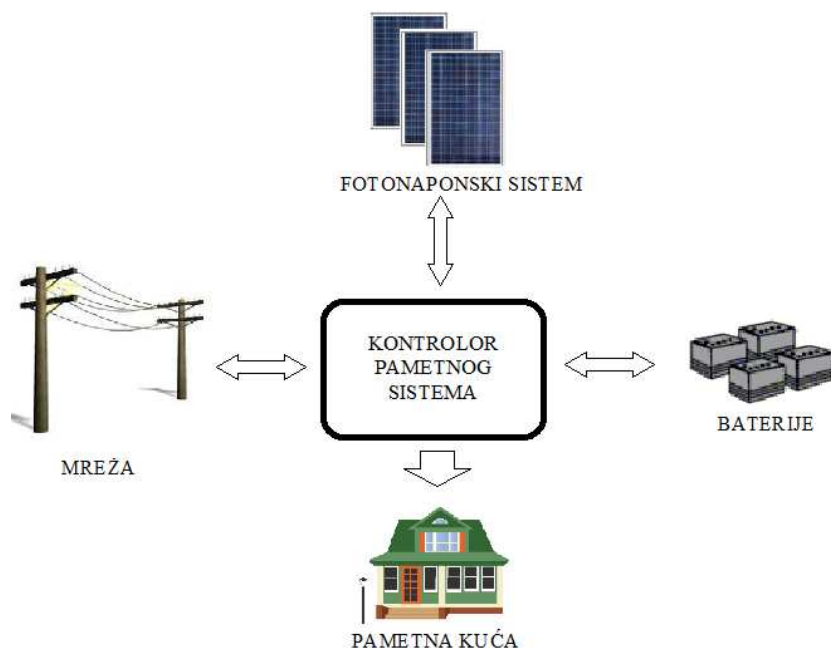
UVOD

U modernim elektroenergetskim sistemima (EES), procentualni udeo obnovljivih izvora energije (OIE) je iz godine u godinu sve veći. OIE se retko priključuju direktno na prenosnu mrežu i dominantno pripadaju distribuiranim izvorima energije, što se najviše odnosi na fotonaponske sisteme. Distribuirana proizvodnja i potrošnja formiraju mikromrežu u kojoj se potrošnja može snabdevati ili iz distribuiranih izvora ili iz mreže. Integracija OIE uzrokovala je sve veće prisustvo pametnih mreža. Pametne mreže omogućavaju optimalno upravljanje sistemima u prisustvu intermitentnih OIE. Jedna od vodećih aplikacija pametnih mreža je i upravljanje potrošnjom, *Demand Side Management* (DSM). DSM omogućava pomeranje potrošnje u sate u kojima je to za sistem najbolje, pri čemu ukupna preuzeta energija ostaje konstantna. Da bi se upravljanje potrošnjom uspešno izvršavalo, neophodno je u dijagramu potrošnje definisati upravljivi i neupravljivi deo. Neupravljiv deo potrošnje kod domaćinstava obuhvata onaj deo potrošnje koji se ne može pomerati u vremenu. On obuhvata osvetljenje, televizore, šporete, itd. Pomeranje ove potrošnje u vremenu bi značajno narušilo komfor života ljudi. Upravljiv deo potrošnje obuhvata uređaje čija se potrošnja može pomerati u vremenu, pri čemu se ne narušava komfor života. Tu spadaju veš mašine, mašine za pranje posuđa, bojleri, TA peći, itd. Pomeranjem vremena rada ovih uređaja, dijagram potrošnje se donekle može uskladiti sa dijagramom proizvodnje iz OIE (1).

Pametne mreže su osnova pametnih sistema sa distribuiranim izvorima energije. Pored potrošnje i proizvodnje, ovi sistemi često obuhvataju i sisteme za skladištenje energije. Pametni sistemi, pored distribuiranih izvora koriste i spoljnu mrežu kao izvor električne energije. Princip rada ovih sistema je sledeći: proizvodnja iz distribuiranih izvora je fiksna i njome se ne može upravljati, te se ona može posmatrati kao negativna neupravljiva potrošnja. Višak ili manjak trenutnih potreba za energijom se u pametnom sistemu može rešiti na 3 načina: punjenjem i pražnjenjem akumulatorskih baterija, prodajom ili kupovinom električne energije iz eksterne mreže ili upravljanjem potrošnjom tako da se dijagrami proizvodnje iz OIE i potrošnje donekle preklape. Kombinacijom ovih akcija, moguće je izvršiti optimalno upravljanje pametnim sistemima, pri čemu se kao kriterijum optimizacije posmatraju troškovi preuzete električne energije iz spoljašnje mreže.

Optimalno upravljanje pametnim sistemima sa distribuiranim izvorima energije i akumulatorskim baterijama je trenutno vrlo aktuelna tema istraživanja. Analiza upravljanja potrošnje u sistemu sa različitim izvorima energije (električne i toplotne) je izvršena u (2). Analiza optimalnog dimenzionisanja sistema u pametnim kućama sa distribuiranim izvorima energije i sistemima za skladištenje je izvršena u (3). Metodologija za smanjivanje vršnog opterećenja u domaćinstvima je prikazana u (4). Analiza optimalnog upravljanja hibridnog izolovanog sistema koga čine solarne elektrane, vetroelektrane, sistemi za skladištenje energije, agregat na biogas i dizel agregat je prikazan u (5). U okviru (6) prikazano je optimalno upravljanje izolovanim sistemom sa intermitentnim OIE, pri čemu se proizvodnja iz biomase posmatra kao podrška intermitentnoj prirodi OIE.

U ovom radu, izvršena je analiza optimalnog upravljanja pametnog sistema jednog domaćinstva. Domaćinstvo poseduje fotonaponski sistem kao intermitentni OIE. Pored njega, sistem je povezan i na eksternu mrežu i akumulatorsku bateriju. Akumulatorska baterija služi za skladištenje viška energije koji se kasnije može upotrebiti. Pored toga, korisnik ima mogućnost da vrši kupovinu i prodaju električne energije iz mreže po ceni koja se u toku dana menja sa satnom rezolucijom. Na Sl. 1 dat je šematski prikaz definisanog sistema. Cilj rada je da se odredi optimalno punjenje i pražnjenje akumulatorskih baterija, kao i kupovine i prodaje električne energije na slobodnom tržištu, pri čemu je cilj postići minimalne dnevne troškove. Akumulacija energije u sistemima za skladištenje je moguća i iz OIE, ali i iz mreže. Analize su odrađene za dva scenarija – u prvom je pretpostavljeno da sistem ne poseduje mogućnost upravljanja potrošnjom, dok je u drugom slučaju sistem u mogućnosti da upravlja potrošnjom u cilju postizanja optimalnog stanja. Za razliku od radova koji su prikazani u navedenoj literaturi, u ovom radu je pretpostavljeno da je cena električne energije prilikom kupovine i prodaje u istom satu različita. U slučaju kada je ta cena ista, nije važno da li će se energija iz fotonaponskih sistema prvo prodati mreži, pa zatim po istoj ceni kupiti iz mreže, ili će se direktno vršiti njeno skladištenje. U slučaju kada je cena različita, vrlo je bitno da li će se energija iz fotonaponskih sistema direktno skladištiti u bateriji ili će se prvo prodavati a zatim kupovati po većoj ceni. Na taj način, vrši se kompletno sprezanje čitavog sistema proizvodnje, potrošnje, skladištenja električne energije i kupovine električne energije iz eksterne mreže.



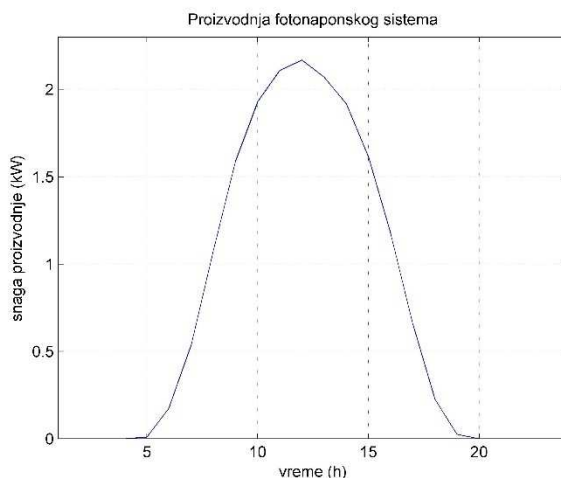
Sl. 1. Šematski prikaz analiziranog pametnog sistema

Rad je organizovan na sledeći način. Prvo su matematički definisane sve komponente sistema. Nakon toga je izvršena matematička definicija optimizacionog problema, pri čemu je za njegovo rešavanje odabran genetski algoritam (GA). Genetskim algoritmom je dobijen optimalni režim rada svih komponenti sistema.

ELEMENTI PAMETNOG SISTEMA

U ovom poglavlju, prikazani su i definisani svi elementi i sve veličine koje čine analizirani pametni sistem čije se optimalno upravljanje sprovodi. To su distribuirani OIE, potrošnja sa svojim upravljivim i neupravljivim delom, akumulatorska baterija za skladištenje energije i eksterna mreža iz koje se električna energija može kupovati, odnosno prodavati.

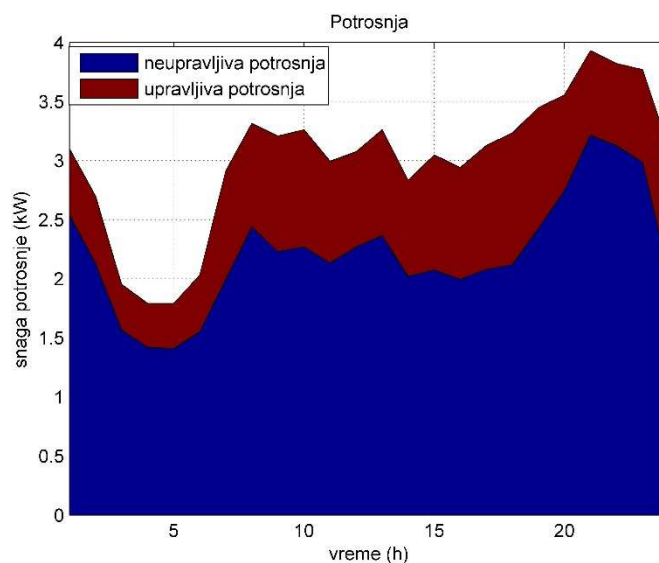
Prvi element analiziranog sistema je fotonaponski sistem. Fotonaponski sistem vrši konverziju svetlosne energije u električnu, pa je njegova proizvodnja direktno zavisna od trenutnog potencijala solarnog zračenja. Instalirana snaga fotonaponskog sistema je 4 kW. Sistem je južno orjentisan sa nagibnim uglom 20° . Podaci o solarnoj iradijaciji za Beograd preuzeti su sa sajta Nacionalne laboratorije za OIE u Koloradu (7). Na Sl. 2 prikazana je proizvodnja pretpostavljenog fotonaponskog sistema u toku analiziranog dana (11. maj). Proizvodnjom fotonaponskog sistema se ne može upravljati, te se ona u sistemu posmatra kao negativna neupravljiva potrošnja.



Sl. 2. Proizvodnja iz analiziranog fotonaponskog sistema

Drugi element analiziranog sistema je potrošnja. Kako je krajnji cilj svakog sistema da se zadovolje zahtevi za potrošnjom, ovaj element sistema se može smatrati i najznačajnijim. Potrošnja se jednostavno opisuje svojim

dnevnim dijagramom, koga čine upravljivi i neupravljivi deo, što je prikazano na Sl. 3 (8). Na Sl. 3 je prikazan dijagram opterećenja trafostanice koja napaja domaćinstva, skaliran na potrošnju jednog domaćinstva. Iako je ovo sintetički dijagram, u njemu se nalaze informacije o najverovatnijoj snazi pojedinih uređaja u domaćinstvu u toku dana, te je smatrano da upravo on najbolje reprezentuje prosečan dijagram jednog domaćinstva.

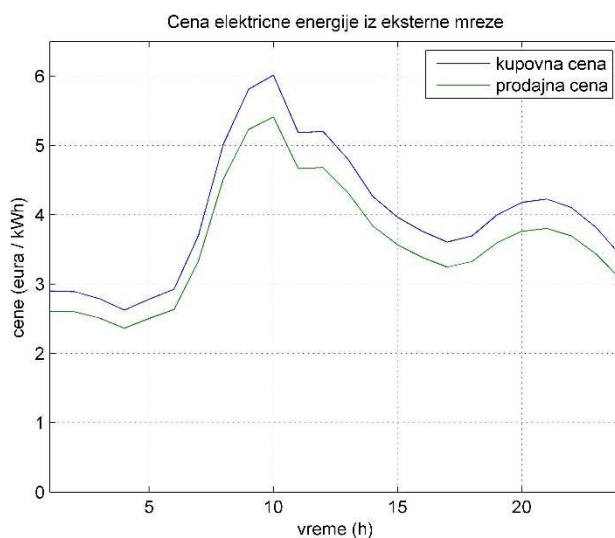


Sl. 3. Dijagram potrošnje sa upravljivim i neupravljivim delom

Akumulatorske baterije služe za skladištenje energije. Njihove glavne karakteristike su kapacitet koja iznosi 10 kWh, kao i maksimalna snaga punjenja koja iznosi 3 kW. Akumulatorske baterije imaju stepen iskorišćenja koji je manji od jedinice, i on je veći kada se baterija sporije prazni. Ovo je modelovano eksponencijalnim zakonom, pri čemu je efikasnost baterije funkcija trenutne snage baterije:

$$\eta = 0,5691 \cdot P_{bat}^{-0,1564} \quad (1)$$

U sistemu je još ostalo modelovati eksternu mrežu. Eksterna mreža predstavlja beskonačni izvor energije, pri čemu pametni sistem ima mogućnost i da proda kao i da kupi energiju. Kako se čitava optimizacija svodi na proračun finansijskih troškova, eksterna mreža se jednostavno opisuje satnom cenom električne energije, pri čemu se pretpostavlja da je cena prilikom prodaje električne energije 10% jeftinija nego prilikom kupovine. Na Sl. 4 je prikazan grafik kupovne, odnosno prodajne cene električne energije (9).



Sl. 4. Cene električne energije iz eksterne mreže za analizirani dan

MATEMATIČKA DEFINICIJA OPTIMIZACIONOG PROBLEMA

U prethodnom poglavlju, definisan je i prikazan matematički model svih elemenata analiziranog sistema. U ovom poglavlju, izvršena je matematička definicija optimizacionog problema. Optimizacioni problem se posmatra kroz dva scenarija. U prvom slučaju, pretpostavljeno je da sistem ne poseduje mogućnost upravljanja potrošnjom, odnosno da je 0% potrošnje upravljivo. Kako je i proizvodnja iz fotonaponskog sistema fiksna, neophodno je odrediti samo dijagrame punjenja, odnosno praznjenja akumulatorskih baterija, kao i dijagrame kupovine i prodaje električne energije u eksternu mrežu, pri čemu je neophodno da u svakom trenutku balans snaga bude zadovoljen:

$$P_i^{potr} + P_i^{PV} + P_i^{bat} + P_i^{ext} = 0 \quad (2)$$

U ovom izrazu, P_i^{potr} predstavlja snagu potrošnje u i – tom satu, $i=1, \dots, 24$, pri čemu se ova snaga uzima kao negativna. Zatim, P_i^{PV} predstavlja proizvodnju iz fotonaponskih sistema u i – tom satu, pri čemu je ova snaga uvek pozitivna. Snaga akumulatorske baterije P_i^{bat} se uzima kao pozitivna kada se akumulatorska baterija prazni, odnosno kao negativna ako se akumulatorska baterija puni. I na kraju, prilikom kupovine električne energije iz mreže usvaja se da je vrednost snage P_i^{ext} pozitivna, a prilikom prodaje negativna. Kako su snage proizvodnje iz fotonaponskih izvora fiksne, kao i potrošnje, dobija se da preuzeta snaga iz eksterne mreže direktno zavisi od snage akumulatorske baterije. Zbog toga se u ovom radu, za slučaj kada sistem ne poseduje mogućnost upravljanja potrošnjom, usvaja da je jedino nepoznat dijagram snaga akumulacionih baterija. Pored ovih jednakosti, neophodno je da kumulativni zbir snaga akumulacionih baterija uvek bude veći od nule (što znači da baterija ne može trošiti energiju koju prethodno nije skladištila), odnosno da mora biti manji od kapaciteta baterije (što znači da se u sistemu ne može skladištiti više energije nego što je kapacitet baterije). Takođe, neophodno je da svaka od snaga baterije bude manja od maksimalne snage punjenja baterije.

Objektivna funkcija definisanog optimizacionog problema je minimum troškova preuzete električne energije iz eksterne mreže, i ona se računa na sledeći način:

$$KF = \min \sum_{i=1}^{24} c_i \cdot P_i^{ext} \quad (3)$$

U ovom izrazu, vrednost c_i zavisi da li je snaga preuzeta iz mreže pozitivna ili negativna. Ova objektivna funkcija je ista i u slučaju kada se analizira sistem koji poseduje mogućnost upravljanja potrošnjom. U ovom slučaju su nepoznate veličine, pored snaga akumulatorskih baterija, i snage potrošnje. U tom slučaju, javlja se još jedno ograničenje tipa jednakosti, a to je da u toku dana, ukupna preuzeta energija mora ostati konstantna:

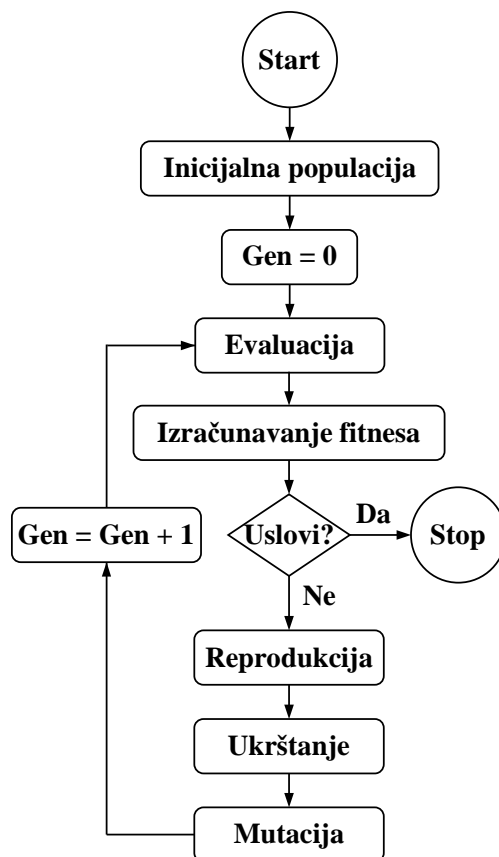
$$\sum_{i=1}^{24} P_i^{upr-pre} = \sum_{i=1}^{24} P_i^{upr-pos} \quad (4)$$

U ovom izrazu, $P_i^{upr-pre}$ predstavlja upravljivi deo snage potrošača u i – tom satu, dok je $P_i^{upr-pos}$ upravljivi deo snage potrošnje u i – tom satu nakon upravljanja potrošnjom. Jednačina (4) definiše da ukupna upravljiva energija pre i nakon upravljanja potrošnjom mora ostati konstantna.

Na ovaj način izvršena je definicija optimizacionog problema analiziranog u ovom radu. Za rešavanje optimizacionog problema, iskorišćen je genetski algoritam (GA). Razlozi za to su brojni. Prvo, definisani optimizacioni problem nema veliki broj promenljivih (u slučaju sistema bez upravljanja potrošnjom to su 24 nepoznate, dok je u slučaju sistema sa upravljanjem potrošnjom to 48 promenljivih) tako da je vreme konvergencije predloženog algoritma veoma brzo. Genetski algoritam je algoritam koji na vrlo jednostavan način uvažava ograničenja tipa jednakosti i nejednakosti, te je jednostavan i za programiranje. Korišćenje klasičnih metoda, iako ubrzava vreme konvergencije optimizacionog problema, istiskuje daleko veće napore za programiranje i definiciju samog rešenja. Glavni razlog zašto se koristi GA je i taj što se definisani optimizacioni problem ni ne može predstaviti u klasičnoj optimizacionoj formi u kojoj figurišu sve diferencijabilne funkcije. Razlog za to je uslov da cena električne energije zavisi od toga da li se ona kupuje ili prodaje u mrežu. U takvim situacijama, GA je praktično nezamenljiv.

GA predstavlja algoritam koji je inspiraciju pronašao u teoriji evolucije. Naime, u procesu razmnožavanja najčešće učestvuju jake jedinke, koje su prethodno savladale slabijeg neprijatelja, i one svoje dobre gene prenose

na svoje potomke. Sa druge strane, slabije jedinke ređe učestvuju u razmnožavanju, te zbog toga njihovi lošiji geni polako izumiru. Na taj način populacija postaje vremenom sve kvalitetnija i jača. Isto to se dešava i u GA, pri čemu se jedinka opisuje skupom mogućih rešenja, dok se kvalitet jedinke ocenjuje njenom objektivnom funkcijom. Na Sl. 5 prikazan je slikoviti prikaz GA.



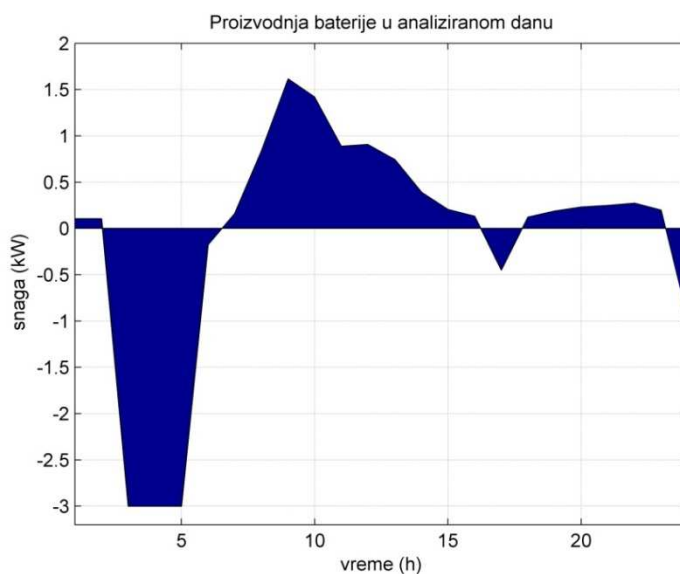
Sl. 5. Osnovni delovi genetskog algoritma

Da bi se olakšao proračun i programiranje, umesto satnih snaga akumulatorskih baterija posmatraju se satne vrednosti napunjenosti akumulatorske baterije, pri čemu je razlika ove dve vrednosti jednaka snazi akumulatorske baterije. Na taj način, prilikom primene GA, ne može se desiti da energija u akumulatorskoj bateriji bude veća od kapacitivnosti baterije, odnosno da bude manja od nule. Tada se mora voditi računa o tome da razlika svake dve susedne vrednosti ne sme biti ni veća od snage punjenja baterije. Prilikom proračuna, vrši se ova provera i vrši se ispravka podataka tako da ovaj uslov bude zadovoljen.

Ograničenje tipa jednakosti koje se odnosi na upravljiv deo snage potrošnje se vrlo jednostavno uzima u obzir u GA. Naime, kako je poznata upravljiva energija, kao nepoznate veličine se mogu posmatrati procentualni udeli upravljive energije u svakom satu, pri čemu zbir nepoznatih veličina mora biti jednak 100%. To se na jednostavan način postiže. Prvo se u genetskom algoritmu određuje na slučajan način skup od 24 broja, nakon čega se svaki od njih deli sa njihovim zbirom. Na taj način, princip slučajnosti koji je osnova GA se ne narušava, a ograničenje tipa jednakosti je ispunjeno. Kroz iteracije, ovaj uslov se ne mora proveravati, dovoljno je svaki put dobijene vrednosti normalizovati tako da se dobiju procentualni udeli upravljive energije u svakom satu.

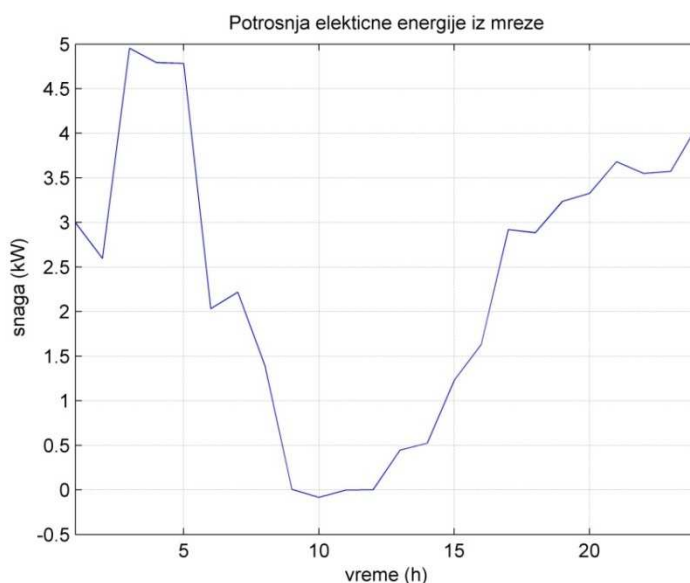
REZULTATI ANALIZA

U ovom poglavlju, prikazani su rezultati analiza sprovedenih na definisanom pametnom sistemu. U prvom slučaju, pretpostavljeno je da sistem ne poseduje mogućnost upravljanja potrošnjom, te se tada smatra da je 0% energije upravljivo. Tada se kao nepoznate vrednosti posmatraju snage akumulatorske baterije, kao i snage preuzimanja iz eksterne mreže. Na Sl. 6 prikazan je dijagram snage akumulatorske baterije.



Sl. 6. Snaga akumulatorske baterije u sistemu bez DSM-a

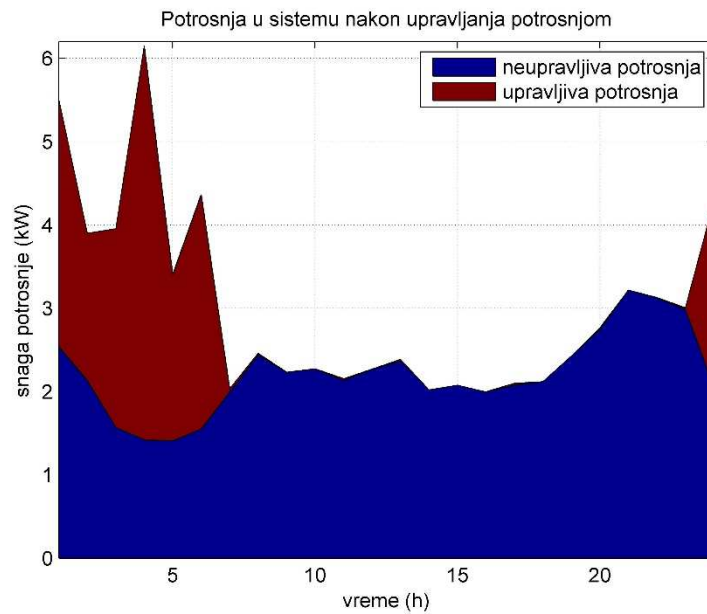
Sa Sl. 6 se vidi da u sistemu bez upravljanja potrošnjom, kupovina električne energije se najviše vrši u satima u kojima je cena električne energije najmanja. Kasnije se ta energija najviše troši u satima u kojima je njena cena najviša. Na taj način, postižu se maksimalne uštede u pametnom sistemu. Na Sl. 7 prikazan je dijagram koji prikazuje snagu kojom se preuzima energija iz eksterne mreže.



Sl. 7. Snaga kojom se preuzima energija iz eksterne mreže

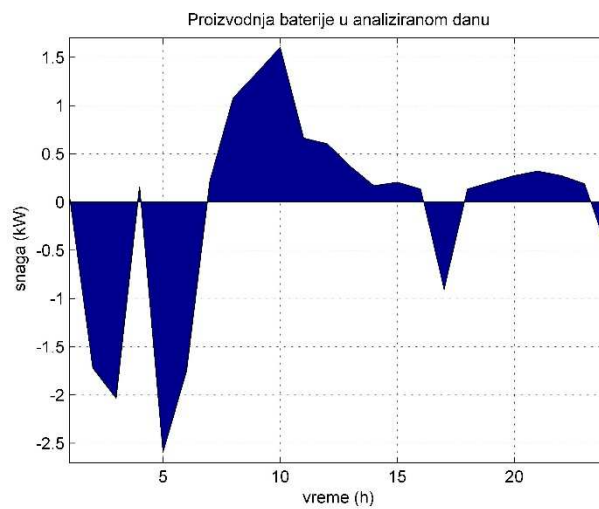
Na Sl. 7 se može videti da se dijagram snage kojom se energija preuzima iz eksterne mreže ne formira prema dijagramu potrošnje, već pretežno prema dijagramu cena. Na taj način, akumulatorske baterije omogućavaju kupovinu i skladištenje električne energije onda kada je ona najjeftinija, pri čemu se skladištena energija koristi onda kada je cena električne energije na berzi najveća. Ovom efektu dodatno doprinosi i to što se energija iz fotonaponskih sistema proizvodi onda kada je i cena električne energije viša na berzi. U dobijenim analizama, dobijena je optimalna dnevna cena električne energije koja iznosi 1,98€.

U drugoj analizi, pretpostavljeno je da sistem poseduje mogućnost upravljanja potrošnjom, i za taj slučaj je izvršena optimizacija. Da bi se sprečilo da se sva potrošnja prebaci u sat sa najjeftinijom cenom električne energije, uvedeni su troškovi koji se odnose na vršno opterećenje, i oni iznose 1,5 c€/kW za vršna opterećenja iznad 6 kW. Na Sl. 8 prikazan je novodobijeni dijagram potrošnje.

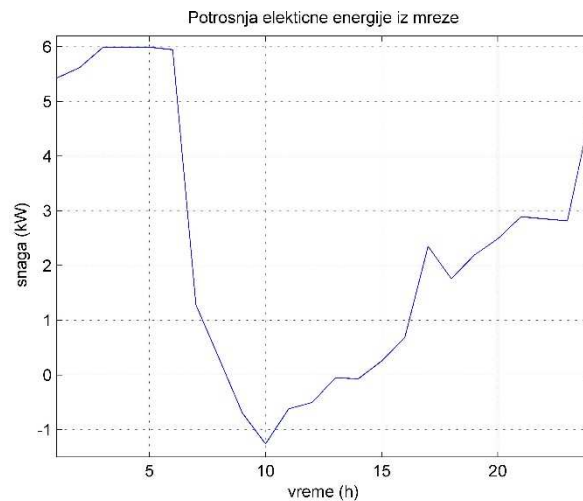


Sl. 8. Novi dijagram potrošnje sistema u optimalnom stanju

Na Sl. 9 je prikazan dijagram snage akumulatorske baterije u analiziranom danu, dok je na Sl. 10 prikazana snaga kojom se energija preuzima iz eksterne mreže.



Sl. 9. Dijagram snage akumulatorske baterije u sistemu sa upravljanjem potrošnje



Sl. 10. Dijagram snage akumulatorske baterije u sistemu sa upravljanjem potrošnje

Sa Sl. 8 – Sl. 10 može se doći do zaključka na koji način treba upravljati potrošnjom i akumulatorskim baterijama u pametnim sistemima u prisustvu OIE. Kao i u prethodnom slučaju, vidi se da se punjenje baterija vrši u satima kada je cena električne energije najmanja. Sa druge strane, u ovom slučaju javlja se još jedna pogodnost, a to je da se potrošnja takođe može pomerati u sate u kojima je cena električne energije najmanja. U slučaju da nije uveden uslov da se vršna snaga iznad 6 kW mora dodatno plaćati, dobilo bi se da se sva upravljiva energija mora prebaciti u jutarnje sate. Na Sl. 10 se najbolje vidi da se energija iz mreže najviše preuzima onda kada je i najjeftinija, dok u satima u kojima je cena električne energije najveća dolazi i do prodaje određene energije mreži. Dobijeni dnevni troškovi u ovom slučaju su 1,77€.

ZAKLJUČAK

U ovom radu, izvršena je analiza optimalnog skladištenja energije i upravljanja potrošnjom u pametnom sistemu sa distribuiranim izvorima energije. U prvom slučaju, pretpostavljeno je da sistem ne poseduje mogućnost upravljanja potrošnjom, dok je u drugom slučaju primenjeno i upravljanje potrošnjom. U prvoj analizi je uočeno da sistemom za skladištenje energije treba upravljati tako da se on puni onda kada je cena električne energije na tržištu niska, pri čemu se ta energija koristi onda kada je cena na tržištu najveća. Zbog toga je preuzeta energija iz mreže najmanja onda kada je cena na tržištu najveća. Dobijeni dnevni troškovi u tom slučaju iznose 1,98 €. U drugoj analizi, takođe se dobija da se električna energija iz mreže maksimalno koristi onda kada je njena cena najniža, dok se u satima u kojima je ta cena visoka, električna energija predaje mreži. Kada se energija preuzme iz mreže, tada je sve jedno da li će se ona iskoristiti za punjenje akumulatorske baterije ili za podmirivanje upravljive potrošnje. U drugom slučaju, dobijeni troškovi su 1,77€, odnosno 10,6% manji u odnosu na sistem bez upravljanja potrošnje, čime se potvrđuje da se uz pomoć upravljanja potrošnjom mogu postići dodatne uštede.

LITERATURA

1. J. Ekanayake, K. Liyanage, J. Wu, A. Yokoyama, N. Jenkins, 2012, "Smart Grid – Technology and Applications", "A John Wiley & Sons, Ltd., Publication", 1-12, 141-171
2. A. Sheikhi, M. Rayati, A. M. Ranjbar, 2016, "Demand side management for a residential customer in multi-energy systems", "Sustainable Cities and Society", "22", 63-77
3. O. Erdinc, N. G. Paterakis, I. N. Pappi, A. G. Bakirtzis, J. P. S. Catalao, 2015, "A new perspective for sizing of distributed generation and energy storage for smart households under demand response", "Applied Energy", "143", 26-37
4. N. G. Dlamini, F. Cromieres, 2012, "Implementing peak load reduction algorithms for household electrical appliances", "Energy Policy", "44", 280-290
5. S. R. Hazra, K. S. Hossain, M. A. Al Jubaer, M. M. Rabby, 2014, "An optimized hybrid system model: solution for coastal area in Bangladesh", "International Journal of Research in Engineering and Technology", "3", 94 – 102
6. L. Montuori, M. Alcazar-Ortega, C. Alvarez-Bel, A. Domijan, 2014, "Integration of renewable energy in microgrids coordinated with demand response resources: Economic evaluation of a biomass gasification plant by Homer Simulator", "Applied Energy", "132", 15-22
7. <http://pwwatts.nrel.gov/>
8. Parsons Brinckerhoff, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, "SMARTER GRID" – Studija potencijala upravljanja potrošnjom i mogući uticaji na prenosni sistem JP EMS, 2016, Report N^o 3: 120
9. <https://www.epexspot.com/en/>
10. N. G. Dlamini, F. Cromieres, 2012, "Implementing peak load reduction algorithms for household electrical appliances", "Energy Policy", "44", 280-290