

Ivan Pavić<sup>1</sup>  
Sveučilište u Zagrebu,  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
[Ivan.pavic@fer.hr](mailto:Ivan.pavic@fer.hr)

Tomislav Capuder  
Sveučilište u Zagrebu,  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
[Tomislav.capuder@fer.hr](mailto:Tomislav.capuder@fer.hr)

Igor Kuzle  
Sveučilište u Zagrebu,  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
[Igor.kuzle@fer.hr](mailto:Igor.kuzle@fer.hr)

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

## ANALIZA ASPEKATA FLEKSIBILNOSTI BUDUĆEG ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA S INTEGRIRANIM ELEKTRIČNIM VOZILIMA

### SAŽETAK

Sve veći broj varijabilnih i obnovljivih izvora (OIE) teže predvidljive proizvodnje posljedično mijenja zahtjeve vođenja elektroenergetskog sustava. Povećani zahtjevi za fleksibilnošću, u vidu naglih promjena zahtjeva za energijom zbog varijabilnih karakteristika OIE, i rezervom, u vidu dodatnih kapaciteta rezerve usred nepredvidljivosti proizvodnje OIE, impliciraju korištenje novih izvora fleksibilnosti. U tom kontekstu često se spominju upravo električna vozila koja bi svojim karakteristikama ponašanja i spremnicima mogla pružiti traženu fleksibilnost. U radu je razvijen i opisan matematički model planiranja pogona elektroenergetskog sustava temeljen na cjelobrojnom mješovitom programiranju. Matematički model električnih vozila (EV) temelji se na povijesnim obrascima ponašanja klasičnih vozila s unutarnjim izgaranjem s ciljem zadržavanja jednake razine ugodnosti za krajnjeg korisnika. Na primjeru različitih elektroenergetskih sustava, različitih karakteristika proizvodnog portfelja, prikazan je utjecaj OIE na zahtjeve za fleksibilnošću i rezervom. Analiziran je i kvantificiran utjecaj neupravljivog punjenja EV, kao i mogućnosti da upravljivo punjenje EV doprinese novim zahtjevima za fleksibilnosti. Doprinosi fleksibilnog upravljanja EV izraženi su kroz troškove sustava, emisije CO<sub>2</sub> te količinu neiskorištene energije OIE.

**Ključne riječi:** Fleksibilnost sustava, električna vozila, obnovljivi izvori energije

## FLEXIBILITY ANALYSIS OF FUTURE POWER SYSTEM WITH INTEGRATED ELECTRIC VEHICLES

### SUMMARY

Increasing number of variable and renewable energy sources (RES) with unpredictable generation creates new operation paradigm for power systems. Greater flexibility requirements due to sudden changes in RES generation as well as greater operation reserve requirements due to unpredictable nature of RES primary source, demand integration and preparation of new flexibility providers. Recent literature often propose electric vehicles as a potential distributed flexibility providers. The main reasons are their driving behavior and energy storage which can be partially adjusted to relieve some of the newly acquired pressure on system operation. The paper brings mathematical model for power system operation planning based on mixed integer linear programming. Mathematical model of electric vehicles (EV) is based on historical

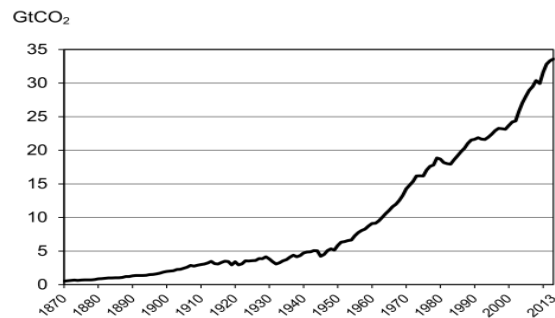
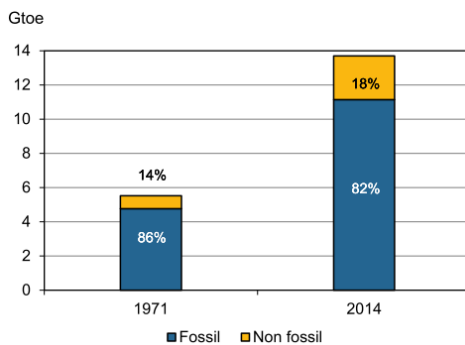
<sup>1</sup> Stavovi izneseni u referatu su osobna mišljenja autora, nisu obvezujući za poduzeće/instituciju u kojoj je autor zaposlen te se ne moraju nužno podudarati sa službenim stavovima poduzeća/institucije.

driving behavior curves of conventional vehicles with internal combustion engines. The aim of such representation is to maintain the same level of comfort for EV's end-users. Power systems with different energy mixes have been used to investigate RES impact on power system's flexibility and reserve requirements. Main focus of the paper is to analyze and quantify impact of uncontrollable and controllable EV charging on new flexibility requirements. Negative impacts and/or benefits of different EV charging regimes have been expressed as total system costs, total system emissions and total wind power curtailment.

**Key words:** Power System Flexibility, Electric Vehicles, Renewable Energy Sources

## 1. UVOD

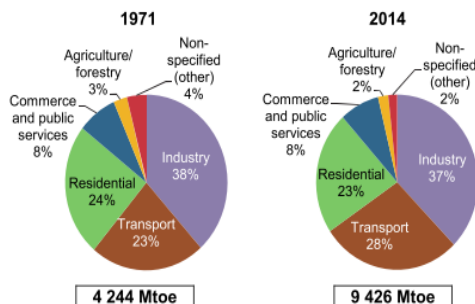
Dogovorom u Parizu krajem 2015. godine države sudionice obvezale su se na nastavak borbe protiv klimatskih promjena, odnosno globalnog zatopljenja [1]. Osnovni cilj dogovora jest ograničiti porast prosječne globalne temperature na ispod 2°C gdje je referenca predindustrijsko razdoblje. Trenutno je sporazum ratificiralo 145 od ukupno 197 sudionika sporazuma te je 4. studenog 2016. godine sporazum stupio na snagu. Prije i tijekom Pariške konferencije države su predale nacionalne klimatske akcijske planove, ali oni i dalje nisu dovoljni kako bi se globalno zatopljenje držalo ispod 2°C. Kako bi se moglo pravodobno razlučiti kako i u kojim gospodarskim sektorima djelovati da bi se navedeni cilj pravovremeno postigao. Potrošnja primarne energije u svijetu u velikom je porastu što sa sobom povlači i porast emisija stakleničkih plinova, ponajviše ugljičnog dioksida, nastalih spaljivanjem fosilnih goriva. Prema Međunarodnoj energetskej agenciji (engl. „International Energy Agency“), Slika 1, se vidi porast potrošnje primarne energije iz fosilnih i ostalih ne-fosilnih goriva u razdoblju 1971.-2014. Također, na Slika 2 prikazan je trend porasta emisija ugljičnog dioksida u istom razmatranom razdoblju [2].



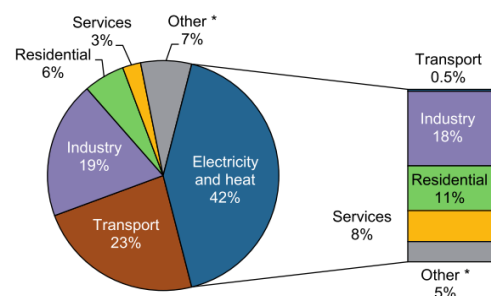
Slika 1 Porast potrošnje primarne energije [2]

Slika 2 Trend porasta emisija ugljičnog dioksida od 1971. – 2014. [2]

Iako se ukupna krajnja potrošnja energije više nego udvostručila u četrdeset-trogodišnjem periodu (od 1971. do 2014. godine), raspodjela potrošnje energije po sektorima je ostala gotovo nepromijenjena što se može vidjeti na Slika 3 [3]. Na prometni sektor u 2014. otpada oko 28% svih potreba za primarnom energijom. S druge strane, kada se pogleda raspodjela emisija ugljičnog dioksida može se uočiti nekoliko sektora sa značajnim zagađenjem, od čega prednjače sektori energetike, prometa, industrije, zgradarstva... Prema [2], Slika 4, u 2014. godini sektor prometa sudjeluje s oko 23% ukupnih emisija.

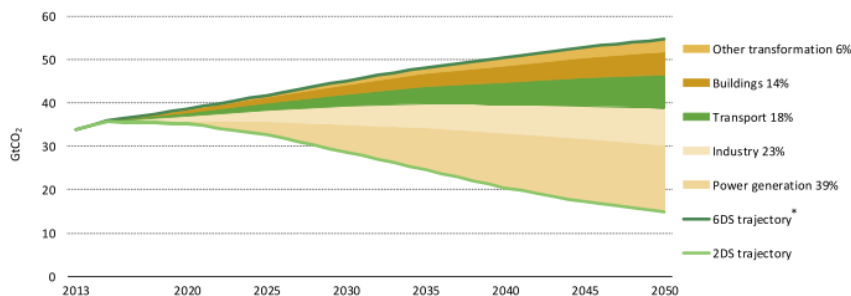


Slika 3 Ukupna godišnja krajnja potrošnja energije za 1971. i 2014. godinu [3]



Slika 4 Ukupne godišnje emisije ugljičnog dioksida u 2014. godini [2]

Zanimljiva analiza se može pronaći u [4], Slika 5, gdje su definirane dvije trajektorije budućih emisija ugljičnog dioksida. Gornja trajektorija, nazvana 6DS, odnosi se na povećanje emisija ugljičnog dioksida do 2050. prema trenutno aktualnim nacionalnim ekološkim i energetskim strategijama. Drugim riječima, ako ne dođe do nužnih promjena prema trenutnom stanju zakonodavstva, regulative i prakse porast globalne prosječne temperature bit će oko 6°C u odnosu na predindustrijsku temperaturu. Porast temperature od 2°C dan je donjom trajektorijom nazvanom 2°C. Međutim, da bi se to doseglo potrebno je smanjiti emisije ugljičnog dioksida po svim gospodarskim sektorima. Najviše u sektoru energetike i industrije, te u prometnom sektoru gdje predviđeno smanjenje zauzima 18% svih ukupnih smanjenja emisija.

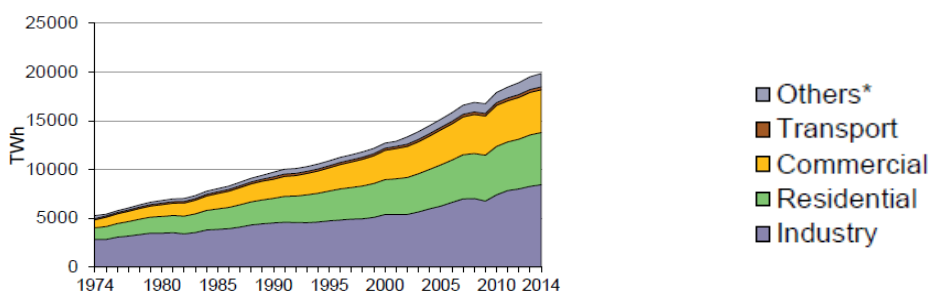


Slika 5 Potrebno smanjenje emisija ugljičnog dioksida do 2050. godine [4]

Vrlo je jasno da se ambiciozni ciljevi Pariškog sporazuma ne mogu dostići bez značajnih promjena u prometnom sektoru što uključuje promjene u vidu tehnoloških inovacija, preko novih poslovnih konceptata do promjena ponašanja krajnjih korisnika.

## 2. ELEKTROENERGETIKA I ELEKTRIČNA VOZILA

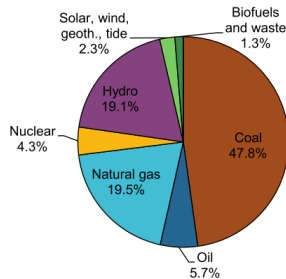
Jedno od potencijalnih rješenja smanjenja emisija stakleničkih plinova prometnog sektora jest elektrifikacija prometa, odnosno transformacija prometnog sektora s konvencionalnog pogonjenog fosilnim gorivima ka novom pogonjenom električnom energijom. Ovakva transformacija se odnosi na sve oblike transporta: javni prijevoz, taksi službe, dostavna vozila, industrijska vozila, teretne prijevozne tvrtke, osobna vozila... Elektrifikacija prometa neminovno znači i dodatni porast potrošnje električne energije. Dodatni porast električne energije povlači za sobom i potrebu za novim ulaganjima u proizvodne i mrežne kapacitete kako bi se uspjele pokriti novonastalo opterećenje. Na Slika 6 prikazan je povijesni porast potrošnje električne energije, gdje prometni sektor u 2014. zauzima manje od 1%. Potreba za izgradnjom proizvodnih i mrežnih kapaciteta postoji i bez predložene elektrifikacije prometa, no ista će ju zasigurno još više produbiti.



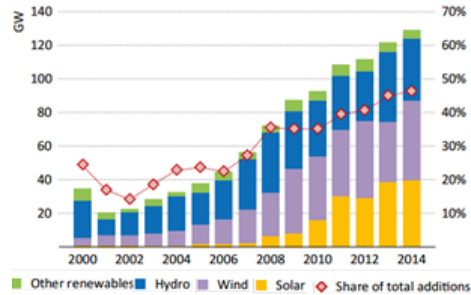
Slika 6 Porast potrošnje električne energije kroz razdoblje 1971 – 2014 [5]

Na Slika 4 može se uočiti kako energetika zauzima 42% ukupnih emisija ugljičnog dioksida te svako daljnje povećanje proizvodnje električne energije iz konvencionalnih izvora znači i povećanje emisija stakleničkih plinova. Takvim pristupom prebacile bi se emisije iz lokalnih sredina gdje boravi čovjek u područja gdje se nalaze velike proizvodne jedinice. Svako pozitivna i zdrava promjena, no ukupne globalne emisije bi ostale na istoj razini kao i prije elektrifikacije. Ono što je potrebno, što je preduvjet zdrave elektrifikacije prometa, jest transformacija elektroenergetskog sustava iz fosilno-ovisnog u niskougljični sustav. Elektroenergetski sustav još uvijek živi na krilima fosilnih goriva. Ukupna proizvodnja električne energije na fosilna goriva u 2014. godini u svijetu bila je na razni 73% ukupno proizvedene električne energije, prikazano na Slika 7. Promjene u energetskom konceptu, počele su se događati prije više od

dvadeset godina kada je sustavnom deregulacijom te liberalizacijom omogućen novi prtok kapitala koji je udahnuo novi život elektroenergetici. Novi prtok privatnog kapitala kao i visoke državne subvencije za niskouglične tehnologije stvorile su plodno tlo za ekspanziju proizvodnih objekata na obnovljive izvore energije (OIE) poput solarnih elektrana i vjetroelektrana. Na Slika 8 prikazan je rapidan rast instaliranog proizvodnog kapaciteta OIE, te je u 2015. godini ukupni instalirani kapacitet u obnovljivim izborima energije prvi puta prešao 50% ukupnog godišnjeg instaliranog proizvodnog kapaciteta u svijetu.

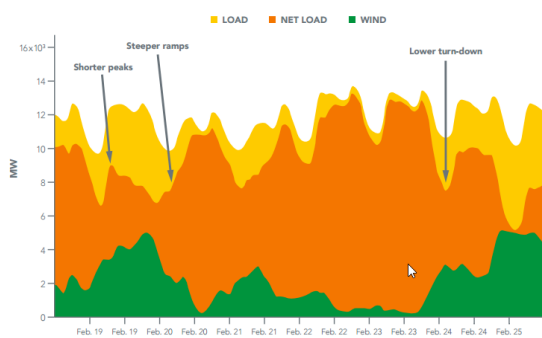


Slika 7 Proizvodnja električne energije u svijetu 2014. godine [5]

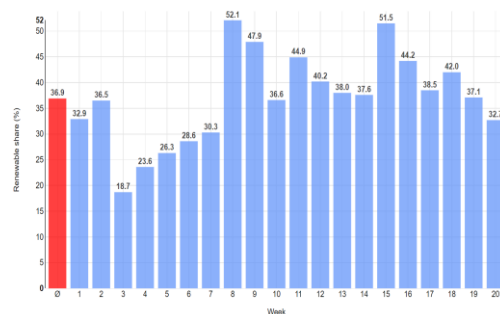


Slika 8 Novoinstalirani proizvodni kapaciteti na OIE u svijetu [6]

Obnovljive izvore krasi karakteristike kao što su proizvodnja električne energije sa zanemarivim varijabilnim troškom te nula emisija stakleničkih plinova. No s druge strane, njihova povećana integriranost narušava pogon elektroenergetskog sustava upravljanog konvencionalnim načinom razmišljanja. Problemi se ponajviše očituju u nepredvidivosti te promjenjivosti njihove proizvodnje električne energije što iziskuje dodatna ulaganja u cjelokupnu fleksibilnost sustava. Naime, u elektroenergetskom sustavu u svakom trenutku mora biti uravnotežena proizvodnja i potrošnja energije. Fleksibilnost sustava se može definirati kao sposobnost sustava da dovoljno brzo i na odgovarajući način odgovori na nagle promjene u proizvodnji i potrošnji u sustavu. U sustavu bez OIE nepredvidivost potrošnje energije uvijek je bila uravnotežena s upravljivim elektranama na fosilna goriva. Proizvodnja električne energije iz OIE je neupravljiva što znači u slučaju visoke integracije OIE sustav mora imati dovoljno upravljivih postrojenja kako bi u svakom trenutku mogao imati uravnotežen pogon. Događa se jedna kontradiktorna situacija gdje zbog visokog udjela proizvedene energije iz OIE nema niti potrebe niti financijskih koristi za ulaganje u upravljive elektrane (npr. plinske turbine) dok s druge strane zbog većih potreba za regulacijom i uravnoteženjem rastu i potrebe za upravljivim fleksibilnim elektranama. Primjer rečenoga vjerno je prikazan na Slika 9 gdje proizvodnja iz vjetroelektrana smanjuje trajanje vršnog opterećenja (manja zarada od prodaje energije u satima visokih cijena), a s druge strane tehničke karakteristike upravljive proizvodnje moraju biti fleksibilnije (veći zahtjevi na brzinu povećanja proizvodnje (engl. „ramping“) elektrane i niži tehnički minimum). Također, vjetroelektrane i solarne elektrane imaju nizak faktor opterećenja (mala količina proizvedene energije u odnosu na instaliranu snagu) jer proizvodnja ovisi o vremenskim okolnostima. U Njemačkoj instalirana snaga u OIE u 2017. godini iznosi oko 50 % (samo sunce i vjetar su nešto više od 46%) dok je udio u ukupnoj proizvodnji za cijelu 2016. godinu oko 30% (samo sunce i vjetar nešto više od 21%) [7]. Primjer promjenjivosti udjela OIE u ukupnoj potrošnji može se vidjeti, također na primjeru Njemačke, za prvih pet mjeseci 2017. godine po tjednima na Slika 10.



Slika 9 Veća promjenjivost neto opterećenja u sustavu s više OIE [8]



Slika 10 Udio OIE u ukupnoj potrošnji u Njemačkoj, siječanj-svibanj 2017. [7]

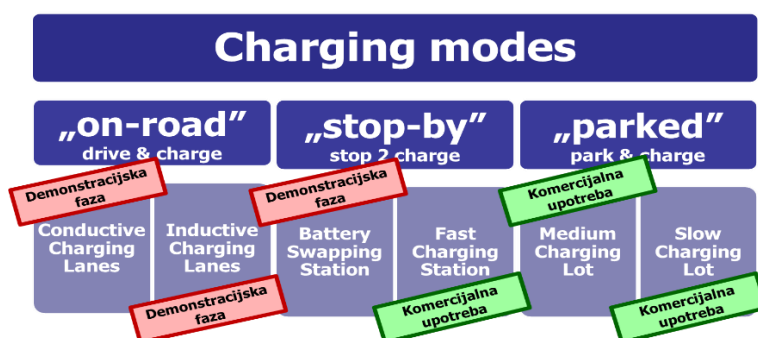
Kako bi se proizvodnja iz OIE premjestila u trenutke većeg opterećenja te kako bi se vršilo uravnoteženje niskouglijinog sustava nužna je visoka fleksibilnost elektroenergetskog sustava. Najjednostavniji te konceptualno najbliže današnjem elektroenergetskom sustavu je instalacija plinskih elektrana s mogućnostima brzog puštanja u pogon, brze promjene radne točke, niskog tehničkog minimuma i sl. Međutim instalacija novih proizvodnih pogona na fosilna goriva je upravo suprotna ideji integracije OIE te borbi protiv emisija stakleničkih plinova i globalnog zatopljenja. Upravo iz tog razloga postoji široka paleta drugih tehnologija i koncepata koja bi mogla preuzeti uloge upravljivih konvencionalnih elektrana. Spremnici energije idealni su prema svojim tehničkim karakteristikama za tu ulogu. Međutim ili su im lokacije iskorištene (slučaj reverzibilnih elektrana) ili su im troškovi instalacije previsoki (baterijski spremnici energije). Sve veću važnost dobiva fleksibilna potrošnja koja može biti u stanju pratiti proizvodnju iz OIE (primjer: sustavi grijanja, hlađenja i ventilacije, razne crpke i hladnjače itd.) ili pak korištenje samih proizvodnih pogona na OIE kao postrojenja za uravnoteženje (ovo se želi izbjeći jer je cilj maksimalno iskoristiti OIE). Isto tako uslijed sve veće integracija električnih vozila (EV) javlja se mogućnost korištenja fleksibilnosti baterija električnih vozila kako bi se omogućio daljnji priljev OIE. EV bi u tom slučaju imala dvojaku ulogu s ekološkog aspekta: smanjenje emisija zbog korištenja elektrificiranog transporta te smanjenje emisija zbog omogućavanja veće integracije OIE. Naravno ovo vrijedi samo za slučaj pametne integracije, korištenja i punjenja EV. Također, pametni način integracije EV bi donio financijske koristi i operatoru sustava (uravnoteženje sustava) i korisniku vozila (niži operativni troškovi).

### 3. NAČINI PUNJENJA ELEKTRIČNIH VOZILA

Prednost električnih vozila nad konvencionalnim vozilima jest i u raznolikosti potencijalnih načina punjenja vozila. Općenito, električna vozila se mogu puniti na tri različita načina s obzirom na korištenje vozila za vožnju:

- tijekom vožnje tj. punjenje na cesti (engl. „on-road charging“),
- kratko zaustavljanje zbog punjenja (engl. „stop-by charging“) te
- kada su parkirana i ne koriste se za vožnju (engl. „parked charging“).

Klasifikacija načina punjenja dana je na Slika 11.



Slika 11 Načini punjenja električnih vozila

#### 3.1. Punjenje tijekom vožnje – prometnice za punjenje

Različiti znanstveni i demonstracijski projekti predlažu punjenje električnih vozila za vrijeme vožnje tako da su vozila galvanski ili induktivno spojena s infrastrukturom za punjenje. Infrastruktura za takvo punjenje je integrirana u same prometnice. Vozači u isto vrijeme koriste baterije za pogon vozila te za punjenje baterija iz mreže. Ovakav način punjenja vrlo dobro ublažava neke od osnovnih problema električnih vozila kao što su mala udaljenost koju mogu preći na temelju jednog punjenja. Dva su osnovna koncepta punjenja za vrijeme vožnje:

- prometnice za kontaktno punjenje te
- prometnice za bežično punjenje.

Prometnice za kontaktno punjenje nalažu instalaciju infrastrukture slične onoj korištenoj kod tramvaja ili trolejbusa gdje se vozilo napaja preko kontakta oduzimača struje s naponskim vodom. Tvrtka Siemens trenutno razvija takvu infrastrukturu za kamione na autocestama pod nazivom projekta eHighway, više informacija može se naći u [9]. Tvrtka High Voltage Valley [10] razvija nešto drugačiji način kontaktnog punjenja električnih vozila kroz projekt Elways gdje vozilo posjeduje rampu kojom klizi po tračničkom vodu položenom u samoj prometnici. Osim kontaktnog punjenja EV za vrijeme vožnje predlažu se i prometnice za bežično punjenje gdje bi se EV opremljena zavojnicom punila elektromagnetskom indukcijom preko zavojnica položenih u prometnici.

### 3.2. Kratko zaustavljanje zbog punjenja – stanice za punjenje/zamjenu

Nadopuna goriva u vozilima s unutrašnjim izgaranjem najčešće se vrši kratkim stajanjem za vrijeme vožnje na benzinskim crpkama koje se nalaze uz prometnice. Ovakav odnos punjenja i vožnje najlakše je preslikati na električna vozila ponajviše zbog ljudske nesklonosti na (velike) promjene. Dva su osnova koncepta kod kratkog zaustavljanja zbog punjenja:

- stanice za brzo punjenje te
- stanice za zamjenu baterija.

Osim odnosa punjenja i vožnje, kod stanica za brzo punjenje i sam koncept punjenja je vrlo sličan onom kod benzinskih postaja. EV se zaustavi te se priključi na punionicu dok se vozilo ne napuni. Stanice za brzo punjenje EV iz navedenog razloga su se brzo krenule širiti u zemljama s velikom potražnjom za punjenjem EV, primjer stanice za brzo punjenje tvrtke Tesla [11]. Drugi koncept u ovoj kategoriji su stanice za zamjenu baterija. Koncept se može usporediti s konceptom zamjene plinskih boca, korisnik dolazi sa praznim spremnikom (baterijom u EV) te ga mijenja punim. Najveća prednost zamjene baterija je vrijeme obavljanja zamjene baterije koje je mnogostruko veće od vremena potrebnog za napuniti bateriju na stanici za brzo punjenje. Tesla je uživo demonstrirao učinkovitost ovakvog koncepta te su baterije uspješno zamijenjene u dva vozila dok se jedno vozilo sa unutrašnjim izgaranjem nije uspjelo napuniti [12].

### 3.3. Punjenje tijekom parkiranja – Parkirna mjesta za punjenje

Budući da je elektroenergetska mreža razgranata te je instalacija dodatne infrastrukture jednostavnija nego kod ostalih oblika energije, elektrifikacija cestovnog prometa donosi dodatnu prednost sa strane punjenja jer omogućava punjenje vozila i dok se ne koriste za vožnju, odnosno dok su parkirana. Korisnik vozila parkira svoje vozila kada mu nije potrebno za vožnju te ga istodobno priključi na mrežu i puni. Dva su osnova koncepta kod punjenja za vrijeme parkiranja:

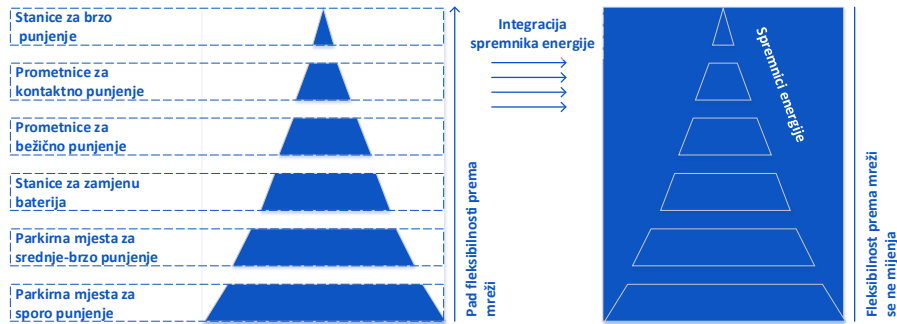
- parkirna mjesta za srednje-brzo punjenje te
- parkirna mjesta za sporo punjenje.

U ovisnosti o karakteristikama parkirališta punionice električnih vozila različitih karakteristika mogu biti isplative i korisne vlasnicima vozila. Iz navedenog razloga moguće je postaviti trofazne AC punionice velike instalirane snage (preko 20 kW – punjenje do 2 sata) na visokofrekventnim parkiralištima (vozila su parkirana kraće vrijeme i češća je izmjena vozila na parkiralištu). Jednofazne AC punionice srednje instalirane snage (oko 10 kW – punjenje do 8 sati) moguće je instalirati na srednje frekventnim parkiralištima (manja frekventnost i duže vrijeme parkiranja). Navedena punionice prema gore spomenutoj klasifikaciji spadaju pod srednje-brzo punjenje EV. Jednofazne AC punionice male instalirane snage (do 5 kW – cjelonočno punjenje) moguće je instalirati na niskofrekventnim parkiralištima (mala izmjena vozila te dugo vrijeme parkiranja). Više informacija o različitim načinima punjenja može se pronaći u [12].

## 4. UTJECAJ PUNJENJA ELEKTRIČNIH VOZILA NA FLEKSIBILNOST SUSTAVA

Svaki od spomenutih načina punjenja može se promatrati sa stajališta korisnika EV te sa stajališta sustava koji mora opskrbiti prometnice/stanice/parkirališta. Ako se infrastruktura za punjenje promatra kao nova pasivna potrošnja u sustavu, tada će pri velikoj integraciji EV doći do povećanja vršnog opterećenja te posljedično do potreba za novim ulaganjem i u mrežnu infrastrukturu i u proizvodna postrojenja. Osim povećanja vršnog opterećenja, EV donose novu varijabilnost i nepredvidivost sustavu. Povećanje varijabilnosti u sustavu znači veću volatilitnost neto opterećenja (Slika 9) što povlači za sobom potrebu za dodatnim fleksibilnim jedinicama koje bi to mogle pratiti. Nepredvidivost se očituje kroz neizvjesnost nekoliko veličina: vrijeme odlaska EV sa mreže, vrijeme dolaska EV na mrežu, stanje napunjenosti baterije prilikom priključenja na mrežu (engl. „State-of-Charge-SOC“). Povećanje nepredvidivosti u sustavu ima za posljedicu povećanje potreba za rezervom, odnosno uravnoteženjem u sustavu. Kako bi se EV prebacila iz pozicije uzročnika nefleksibilnosti u sustavu u donosioca nove fleksibilnosti potrebno je razviti nove inovativne metode kontrole i upravljanja EV. EV zbog posjedovanja baterije te zbog relativno malog vremena korištenja za vožnju tijekom dana (u prosjeku se osobni automobili koriste oko 5% dana) izvrstan su kandidat za uravnoteženje sustava ako se koriste u pametnom/upravljivom režimu rada. Pružanje fleksibilnosti sustavu iz električnih vozila ovisi o vremenu spoja na infrastrukturu za punjenje te o snazi punjenja. Tako najveću fleksibilnost prema sustavu EV mogu pružiti koristeći parkirna mjesta za sporo punjenje EV. Razlog je dugo vrijeme spoja na punjač pri čemu se EV može puniti samo onda kada to odgovara sustavu te i dalje biti na željenom SOC u trenutku odlaska s mreže. S druge strane, EV na stanicama za brzo punjenje nisu parkirana dugo vremena te se žele napuniti u što kraćem vremenskom razdoblju, odnosno prema mreži djeluju izrazito nefleksibilno (nema mogućnosti pružanja rezerve). Parkirna mjesta sa srednje-brzim punjenjem se nalaze između onih sa sporim punjenjem te stanica za brzo punjenje

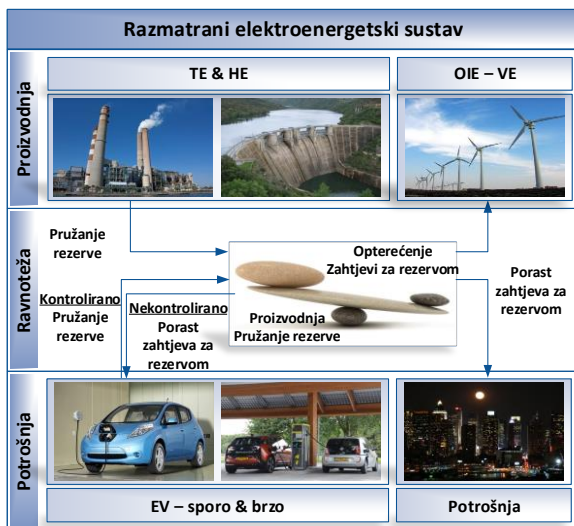
te do neke mjere mogu pružiti fleksibilnost sustava preko punjača. Stanice za zamjenu baterija sastoje se od stoga baterija različitih razina napunjenosti. Punjenje baterija odvojeno je od same potražnje za zamjenom baterija što zapravo omogućava stanici pružanje fleksibilnosti sustava onda kada je zadani broj baterija na zadovoljavajućem SOC-u. Električna vozila koja bi koristila infrastrukturu za punjenje integriranu u same prometnice (punjenje za vrijeme vožnje) mogu do neke mjere biti fleksibilna s aspekta sustava. Odnosno, ukoliko je SOC baterije zadovoljavajući, EV može automatski smanjiti punjenje ako to sustav zahtjeva. Ovdje dolazi do pitanja zagušenja takve prometnice zbog vozila koja se nepune cijelo vrijeme dok se voze po njoj, a s time i pitanje isplativosti takve investicije. Ilustrativni pregled načina punjenja prema razini fleksibilnosti koju mogu pružiti mreži dan je na Slika 12 (lijeva strana slike). Ukoliko se želi izbjeći dodatno neelastično opterećenje prema mreži od strane prometnica/stanica/parkirališta za punjenje EV integracija spremnika električne energije čini se kao potencijalno rješenje (desna strana Slika 12).



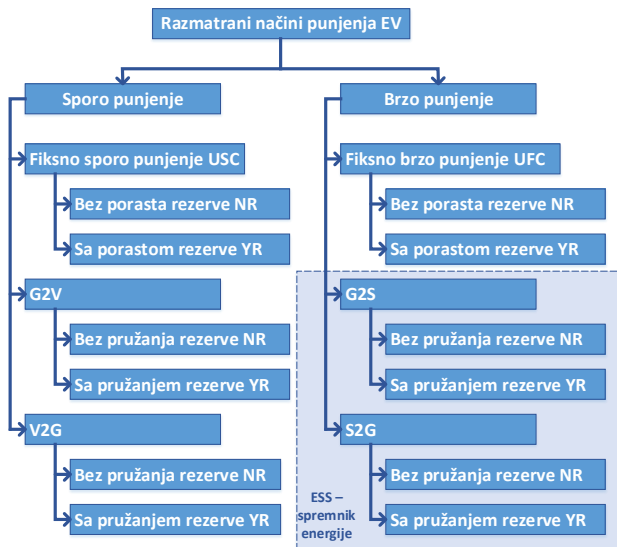
Slika 12 Fleksibilnost način punjenja s aspekta sustava

#### 4. ANALIZA BUDUĆEG ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA S INTEGRIRANIM EV

Kako bi se izvršila analiza budućeg elektroenergetskog sustava s integriranim EV razvijen je mješovito cjelobrojni optimizacijski model koji razmatra konvencionalni sustav (termo i hidroelektrane te konvencionalna potrošnja) s integriranim OIE i EV. EV su promatrana kroz dva načina punjenja koja prikazuju dva krajnja slučaja s aspekta fleksibilnosti prema mreži: Stanice za brzo punjenje kao izrazito nefleksibilni način te parkirna mjesta za sporo punjenje kao najfleksibilniji način. Prikaz sustava te međuodnosa dionika nalazi se na Slika 13. Gornji redak odgovara proizvodnji električne energije, srednji redak prikazuje potrebu za uravnoteženjem te donji redak prikazuje opterećenje u sustavu (potrošnju energije te EV).



Slika 13 Razmatrani elektroenergetski sustav



Slika 14 Razmatrani scenariji

##### 4.1. Matematička pozadina

Uravnoteženje sustava u modelu ostvareno je kroz dvije matematičke formulacije. Prva jest jednadžba ravnoteže proizvodnje i potrošnje prikazana na jednadžbi (1): suma proizvodnje iz termoelektrana ( $p_{g\_TP}$ ), hidroelektrana ( $p_{g\_HP}$ ) i vjetroelektrana ( $p_{g\_WP}$ ) te proizvodnje/potrošnje reverzibilnih

hidroelektrana ( $p_{PS}^g / p_{PS}^p$ ) mora biti jednaka sumi konvencionalne potrošnje ( $P^d$ ), snage punjenja/pražnjenja ( $p_{EV}^c / p_{EV}^d$ ) EV na parkirnim mjestima za sporo punjenje te snage punjenja/pražnjenja ( $p_{FCS}^c / p_{FCS}^d$ ) na stanicama za brzo punjenje EV (engl. „Fast Charging Stations - FCS“)

$$\sum_{i=1}^{Ni\_TP} (p_{t,i}^{g\_TP}) + \sum_{i=1}^{Ni\_HP} (p_{t,i}^{g\_HP}) + \sum_{i=1}^{Ni\_PS} (p_{t,i}^{g\_PS} - p_{t,i}^{p\_PS}) + p_t^{g\_WP} =$$

$$= P_t^d + \sum_{i=1}^{Ni\_EV} (p_{t,i}^{c\_EV} - p_{t,i}^{d\_EV}) + \sum_{i=1}^{Ni\_FCS} (p_{t,i}^{c\_FCS} - p_{t,i}^{d\_FCS}) \quad (1)$$

Druga formulacija je nejednadžba (2), gdje ukupna ponuđena rezerva mora biti veća od zahtjeva za rezervom: rezerva ponuđena od svakog dionika (termo –  $r_{TP}^{up}$ , hidro –  $r_{HP}^{up}$ , sporo punjenje/pražnjenje EV –  $r_{EV}^{up}$  te brzo punjenje/pražnjenje EV –  $r_{FCS}^{up}$ ).

$$\sum_{i=1}^{Ni\_TP} r_{t,i}^{up\_TP} + \sum_{i=1}^{Ni\_HP} r_{t,i}^{up\_HP} + \sum_{i=1}^{Ni\_EV} r_{t,i}^{up\_EV} + \sum_{i=1}^{Ni\_FCS} r_{t,i}^{up\_FCS} \geq R_t^{up} \quad (2)$$

Jednadžba (2) prikazuje rezervu kapaciteta za sekundarnu rezervu prema gore, analogno toj formuli postoji i formule za sekundarnu prema dolje, primarnu prema gore/dolje te tercijarnu prema gore. Električna vozila razmatrana su kao agregirana baterija promjenjivog kapaciteta cijele EV flote gdje je osnova jednadžba očuvanja energije dana formulom (3). S lijeve strane nalazi se ukupna energija sadržana u floti EV u razmatranom trenutku ( $s_t^{EV}$ ), s desne strane nalazi se (redom): energija sadržana u floti trenutku koji prethodi razmatranju ( $s_{t-1}^{EV}$ ), energija sadržana u vozilima koja se vraćaju nakon putovanja te priključuju na mrežu ( $s_{arr}^{EV}$ ), energija sadržana u vozilima koja odlaze s mreže ( $s_{leav}^{EV}$ ), energija za sporo punjenje EV ( $p_{EV}^c * \eta_{EV}^c$ ), energija za pražnjenje EV u mrežu ( $p_{EV}^d / \eta_{EV}^d$ ) te energija potrebna za punjenje/pražnjenje EV u stanicama za brzo punjenje EV ( $s_{add}^{EV}$ ).

$$s_{t,i}^{EV} = s_{t-1,i}^{EV} + s_{t,i}^{arr\_EV} - s_{t,i}^{leav\_EV} + p_{t,i}^{c\_EV} * \eta_i^{c\_EV} * \Delta t - p_{t,i}^{d\_EV} / \eta_i^{d\_EV} * \Delta t + s_{t,i}^{add\_FCS} \quad (3)$$

Na Sliku 14 prikazani su razmatrani scenariji pri analizi gdje su električna vozila promatrana kroz sporo i brzo punjenje svaki s tri različita moda punjenja:

- fiksno punjenje – EV se pune kako pristignu na mrežu dok se ne napune do maksimalnog SOC-a
- G2V/G2S punjenje (engl. „Grid to Vehicle/Grid to Station“) – jednosmjerno upravljivo punjenje EV (bez injekcije snage natrag u mrežu). EV se pune u trenutcima povoljnim za elektroenergetski sustav;
- V2G/S2G punjenje (engl. „Vehicle to Grid/Station to Grid“) – dvosmjerno upravljivo punjenje EV, (s mogućnošću injekcije snage natrag u mrežu). EV se pune ili prazne u trenutcima povoljnim za sustav.

U sljedećem potpoglavlju bit će prikazan utjecaj EV na tjedni dijagram opterećenja kroz nekoliko scenarija. Detaljnije objašnjenje modela, scenarija te rezultata može se pronaći u [13] i [14].

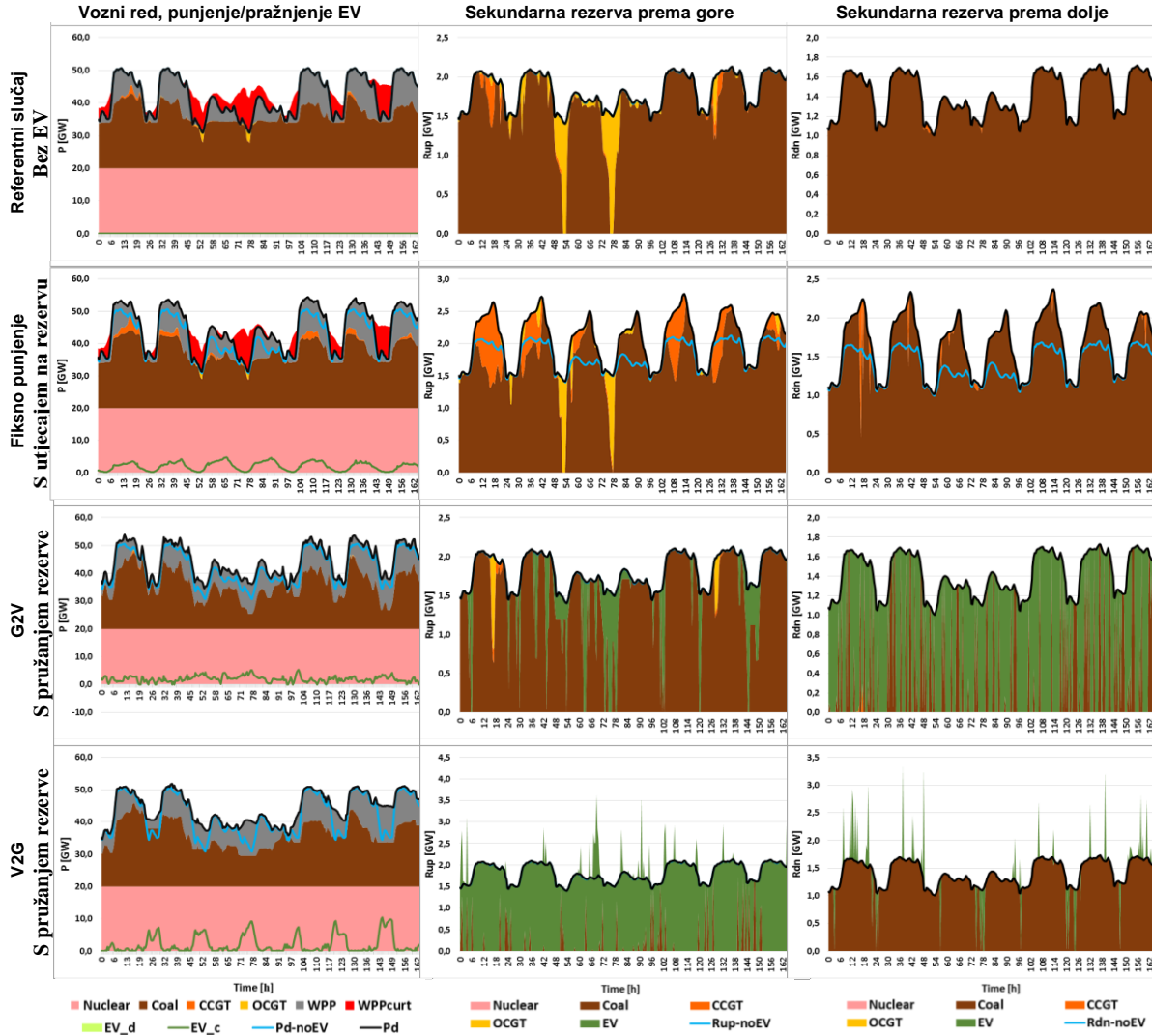
## 4.2. Rezultati

Na Sliku 15 prikazani su rezultati referentnog slučaja bez integriranih EV, te za slučajeve fiksnog punjenja EV s negativnim utjecajem na rezervu (porast zahtjeva) i upravljivih G2V i V2G modova punjenja s mogućnošću pružanja rezerve. Razmatran je period od tjedan dana za energetski miks sustava sastavljen od termoelektrana i vjetroelektrana (instalirana snaga vjetroelektrana je 20 % vršnog opterećenja). U slučaju bez EV određena količina energije iz vjetroelektrana je odbačena uslijed nedovoljne fleksibilnosti sustava (crvena površina na grafu voznog reda). Samo u vršnim trenutcima je većina energije iz vjetroelektrana injektirana u sustav (siva površina). Nuklearne elektrane pokrivaju bazno opterećenje dok ugljene pokrivaju veći dio vršnog opterećenja. Sekundarna rezerva u oba smjera je pokrivena uglavnom iz termoelektrana na ugljen. Integracijom EV koji se pune na fiksni, neupravljivi način (zelena krivulja na grafovima s voznim redom) povećava se vršno opterećenje te zahtjevi za rezervom u vršnim trenutcima. Navedeno se očituje u strožim zahtjevima za fleksibilnošću postavljenim termoelektranama na ugljen te paljenju dodatnih plinskih elektrana. Količina odbačene energije iz VE je ostala gotovo nepromijenjena.

S druge strane korištenjem upravljivog punjenja EV (i G2V i V2G) porast vršne snage je zanemariv, a zahtjevi za rezervom ostaju nepromijenjeni. Korištenjem upravljivih načina punjenja rješava se problem odbacivanja energije iz vjetroelektrana (nema crvene površine). Razlika u G2V i V2G modu najviše se očituje u pružanju rezerve prilikom punjenja/pražnjenja. G2V mod je upravljivo jednosmjerno punjenje te ono može pružiti rezervu promjenom snage punjenja, dok V2G mod može pružiti rezervu promjenom snage

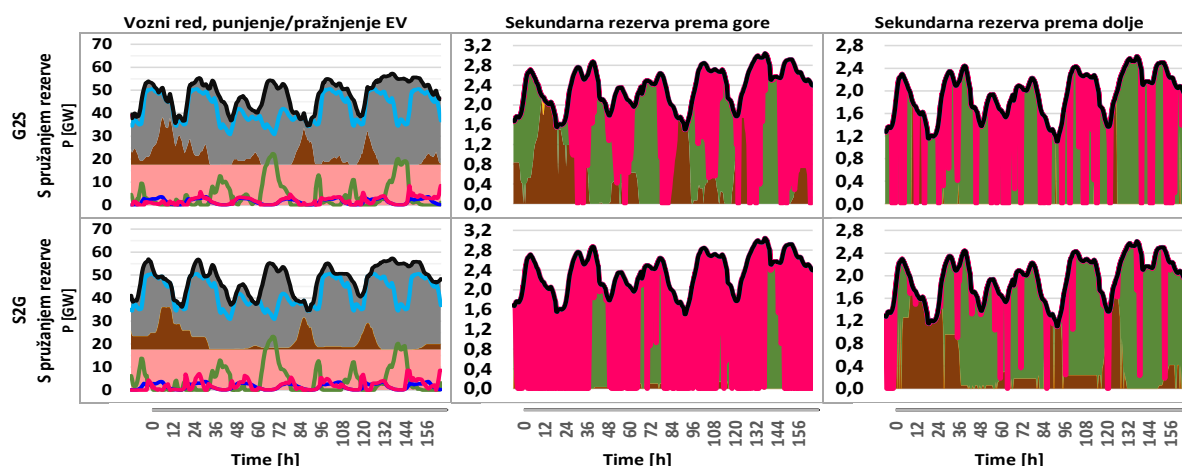


punjenja te pražnjenjem EV u sustav. Krivulja kod G2V moda jest jednolika kroz tjedan te prati manje nagle promjene neto opterećenja u sustavu. Flota EV se nikada ne puni maksimalnom snagom kako bi mogla pružiti rezervu prema dolje (povećati potrošnju energije ako operator sustava to zahtjeva). Budući da se EV pune jednoliko kroz tjedan, praćenje dnevnih fluktuacija (većih, sporijih) neto opterećenja je palo na ugljene elektrane više nego što je to bio slučaj bez EV upravo zbog dodatne fleksibilnosti iz EV. V2G mod se za razliku od G2V moda, koristi za pružanje rezerve prema gore (ova rezerva je skuplja). EV se u V2G modu većinom koriste za pokrivanje dnevnih promjena neto opterećenja te se često pune po noći.



Slika 15 Utjecaj sporog punjenja EV na fleksibilnost EES-a

Ako dio sporog punjenja pretvorimo u brzo punjenje na stanicama za brzo punjenje EV što odgovara realnom svijetu, dobijemo rezultate sa Slika 16 (legenda je ista kao na slici 15). Kao što se vidi na Slika 12 i Slika 14, da bismo stanice za brzo punjenje EV koristili u upravljivim načinima rada moramo integrirati spremnike energije u same punionice. Ljubičasta boja označava interakciju spremnika energije integriranom u punionici sa sustavom, dok plava krivulja na grafu voznog reda označava korištenje energije iz spremnika za punjenje EV. Kao što se vidi na grafovima voznog reda, sustav može prihvatiti velike količine energije iz vjetroelektrana (za razliku od Slika 15, instalirana snaga u VE je jednaka 40% vršnog opterećenja upravo da se pokaže velika fleksibilnost donesena integracijom upravljivih EV). U trenutcima velike proizvodnje energije iz vjetroelektrana dolazi do najvećeg punjenja EV i preko sporog i preko brzog punjenja. U ovisnosti o dobu dana, odnosno zbog različitih potreba za punjenjem, sporo i brzo punjenje EV se izmjenjuje u pružanju rezerve. No gotovo sva rezerva i prema gore i prema dolje je pokrivena iz EV.



Slika 16 Utjecaj brzog punjenja EV na fleksibilnost EES-a

## 5. ZAKLJUČAK

Naprednom integracijom EV, kroz upravljive režime punjenja (i pražnjenja), EV kao novi potrošač u sustavu ne djeluju tako da povećavaju niti vršnu snagu u sustavu niti zahtjeve za rezervom u vršnim trenucima. Naprotiv, svojoj dodatnom fleksibilnošću omogućavaju prihvat veće količine varijabilnih obnovljivih izvora energije bez posebnog ulaganja u fleksibilne elektrane ili stacionarne spremnike energije. Električna vozila u upravljivim režimima rada mogu se shvatiti kao fleksibilna potrošnja (engl. „demand response“) te bez stvaranja novog troška pružiti rezervu operatoru prijenosnog sustava čime se daljnje smanjuje ovisnost o fleksibilnim termoelektranama na fosilna goriva. Pravovremenim prepoznavanjem problema integracije EV koristeći fiksno punjenje, može se doprinijeti sustavu te smanjiti troškove.

## 6. ZAHVALA

Ovaj je rad sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektima IP-2014-09-3517 EVBASS te Flexible Energy Nodes in low-carbon Smart Grid FENISG (7766) .

## 7. LITERATURA

- [1] “COP 21 Paris France Sustainable Innovation Forum 2015 working with UNEP.” [Online]. Available: <http://www.cop21paris.org/>. [Accessed: 19-Apr-2017].
- [2] International Energy Agency, “Key CO2 Emissions Trends,” 2016.
- [3] International Energy Agency, “Key World Energy Trends,” 2016.
- [4] International Energy Agency, “Global EV Outlook 2016,” 2016.
- [5] International Energy Agency, “KEY ELECTRICITY TRENDS ELECTRICITY,” 2016.
- [6] International Energy Agency, “Energy Climate and Change World Energy Outlook Special Report,” 2016.
- [7] “Home | Energy Charts.” [Online]. Available: <https://www.energy-charts.de/index.htm>. [Accessed: 17-May-2017].
- [8] J. Cochran, M. Miller, O. Zinaman, M. Milligan, D. Arent, B. Palmintier, S. Mueller EPRI Eamonn Lannoye, and A. Tuohy, “Flexibility in 21st Century Power Systems.”
- [9] “eHighway - Electromobility - Siemens.” [Online]. Available: <http://w3.siemens.com/topics/global/en/electromobility/pages/ehighway.aspx>. [Accessed: 18-May-2017].
- [10] “Hem | highvoltagevalley.” [Online]. Available: <http://www.highvoltagevalley.se/en-GB>. [Accessed: 18-May-2017].
- [11] “Destination Charging | Tesla.” [Online]. Available: <https://www.tesla.com/destination-charging>. [Accessed: 19-May-2017].
- [12] “Tesla Model S - Battery Swap HD Official - YouTube.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=H5V0vL3nnHY>. [Accessed: 19-May-2017].
- [13] I. Pavić, T. Capuder, and I. Kuzle, “Value of flexible electric vehicles in providing spinning reserve services,” *Appl. Energy*, vol. 157, pp. 60–74, Nov. 2015.
- [14] I. Pavić, T. Capuder, and I. Kuzle, “Low carbon technologies as providers of operational flexibility in future power systems,” *Appl. Energy*, vol. 168, pp. 724–738, 2016.