

Mirna Gržanić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
mirna.grzanic@fer.hr

Tomislav Capuder
Fakultet elektrotehnike i računarstva
tomislav.capuder@fer.hr

MODEL ZAJEDNIČKOG SUDJELOVANJA AKTIVNIH KUPACA I OBNOVLJIVIH IZVORA NA TRŽIŠTU ELEKTRIČNOM ENERGIJOM

SAŽETAK

Napuštanje tradicionalnog vođenja elektroenergetskog sustava te prijelaz na upravljanje sustavom u realnom vremenu, te porast broja baterija, kao i solarnih panela kod krajnjih korisnika mreže te obnovljivih izvora energije općenito, otvara prilike za pojavu novih entiteta na tržištu. Zbog nedovoljno velike snage pojedinih krajnjih korisnika, koji od pasivnih potrošača s neupravljivom potrošnjom postaju aktivni kupci s vlastitom proizvodnjom, formiraju se grupacije zastupane na tržištu od strane agregatora.

U radu je prikazan zajednički nastup vjetroelektrane elektrane i agregatora aktivnih kupaca na tržištu električne energije. Agregator zastupa na tržištu korisnike mreže kategorije kupca s vlastitiom proizvodnjom (kućanstva opremljena baterijom i fotonaponskim panelima (PV) ili mikro kogeneracijskim postrojenjem (μ CHP-om)). Rezultati pokazuju kako je koordinirani nastup profitabilan za oba sudionika.

Ključne riječi: agregator, baterija, CHP, solarni paneli, vjetroelektrana

MODEL OF JOINT MARKET PARTICIPATION OF ACTIVE CONSUMERS AND RENEWABLE ENERGY SOURCES

SUMMARY

The transition from traditional approach in energy power system control to real-time management, increased number of end-consumers with installed battery storages and PV, as well as broad integration of renewable energy sources in general, will enable the market participation for new entities. Passive consumers with uncontrollable load become active prosumers, and because of small individual power, the groups represented on the market by the aggregators are formed.

The paper presents a joint coordination of wind power plant and aggregator on the energy market. Aggregator represents households equipped with battery storage and solar panels (or CHP). The results show that the coordinated market participation brings benefits for both sides.

Key words: aggregator, battery storage, CHP, solar panel, wind power plant

1. UVOD

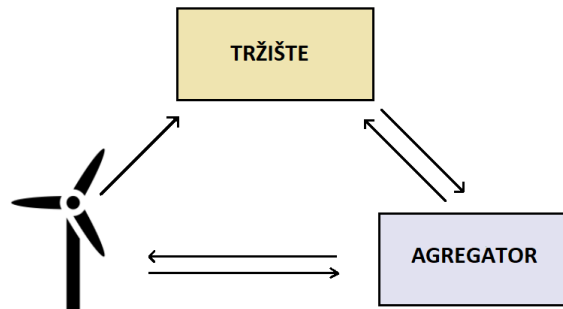
Prijelaz iz tradicionalnog, centraliziranog elektroenergetskog sustava u decentralizirani sustav podrazumijeva pojavu aktivnih krajnjih korisnika mreže kojima se pruža mogućnost trgovine električnom energijom. Pad cijena solarnih panela [1], kao i nove regulative, doprinose probijanju aktivnih korisnika mreže na tržište [2]. Postoje brojni poslovni modeli nastupa aktivnih potrošača na tržištu električne energije, bilo pojedinačno [3], ili kroz zajedničko sudjelovanje s drugim sudionicima [4] koji, u konačnici, rezultiraju benefitima za sve strane uključene u koordinaciju. Rad [5] opisuje model mješovitog cjelobrojnog linearnog programiranja koji optimizira zajednički nastup vjetroelektrane i spremnika baterija na tržištu električne energije dan unaprijed te na tržištu rezerve. Nesigurnost uzrokovana proizvodnjom iz obnovljivih izvora energije te troškovi uravnoteženja smanjeni su koordinacijom s baterijom. Autori u [6] opisuju kućanstva opremljena baterijom i solarnim panelima udružena u nisko-ugljične zajednice te njihovu mogućnost da, uz samodostatnost, dodatno pruže pomoćne usluge operatoru sustava. Dvorazinski model agregatora električnih vozila prikazuje natjecanje između agregatora i vlasnika vozila u [7]. Rad [8] je baziran na teoriji igara i natjecanju između agregatora upravljive potrošnje koji nastoji prodati višak električne energije drugim agregatorima. Privatni investitori i optimalno upravljanje velikim baterijama opisani su u [9]. Dvorazinski model agregatora upravljive potrošnje koji sudjeluje na tržištu električne energije prikazan je u radu [10]. Ostvareni profit agregator podijeli krajnjim korisnicima. Autor u [11] opisuje interakciju između agregatora upravljive potrošnje i investitora u spremnike energije. Rezultati pokazuju kako međusobno natjecanje donosi veće uštede sustavu, u usporedbi sa slučajem gdje je razmatrana samo jedna tehnologija. Dvorazinski model u [12] minimizira troškove proizvodnje električne energije u gornjem problemu i maksimizira samodostatnost kupaca s vlastitom proizvodnjom. Visoka integracija aktivnih korisnika poboljšava naponske prilike u sustavu i ravna dnevni dijagram opterećenja. Članak [13] predstavlja agregatora električnih vozila koji indirektno upravlja potrošnjom određene skupine vozila određujući optimalne prodajne cijene. Model [14] predstavlja dvorazinski problem koji poboljšava efikasnost sustava s cijenama električne energije za određivanje potrošnje podijeljene u 3 različite grupe u sustavu s visokim udjelom električne energije proizvedene u vjetroelektranama. Dvorazinski model [15] opisuje donošenje odluka agregatora i upravljanje potrošačima zastupljenih od strane agregatora te kako su određene maloprodajne cijene za potrošače.

U elektroenergetskim sustavima gdje je većina energija proizvedena iz obnovljivih izvora, poželjna je njihova koordinacija s drugim sudionicima na tržištu. Obnovljivi izvori energije, kao izvori čiste energije s niskim marginalnim troškovima, udružuju se s grupama aktivnih potrošača zastupanih od strane agregatora. Na taj način mogu povećati svoj profit te ublažiti nesigurnost pri nastupu na tržištu.

U ovom radu modeliran je dvorazinski problem koordinacije vjetroelektrane i agregatora aktivnih korisnika mreže. Gornji problem opisuje minimizaciju troškova agregatora, dok u donjem problemu vjetroelektrana maksimizira svoj profit prodajom električne energije na tržištu. Problem je modeliran u Pythonu i riješen koristeći optimizacijski alat Gurobi.

2. OPIS MODELA

Na slici 1 prikazan je model zajedničkog nastupa vjetroelektrane i agregatora na tržištu te opisan u poglavljima 2.1 i 2.2:



Slika 1 Model zajedničkog nastupa na tržištu

2.1. Model agregatora

Agregator zastupa na tržištu dva različita tipa kupaca s vlastitom proizvodnjom. Jedan tip kupaca posjeduje fotonaponske panele i bateriju, dok je drugi opremljen CHP-om i baterijom. CHP jedinice modelirane su kao generatori s troškovima iskazanim u €/kWh te je pretpostavljeno da se uz svaku jedinicu nalazi toplinski spremnik koji omogućava neovisnu proizvodnju električne i toplinske energije. Funkcija cilja agregatora predstavlja minimizaciju troškova električne energije proizvedene u CHP-u, kupnju električne energije na tržištu te maksimizaciju profita prilikom prodaje viška električne energije (1):

$$\min \sum_{t \in T} cijena^{CHP} \cdot CHP_t + cijena_t^{kupovna} \cdot kupnja_t^{total} - cijena_t^{prodaja} \cdot prodaja_t^{total} \quad \forall t \in T \quad (1)$$

Pri čemu su:

$cijena^{CHP}$ – cijena proizvedene jedinice iz CHP-a i iznosi 0.03 €/kWh,

CHP_t – proizvedena električna energija iz CHP-a u trenutku t ,

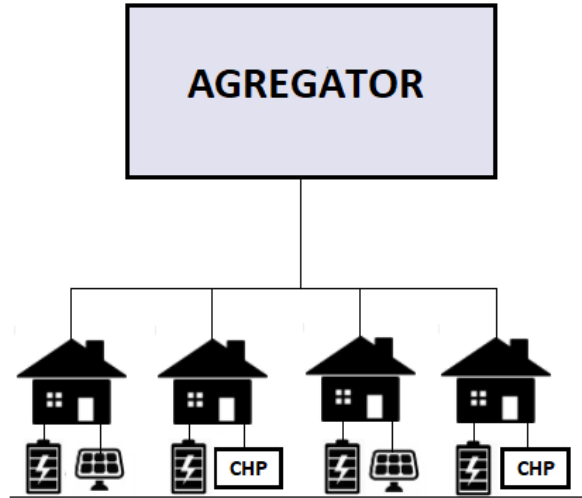
$cijena_t^{kupovna}$ – cijena po kojoj agregator kupuje električnu energiju na tržištu i ona je podijeljena u nižu i višu tarifu (niža tarifa iznosi 0.07 €/kWh i obračunava se u periodu od 22h do 8h, dok viša iznosi 0.14 €/kWh i obračunava se od 8h do 22h),

$kupnja_t^{total}$ – električna energija kupljena na tržištu u trenutku t ,

$cijena_t^{prodaja}$ – cijena prodaje električne energije, iznosi 0.10 €/kWh,

$prodaja_t^{total}$ – prodana energija na tržištu u trenutku t .

Korisnici mreže imaju sklopljen ugovor s agregatorom koji definira fiksne cijene kako bi se ogradili od varijabilnosti cijena na tržištu. Razmjena energije između vjetroelektrane i agregatora se ne naplaćuje zbog zajedničkog sudjelovanja na tržištu s ciljem povećanja benefita za obje strane. Ova činjenica implicira da vjetroelektrana nastoji za vrijeme niskih cijena na tržištu što više energije predati agregatoru, koji onda jednaku količinu energije vraća za vrijeme visokih cijena. Važno je napomenuti da ukupna predana energija vjetroelektrane na kraju dana odgovara količini predane energije u suprotnom smjeru. Međusobna razmjena energije između kupaca s vlastitom proizvodnjom također se ne naplaćuje. Agregator i njegov portfelj prikazani su slikom 2:



Slika 2 Agregator i grupe kupaca s vlastitim proizvodnjom koja zastupa na tržištu

Svaka grupa kupca s vlastitom proizvodnjom d , za zadovoljenje svojih potreba električnu energiju može nabaviti s tržišta, vjetroelektrane ili od drugih kupaca (2):

$$Import_{d,t} = Import_{d,t}^{MARKET} + P_{d,t}^{WtoA} + \sum_{m \in D} Export_m^{HtoH} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (2)$$

Pri čemu su:

$Import_{d,t}$ – ukupna preuzeta električna energija grupe kupaca s vlastitom proizvodnjom d u vremenu t

$Import_{d,t}^{MARKET}$ – preuzeta električna energija s tržišta za grupu kupaca s vlastitom proizvodnjom d u trenutku t

$P_{d,t}^{WtoA}$ – energija predana grupi kupaca s vlastitom proizvodnjom d od strane vjetroelektrane u trenutku t

$Export_m^{HtoH}$ – energija predana od drugih kupaca s vlastitom proizvodnjom m grupi kupaca s vlastitom proizvodnjom d u trenutku t

Također, svaka grupa kupaca s vlastitom proizvodnjom može dati energiju na tržište, vjetroelektrani ili drugim kupacima s vlastitom proizvodnjom (3):

$$Export_{d,t} = Export_{d,t}^{MARKET} + P_{d,t}^{AtoW} + \sum_{m \in D} Import_m^{HtoH} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (3)$$

Pri čemu su:

$Export_{d,t}$ – ukupno predana električna energija iz grupe kupaca s vlastitom proizvodnjom d u vremenu t

$Export_{d,t}^{MARKET}$ – predana električna energija iz grupe kupaca s vlastitom proizvodnjom d u trenutku t na tržište

$P_{d,t}^{AtoW}$ – energija predana vjetroelektrani od strane grupe kupaca s vlastitom proizvodnjom d u trenutku t

$Import_m^{HtoH}$ – energija dana drugim kupacima s vlastitom proizvodnjom m u trenutku t

Treba naglasiti da nije moguće u istom satu i kupovati i prodavati energiju s tržišta.

Energija koja se unese u svaku grupu kupaca s vlastitom proizvodnjom služi za napajanje potrošnje ili punjenje baterije (4):

$$Import_{d,t} = Import_{d,t}^{demand} + charging_{d,t}^{import} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (4)$$

Pri čemu su:

$Import_{d,t}^{demand}$ – napajanje potrošnje grupe kupaca s vlastitom proizvodnjom d u trenutku t

$charging_{d,t}^{import}$ – napajanje baterije grupe kupaca s vlastitom proizvodnjom d u trenutku t

Potrošnju je moguće zadovoljiti pražnjenjem baterije, proizvodnjom iz fotonaponskih panela (ili CHP-a) te preuzetom energijom bilo s tržišta, iz vjetroelektrane ili drugih kupaca s vlastitom proizvodnjom. Ovaj odnos modeliran je jednadžbom (5):

$$demand_{d,t} = discharging_{d,t}^{demand} + PV_{d,t}^{demand} + CHP_{d,t} + Import_{d,t}^{demand} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (5)$$

Pri čemu su:

$demand_{d,t}$ – iznos potrošnje grupe kupaca s vlastitom proizvodnjom d u trenutku t

$discharging_{d,t}^{demand}$ – pražnjenje baterije d u svrhu napajanja potrošnje u trenutku t

$PV_{d,t}^{demand}$ – proizvodnja solarnih panela za potrebe napajanja potrošnje grupe kupaca s vlastitom proizvodnjom d u trenutku t

$CHP_{d,t}$ – proizvodnja CHP-a grupe kupaca s vlastitom proizvodnjom d u trenutku t

Energija koju grupa kupaca s vlastitom proizvodnjom izvozi rezultat je pražnjenja baterija i viška energije iz solarnih panela (6):

$$Export_{d,t} = discharging_{d,t}^{export} + PV_{d,t}^{export} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (6)$$

Pri čemu su:

$Export_{d,t}$ – predana energija iz grupe kupaca s vlastitom proizvodnjom d u trenutku t

$discharging_{d,t}^{export}$ – pražnjenje baterije d za izvoz u trenutku t

$PV_{d,t}^{export}$ – izvoz energije iz solarnih panela grupe kupaca s vlastitom proizvodnjom d u trenutku t

Baterija se može puniti energijom proizvedenom iz solarnih panela ili CHP-a te uvezenom energijom (7):

$$charging_{d,t} = charging_{d,t}^{import} + charging_{d,t}^{PV} + charging_{d,t}^{CHP} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (7)$$

Pri čemu su:

$charging_{d,t}$ – ukupno punjenje baterije d u satu t

$charging_{d,t}^{PV}$ – punjenje baterije d iz solarnih panela u trenutku t

$charging_{d,t}^{CHP}$ – punjenje baterije iz CHP-a d u trenutku t

Pražnjenje baterije služi za napajanje potrošnje i izvoz (8):

$$discharging_{d,t} = discharging_{d,t}^{demand} + discharging_{d,t}^{export} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (8)$$

Pri čemu je:

$discharging_{d,t}$ – ukupno pražnjenje baterije d u satu t

Ukupno punjenje i pražnjenje baterije ograničeno je maksimalnom snagom baterije, dok je stanje napunjenosti ograničeno kapacitetom baterije. Stanje napunjenosti baterije u nekom trenutku t rezultat je stanju baterije u prethodnom satu $t-1$ uvećanom za ukupno punjenje u satu t ili umanjenom za ukupno pražnjenje u sat t (9):

$$SOC_{d,t} = SOC_{d,t-1} + 0.9 \cdot charging_{d,t} - discharging_{d,t} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (9)$$

Pri čemu su:

$SOC_{d,t}$ – stanje napunjenosti baterije d u trenutku t

$SOC_{d,t-1}$ – stanje napunjenosti baterije d u trenutku $t-1$

2.2. Model vjetroelektrane

Vjetroelektrana prodaje proizvedenu električnu energiju na tržištu maksimizirajući svoj profit (10):

$$\max \sum_{t \in T} (P_t^W + P_t^{AtoW} - P_t^{WtoA}) \cdot \lambda_t \quad \forall t \in T \quad (10)$$

Pri čemu su:

P_t^W – proizvodnja vjetroelektrane u satu t

P_t^{AtoW} – ukupna razmjena agregatora i vjetroelektrane u satu t (smjer agregator → elektrana)

P_t^{WtoA} – ukupna razmjena vjetroelektrane i agregatora u satu t (smjer elektrana → agregator)

λ_t – cijena na tržištu u trenutku t

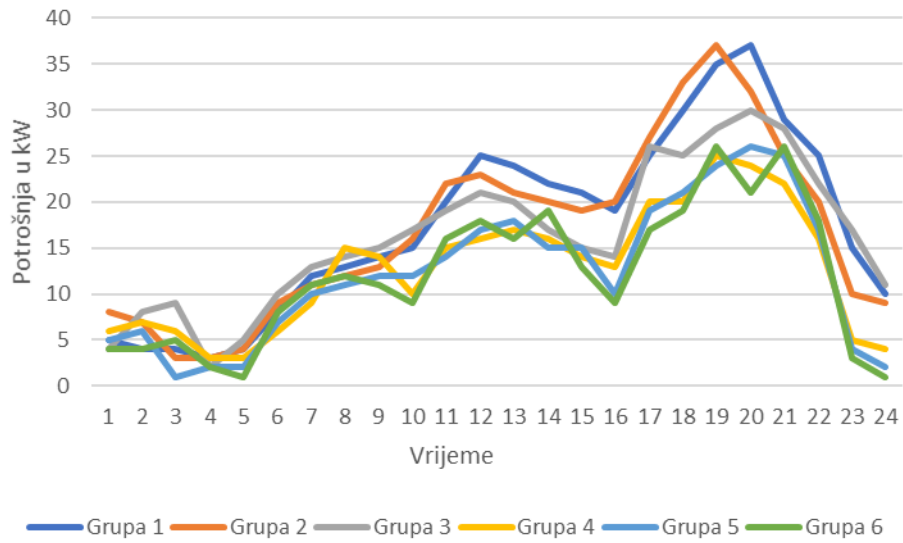
Treba napomenuti da je u istom satu smjer energije moguć samo u jednom smjeru (ili elektrana predaje energiju agregatoru ili ju prima od njega). Ukupna primljena i predana energija jednake su zbroju primljene/predane energije od pojedinih grupa kupaca s vlastitom proizvodnjom (11-12):

$$P_t^{AtoW} = \sum_{d \in D} P_{d,t}^{AtoW} \quad \forall t \in T \quad (11)$$

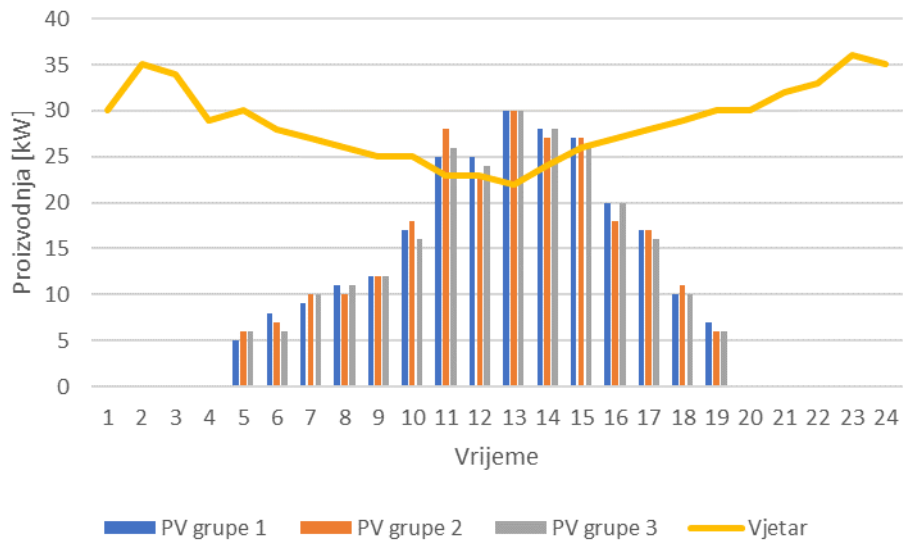
$$P_t^{WtoA} = \sum_{d \in D} P_{d,t}^{WtoA} \quad \forall t \in T \quad (12)$$

3. REZULTATI

Model je analizirao 3 grupe kupaca s vlastitom proizvodnjom opremljena solarnim panelima te tri opremljena CHP-om. Svih 6 grupa kupaca s vlastitom proizvodnjom ima bateriju. Svaka grupa kupaca s vlastitom proizvodnjom je skupina udruženih potrošača te agregator na tržištu predstavlja ukupno 6 grupa kupaca s vlastitom proizvodnjom. Potrošnja pojedinih grupa kupaca s vlastitom proizvodnjom kroz dan prikazana je slikom 3 (ukupna potrošnja svake grupe koja se mora namiriti ili pražnjenjem baterije, kupnjom na tržištu, međusobnom razmjenom ili proizvodnjom solarnih panela, odnosno CHP-a), dok je ukupna proizvodnja fotonaponskih panela i vjetroelektrane prikazana slikom 4:



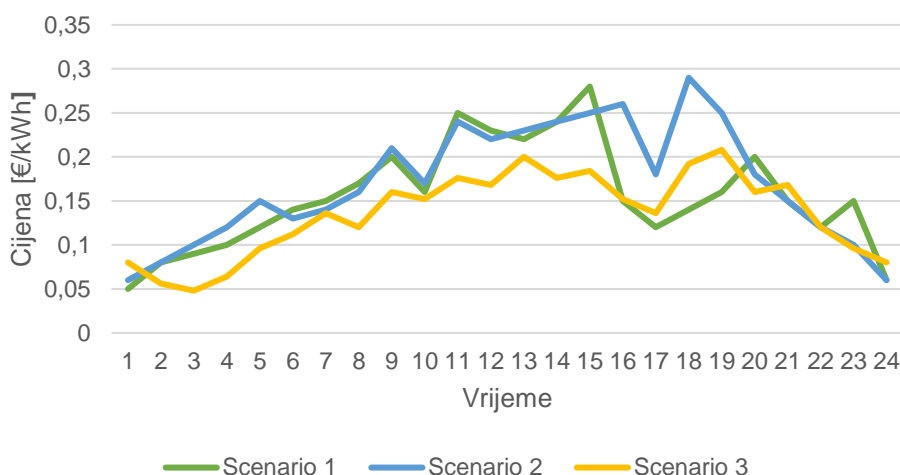
Slika 3 Potrošnja



Slika 4 Proizvodnja solarnih panela i vjetroelektrane

Optimizacije su provedene za 3 različita slučaja cijena na tržištu električne energije. Cijene su prikazane Slikom 5:

Cijena na tržištu



Slika 5 Cijene električne energije na tržištu za različite scenarije

Model zajedničkog nastupa na tržištu uspoređen je s modelom pojedinačnog nastupa te iz Tablice I vidljivo je povećanje profita vjetroelektrane te smanjenje troška agregatora iz Tablice II. U prvom slučaju elektrana je najviše povećala svoj profit (5.16 %).

Tablica I Povećanje profita vjetroelektrane

	Samostalno (€)	Zajednički nastup (€)	Povećanje profita u %
Slučaj 1	102.70	108.0	5.16
Slučaj 2	112.79	115.09	2.04
Slučaj 3	89.88	90.69	0.90

Tablica II Smanjenje troškova agregatora

Samostalno	Zajednički nastup 1 (€)	Zajednički nastup 2 (€)	Zajednički nastup 3 (€)
89.55	87.17	87.15	87.23

4. ZAKLJUČAK

Ugradnjom baterija i solarnih panela pasivni potrošači postaju aktivni potrošači. Zbog svojih premalih snaga, udružuju se u grupe te, predstavljeni agregatorom, nastupaju na tržištu električne energije. Istraživanje je provedeno na tržištu dan unaprijed s determinističkim vrijednostima potrošnje električne energije, proizvodnje solarnih panela te proizvodnje vjetroelektrane (pretpostavljeno je da postoji savršena informacija za dan unaprijed). Rezultati pokazuju kako zajednički nastup agregatora i vjetroelektrane na tržištu povećava profit elektrane, dok su troškovi agregatora niži u odnosu na pojedinačni nastup na tržištu. Daljnji rad uključiti će i nesigurnost proizvodnje solarnih panela te vjetroelektrane, kao i nemogućnost točnog predviđanja cijena na tržištu i potrošnje kupaca s vlastitom proizvodnjom te nastup oba entiteta na više tržišta.

5. ZAHVALE

Istraživanje je financirano u sklopu projekta SUCCESS Hrvatske zaklade za znanost, koji se financira u sklopu Programa Vlade Republike Hrvatske za poticanje istraživačkih i razvojnih aktivnosti u području klimatskih promjena za razdoblje od 2015. do 2016. godine.

Istraživanje je provedeno u sklopu projekta 3smart DTP1-1-502-3.2 I koji su financirali Europska unija kroz EFRR i IPA fond.

6. LITERATURA

- [1] Scientific American, The Price of Solar is Declining to Unprecedented Lows, <https://blogs.scientificamerican.com/plugged-in/the-price-of-solar-is-declining-to-unprecedented-lows/>
- [2] Clean Energy for all Europeans, http://europa.eu/rapid/press-release_IP-16-4009_en.htm
- [3] I. Pavić, M. Beus, H. Pandžić, T. Capuder, I. Štritof, „Electricity Markets Overview-Market Participation Possibilities for Renewable and Distributed Energy Sources,” 14th International Conference on the European energy Market (EEM) 2017,8-9 June, Dresden, Germany
- [4] T. Capuder, P. Mancarella, „Assessing the benefits of coordinated operation of aggregated distributed Multi-energy Generation,” Power Systems Computation Conference (PSCC) 2016, 20-24 June, Genoa, Italy
- [5] T. Rodrigues, P.J. Ramirez, and G.Strbac, “The Value of Storage for a Wind Farm Offering Energy and Spinning Reserve,” 5th IET International Conference on Renewable Power Generation (RPG) 2016, 21-23 Sept., London, UK
- [6] T. Rodrigues, R. Moreira, and G.Strbac, “Coordinated Operation of Distributed Energy Storage in Low Carbon Networks,” 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), 10-13 June, Stockholm, Sweden
- [7] H.R.Kermani, M.V.Dahraie, H.R. Najafi, A.A.Moghaddam, J.M. Guerrero, “A stochastic Bi-Level Scheduling Approach for the Participation of EV Aggregators in Competitive Electricity Markets,” Applied Science 2017,7,1100.
- [8] M. Motalleb, R.Ghorbani, “A Game-Theoretic Model of Demand Response Aggregator Competition for Selling Stored Energy in Regulated and Unregulated Power Markets,” <https://arxiv.org/abs/1612.00716v1>
- [9] H.A. Hejazi, H. M.Rad, “Optimal Operation of Independent Storage Systems in Energy and Reserve Market With High Wind Penetration”, IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, vol.5, no.2, March 2014, p 1088-1097
- [10] R. Henriquez, G. Wenzel, D.E.Olivares, M.N.Pincetic, “Participation of Demand Response Aggregators in Electricity Markets: Optimal Portfolio Management,” IEEE Transactions on Smart Grid, accepted article
- [11] Y. Dvorkin, “Can Merchant Demand Response Affect Investments in Merchant Energy Storage,” IEEE Transactions on Power Systems, accepted article
- [12] S. Riaz, H. Marzooghi, G. Verbič, A.C. Chapman, D.J.Hill, “Generic Demand Model Considering the Impact of Prosumers for Future Grid Scenario Analysis,” IEEE Transactions on Smart Grid, accepted article
- [13] I. Momber, S. Wogrin, T.G.S.Roman, “Retail Pricing: A Bilevel Program for PEV Aggregator Decisions Using Indirect Load Control,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 1, January 2016, pp 464-473
- [14] K.K. Simon, J. Zhong, “Smart Dispatch of Controllable Loads with High Penetration of Renewables,” Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES, 7-10 May, Orlando, Florida, US
- [15] G.E. Asimakopoulou, N.D. Hatziaargyriou, “Evaluation of Economic Benefits of DER Aggregation,” IEEE Transactions on Sustainable Energy, accepted paper