

Ivan Pavić
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Ivan.pavic@fer.hr

Tomislav Capuder
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Tomislav.capuder@fer.hr

Hrvoje Pandžić
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Hrvoje.pandzic@fer.hr

AGREGATOR BATERIJA ELEKTRIČNIH VOZILA

SAŽETAK

Električna vozila (EV) postaju sve češći oblik cestovnog prometa te su u nekim zemljama dosegli visoke udjele u ukupnom broju prodanih vozila. Među njima prednjači Norveška gdje je ukupni tržišni udio EV u lipnju 2019. iznosio 58%. Porast broja EV prati i veliki porast infrastrukture za punjenje EV koja označava točku spoja električnog vozila s distribucijskom mrežom.

Pasivnim (neupravljivim) načinom punjenja EV moguće su negativne posljedice za elektroenergetski sustav, poput stvaranja novih vršnih trenutaka u krivulji potrošnje ili dodatne potrebe za uravnoteženjem sustava. Budući da je uravnoteženje sustava osjetljiva tema u uvjetima sve veće integracije obnovljivih izvora energije, EV je potrebno integrirati u sustav s aktivnim/naprednim punjenjem kako bi se ublažile posljedice njihove integracije, ali i kako bi se njima potencijalno pružale i usluge uravnoteženja. U ovom radu bit će prikazan način agregacije EV koji omogućava aktivno punjenje EV te pružanje usluga arbitraža električne energije te uravnoteženja operatoru sustava.

Ključne riječi: Električna vozila, agregator baterija električnih vozila, pomoćne usluge, uravnoteženje sustava, elektromobilnost

ELECTRIC VEHICLES BATTERY AGGREGATOR

SUMMARY

Popularity of electric vehicles (EV) as a mean of a transport is increasing and in some countries they reached high percentages in total vehicles sold. Norway leads the way where total market cut of EVs in June 2019. was 58%. Increase in EV numbers is accompanied with increase in EV charging equipment and it represents point of common coupling of EV with distribution grid.

Passive (uncontrolled) EV charging could introduce negative consequences for power system such as new peak periods in demand curve or additional need for system balancing. Power system balancing is sensitive subject in the conditions of ever-increasing integration of renewable energy sources. EVs should be integrated with active (controlled) charging possibilities in order to mitigate negative effects of their integration, but also to provide additional balancing service to power system. In this paper, a novel aggregation method will be presented which allows active charging/discharging of EVs and provision of energy arbitrage and balancing services.

Key words: Electric vehicles, electric vehicles battery aggregator, ancillary services, power system balancing, e-mobility

1. UVOD

Zadnjih nekoliko godina velik fokus je stavljen na dekarbonizaciju elektroenergetskog sustava (EES). ESS se postupno transformira iz sustava ovisnog o fosilnim gorivima u sustav ovisan o meteorološkim promjenama. Dekomisijom upravljivih elektrana EES gubi na fleksibilnosti te pomoćne usluge poput pružanja rezervi i energije uravnoteženja postaju sve traženije i vrijednije. Europski sustavi upravo zbog toga krenuli su u liberalizaciju spomenutih usluga kako bi se potaknuo ulazak novih tehnologija na tržište pomoćnih usluga. Cilj tih tržišta jest osiguranje dostatnog kapaciteta za pružanje zahtijevane količine pojedine usluge, ali i smanjenje troška raznih usluga. Osim liberalizacije, pružanje rezervi i energije uravnoteženja u skoroj budućnosti bit će moguće i prekogranično čime se još snažnije potiče konkurencija među pružateljima. Tehnologija koja je među prvima iskoristila mogućnost pružanja pomoćnih usluga, jesu baterijski spremnici energije. Iako im je investicijski trošak vrlo visok, u zapadnim zemljama, prije svega u Njemačkoj, spremnici energije su brzo pronašli svoje mjesto na tržištu primarne rezerve. Kako spomenuto tržište ulazi u zasićenje, spremnici se okreću sekundarnoj rezervi te mrežnim uslugama poput odgode ulaganja u mrežu. Tehnologija čiji je ulazak na tržište rezervi i energije uravnoteženja tek u ranoj fazi jest odziv potrošnje, gdje je kapitalni trošak znatno manji te su prema tome i bolje rješenje za pružanje spomenutih usluga. Dakako, potrošnja nije tehnologija čija je primarna namjena pružanje usluga EES-u, već obavljanje industrijskih, komercijalnih ili rezidencijalnih aktivnosti. Prema tome, utjecaj odziva potrošnje na ponašanje i komfor samih korisnika je bitna stavka kod ove tehnologije. Svojevrсна kombinacija ove dvije tehnologije su električna vozila o kojima će biti riječ u ovom radu.

Dekarbonizacija prometnog sustava može se pokazati kao veći izazov nego li dekarbonizacija EES-a. Tranzicija od konvencionalnih vozila pogonjenih fosilnim gorivima k niskougličnim vozilima, primarno električnim vozilima (EV), teče sporije nego je predviđena unatoč tome što je njezina važnost istaknuta u bitnim strateškim dokumentima [1]. Rješenja za promjenu ponašanja te preferencija krajnjih korisnika vozila [2] zahtijevaju integrirani pristup, posebno u pogledu razvoja modela koji bi krajnje korisnike potaknuli na bržu tranziciju kako bi se dosegli ciljevi elektrifikacije [3]. Prilikom izrade poslovnih modela potrebno je voditi računa o tehničkim, ekonomskim te socijalnim ograničenjima kako bi se elektrifikacija prometnog sustava mogla koristiti kao alternativni izvor fleksibilnosti u EES-u. Pasivno, to jest neupravljivo, punjenje EV označava punjenje maksimalnom snagom od trenutka priključenja na punjač sve dok vozilo ne dosegne punu napunjenost ili dok ne napusti mjesto za punjenje [4]. Ovakav način povećava potrebu za fleksibilnošću u EES-u te dovodi do potrebe za novim ulaganjima u vršne elektrane te pojačanja mreže. S druge strane, aktivno ili upravljivo punjenje EV [5] može minimizirati potrebu za novim ulaganjima u EES-u te čak donijeti i uštede na razini cijelog sustava. Upravljivo punjenje EV sadržava značajke i odziva potrošnje i spremnika energije. Pomicanje punjenja u vremenu predstavlja aspekt odziva potrošnje te se ovakav tip upravljivog punjenja često naziva „mreža-prema-vozilu“ punjenje (engl. „Grid-to-vehicle – G2V“) jer zahtjeva jednosmjerno upravljive punjače [6]. Mogućnost pražnjenja energije iz baterije vozila kada ono nije potrebno za vožnju često se naziva „vozilo-prema-mreži“ (engl. „Vehicle-to-Grid – V2G“) punjenje te ono zahtjeva dvosmjerne punjača [7], [8]. Ovaj tip punjenja sličan je principu rada stacionarnih baterijskih spremnika. Detaljan pregled različitih tipova punjenja dostupan je u [9] - [11].

2. MODEL NASTUPA AGREGATORA ELEKTRIČNIH VOZILA NA TRŽIŠTU

Agregator električnih vozila entitet je koji za svoje klijente/krajnje korisnike (električna vozila) vrši nabavku energije za punjenje, prodaju energije kroz pražnjenje u mrežu te prodaju pomoćnih usluga operatorima sustava. U slučaju neupravljivog punjenja agregator vrši uslugu opskrbe električnom energijom kao što je to slučaj kod današnjih opskrbljivača. Kod upravljivih punjenja agregator može pružati pomoćne usluge, te dodatno kod dvosmjerno upravljivog punjenja i prodavati energiju na tržištu električne energije. Tema ovog rada jest upravljivo punjenje EV te prema tome agregator električnih vozila može aktivno nastupati na tržištu električne energije te na tržištima pomoćnih usluga. Fokus je na na obavljanju arbitraže električne energije te na tržištima rezervi i energije uravnoteženja jer su to usluge koje su prve liberalizirane te su lokacijski (mrežno) neovisne.

Princip sudjelovanja agregatora na tržištu električne energije jest kupnja energije na tržištu za vrijeme niskih cijena ili kada je energija potrebna krajnjem korisniku za vožnju. Isto tako, agregator energiju prodaje za vrijeme visokih cijena kada postoji dovoljna količina energije za sljedeće planirano putovanje. Zbog kratkoročnih ograničenja zadovoljenja svih potreba krajnjih korisnika za vožnjom, agregator se može natjecati na dan unaprijed te unutardnevnom tržištu. Prodaja energije iz vozila koristi

isti resurs kao i energija potrebna za vožnju te je potrebno pažljivo planirati potrebnu energiju za vožnju (buduća putovanja) kako se ne bi utjecalo na komfor krajnjih korisnika.

Princip sudjelovanja agregatora na tržištima rezervi jest prodaja kapaciteta za rezervu prema gore ili prema dolje u trenucima kada je vozilo priključeno na punjač te uvelike ovisi o punjenju/praznjenju zbog energije koja se kupuje/prodaje na tržištu. Iako u teoriji sve rezerve dolaze u obzir, zbog potrebe brzog odziva i kraćeg vremena aktivacije tržišta primarne i sekundarne rezerve su najizglednija za agregatora električnih vozila. EV mogu pružati rezervu:

- Prema gore: smanjenjem ili zaustavljanjem punjenja (koje je planirano na tržištu energije) te započinjanjem ili povećanjem praznjenja (koje je planirano na tržištu energije).
- Prema dolje: smanjenjem ili zaustavljanjem praznjenja (koje je planirano na tržištu energije) te započinjanjem ili povećanjem punjenja (koje je planirano na tržištu energije).

Praznjenje i punjenje EV prilikom pružanja rezervi te energije uravnoteženja na isti način utječe na SOE kao i arbitraža električne energije, međutim nepredvidivost izvođenja jest puno veća.

2.1. Odziv potrošnje stacionarnih tereta naspram električnih vozila

Odziv potrošnje tereta kod korisnika kao što su industrijsko postrojenje ili kućanstvo uvijek je povezan samo s jednom lokacijom na koju je teret priključen. Prema tome agregacija samog uređaja ili agregacija njegovog mjesta priključenja na mrežu je istovjetna. Fiksna ograničenja tereta koja agregatoru odziva potrošnje uvjetuju razinu fleksibilnosti koju može ponuditi na tržištima nisu promjenjiva. Jedino što jest promjenjivo je način korištenja tih tereta. Npr. kod agregiranja klima uređaja u kućanstvu maksimalna snaga koju klima uređaj može pružiti je konstantna jer se uređaj ne mijenja, dok je njegovo korištenje promjenjivo u ovisnosti o broju ukućana, vanjskoj temperaturi itd. Isti rezultat se postiže agregacijom mjesta priključenja tereta (u slučaju klima uređaja – utičnice na zidu) ili agregacijom samog tereta (klima uređaja). Slično se može zaključiti i za industrijska postrojenja gdje se primjerice može agregirati motorni pogon crpke ili priključak iste na mrežu. Navedeno vrijedi jer su vlasnik samog tereta te infrastrukture za priključenje na mrežu isti.

Električna vozila tijekom dana mogu biti korištena za vožnju ili mogu biti parkirana. Uz pretpostavku da će u budućnosti sva parkirana mjesta biti opremljena infrastrukturom za punjenje, EV mogu biti ili vožena pri čemu se njihove baterije prazne ili priključena na mrežu pri čemu se njihove baterije mogu ili puniti ili prazniti u mrežu. Priključak na mrežu može biti ostvaren na bilo kojem punjaču uključujući punjače unutar kućanstva, punjače na radnim mjestima, punjače na privatnim ili javnim parkiralištima, punjače uz gradske ceste te punjače u brzim punionicama. Iz navedenog se da zaključiti da punjači i EV ne moraju imati istog vlasnika te se postavlja pitanje hoće li agregator EV vršiti agregaciju punjača ili EV? U slučaju agregacije kućnog punjača kod privatnih EV ili punjača na radnom mjestu kod EV u vlasništvu poslodavca, vlasnik i EV i punjača je isti, dok je kod svih ostalih kombinacija različiti vlasnik punjača te vlasnik EV.

2.2. Agregator punionica EV

U ovom radu pod punjačem smatramo jedno mjesto za punjenje dok pod punionicom smatramo jednu lokaciju za punjenje EV koja može biti sačinjena od jednog ili više punjača. Budući da će punjači unutar iste punionice imati istog agregatora, u nastavku ćemo govoriti o agregaciji punionica.

Ako se vrši agregacija punionica tada vlasnik vozila mora punionici dati dozvolu za agregaciju te joj također mora dati i vlastite postavke za pružanje fleksibilnosti među kojima su najbitnije vrijeme planiranog odlaska s punjača te minimalno stanje napunjenosti (engl. „State-of-Energy – SOE“) u trenutku planiranog odlaska s punjača. Dodatne postavke mogu biti i minimalno stanje napunjenosti za vrijeme čitavog perioda parkiranja, broj ciklusa punjenja/praznjenja, trošak punjenja ili visina naknade za pružanje fleksibilnosti itd. Svako pružanje fleksibilnosti u vidu praznjenja u mrežu dodatno degradira bateriju što u konačnici stvara trošak vlasniku vozila zbog potrebe za prijevremenom zamjenom baterije. Isto tako svako punjenje koje odstupa od neupravljivog punjenja maksimalnom snagom ostvaruje manji SOE nego što bi se ostvarilo u istom periodu kod neupravljivog punjenja. Navedeno može prouzrokovati nedovoljan domet kod nadolazećeg putovanja ili doprinijeti strahu zbog ograničenog dometa (engl. „Range anxiety“) u slučaju da vlasnik vozila odluči napustiti punionicu prije planiranog vremena. Ukratko, narušava se sloboda i komfor vlasnika vozila koji se također moraju na neki način kompenzirati. Zbog

spomenutih izazova, vlasnik punionice vlasniku vozila mora ponuditi financijsku naknadu za pružanje fleksibilnosti iz njegovog vozila. Kod ovakvog tipa agregacije vlasnik punionice (u pravilu vlasnik parkirališta) potpisuje ugovor o agregaciji s agregatorom.

Agregacija punionica EV slična je agregaciji odziva potrošnje kod ostalih stacionarnih tereta uz iznimku dodatnog troška koji se isplaćuje vlasnicima vozila. Agregator za svaku lokaciju punionice za svaki trenutak mora predvidjeti buduće opterećenje te mogući raspon fleksibilnosti koji može ponuditi na tržištu (broj EV na punjačima unutar punionice u svakom trenutku, njihov inicijalni SOE i trenutak dolaska na punjač, njihov željeni SOE i trenutak odlaska s punjača itd.). Zbog nepredvidivosti ponašanja korisnika ovakva predviđanja sklona su greškama te mora postojati određena rezerva kako korisnici ne bi bili oštećeni. Osim ponašanja korisnika, agregator mora biti u stanju procijeniti i fiksna ograničenja poput maksimalne snage punjenje baterija (koja ovisi o unutarnjem punjaču u EV), kapaciteta baterije, učinkovitosti procesa punjenja/praznjenja i slično. Procjena fiksnih ograničenja potrebna je jer se različita vozila izmjenjuju na istom punjaču, dok ista nisu potrebna kod agregacije odziva potrošnje stacionarnih tereta. S druge strane, fiksni podaci vezani za lokaciju (snaga vanjskog punjača) se ne moraju procjenjivati jer su konstantni.

Budući da EV izmjenjuju periode vožnje te periode punjenja na različitim punionicama, agregator punionica EV ne može optimirati punjenje/praznjenje EV tijekom cijelog dana (ili tjedna, radni dan/vikend) jer nema informacije o punjenju/praznjenju EV u periodima kada je EV spojen na punjača van punionice koju on agregira. Upravo te informacije mora predvidjeti. Prema tome, agregator punionica EV može optimirati punjenje/praznjenje EV samo za vrijeme dok su ta vozila spojena na punjače kojima on upravlja.

2.3. Agregator baterija EV

Ako se vrši agregacija samih EV, a ne punionica, ugovor s agregatorom ne potpisuje vlasnik punionice već vlasnik vozila. U ovom slučaju punjači svih punionica su samo dio infrastrukture koja se koristi za punjenje, slično kao prijenosna i distribucijska mreža, te ne vrši niti nabavku energije niti prodaju fleksibilnosti za vlasnika vozila. U literaturi je za *agregatora punionica EV* uvriježen naziv *agregator EV* te smo, kako bismo napravili distinkciju od tog pojma, skovali naziv *agregator baterija EV*.

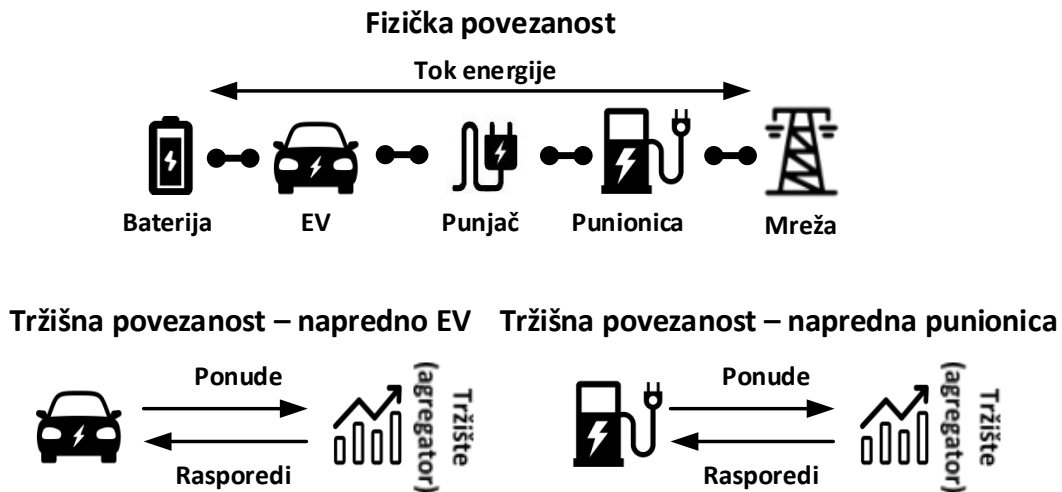
Vlasnik punionice mora na neki način dozvoliti upravljivo punjenje na svojim punjačima te naplatiti korištenje vlastite infrastrukture. Vlasnik vozila ne plaća cjelokupno punjenje (kao što je to slučaj kod agregatora punionica EV) već samo korištenje infrastrukture bilo za punjenje ili prodaju fleksibilnosti. Punjenje ili prodaju fleksibilnosti izravno plaća/naplaćuje od agregatora. Vlasnik vozila ne daje nikakve podatke punionici već agregatoru te ti podaci nisu vezani za jedan period dok je vozilo na jednom punjaču već su vezani za čitav dnevni (tjedni) planirani raspored korištenja vozila. Sve dodatne informacije o konkretnom putovanju/parkiranju su vrlo vrijedan dodatak (npr. to mogu biti planirano vrijeme odlaska s određenog punjača te minimalni SOE) koji može pospješiti poslovanje agregatora. Pružanje fleksibilnosti i u ovom slučaju uzrokuje degradaciju te gubitak komfora, međutim taj trošak se kompenzira izravno od agregatora.

Agregacija samih EV značajno se razlikuje od agregacije stacionarnih tereta. Agregator ne predviđa buduće opterećenje te mogući raspon fleksibilnosti za svaku lokaciju u svakom trenutku, već za svako vozilo u svakom trenutku neovisno na kojem je punjaču EV. Agregator mora predvidjeti buduće ponašanje EV tokom dana. Ponovno postoji nepredvidivost ponašanja korisnika jer i ova predviđanja su sklona greškama te mora postojati rezerva kako korisnici ne bi bili oštećeni. Međutim, predviđanje ponašanja svakog pojedinog korisnika se u ovom slučaju može raditi prema povijesnim podacima o ponašanju konkretnih korisnika te prema dodatnim informacijama koje ti korisnici pošalju agregatoru. U slučaju agregacije punionica, predviđanje se ne radi na temelju podataka o konkretnom krajnjem korisniku EV već na temelju podataka pristiglih s punjača na kojima se pune različiti korisnici. Iz navedenoga, može se zaključiti da se greške u predviđanjima mogu umanjiti ako se agregiraju sama EV. Agregator ne mora procjenjivati fiksne podatke povezane s vozilima poput snage punjača u vozilu te kapaciteta baterije, ali mora na neki način procijeniti fiksne podatke s punjača.

Budući da agregator EV izravno agregira vozila u stanju je optimirati punjenje/praznjenje EV tijekom cijelog dana (ili tjedna, radni dan/vikend) jer ima informacije o punjenju/praznjenju EV u svim periodima, ne samo o korištenju konkretnih punjača.

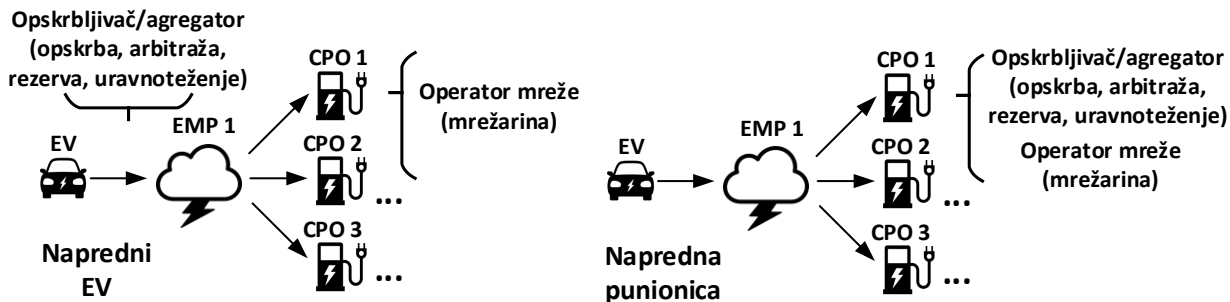
3. DANAŠNJI SUSTAV E-MOBILNOSTI

Na slici Slika 1 prikazana je fizička te tržišna povezanost sudionika kod agregatora baterija EV (gdje su napredna sama EV) te kod agregatora punionica EV (gdje je napredna punionica EV). Gornji dio slike prikazuje fizičku povezanost prilikom punjenja/praznjenja koja je ista u oba slučaja: iz mreže energija teče u punionicu EV te preko punjača dolazi do EV i završava u bateriji (obrnuti smjer za pražnjenje). Donji dio slike prikazuje tržišnu povezanost gdje u slučaju naprednih EV oni, preko agregatora, komuniciraju s tržištem (lijevo), a u slučaju naprednih punionica one, preko agregatora, komuniciraju s tržištem (desno).



Slika 1 Fizička i tržišna povezanost naprednih EV te naprednih punionica EV

Današnji sustav e-mobilnosti temelji se na tri poslovna modela: operatori punionica EV (engl. „Charging Point Operators - CPO“), pružatelji usluga e-mobilnosti (engl. „E-Mobility Providers - EMP“) te opskrba energijom (opskrbljivači i operatori prijenosnog/distribucijskog sustava). CPO tvrtke upravljaju pogonom te održavaju flotu punionica EV. EMP tvrtke pružaju uslugu punjenja EV omogućujući korisnicima pristup stanicama za punjenje EV (autentifikacija) te nude različite načine plaćanja. Nakon autentifikacije EMP tvrtka započinje punjenje EV (maksimalnom snagom) koje prestaje nakon što se EV napuni ili kada vlasnik EV pošalje signal za prestanak. Vlasnici EV imaju ugovore samo s EMP tvrtkama koji prosljeđuju plaćanja CPO tvrtkama na lokacijama gdje su se EV punili. EMP tvrtke imaju ugovore s većim brojem CPO, dok CPO imaju potpisane ugovore s opskrbljivačima energije te operatorima sustava. Ako se želi pružati arbitraža ili pomoćne usluge, EV i EMP tvrtke to ne mogu napraviti, jedino CPO tvrtke mogu. Ovakav princip odgovara sustavu e-mobilnosti s naprednim punionicama EV, odnosno sustavima sa agregatorima punionica. Na slici Slika 2 desno, prikazana je pozicija agregatora u sustavu e-mobilnosti s naprednim punionicama. Ako se želi prijeći na sustav e-mobilnosti s naprednim EV, ugovori s opskrbljivačima/agregatorima se moraju prebaciti na EV ili EMP tvrtke što je prikazano na slici lijevo. CPO tvrtke bi i dalje bili zaduženi za komunikaciju s operatorima sustava jer se fizička povezanost nije promijenila. Kako bi se takav sustav ostvario obračunsko mjesto bi se moralo prebaciti s punjača na električno vozilo. U tom slučaju obračunsko mjesto bi postalo mobilno (lokacijski neovisno). Tvrtka Ubitricity razvila je takvo rješenje naziva „SmartCable“ koje u sebi sadrži brojilo te SIM karticu radi transfera podataka na oblak [12]. Osnovna misao vodilja ovog proizvoda bila je slobodan izbor opskrbljivača za EV bez obzira na kojoj punionici se nalazi. Usluga se može proširiti i na naprednu e-mobilnost vođenu agregatorom baterija EV. Ako e-mobilnost usporedimo s telekomunikacijskom industrijom, e-mobilnost temeljena na naprednim punionicama može se usporediti s fiksnim telefonima. Prelazak na mobilne telefone je s druge strane sličan prelasku na e-mobilnost temeljenu na naprednim EV.



Slika 2 Pozicija agregatora (/opskrbljivača) u sustavu e-mobilnosti s naprednim EV (lijevo) te naprednim punionicama (desno)

Prelazak iz sustava e-mobilnosti temeljenog na naprednim punionicama u onaj temeljen na naprednim EV iziskuje velike promjene u elektroenergetici jer mobilna mjerna mjesta nisu do sada bila definirana jer nije bilo potrebe za njima. Kao potencijalno prijelazno rješenje može biti odluka da sve punionice osim fiksnih tarifa kakve su danas moraju imati i varijabilnu tarifu koja prenosi varijabilnu cijenu električne energije s burze na koju su pridodane naknade za korištenje mreže (od strane operatora prijenosnog i distribucijskog sustava) te naknade za korištenje infrastrukture za punjenje (od strane stanice za punjenje EV). Na sličan način kako je u EU uvjetovano da mora postojati makar jedan opskrbljivač s varijabilnom maloprodajnom cijenom za sve ostale potrošače. Na ovaj način agregator EV bi imao mogućnost arbitraže električne energije (s ciljem smanjenja troška punjenja) bez da preuzima samu opskrbu električnom energijom od CPO tvrtke. Budući da je EMP tvrtka zadužena za početak i kraj punjenja na stanicama za punjenje EV, upravljivo punjenje/praznjenje bi se moglo izvesti modifikacijama u njihovom sustavu. Problem pružanja pomoćnih usluga (rezerve, energije uravnoteženja) bi bio isti kakav je danas kod stacionarnih tereta i odziva potrošnje, a to je prvenstveno rješavanje međudnosa opskrbljivača i agregatora. Naime, zbog aktivacije odziva potrošnje kod određenog potrošača agregator može opskrbljivaču prouzročiti dodatne troškove te mu ih je dužan kompenzirati. Imati na umu da bi se naknade za korištenje infrastrukture za punjenje EV u slučaju ovog hibridnog rješenja morale modificirati te bi morale u obzir uzeti ne samo naknadu po prenesenom kWh već i po satu parkiranja jer bi prenesena energija možda bila smanjena u odnosu na današnje neupravljivo punjenje.

4. MATEMATIČKI MODEL I REZULTATI

Kako bismo dokazali financijske prednosti predloženog poslovnog modela definirali smo dva matematička modela agregatora: za e-mobilnost baziranu na naprednim EV (agregator baterija EV) te na naprednim punionicama (agregator punionica EV). Identificirali smo dva osnovna problema kod e-mobilnosti utemeljena na naprednim punionicama koja ćemo dokazati matematički/ekonomski:

- Agregatori naprednih punionica nemaju dovoljno informacija o ponašanju vozila na drugim punionicama. Agregator prati SOE samo onih EV koje su na njegovim punionicama. Punjenja/praznjenja van tog vremena mora predvidjeti što mu povećava nesigurnost, odnosno rizik poslovanja.
- Agregatori naprednih punionica nemaju mogućnost za prijenosom fleksibilnosti među periodima kada je EV na njihovoj punionici te kada je na punionicama drugih agregatora. Agregator optimira SOE te punjenje/praznjenje samo u periodu dok je EV na njegovoj punionici. Nema mogućnost pripreme SOE s ciljem maksimizacije profita od fleksibilnosti.

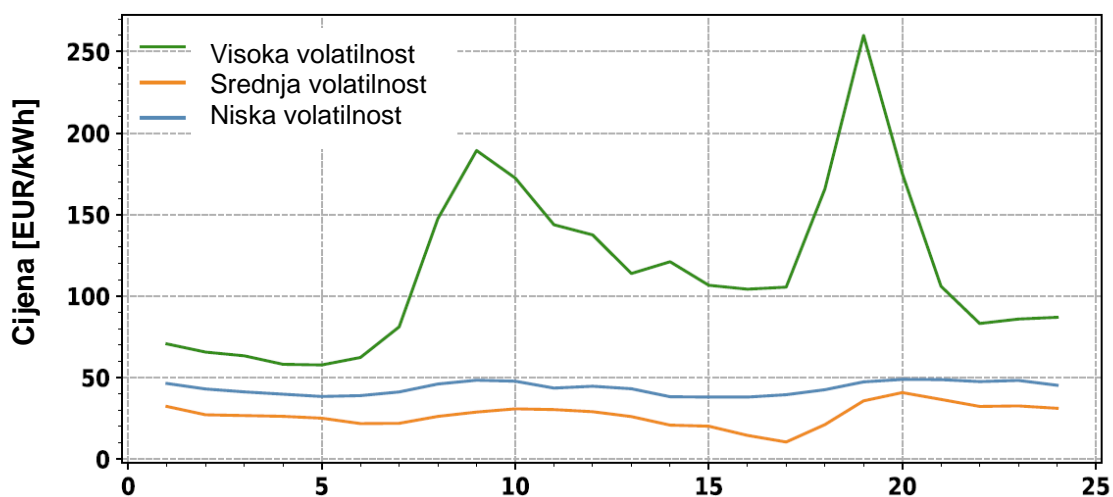
4.1. Matematički model, pretpostavke te ulazni podaci

Matematički modeli koncipirani su kao mješovito linearno cjelobrojni modeli čija je funkcija cilja minimizacija ukupnih troškova EV. Modeli uzimaju u obzir trošak/zaradu od punjenja/praznjenja, trošak mrežarine te naknade za korištenje infrastrukture za punjenje te troškove degradacije baterije radi praznjenja. Pomoćne usluge nisu modelirane zbog složenosti modela, već je naglasak na arbitraži električne energije. Punjenje/praznjenje EV ograničeno je snagama unutarnjeg i vanjskog punjača, te ograničenjem na fazu punjenja konstantnim naponom litij-ionske baterije. Degradacija baterija definirana

je empirijski dobivenim linearnim formulama koji uzimaju u obzir dubinu pražnjenja litij-ionske baterije te snagu pražnjenja. Trošak degradacije uzima u obzir investicijski trošak baterije.

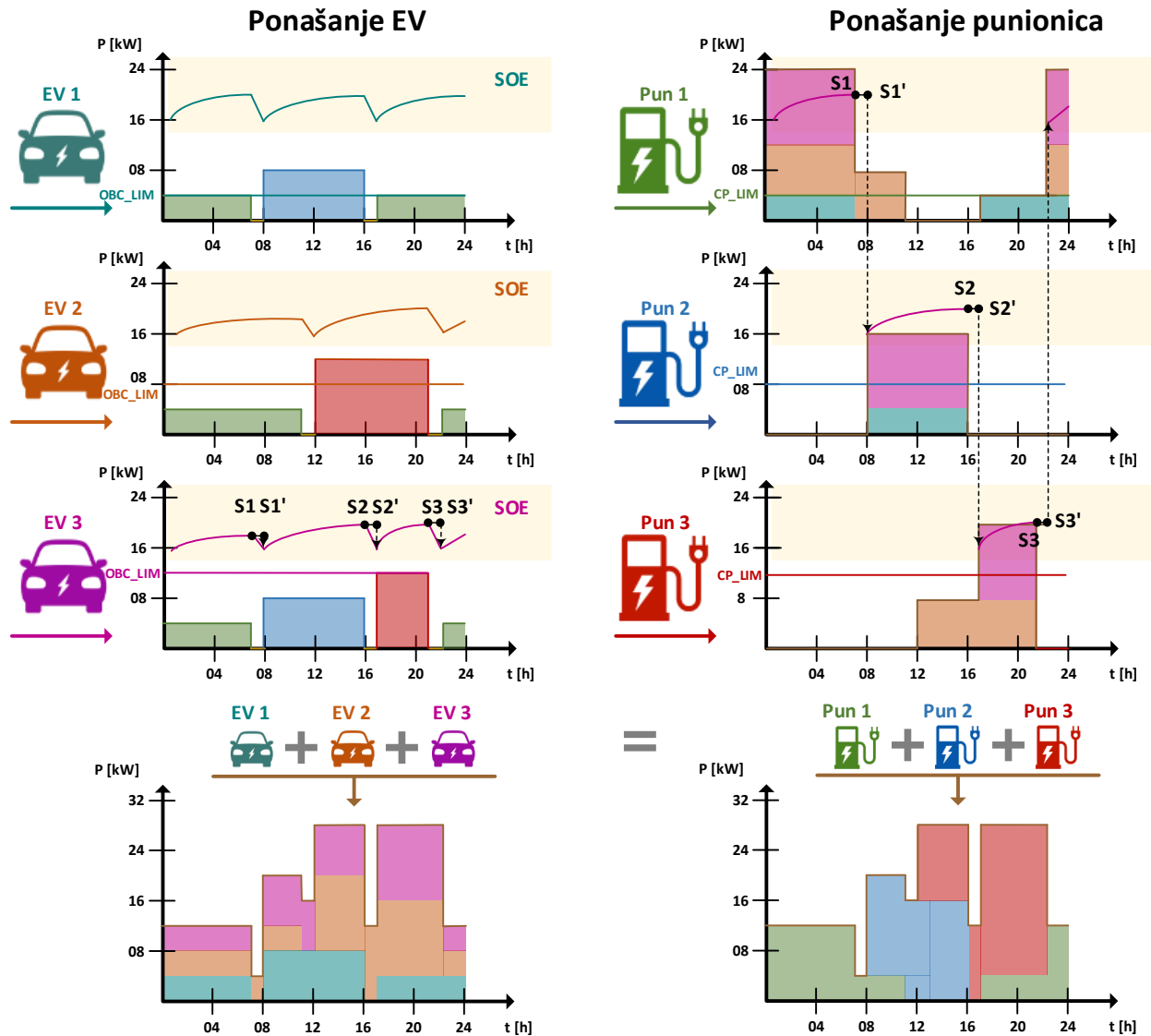
Modeli se razlikuju u definiciji jednadžbe očuvanja energije u bateriji EV. Model agregatora baterija EV ima definiranu jednadžbu za SOE koja uzima u obzir energiju akumuliranu u prošlom trenutku plus energija došla kroz punjenje minus energija korištena za pražnjenje u mrežu te za pražnjenje za vožnju. Model agregatora punionica EV u navedenoj jednadžbi ne sadrži energiju korištenu za vožnju, već ima dodatno eksplicitne jednadžbe koje kažu koliko energije ima prije i nakon svakog putovanja. Detaljnije o modelu se može pronaći u [13]. Za potrebe ovog rada definirana su dva podmodela agregatora punionica EV: s visokim SOE prije svakog putovanja (95%) te s niskim SOE prije svakog putovanja (60%) kako bi se bolje predočila superiornost agregatora baterija EV. Agregator s visokim SOE predstavlja konzervativne korisnike nesklone riziku, dok agregator s niskim SOE predstavlja korisnike koji su voljni imati i niži SOE ako im to može donijeti koristi.

Pretpostavka je da predloženi model agregatora ne utječe na cijene na tržištu već se one predviđaju za razmatrano razdoblje. Iako su cijene te ponašanje EV stohastičke veličine u ovom radu ih modeliramo kao determinističke kako bismo bolje demonstrirali optimalnost obje formulacije. Kao predviđene cijene koriste se povijesne cijene iz 2018 godine preuzete s francuskog EPEX-a, tri seta su korištena koja odgovaraju cijenama s visokom, srednjom te niskom volatilnošću. Cijene su prikazane na slici Slika 3.



Slika 3 Korištene cijene električne energije

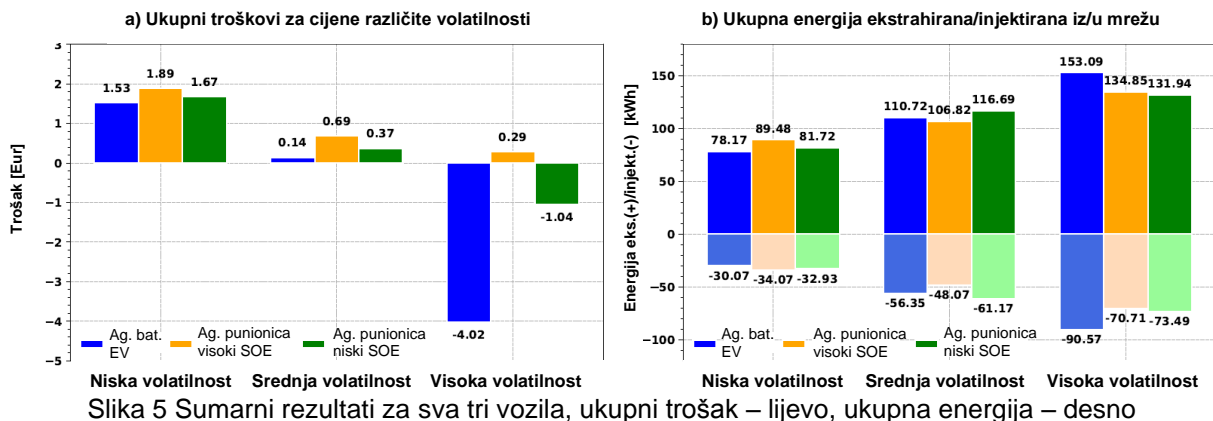
U ovom primjeru korišten je sustav e-mobilnosti s tri EV te tri punjača čije je predviđeno ponašanje prikazano na slici Slika 4. S lijeve strane prikazano je punjenje iz perspektive EV, dok je s desne strane prikazano punjenje iz perspektive punionica. Na lijevoj strani bojama su prikazana punjenja na tri različite punionice, dok su na desnoj strani bojama prikazana punjenja tri različita EV. Obojene površine predstavljaju energiju koju je moguće napuniti u određenom periodu. Linije predstavljaju ograničenja na snagu unutarnjeg i vanjskog punjača. EV1 je postavljen na 20 kWh te 4 kW, EV2 na 40 kWh te 8 kW, a EV3 na 60 kWh te 12 kW. Punionica 1 postavljena je na 4 kW, punionica 2 na 8 kW te punionica 3 na 12 kW. Iz ovog prikaza može se jednostavno vidjeti da iako se razmatraju ista punjenja, različite perspektive nude različite mogućnosti optimalnog punjenja. Jasno se uočava da agregatori punionica nemaju kontinuirani uvid u SOE vozila, već isprekidano te na točkama S1-S3 moraju vršiti predviđanja. S druge strane agregator baterija EV ima kontinuirani uvid u SOE svojih vozila. Također, jasno se uočava da agregator punionica EV ne može prebaciti energiju iz jednog perioda u drugi, dok agregator baterija EV to može.



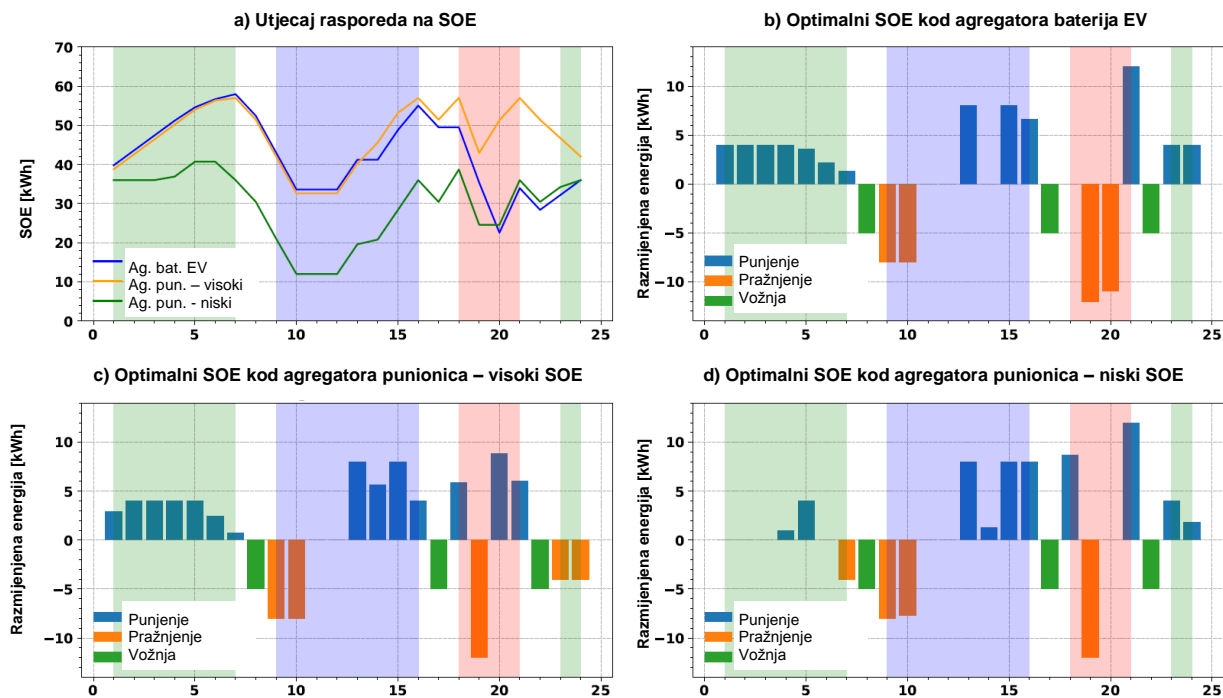
Slika 4 Determinističko ponašanje EV s perspektive agregatora baterija EV (lijevo) te agregatora punionica EV (desno)

4.2. Rezultati

Na slikama Slika 5 i Slika 6 prikazani su rezultati matematičkog modela. Slika 5 sumarno prikazuje ukupne troškove za sva tri vozila za cijene različite volatilnosti. Iz slike (Slika 5 a) se jasno može zaključiti da agregator baterija EV donosi najmanje troškove za krajnje korisnike u svim cjenovnim scenarijima. Porastom volatilnosti cijene, troškovi u sva tri slučaja opadaju, međutim, najveću korist od visoke volatilnosti ima agregator baterija EV. Razlozi superiornosti agregatora baterija EV naspram agregatora punionica EV su dvostrani: i) agregator punionica češće puni vozila pri visokim cijenama te ii) mogućnost arbitraže električne energije je smanjena. Na slici Slika 5 b) dijelu slike vidi se da porast volatilnosti znači i porast energije koja se izmjenjuje s mrežom za sva tri razmatrana slučaja. U scenariju niske volatilnosti cijena agregator baterija EV je najmanje agresivan na tržištu (najmanje energije injektira u mrežu kroz V2G). S druge strane u scenariju visoke volatilnosti, agregator baterija EV prazni najveću količinu energije u mrežu. Razlog takvog ponašanja leži u tome što agregator baterija EV razmatra cijenu električne energije tijekom cijelog dana, dok agregatori punionica ne mogu koristiti cijene kada je vozilo van njihovih punionica.



Slika 6 prikazuje rezultate za EV3 za cjenovni scenarij visoke volatilnosti za sva tri slučaja., a sastoji se od četiri podslike a)-d). Na podslici a) prikazano je stanje napunjenosti EV3 za tri razmatrana slučaja, dok je na podslikama b)-d) prikazana satna energija punjenja/praznjenja za svaki od tri razmatrana slučaja posebno. Na svim slikama periodi kada je vozilo parkirano na jednoj od tri punionice su obojani odgovarajućom bojom. Agregator baterija EV puni EV puni vozilo prije prvog putovanja te ga prazni nakon njega kako bi iskoristio vršnu cijenu u satima 9 i 10. Puni se ponovno prije drugog putovanja kako bi se nakon njega ponovno mogao prazniti u vršnim satima 19 i 20. Nakon toga se ponovno puni prije i poslije zadnjeg putovanja kako bi na kraju dana imao istu energiju kao i na početku dana. Na podslici a) se može uočiti da SOE varijabla kod agregatora baterija prat SOE varijablu kod agregatora punionica s visokim SOE ograničenjem u jutarnjim i dnevnim satima, međutim u večernjim satima sličnija je SOE varijabli kod agregatora punionica s niskim SOE ograničenjem. Uspoređujući agregatora baterija s agregatorom punionica s visokim SOE glavna razlika se događa u večernjim satima kada je EV3 na punionici 3. Kod agregatora punionica EV3 se prije zadnjeg putovanja mora ponovno napuniti na 95% iako su cijene visoke, što nije slučaj kod agregatora baterija koji puni EV samo do 33 kWh u satu 21. Agregator punionica s niskim SOE ograničenjem značajno se drugačije ponaša od agregatora baterija. Nema jutarnjeg punjenja pri niskim cijenama, čak se prije prvog putovanja i prazni. Također se prazni dok je na punionici 3, ali s manje energije nego agregator baterija.



Slika 6 Detaljniji rezultati za vozilo EV 3 s cijenom visoke volatilnosti

5. ZAKLJUČAK

E-mobilnost je multidisciplinarno područje gdje se isprepliću promet, elektroenergetika, socijalni aspekt krajnjih korisnika, ICT, operacijska istraživanja i druge djelatnosti. Porast broja EV mogao bi biti dvosjekli mač za pokušaj dekarbonizacije svjetskog gospodarstva ako se pravovremeno i na pravi način ne uključe elektroenergetska razmatranja jer novi EV bi mogli zahtijevati nova ulaganja u EES. S elektroenergetske strane, napredna e-mobilnost se mora razmatrati odvojeno od ostalih tereta upravo zbog svoje specifičnosti gdje sami tereti (EV) često mijenjaju lokacije. U ovom radu dana je usporedba dva različita aspekta kako se elektroenergetika može razmatrati unutar napredne e-mobilnosti. Jedan je aspekt iz perspektive punionica EV, a drugi iz perspektive sami EV. Smatramo da je za korisnike, drugi aspekt privlačniji radi ekonomskih (manji troškovi) te socijalnih (mobilnost bi bila olakšana, korisnik bi imao ugovor samo s jednim agregatorom) razloga. Za elektroenergetiku takav aspekt uzrokuje potrebu za dubljim promjenama u sustavu mjerenja (mobilna brojila), naplate, ugovornih obaveza te agregacije. Ovim radom zagreben je tek vrh sante leda kada su u pitanju novi koncepti koje donosi e-mobilnost u elektroenergetiku te su potrebne dodatne analize kako bi se izabrao onaj najbolji za sve.

6. ZAHVALA

Ovaj rad je sufinanciran od strane Hrvatske Zaklade za Znanost kroz projekt IP 2019-04-9164 (ANIMATION).

7. LITERATURA

- [1] European Parliament and European Council. Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure; 2014. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=celex%3A32014L0094>
- [2] Bobanac V, Pandzic H, Capuder T. Survey on electric vehicles and battery swapping stations: expectations of existing and future EV owners. In: 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). IEEE; Jun 2018. p. 1–6. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8398793/>
- [3] Capuder T, Miloš Sprčić D, Zoričić D, Pandžić H. Review of challenges and assessment of electric vehicles integration policy goals: Integrated risk analysis approach. *Int J Electr Power Energy Syst* 2020;119:105894. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061519318174>
- [4] Muratori M. Impact of uncoordinated plug-in electric vehicle charging on residential power demand. *Nat Energy* 2018;3(3):193–201.
- [5] Wolinetz M, Aksen J, Peters J, Crawford C. Simulating the value of electric-vehicle–grid integration using a behaviourally realistic model. *Nat Energy* 2018;3(2):132–9.
- [6] Xu Y, Çolak S, Kara EC, Moura SJ, González MC. Planning for electric vehicle needs by coupling charging profiles with urban mobility. *Nat Energy* 2018;3(6):484–93.
- [7] Pavić I, Capuder T, Kuzle I. Value of flexible electric vehicles in providing spinning reserve services. *Appl Energy* 2015;157:60–74.
- [8] Pavić I, Capuder T, Kuzle I. Low carbon technologies as providers of operational flexibility in future power systems. *Appl Energy* 2016;168:724–38.
- [9] Liu C, Chau KT, Wu D, Gao S. Opportunities and challenges of vehicle-to-home, vehicle-to-vehicle, and vehicle-to-grid technologies. *Proc IEEE* 2013;101(11):2409–27.
- [10] Monteiro V, Pinto JG, Afonso JL. Operation modes for the electric vehicle in smart grids and smart homes: present and proposed modes. *IEEE Trans Veh Technol* 2016;65(3):1007–20.
- [11] Pavić I, Capuder T, Kuzle I. A comprehensive approach for maximizing flexibility benefits of electric vehicles - *IEEE Systems Journal*, 2017
- [12] “ubitricity charging solutions - Easy and convenient charging for everyone : ubitricity.” [Online]. Available: <https://www.ubitricity.co.uk/>. [Accessed: 16-Jun-2020].
- [13] Pavić I, Pandžić H., Capuder T. Electric vehicle based smart e-mobility system – Definition and comparison to the existing concept, *Appl. Energy*, vol. 272, p. 115153, Aug. 2020.