

Fuzzy ekspertski sistem za upravljanje potrošnjom i skladištenjem energije u inteligentnoj distributivnoj mreži

Mileta Žarković

Energetika/Katedra za elektroenergetske sisteme
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija
mileta@etf.rs

Goran Dobrić

Energetika/Katedra za elektroenergetske sisteme
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija
dobric@etf.rs

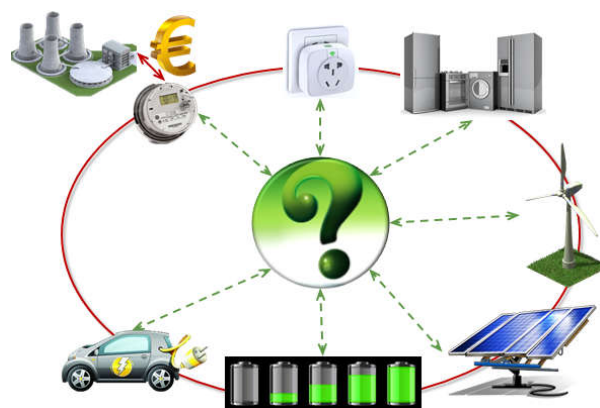
Sažetak—U ovom radu je opisan fuzzy ekspertski sistem za upravljanje potrošnjom i skladištenjem električne energije. Ulazni podaci mogu biti mereni, preuzeti sa mreže ili predviđani sa određenom greškom, pa kao takvi su predstavljeni u vidu fuzzy skupova. Fuzzy ulazi sistema su insolacija, cena električne energije, snaga upravljivih i neupravljivih potrošača električne energije. Izlazi ekspertskog sistema su odluke, tj. odgovori na pitanje šta sa proizvedenom energijom i šta sa upravljivom potrošnjom. Jedan izlaz donosi odluku o skladištenju, korišćenju ili prodaji proizvedene energije. Drugi izlaz omogućava pravilno aktiviranje upravljive potrošnje sa ciljem što manjih troškova korisnika. Treći izlaz daje odgovor koju energiju koristiti za pokrivanje sopstvene potrošnje. Rad ekspertskog sistema je analiziran za realne satne vrednosti ulaznih promenljivih u toku jednog dana.

Ključne riječi—Fuzzy logika; inteligentne distributivne mreže; upravljanje potrošnjom; skladištenje energije

I. UVOD

Razvoj i širenje inteligentnih mreža, praćenje i predikcija cene energije u realnom vremenu, rastući trend distribuirane proizvodnje energije kao i sistema za skladištenje energije, zahtevaju konstantan razvoj u oblasti optimalne kontrole ovih složenih sistema. Glavni cilj rada je da reši probleme sa kojima se suočavaju proizvođači i potrošači električne energije koji pokušavaju da optimalno kontrolišu svoje resurse i uređaje kako bi povećali svoj profit i smanjili potrošnju električne energije. Kao što se može videti sa Sl. 1, glavni problem je donošenje odluka o prodaji, skladištenju i potrošnji električne energije. Ova pitanja predstavljaju probleme za pametne kuće i zgrade kao i za male i velike distribuirane proizvođače električne energije i njihove moguće kombinacije.

Fuzzy logika je našla široku primenu kod donošenja odluka u inteligentnim distributivnim mrežama [1-6]. Fuzzy ekspertski sistem je moguće koristiti za donošenje odluke o tome koji deo komplikovane i velike distributivne mreže je potrebno automatizovati [1]. U radovima [2, 3] fuzzy logika je primenjena za donošenje odluke o punjenju električnih vozila



Slika 1. Aktualna problematika pametnih hibridnih sistema u inteligentnim distributivnim mrežama.

sa aspekta frekvencije distributivne mreže. Moguće je primeniti i fuzzy klasterovanje u cilju dobijanja odgovora za upravljanje potrošnjom na osnovu velikog broja prikupljenih podataka [4]. Optimizacija u kombinaciji sa fuzzy logikom u cilju upravljanja energijom u inteligentnoj mreži se javlja u radovima [5, 6].

Zbog nedovoljno tačno predvidive, varijabilne, potrošnje, proizvodnje i cene električne energije predlaže se korišćenje fuzzy logike. U radu je razvijen fuzzy ekspertski sistem na primeru pametne kuće koja poseduje proizvodnju iz solarnih panela, skladištenje energije i mogućnost odlaganja aktiviranja upravljive potrošnje. U radu nije uzet u obzir kapacitet baterija za odlaganje kao i veličina solarnih panela. Za formirani ekspertski sistem koji predstavlja fuzzy kontroler je prikazan postupak fazifikacije ulaznih promenljivih: snaga upravljive i neupravljive potrošnje, insolacija (proizvodnja iz obnovljivih izvora energije) i cena električne energije. Takođe predstavljene su i funkcije pripadnosti ulaznih i izlaznih promenljivih. Definisana su pravila koja čine bazu znanja fuzzy ekspertskog sistema. Rezultati ekspertskog sistema su predstavljeni u vidu prenosnih funkcija za kombinacije ulaznih i izlaznih promenljivih. Prikazan je i rezultat ekspertskog sistema za konkretne ulazne podatke. Ekspertski sistem je testiran za realne usrednjene satne podatke za jedan dan, a

rezultati o donošenju odluke su predstavljeni u zadnjem poglavlju ovog rada.

II. FUZZY LOGIKA

Kod sistema i algoritama gde ulazni i izlazni podaci nisu jasno određeni, mere se ili predviđaju sa određenom greškom, pogodno je koristiti fuzzy logiku. Distribuirana proizvodnja iz obnovljivih izvora zavisi od meteoroloških uslova. Cena električne energije sve više varira u toku dana, a dinamičko tarifiranje je sve više prisutno. Potrošnja električne energije zavisi od haotičnog korišćenja velikog broja električnih uređaja. Pomenuti podaci se mogu predstaviti vrednostima koje imaju svoju neizvesnost i nisu jasno precizne. Te vrednosti se ne ponavljaju ciklično sa stopostotnom verovatnoćom. Zato se u radu služimo fuzzy logikom, a ne verovatnoćom. Fuzzy logika operiše sa determinističkim nedorečenostima i neodređenostima, dok se verovatnoća bavi verodostojnošću stohastičkih događaja. Iz pomenutih razloga ulazne promenljive ekspertskog sistema su fazifikovane i predstavljene pomoću funkcija pripadnosti. Fuzzy funkcije pripadnosti predstavljaju sličnost objekata u kontekstu neprecizne definicije osobina, dok verovatnoća daje informaciju o frekvenciji ponavljanja. Ulazne promenljive ekspertskog sistema su: insolacija, snaga neupravljive potrošnje, snaga upravljive potrošnje i cena električne energije. Cena električne energije je predstavljena sa četiri funkcije pripadnosti, dok sve ostale ulazne veličine su predstavljene sa po tri funkcije pripadnosti. Funkcije pripadnosti se vezuju za atribute koje određuju: nisku, srednju i visoku vrednost posmatrane veličine. Tri izlaza sistema su tri odluke koje se vezuju svojim funkcijama pripadnosti za opsege brojnih vrednosti. Prvi izlaz se odnosi na proizvedenu energiju sa funkcijama pripadnosti koje nose atribute i opsege brojeva:

1. skladišti energiju (vrednosti iz opsega $[0, 1]$),
2. napoj sopstvenu potrošnju ($[1, 2]$) i
3. prodaj energiju distributivnoj mreži ($[2, 3]$).

Drugi izlaz se odnosi na upravljive potrošače koji se vezuju za atribute:

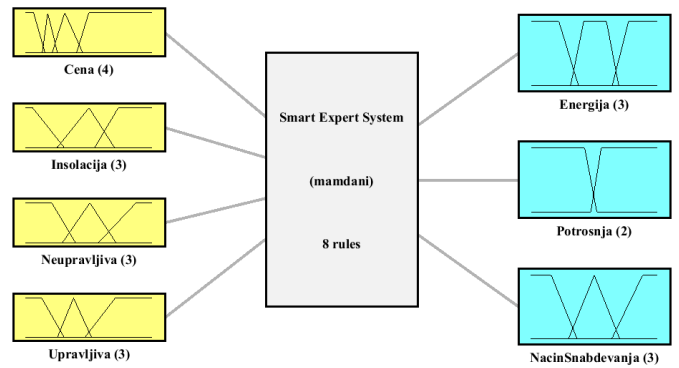
1. uključi potrošnju sada ($[-1, 0]$) ili
2. odloži potrošnju ($[0, 1]$).

Treći izlaz se odnosi na način korišćenja energije za sopstvenu potrošnju:

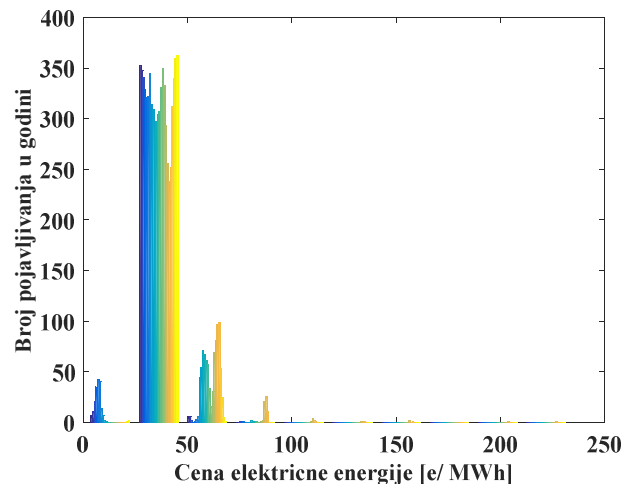
1. energija iz mreže (vrednosti iz opsega $[0, 1]$),
2. energija iz baterije ($[1, 2]$) i
3. energija iz distribuirane proizvodnje ($[2, 3]$).

Izgled fuzzy ekspertskog sistema sa svojim ulazima i izlazima se može videti na Sl. 2. Cena električne energije se u toku dana menja od 1,443 do 200 €/MWh. Da bi izabrali određene raznolike funkcije pripadnosti i njihove opsege predstavljen je histogram vrednosti cene električne energije (Sl. 3). Na Sl. 4. se mogu videti funkcije pripadnosti za cenu električne energije koji je u korelaciji sa Sl. 3. Srednja dnevna insolacija na godišnjem nivou na mestu posmatrane pametne hibridne kuće se kreće u granicama od 0 do 7 kWh/m² (Sl. 5). Snaga

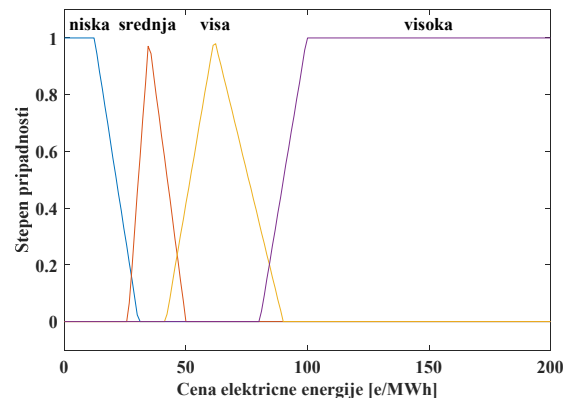
upravljivih potrošača u pametnoj kući je do 8 kW (zbirna snaga bojlera, TA-peći, klima uređaja...), a neupravljivih potrošača do 3,5 kW (osvetljenje, električni šporet, audio –video uređaji...).



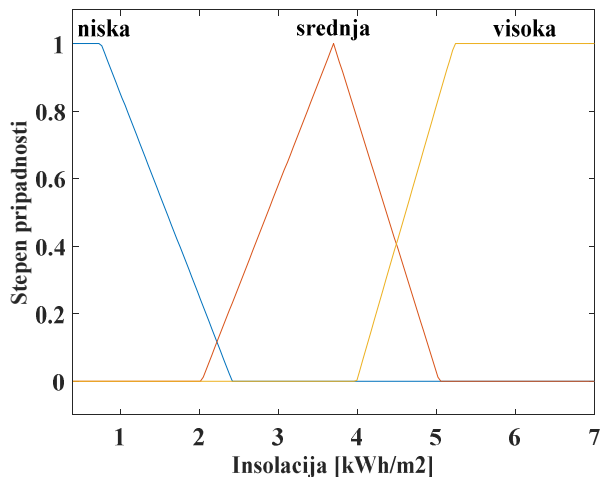
Slika 2. Izgled fuzzy ekspertskog sistema sa svojim ulazima i izlazima.



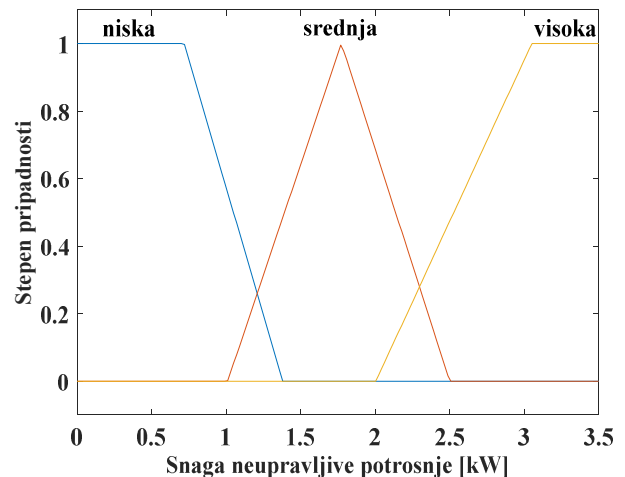
Slika 3. Histogram cene električne energije na godišnjem nivou.



Slika 4. Funkcija pripadnosti za cenu električne energije.



Slika 5. Funkcija pripadnosti za insolaciju.



Slika 6. Funkcija pripadnosti za snagu neupravljive potrošnje.

Na Sl. 6. je predstavljen ulaz snage neupravljive potrošnje koji je kao i upravljiva potrošnja predstavljen sa dve trapezoidne i jednom trougaonm funkcijom pripadanja. U skladu sa pomenutim vrednostima, funkcije pripadnosti mapiraju vrednosti iz realnog skupa sa određenim stepenom istinitosti. Sve funkcije pripadnosti i njihove opsege je moguće povezati sa histogramom ulaznih veličina. U radu nisu prikazane funkcije pripadnosti za izlaze ali se njihov oblik može videti na Sl. 2.

Nakon fazifikacije prikazane na Sl. 4-6. potrebno je definisati bazu pravila koja će sadržati znanje eksperta. U osnovi baze znanja se nalaze fuzzy (if - then, tj. ako - onda) pravila. Ova pravila koja se unose u sistem donošenja odluka su bazirana na prethodnom iskustvu. Funkcionalni fuzzy ekspertski sistem mora da sadrži više od jednog lingvističkog pravila u bazi pravila.

Izmenom pravila, inženjeru ili korisniku ekspertskog sistema se ostavlja mogućnost da ostvari željeni cilj (najveća ušteda, najveća zarada od prodaje energije, najveće skladištenje energije ili minimizovanje računa za naplatu...). Primer najjasnijeg, najprostijeg, pravila koje se u primeru donošenja odluke primenjuje je:

„Ako je cena električne energije visoka, ako je insolacija niska, i ako je aktivan veliki broj upravljivih i neupravljivih potrošača, onda treba prodati proizvedenu i akumuliranu energiju“.

Listom (Tabela I) if - then tvrđenja formirana je baza pravila koja „lingvističko“ znanje o problemu unosi. Lista pravila može biti dopunjena, smanjena ili modifikovana tako da se zadovolje odgovarajuće želje korisnika. Sva pravila imaju jednak težinski faktor koji se takođe može korigovati.

TABELA I. BAZA PRAVILA

Pravilo	If	Then:		
		Energija	Potrošnja	Snabdevanje
1	$Cena=niska \cap Insolacija=visoka \cap Upravljiva = niska \cap Neupravljiva= niska$	akumulacija	aktiviraj	mreža
2	$Cena=srednja \cap Insolacija= srednja \cap Upravljiva = srednja \cap Neupravljiva= srednja$	potrošnja	aktiviraj	mreža
3	$Cena=visa \cap Insolacija= srednja \cap Upravljiva = srednja \cap Neupravljiva= srednja$	akumulacija	odloži	obnovljivi
4	$Cena=visoka \cap Insolacija= niska \cap Upravljiva = visoka \cap Neupravljiva= visoka$	prodaja	odloži	not (mreža)
5	$Cena=visoka \cap Insolacija= niska \cap Upravljiva = visoka$	prodaja	odloži	not (mreža)
6	$Cena=not(visoka) \cap Insolacija=not(niska) \cap Upravljiva=not(niska) \cap Neupravljiva= niska$	not (prodaja)	not (odloži)	not (baterija)
7	$Cena=visoka \cap Insolacija= not (visoka)$	/	not (odloži)	not (mreža)
8	$Upravljiva = visoka \cap Neupravljiva= visoka$	not(akumulacija)	odloži	not (mreža)

Kod zaključivanja se računa fuzzy skup iz zaključka fuzzy pravila u zavisnosti od jačine odgovarajućeg pravila. U ovom radu koristi se Mamdanijev tip zaključivanja koji se odnosi na metod odsecanja. Naredni korak u fuzzy sistemu zaključivanja predstavlja agregacija. Zbog toga što se fuzzy sistem zasniva na pravilima koja se delimično preklapaju, određene ulazne vrednosti za sistem mogu da aktiviraju i više pravila odjednom. Agregacija je potrebna da kombinuje rezultate zaključivanja za svako aktivirano pravilo i oformi jedinstven fuzzy skup za izlaznu promenljivu. Da bi izlaznu promenljivu mogli da tumačimo potreban je poslednji korak u fuzzy procesu zaključivanja, a to je defazifikacija. U ovom radu je primenjena metoda centra gravitacije mase kao najčešći postupak defazifikacije. Jedinstvena, realna vrednost izlaznih promenljivih se vezuje za neku od poruka kod funkcija pripadnosti izlaza.

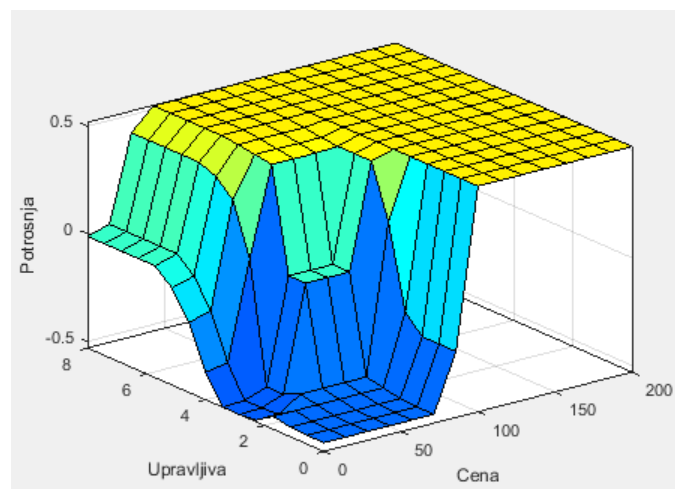
Najčešće se lice odgovorno za donošenje odluka prilikom procesa odlučivanja ili rešavanja problema koristi iskustvom, intuicijom i subjektivnom ocenom nekih parametara. Zadaci ovog tipa su vrlo često previše složeni za kvantitativno razumevanje, dok ljudi uspevaju da ih reše koristeći znanje koje je pre neprecizno nego precizno. Zbog toga formirani ekspertski sistem može biti modifikovan, mogu se menjati ili dodati pravila u skladu sa korisnikovim zahtevima čime bi se povećala subjektivnost. Takođe funkcije pripadnosti mogu biti modifikovane kako bi zadovoljile merenja na konkretnom problemu ili kako bi se unela veća neodređenost.

III. REZULTATI

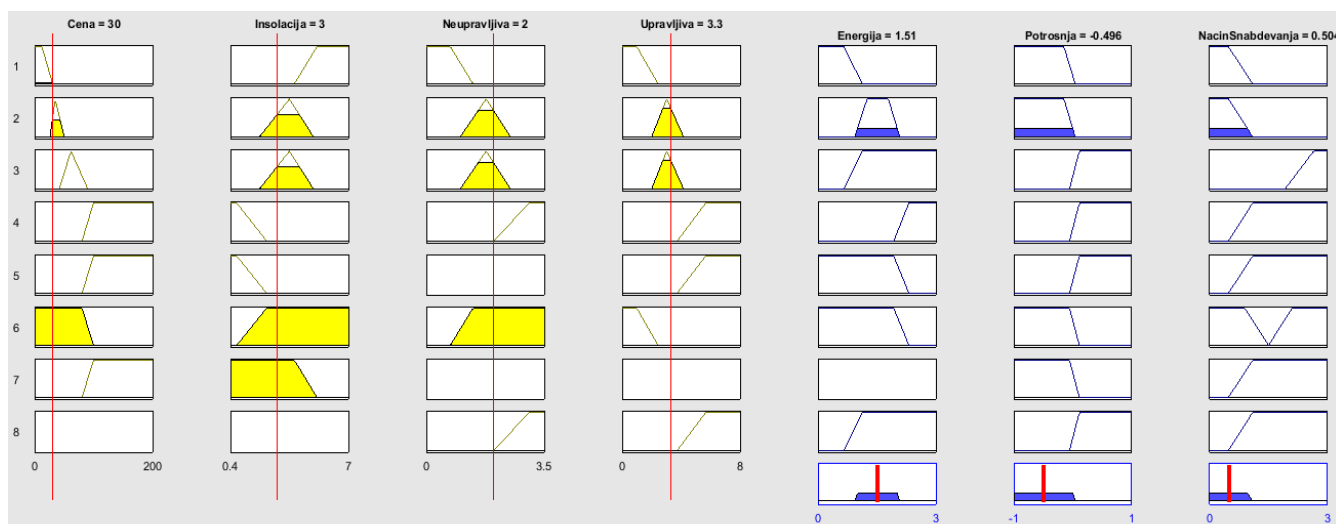
Kada se fuzzy ekspertski sistem formira može se za svaku kombinaciju dve ulazne promenjive dobiti trodimenzionalna površina prenosa. Ova površina slikovito prikazuje ponašanje odabranog izlaza u zavisnosti od kombinacije ulaznih promenljivih (Sl. 7). Sa Sl. 7 se može videti da ako cena električne energije i upravljiva potrošnja rastu, onda je potrebno odložiti rad upravljivih potrošača. Funkcionisanje

ekspertskog sistema može biti sagledano kroz menjanje ulaznih podataka. Na Sl. 8 može se videti rezultat sistema za ulaze: cena električne energije je 30 €/MWh, insolacija je 3 kWh/ m², snaga neupravljive potrošnje je 2 kW i snaga upravljive potrošnje 3,3 kW. Rezultati su: da sopstvenu energiju treba trošiti (1,51 je u opsegu [1, 2]), da upravljivu potrošnju ne treba odložiti (-0,496) i da sopstvenu potrošnju treba namiriti iz mreže (0,504).

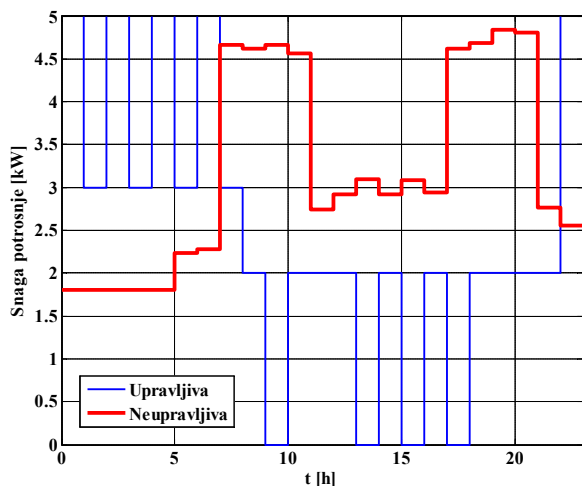
Na osnovu mernih podataka (Sl. 9.) potrošnje svakog uređaja u toku 24 časa može se izvršiti testiranje formiranog ekspertskog sistema. Takođe za test su potrebne srednje satne vrednosti cene električne energije (Sl. 10.) i insolacije (Sl. 11.). Na osnovu ulaznih podataka sa Sl. 9-11 izvršeno je testiranje formiranog fuzzy ekspertskog sistema. Rezultati testiranja su prikazani na Sl. 12.



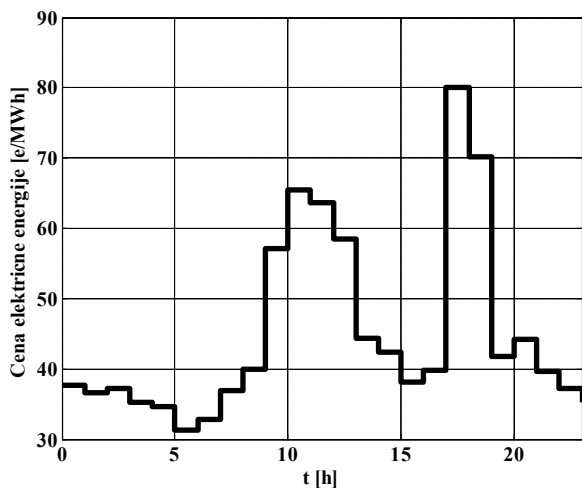
Slika 7. Funkcija pripadnosti za insolaciju.



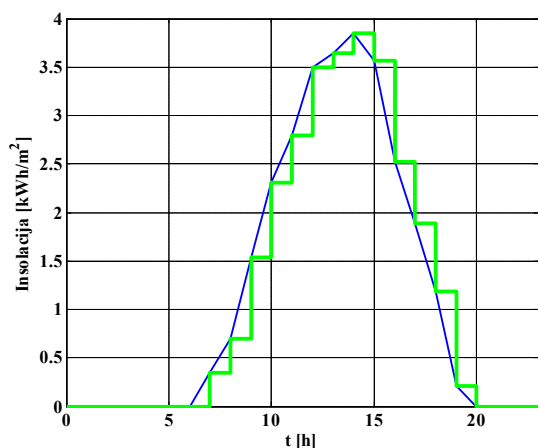
Slika 8. Prikaz pravila iz baze znanja za neku konkretno zadatu kombinaciju ulaza



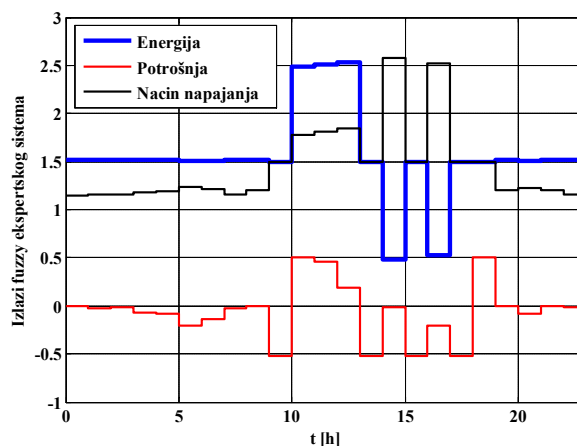
Slika 9. Satne vrednosti snage potrošača kao ulazi ekspertskog sistema.



Slika 10. Satne vrednosti cene električne energije.



Slika 11. Srednje satne vrednosti insolacije.



Slika 12. Satne odluke fuzzy ekspertskog sistema.

Ako se na Sl. 12 posmatraju rezultati za 15h može se zaključiti da sopstvenu energiju treba trošiti ili skladištiti ako je to moguće, da upravljivu potrošnju ne treba odložiti i da sopstvenu potrošnju treba napajati iz baterije ako je to moguće.

IV. ZAKLJUČAK

Fuzzy ekspertski sistem i rezultati prikazani u ovom radu mogu poslužiti kao dobra orijentacija za donošenje odluke kod inteligentnih distributivnih mreža. Objasnjeno je kako se ekspertski sistem može na lak način modifikovati i prilagoditi sopstvenim potrebama i željama korisnika. U skladu sa željama sistem donosi odluku o korišćenju upravljive potrošnje, skladištenju, prodaji ili korišćenju proizvedene energije. Ekspertski sistem bi imao još veću primenu u slučaju postojanja budućih, predviđenih ulaznih podataka. Ako bi postojala predikcija cene električne energije, predikcija insolacije kao i dijagrama opterećenja, ekspertski sistem bi unapred donosio odluku za korisnika čime bi se povećala šansa za ostvarenjem njegovog željenog cilja. Dakle sistem se može podesiti tako da planira najbolju kontrolu resursa uzimajući u obzir profit i energetska efikasnost korisnika bez ugrožavanja njegovih želja. Dalji razvoj jeste da se opisana metodologija poveže sa algoritmima za predviđanje ulaznih podataka i testira na većem broju minutnih vrednosti ulaznih podataka.

ZAHVALNICA

Autori zahvaljuju Ministarstvu za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije koje je omogućilo izradu ovog rada u okviru Projekata III 42009 Pametne mreže.

LITERATURA

- [1] M.N.Q. Macedo, J.J.M. Galo, L.A.L. Almeida, A.C.C. Lima, "Methodology for the calculation of the factor of priority for smart grid implantation using fuzzy logic," *Electrical Power and Energy Systems* 78, pp. 563–568, 2016.
- [2] S. Falahati, S.A. Taher, Mohammad Shahidehpour, "A new smart charging method for EVs for frequency control of smart grid," *Electrical Power and Energy Systems* 83, pp. 458–469, 2016.

- [3] R. Pereira, A. Fagundes, R. Melício, V.M.F. Mendes, J. Figueiredo, J. Martins, J.C. Quadrado, "Real-time charging coordination of plug-in electric vehicles based on hybrid fuzzy discrete particle swarm optimization," *Electric Power Systems Research* 128, pp. 19–29, 2015.
- [4] R. Pereira, A. Fagundes, R. Melício, V.M.F. Mendes, J. Figueiredo, J. Martins, J.C. Quadrado, "A fuzzy clustering approach to a demand response model," *Electrical Power and Energy Systems* 81, pp. 184–192, 2016.
- [5] O. Dragomir and F. Drgomir, "Decision support system integrating fuzzy logic and expert system for optimization of smart grid functioning," *International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, pp. 186-191, 2016.
- [6] K. Bharathi, M. Sasikumar, "Fuzzy Based Feed Forward Control For Voltage Compensation of Smart Grid using Bidirectional Intelligent Semiconductor Transformer And PV Cell," *Second International Conference On Science Technology Engineering and Management (ICONSTEM)*, pp. 394-398, 2016.

This paper describes a fuzzy expert system for load management and storage of electrical energy. Input data can be directly measured, imported from grid measurements or predicted with a certain error and presented in the form of fuzzy sets. The inputs of the fuzzy system are insolation, the price of electricity and the power of controlable and uncontrolable load. The outputs of the expert system are decisions, i.e. answers to the question of what to do with energy production and with controlable load. The first output shall decide on whether to store, sell or use produced energy. The second output is used to lower the consumer costs by load control. The third output gives the decision whether to use grid or stored energy. The expert system is analyzed for real hourly values of input variables in a single day.

**FUZZY EXPERT SYSTEM FOR DEMAND
MANAGEMENT AND ENERGY STORAGE IN SMART
GRID**

Mileta Žarković
Goran Dobrić

ABSTRACT