

Hrvoje Pandžić  
Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilište u Zagrebu  
[Hrvoje.pandzic@fer.hr](mailto:Hrvoje.pandzic@fer.hr)

## POGON STANICE ZA ZAMJENU BATERIJA ELEKTRIČNIH VOZILA

### SAŽETAK

Naftni derivati pokreću vozila još od izuma modernog motora s unutarnjim izgaranjem 1885. godine. Posljedica je da danas samo osobna vozila emitiraju preko 10% stakleničkih plinova diljem svijeta. Osim brige za okoliš, promjenjivost cijene sirove nafte i napredak u razvoju alternativnih pogonskih goriva potiču razvoj novih ideja kojima vozila postaju „zelenija“, jeftinija i učinkovitija. Nedavni komercijalni uspjeh vozila Nissan Leaf, Tesla i ostalih, stavio je električna vozila u središte pozornosti. Međutim, potrebno je ukloniti postojeće prepreke kako bi korištenje električnih vozila postalo privlačno većem broju kupaca.

Za masovnu upotrebu električnih vozila potrebno je uspostaviti adekvatnu infrastrukturu. Sveprisutan pristup predmetnoj infrastrukturi smanjio bi brigu oko dosega električnih vozila i dugih vremena punjenja baterija. Stanice za izmjenu baterija električnih vozila svakako su učinkovito sredstvo za uklanjanje problema dugotrajnog čekanja na punjenje baterija. Te su stanice posrednici između elektroenergetskog sustava i svojih klijenata. Za uspješnu izgradnju i poslovanje ovih stanica potrebno je prvo izraditi poslovni i radni model. Na taj će se način osigurati da stanica za izmjenu baterija električnih vozila bude održiva nudeći brzu i pouzdanu uslugu kao alternativu dugotrajnom punjenju baterija.

**Ključne riječi:** baterije, električna vozila, stanica za izmjenu baterija, poslovni model

## OPERATING MODEL OF A BATTERY SWAPPING STATION

### SUMMARY

Vehicles have been almost exclusively run by the petroleum fuel oil distillates ever since the introduction of modern internal combustion engine in 1885. As a result, the personal vehicles are responsible for at least 10% of greenhouse gas emissions worldwide. Besides these environmental issues, the volatility of crude oil prices and the advances in alternative fuel technologies have started generating new ideas on more ecological, cheaper, and more efficient personal vehicles. Recent commercial success of Nissan Leaf, Tesla, and others, have put Electric Vehicles (EVs) in the spotlight. However, there are serious obstacles that need to be removed in order to make EVs attractive.

For a successful rollout of EVs, it is required to establish an adequate charging infrastructure. The ubiquitous access to such infrastructure would help to mitigate concerns associated with limited EV range and long charging times. Battery Swapping Stations (BSSs) are poised as effective means of eliminating the EVs long waiting times associated with charging the batteries. These stations are mediators between the power system and their customers. In order to successfully deploy this type of stations, business and operating models are required, that will allow it to generate profits while offering a fast and reliable alternative to charging batteries.

**Key words:** batteries, electric vehicles, battery swapping stations, business model

## 1. MOTIVACIJA I UVOD

Naftni derivati pokreću vozila još od izuma modernog motora s unutarnjim izgaranjem 1885. godine. Posljedica je da danas prijevozni sustav uzrokuje 23% stakleničkih plinova diljem svijeta [1], od čega 44.5% otpada na osobna vozila [2]. Dodatno, 25% emisija vezanih za prijevoz dolazi od kamiona srednje i teške kategorije, od kojih se neki upotrebljavaju za prijevoz fosilnih goriva za potrebe osobnih vozila. Ove brojke ukazuju na činjenicu kako su osobna vozila odgovorna za najmanje 10% ukupnih svjetskih emisija stakleničkih plinova.

Osim brige za okoliš, promjenjivost cijene sirove nafte i napredak u razvoju alternativnih pogonskih goriva potiču razvoj novih ideja kojima vozila postaju „zelenija“, jeftinija i učinkovitija. Jedan od mogućih načina za smanjenje negativnog utjecaja osobnih vozila jest proizvodnja učinkovitijih motora. Međutim, taj pristup može smanjiti problem samo do određene razine, ali ne i u potpunosti ga ukloniti. U drugoj polovici 20. stoljeća počela su se pojavljivati alternativna goriva poput biodizela, etanola, ukapljenog prirodnog ili naftnog plina, stlačenog prirodnog plina i vodika. Gotovo sva navedena goriva i dalje upotrebljavaju motor s unutarnjim izgaranjem, osim vodika koji se može koristiti za proizvodnju električne energije u gorivnim ćelijama, koja se potom koristi za pogon električnog motora.

Veliki komercijalni iskorak prema većoj ekonomičnosti goriva bilo je uvođenje hibridnih električnih vozila (HEV) koja kombiniraju konvencionalni motor s unutarnjih izgaranjem i električni motor. Najuspješniji ovakav model jest Toyota Prius čija je svjetska prodaja dosegla 6 milijuna prodanih vozila krajem 2013. godine [3]. Sljedeći korak bio je uvođenje plug-in hibridnih vozila (engl. Plug-in Hybrid Electric Vehicle - PHEV) čije se baterije mogu napuniti spajanjem na električnu zidnu utičnicu. Ova tehnologija pruža zanimljive prednosti poput kućnog punjenja, rezervno napajanje električnom energijom u hitnim slučajevima te Vehicle-to-Grid (V2G, vozilo daje električnu energiju u mrežu). Komercijalno najuspješniji PHEV modeli su Chevrolet Volt/Opel Ampera, Toyota Prius PHEC te Mitsubishi Outlander PHEV.

Konačni korak prema napuštanju motora s unutarnjim izgaranjem jest uvođenje isključivo baterijski pogonjenih električnih vozila (engl. Battery Electric Vehicles - BEV) koji upotrebljavaju isključivo kemijsku energiju spremeljenu u baterijama s mogućnosti ponovnog punjenja. Najprodavanije električno vozilo u svijetu je Nissan Leaf s ukupnom prodajom od 100,000 vozila do sredine siječnja 2014 [4], dok drugo mjesto drži Tesla Model S [5]. Električna vozila ekološki su osobito atraktivna opcija s obzirom da proizvodnja električne energije teži ka čistim obnovljivim izvorima energije pa bi stoga negativan ekološki utjecaj električnih vozila, u usporedbi s tradicionalnim vozilima, bio znatno manji.

Električna vozila omogućuju upotrebu električne energije za kretanje umjesto fosilnih goriva. Međutim, potencijalni vlasnici električnih vozila zabrinuti su zbog dugotrajnosti procesa punjenja baterija, nemogućnosti instaliranja punjača u mjestu boravišta, ograničenog doseg a vožnje i ograničenog broja javnih punionica. Postojeća rješenja za ublažavanje navedenih problema obično zahtijevaju znatna ulaganja u infrastrukturu. Primjerice, brzi punjači na razini kućanstva mogu smanjiti vrijeme čekanja za punjenje, ali pod cijenu velikog troška za korisnika. Nadalje, ovakve brze punjače možda nije moguće instalirati u kućanstvima ili na mjestima gdje postojeća električna mreža ne može podnijeti dodatnu potrošnju. Još jedna velika briga je ograničeni doseg prosječnog električnog vozila, tzv. "strah od ostanka" (engl. range anxiety). Za ublažavanje ovog problema korisnicima je potrebno omogućiti pristup javnim punionicama koje će pružati usluge slične tradicionalnim benzinskim postajama. Iako je broj punionica baterija u porastu, vrijeme potrebno za punjenje baterija na ovakvim postajama i dalje je predugo. Čak i u slučaju punjenja baterija velikim snagama u svrhu smanjenja vremena punjenja, ostaje problem smanjenja životnog vijeka baterija zbog podvrgavanja postupku brzog punjenja. Povrh svega, glavno pitanje je cijena takve infrastrukture za punjenje. Nacionalni istraživački odbor procijenio je da trošak instalacije infrastrukture koja uključuje kućne, poslovne te javne punionice iznosi 3000\$ po električnom vozilu [6]. Iako su ovi troškovi naizgled ogromni, zapravo su istog reda veličine kao i sredstva koja se troše za održavanje infrastrukture za konvencionalna prijevozna sredstva [7].

Međudjelovanje punionica baterija električnih vozila i elektroenergetske mreže razmatrana je u mnogim studijama. Primjerice, u [8] je predložen model više-kriterijskog planiranja položaja punionica, dok je u [9] predložen model ekvilibrija koji maksimizira društvenu dobit združenog sustava transportne mreže i elektroenergetskog prijenosnog sustava. Autori u [10] predlažu model planiranja javnih punionica električnih automobila koja optimizira lokaciju tih punionica razmatrajući putne obrasce i obrasce ponašanja vozača. U radu se pretpostavlja da će izgradnja punionica na velikim parkiralištima pomoći boljem iskorištenju punionica, ali i povećati uočljivost punionica što će pomoći ublažiti tjeskobu zbog ograničenog dometa električnih vozila. Autori smatraju da će instalacija punionica na frekventna parkirališta pomoći općem prihvaćanju električnih vozila. Međutim, studija je izvedena pod pretpostavkom da se trenutni obrasci ponašanja vozača neće promijeniti nakon tranzicija prema električnim vozilima, što zasigurno nije istina. Naime, vozači bi mogli povremeno koristiti i ne-električna vozila, koristiti alternativne

načine putovanja, promijeniti itinerare ili čak činiti kratka skretanja s planiranog puta do najbliže javne punionice čime bi se smanjio broj nedovršenih putovanja.

Alternativa punionicama baterija za električne automobile je raspoređivanje stanica za izmjenu baterija električnih vozila (engl. Battery Swapping Station - BSS) gdje se ispražnjene baterije mogu zamijeniti s istovjetnim napunjenim baterijama. U literaturi se ponekad umjesto izraz stanica za izmjenu baterija električnih vozila navodi termin stanica za promjenu baterija električnih vozila (engl. Battery Switching Station) [11]. Oba izraza imaju identično značenje. Stanice za izmjenu baterija električnih vozila mogu smanjiti zabrinutost korisnika zbog dugog vremena punjenja ili nedovoljnog kapaciteta baterija za dovršetak započetog putovanja. Najčešće se pretpostavlja da su baterije u vlasništvu stanica i kao takve ih korisnik zakupljuje/iznajmljuje. Na ovaj način korisnik ne skrbi o troškovima održavanja i vijeka trajanja baterija, već je to problem stanice za izmjenu baterija električnih vozila. Nadalje, korisnika ne mora zabrinjavati životni vijek baterije niti način na koji se baterija puni (brzo punjenje nasuprot sporom punjenju, što utječe na životni vijek baterije). Navedeni troškovi moraju biti uzeti u obzir kada stanica naplaćuju korisnicima fiksnu naknadu za korištenje usluge zamjene baterija.

Stanice za izmjenu baterija električnih vozila novi su sudionik na tržištu električne energije. S obzirom da agregiraju i upravlja s većim brojem baterija za električne automobile, mogu učinkovitije pružiti elektroenergetskom sustavu iste one usluge kao i sami električni automobili. Te usluge uključuju pomoć pri regulaciji napona [12], regulaciju frekvencije, rezervu [13] te mogućnosti upravljanja potrošnjom [14]. Cilj stanice za izmjenu baterija električnih vozila je maksimizacija dobiti sudjelujući na tržištu električne energije i pružajući spomenute usluge upravljanja potrošnjom, spremnika energije i pružanja rezerve. Mogućnosti spremanja energije u stanici planiraju se prema vremenski promjenjivim cijenama električne energije, primjerice određivanje cijena u realnom vremenu (real-time pricing - RTP) [15]. Stanica za izmjenu baterija električnih vozila maksimizira svoju dobit iskorištavajući periode niskih cijena za kupnju električne energije za punjenje baterija u Grid-to-Battery modu rada (G2B) te prodavajući električnu energiju tijekom perioda visokih cijena pražnjenjem baterija u Battery-to-Grid modu rada (B2G). Dodatno, stanica može pružati Battery-to-Battery (B2B) usluge s ciljem punjenja određenih baterija energijom spremljenom u ostalim baterijama. Nekoliko radova u literaturi bavi se identičnim uslugama koje pružaju sami električni automobili: Grid-to-Vehicle (G2V), Vehicle-to-Grid (V2G) i Vehicle-to-Vehicle (V2V) [16]. Stoga, G2B, B2G i B2B modovi rada stanice za izmjenu baterija električnih vozila predstavljeni u [17] i [18] su ekvivalentni modovima G2V, V2G i V2V električnih vozila.

Sve je više znanstvenih radova i tehničkih izvještaja koji se bave problematikom smještaja, dimenzioniranja i pogona stanica za izmjenu baterija električnih vozila. Optimalno pozicioniranje i dimenzioniranje koristeći algoritam kolonije pčela (engl. artificial bee colony algorithm) prezentirano je u [11]. Predmetni rad prikazuje rezultate kooptimizacije upravljanja izlazne snage distribuiranih proizvođača električne energije i dimenzioniranja stanica za izmjenu baterija električnih vozila. Autori navode da podešenja veličine stanica omogućavaju rad distribuiranih proizvođača na točki optimalne izlazne snage što rezultira manjim gubicima u mreži i povećanjem sigurnosti sustava.

Model zakupa baterija temeljen na modelu s ograničenjima temeljenim na slučajnosti (engl. chance constrained programming) predložen je u [19]. Cilj je optimalno isplanirati veličinu i položaj stanica za izmjenu baterija električnih vozila. Postavljeni problem je simuliran korištenjem modificirane Monte Carlo metode.

U radu [20] autori predlažu metodu za određivanja položaja i veličine stanica za izmjenu baterija električnih vozila u distribucijskoj mreži. Položaj i veličina predmetnih stanica dva su određujuća faktora u povećanju broja električnih automobila. Problem je modeliran maksimizacijom neto sadašnje vrijednosti (engl. net present value - NPV) svakog projekta pri čemu su razmatrani različiti modeli stanica za izmjenu baterija električnih vozila, nadogradnje mreže i pouzdanost sustava. Kako bi se ocjena omjera troška i koristi (engl. cost/benefit analysis) projekata obavila u nekoliko faza korišten je kriterij troškova tijekom cjelokupnog životnog vijeka.

Model ekonomski povoljnog angažmana agregata koji koristi stanice za izmjenu baterija električnih vozila kako bi smanjio utjecaj promjenjivosti snage vjetroagregata razvijen je u [21]. U [22] se korištenjem dinamičkog programiranja određuje broj baterija čija se kupnja planira skupa s rasporedima punjenja.

U svim gore navedenim radovima međudjelovanje s tržištem električne energije je zanemareno. Poslovni modeli stanica za izmjenu baterija električnih vozila također su bili predmet istraživanja. Ideja pretplatničkog strukturiranja cijena, s uključenim odgovarajućim troškovima infrastrukture, je predstavljena u [23]. Pridruženi rizici, klasifikacije ulaganja i potencijalne usluge koje bi mogle biti ponuđene od strane stanica su prikazani u [24]. Detaljna analiza svih potrebnih troškova za pokretanje stanice provedena je u [25]. Ipak, ovi modeli ne razmatraju međudjelovanje stanica i elektroenergetskog sustava.

Poslovni modeli i modeli pogona stanica za izmjenu baterija električnih vozila nisu bili razmatrani samo u teoriji. Naime, komercijalni poslovni subjekti razvili su se oko koncepta stanica kako bi ih koristila postojeća populacija električnih automobila. Primjerice, kompanija Better Place je tijekom 2012. godine instalirala nekoliko stanica koje podržavaju određeni tip električnih vozila [26]. 2013. godine Tesla Motors predstavio je tehnologiju zamjene baterija za svoju flotu električnih vozila [27]. Dodatno, nekoliko je kineskih operatora distribucijskog sustava tijekom 2013. godine instaliralo stanice za svoju populaciju električnih automobila [28]. Financijska dobit u svim navedenim poslovnim modelima u potpunosti ovisi o iznosu naknade za zamjenu baterija uz ignoriranje potencijalnog dodatnog prihoda koji može biti ostvaren sudjelovanjem na tržištu pomoćnih usluga i tržištu električne energije.

## **2. POSLOVNI MODEL**

Unatoč velikoj količini literature koja se bavi samim pogonom stanica za izmjenu baterija električnih vozila, rijetke su publikacije koje istražuju poslovni model predmetnih stanica. Nadalje, samo se jedna kompanija, Better Place, ozbiljno bavila ovim poslom i propala je. Trenutno se čini da se tvrtka Tesla Motors najozbiljnije bavi ovom problematikom.

Prva zadaća je pozicionirati stanicu za izmjenu baterija električnih vozila u današnje socijalno, ekonomsko, tehnološko i tržišno okruženje. Sa socijalnog stajališta, potrebno je provesti ankete među postojećim i potencijalnim korisnicima električnih vozila kako bi se utvrdili problemi s kojima se suočavaju i razloge zbog kojih potencijalni kupci još nisu kupili električno vozilo. Također je potrebno istražiti kolika količina ljudi nije u mogućnosti instalirati uređaje za punjenje baterija električnih vozila u vlastitim kućanstvima zbog niza razloga: nedostatak kapaciteta elektroenergetskog sustava, unajmljuju stan/kuću u kojem žive, žive u zgradama s nedostatnim parkingom i sl.

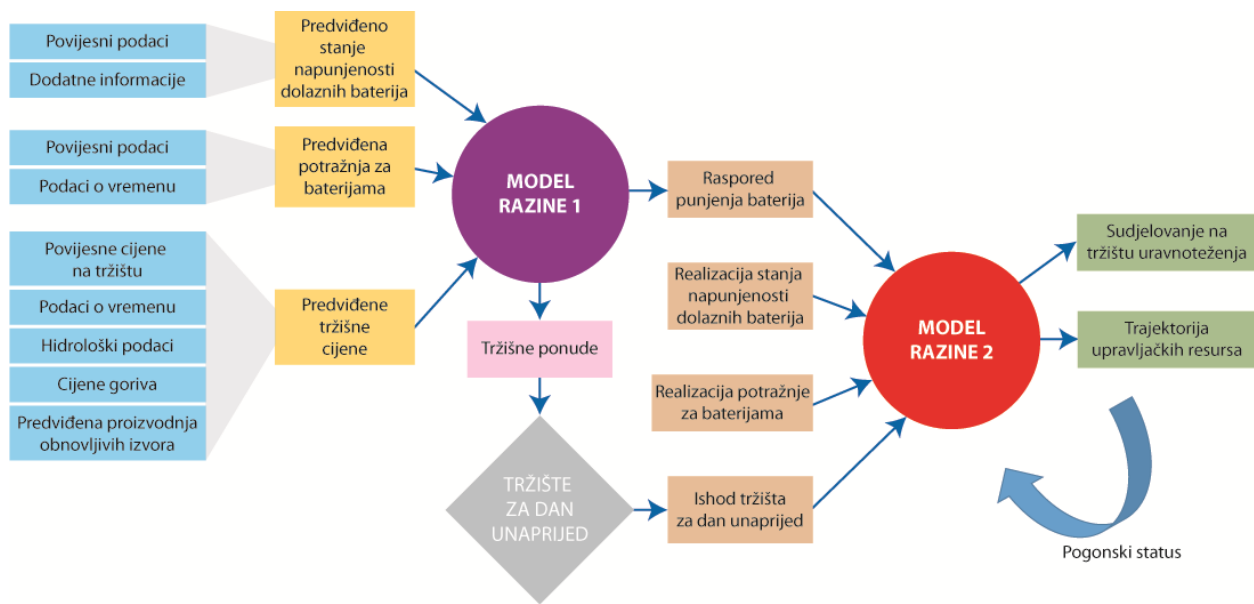
Tehnička analiza poslovnog modela stanice bave se prihvatom stanica u postojeće distribucijske i prijenosne elektroenergetske sustave. Potrebno je utvrditi potrebne promjene u sustavu za prihvata velikih količina ovakvih stanica. Navedene promjene uključuju nova pravila priključenja, promjene u sustavima zaštite i sl.

Centralni dio stanice za izmjenu baterija električnih vozila su same baterije. Stoga je potrebno analizirati trenutno i buduće stanje razvoja tehnologije. Postoji cijena električnih baterija (Eur/kWh i/ili Eur/kW) pri kojoj je pogon stanice ekonomski opravdan. Predmetna će se cijena odrediti za svaku vrstu baterijske tehnologije. Nadalje, svaka baterijska tehnologija ima drugačiju krivulju starenja u ovisnosti o broju, snazi i dubini ciklusa punjenja i pražnjenja. Poslovni model stoga mora uključivati i modele starenja baterija [29].

Budući da su stanice za izmjenu baterija električnih vozila praktički spremnici energije, a svakako mogu i mijenjati ili djelomično odgoditi svoju potrošnju, njihov utjecaj na tržištu električne energije mogao bi biti značajan. Europski energetska okvir trenutno se mijenja kako bi prihvaćao i skladišna postrojenja [30]. Slično je potrebno i za stanice za izmjenu baterija električnih vozila koje se moraju klasificirati kao agregatori, promjenjivi tereti, skladišta, ili potpuno novi entiteti. Očito je da promjenjivost cijene električne energije na tržištu, koja je posljedica povećanja proizvodnje iz obnovljivih izvora električne energije, koristi stanicama koje mogu stvarati dobit provodeći arbitražu. Međutim, potrebno je analizirati pod kojim uvjetima i u kakvim tržišnim okruženjima je takav pogon stvarno profitabilan. Stoga je potrebno utvrditi na kojim tržištima stanica za izmjenu baterija električnih vozila sudjeluje (tržište za dan unaprijed, tržište pomoćnih usluga, tržište uravnoteženja) i koja se ograničenja na tim tržištima pojavljuju za stanicu.

## **3. POGON STANICE ZA ZAMJENU BATERIJA ELEKTRIČNIH VOZILA**

Radni model stanice za izmjenu baterija električnih vozila mora uzimati u obzir veleprodajne cijene na tržištu električne energije, ponašanje klijenata (distribucija dolaska na izmjenu), stanje napunjenosti baterija koje klijenti mijenjaju za potpuno napunjene te starenje baterija (smanjenje njihovog kapaciteta) s obzirom na cikluse punjenja i pražnjenja. Očekuje se da će predmetne stanice većinu svojih energetska potreba zadovoljavati na tržištu za dan unaprijed. Stoga je nužno na adekvatan način modelirati nesigurnost ulaznih parametara na temelju kojih stanica sudjeluje na tržištu za dan unaprijed. S obzirom na prirodu trgovanja na tržištu električne energije, veliki broj upravljačkih uređaja i ograničenja, kao i nužnosti dugoročnog planiranja pogona stanice, potrebna je dvorazinska dekompozicija prikazana na slici 1.



Slika 1 Radni model stanice za izmjenu baterija električnih vozila

Cilj modela razine 1 je definiranje robusne strategije sudjelovanja na tržištu za dan unaprijed uzimajući u obzir sve neizvjesne parametre: napunjenost dolaznih baterija od strane klijenata, potražnju za baterijama te cijene na tržištu. Napunjenost dolaznih baterija će ovisiti o gustoći mreže stanica za izmjenu baterija električnih vozila, poticajima samih stanica (moguće je poticanje vozača da vraćaju baterije unutar određenog raspona napunjenosti koja bi bila u skladu s poslovnim modelom), ali i nepredvidivim događajima. Distribucija i količina potražnje za izmjenom baterija tijekom dana ne bi smjela biti teška z predvidjeti s obzirom na povijesne podatke i podatke o vremenu. Primjerice, ukoliko je vrijeme lijepo, izvjesnije je da će ljudi ići na izlete i koristiti vozila, dok je u slučaju lošeg vremena izvjesnije da će ljudi ostati doma i da će potražnja za izmjenama biti manja. Cijene na tržištu predviđaju se na temelju povijesnih podataka, podataka o vremenu, hidroloških podataka (na temelju kojih se predviđa proizvodnja hidroelektrana), podataka o cijeni pogonskog goriva elektrana te očekivanoj proizvodnji obnovljivih izvora električne energije.

Model razine 1 donosi odluke za dan unaprijed i stoga se mora osigurati od neizvjesnosti ulaznih parametara. Ovaj model odlučuje o optimalnoj trajektoriji napunjenosti baterija za dan unaprijed (stanje napunjenosti svake baterije u svakom satu sljedećeg dana). Potrebno je ustanoviti koja je najprikladnija tehnika za uključivanje neizvjesnosti u ovaj model: stohastička optimizacija [31], intervalna optimizacija [32], intervalna optimizacija s više područja [33], inventarna robusna optimizacija [34], ili hibridni pristup, poput [35].

Modeli razina 1 i 2 uzimat će u obzir starenje baterija. Naime, način punjenja i pražnjenja znatno utječe na starenje, odnosno smanjenje kapaciteta, baterija. Dublji ciklusi uzrokuju veći gubitak kapaciteta. Eksperimentalna istraživanja provode se podvrgavanju baterija ciklusima jednake dubine pražnjenja [36], [37]. Proces se ponavlja dok korisni kapacitet baterije na padne ispod predodređene granice koja se smatra krajem životnog vijeka baterije [38]. Očekuje se da starenje baterija utječe na rezultate modela razina 1 i 2.

Rezultat proračuna modela razine 1 je raspored punjenja baterija i ponude koje će stanica podnositi na tržištu električne energije za dan unaprijed. Raspored punjenja baterija prosljeđuje se modelu razine 2, dok se ponude podnose izravno na tržište. Nakon obračuna ponuda na tržištu, ishod tržišnog nadmetanja (količine kupljene i prodane električne energije) također se predaju modelu razine 2.

Model razine 2 pokreće se periodički, svakih 5-15 minuta, kako bi se odredilo stvarno stanje baterija i prilagođuje upravljačke varijable kako bi se poštivale trajektorije modela razine 1. Moguće je da model razine 2 može upravljati bolje od predviđenih trajektorija, primjerice, ukoliko je napunjenost dolaznih baterija veća od predviđenih vrijednosti. Model razine 2 nastupa na tržištu uravnoteženja gdje može kupovati i prodavati električnu energiju.

Osnovna je ideja da se model razine 1 pokreće jednom za dan unaprijed, a model razine 2 svakih 5-15 minuta, ovisnosti o vremenu potrebnom za izvršenje izračuna. Model razine 1 određuje globalnu trajektoriju baterija u stanici, dok model razine 2 postavlja upravljačke varijable na način da prate zadanu trajektoriju. Model razine 2 bi trebao biti brži od modela razine 1 jer ga se pokreće češće i radi skoro u

stvarnom vremenu. Također, modeli punjenja i starenja baterija bi trebali biti precizniji u modelu razine 2, s obzirom da ne uzimaju u obzir neizvjesnost kao i modelu razine 1. Model razine 2 bi trebao biti gotovo u potpunosti automatiziran.

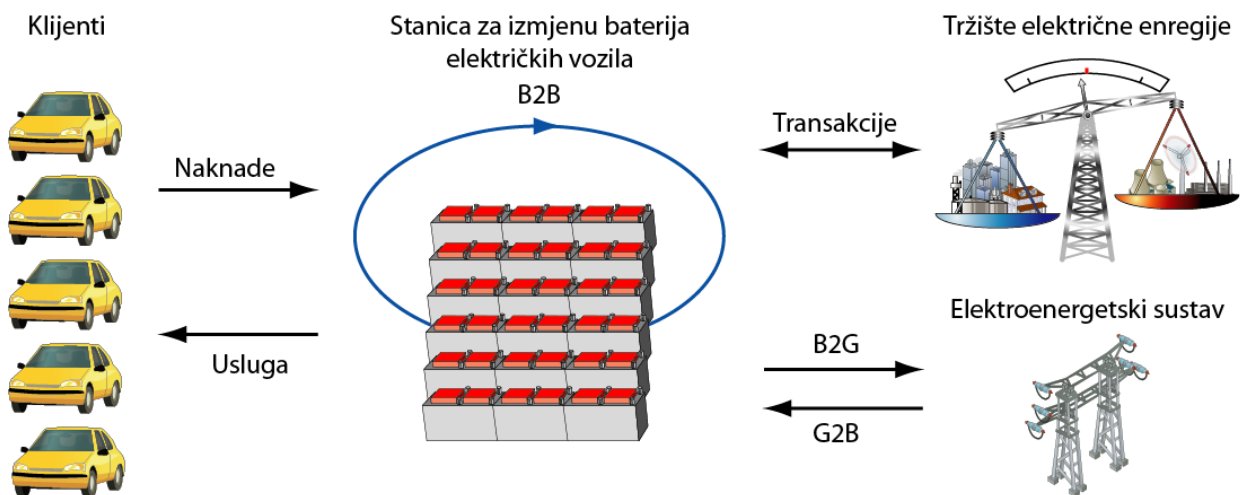
### 3. KOMUNIKACIJA I UPRAVLJAČKA INFRASTRUKTURA

Stanica za izmjenu baterija električnih vozila zahtijeva dvosmjernu komunikaciju s tržištem električne energije. Predmetna će se komunikacija obavljati posredstvom centralnog računala koje će i pozivati optimizacijske modele i koje će imati na raspolaganju najnovije podatke o napunjenosti svih baterija te o operacijama punjenja i pražnjenja.

Druga vrsta dvostrane komunikacije odvijat će se unutar same stanice za izmjenu baterija električnih vozila: od centralnog računala prema baterijama i zamjenama baterija koje se trenutno odvijaju. Cilj je utvrditi komunikacijske zahtjeve, cijenu i potrebnu infrastrukturu. Osobita pažnja posvetit će se latencijama i prioritetima izvršenja radnji.

Komunikacija s tržištem električne energije je uspostavljena i dobro poznata procedura, no upravljanje i istovremena komunikacija s velikim brojem baterija nije jednostavan problem. Potrebno je detaljno analizirati učestalost i način komunikacije između svakog stoga baterija i centralnog računala kako bi se predložila odgovarajuća rješenja.

Komunikacijski zahtjevi stanice za izmjenu baterija električnih vozila prikazani su na slici 3.



Slika 2 Komunikacijski zahtjevi stanice za izmjenu baterija električnih vozila

### 4. INTEGRACIJA STANICA ZA ZAMJENU BATERIJA U ELEKTROENERGETSKI SUSTAV

U ovisnosti o instaliranoj snazi, stanica za izmjenu baterija električnih vozila priključuje se na distribucijsku ili prienosnu elektroenergetsku mrežu. Trenutna praksa u Hrvatskoj predlaže povezivanje tereta iznad 10 MW na prienosnu mrežu [39]. S obzirom da postojeći superpunjač tvrtke Tesla ima snagu 120 kW, za pretpostaviti je da će postojati situacije u kojima će stanice biti priključene na prienosnu mrežu. Ipak, očekuje se da će ih većina biti priključena na distribucijsku mrežu.

Na distribucijskoj razini se očekuje priključenje većeg broja stanica relativno malog kapaciteta. U budućnosti će biti potrebno analizirati utjecaj jedne stanice različitog kapaciteta, a potom i skupine stanica priključenih na isti izvod distribucijske stanice. Bit će potrebno istražiti specifični slučajevi urbanih, suburbanih i ruralnih mreža. Nadogradnja urbanih distribucijskih mreža nisu uvijek moguće zbog nedostatka prostora, kompleksnosti projekta i visokih troškova. Iz navedenog razloga vjerojatno će se morati pribjeći puštanju u pogon veće količine stanica manjeg kapaciteta. S druge strane, u ruralnim područjima nisko opterećenje često ne može opravdati znatna ulaganja u mrežu. Lociranje stanice u takvom okruženju će uvelike promijeniti opterećenje i strukturu ruralne mreže.

### 5. OPTIMIZACIJSKI MODEL STANICE ZA ZAMJENU BATERIJA

U ovom je radu prikazan model pogona stanice za zamjenu baterija koji uzima u obzir tržište za dan unaprijed. Stanica predviđa broj zamjena i njihovu dinamiku za sljedeći dan i cijene na tržištu. Stanica raspolaže i servisira potrošače koristeći dvije grupe baterija predviđene za ugradnju u različite tipove vozila. Potrošači dobivaju 100% napunjenu bateriju, no u slučaju da stanica nije u mogućnosti isporučiti u potpunosti napunjenu bateriju, dobivaju popust.

Na dan unaprijed stanica određuje optimalan raspored punjenja i pražnjenja baterija, određuje koje će baterije biti zamijenjene kako bi se zadovoljila potražnja u svakom satu  $N(g,t)$ , te određuje koliko će električne energije kupiti, odnosno prodati na tržištu za dan unaprijed. Model je formuliran kako slijedi:

Maksimizirati

$$BSR \sum_{(t \in T)} \sum_{(g \in G)} N_{g,t} - VOLC \sum_{(t \in T)} \sum_{(g \in G)} bat_{g,t}^{short} - \sum_{(t \in T)} \lambda_t^{DA} (em_t^{buy} - em_t^{sell}) - BSR \sum_{(t \in T)} \sum_{(i \in I)} \beta_{i,t} \quad (1)$$

Uz ograničenja:

$$soc_{i,t} = (soc_{i,t-1} + bat_{i,t}^{chg} \eta^{chg} - bat_{i,t}^{dsg} \eta^{dsg}) (1 - x_{i,t}) + SoC_{i,t}^{init} \cdot x_{i,t} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (2)$$

$$soc_{i,t-1} + soc_{i,t}^{short} \geq BC_g \cdot S_{i,g} \cdot x_{i,t} \quad \forall i \in I, \forall g \in G, \forall t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{(i \in I)} soc_{i,t-1} \cdot x_{i,t} + \sum_{(g \in G)} BC_g \cdot bat_{g,t}^{short} = \sum_{(g \in G)} BC_g \cdot N_{g,t} \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$em_t^{buy} - em_t^{sell} = \sum_{(i \in I)} (bat_{i,t}^{chg} - bat_{i,t}^{dsg}) \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$0 \leq bat_{i,t}^{chg} \leq (1 - x_{i,t}) P_i^{max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (6)$$

$$0 \leq bat_{i,t}^{dsg} \leq (1 - x_{i,t}) P_i^{max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (7)$$

$$0 \leq soc_{i,t} \leq \sum_{(g \in G)} S_{i,g} \cdot BC_g \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (8)$$

$$bat_{i,t}^{dsg} \leq P_i^{max} \cdot a_{i,t} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (9)$$

$$bat_{i,t}^{chg} \leq P_i^{max} \cdot (1 - a_{i,t}) \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (10)$$

$$em_t^{sell} \leq M \cdot b_t \quad \forall t \in T \quad (11)$$

$$em_t^{buy} \leq M \cdot (1 - b_t) \quad \forall t \in T \quad (12)$$

Cilj je maksimizirati profit stanice za zamjenu baterija električnih vozila. Prvi član u (1) je prihod od usluge zamjene baterija, čija je cijena  $BSR$  (\$/bateriji). Drugi član uzima u obzir nemogućnost zamjene baterije uslijed nedostatka napunjenih baterija  $bat_{g,t}^{short}$  i kažnjava se s  $VOLC$  (\$). Treći izraz je cijena kupnje  $em_t^{buy}$  (kWh) količine električne energije ili prodaje  $em_t^{sell}$  (kWh) električne energije na tržištu za dan unaprijed po predviđenoj cijeni  $\lambda_t^{DA}$  (\$/kWh). Posljednji član u (1) vezan je za popuste koji su detaljno pojašnjeni u sljedećem poglavlju.

Funkcija cilja je ograničena ograničenjima (2)-(12). Binarna varijabla  $x_{i,t}$  ima vrijednost 1 ako je baterija  $i$  zamijenjena tijekom vremenskog razdoblja  $t$ , a inače je 0. Ograničenja (2) ažuriraju stanje napunjenosti  $soc_{i,t}$  (kWh) svake baterije tijekom svakog vremenskog razdoblja uzimajući u obzir snage punjenja  $bat_{i,t}^{chg}$  (kW) i pražnjenja  $bat_{i,t}^{dsg}$  (kW), kao i njihove učinkovitosti  $\eta^{chg}$  and  $\eta^{dsg}$ . Ako je  $x_{i,t}$  jednak 1, (2) ne ažurira stanje napunjenosti, već postavlja stanje napunjenosti zamijenjene baterije na vrijednost napunjenosti  $SoC_{i,t}^{init}$  (kWh) dolazne zamijenjene baterije. Ugrađena baterija bi trebala biti napunjena do svog kapaciteta  $BC_g$  (kWh). U protivnom, manjak napunjenosti  $soc_{i,t}^{short}$  (kWh) je zabilježen u ograničenjima (3). Prema (4), potrebno je namiriti cjelokupnu potražnju za baterijama, a nedostatak baterija je zabilježen pomoću varijable  $bat_{g,t}^{short}$ . Da bi zadovoljio potražnju za napunjenim baterijama, stanica za zamjenu baterija električnih vozila daje ponude za kupnju i prodaju električne energije na tržištu, što je nametnuto graničenjima (5). Snage punjenja i pražnjenja baterija ograničene su na  $P_i^{max}$  (kW) pomoću (6) i (7), dok je stanje napunjenosti ograničeno kapacitetom baterije  $BC_g$  ograničenjem (8). Konačno, ograničenja (9) i (10) onemogućuju istovremeno punjenje i pražnjenje baterija, dok ograničenja

(11) i (12) onemogućuju istovremenu kupnju i prodaju električne energije na tržištu. U ograničenjima (2) binarna varijabla  $x_{i,t}$  množi realnu, što uzrokuje nelinearnost. Nelinearni izraz se linearizira metodom prikazanom u [42].

## 6. POPUSTI

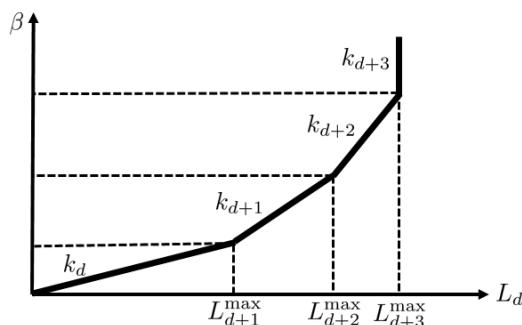
Posljednji izraz u funkciji cilja (1) označava popuste klijentima. Ukoliko nema u potpunosti napunjenu baterije u traženom trenutku, stanica za zamjenu baterija može isporučiti bateriju manje napunjenosti, primjerice 80%, pop sniženoj cijeni ili uskratiti uslugu, izazivajući nezadovoljstvo klijenta, što se penalizira s *VOLC*. Popust se progresivno povećava kako se povećava nenapunjenost baterije, što je prikazano na slici 3. Funkcija koja je linearna po dijelovima modelirana je korištenjem ograničenja (13)-(16), gdje je  $D$  skup blokova popusta označenih s  $d$ . U izrazu (13) je nedostatak napunjenosti baterije ograničen njenim kapacitetom. Izraz (14) postavlja zbroj svih blokova nenapunjenosti,  $L_d$ , na normaliziranu nenapunjenost specifične baterije. Pomoću (15) određuje se postotak popusta  $\beta_{t,i}$  za svaku bateriju koja je bila zamijenjena, a nije bila 100% puna. Ovaj se postotak računa množenjem nedostajućeg kapaciteta baterije s koeficijentima  $k_d$  po odgovarajućim dijelovima krivulje popusta u (15). Konačno, u (16) se ograničava energija koja nedostaje u svakom bloku na  $L_d^{\max}$ . Parametri koji određuju popust su  $k_d$  i  $L_d^{\max}$  i oni ovise o poslovnoj politici stanice za zamjenu baterija električnih vozila.

$$0 \leq soc_{i,t}^{\text{short}} \leq \sum_{(g \in G)} S_{i,g} \cdot BC_g \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (13)$$

$$\frac{soc_{i,t}^{\text{short}}}{\sum_{(g \in G)} S_{i,g} \cdot BC_g} = \sum_{(d \in D)} L_d \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (14)$$

$$\beta_{i,t} = \sum_{(d \in D)} k_d \cdot L_d \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (15)$$

$$L_d \leq L_d^{\max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (16)$$

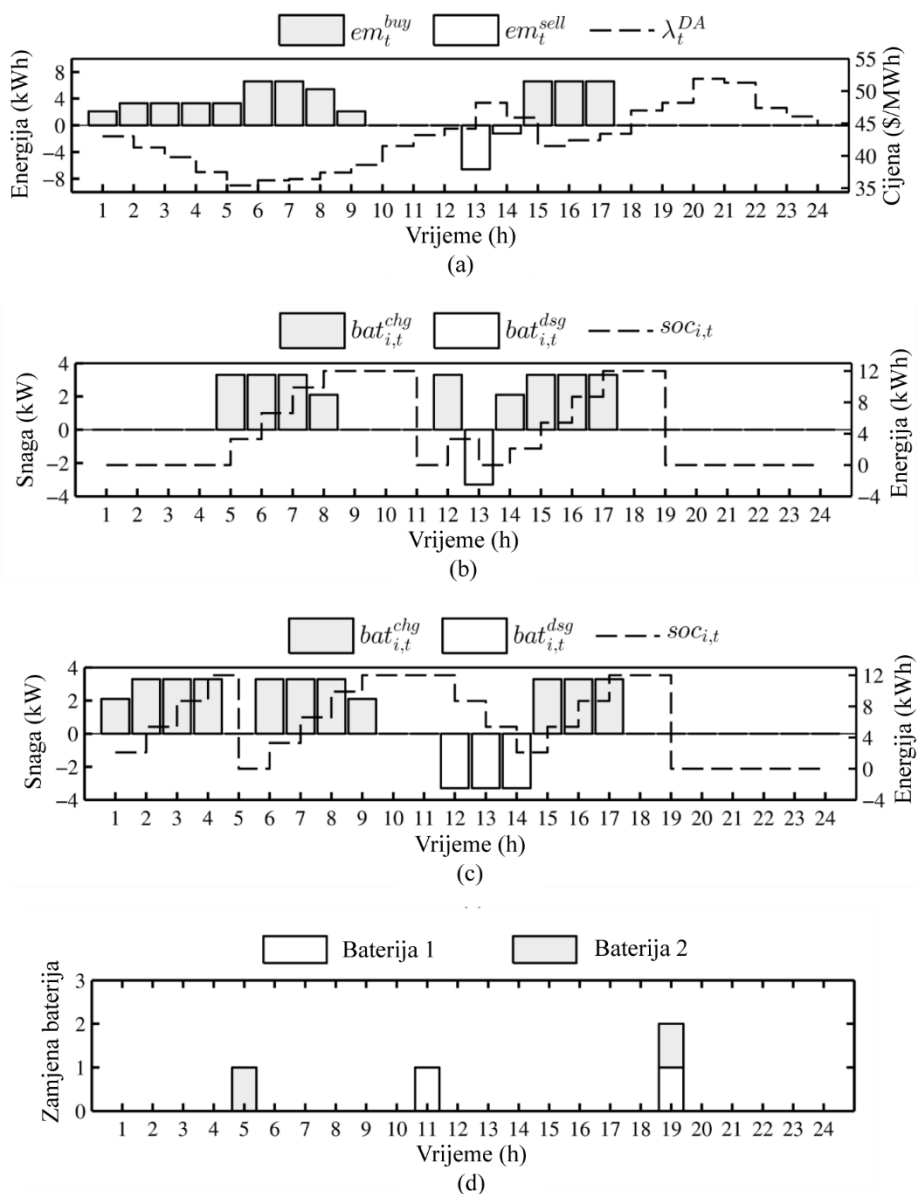


Slika 3 Popust na zamijenjenu bateriju kao funkcija nenapunjenosti baterije

## 7. SIMULACIJA

U ovom je poglavlju prikazana simulacija predstavljenog modela u svrhu njegovog razumijevanja i verifikacije. Iz tržišne perspektive, stanice za zamjenu baterija ne utječe na tržišnu cijenu. Cijena zamjene baterije, *BSR*, iznosi i\$70, dok je cijena izgubljenog klijenta *VOLC* postavljena na \$200. Krivulja popusta ima sljedeće parametre: 1)  $k_1=1.1$ ;  $L_1^{\max}=10\%$ , 2)  $k_2=3.0$ ;  $L_2^{\max}=30\%$ , 3)  $k_3=5.0$ ;  $L_3^{\max}=50\%$ , 4)  $k_4=10$ ;  $L_4^{\max}=100\%$ . Snaga punjenja i pražnjenja iznosi 3.3 kW. Model je implementiran u GAMS 24.0 okruženju i riješen pomoću CPLEX 12.1. Kapacitet baterija iznosi 12 kWh, a početna napunjenost 0 kWh. Razmatra se samo jedna grupa baterija, a stanica za zamjenu baterija upravlja količinom od svega dvije baterije. Radi jednostavnosti, pretpostavljeno učinkovitost baterija iznosi 100%. U petom i jedanaestom satu javlja se potreba za zamjenom jedne baterije, a u devetnaestom satu za zamjenom dvije baterije. Na slici 4a prikazane su radnje za kupnju i prodaju na tržištu za dan unaprijed. Slike 4b i 4c prate napunjenost obiju baterija. Pritom pozitivna snaga označava punjenje, a negativna pražnjenje. Konačno, na slici 4d je prikazana zamjena pojedinih baterija.





Slika 4 (a) Odluke za kupnju i prodaju na tržištu za dan unaprijed; (b) stanje napunjenosti i profil punjenja/praznjenja prve baterije; (c) stanje napunjenosti i profil punjenja/praznjenja druge baterije; (d) status zamjene baterija na temelju potražnje za zamjenom

Općenito, stanica za zamjenu električnih vozila će nastojati kupovati električnu energiju tijekom niskih cijena i puniti baterije u G2B modu, odnosno prodavati električnu energiju i prazniti baterije u B2G modu. Nakon zamjene baterija, pridošla baterija se počinje puniti, što je vidljivo na slikama 4b i 4c. Budući da zamjena druge baterije nije predviđena sve do 19. sata, ona se u razdoblju 12-14. sata prazni (G2B mod). Tijekom 12. i 14. sata druga baterija puni prvu u B2B modu, tok se tijekom 13. sata obje baterije prazne u B2G modu i stanica prodaje električnu energiju na tržištu jer je u tom satu najviša očekivana cijena podnevnog maksimuma. Ovo se događa jer se ne očekuje zamjena obiju baterija sve do 19. sata, do kada se obje baterije stignu napuniti jeftinijom popodnevnom električnom energijom. Ukupno stanica za zamjenu baterija kupi 55.8 kWh u G2B modu, proda 7.8 kWh u B2G modu te se 5.4 kWh preseli iz jedne baterije u drugu u B2B modu. Opisani slučaj ne uključuje popuste jer je zadovoljena potražnja za baterijama. Od klijenata je prikupljeno \$280, a cijena kupljene električne energije iznosi \$2.20, dok je prihod od prodane električne energije \$0.374.

## 8. ZAKLJUČAK

Stanica za zamjenu baterija električnih vozila može ukloniti napetost korištenja električnih vozila. Ona, osim što koristi vozačima financijski i psihološki, koristi i elektroenergetskom sustavu sudjelovanjem na tržištu električne energije. Kako bi bila profitabilna, stanica za zamjenu baterija mora optimalno odrediti politiku popusta zbog nenaunjenih baterija.

Rezultati simulacije pokazuju da sudjelovanje na tržištu električne energije omogućuje stanici za zamjenu baterija električnih vozila zaradu punjenjem tijekom razdoblja niskih cijena, djelomičnim pražnjenjem tijekom razdoblja visokih cijena, te uštede transferom energije među baterijama. Simulacija također ukazuje da je \$70 po zamjeni baterije nerealno visoka cijena i da stanica za zamjenu baterija električnih vozila može biti profitabilna i po puno nižim cijenama svojih usluga.

## 9. ZAHVALA

Ovaj je rad sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom IP-2014-09-3517 Stanica za zamjenu baterija električnih vozila.

## 10. LITERATURA

- [1] International Energy Agency, "World Energy Outlook 2006." [Online] Dostupno na: <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weoweb/2008-1994/WEO2006.pdf>
- [2] World Business Council for Sustainable Development, "Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability," The Sustainable Mobility Project, Full Report 2004. [Online] Dostupno na: <http://www.wbcsd.org/web/publications/mobility/mobility-full.pdf>
- [3] Toyota News Release, "Worldwide Sales of Toyota Hybrids Top 6 Million Units." [Online] Dostupno na: <http://corporatenews.pressroom.toyota.com/releases/worldwide+toyota+hybrid+sales+top+6+million.htm>
- [4] Nissan News Release, "Nissan LEAF global sales reach 100,000 units." [Online] Dostupno na: <http://www.automotiveworld.com/news-releases/nissan-leaf-global-sales-reach-100000-units/>
- [5] EVObsession, "World Electrified Vehicle Sales (2013 Report)." [Online] Dostupno na: <http://evobsession.com/world-electrified-vehicle-sales-2013/>
- [6] National Research Council (NRC), 2013. Transitions to Alternative Vehicles and Fuels. The National Academies Press, Washington, DC.
- [7] J. Ogden "The transition to hydrogen," Access Magazine, vol. 27, 2005, str. 10–16.
- [8] H. Wang, Q. Huang, C. Zhang i A. Xia, "A Novel Approach for the Layout of Electric Vehicle Charging Stations," Proceedings of Apperceiving Computing and Intelligence Analysis Conference, str. 64-70, 2010.
- [9] F. He, D. Wu, Y. Yin i Y. Guan, "Optimal deployment of public charging stations for plug-in hybrid electric vehicles," Transportation Research Part B, vol. 47, dio C, str. 87–101, 2013.
- [10] J. Dong, C. Liu i Z. Lin, "Charging infrastructure planning for promoting battery electric vehicles: An activity-based approach using multiday travel data," Transportation Research Part C: Methodological, vol. 38, dio C, str. 44–55, 2014.
- [11] J.J. Jamian, M.W. Mustafa, H. Mokhils i M.A. Baharudin, "Simulation study on optimal placement and sizing of Battery Switching Station units using Artificial Bee Colony algorithm," Electrical Power and Energy Systems, vol. 55, str. 592-601, 2014.
- [12] K. M. Rogers, R. Klump, H. Khurana, A. A. Aquino-Lugo i T. J. Overbye, "An authenticated control framework for distributed voltage support on the smart grid," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1, str. 40-47, 2010.
- [13] J. A. P. Lopes, F. J. Soares i P. M. R. Almeida, "Integration of electric vehicles in the electric power system," Proceedings of the IEEE, vol. 99, str. 168-183, 2011.
- [14] S. Borenstein, "The long-run efficiency of real-time electricity pricing," The Energy Journal, vol. 26, br. 3, str. 9311-6, 2005.
- [15] M. A. Ortega-Vazquez, F. Bouffard i V. Silva, "Electric vehicle aggregator/system operator coordination for charging scheduling and services procurement," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, br. 2, str. 1806-1815, 2013.
- [16] S. Han, S. Han i K. Sezaki, "Development of an Optimal Vehicle-to-Grid Aggregator for Frequency Regulation," IEEE Transactions on Smart Grid, vol.1, br.1, str. 65-72, 2010.

- [17] M. R. Sarker, H. Pandžić i M. A. Ortega-Vazquez, "Electric vehicle battery swapping station: business case and optimization model," 2013 International Conference on Connected Vehicles & Expo (ICCVE 2013), Las Vegas, NV, USA, 2013.
- [18] M. R. Sarker, H. Pandžić i M. A. Ortega-Vazquez, "Optimal Operation and Services Scheduling for an Electric Vehicle Battery Swapping Station," IEEE Transactions on Power Systems, dostupno online.
- [19] D. Zheng, F. Wen i J. Huang, "Optimal planning of battery swap stations," Proceedings of Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2012), rujun 2012, pp. 1-7.
- [20] Y. Zheng, Z.Y. Dong, Y. Xu, K. Meng, J.H. Zhao i J. Qiu, "Electric Vehicle Battery Charging/Swap Stations in Distribution Systems: Comparison Study and Optimal Planning," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 29, no. 1, pp. 221-229, 2014.
- [21] G. Ya-jing, Z. Kai-xuan i W. Chen, "Economic dispatch containing wind power and electric vehicle battery swap station," in Proceedings of Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES, 2012, pp. 17.
- [22] O. Worley i D. Klabjan, "Optimization of battery charging and purchasing at electric vehicle battery swap stations," in Proceedings of Vehicle Power and Propulsion Conference, 2011 IEEE, 2011, pp. 14.
- [23] J. Lidicker, T. Lipman i B. Williams, "Business model for subscription service for electric vehicles including battery swapping for San Francisco bay area, California," Transp. Research Record: Journal of the Transp. Research Board, vol. 2252, str. 8390, 2011.
- [24] "Basic Business Concepts: Electric Vehicle," G4V: Grid for Vehicles, Tech. Rep., 2011.
- [25] J. S. Neubauer i A. Pesaran, Techno-Economic Analysis of BEV Service Providers Offering Battery Swapping Services, 2013.
- [26] Better Place: Battery Swapping Stations (BSS). [Online] Dostupno na: [http://en.wikipedia.org/wiki/Better\\_Place](http://en.wikipedia.org/wiki/Better_Place)
- [27] Tesla Motors: Battery Swap. [Online] Dostupno na: [www.teslamotors.com/batteryswap](http://www.teslamotors.com/batteryswap)
- [28] "China electric vehicle charging station market report, 2012-2013," Research in China, 2013.
- [29] T. Dragičević, H. Pandžić, D. Škrlec, I. Kuzle i D.S. Kirschen, "Capacity Optimization of Renewable Energy Sources and Battery Storage in an Autonomous Telecommunication Facility," IEEE Transactions on Sustainable Energy, dostupno online.
- [30] "stoRE – Final Publishable Report," svibanj 2014. [Online] Dostupno na: <http://www.store-project.eu/>
- [31] D. Fouskakis i D. Draper, "Stochastic Optimization: A Review," International Statistical Review, vol. 70, no. 3, str. 315-349, 2002.
- [32] S. H. Chen, J. Wu i Y. D. Chen, "Interval optimization for uncertain structures," Finite Elements in Analysis and Design, vol. 40, br. 11, str. 1379-1398, 2004.
- [33] C. Busing and F. D'Andreagiovanni, "New results about multi-band uncertainty in robust optimization," in Experimental Algorithms. vol. 7276, R. Klasing, ed: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 63-74.
- [34] D. Bertsimas i A. Thiele, "A robust optimization approach to inventory theory," Operations Research, vol. 54, str. 150-168, 2006.
- [35] Y. Dvorkin, H. Pandžić, M. Ortega-Vazquez i D.S. Kirschen, "A Hybrid Stochastic/Interval Approach to Transmission-Constrained Unit Commitment," IEEE Transactions on Power Systems, dostupno online.
- [36] L. H. Thaller, "Expected cycle life versus depth of discharge relationships of well behaved single cells and cell strings," Proceedings of 162nd Meeting of the Electrochem. Soc., Detroit, 17-22 listopad 1982 (M. S. Baxa and C. E. Weinlein, ur.), str. 17-22, 1982.
- [37] D. Vutetakis i H. Wu, "The effect of charge rate and depth of discharge on the cycle life of sealed lead-acid aircraft batteries," Proceedings of IEEE 35th International Power Sources Symposium, str. 103-105, 1992.
- [38] B. Cotton, "Vrta battery lifetime fingerprints - part 1," Proceedings of IEEE 34th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), str. 1-8, 2012.
- [39] D. Bošnjak, T. Capuder, T. Cerovečki, I. Kuzle, A. Milković, H. Pandžić, D. Petranović, D. Škrlec, N. Švarc, "Elaborat optimalnog tehničkog rješenja priključenja na elektroenergetsku mrežu: Kupac Trgovački centar Požega", 2010.
- [40] I. Kuzle, D. Škrlec, H. Pandžić, M. Zidar, T. Capuder, "Razvoj distribucijske mreže Elektre Koprivnica u razdoblju 2011-2031. godine", 2012.
- [41] I. Kuzle, Igor, H. Pandžić, T. Capuder, M. Zidar, "Elaborat optimalnog tehničkog rješenja priključenja elektrane na biomasu Koprivnički Ivanec na prijenosnu mrežu", 2012.

- [42] C. Guéret, C. Prins, M. Sevaux, Applications of optimization with Xpress-MP: Dash Optimization Ltd., 2000.