

# Primjena virtualnih baterija u elektroenergetskom sustavu

---

**Peršić, Stefan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:727591>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-12**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**Primjena virtualnih baterija u elektroenergetskom sustavu**

Rijeka, Svibanj 2024.

Stefan Peršić  
0069083484

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**Primjena virtualnih baterija u elektroenergetskom sustavu**

Mentor: Prof. dr. sc. Vitomir Komen, dipl. ing. el.

Rijeka, svibanj 2024.

Stefan Peršić  
0069083484

Rijeka, 15. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Prijenos i distribucija električne energije**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Stefan Peršić (0069083484)**  
Studij: **Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike**  
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **PRIMJENA VIRTUALNIH BATERIJA U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU**

### Opis zadatka:

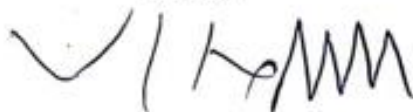
Koncept virtualnih elektrana u elektroenergetskom sustavu. Vrste virtualnih elektrana i područja primjene.

Razrada primjene virtualnih baterija u elektroenergetskom sustavu.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

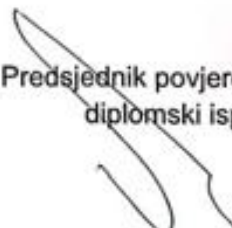
Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Prof. dr. sc. Vitomir Komen

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Dubravko Franković

# IZJAVA

Sukladno članku 8. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta u Rijeci od 1. veljače 2020., izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad prema zadatku preuzetom dana 20. ožujka 2023.

Rijeka, svibanj 2024.

Stefan Peršić

Stefan Peršić



## Sadržaj

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2. Potreba za energetsom tranzicijom</b>	<b>3</b>
2.1. Energetska tranzicija . . . . .	3
2.1.1. Ograničenost fosilnim gorivima . . . . .	3
2.1.2. Negativan utjecaj fosilnih goriva na okoliš . . . . .	4
2.2. Inovacije i tehnološki napredak . . . . .	6
2.3. Promjene potrošača i subvencije . . . . .	7
<b>3. Virtualna elektrana</b>	<b>9</b>
3.1. Vrste virtualnih elektrana . . . . .	11
3.1.1. Vrste upravljanja virtualnim elektranama . . . . .	11
3.2. Virtualna elektrana na tržištu električne energije . . . . .	15
3.3. Područje primjene virtualnih elektrana . . . . .	18
3.3.1. Primjena virtualne elektrane u Sjevernom Hebeiju, Kina . . . . .	21
3.3.2. Primjena virtualnih elektrana na otocima . . . . .	22
<b>4. Električna vozila</b>	<b>24</b>
4.1. Povijest električnih automobila . . . . .	25
4.2. Električna vozila kao virtualne baterije . . . . .	26
4.2.1. Dijelovi električnog vozila . . . . .	27
4.3. Vrste električnih vozila . . . . .	30
4.3.1. Potpuno električna vozila . . . . .	30
4.3.2. Hibridna Električna Vozila . . . . .	31
4.3.3. Priključna Hibridna Električna Vozila . . . . .	31
4.3.4. Električna Vozila s Gorivim Čelijama . . . . .	32
4.4. Utjecaj električnih vozila . . . . .	33
4.4.1. Utjecaj na električnu mrežu . . . . .	34
4.4.2. Utjecaj na okoliš . . . . .	38
4.4.3. Utjecaj na ekonomiju . . . . .	38
<b>5. Virtualne baterije</b>	<b>40</b>
5.1. Primjena virtualnih baterija u elektroenergetskom sustavu . . . . .	41

5.1.1. Odabir električnih vozila . . . . .	41
5.1.2. Određivanje napunjenosti virtualne baterije . . . . .	43
5.1.3. Rezultati istraživanja . . . . .	45
5.1.4. Integracija obnovljivih izvora energije . . . . .	49
5.2. Budućnost virtualnih baterija . . . . .	49
<b>6. Zaključak</b>	<b>51</b>
<b>Literatura</b>	<b>53</b>
<b>Popis slika</b>	<b>55</b>
<b>Popis tablica</b>	<b>56</b>
<b>Sažetak i ključne riječi</b>	<b>57</b>
<b>Summary and key words</b>	<b>58</b>



## 1. Uvod

Ovaj rad obrađuje temu primjene virtualnih baterija u elektroenergetskog sustava. Zadatak rada je opisati virtualne elektrane u elektroenergetskog sustavu te opisati vrste virtualnih elektrana i područja njihove primjene. Uz to potrebno je razraditi primjene virtualnih baterija u elektroenergetskom sustavu.

Kako bi lakše razumjeli što je dovelo do razvoja električnih vozila, a s njima i virtualnih baterija, na početku rada opisan je proces elektroenergetske tranzicije. Budući da se potreba za električnom energijom iz dana u dana povećava potrebno je izgraditi nove izvore električne energije. Također, većina električne energije koju danas koristimo proizvodi se sagorijevanjem fosilnih goriva. Sagorijevanjem tih goriva dolazi do emitiranja velikih količina stakleničkih plinova koji su glavni uzročnici globalnog zatopljenja. Stoga se energetska tranzicija zalaže za prestanak proizvodnje električne energije na konvencionalan način te prelazak na obnovljive izvore energije. Isto tako zalaže se da se fosilna goriva prestanu koristiti i u svim ostalim sektorima. Elektroenergetska tranzicija, tj. utjecaj konvencionalne proizvodnje i korištenja električne energije potaknulo je razvoj obnovljivih izvora i električnih vozila, a s njima i virtualnih elektrana i virtualnih baterija.

U nastavku rada upoznajemo se s virtualnim elektranama. Virtualne elektrane predstavljaju sustav koji povezuje više decentraliziranih izvora energije, poput solarnih elektrana, manjih vjetroelektrana, kogeneracijska postrojenja, električna vozila i potrošače u jednu koherentnu jedinicu. Virtualna elektrana je sustav koji optimizira tok električne energije između svih spomenutih jedinica te osigurava stabilnost i ravnotežu sustava. Također, virtualna elektrana omogućuje pasivnim korisnicima električne energije da postanu aktivni potrošači u elektroenergetskom sustavu. Krajnji potrošači koji su vlasnici električnog vozila ili imaju instalirane solarne panele na krovovima svojih kuća mogu uz pomoć virtualne elektrane aktivno sudjelovati na raznim tržištima električne energije. Postoji više različitih vrsta virtualnih elektrana. U ovom radu opisana je podjela prema načinu upravljanja virtualne elektrane. U spomenutoj podjeli razlikuju se centralizirane virtualne elektrane, distribuirane virtualne elektrane te potpuno distribuirane virtualne elektrane.

Električno vozilo predstavlja inovativno i održivo rješenje za dekarbonizaciju cestovnog prometa. Električna vozila za svoj pogon koriste elektromotor koji kao izvor energije koriste električnu energiju pohranjenu u bateriji vozila. Postoji više različitih vrsta električnih vozila ovisno o tome je li pogonjena isključivo pomoću elektromotora ili rade u kombinaciji sa motorom s unutarnjim izgaranjem. Implementacijom većeg broja električnih vozila u elektroenergetski sustava dolazi do niza pozitivnih i negativnih utjecaja na sustav. Osim utjecaja na električnu mrežu električna vozila mogu utjecaj na okoliš i ekonomiju. Svi spomenuti utjecaji električnih vozila su opisani u radu.

U slučajevima kada električno vozilo ima mogućnost priključeno na mrežu te je omogućen dvosmjernan tok energije električno vozilo može postati dio virtualne baterije. Virtualna baterija je

koncept koji koristi distribuirane baterije električnih vozila kao fleksibilan resurs za skladištenje i upravljanje električnom energijom. Virtualna baterija transformira električno vozila iz prijevoznog sredstva u dinamički sustav za skladištenje električne energije. U radu su također prikazani i opisani utjecaji virtualne baterije na elektroenergetski sustav. Pametnim upravljanje punjenja električnih vozila virtualna baterija može utjecati na smanjenje opterećenja sustava i pružiti potporu u održavanju stabilnosti sustava.

## 2. Potreba za energetsom tranzicijom

Danas se u svijetu sve više počinju spominjati problemi koji nastaju zbog klimatskih promjena, proizvodnje električne energije iz neobnovljivih izvora energije, zagađenja zraka i sličnih uzroka. Stoga pojam „energetske tranzicije“ postaje sveprisutniji i ključniji u oblikovanju naše budućnosti. Postepene promjene u politici, tehnologiji i društvenim normama svjedoče o prihvaćanju novih energetske paradigmi. Tehnološki napredci u obnovljivim izvorima, pametnim mrežama te tehnologijama pohrane energije u virtualnim baterijama ukazuju na neizbježnost ovog globalnog pomaka ali i da se trenutno već nalazimo u početnoj fazi energetske tranzicije.

### 2.1. Energetska tranzicija

Energetska tranzicija predstavlja put prema održivoj i čistoj energetskej budućnosti. Glavni cilj energetske tranzicije je smanjenje emisije stakleničkih plinova, a samim time i smanjenje klimatskih promjena. Danas se u svijetu gotovo 85% električne energije proizvodi iz neobnovljivih izvora energije, kao što su nafta, ugljen i zemni plin. Sagorijevanjem tih izvora energije emitiraju se velike količine  $CO_2$  koji je najveći uzročnik klimatskih promjena tj. globalnog zatopljenja. Stoga, energetska tranzicija predstavlja prelazak proizvodnje električne energije iz izvora čije sagorijevanje emitira  $CO_2$  na obnovljive i čiste izvore energije kao što su sunce, voda i vjetar. Osim što energetska tranzicija zahtjeva promjenu u proizvodnji električne energije zahtjeva ograničenje upotrebe fosilnih goriva i u svim ostalim aspektima ljudskog života. Veliku ulogu u emitiranju  $CO_2$  ima i automobilska industrija. Stoga će primjena virtualnih baterija u elektroautomobilima igrati veliku ulogu u energetskej tranziciji.

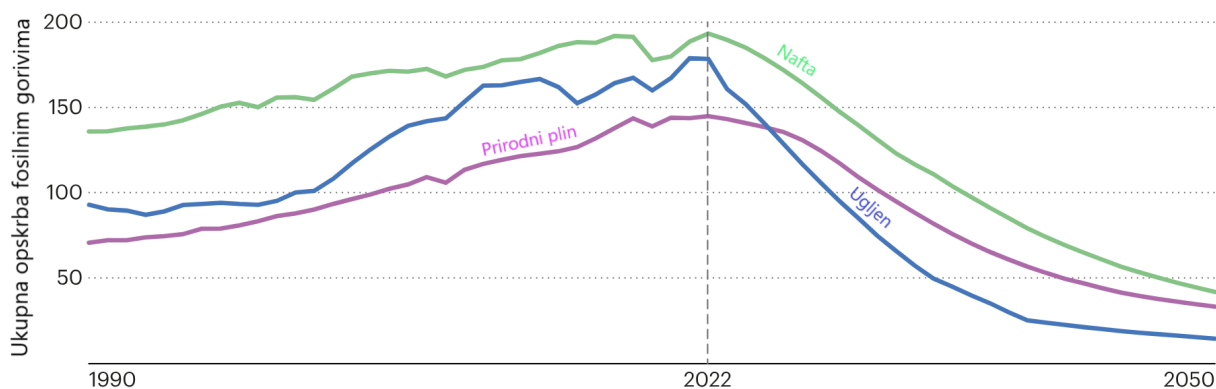
Osnovni razlozi koji su doveli do energetske tranzicije su ograničenost fosilnim gorivima te njihov negativan utjecaj na okoliš.

#### 2.1.1. Ograničenost fosilnim gorivima

Fosilna goriva poput nafte, ugljena i zemnog plina spadaju u neobnovljive resurse što znači da njihove zalihe nisu neograničene. Kako svakim danom globalna potreba za električnom energijom raste postavlja se sve veći pritisak na već ograničene zalihe fosilnih goriva. Također, veliki problem stvara geološki neravnomjerno raspoređene zalihe fosilnih goriva. Značajan dio svjetskih rezervi fosilnih goriva nalazi se na Bliskom istoku, Rusiji i nekim dijelovima Afrike. Stoga je puno država, koje imaju manje zalihe fosilnih goriva, prisiljeno kupovat fosilna goriva za svoje potrebe proizvodnje električne energije. Što može dovesti do visokih cijena fosilnih goriva u nekim državama. Upravo zbog sve manjih zaliha fosilnih goriva javlja se potreba za proizvodnjom električne energije iz izvora kojih imamo u neograničenim zalihama kao što su sunce, voda i vjetar. Takve

izvore nazivamo obnovljivim izvorima energije.

Pozitivna stvar je što potražnja za fosilnim gorivima pada te nema potrebe za novim dugotrajnim projektima bušenja i eksploatacije nafte i zemnog plina, niti za novim ugljenokopima ili proširenjima postojećih rudnika.



Slika 2.1. Ukupna opskrba fosilnim gorivima. Izvor: [1]

Na slici 2.1 prikazana je ukupna opskrba fosilnim gorivima. Prema izvještaju Međunarodne agencije za energiju (IEA), očekuje se značaj pad opskrbe fosilnim goriva u razdoblju od 2022. do 2050. Ovaj trend odražava globalne napore prema smanjenju ovisnosti o fosilnim gorivima kako bi se postigao cilj tranzicije prema održivim izvorima energije. Opskrba fosilnim gorivima u razdoblju od 2022. do 2050. prema Međunarodnoj agenciji za energiju prikazana je u tablici 2.1.

Tablica 2.1. Prikaz opskrbe fosilnim goriva. Izvor: [1]

Godina	2022	2030	2035	2050
<b>Opskrba fosilnim gorivima (EJ)</b>	<b>511</b>	<b>362</b>	<b>237</b>	<b>88</b>
Nafta	189	148	110	42
Prirodni plin	144	118	77	32
Ugljen	179	95	50	15

Iz tablice 2.1 možemo vidjeti kako je najveća potražnja za naftom. Tu krivicu možemo prepisat prometnom sektoru, a unutar njega automobilske industriji. Automobili s unutarnjim izgaranjem zahtijevaju veliku količinu nafte, stoga bi prelazak s takvih automobila na automobile koji koriste električne baterije bio veliki pomak prema čistoj energetskej tranziciji.

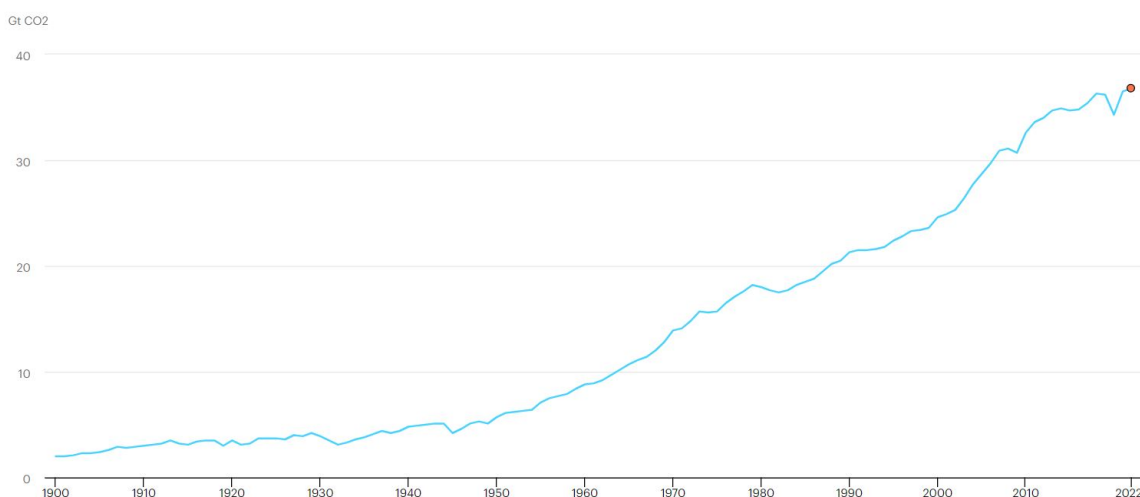
### 2.1.2. Negativan utjecaj fosilnih goriva na okoliš

Još veći problem od ograničenosti fosilnih goriva stvara njihov negativan utjecaj na okoliš. Njihov negativan utjecaj na okoliš može se prepoznati u klimatskim promjenama i kvaliteti zraka. Fosilna goriva negativno utječu na okoliš prilikom njihove ekstrakcije, proizvodnje i korištenja.

Izgradnja rudnika ugljena i naftna bušenja dovodi do uništavanja ekosustava i degradacije tla. Također, eksploatacija fosilnih goriva dovodi do devastacije prirodnih staništa, ugrožavajući brojne biljne i životinjske vrste. Osim toga, nafta bušenja mogu dovesti do velikih prirodnih katastrofa kao što su izlivanje nafte i onečišćenje voda.

Korištenje fosilnih goriva u proizvodnji električne energije dovodi do velikih emisija stakleničkih plinova. Sagorijevanje fosilnih goriva ne samo u proizvodnji električne energije već i u njihovo korištenje u industrijama koje ih koriste kao primarni izvor goriva oslobađaju se velike količine ugljičnog dioksida koji je glavni uzročnik globalnog zatopljenja i klimatskih promjena. Također, izravnim izgaranjem fosilnih goriva dolazi do onečišćenja zraka koji može imati ozbiljne posljedice na ljudsko zdravlje.

I u ovom slučaju idealno rješenje su obnovljivi izvori energije koje smo ranije spomenuli. Uz pomoć kojih bi mogli proizvoditi električnu energiju bez emisija  $CO_2$  i bez zagađenja zraka.

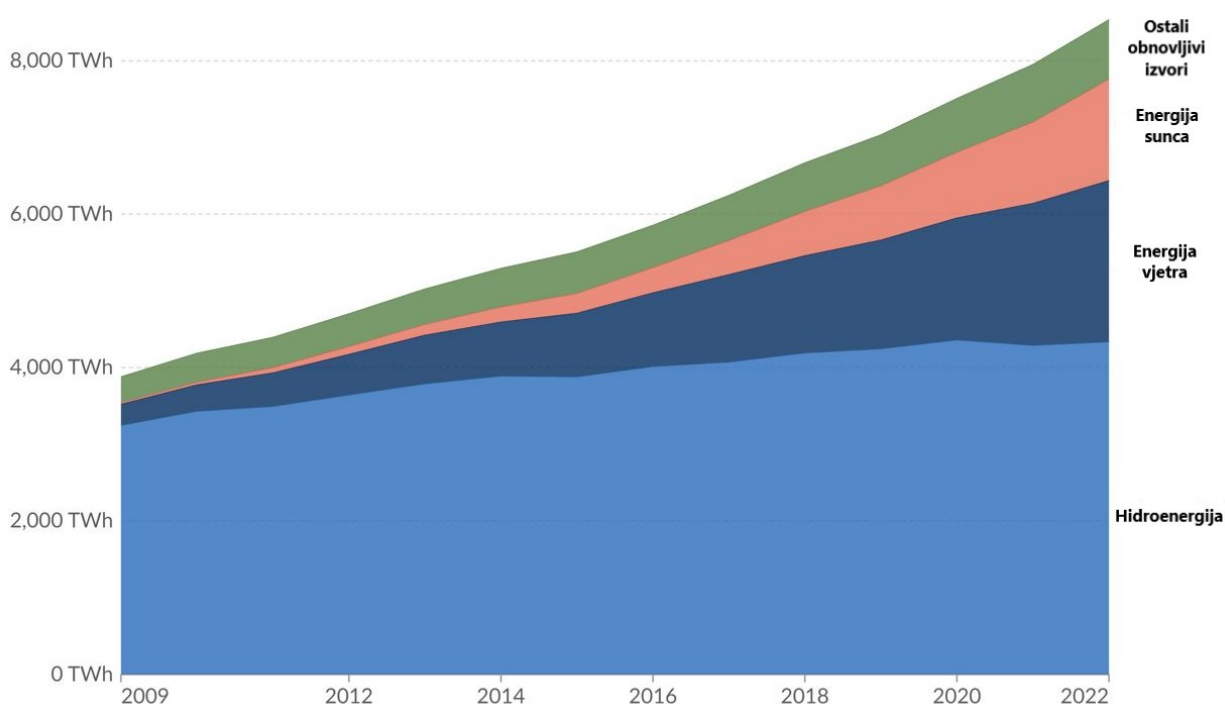


Slika 2.2. Globalne  $CO_2$  emisije. Izvor: [1]

Na slici 2.2 prikazane su globalne emisije  $CO_2$ . Možemo primijetiti da je nakon 2020. godine zabilježen rast emisija  $CO_2$ . Taj porast dogodio se zbog globalne energetske krize koje je djelomično uzrokovana pandemijom COVID-19. Prema Međunarodnoj agenciji za energiju (IEA) 2023. godine zabilježen je porast od 0.9% ili 321 milijuna tona u odnosu na 2022. i tako je dosegnut novi rekord od preko 36.8 milijardi tona emisija  $CO_2$ . Treba napomenuti kako je tokom pandemije COVID-19 zračni promet sveden na minimum te je on najviše utjecao na pad emisija  $CO_2$ . Kako je tokom 2022. zračni promet vraćen u normalu možemo reći kako je polovica povećanje emisija  $CO_2$  tokom 2022. krivac upravo zračni promet. S druge strane tokom 2022. zabilježena je prodaja preko 10 milijuna električnih automobila, što čini oko 14% ukupne prodaje automobila širom svijeta, što je pridonijelo uvelike smanjenju emisija  $CO_2$ .

## 2.2. Inovacije i tehnološki napredak

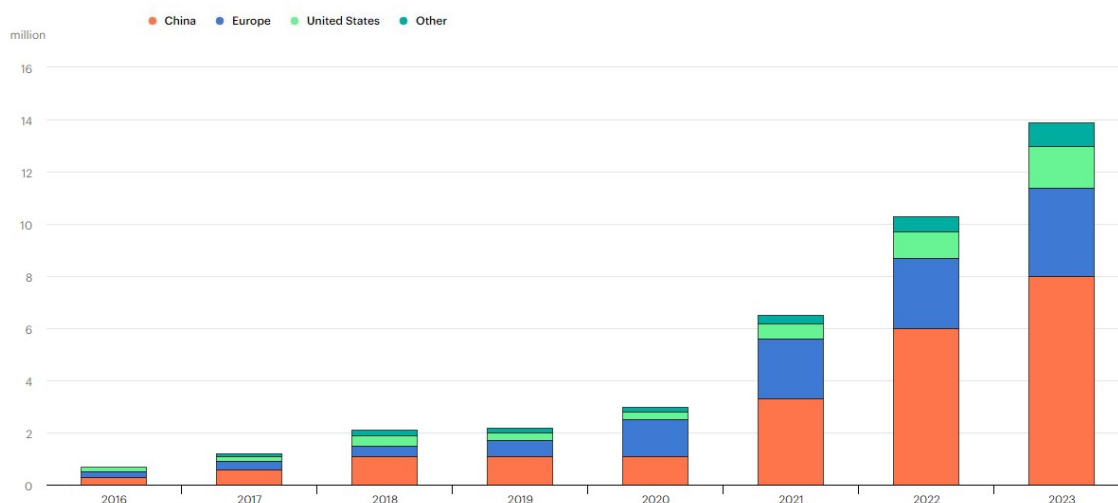
Najveći inovacijski i tehnološki napredak vidljiv je u korištenju obnovljivih izvora energije. U svijetu prvenstveno imamo sve više solarnih elektrana ali i vjetroelektrana, hidroelektrana i geotermalnih elektrana. Ove elektrane trebale bi u budućnosti u potpunosti zamijeniti elektrane na fosilna goriva, što će dovesti do drastičnog smanjenja emisija stakleničkih plinova. Međunarodna agencija za energiju (IEA) očekuje da će izvori sa niskim emisijama činiti gotovo polovicu svjetske proizvodnje električne energije do 2026. godine. Na slici 2.3 prikazane su globalne proizvodnje i pojedinih obnovljivih izvora energije. Možemo vidjeti kako hidroelektrane i dalje najveći obnovljivi izvor energije ali također možemo vidjeti kako vjetroelektrane i solarne elektrane rapidno rastu.



Slika 2.3. Proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora energije. Izvor: [2]

Jedan od najvećih problema koji se javlja prilikom zamjene tradicionalnih izvora energije sa obnovljivima je njihova varijabilnost i uravnoteženje sustava. Sunčevu energiju ne možemo koristiti tokom noći te tijekom ružnog vremena, također vjetroviti dani mogu biti nepredvidivi. Stoga kako bi se osigurala pouzdana opskrba električnom energijom, tijekom perioda kada obnovljivi izvori ne proizvode dovoljno električne energije za naše potrebe, potrebno je osigurati električnu energiju iz nekih drugih izvora ili iz sustava za skladištenje energije. Ovdje bi ključnu ulogu mogli igrati električni automobili u obliku virtualnih baterija. U sustavima gdje je omogućen dvosmjerni tok energije tj. tok energije iz mreže prema automobilima prilikom punjenja te iz baterije automobila prema mreži u slučajevima kada imamo manjak energije u sustavu. Tada bi električni automobili imali ulogu virtualnih baterija te osiguravali stabilnost sustava i održivost korištenja obnovljivih izvora energije. Dakle, u slučajevima kada je električni automobil spojen na sustav preko punjača

on može imati ulogu sustava za skladištenje energije. Kada u sustavu nedostaje električne energije sustavu bi taj manjak mogao nadomjestiti sa električnom energijom pohranjenom u bateriji električnog automobila. Naravno kako bi takav sustav funkcionirao potrebno je imati veliki broj električnih automobila koji su spojeni na sustav ali i pametne mreže koje će omogućiti dvosmjernan tok energije. Ohrabrujuće je da potražnja za električnim automobilima svake godine raste. Na slici 2.4 prikazan je broj novih električnih automobila prodanih svake godine. Možemo vidjeti kako taj broj svake godine raste.



Slika 2.4. Broj novih električnih automobila prodanih godišnje. Izvor: [1]

Sustavi koji omogućuju dvosmjernu komunikaciju između potrošača i proizvođača električne energije nazivamo pametnim mrežama (eng. smart grids). Razvoj takvih sustava biti će ključan za integraciju obnovljivih izvora i električnih automobila kao sustava za skladištenje energije u elektroenergetski sustav. Na kraju takvi sustavi rezultirat će učinkovitijim, sigurnijim i fleksibilnijim elektroenergetskim sustavom.

### 2.3. Promjene potrošača i subvencije

"Koncept nove energetike na određeni način briše čvrstu granicu između formalne energetike i kupaca, jer će se na razini kupaca događati proizvodnja energije. Osim toga, digitalizacija energetike omogućit će značajno veće mogućnosti upravljanja proizvodnjom i potrošnjom energije, veću participaciju građana/kupaca u izboru rješenja vlastite energetike. Sustav obrazovanja i informiranja kupaca o najboljoj praksi i mogućnostima treba podignuti na višu razinu." [3]

Potrošači bi u novom energetskom sustavu trebali imati jednu od ključnih uloga. Kao što smo već rekli nove pametne mreže omogućiti će dvosmjernan tok energije odnosno omogućit će potrošačima da svoj višak energije predaju u elektroenergetski sustav. Na taj način ćemo i mi kao krajnji korisnici električne energije moći sudjelovati na tržištu električne energije kao proizvođač, a ne

samo kao kupac električne energije. Krajnji korisnici koji recimo imaju instalirane solarne panele na svojem krovu ili su vlasnici električnog automobila moći će aktivno sudjelovati u održavanju stabilnosti elektroenergetskog sustava.

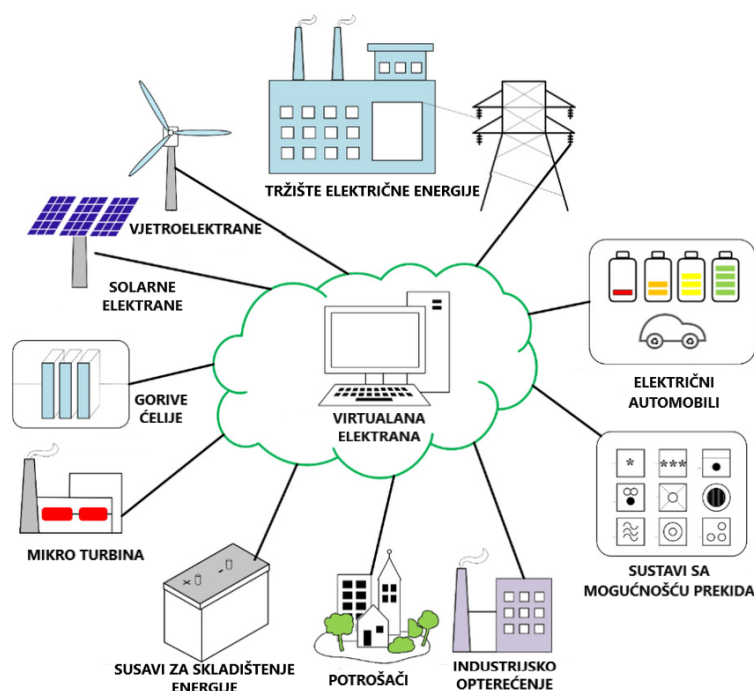
Kao što smo mogli vidjeti na slici 2.4 najveći dio električnih automobila prodaje se u Kini. Kina je u 2022. bila odgovorna za 60% novih registracija električnih automobila u svijetu. Taj snažan rast dogodio se zbog kontinuirane političke podrške novim vlasnicama električnih automobila. Također, Kina je produljila poticaje za kupnju novih automobila koji su prvotno bili planirani do 2020. godine do kraja 2022. godine. Europa je 2022. godine ostala drugo najveće tržište za električne automobile. Očekuje se nastavak rasta prodaje električnih automobila u Europi posebice zbog novih paketa mjera koja je uvela Europska unija. Jedan od tih paketa je „Fit for 55“ kojim je Europska unija postavila strože standarde za emisije  $CO_2$  za razdoblje od 2030. do 2034. godine te ciljaju na 100% smanjenje emisija  $CO_2$  za nova osobna i dostavna vozila do 2035. godine. Također, u razdoblju od 2025. do 2029. planiraju se uvesti poticajni mehanizmi za proizvođače koji postignu udio od 25% u prodaji automobila sa nultom emisijom.



### 3. Virtualna elektrana

U budućnosti će tradicionalni pasivni korisnici postati aktivni potrošači u elektroenergetskom sustavu te će moći aktivno upravljati svojom potrošnjom, proizvodnjom i pohranom energije. U elektroenergetskom sustavu se svakog dana uvode nove tehnologije te se povećava broj distribuiranih izvora energije koje još nazivamo i DER-ovima (engl. Distributed Energy Resources). To dovodi do potreba za novim sustavima upravljanja koji će osigurati fleksibilnost i ravnotežu energetskog sustava. Jedan od takvih sustava je virtualna elektrana (eng. Virtual Power Plant – VPP). Virtualna elektrana je sustav koji povezuje više decentraliziranih izvora energije koji se ne moraju nalaziti na istom geološkom području u jednu cjelinu te se njima upravlja kao jedna koherentna jedinica. Dakle, virtualne elektrane povezuju solarne panele postavljene na krovovima kuća, manje vjeroelektrane, kogeneracijska plinska postrojenja, sustava za skladištenje energije i električne automobile te osigurava optimalan tok električne energije u sustavu.

S povećanjem proizvodnje električne energije iz vjetera i solarnih fotonaponskih sustava dolazi do nestabilnosti i neuravnoteženja elektroenergetskog sustava. Kao što znamo većina obnovljivih izvora su ovisni o vremenskim prilikama na koje mi ne možemo utjecati. Dakle, u jednom danu možemo imati puno električne energije proizvedene iz fotonaponskih sustava ali već sljedeći dan ta proizvodnja može pasti na nulu. Stoga nam je potreban sustav kao što je virtualna elektrana koja će osigurati da nedostatak proizvodnje, u ovom slučaju iz fotonaponskih sustava, nadomjesti iz nekog drugog izvora. Na slici 3.1 shematski je prikazana jedna virtualna elektrana.



Slika 3.1. Prikaz virtualne elektrane. Izvor: [4]

"Konkretnije, prema IEC standardu (IEC TS 63189-2), VPP se definira kao stranka ili sustav koji ostvaruje agregaciju, optimizaciju i kontrolu decentraliziranih generacija, uređaja za pohranu energije i upravljivih opterećenja, koji se ne moraju nužno nalaziti na istom geografskom području, i olakšavaju aktivnosti u operacijama elektroenergetskog sustava i tržištu električne energije." [5] Sa slike 3.1 možemo vidjeti koje sve sustave i tehnologije mora sadržavati virtualna elektrana. Neki od ključnih tehnološki komponenti od kojih se sastoji virtualna elektrana su:

- **Obnovljivi izvori energije:** Najčešći obnovljivi izvori koji se pojavljuju unutar virtualne elektrane su solarne fotonaponske elektrane i vjetroelektrane. Osim njih unutar virtualne elektrane mogu se pojavljivati i hidroelektrane, elektrane na biomasu i kogeneracijska postrojenja, ove elektrane pružaju veću fleksibilnost sustava. Obnovljivi izvori energije trebali bi biti osnova za proizvodnju električne energije u VPP-u.
- **Sustavi za skladištenje energije:** Sustavi za skladištenje energije omogućuju skladištenje viška energije iz obnovljivih izvora ali i korištenje te energije u trenutcima kada obnovljivi izvori ne proizvode dovoljno električne energije. Na taj način osiguravaju stabilnost sustava u trenucima kada obnovljivi izvori energije ne proizvode dovoljno energije. Postoje više različitih sustava za skladištenje energije. Najčešće su to baterije ali tu spadaju i superkondenzatori, termalni spremnici, pumpe za pohranu vode, vodikovi spremnici i mnogi drugi. Svaki od ovih spremnika ima svoje prednosti i nedostatke, ovisno o potreba i uvjetima VPP.
- **Električni automobili:** Integracija električnih automobila u VPP-u donosi još veću fleksibilnost sustava. Električni automobili mogu imati istu ulogu kao sustavi za skladištenje energije u slučajevima kada su preko punjača spojeni na VPP. U slučajevima kada imamo višak energije iz obnovljivih izvora možemo tu energiju koristiti za punjenje baterije električnog automobila dok u slučajevima kada nam fali energije u sustavu možemo koristiti energiju pohranjenu u bateriji automobila.
- **Upravljanje sustava:** Kako bi se omogućilo upravljanje i nadzor svih sustava, DER-ova i ostalih dijelova VPP potrebni su brojni softverski alati i sustavi. Ti sustavi osiguravaju optimalan rad virtualne elektrane. Neki od njih su:
  - EMS (Energy Management System) sustav upravlja proizvodnjom iz obnovljivih izvora energije, upravlja sustavima za pohranu energije te svim ostalim sustavima koje se nalaze unutar VPP. EMS optimizira raspodjelu električne energije unutar sustava kako bi se postigla maksimalna energetska učinkovitost i profitabilnost.
  - SCADA sustavi (Supervisory Control and Data Acquisition) omogućuju praćenje o proizvodnji i potrošnji energije, o tokovima snaga, o stanju opreme i svim drugim važnim parametrima unutar VPP u stvarnom vremenu.
 Osim ovih sustava imamo razne druge sustave za praćenje i analizu podataka, automatizacijske procese i sustave koji koriste složene algoritme koji mogu predviđati buduću potrošnju i proizvodnju unutar VPP.

- **Komunikacijska tehnologija:** Jedan od važnijih aspekta VPP je osigurati brzu i pouzdanu razmjenu podataka između svih resursa unutar VPP. To nam omogućuju komunikacijska tehnologija. Osnovni dijelovi komunikacijske tehnologije su: bežične mreže, mrežna infrastruktura i razni komunikacijski protokoli. Također, jedan od važnijih komunikacijskih tehnologija su pametna brojila. Pametna brojila omogućuju dvosmjernu komunikaciju između potrošača i mreže. Pametna brojila mjere potrošnju energije u realnom vremenu, što VPP daje informaciju o trenutnom stanju u mreži i omogućava optimalno upravljanje distribucijskim izvorima energije. Još jedan od važnijih dijelova komunikacijskih tehnologija je cyber sigurnost. Budući da se unutar VPP-a nalaze osjetljivi podaci koji su bitni za osiguravanje stabilnosti sustava važno je osigurati visoku razinu sigurnosti komunikacijskih sustava. To uključuje implementaciju enkripcije podataka, autentifikaciju korisnika, praćenje i detekciju neovlaštenih aktivnosti te redovito ažuriranje sigurnosnih mjera.

### 3.1. Vrste virtualnih elektrana

Postoji više različiti podjela virtualnih elektrana. Najznačajnija je podjela prema načinu upravljanja. Ovu podjelu ćemo kasnije malo više opisati.

Osim prema načinu upravljanja virtualne elektrane možemo podijeliti i prema:

- **Vrsti resursa:** Najviše električne energije unutar virtualne elektrane proizvodi putem obnovljivih izvora ali osim njih virtualne elektrane mogu se temeljiti i na konvencionalnim izvorima energije kao što su plinske elektrane i termoelektrane.
- **Kapacitetu:** Ovisno o broju povezanih potrošača i instaliranih izvora energije unutar virtualne elektrane ovisit će i kapacitet s kojim raspolaže virtualna elektrane. Stoga ih možemo podijeliti na male, srednje ili velike virtualne elektrane.
- **Lokaciji:** Virtualna elektrana može upravljati potrošačima i izvorima energije koji se nalaze na malom prostoru takve virtualne elektrane nazivamo lokalne. Dok u slučaju kada se izvori energije ne nalaze u blizini potrošača već se protežu na većem geografskom području virtualnu elektranu nazivamo regionalnom.

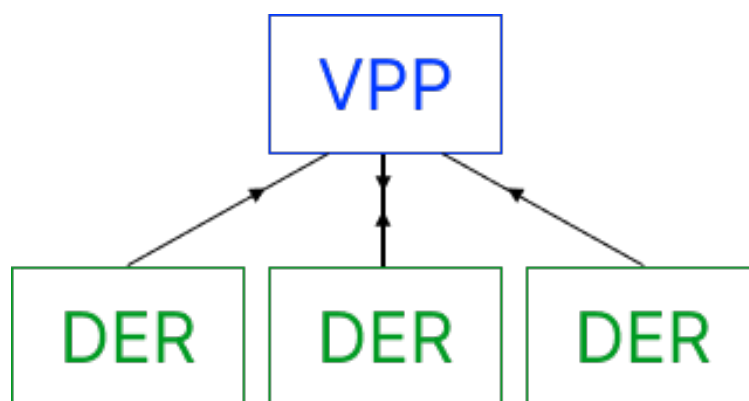
#### 3.1.1. Vrste upravljanja virtualnim elektranama

Upravljanje virtualnim elektranama može se podijeliti na tri osnovne vrste, koje odražavaju različite arhitekture i metode nadzora nad distribuiranim izvori energije (DER-ovima). Te vrste uključuju centralizirane virtualne elektrane, distribuirane virtualne elektrane i potpuno distribuirane virtualne elektrane.

## Centralizirane virtualne elektrane

Kao što joj i samo ime kaže ove vrste elektrane ima jedno centralizirano mjesto iz kojeg se provodi kontrola i nadzor svih distribucijskih izvora energije (DER-ova) u sustavu. Centralizirane virtualne elektrane imaju jednu središnju točku nadzora koja koordinira aktivnošću svih potrošača i izvora energije unutar virtualne elektrane.

U ovakvom sustavu svi distribucijski izvori energije, poput solarnih panela, vjetroelektrana, baterija, električnih automobila i drugih, povezani su putem mrežnih veza sa središnjom jedinicom za upravljanje. Na taj način središnja jedinica za upravljanje može pratiti stanje i performanse svakog izvora i svakog potrošača te optimizirati njihovu potrošnju ili proizvodnju. Također, to omogućuje virtualnoj elektrani održavanje stabilnosti elektroenergetskog sustava i aktivno sudjelovanje na tržištu električne energije. Na slici 3.2 shematski je prikazana centralizirana virtualna elektrana.



Slika 3.2. Prikaz centralizirane virtualne elektrane. Izvor: [6]

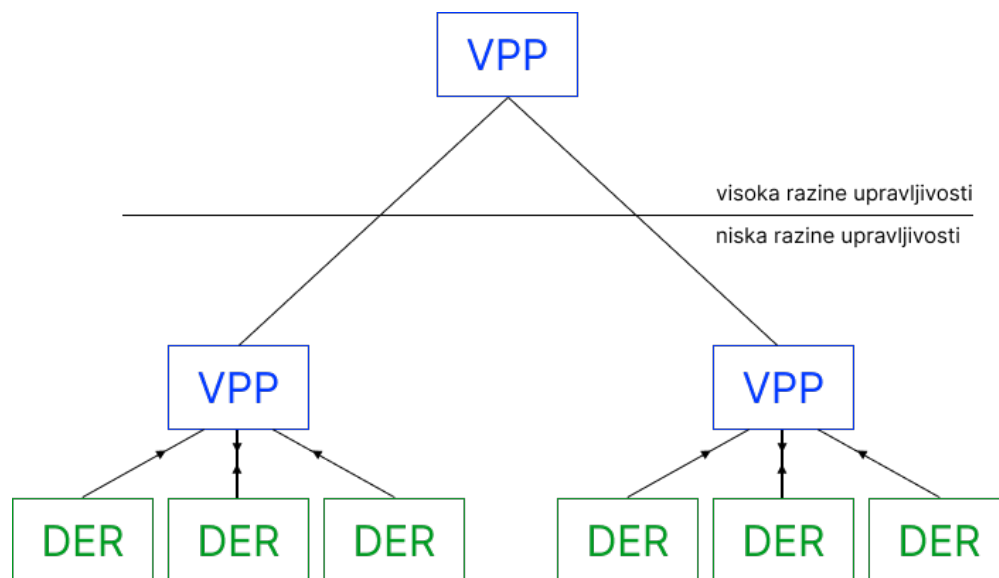
Najveća prednost ovakvog sustava upravljanje je što se svim distribucijskim izvorima energije upravlja s jednog mjesta. To dovodi do optimalizacije proizvodnje i potrošnje električne energije te do minimalizacije troškova. Također, ova vrsta upravljanja omogućuje brzu reakciju sustava prilikom promjene potrošnje te do brzog izjednačenja potrošnje i proizvodnje što dovodi do stabilnosti elektroenergetskog sustava. Naravno ova vrsta upravljanja ima i svoje nedostatke. Centralizirani sustavi zahtjevu dobru komunikacijsku mrežu kako bi se osigurala sigurna i brza komunikacija središnje jedinice sa potrošačima i izvorima energije. Uz to ovakav sustav ovisan je o samo jednoj središnjoj jedinici. Dakle, kvar u središnjoj jedinici može imati utjecaj na cjelokupan rad svih jedinica virtualne elektrane.

## Distribuirane virtualne elektrane

Za razliku od centraliziranih sustava kod distribuiranih sustava upravljanje se odvija na lokalnoj razini. Distribuirani izvori energije kod ovih sustava imaju određenu autonomiju u donošenju odluka i upravljanja. Dakle, svaki energetske resurs, poput solarnih panela, sustava za skladištenje energije, električnih automobila ili potrošača, ima određenu autonomiju u donošenju odluka o

svojoj potrošnji, proizvodnji i skladištenju energije.

U ovom sustavu postoje dvije razine upravljanja. Prva razina je niža razina upravljanja u kojoj distribuirani izvori energije mogu samostalno donositi određene odluke. Ova razina upravljanja nadzire i kontrolira rad manji broj distribuiranih izvora energije te joj to omogućuje brže reakcije i prilagodbe na lokalne uvjete i zahtjeve. Druga razina je viša razina upravljanja i ona upravlja svim distribuiranim izvorima energije unutar virtualne elektrane. Također, ova razina upravljanja nadzire i kontrolira rad svih nižih razina upravljanja. Shematski prikaz distribuirane virtualne elektrane možemo vidjeti na slici 3.3.



Slika 3.3. Prikaz distribuirane virtualne elektrane. Izvor: [6]

Najveća prednost ovakvog sustava je što se povećava autonomiju distribuiranih izvora energije. Distribuirani izvori energije sami prate i kontroliraju svoju potrošnju i proizvodnju što dovodi do optimizacije potrošnje i proizvodnje na lokalnoj razini. Također, na taj način se smanjuju gubitci energije u sustavu. Uz to distribuirano upravljanje osigurava veću fleksibilnost i ravnotežu sustava jer se sve odluke dovode na temelju stvarnih lokanih uvjeta. Uvođenjem više razina upravljanja dovodi do složenijeg sustava. Složeniji sustav zahtjeva napredne sustave za nadzor i upravljanje. Uz to svaki distribuirani izvor je drugačiji i zahtjeva drugačije algoritme i sustave prilikom upravljanja što dodatno povećava složenost sustava. Na primjer, svaki solarni panel postavljen na krovu kuće imati će drugačiju količinu proizvedene električne energije ovisno o vremenskim uvjetima i položaju, dok električna vozila mogu imati različite kapacitete baterija te različito vrijeme punjenja i pražnjenja. Također, distribuirani sustavi zahtijevaju još naprednije komunikacijske sustave u odnosu na centralizirane sustave jer se mora osigurati dobra komunikacije i koordinacija između pojedinih distribuiranih izvora, a ne samo između jedinice za upravljanje i distribuiranih izvora.

## Potpuno distribuirane virtualne elektrane

Potpuno distribucijski sustav upravljanja je sustav u kojem svaki resurs odnosno svaki distribucijski izvor energije djeluje potpuno autonomno. U ovom sustavu nemamo središnje jedinice ili upravljačkog centra već svaki resurs donosi odluke o svojoj potrošnji, proizvodnji i skladištenju energije. Distribucijski izvori energije na temelju lokalnih mjerenja i informacija kontroliraju tok energije te održavaju svoju stabilnost tj. održavaju jednakost u svojoj proizvodnji i potrošnji električne energije.

Primjer potpuno distribuiranog sustava upravljanja može biti kuća koja je opremljena sa solarnim panelima na krovu, baterija za skladištenje energije i pametnim uređajima za mjerenje trenutne potrošnje. U ovam slučaju takva jedinica djeluje potpuno neovisno od ostatka sustava ili drugih kuća. Na temelju informacija iz pametnih brojila sustav donosi odluke o tome dali će proizvedenu električnu energiju koristiti trenutno ili će je pohraniti u baterije te je kasnije iskoristiti. Jedan takav sustav prikazan je na slici 3.4. Na slici 3.4 možemo vidjeti sustav koji se sastoji od solarnih panela i baterija za pohranu energije. U slučajevima ako solarni paneli uz pomoć baterija mogu proizvesti dovoljno energije za pokrivanje vlastite potrošnje kuće možemo reći kako ta kuća djeluje kao vlastita mala virtualna elektrana.



Slika 3.4. Prikaz potpuno distribuirane virtualne elektrane. Izvor: [7]

Prednost ovog sustava je potpuna autonomnost distribuiranih izvora energije. Također, ta autonomnost povećava fleksibilnost i prilagodljivost prilikom upravljanja energije prema lokalnim potrebama i uvjetima. Još jedna od prednosti ovog sustava je ta što kvar u jednom od distribuiranih izvora energije ne utječe na rad ostalih izvora ili na rad sustava. Nedostatak ovog sustava upravljanja je nedostatak centralizirane jedinice koja omogućuje koordinaciju i komunikaciju između distribuiranih izvora energije. Iz razloga što svaki distribuirani izvor radi sam za sebe može doći do neoptimalnog korištenja resursa. Jedna samostalna jedinica može proizvoditi previše energije

dok druga jedinica koja se može nalaziti u blizini može upravo trebati tu energiju. Prijenos energije između tih dviju jedinica je nemoguć upravo iz razloga jer ne postoji nikakva središnja jedinica ili komunikacija između te dvije jedinice. To dovodi i do smanjenja učinkovitosti sustava. Sustav na ovaj način teže raspolaže energijom u sustava te se teže prilagođava na promjene u potrošnji i proizvodnji energije. Također, jedan od nedostataka je taj što su distribuirani izvori energije većinom ovisni o vremenskim uvjetima. Stoga u nekim situacijama može doći do nestabilnosti u sustavu.

Kao što smo mogli vidjeti svaki od ovih opisanih sustava upravljanja virtualnim elektranama ima svoje prednosti i nedostatke. Ovisno o topologiji mreže i uvjetima u mreži potrebno je odabrati optimalan sustav kako bi se što više smanjili gubici energije, povećala učinkovitost te smanjile emisije CO<sub>2</sub>.

### **3.2. Virtualna elektrana na tržištu električne energije**

Uvođenje obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sustav dovodi do liberalizacije tržišta električne energije. Liberalizacija tržišta električne energije znači prelazak sa monopolnog vertikalno-integriranog tržišta na konkurentno otvoreno tržište. U vertikalno-integriranom sustavu postoji jedan veliki energetska dobavljač koji ima monopol nad proizvodnjom, distribucijom i prodajom električne energije. To ograničava konkurenciju i fleksibilnost tržišta. Stoga je potrebno stvaranje slobodnog konkurentnog tržišta na kojem mogu sudjelovati i mali proizvođači, distributeri i potrošači električne energije.

Proces liberalizacije te uvođenje slobodnog konkurentnog tržišta već je implementiran u većini država svijeta. Liberalizacija energetskeg sektora dovodi do učinkovitijeg korištenja energije, pomaka prema korištenju čistih energenata i tehnologija, smanjenju gubitaka i ono najbitnije za potrošače liberalizacija dovodi do smanjenja cijene električne energije. U novonastalom sustavu više ne postoji jedan veliki dobavljač električne energije koji je imao monopol nad proizvodnjom, distribucijom i prodajom električne energije već su prijenos, distribucija i trgovina električnom energijom odvojeni i djeluju neovisno.

Liberalizacija uključuje razdvajanje energetskeg tvrtki na proizvodne, distribucijske i prodajne entitete te uspostavu regulatornih tijela koja nadgledaju tržište kako bi osigurala poštene i transparentne uvjete za sve sudionike. Proces liberalizacije možemo pogledati na primjeru Hrvatske, gdje je vertikalno integrirano poduzeće HEP razdvojen na više tijela kao što su HEP proizvodnja, HOPS, HEP ODS i HEP opskrbu te su osnovana dva regulatorna tijela: Hrvatska energetska regulatorna agencija (HERA) i Hrvatski operater tržišta energije (HROTE).

U okviru liberalizacije tržišta, virtualna elektrana ima sposobnost integracije distribuiranih izvora energije poput obnovljivih izvora, sustava za skladištenje i električnih automobila u elektroenergetski sustav te da pruži fleksibilnost u upravljanju potražnjom i potrošnjom električne energije. "Virtualne elektrane su objedinjeni virtualni agregati proizvođača i opterećenja raspoređeni po zemljopisno velikim područjima, a njima se upravlja kao jedinstvenim velikim postrojenjem kako bi se ukupnim proizvodnim kapacitetom moglo sudjelovati u djelatnostima tržišta električne ener-

gije te kako bi se mogle predstaviti ponude kupnje i prodaje na burzama, s ciljem maksimizacije profita vlasnika postrojenja (u ekonomskom pogledu). Virtualne elektrane mogu imati i mogućnost potpisivanja ugovora o opskrbi za pružanje pomoćnih usluga, što pojedinačni distribuirani izvori energije nisu uvijek u mogućnosti." [8]

Virtualna elektrana predstavlja vlasnike distribuiranih izvora energije na veleprodajnom tržištu električne energije te im omogućuje sudjelovanje na različitim tržištima električne energije kao što su: terminska tržišta (eng. „futures and forward market“), na tržištu dan unaprijed (eng. Day-ahead market), na zamjenskim tržištima, tržištu u stvarnom vremenu (eng. Real-Time Market) i mnogim drugim tržištima električne energije.

### **Terminsko tržište**

Postoje dvije vrste terminskih tržišta, terminsko izvanburzovno tržište (eng. forwards) i terminski burzovno tržište (eng. futures). Terminska tržišta (eng. futures and forward) su financijska tržišta na kojem se sklapaju ugovori koji obvezuju kupca ili prodavatelja da dogovorenu količinu robe, u našem slučaju određenu količinu električne energije, kupe ili prodaju određenog datuma po unaprijed dogovorenoj cijeni.

Na terminskom burzovnom tržištu (eng. forward) trguje se standardiziranim ugovorima koje nazivamo „futures ugovorima“. Na tim ugovorima unaprijed je točno definiran datum isporuke te je standardizirana količina električne energije i cijena električne energije koja se kupuje ili prodaje. Terminska izvanburzovna tržišta (eng. „forward“) nemaju standardizirane ugovore već su ugovori fleksibilniji te se prilagođavaju potrebama kupca ili prodavatelja električne energije.

Ova tržišta električne energije virtualna elektrana koristi kako bi se zaštitila od fluktuacije cijena. Sklapanjem ovih ugovora virtualna elektrana osigurava stabilnost mreže u budućnosti ali se i štiti od nepovoljnih promjena cijena električne energije u budućnosti. Također, ovi ugovori pomažu virtualnoj elektrani u planiranju proizvodnje u budućnosti te minimizira troškove električne energije i ostvaruje profit.

Unutar terminskog tržišta moguće je trgovati uz pomoć opcijskih ugovora. „Opcijski ugovor terminskog burzovnog tržišta predstavlja oblik osiguranja koji daje opcijском kupcu pravo, ali ne i obvezu, da kupi (proda) terminski burzovni ugovor po određenoj cijeni. Postoje dvije vrste opcijskih ugovora, tj. načina trgovanja opcijama:" [9]

- Kupovna opcija (eng. „call options – calls“) daje pravo ovlašteniku da kupi temeljnu imovinu određenog datuma za određenu cijenu.
- Prodajna opcija (eng. „put options – puts“) daje pravo ovlašteniku da proda temeljnu imovinu određenog datuma za određenu cijenu.

Opcijski ugovori daju virtualnoj elektrani još veću fleksibilnost i veće mogućnosti prilikom upravljanja rizicima na tržištu električne energije.



## **Bilateralni ugovori**

Bilateralni ugovori postaju popularni sa sve većim uvođenjem obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sustav. Ovi ugovori sklapaju se izvan organiziranog tržišta električne energije poput burze ili forward tržišta. Bilateralni ugovori sklapaju se direktno između proizvođača električne energije, u našem slučaju to može biti virtualna elektrana, i kupca električne energije. Kupac i prodavač se putem ovog ugovora dogovore o cijeni električne energije, trajanju ugovora i količini električne energije koja mora biti isporučena do određenog roka.

Bilateralni ugovori osiguravaju virtualnoj elektrani stabilnost prihoda. Sklapanjem bilateralnog ugovora s kupcima električne energije virtualna elektrana je osigurala da će svu proizvedenu energiju prodati po unaprijed dogovorenoj cijeni. Na taj način virtualna elektrana je osigurala sigurne prihode i smanjila rizik od fluktuacije cijena na tržištu električne energije. Također, budući da je već unaprijed dogovorena isporuka električne energije virtualna elektrana može planirati proizvodnju električne energije što dovodi do optimizacije proizvodnje električne energije. Činjenica da se ovi ugovori sklapaju direktno između proizvođača i potrošača električne energije omogućuje virtualnoj elektrani da sklapa ugovori različitim vrstama kupaca te da bude konkurentna na tržištu električne energije.

## **Zamjensko tržište**

"Na zamjenskom tržištu ugovori se zaključuju supstitucijom, tj. razmjenom fizičkih ili financijskih obveza. Zamjena je uobičajeni sporazum na temelju kojega je pojedinac trgovac spreman trgovati sa svojim kuponskim plaćanje za ono što ima drugi subjekt koji je uključen u konkretan zamjenski posao.“[9] Ovo tržište omogućuje virtualnoj elektrani da sama nađe drugog trgovca koji će za nju obaviti isporuku električne energije. Dakle, ovo tržište virtualna elektrana koristi u slučaju kada postoji opcija da drugi proizvođač brže, jeftinije ili sa manjim gubitcima isporuči električnu energiju.

## **Tržište rezervne snage**

Tržište rezervne snaga je tržište na kojem se trguje električnom energijom kojom se osigurava stabilnost sustava. Ova tržišta osiguravaju dodatne kapacitete za brzo reagiranje u neočekivani slučajevima kako bi osigurali pouzdan rad elektroenergetskog sustava. Virtualne elektrane na ovom tržištu sudjeluju jer mogu brzo reagirati u slučajevima kada je potrebna dodatna snaga za održavanje ravnoteže sustava. Također, virtualne elektrane mogu vrlo brzo prilagoditi svoju proizvodnju i potrošnju energije te i na taj način osigurati stabilnost sustava. Sudjelujući na tržištu rezervi virtualna elektrana može osigurati dodatne prihode budući da može brzo svoje zalihe energije dati na raspolaganje na tržištu rezervi.

## Tržište dan unaprijed

Kao što mu i samo ime kaže na tržištu dan unaprijed trguje se električnom energijom za sljedeći dan. Virtualna elektrana izrađuje dijagram opterećenja na temelju potrošnje električne energije iz prošlosti, uzimajući u obzir koji je dan u tjednu, vremenske uvjete, radne aktivnost i mnoge druge parametre. Dijagram opterećenja prikazuje potrošnju električne energije u intervalima od jednog sata. Na temelju tih dijagrama virtualna elektrana planira svoju proizvodnju i potrošnju električne energije za idući dan te može aktivno sudjelovati na tržištu dan unaprijed. U slučajevima kada virtualna elektrana na temelju dijagrama opterećenja za idući dan procjeni da će imati višak proizvedena energije može sudjelovati na tržištu dan unaprijed kao prodavač. Dok u slučaju kada na temelju dijagrama opterećenja procjeni da će joj biti potrebna električna energija za idući dan može sudjelovati na tržištu dan unaprijed kao kupac.

## Tržište uravnoteženja u stvarnom vremenu

Na tržištu uravnoteženja u stvarnom vremenu trguje se električnom energijom koja osigurava trenutačnu ravnotežu između proizvodnje i potrošnje električne energije. Ovo tržište omogućuje brzu reakciju na promjene u potražnji ili proizvodnji električne energije u stvarnom vremenu, što je ključno za održavanje stabilnosti elektroenergetskog sustava. Kao što znamo velika prednost virtualnih elektrana je upravo sposobnost brze reakcije na promjenu u proizvodnji ili potrošnji električne energije. Stoga virtualne elektrane imaju veliku ulogu na tržištu uravnoteženja u stvarnom vremenu. Uz to velika fleksibilnost koju ima virtualna elektrana joj također omogućuje da upravlja svojim resursima kako bi se prilagodila trenutačnim potrebama tržišta. To uključuje mogućnost optimizacije raspodjele energije između različitih izvora i potrošača kako bi se osigurala stabilnost elektroenergetskog sustava.

Virtualne elektrane i uz pomoć ovog tržišta mogu osigurati dodatne prihode budući da mogu ponuditi različite pomoćne usluge na tržištu uravnoteženja u stvarnom vremenu, poput frekvencijske regulacije ili balansiranja napona.

Sva navedena tržišta električne energije omogućuju virtualnoj elektrani različite pogodnosti i uvjete trgovanja. Ovisno o uvjetima na tržištu električne energije virtualna elektrana mora što optimalnije odabrati vrstu tržišta i vrstu ugovora s kojim će trgovati električnom energijom kako bi osigurala što jeftiniju električnu energiju za svoje potrošače ali opet osigurati stabilnost sustava i svesti gubitke električne energije na minimum.

### 3.3. Područje primjene virtualnih elektrana

Virtualna elektrana ima razne aplikacije u elektroenergetskom sustavu. Već smo ranije spomenuli kako virtualna elektrana povezuje brojne distribuirane izvore energije u jednu integriranu

cjelinu. Ta integracija omogućuje virtualnoj elektrani da optimalno upravlja svim distribuiranim izvorima te pruža elektroenergetskom sustavu različite usluge. Neke od tih usluga su: fleksibilnost i stabilnost mreže, upravljanje proizvodnje i potrošnje u vršnim opterećenjima, skladištenje energije za kasniju upotrebu, participaciju na tržištu električne energije i mnoge druge usluge.

Razvojem obnovljivih izvora energije te novih tehnologija unutar energetskog sustava dovelo je i do razvoja virtualnih elektrana. Mnoge tvrtke počele su razvijati ali i primjenjivat sustav virtualnih elektrana kako bi optimizirale svoju potrošnju i proizvodnju energije, smanjile gubitke električne energije i smanjile emisije stakleničkih plinova. Budući da virtualna elektrana može pridonijeti poboljšanju elektroenergetskog sustava na različite način svaka tvrtka razvija i koristi virtualnu elektranu na različite načine. Samo neke od tvrtki koje su aktivno uključene u razvoj i korištenje virtualnih elektrana su: Siemens, Bosch, Next Kraftwerke i ABB.

### **Virtualna elektrana tvrtke Siemens**

Siemens je globalno tehnološka tvrtka, osnovana u Njemačkoj koja se bavi razvojem i proizvodnjom električne opreme poput: solarnih panela, vjetroagregata, sustava za pohranu energije i pametnih mreža. Također, tvrtka Siemens počela je razvijati vlastiti sustav virtualnih elektrana. Siemens je stvorila novi poslovni model virtualnih elektrana koji se naziva Vibeco (Virtualno Ekosustav Zgrada). Vibeco je inovativan pristup koji se koristi za povećanje koristi decentraliziranih energetskih sustava. Srce virtualne elektrane je softverska platforma kojom upravlja Siemens, koja inteligentno balansira električna opterećenja zgrada spojenih u mikroelektranu, uključujući obnovljivu energiju i pohranu energije. Ovaj novi sustav počeo se primjenjivati u Finskoj. Vibeco omogućuje povezivanje malih električnih opterećenja zgrada ili industrijskih lokacija u jednu integriranu cjelinu, tako da operateri zgrada mogu prodavati energiju na tržište rezervi, s krajnjim ciljem povećanja fleksibilnosti cjelokupnog tržišta električne energije. Usluga virtualne elektrane pomaže u balansiranju potrošnje električne energije, smanjuje potrebu za rezervnom snagom te kao posljedica toga, smanjuje emisije ugljičnog dioksida. U slučajevima kada virtualna elektrana doprinosi energijom u javnu mrežu Finski nacionalni operator mreže, Fingrid, novčano nadoknađuje vlasnicima nekretnina. Jedan od primjera gdje se koristi Vibeco je grad Lappeenranta. U kojem je povezano devet javnih zgrada, proširujući se na povezivanje još 50 zgrada u gradskoj mikromreži. Još jedan primjer u kojem je tvrtka Siemens uspješno integrirala svoju virtualnu elektranu je trgovački centar Sello. Mikro mreža Sella kombinira energetsku učinkovitost, pohranu energije, optimizaciju vršnih opterećenja i vlastitu proizvodnju električne energije. Osim toga, isporuka dodatne energije na tržište rezervi dovela je do godišnjih prihoda od oko 650.000 eura godišnje za vlasnike nekretnine Sello. [10]

## **Virtualna elektrana tvrtke ABB**

Tvrtka ABB je također razvila svoju vrstu virtualne elektrane koju nazivaju ABB Ability Virtual Power Pools. ABB Ability Virtual Power Pools preuzima koordiniranu kontrolu nad umreženim generacijskim sustavima ili virtualnim elektranama. Radne točke svake povezane tehničke jedinice i pružanje mrežnih usluga optimiziraju se u stvarnom vremenu uzimajući u obzir trenutne ograničenja sustava. Na taj način ABB omogućava združeno trgovanje elektranama, generacijskim jedinicama, energetske skladištima i kontroliranim opterećenjima. Sve veći broj regenerativnih proizvodnih jedinica znači da balansna snaga brzo dobiva na značaju kao mrežna usluga. Pooling je inteligentno povezivanje i kontrola mnogih malih jedinica i na taj način omogućuje izravno trgovanje na terminskom i na spot tržištu. Moguće je daljnje povećanje fleksibilnosti i profitabilnosti Poolinga, na primjer, uključivanjem rješenja za pretvorbu energije u toplinu / energiju u plin, balansnih baterijskih rješenja ili fleksibilnih opterećenja za odziv na potražnju. ABB-ova rješenja optimizacije omogućuju učinkovito poslovanje inovativnih poslovnih ideja i profitabilno poslovanje upravljivih tehničkih jedinica u cjelini.

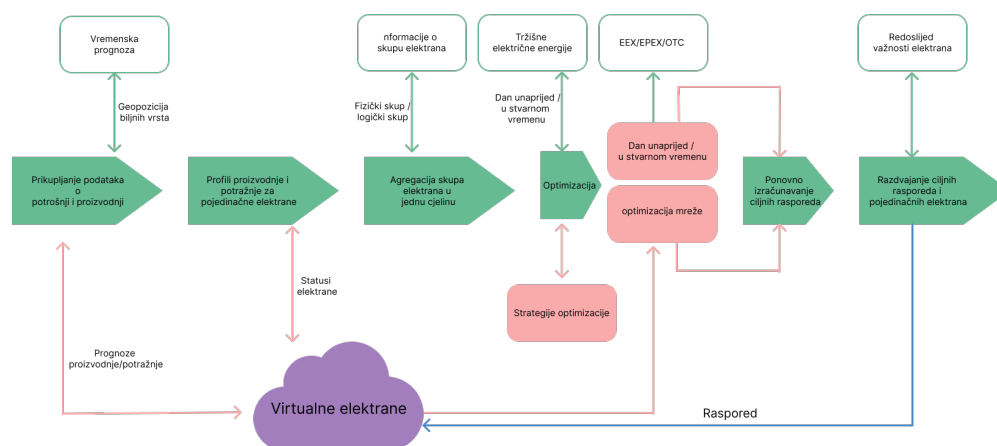
ABB Ability Virtual Power Pools koristi matematički model kako bi optimalno rasporedio postavke snage na pojedinačne tehničke jedinice u stvarnom vremenu. Ograničenja sustava, prekidi i informacije iz rasporeda registriraju se online i direktno se uklapaju u kontrolu korištenja sustava. Stoga je moguće fleksibilno prilagoditi ciljeve optimizacije promjenjivim okvirnim zahtjevima. Cilj optimizacije je minimizirati troškove generacije i maksimizirati prihode iz Virtual Power Poolsa.

ABB Ability Virtual Power Pools automatizira komunikaciju između upravljanja energijom i tehničkih jedinica putem standardiziranih sučelja. Informacije o prognozama, trgovanju, rasporedu i fakturiranju razmjenjuju se s upravljanjem energijom. Pozivi za balansiranje snage razmjenjuju se s operatorima prijenosne mreže, a informacije u stvarnom vremenu i sustavne informacije razmjenjuju se s tehničkim jedinicama. Te informacije dostupne su za dijagnostiku, analizu i statistiku putem arhiviranja ABB Ability Virtual Power Pools. Rad i nadzor su jednostavni i laki putem intuitivnog korisničkog sučelja ABB Ability Virtual Power Pools ili već postojećeg sustava upravljanja. Planirane i trenutačne vrijednosti snage, kao i pozivi za balansiranje snage, prikazuju se izravno. Trenutna snaga i status virtualne elektrane uvijek su na dohvat ruke uz jednostavan prikaz. [11]

## **Virtualna elektrana tvrtke Bosch**

Praksa virtualne elektrane tvrtke Bosch provedena je u regiji Rheintal u Vorarlbergu, Austrija. Agregirani DER-ovi u VPP-u su bili fotonaponski sustavi, potrošači energije i električna vozila. U budućnosti će se uvesti pohrana energije kako bi se poboljšala ukupna učinkovitost. Što je više objekata povezano s VPP-om, to će on moći fleksibilnije i učinkovitije raditi. Međutim, ovo umrežavanje čini upravljanje sustavom složenijim. Da bi se željena snaga isporučivala prema

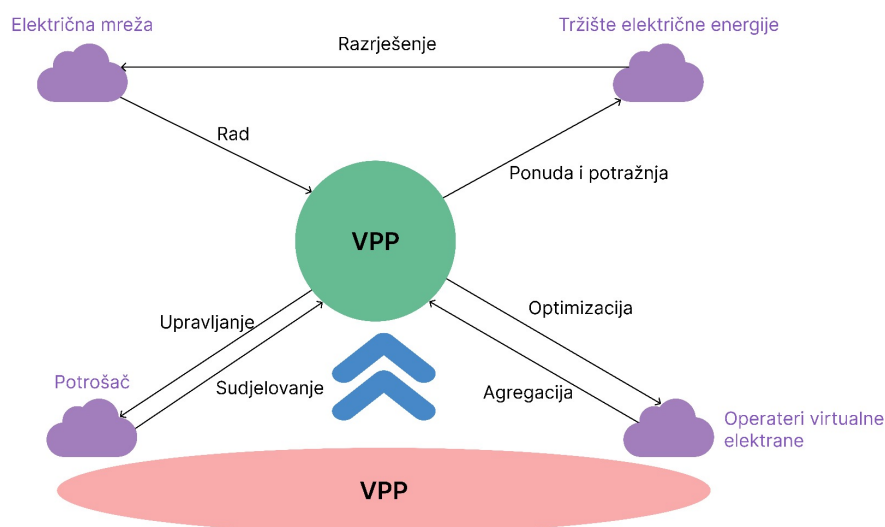
potrebi, sustav mora osigurati besprijekornu interakciju decentraliziranih izvora energije. Također mora moći pouzdano prognozirati kapacitet pojedinačnih elektrana. U tom kontekstu, Bosch je razvio softver koji kontinuirano određuje idealne proizvodne količine i daje preporuke u vezi s upravljanjem elektranama. Osim što se oslanja na prognoze vremena, "VPP Manager" također uzima u obzir razvoj cijena na tržištima energije kako je prikazano na slici 3.5. Na taj način, sustav može odrediti najbolji trenutak za prodaju viška energije. Glavni cilj VPP-a je optimizacija agregiranih DER-ova za balansiranje lokalnih opterećenja i smanjenje vršnih opterećenja kako bi se odgodila izgradnja elektroenergetske mreže. Podaci o potrošnji električne energije DER-ova prikupljaju se svakih 15 minuta od strane operatora VPP-a radi prognoziranja daljnjeg tijeka opterećenja. [12]



Slika 3.5. Shematski prikaz rada virtualne elektrane tvrtke Bosch. Izvor: [12]

### 3.3.1. Primjena virtualne elektrane u Sjevernom Hebeiju, Kina

Pilot projekt VPP-a u sjevernom Hebeiju ima ukupni kapacitet od 357,6 MW, uključujući 356,7 MW upravljivog opterećenja, 106 kW DG-a i 800 kW skladištenja energije, pri čemu upravljivo opterećenje uključuje 73,2 MW industrijskog i komercijalnog opterećenja, 259,7 MW električnih grijalica i 23,8 MW ostalih vrsta upravljivog opterećenja. Projekt obuhvaća više regija u elektroenergetskom sustavu sjevernog Hebeija, uključujući gradove Zhangjiakou, Langfang i Qinhuangdao. Cilj projekta VPP-a je pružiti usluge smanjenja vršnih opterećenja za elektroenergetski sustav tijekom vršnih i valnih razdoblja profila opterećenja. S upravljivim DER-ovima agregiranim od strane VPP-a, tradicionalne termoelektrane mogu smanjiti potrebu za smanjenjem vršnih opterećenja i time uštedjeti operativne troškove. Lokalni DER-ovi mogu se agregirati kako bi se izbalansirala proizvodnja obnovljive energije i slučajno opterećenje. Operativni tijek VPP-a u sjevernom Hebeiju prikazan je na slici 3.6. Od prosinca 2019. do travnja 2020. godine, pilot projekt VPP-a u sjevernom Hebeiju sudjelovao je na tržištu pomoćnih usluga smanjenjam vršnih opterećenja s ukupnim regulacijama od 7853,3 MWh i ukupnim prihodom od oko jednog milijuna eura. [12]



Slika 3.6. Prikaz operativnog tijeka virtualne elektrane u Hebeiju. Izvor: [12]

### 3.3.2. Primjena virtualnih elektrana na otocima

Jedan od najvećih izazova u dekarbonizaciji europskih zemalja leži u razvoju obnovljivih izvora energije na geografskim otocima, koji često ovise o morskim kablovima za prijem energije s kopna ili koriste dizel generatore za dodatnu snagu u udaljenim područjima. Otočne države poput Malte i Cipra prijavile su najviše troškove energije u Europi, vjerojatno zbog zahtjeva za trgovinom energijom s kopna i uvoza goriva. S obzirom na svoju površinu, Cipar također ima jedne od najviših emisija stakleničkih plinova po stanovniku, što je približno 31% iznad europskog prosjeka. Geografskim otocima često nedostaju potrebni objekti i stručnost za razvoj potencijalnih pametnih koncepata mreža kako bi se povećala održivost i smanjila ovisnost o uvoženoj energiji.

Stoga je Europska Unija pokrenula novi projekt kojeg nazivamo VPP4Islands. VPP4Islands ima za cilj olakšati integraciju obnovljivih sustava, ubrzati prijelaz prema pametnoj i zelenoj energiji te pomoći otocima da iskoriste potencijal energetske učinkovitosti i inovativne pristupe pohrani energije, poticati aktivno sudjelovanje građana i postati samodostatni u energiji, dok istovremeno smanjuje troškove, emisije stakleničkih plinova i ovisnost o teškom naftnom gorivu za proizvodnju električne energije, te stvarajući nove inteligentne poslovne prilike, rast i lokalna kvalitetna radna mjesta. Kako bi se postigli ti ciljevi, projekt VPP4Islands predlaže revolucionarne rješenja temeljena na konceptu digitalnog blizanca (eng. digital twin concept), virtualnim sustavima pohrane energije (VESS) i tehnologiji distribuirane knjige (DLT) kako bi se revolucionirao postojeći VPP i izgradio pametne energetske zajednice. Temeljen na agregaciji i pametnom upravljanju distribuiranim energetske resursima (DER-ima), VPP4Islands povećava fleksibilnost i profitabilnost energetske sustava pružajući istovremeno nove usluge. VPP4Islands također će poboljšati sposobnost odgovora na potražnju potrošača razumijevanjem njihovih ponašanja i promicanjem samopotrošnje.

Koncept VPP4Islands-a temelji se uglavnom na tri ideje: Digitalni Bliznac (eng. „Digital Twin“), Tehnologija Distribuirane Knjige (eng. „Distributed Ledger Technology“ - DLT) i Virtualni Sustav

Pohrane Energije (eng. „Virtual Energy Storage System“ - VESS). Digitalni Blizanac predstavlja koncepte u kojem se stvarni energetska sustav i infrastruktura otoka pretvara u repliku ali u digitalnom obliku. Digitalni oblik omogućuje simulaciju, nadzor i optimizaciju rada energetskih sustava u stvarnom vremenu, što omogućuje bolje upravljanje i planiranje. Digitalni blizanac omogućuje modeliranje i promjene u energetskim mrežama s ciljem poboljšanja performansi i učinkovitosti u stvarnom energetskom sustavu. Virtualni sustavi za pohranu energije su sustavi koji služe za pohranu energije te pružaju podršku virtualnim elektranama. U ove sustave spadaju baterije, električni automobili, vodikovi sustavi i druge tehnologije za pohranu energije. Tehnologija Distribuirane knjige spada pod blockchain tehnologiju. Odnosno, ova tehnologija osigurava sigurnu razmjenu podataka između svih energetskih sustava na otoku. [13]

Koncept VPP4Islands već se primjenjuje na par otoka u Europi kao što su: Gökçeada, Formentera, Bozcaada, Grado i Bornholm.

### **VPP4Islands na otoku Bozcaada**

Otok Bozcaada je mali otok s oko 3000 stanovnika. Na otoku je instalirano 17 vjetroagregata s ukupnim nominalnim kapacitetom od preko 10 MW. Osim toga, otok je opremljen solarnim postrojenjem snage 20 kW i vjetroagregatom snage 30 kW. Električna energija proizvedena ovim sustavima koristi se za elektrolizu vode u vodik. Ovaj plin se komprimirano pohranjuje i kasnije koristi za proizvodnju energije ili kao gorivo u vozilima na vodik. Dakle, otok Bozcaada proizvodi 30 puta više električne energije od ukupne potrošnje na otoku, a višak energije se šalje na kopno preko morskih kabela. Temeljem visoke proizvodnje energije na Bozcaadi, otok je pokrenuo plan bez ugljika koji će se ostvariti do 2030. U tom kontekstu, Bozcaada će iskoristiti platformu VPP4Islands kako bi definirao sve potrebne zahtjeve, specifikacije i infrastrukture za integraciju velikog broja električnih vozila radi smanjenja emisija iz konvencionalnih vozila, uz osiguranje stabilnosti električne mreže i generiranje ekonomskih koristi.

## 4. Električna vozila

Kao što su obnovljivi izvori energije postali novi popularni oblik proizvodnje čiste električne energije tako su i električna vozila postala sve značajni segment u svijetu automobilske industrije. Električno vozilo (EV) predstavlja inovativno i održivo rješenje za dekarbonizaciju cestovnog prometa. Posljednjih godina bilježi se eksponencijalni rast prodaje električnih vozila, potaknut sve većom svjesnošću kupaca o okolišu i potrebama za smanjenjem emisija štetnih plinova. Ova evolucija u automobilskom sektoru postavlja električne automobile kao ključni segment u ostvarivanju održive mobilnosti u budućnosti. Ako se rast koji smo doživjeli u posljednje dvije godine nastavi, emisije  $CO_2$  iz automobila mogu do 2030. biti usmjerene na put prema scenariju nulte emisije  $CO_2$  koji je Europska Unija planirala u 2050. godini. Međutim, električna vozila još uvijek nisu globalni fenomen. Električna vozila imaju nešto sporiji rast u manje razvijenim državama zbog svoje još uvijek visoke cijene i nedostatak dostupne infrastrukture za punjenje. Električna vozila neće imati ključnu ulogu samo u smanjenju emisija stakleničkih plinova već će u kombinaciji sa virtualnim elektranama imati ulogu i u održavanju stabilnosti elektroenergetskog sustava.

U nastavku rada istražiti ćemo povijest električnih vozila, analizirati princip rada električnih vozila, razmotriti različite vrste električnih vozila, definirati kada električna vozila postaju virtualne baterije te istražiti implementaciju i utjecaj virtualnih baterija u elektroenergetskom sustavu. U ovom djelu rada istražujemo ključne aspekte električnih vozila i virtualnih baterija kako bi bolje razumjeli njihov utjecaj na elektroenergetski sustav te brojne promjene koje će se u njemu desiti implementacijom velikog broja električnih vozila u sustav. Jedan od najpopularniji električnih automobila današnjice prikazan je na slici 4.1.

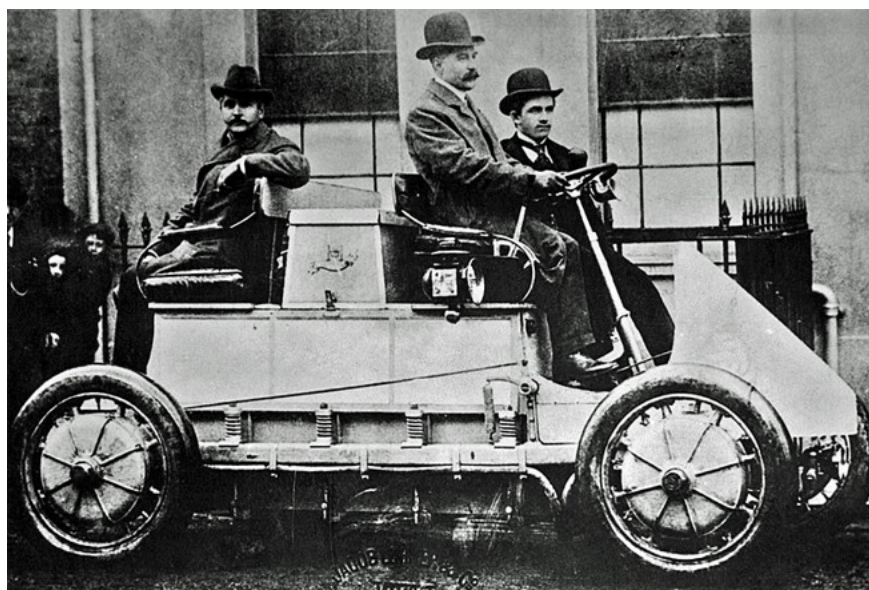


*Slika 4.1. Električni automobil tvrtke Tesla. Izvor [14]*



#### 4.1. Povijest električnih automobila

Iako većina nas smatra kako su električni automobili relativno novi izum i kako su se počeli koristiti prije nekoliko desetak godina to zapravo i nije točno. Prvi električni automobil, zapravo električnu kočiju izumio je Robert Anderson 1832. godine. Međutim, prvi praktični električni automobili počeli su se pojavljivati tek u drugoj polovici 19. stoljeća. S pojavom električnih automobila na tržištu pojavili su i automobili na benzin tj. automobili pogonjeni sa motorom s unutarnjim izgaranjem. Automobili sa motorom s unutarnjim izgaranjem u to doba zahtijevali su puno ručnog napora za vožnju, mijenjanje brzina nije bilo lako, a trebalo ih je pokrenuti ručnom kranom, što ih je činilo teškim za vožnju. Također su bili bučni, a njihovi ispušni plinovi imali su neugodan miris. Prednosti električnih automobila u to vrijeme su vrlo slične današnjim prednostima u odnosu na motore s unutarnjim izgaranjem. Bili su tihi, laki za vožnju i nisu ispuštali smrdljive onečišćujuće tvari poput drugih automobila toga vremena. Bili su savršeni za kratke vožnje po gradu. Stoga su mnogi inovatori tada obratili pozornost na visoku potražnju za električnim vozilima, istražujući načine kako poboljšati tehnologiju. Na primjer, Ferdinand Porsche, osnivač sportske tvrtke istog imena, razvio je električni automobil nazvan P1 1898. godine. Tri godine kasnije stvorio je i prvi hibridni električni automobil na svijetu tj. vozilo koje se napaja električnom energijom i benzinskim motorom. Taj automobili nazvan je Lohner-Porsche Mixte i prikazan je na slici 4.2.



*Slika 4.2. Prvi hibridni električni automobil na svijetu. Izvor: [15]*

Električni automobili doživjeli su svoj vrhunac popularnosti početkom 20. stoljeća. Kako su se motori s unutarnjim izgaranjem dalje razvijali električni automobili su se susreli sa problemima sličnim kao i danas. Neki od tih problema su ograničeni doseg, dugotrajno punjenje baterija i skupa proizvodnja električnih automobila u odnosu na benzinske automobile. Električni automobili su ponovno postali popularni krajem 20. stoljeća kada se počela povećavati svijest o zelenoj ekologiji

i problemima uzrokovanim štetnim emisijama iz vozila s unutarnjim sagorijevanjem. Tijekom tog vremena, proizvođači automobila počeli su modificirati neke od svojih popularnih modela vozila u električna vozila. To znači da su električna vozila sada postizala brzine i performanse puno bliže vozilima na benzin, a mnoga od njih imala su doseg od 100 kilometara. Iako su ovaj uzlet i pad industrije električnih vozila u drugoj polovici 20. stoljeća pomogli pokazati svijetu obećanje te tehnologije, prava obnova električnih vozila nije se dogodila sve do početka 21. stoljeća. Posljednjih nekoliko desetljeća svjedočimo eksploziji interesa za električne automobile. Tvrtke poput Tesle postale su sinonim za električnu mobilnost, proizvodeći visokokvalitetne električne automobile s velikim dosegom, brzim punjenjem i inovativnom tehnologijom. Razvoj baterijske tehnologije, infrastrukture punjenja i ekološke osviještenosti doprinose daljnjem rastu tržišta električnih automobila.

## 4.2. Električna vozila kao virtualne baterije

Električno vozilo (EV) temelji se na elektromehaničkom sustavu. Ne koristi se unutarnji izgarajući motor za razvoj okretnog momenta već se kao izvor energije koristi električna energija. Ta energija obično je pohranjena u baterijama. Prednost električnih vozila je visoko učinkovito pretvaranje snage kroz svoj propozicijski sustav električnog motora. Postoje dvije osnovne vrste električnih vozila. Prva vrsta su vozila koja koriste samo bateriju kao izvor energije, dok druga vrsta koristi kombinaciju elektromotora i kovencijalnog motora. Ovu vrstu vozila nazivamo hibridima.

Automobilska industrija postala je značajan sudionik i u globalnoj ekonomiji i u svijetu istraživanja i razvoja. Sa stalnim napretkom tehnologije, vozila su sada opremljena značajkama koje prioritiziraju sigurnost kako putnika tako i pješaka. To je dovelo do povećanja broja vozila na cestama, pružajući nam udobno i brzo putovanje. Međutim, ovaj napredak došao je s cijenom. Urbana područja su svjedočila naglom porastu onečišćivača okoliša poput sumpor-dioksida ( $SO_2$ ), dušikovih oksida ( $NO$ ), ugljikovog monoksida ( $CO$ ) i lebdećih čestica ( $PM$ ). Važno je priznati utjecaj koji je automobilska industrija imala na naš svakodnevni život, kako pozitivan tako i negativan. Stoga je pojava i razvoj električnih vozila od velike važnosti u stvaranju zelene i održive ekologije.

Budući da su električni automobili pogonjeni elektromotorom koji kao izvor energije koristi električnu energiju on ne utječe na onečišćenje okoliša. Također, velika prednost električnih vozila je što su veoma tihi, što smanjuje buku u urbanim sredinama i doprinosi poboljšanju kvalitete života stanovnika. Uz to cijena električne energije je jeftinija od cijena benzina ili dizela, što može rezultirati uštedama u dugoročnom trošku vlasništva vozila. I njegovo održavanje je također jednostavnije budući da ima manje pokretnih dijelova u odnosu na motore s unutarnjim izgaranjem. Ovo su samo neke od prednosti koje nam pružaju električna vozila (EV). Naravno, električna vozila se još uvijek susreću i sa nekim problemima. Iako se tehnologija koju koriste električna vozila konstantno i veoma brzo razvija možemo i sami zaključiti kako je nemoguće očekivati da ćemo u

potpunosti u samo par godina zamijeniti motore s unutarnjim izgaranjem s električnim motorima. Jedan od najvećih problema kod implementacije električnih vozila biti će promjena infrastrukture. Biti će potrebno izgraditi veliki broj punionica za električne automobile. Osim toga još uvijek veliki problem stvara domet električnih automobila te vrijeme punjenja. Uz to i njihova cijena je i dalje veća od vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem.

Većina električnih vozila koje se danas koriste i koje će se koristiti u budućnosti imaju mogućnosti punjenja baterije putem električnog priključka. Takva vozila nazivamo plug-in električno vozilo (PEV). U slučajevima kada je plug-in električno vozilo spojeno na priključak i integrirano u pametni sustav, poput virtualne elektrane, možemo reći kako PEV zapravo postaje virtualna baterija. Dakle, kada je plug-in električno vozilo preko punjača priključeno na mrežu može djelovati kao sustav za skladištenje električne energije tj. kao jedna vrsta baterije koju nazivamo virtualna baterija. Virtualne elektrane ali i drugi pametni sustavi upravljanja mogu koristiti električnu energiju pohranjenu u baterijama PEV-ova tj. energiju iz virtualnih baterija za održavanje stabilnosti elektroenergetskog sustava. Na primjer, kada u elektroenergetskoj mreži imamo višak električne energije možemo je pohraniti u baterije PEV-ova, dok kada je potrebno dodatno napajanje u mreži tada se energija može povući iz baterije PEV-ova. Koncept primjene PEV-ova kao virtualnih baterija stvara veću fleksibilnost sustava te omogućuje lakšu integraciju obnovljivih izvora u elektroenergetski sustav. Također, može pružiti podršku prilikom smanjenja opterećenja tijekom vršnih sati potrošnje električne energije.

Dakle, kada je električno vozilo kao što je prikazano na slici 4.3, u ovom slučaju Teslin električni automobil, spojen preko punjača sa punionicom tj. povezano s elektroenergetskim sustavom ono postaje plug-in električno vozilo te može sudjelovati u sustavu kao virtualna baterija.

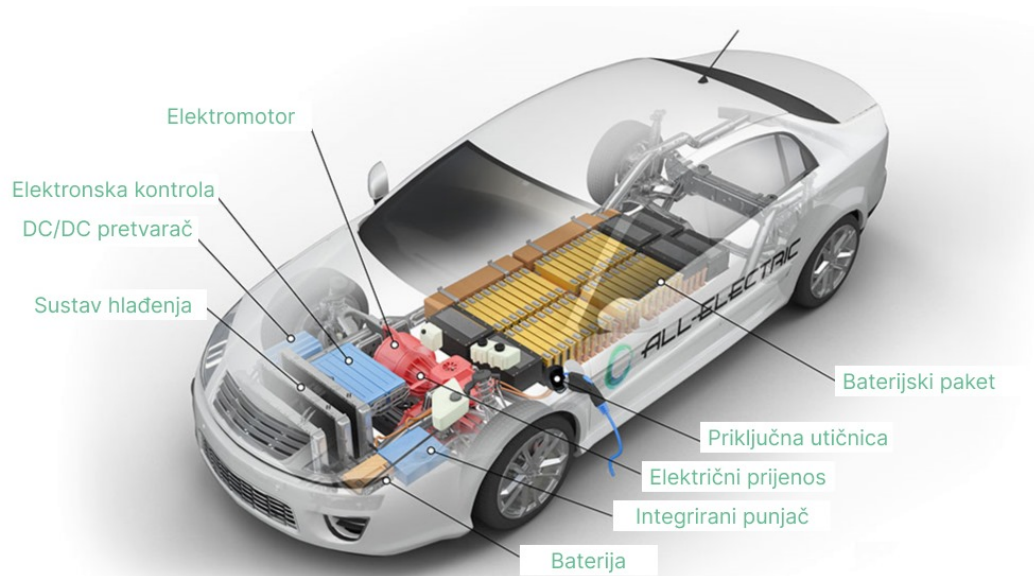


*Slika 4.3. Prikaz plug-in električnog vozila koji može imati ulogu virtualne baterije. Izvor: [16]*

#### 4.2.1. Dijelovi električnog vozila

Komponente električnog vozila i njihova funkcija ovise o tipu vozila. U sljedećem dijelu rada upoznat ćemo se sa glavnim dijelovima električnog vozila. Neki od tih dijelova su: baterija, elek-

tromotor, DC/DC pretvarač, priključna utičnica, integrirani punjač, sustav hlađenja i ostali dijelovi. Na slici 4.4 prikazani su glavni dijelovi električnog vozila.



Slika 4.4. Prikaz glavnih dijelova električnog vozila. Izvor: [17]

## Baterijski paket

Najvažnija komponenta električnog vozila je baterijski paket. Možemo reći kako je to srce električnog vozila koje skladišti električnu energiju s kojom pokreće elektromotor i omogućuje vožnju vozila. Baterijski paket je najveća i najskuplja komponenta koja na kraju određuje koliko će snage i doseg imati vozilo. Baterijski paket sastoji se od nekoliko odvojenih baterija koje su povezane zajedno, što može biti bilo što od 5 do 25 baterija, a svaka od njih sastoji se od stotina pojedinačnih ćelija. Također postoje različite vrste baterija, kao što su litij-ionske baterije, nikal-metal-hibridne baterije ili čvrste stanice.

## Elektromotor

Elektromotor pretvara električnu energiju koji dobiva iz baterija u mehaničku energiju kako bi pokretao kotače i gurao automobil. Motori se vrlo razlikuju, neki rade na izmjeničnu struju (AC), a neki na istosmjernu struju (DC). Najčešći motori za konverziju električnih vozila su AC motori zbog njihove veće učinkovitosti. Motor je zapravo veliki elektromagnet koji se okreće zbog privlačenja i odbijanja magneta unutar njega.

Elektromotor pretvara više od 85% električne energije u mehaničku energiju u usporedbi s manje od 40% za motor s unutarnjim izgaranjem. Također, elektromotor može postići puno više konjskih snaga u odnosu na klasične motore s unutarnjim izgaranjem. Tako Teslini veliki pogonski sklop može generirati više od 500 konjskih snaga ako je potrebno.

## **Punjač**

Punjač je uređaj koji omogućuje punjenje baterija električnog vozila. Punjač pretvara izmjeničnu struju u istosmjernu struju koja služi za punjenje baterijskog paketa. Punjači mogu biti integrirani unutar vozila ili vanjski. U većini slučajeva punjač je integriran unutar vozila jer to omogućuje punjenje vozila gdje god se ono nalazilo, bilo kod kuće, na parkiralištu ili na benzinskoj postaji. Punjači dolaze u različitim snagama, što može značajno utjecati na brzinu punjenja vozila. Međutim, čak i najbrži dostupni punjač neće moći brzo puniti ako izvor energije nije dovoljno jak.

## **DC/DC pretvarač**

DC/DC pretvarač je uređaj koji pretvara DC električnu energiju visokog napona iz baterijskog paketa u DC električnu energiju niskog napona potrebnu za rad dodatnih uređaja u vozilu i punjenje pomoćne baterije. Električna energija niskog napona koristi se za napajanje svjetla, sustava za automatsko zaključavanje, brisača ili sličnih uređaja u vozilu.

## **Sustav hlađenja**

Iako su električna vozila 85% učinkovita, još uvijek dolazi do stvaranja topline, koja iako obično nije ekstremna, ali kako se zaštitili komponente i održavale u optimalnom radu, najbolje je da ih se hladi. Za to su zaduženi sustavi hlađenja. Ovaj sustav održava radne temperature elektromotora, baterija, energetske elektronike i drugih komponenata.

## **Priključak za punjenje**

Priključak za punjenje obično je postavljen tamo gdje je originalni otvor za gorivo. On se izravno povezuje s sustavom za punjenje unutar automobila koji zatim puni baterijski paket visokog napona. Ovi priključci su obično standardizirani te je to obično utičnica tipa 2. Na taj način se osigurava da se električna vozila mogu puniti na različitim mjestima bez potrebe za nošenjem adaptera ili skupih kabela. Također, to nam omogućuje da električno vozilo punimo uz pomoć trosruke utičnice iz svojih domova. Iako će u tom slučaju punjenje biti sporije nego da se električno vozilo puni preko punionice namijenjene za punjenje električnih vozila.

## **Sustav regenerativnog kočenja**

Sustav regenerativnog kočenja koji još nazivamo kočioni sustav omogućuje električnom vozilu da energiju koja se oslobađa prilikom kočenja koristi za punjenje baterija te na taj način povećava doseg vozila.

## Elektronska kontrola

Elektronska kontrola je dio električnog vozila koja upravlja i regulira rad svih funkcija i sustava u vozilu. Ovaj dio EV-a obuhvaća različite elektroničke komponente i sustave koji kontroliraju rad motora, baterije, punjenje, upravljanje vozilom, sustav regenerativnog kočenja i još mnogo toga. Uz pomoć nje osigurava se optimalan tok energije unutar vozila te optimalan rad svih dijelova vozila kao jedna cjelina.

Električna vozila su budućnost automobilske industrije. Kako bi zamijenila automobile na konvencionalna goriva, potrebna je promjena u razmišljanju i tehnologiji. S kontinuiranim razvojem tehnologije, električni automobili postat će sve pristupačniji i popularniji. Svako od navedenih dijelova, poput baterija, elektromotora i sustava za regenerativno kočenje, ima svoju ulogu te doprinosi ukupnim performansama i učinkovitosti vozila. Najveći fokus usmjeren je na baterijske sustave jer su ključni za karakteristike vozila na koje smo navikli. Navikli smo da možemo brzo napuniti spremnik goriva i to u gotovo svakom mjestu. Stoga je važno osigurati da punjenje baterija traje što kraće i da s jednim punjenjem možemo prijeći što veći broj kilometara. Električna vozila proizlaze iz kombinacije baterijskih paketa sa ostalim navedenim dijelom, što rezultira širokim rasponom mogućnosti i prilagodljivosti prema različitim potrebama vozača i uvjetima vožnje.

### 4.3. Vrste električnih vozila

Sa razvojem tehnologija došlo je i do razvoja različitih vrsta električnih vozila. Električna vozila mogu biti pogonjena isključivo pomoću električnog pogona ili mogu raditi u kombinaciji sa motor s unutarnjim izgaranjem. Električna vozila koja koriste isključivo energiju pohranjenu u baterijama kao izvor energije nazivamo potpuno električna vozila. Vozila koja koriste bateriju u kombinaciji sa nekim drugim izvorom nazivamo hibridna električna vozila. Hibridna vozila možemo podijeliti na priključno hibridno električno vozilo i hibridno električno vozilo. Razlika je u tome što priključno hibridno električno vozilo može svoje baterije puniti putem punjača koji se priključuje na električnu mrežu dok hibridno električno vozilo koristi isključivo regenerativno kočenje za punjenje svojih baterija. Uz ove navedene vrste vozila danas su se počela razvijati vozila s gorivim ćelijama. U nastavku rada pojedinačno ćemo se upoznati sa svakom od navedenih vrsta električnih vozila.

#### 4.3.1. Potpuno električna vozila

Potpuno električno vozilo (Battery electric vehicles – BEV) pokreću se isključivo pomoću električne energije koja je pohranjena u bateriji vozila. Ova vozila ne koriste klasične motore s unutarnjim izgaranjem te ne koriste konvencionalna goriva, poput nafte i benzina, već koriste elektromotor kojeg pokreće električna energija. BEV-ovi su vozila nulte emisije, budući da ne proizvode nikakve štetne emisije ispušnih plinova ili onečišćenja zraka. Domet BEV-ova uvelike

ovisi o kapacitetu baterije jer se oni oslanjaju isključivo na pohranjenu energiju u svojim baterijskim paketima. Tipičan domet jednog punjenja iznosi od 100 do 250 km. Ovi rasponi ovise o konfiguraciji vozila, uvjetima na cesti, uvjetima i stilu vožnje, tipu baterije i klimi. Baterijski paket zahtijeva puno vremena, nekoliko sati, da se potpuno napuni. Čimbenici poput konfiguracije punjača, razine radne snage i infrastrukture utječu na vrijeme punjenja.

BEV-ovi su pouzdani i tihi te omogućuje vožnju bez emisije štetnih plinova što ih čini idealnim za gradsku vožnju. Međutim, ograničenja u dometu i infrastrukturi punjenja još uvijek predstavljaju izazove za široku prihvaćenost BEV-ova, iako su oni sve popularniji i dostupniji na tržištu.

#### 4.3.2. Hibridna Električna Vozila

Hibridna električna vozila (Hybrid Electric Vehicles - HEV) koriste elektromotor i motor s unutarnjim izgaranjem za pogon vozila. HEV-ovi koriste prednosti oba pogonska sustava kako bi postigli što veću učinkovitost vozila ali i smanjili emisiju štetnih plinova u odnosu na klasična konvencionalna vozila s unutarnjim izgaranjem. Ključnu ulogu u ovoj vrsti vozila igra regenerativno kočenje budući da HEV-ovi nemaju mogućnost punjenja baterija putem punjača kao što je to slučaj kod BEV-ova. Regenerativno kočenje omogućuje pretvaranje kinetičke energije koja se oslobađa prilikom kočenja u električnu energiju s kojom se pune baterije vozila. U tradicionalnom vozilu s unutarnjim izgaranjem, ova energija pri kočenju obično se gubi kao toplina u kočionim pločicama i diskovima.

HEV-ovi koriste oba pogonska sustava kako bi vožnju učinili što učinkovitijom. Električna energija iz baterija tj. elektromotor se koristi prilikom vožnje na niskim brzinama ili u slučajevima kada je potrebno manje snage. S druge strane benzinski motor se koristi prilikom vožnje pri većim brzinama ili kada je potrebno veće ubrzanje. Ovaj dinamički pristup omogućuje optimalno korištenje energije i bolju učinkovitost vozila u različitim uvjetima vožnje.

Iako se HEV-ovi ne mogu puniti putem punjača i dalje čine veliku razliku u pogledu štednje goriva i smanjenja emisija u odnosu na tradicionalna vozila. HEV-ovi su veoma popularni među vozačima koji žele sudjelovati u smanjenju negativnog utjecaja na okoliš ali još uvijek skeptični prema potpuno električnim vozilima.

#### 4.3.3. Priključna Hibridna Električna Vozila

Priključna hibridna električna vozila (Plug-In Hybrid Electric Vehicles - PHEV) su slična HEV-ovima razlika je što PHEV-ovi imaju mogućnost punjenja svojih baterije putem punjača. Dakle, PHEV-ovi također koriste kombinaciju elektromotora i motora s unutarnjim izgaranjem uz mogućnost povezivanja vozila s elektroenergetskim sustavom putem električnog priključka.

PHEV-ovi imaju veće baterije što dovodi i do povećanja dometa vozila. To omogućuje elektromotoru da ima glavnu ulogu u pogonu vozila. Domet PHEV-ova obično iznosi 20 km do 60 km prije nego se potroši sva energija iz baterija. Nakon što se baterije isprazne vozilo prelazi na motor s

unutarnjim izgaranjem. Tada se baterije PHEV-ova pune putem regenerativnog kočenja ali i kada su priključene na električnu mrežu putem punjača.

PHEV-ovi predstavljaju još jedan korak prema smanjenju potrošnje konvencionalnih goriva i smanjenju emisije štetnih plinova. Kao primarni izvor koriste električnu energiju pohranjenu u baterija što omogućuje vozačima da ostave još veći otisak u očuvanju okoliša. Istovremeno, mogućnost brzog prebacivanja na motor s unutarnjim izgaranjem daje sigurnost vozačima da će stići na svoj cilj u slučajevima kada se baterije isprazne.

#### 4.3.4. Električna Vozila s Gorivim Čelijama

Električna vozila s gorivim ćelijama (Fuel Cell Electric Vehicle - FCEV) koriste gorivne ćelije kao izvor energije za pogon. Glavni princip rada FCEV-a je elektrokemijska reakcija između vodika i kisika u gorivnoj ćeliji kako bi se proizvela električna energija. Električna energija koja pokreće motor FCEV-ova je proizvedena na čist način bez emisije štetnih plinova. Budući da je jedini nusprodukt ovog procesa čista voda. Uz to velika prednost ovih vozila je mogućnost brzog punjenja goriva i dugi domet. Ove dvije prednosti ih čine idealnom zamjenom za vozila s unutarnjim izgaranjem.

Također, vodik koji se koristi kao gorivo kod ove vrste vozila se može proizvesti na čist način bez emisije štetnih plinova putem elektrolize vode. Elektroliza vode je proces u kojem uz pomoć električne energije proizvodimo vodik iz vode. U slučaju kada za proces elektrolize vode koristimo električnu energiju iz obnovljivih izvora možemo reći kako smo proizveli vodik bez emisije štetnih plinova. Tako proizveden vodik nazivamo zelenim vodikom. U budućnosti je cilj koristiti samo zeleni vodik kao goriva za FCEV-ove.

Najpopularniji FCEV-ovi na tržištu su Toyota Mirai i Honda Clarity. Toyotini FCEV-ovi imaju doseg od 650 km s jednim spremnikom vodika što je puno više od BEV-ova. Također, punjenje vodikovih spremnika traje vrlo kratko, tek 3 – 5 minuta za puni spremnik. Kao što smo već rekli to su i dvije najveće prednosti FCEV-ova u odnosu na BEV-ove.

Iako FCEV-ovi imaju niz prednosti, poput dugog dometa i brzog punjenja, postoji i neki izazovi koji ograničavaju njihovu široku upotrebu. To uključuje ograničenu infrastrukturu punjenja vodika, visoke troškove proizvodnje i održavanja ovih vozila te pitanja sigurnosti povezana s rukovanjem vodikom kao gorivom. Međutim, s daljnjim tehnološkim napretkom i rastućom dostupnošću obnovljivih izvora energije, FCEV-ovi bi mogli postati sve popularniji kao ekološki prihvatljiva alternativa konvencionalnim vozilima.

U tablici 4.1 usporedili smo do sada spomenute vrste električnih vozila i konvencionalna vozila. U tablici možemo vidjeti sve prednosti ali i nedostatke električnih vozila i konvencionalnih goriva. BEV-ovi su električna vozila koja se puna direktno iz električne mreže te imaju nulte emisije štetnih plinove tijekom vožnje ali još uvijek imaju problem domet i punjenje baterija. Problem punjenja i dometa riješili smo na način da kombiniramo električni pogon sa pogon s unutarnjim izgaranjem. Takav način pogona koriste HEV-ovi i PHEV-ovi. Naravno budući da HEV-ovi i



PHEV-ovi koriste motor s unutarnjim izgaranjem ponovno se javlja problem korištenja konvencionalnih goriva, čija cijena na tržištu sve više raste, i problem emisije štetnih plinova prilikom izgaranja tih goriva. FCEV-ovi su trenutno, barem u teoriji najbolja vrsta električnih vozila. Kao gorivo koriste vodik koji se može proizvoditi i koristi na čist način bez emisija štetnih plinova. Također, ova vrsta vozila nema problema sa domet te se mogu napuniti u vrlo kratkom vremenu. Ali nažalost, infrastruktura punjenja vodika je manje razvijena čak i u odnosu na infrastrukturu punjenja baterija, a proizvodnja FCEV-ova je veoma skupa.

Tablica 4.1. Usporedba različitih vrsta električnih vozila i konvencionalnih vozila.

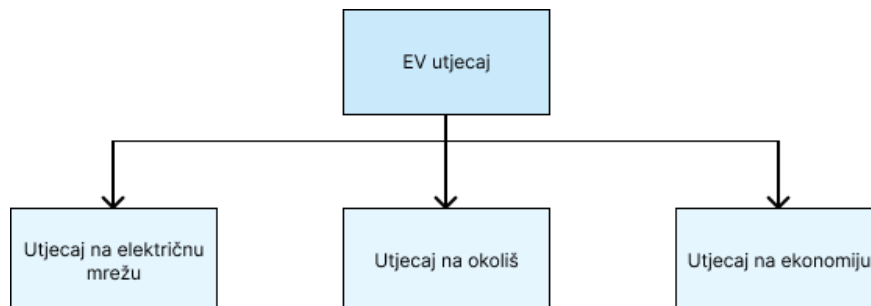
Vrsta vozila	Izvor energije	Odlike	Problemi
<b>HEV i PHEV</b>	Motor s unutarnjim izgaranjem i elektromotor	Složena konstrukcija, dvije vrste pogona, široko dostupni, niske emisije, veliki domet	Optimizacija veličine motora i baterija, upravljanje energetskim resursima
<b>BEV</b>	Elektromotor i baterija	Široko dostupni, ne zahtijevaju gorivo, nulte emisije, domet ovisi o baterijama i uvjetima	Domet, vrijeme punjenja, cijena, infrastruktura punjenja
<b>FCEV</b>	Elektromotor i gorivna ćelija	Široko dostupni, nulte emisije, visoka učinkovitost, brzo punjenje	Trošak gorivnih ćelije, skupo održavanje, infrastruktura punjenja,
<b>Konvencionalna vozila</b>	Motor s unutarnjim izgaranjem	Jednostavan dizajn, široko dostupni, jeftini, brzo punjenje	Velike emisije štetnih plinova, promjenjiva cijena goriva

Dakle, možemo zaključiti kako danas na tržištu imamo različite vrste vozila. Iako su i dalje najprodavanija i najpopularnija konvencionalna vozila, razvojem tehnologija i infrastrukture raste trend upotrebe i prodaje električnih vozila. Zahvaljujući raznolikosti vrstama električnih vozila možemo reći da već i danas svatko može pronaći vozilo koja zadovoljava njihove potrebe te pritom može sudjelovati i smanjenju štetnih utjecaja na okoliš.

#### 4.4. Utjecaj električnih vozila

Iako je osnovna namjena električnih vozila da služe u svrhu prijevoza, oni utječu i na mnoga druga područja. Predviđa se da će u bliskoj budućnosti trenutni rast električnih vozila (EV) dovesti do ogromnih promjena u električnoj mreži. Dodatna potrošnja energije zbog EV-a može izazvati značajna opterećenja na električnim mrežama. Ta dodatna opterećenja imaju brojne negativne učinke na postojeće distribucijske mreže. Nasuprot tome, masovna upotreba EV-a u kombinaciji s pametnim tehnologijama, kao što su virtualne elektrane, imati će povoljan utjecaj na okoliš i

gospodarstvo. EV ne samo da smanjuju emisije stakleničkih plinova i drugih onečišćivača, već također poboljšavaju korištenje obnovljivih izvora energije. Ukupni utjecaji EV-a mogu se klasificirati u tri glavne kategorije: utjecaj na električnu mrežu, utjecaj na okoliš i utjecaj na ekonomiju, kao što je to prikazano na slici 4.5.



Slika 4.5. Klasifikacija utjecaja električnih automobila.

#### 4.4.1. Utjecaj na električnu mrežu

Velika pažnja posvećuje se električnim vozilima (EV) kako bi se suočili s izazovima globalne klimatske promjene, s obzirom da se sektor prijevoza smatra drugim najvećim izvorom emisije ugljika. Međutim, masovno uvođenje EV-a zahtijeva dodatnu snagu iz tradicionalne distribucijske mreže. Implementacijom velikog broja EV-a u distribucijsku mrežu ukazuje na širok spektar značajnih negativnih utjecaja na tu distribucijsku mrežu. Ti utjecaji mogu varirati o karakteristikama EV-a, odnosno o, karakteristikama baterije EV-a, obrascima punjenja, lokacijama punjenja, načinima punjenja, vremenima punjenja, obrascima vožnje EV-a, dosegu EV-a i mnogim drugim karakteristikama. EV-a također imaju značajne pozitivne učinke na distribucijsku mrežu. U daljnjem dijelu rada opisaćemo negativne i pozitivne utjecaje EV-a na električnu mrežu.

#### Negativni utjecaji na električnu mrežu

Električna vozila se smatraju visokim energetske opterećenjima i izravno utječu na elektroenergetski sustav. Njihova implementacija u distribucijski sustav najviše utječe na transformatore, kablove i osigurače. Za primjer možemo uzeti EV Nissan Leaf s baterijskim paketom od 24kWh koji može potrošiti energiju sličnu jednom europskom kućanstvu. Punjač snage 3,3 kW u sustavu od 220 V, 15 A može povećati potražnju struje za 17% do 25%. Dakle, možemo samo zamisliti kakvo opterećenje se pojavljuje u mreži povezivanjem više EV-a kada samo jedno EV može uzrokovati takvu potrošnju energije. Do još većeg problema dolazi prilikom punjenja EV-a tijekom vršnih sati u danu. Takvo punjenje EV-a gdje vozila punimo u bilo koje vrijeme, ne obazirući se na utjecaj punjenja na električnu mrežu nazivamo nekontroliranim punjenjem ili čak „glupim punjenjem“. Takvo punjenje može dovesti do nestabilnosti napona, povećanja vršne potrošnje, povećanja gubitaka snage, preopterećenja transformatora i degradacije kvalitete električne energije.

**Nestabilnost napona:** Električni sustavi obično operiraju blizu granice stabilnosti. Nestabilnosti

napona u takvim sustavima mogu se pojaviti zbog karakteristika opterećenja, a ta nestabilnost može dovesti do prekida u opskrbi. Opterećenja EV-a imaju nelinearne karakteristike, što je drugačije od općenitih industrijskih ili kućanskih opterećenja, te povlače velike količine energije u kratkom vremenskom razdoblju. Kada bi EV-a imali konstantne impedancijske karakteristike opterećenja, tada bi mreža mogla istovremeno podržati mnogo vozila bez suočavanja s bilo kakvom nestabilnošću. Međutim, opterećenja EV-a ne mogu se unaprijed pretpostaviti, pa njihova potrošnja energije ostaje nepredvidljiva. Nestabilnost napona događa se kada se veliki broj EV-a istovremeno spoji na mrežu radi punjenja. Istovremeno punjenje većeg broja EV-a izaziva nagli rast potrošnje energije, što dovodi do nestabilnosti napona u mreži. Nestabilnost napona biti će posebno izražena u slučajevima kada se punjenje provodi u vrijeme vršnih opterećenja u mreži. Takve situacije dovode do preopterećenja mreže, prekoračenja napona pa i do prekida u opskrbi električne energije.

**Povećanje vršne potrošnje:** Vršna opterećenja već su sama po sebi ozbiljan izazov u elektroenergetskom sustavu. Dodatno punjenje EV-a tijekom vršnih opterećenja moglo bi dodatno opteretiti već opterećeni sustav. To dovodi do preopterećenja mreža, ali može rezultirati i višim troškovima punjenja za vlasnike EV-a.

**Kvaliteta napajanja:** Jedni od osnovnih pokazatelja kvalitete napona su harmonici. Harmonici su prikazani kao komponenta spektara napona i struje čije su frekvencije višekratnici osnovne frekvencije, obično 50Hz ili 60 Hz. Neželjeni spektri napona i struje u elektroenergetskom sustavu uzrokovani su nelinearnim opterećenjima, poput električnih vozila. Ukupna distorzija harmonika struje ( $THDi$ ) i ukupna distorzija harmonika napona ( $THDv$ ) mogu se izraziti u postocima, kako je prikazano u jednadžbama 4.1 i 4.2.

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H I_h^2}}{I_1} \quad (4.1)$$

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H V_h^2}}{V_1} \quad (4.2)$$

gdje je  $h$  redni broj harmonika,  $H$  je najviši broj harmonika,  $I_h$  i  $V_h$  su RMS vrijednosti struje i napona kod  $h$ -tog harmoničnog komponenta,  $I_1$  i  $V_1$  su RMS vrijednosti osnovne frekvencije struje i napona.

Harmonici izobličavaju valne oblike napona i struje, što može smanjiti kvalitetu napajanja. Također uzrokuje opterećenje na opremi elektroenergetskog sustava poput kabela i osigurača. Trenutačno postavljene kabele mogu izdržati 25% prodiranja električnih vozila ako se koristi sporo punjenje, dok u slučaju brzog punjenja taj postotak pada na 15%. S povećanim brojem električnih vozila, postoji mogućnost poništenja harmonika zbog različitih uzoraka opterećenja. Različiti punjači električnih vozila mogu proizvesti različite faze i magnituda, što može dovesti do takvih poništenja. Također je moguće smanjiti, čak i eliminirati harmonike primjenom modulacije širine pulsa u punjačima električnih vozila.

**Pad napona:** Padovi napona u elektroenergetskom sustavu javljaju se zbog različitih razloga,

uključujući kratke spojeve, preopterećenja i pokretanje električnih motora. Do pada napona također može dovesti i punjenje EV-a. Određena istraživanja pokazala su da istovremeno nekontrolirano punjenje većeg broja EV-a može rezultirati padom napona od više od 20%, što značajno premašuje dopuštene granice padova napona u elektroenergetskom sustavu. Ovaj postotak može biti još veći ako se punjenje električnih vozila događa tijekom vršnih opterećenja na mreži. Kako bi se riješili problemi s padom napona uzrokovani punjenjem električnih vozila, primjenjuju se različite strategije upravljanja opterećenjem i punjenjem.

**Gubitci snage:** Implementacijom novih EV-a u distribucijsku mrežu dovodi do povećanja gubitaka snage. Gubitci snage ( $P_L$ ) u distribucijskom sustavu može se izračunati kao:

$$P_L = \sum_{i=1}^{N_B} I^2 R_i \quad (4.3)$$

gdje je  $I$  struja,  $R$  otpor grane i  $N - B$  broj grana distribucijskog sustava. Dodatni gubitak ( $AP_L$ ) nastao zbog punjenja EV-a može se izraziti kao što je prikazano u jednadžbi 4.4.

$$AP_L = TPL_{EV} - TPL_{pEV} \quad (4.4)$$

gdje je  $TPLEV$  ukupan gubitak snage kada se EV-a pune putem distribucijske mreže, a  $TPL_{pEV}$  ukupan gubitak snage prije početka punjenja EV-a.

U i ovom slučaju nekontrolirano punjenje dovodi do velikih gubitaka snage što može imati negativne posljedice na distribucijske mreže. Jedno od rješenja bilo bi punjenje EV-a blizu proizvodnje električne energije.

**Preopterećenje transformatora:** Punjenje EV-a ima utjecaj i na preopterećenje transformatora. Nekontrolirano punjenje EV-a može izazvati povećano opterećenje na distribucijskim transformatorima, što može rezultirati različitim posljedicama na njihovu radnu učinkovitost i vijek trajanja. Prilikom punjenja EV-a posebno su pogođeni oni transformatori koji se nalaze u blizini punionica ili područjima s visokom koncentracijom EV-a. Također, ako na manjem području istovremeno punimo više EV-a može se promijeniti raspodjela opterećenja na transformatorima. To može zahtijevati prilagodbe u mrežnom planiranju i distribuciji opterećenja.

### Pozitivni utjecaji na električnu mrežu

Da bi se izbjegli negativni učinci i osiguralo učinkovito punjenje s dostupnom infrastrukturom, potrebno je usvojiti koordinirano punjenje ili tako zvano „pametno punjenje“. U ovom sustavu, električna vozila pune se tijekom vremenskih razdoblja kada je potražnja niska, na primjer, nakon ponoći. Takvi su programi korisni na mnogo načina. Ne samo da sprječavaju dodavanje dodatnog opterećenja tijekom vršnih sati, već i povećavaju opterećenje u dolinama krivulje opterećenja, olakšavajući pravilnu upotrebu elektrana s boljom učinkovitošću. Na strani potrošača, to može smanjiti račun za električnu energiju jer je električna energija potrebna za punjenje električnih vozila jeftinija tijekom noćnih sati. Postoje različiti sustavi i tehnologije uz pomoć kojih EV-a mogu

biti vrlo korisna za elektroenergetski sustav.

**Pametne mreže:** Pametne mreže omogućuju EV-a da pozitivno utječu na elektroenergetsku mrežu iz razloga što je u takvom sustavu lako ostvarivo koordinirano punjenje. Integracija EV-a unutar pametnih mreža omogućuje fleksibilno punjenje, optimizaciju opterećenja mreže, povećanje stabilnosti i učinkovitosti mreže. Napredne tehnologije komunikacije i upravljanja omogućuju pametnim mrežama da se EV-a pune u trenucima kada imamo višak električne energije u sustavu te da se i na taj način izbjegne punjenje EV-a za vrijeme vršnog opterećenja. Koordiniran način punjenja kojeg omogućuju pametne mreže poboljšava učinkovitost, pouzdanost i održivost elektroenergetske mreže te nudi rješenje za većinu negativnih utjecaja EV-a na električnu mrežu koje smo ranije spomenuli. Također, interakcija pametnih mreža i EV-a dovodi do stvaranja novih tehnologija, poput V2G, te omogućuje bolju integraciju obnovljivih izvora energije u sustav.

**V2G:** Tehnologija V2G predstavlja najpovoljniju priliku za implementaciju EV-a u elektroenergetski sustav. V2G ili "vehicle-to-grid" je metoda u kojoj električna vozila mogu pružati energiju elektroenergetskoj mreži. U ovom sustavu, vozila djeluju kao potrošači kada troše energiju prilikom punjenja, a zatim postaju dinamička skladišta energije vraćajući energiju u mrežu. U koordiniranom punjenju, EV-a uzimaju električnu energiju iz mreže za punjenje baterija za vrijeme niskih opterećenja, odnosno u dolinama krivulje opterećenja, dok u V2G-u EV-a mogu djelovati oko izvori energije, nudeći povratnu isporuku električne energije u mrežu kada je to potrebno. Koristeći funkcionalnosti pametne mreže, električna vozila mogu se koristiti kao dinamička opterećenja ili dinamički sustavi za pohranu. Protok energije u ovom sustavu može biti jednosmjernan ili dvosmjernan. Jednosmjerni sustav analogan je koordiniranom sustavu punjenja, vozila se pune kada je opterećenje nisko, ali vrijeme punjenja vozila automatski određuje sustav. Vozila koja koriste ovu shemu jednostavno se mogu priključiti u bilo koje vrijeme, a sustav će odabrati prikladno vrijeme za punjenje. Dvosmjerni sustav omogućuje vozilima da vraćaju energiju mreži.

Osnovna ideja V2G tehnologije je iskoristiti baterije EV-a kao dinamičke energetske resurse koji doprinose stabilizaciji elektroenergetske mreže. V2G sustavi pretvaraju EV-a u sustave za skladištenje energije. Koji postaju sve neophodniji za održavanje stabilnosti sustava, pogotovo sa sve većim integriranjem obnovljivih izvora energije u sustav. Uz to budući da vozila većinu svog vremena provede parkirana, električna energija iz njihovih baterija mogu se koristiti za pokrivanje vršnih opterećenja ili u slučaju potrebe za dodatnom energijom.

Iako V2G tehnologija donosi mnoge koristi, postoje i izazovi koji trebaju biti riješeni kako bi se potpuno iskoristio njezin potencijal. To uključuje razvoj standardiziranih protokola i sustava za upravljanje, kao i osiguranje da česte promjene u punjenju i pražnjenju ne utječu negativno na životni vijek baterija električnih vozila.

Uz brz napredak tehnologije i sve većim brojem električnih vozila na cestama, V2G tehnologija postaje ključni element u ostvarivanju održive i pametne elektroenergetske mreže budućnosti.

#### 4.4.2. Utjecaj na okoliš

Jedan od glavnih čimbenika koji su potaknuli povećanje popularnosti EV-a je njihov doprinos smanjenju emisije stakleničkih plinova. Konvencionalna vozila s unutarnjim izgaranjem izravno sagorijevaju gorivo i time proizvode štetne plinove, uključujući ugljični dioksid i ugljični monoksid. Iako hibridna električna vozila (HEV) i priključno hibridna električna vozila (PHEV) imaju motore s unutarnjim izgaranjem, njihove emisije su manje nego kod konvencionalnih vozila. Također, EV-a ne ispuštaju ispušne plinove što značajno poboljšava kvalitetu zraka u urbanim sredinama te se na taj način povećava kvaliteta života lokalnog stanovništva. Još jedan od načina s kojim EV-a poboljšavaju kvalitetu življenja u urbanim sredinama je njihov tihi rad. Električni motori proizvode manje buke od konvencionalnih motora što znatno smanjuje buku u urbanim sredinama.

Međutim, ako se električna energija potrebna za punjenje EV-a dobiva sagorijevanjem fosilnih goriva koji emitiraju štetne plinove može doći povećanja emisije stakleničkih plinova. Ovaj scenarij događa se kada EV-a pune na nekontroliran način tj. kada EV-a punimo za vrijeme vršnih opterećenja. Da velika konvencionalna postrojenja moraju povećati svoju proizvodnju električne energije što dovodi do puno većih emisija stakleničkih plinova. Ovo se može izbjeći koordiniranim punjenjem te punjenjem EV-a uz pomoć obnovljivih izvora energije.

EV-a su upravo zbog svojih pozitivnih utjecaja na okoliš danas sve popularnija. Njihovo korištenje dovodi do smanjenja emisija stakleničkih plinova, poboljšanja kvalitete zraka, smanjenju buke i smanjenja potrošnje fosilnih goriva što ih čini ključnim alatom u ostvarivanju cilja čiste i zelene ekologije.

#### 4.4.3. Utjecaj na ekonomiju

S aspekta vlasnika EV-a, EV-ovi pružaju manje operativne troškove zbog njihove superiornije učinkovitosti. Njihova učinkovitost je oko 70% što je puno više nego što iznosi učinkovitost konvencionalnih vozila. Također, trenutne visoke cijene EV-a vjerojatno će se smanjiti zbog masovne proizvodnje i boljih energetske politike, što će dodatno povećati ekonomske dobitke vlasnika. Vlasnici EV-a uštedit će i na gorivu, budući da je električna energija jeftinija u odnosu na fosilna goriva.

V2G je još jedan način koji omogućuje vlasnicima da ostvare financijske koristi od svojih vozila pružanjem usluga mreži. Davatelji usluga električne energije također imaju koristi od integracije EV-a uglavnom primjenom koordiniranog punjenja i V2G-a. EV-a im omogućuju lakše savladavanje vršnih opterećenja i bolju integraciju obnovljivih izvora.

Da bismo iskoristili sve pozitivne utjecaje koje električna vozila mogu imati na električnu mrežu, okoliš i ekonomiju, ali istovremeno izbjegli sve negativne utjecaje, potrebno je integrirati ih u pametne sustave koji omogućuju razvoj naprednih tehnologija poput Vehicle-to-Grid sustava. Korištenjem ovih sustava, možemo postići koordinirano ili pametno punjenje EV-a, ali i omogućiti

im da sudjeluju u održavanju stabilnosti elektroenergetskog sustava. Pametne mreže i V2G sustavi transformiraju EV-e u sustave za pohranu energije i omogućuju dvosmjerni tok energije. To znači da EV-i mogu primiti energiju iz mreže tijekom punjenja, ali i vraćati energiju u sustav kada je to potrebno. U ovakvim sustavima, EV-i se mogu smatrati virtualnim baterijama, doprinoseći tako fleksibilnosti i stabilnosti elektroenergetskog sustava.

## 5. Virtualne baterije

Virtualne baterije predstavljaju inovativan pristup implementacije EV-a u elektroenergetski sustav. Umjesto da EV-a koristimo samo za transport te baterije EV-a samo za pokretanje vozila, koncept virtualne baterije proširuje njihovu funkcionalnost na skladištenje i upravljanje električne energije. Kao što smo već rekli tehnologija, poput V2G, omogućuje EV-a da električnu energiju pohranjenu u bateriji vozila vraća nazad u mrežu kada je to potrebno. U takvom scenariju EV-a možemo smatrati virtualnom baterijom.

Virtualna baterija je koncept koji koristi distribuirane baterije električnih vozila kao fleksibilan resurs za skladištenje i upravljanje električnom energijom. Umjesto fizičkog centraliziranog skladištenja, virtualna baterija koristi kapacitet baterija EV-a raspoređenih po vozilima kao distribuirane sustave za skladištenje energije. Ovaj koncept omogućuje korištenje kapaciteta baterija EV-a za skladištenje viška električne energije iz mreže ali isto tako nudi podršku sustavu za vrijeme vršnih opterećenja ili nestabilnosti unutar sustava.

Glavna zadaća virtualne baterije je dinamično upravljanje punjenjem i pražnjenjem baterije EV-a. Ovisno o trenutnim zahtjevima elektroenergetskog sustava virtualna baterija može odlučivati kada će se EV-a puniti, a kada će energiju pohranjenu u bateriji EV-a vraćati u sustav. U ovom konceptu baterije EV-a će se puniti kada postoji višak električne energije ili kada je električne energije jeftinija, recimo tijekom noćnih sati. Dok se pražnjenje baterije EV-a može koristiti kao dodatan izvor energije u trenucima kada je potrebno izbalansirati opterećenje u mreži ili pružiti podršku sustavu za vrijeme vršnih opterećenja.

Implementacija virtualnih baterija u elektroenergetski sustav ima niz prednosti. Prvo, omogućuju bolju i bržu integraciju EV-a u elektroenergetski sustav. Uz pomoć virtualne baterije elektroenergetski sustav ne vidi EV-a kao novo opterećenje sustavu. Implementacija EV-a može dovesti do niza negativnih utjecaja na elektroenergetski sustav ali u kombinaciji sa virtualnim baterija EV-a zapravo mogu povećati stabilnost mreže i dovesti do optimizacije cijelog elektroenergetskog sustava. Također, virtualne baterije mogu imati veliku ulogu u smanjenju vršnih opterećenja sustava nudeći električnu energiju skladištenu u bateriji EV-a kao dodatni izvor energije.

Naravno implementacija virtualnih baterija suočava se i sa određenim izazovima. Virtualne baterije zahtijevaju napredne tehnologije i pametne sustave za upravljanje energije. Također, potrebno je razviti komunikacijsku infrastrukturu kako bi se osigurala dobra i sigurna komunikacija između EV-a, energetske mreže i sustava za upravljanje.

U nastavku rada prikazano je istraživanje koje je provelo „Fakultet za elektrotehniku“ u Ljubljani. Istraživanje je provedeno za uvjete u Sloveniji za 2030. godinu kada se očekuje 200.000 EV-a na cesti. Uz pomoć ovog istraživanja prikazat ćemo mogućnosti primjene virtualnih baterija u elektroenergetskom sustavu.



## 5.1. Primjena virtualnih baterija u elektroenergetskom sustavu

Primjenom virtualnih baterija u elektroenergetskom sustavu dovodi do povećanje stabilnosti cijelog sustava. Virtualne baterije u elektroenergetski sustav dovode nove izvore električne energije ali i smanjuje opterećenje mreže uzrokovano punjenje EV-a. Sa sve većim brojem EV-a koji se svakodnevno koriste potrebno je obratiti pozornost na njihov utjecaj na električnu mrežu. Kako bi se izbjegli svi negativni utjecaji na električnu mrežu uzrokovani punjenjem EV-a, koje smo i ranije spomenuli potrebno je implementirati virtualne baterije koje će uz pomoć pametnog punjenja kontrolirati punjenje i pražnjenje EV-a. U trenutku kada se EV-a poveže sa sustavom on postaje dio jedne virtualne baterije te postaje aktivnim elementom sustava. Prilikom nadzora punjenja i pražnjenja električnih baterija potrebno je biti oprezan jer su EV-a u većini slučajeva privatna, bilo za privatnu ili poslovnu uporabu. Implementacija pametnog punjenja u kojem virtualna baterija kontrolirana punjenje i pražnjenje EV-a može utjecati na aktivnu snagu i stanje napunjenosti (State of Charge - SOC ) svake baterije EV-a.

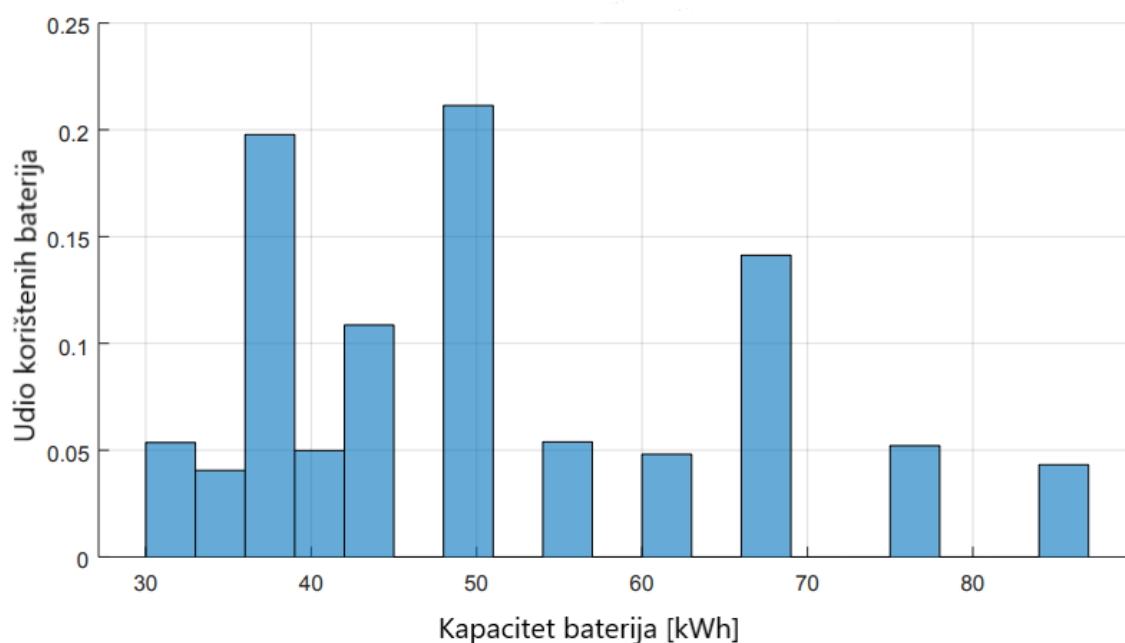
Za ostvarivanje navedene funkcionalnosti, potrebno je prvo široj javnosti predstaviti utjecaj iste na EV-a i na vožnje svakog pojedinca, jer bi svaki pojedinac trebao dopustiti operatoru mreže ili trećoj osobi da upravlja njegovim vozilom. Prilikom nadzora EV-a, operator bi samo nadzirao punjenje i pražnjenje baterije, pri čemu bi svaki pojedinac trebao odrediti kolika napunjenost baterije treba biti u svakom trenutku. Određena minimalna napunjenost baterije osigurava hitne vožnje koje nisu bile predviđene u izvornom dnevnom planu vožnji.

U prikazanom istraživanju promatrana su dva scenarija. U prvom scenariju prikazana su EV-a koja kada su parkirana nisu povezana sa sustavom. Dok su u drugom scenariju prikazani EV-a koja su parkirana i povezana sa sustavom te se mogu koristiti za povezivanje u virtualnu bateriju. Analiza virtualne baterije provedena je za uvjete u Sloveniji za 2030. godinu kada se očekuje 200.000 EV-a. Različita EV-a odabrana su prema njihovoj popularnosti u Sloveniji. Fleksibilnost virtualne baterije temeljena je na dva granična uvjeta, održavanju maksimalnog i minimalnog SOC virtualne baterije. Prilikom održavanja maksimalnog SOC-a virtualne baterije, baterija EV-a se počinje puniti odmah nakon priključenja i puni se do maksimuma. Kod održavanja minimalnog SOC-a virtualne baterije, baterija EV-a se počinje se puniti prije putovanja i puni se samo za putovanje ili putovanja do sljedećeg priključivanja na mrežu. Baterija nije potpuno ispražnjena, uvijek sadržava neki minimalni SOC zbog nepredviđenog događaja. Spomenuto istraživanje će nam prikazati koliko je snage ili električne energije dostupno u određenom trenutku za pružanje usluga sustava. Na početku istraživanja bilo je potrebno odabrati EV-a te prikazati njihove dnevne profile vožnje.

### 5.1.1. Odabir električnih vozila

Ponuda električnih vozila na tržištu svakim danom raste, stoga možemo očekivati da ćemo i u prometu imati više različitih električnih vozila. Svako električno vozilo se razlikuje od drugog po određenim specifikacijama. Glavne specifikacije koje su se promatrane u spomenutom istraživanju su potrošnja električne energije, kapacitet baterije i snaga punjenja. S time da je snaga punjenja

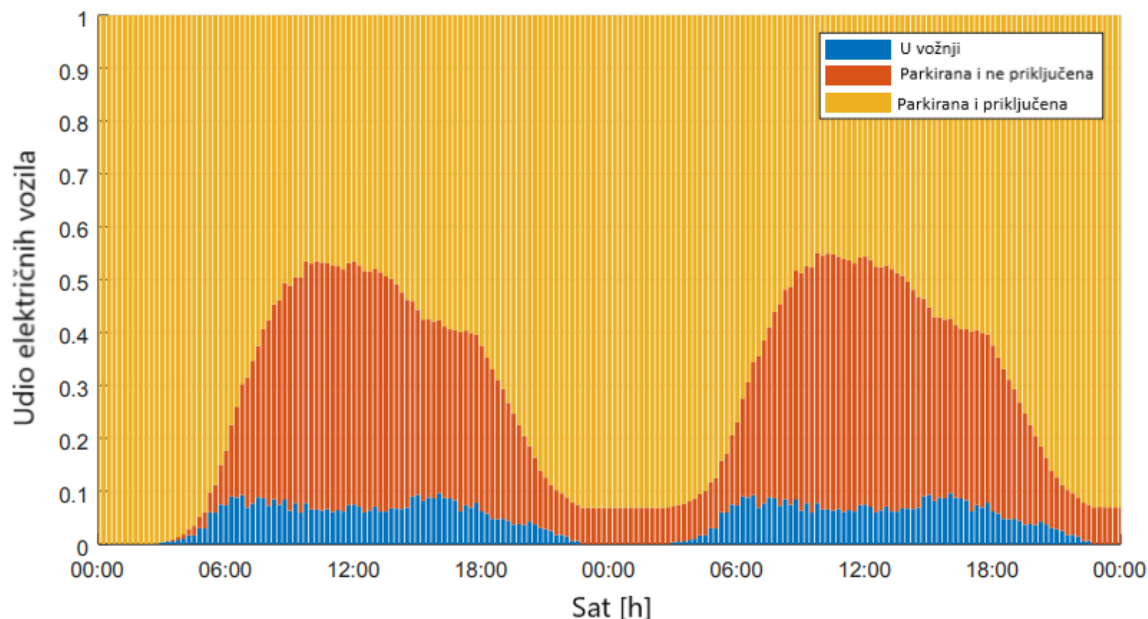
za sva električna vozila uvijek bila jednaka dok je udio korištenih električnih vozila s obzirom na kapacitet baterije prikazan na slici 5.1.



*Slika 5.1. Prikaz korištenih vozila prema kapacitetu baterije. Izvor: [20]*

U većini slučajeva EV-a koristimo za vožnju do posla, trgovine ili sličnih mjesta te većinu svoga vremena EV provede parkirano. EV-a mogu biti parkirana na različitim parkiralištima. U spomenutom istraživanju parkirna mjesta bila su podijeljena prema tome dali je EV priključeno na mrežu ili ne. U istraživanju EV-a bila su priključena na mrežu kod kuće i na poslu, dok na ostalim parking mjestima nisu bila priključena na mrežu. Za svako vozilo bilo je potrebno odrediti dnevni profil vožnje. U istraživanju je korišteno 3 545 različitih dnevnih profila vožnje. Na slici 5.2 prikazano je stanje EV-a za određeni sat u toku dana. Žutom bojom su prikazana ona vozila koja su u tom satu parkirana i priključena na mrežu, crvenom ona vozila koja su parkirana ali nisu priključena dok plava boja prikazuje vozila u vožnji. Dakle, sa slike možemo zaključiti da su u većini slučajeva EV-a parkirana i priključena na mrežu.

Nakon što smo prikazali specifikacije EV-a koji su se koristili u istraživanju te prikazali različite profile vožnje. Odnosno prikazali koliko vozila je priključeno na mrežu u svakom pojedinom satu prikazat ćemo izraze i modele uz pomoć kojih izračunavamo napunjenost virtualne baterije te količinu električne energije s kojom raspolažemo u određenom trenutku.



Slika 5.2. Prikaz stanja električnih vozila za svaki sat. Izvor: [20]

### 5.1.2. Određivanje napunjenosti virtualne baterije

Virtualne baterije se mogu koristiti na manjih mjestima u elektroenergetskom sustavu kako bi se postigla decentralizacija sustava. U prikazanom istraživanju sva EV-a u Sloveniji čine jednu virtualnu bateriju. Na taj način moći će se lakše prikazati koliko električne energije dostupno u Sloveniji. Kao što smo već spomenuli fleksibilnost virtualne baterije određena je za dva rubna uvjeta ili način punjenja. Prvi način punjenja je održavanje maksimalne napunjenosti baterije cijelo vrijeme, što znači da baterija počinje puniti odmah nakon vožnje, odnosno priključivanja na mrežu. Drugi način punjenja je održavanje minimalne napunjenosti baterije. U ovom načinu punjenja baterija se napuni prije početka vožnje, ali samo koliko je potrebno za vožnju ili vožnju dok ponovno nije priključena na mrežu. Baterija je stalno punjena minimalnom vrijednošću, budući da se tijekom vožnje mogu dogoditi nepredviđeni događaji poput obilaska zbog radova ili nesreće na cesti.

Za svako EV  $a$  potrebno je posebno odrediti napunjenost baterije  $W_{a,t}$  za zadani trenutak  $t$ . Napunjenost baterije  $W_{a,t}$  izračunava se pomoću sljedeće jednadžbe:

$$W_{a,t} = W_{a,t-1} + P_{a,t} \cdot \eta_a \cdot \Delta t - W_{a,t}^t \quad (5.1)$$

gdje je  $W_{a,t}$  trenutna napunjenost baterije,  $W_{a,t-1}$  napunjenost baterije u prethodnom promatranom trenutku,  $\eta_a$  učinkovitost punjenja,  $\Delta t$  vremenski korak između dva promatrana trenutka punjenja i  $W_{a,t}^t$  potrošnja energije vozila u trenutku  $t$ .

Uz pravilan odabir vrijednosti pojedinih varijabli jednadžba 5.1 vrijedi i tijekom punjenja vozila ali i tijekom vožnje. Kada je vozilo u vožnji, tada je snaga punjenja  $P_{a,t} = 0 \text{ kW}$ , a potrošnja tijekom

vožnje  $W_{a,t}^p > 0kW$ . Dok je vozilo parkirano, varijable imaju obrnute vrijednosti,  $W_{a,t}^p = 0$ , a snaga punjenja iznosi  $P_{a,t} > 0 kW$  ili  $P_{a,t} = 0 kW$ , ovisno o tome puni li se baterija ili ne. Ipak, važno je uzeti u obzir da je baterija ograničena minimalnom i maksimalnom vrijednošću napunjenosti baterije, što je prikazano nejednakostima:

$$C_a \cdot SOC_a^{min} \leq W_{a,t} \leq C_a \cdot SOC_a^{max} \quad (5.2)$$

gdje  $SOC_a^{min}$  i  $SOC_a^{max}$  predstavljaju minimalni i maksimalni postotak napunjenosti baterije ("State of Charge") te  $C_a$  predstavlja kapacitet baterije pojedinog električnog vozila. U jednadžbi 5.1 također je potrebno uzeti u obzir i maksimalnu snagu s kojom se može puniti baterija, koja je povezana s punionicom:

$$0 \leq P_{a,t} \leq P_a^{max} \quad (5.3)$$

gdje je  $P_a^{max}$  maksimalna snaga s kojom se može puniti baterija vozila.

Za početak potrebno je odrediti donju i gornju krivulju napunjenosti za svako EV ( $W_{a,t}^{donja}$  i  $W_{a,t}^{gornja}$ ). Gornja krivulja napunjenosti zapisana je izrazom:

$$W_{a,t}^{gornja} = C_a \cdot SOC_a^{max}. \quad (5.4)$$

Dok je donja krivulja napunjenosti jednaka gornjoj vrijednosti napunjenosti umanjenoj za potrošnju energije u jednom danu, što je prikazano sljedećom jednadžbom

$$W_{a,t}^{donja} = W_{a,t}^{gornja} - W_{p,1d} \quad (5.5)$$

gdje je  $W_{p,1d}$  potrošnja energije vozila u jednom danu.

Za svaki trenutak u danu određena je i snaga pražnjenja  $P_{a,t}^{gornja}$  i snaga punjenja  $P_{a,t}^{donja}$ , kao što je prikazano u sljedećim jednadžbama

$$P_{a,t}^{gornja} = \max \left( \min \left( P_{a,t}^{max}, \frac{W_{a,t}^{gornja} - W_{a,t-1}^{donja}}{\eta_a \cdot \Delta t} \right), 0 \right) \quad (5.6)$$

$$P_{a,t}^{donja} = \max \left( \min \left( P_{a,t}^{max}, \frac{W_{a,t}^{donja} - W_{a,t-1}^{gornja}}{\eta_a \cdot \Delta t} \right), 0 \right) \quad (5.7)$$

Pri drugom načinu punjenja, održavanje minimalne napunjenosti baterije, baterija se puni prije početka vožnje što je prikazano jednadžbama 5.8 i 5.9, odnosno jednadžbama sa indeksom 2.

$$P_{a,t}^{gornja,2} = \max \left( \min \left( P_{a,t}^{max}, \frac{W_{a,t}^{gornja} - W_{a,t-1}^{donja,2}}{\eta_a \cdot \Delta t} \right), 0 \right) \quad (5.8)$$

$$P_{a,t}^{donja,2} = \max \left( \min \left( P_{a,t}^{max}, \frac{W_{a,t}^{donja,2} - W_{a,t-1}^{gornja}}{\eta_a \cdot \Delta t} \right), 0 \right) \quad (5.9)$$

Povezivanjem svih EV-a u jednu cjelinu nastaje virtualna baterija. Model virtualne baterije prikazan je jednadžbom:

$$W_{n,t} = W_{n,t-1} + P_{n,t} \cdot \eta_{n,t} \cdot \Delta t + W_{n,t}^{ulaz} - W_{n,t}^{izlaz} \quad (5.10)$$

gdje je  $W_{n,t}$  napunjenost virtualne baterije,  $W_{n,t-1}$ , napunjenost virtualne baterije u prethodnom promatranom trenutku,  $P_{n,t}$  snaga punjenja virtualne baterije,  $\eta_{n,t}$  učinkovitost punjenja virtualne baterije,  $\Delta t$  vremenski korak između dva promatrana trenutka,  $W_{n,t}^{ulaz}$  količina energije koja se dodaje virtualnoj bateriji i  $W_{n,t}^{izlaz}$  količina energije koju virtualna baterija predaje sustavu.

Kapacitet virtualne baterije ne smije premašiti ukupne kapacitete svih vozila priključenih na mrežu u određenom trenutku:

$$W_{n,t}^{min} \leq W_{n,t} \leq W_{n,t}^{max}. \quad (5.11)$$

Spajanje svih vozila u jednu virtualnu bateriju u analiziranom sustavu prikazano je sljedećim jednadžbama:

$$W_t^{min} = \sum_a u_{a,t}^V \cdot W_{a,t}^{donja} \quad (5.12)$$

i

$$W_t^{max} = \sum_a u_{a,t}^V \cdot W_{a,t}^{gornja} \quad (5.13)$$

gdje  $W_t^{min}$  i  $W_t^{max}$  prikazuju minimalnu i maksimalnu napunjenost virtualne baterije. Dok je minimalna i maksimalna snaga virtualne baterije ( $P_t^{min}$  i  $P_t^{max}$ ) prikazana sljedećim jednadžbama:

$$P_t^{min} = \sum_a u_{a,t}^V \cdot P_{a,t}^{donja} \quad (5.14)$$

i

$$P_t^{max} = \sum_a u_{a,t}^V \cdot P_{a,t}^{gornja}. \quad (5.15)$$

U jednadžbama 5.12, 5.13, 5.14 i 5.15 varijabla  $u_{a,t}^V$  određuje jeli vozilo priključeno na mrežu ili nije. Ako je vozilo u vožnji ili samo parkirano varijabla  $u_{a,t}^V$  ima vrijednost 0, dok ako je vozilo parkirano i priključeno na mrežu tada varijabla  $u_{a,t}^V$  ima vrijednost 1.

Ukupna iskoristivost virtualne baterije jednaka je zbroju iskoristivosti pojedinih električnih vozila, što je prikazano sljedećom jednadžbom:

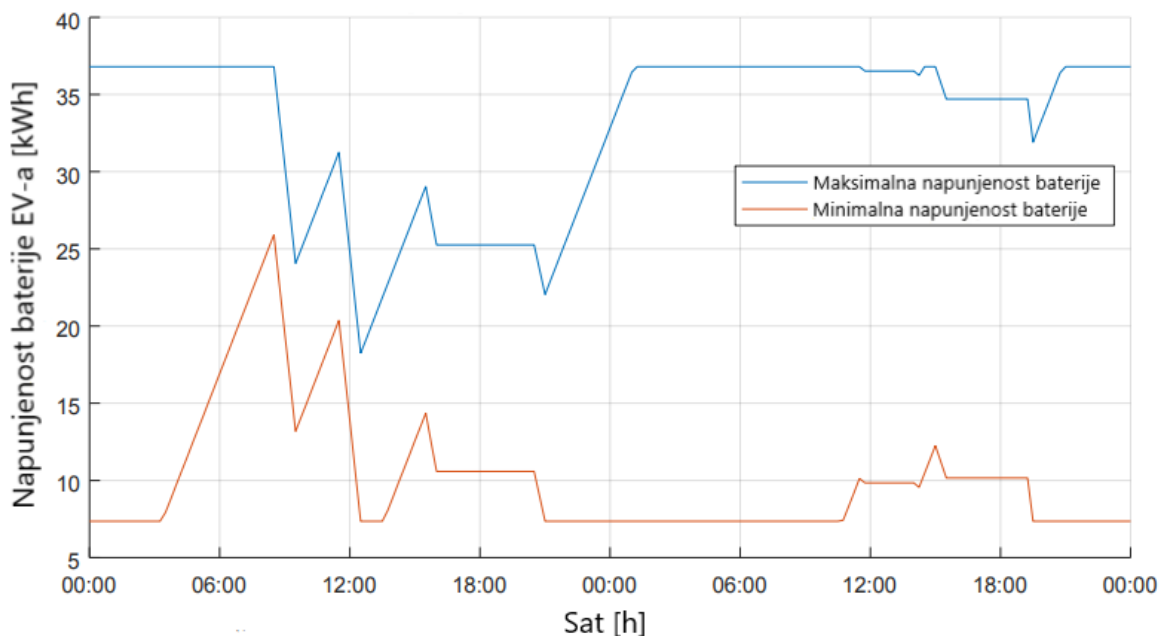
$$\eta_{n,t} = \frac{\sum_a u_{a,n,t}^V \cdot \eta_{n,t}^A}{u_{a,n,t}^V}. \quad (5.16)$$

### 5.1.3. Rezultati istraživanja

U spomenutom istraživanju pri određivanju napunjenosti virtualne baterije uzeto je u obzir 3.545 različitih dnevnih profila vožnji, koji su zatim odgovarajuće skalirani na 200.000 električnih vozila, budući da bi toliko električnih vozila trebalo biti dostupno do 2030.

Na slici 5.3 prikazano je punjenje i pražnjenje baterije za nasumično odabrano EV. Plavom bojom prikazano je napunjenost baterije prilikom odražavanja maksimalne napunjenosti baterije. U ovom scenariju možemo vidjeti kako se baterija EV-a tijekom noći napuni do maksimuma te se prilikom svakog sljedećeg priključenja na mrežu odmah počinje puniti. Crvenom bojom prikazan je scenarij u kojem se održava minimalna napunjenost baterije. Iz ovog scenarija možemo vidjeti kako se

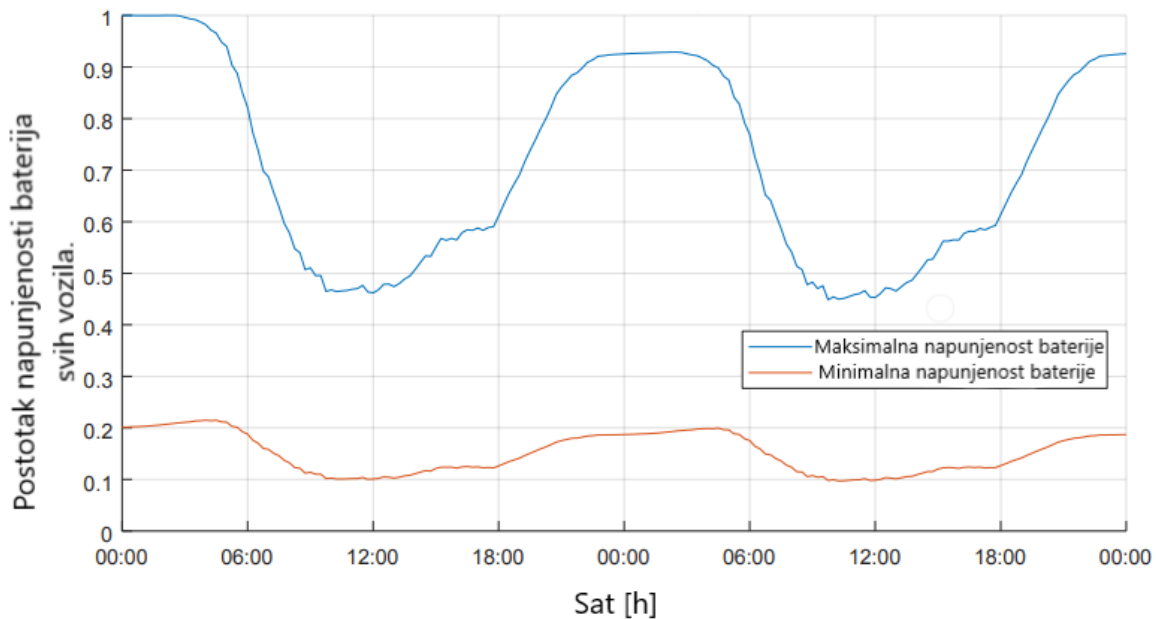
baterija EV-a počinje puniti ujutro prije polaska te se sa svakim sljedećim punjenjem održava minimalna napunjenost baterije. U ovom scenariju baterija se puni samo koliko je potrebno za vožnju do sljedećeg priključenja na mrežu.



Slika 5.3. Prikaz punjenja i pražnjenja baterije jednog EV-a. Izvor: [20]

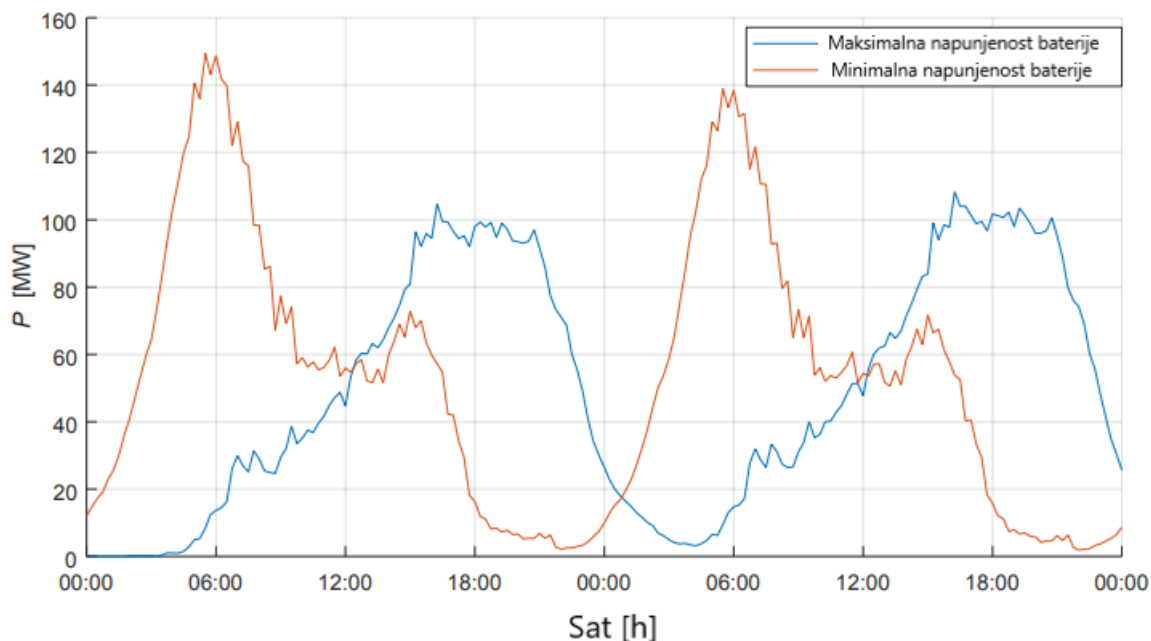
Maksimalan ukupni kapacitet virtualne baterije iznosi 10,16 MWh. Na slici 5.4 prikazan je postotak napunjenosti virtualne baterije tijekom dana. Napunjenost virtualne baterije razlikuje u dva promatrana scenarija. Prilikom održavanja maksimalne napunjenosti baterije, što je prikazano plavom bojom, možemo vidjeti kako tijekom dana napunjenost baterije pada na 50% maksimalnog kapaciteta virtualne baterije, što iznosi otprilike 5 MWh. Tijekom noći, baterije EV-a se pune te se virtualna baterija napuni do 90% napunjenosti. Pri održavanju minimalne napunjenosti baterije EV-a, što je prikazano žutom bojom, napunjenost baterije je uvijek između 10% i 20%, budući da se EV-a pune samo energijom potrebno za daljnju vožnju.

Sa slike 5.4 također je vidljivo kolika je trenutna količina električne energije pohranjena u virtualnoj bateriji. Kod održavanja minimalne napunjenosti, virtualna baterija ima između 10% i 20% svog ukupnog kapaciteta. To znači da u ovom scenariju virtualna baterija teoretski može pružiti između 1MWh i 2MWh električne energije elektroenergetskom sustavu. Treba uzeti u obzir i minimalnu vrijednost s kojom baterija EV-a uvijek mora biti napunjena u slučaju nepredviđenih vožnji. Kod održavanja maksimalne napunjenosti baterije, virtualna baterija raspolaže s puno većom količinom električne energije u usporedbi s minimalnom napunjenosti. U ovom scenariju, virtualna baterija raspolaže s 50% do 90% svog ukupnog kapaciteta, što iznosi između 5MWh i 9MWh.



Slika 5.4. Prikaz postotka punjenosti virtualne baterije. Izvor: [20]

Bitno je naglasiti da se baterije EV-a ne u pune istovremeno. Do maksimalna snage punjenja pri održavanju minimalne napunjenosti dolazi u jutarnjim satima, budući da se većina vozila puni prije početka vožnje. Nasuprot tome, maksimalna snaga punjenja pri održavanju maksimalne napunjenosti baterije nije tako izražena, budući da traje neko vrijeme i niža je nego u prethodnom scenariju. Problem se javlja u večernjim satima kada se maksimalna snaga punjenja EV-a poklapa sa vršnim opterećenje elektroenergetskog sustavu. Maksimalne snage punjenja prikazane su na slici 5.5. Ovo stvara izazove u upravljanju mrežom, jer istovremeno punjenje svih EV-a može dovesti do preopterećenja mreže i destabilizacije elektroenergetskog sustava.



Slika 5.5. Prikaz snage punjenja virtualne baterije. Izvor: [20]

Iz istraživanja možemo vidjeti kako virtualne baterije mogu dinamički prilagoditi punjenje i pražnjenje baterije EV-a prema zahtjevima elektroenergetskog sustava.

Održavanje minimalne napunjenosti baterije održava minimalnu električnu energiju u bateriji EV-a potrebnu za vožnju do sljedećeg priključenja te na taj način stvara manje opterećenje na sustav. Problem je što ovakav način punjenja dovodi do velikih maksimalnih snaga punjenja u jutarnjim satima. Također, kod ovog načina punjenja virtualna baterija ne može pružiti dodatnu energiju sustavu prilikom vršnih opterećenja, budući da se kapacitet virtualne baterije drži na minimalnoj vrijednosti. S druge strane, prilikom održavanja maksimalne napunjenosti baterije virtualne baterije, u određenim trenucima može doći do dodatnog opterećenja sustava. Na primjer, ako promatramo sliku 5.4 i uzmete u obzir trenutak između 17:00 i 18:00 sati, koji često predstavlja vršno opterećenje u elektroenergetskom sustavu. U tom vremenskom razdoblju, baterije električnih vozila se obično pune, što dodatno opterećuje sustav. To može rezultirati negativnim utjecajima na stabilnost elektroenergetskog sustava, kako smo opisali u poglavlju 4.4.1..

Možemo zaključiti da bi ovakve situacije trebalo izbjeći. Jedan način postizanja toga je da se razlika u energiji između održavanja maksimalne i minimalne napunjenosti baterije iskoristi na koristan način. Na primjer, u navedenom vremenskom intervalu, razlika u energiji između održavanja maksimalne i minimalne napunjenosti baterije iznosi između 40% i 50%. To znači da bi sva ta dodatna energija virtualne baterije mogla biti isporučena elektroenergetskom sustavu kako bi pružila podršku tijekom vršnih opterećenja.

U takvom scenariju, električna vozila bi i dalje imala dovoljno električne energije za putovanje do sljedeće točke priključka, dok bi virtualna baterija pružila stabilizaciju elektroenergetskog sustava. Električna vozila bi se tijekom noći, kada je potražnja za električnom energijom manja, mogla



ponovno napuniti do svojeg maksimalnog kapaciteta.

Ovo istraživanje naglašava kako upravljanje punjenjem i pražnjenjem električnih vozila putem virtualnih baterija može imati pozitivan utjecaj na elektroenergetski sustav. Kombiniranjem oba načina punjenja, izbjegavamo punjenje električnih vozila tijekom vršnih opterećenja, dok istovremeno osiguravamo dostupnost električne energije iz vozila za podršku sustavu. Ovi čimbenici olakšavaju integraciju električnih vozila u elektroenergetski sustav. Virtualne baterije osiguravaju da elektroenergetski sustav ne percipira električna vozila samo kao dodatno opterećenje, već i kao dodatan izvor energije koji pruža dodatnu stabilnost.

#### 5.1.4. Integracija obnovljivih izvora energije

Virtualne baterije, osim što olakšavaju integraciju EV-a u elektroenergetski sustav, imaju ključnu ulogu u olakšavanju integracije obnovljivih izvora energije. Kao što već znamo obnovljivi izvori energije su varijabilni i nestabilni. Recimo solarni paneli ne proizvode istu količinu električne energije svaki dan. Isto tako proizvedena električna energije iz solarnih panela u jednom danu može jako varirati. Isto vrijedi i za vjetroelektrane. Stoga održavanje stabilnosti sustava i ravnoteže između proizvodnje i potrošnje električne energije može biti izazovno. Korištenjem virtualnih baterija mogu se baterije EV-a koristiti kao sustavi za skladištenje viška električne energije iz obnovljivih izvora za kasniju upotrebu kada proizvodnja iz obnovljivih izvora nije dovoljna.

Primjerice, tijekom vjetrovitih noći, kada potražnja za električnom energijom nije velika te proizvodnja iz vjetroelektrana premašuje trenutnu potrošnju, višak energije se može koristiti za punjenje EV-a. Kasnije se ta energije može vraćati u sustav tijekom niske proizvodnje iz obnovljivih izvora ili za vrijeme vršnih opterećenja. Integracijom sve većeg broja obnovljivih izvora uz pomoć virtualnih baterija također znatno smanjujemo emisije  $CO_2$  u elektroenergetskom sektoru. Pametnim korištenjem energije iz obnovljivih izvora te skladištenjem te energije za kasniju upotrebu elektroenergetski sustav postaje sve manje ovisan od fosilnim gorivima.

Kombinacija obnovljivih izvora energije s virtualnim baterijama omogućava ubrzanu integraciju obnovljivih izvora energije, što pridonosi bržem razvoju održivog i čistog elektroenergetskog sustava. Ova kombinacija omogućava bolje iskorištenje obnovljivih izvora energije, smanjujući ovisnost o fosilnim gorivima. Brža integracija obnovljivih izvora energije uz pomoć virtualnih baterija doprinosi postizanju ciljeva smanjenja emisija  $CO_2$  i stvaranju energetski održivije budućnosti.

## 5.2. Budućnost virtualnih baterija

Sa brojem električnih vozila i brojem obnovljivih izvora unutar elektroenergetskog sustava trenutno virtualne baterije ne mogu imati veliku utjecaj na elektroenergetski sustav. Ali kako se uz pomoć zakona i poticaja koje pruža Europska unija ali i države na drugim kontinentima broj električnih vozila i broj obnovljivih izvora svake godine povećava možemo očekivati kako će virtualne

baterije imati ključnu ulogu u razvoju novog elektroenergetskog sustava.

Virtualne baterije predstavljaju ključni element u transformaciji elektroenergetskog sektora prema održivijem i inteligentnijem modelu. Uvođenje električnih vozila i obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sustav bez njihove kombinacije sa pametnim sustavima, poput virtualne baterije, može rezultirati više negativnih utjecaja nego pozitivnih. Bitno je nastaviti tehnološki napredak virtualnih baterija kako bi se postiglo optimalno upravljanje energije i osigurala dobra i sigurna komunikacija između EV-a, obnovljivih izvora, virtualne baterije i cijelog elektroenergetskog sustava.

S razvojem tehnologije i padom cijena, očekuje se daljnja integracija obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sustav. Virtualne baterije će imati ključnu ulogu u podršci ovoj integraciji, omogućujući pohranu viškova proizvedene energije za korištenje tijekom razdoblja niske proizvodnje ili visoke potražnje. Isto tako virtualne baterije olakšat će integraciju EV-a, pretvarajući EV-a u sustave za skladištenje električne energije i distribuciju električne energije.

Daljnji razvoj umjetne inteligencije i naprednih algoritama omogućit će razvoj autonomnih sustava upravljanja virtualnim baterijama. Ovi sustavi će biti sposobni brzo i precizno reagirati na promjene u proizvodnji i potrošnji električne energije, optimizirajući rad virtualnih baterija i pružajući stabilnost elektroenergetskom sustavu.

Budućnost virtualnih baterija je svijetla i obećavajuća. Njihova sposobnost da nam olakša integraciju obnovljivih izvora i električnih vozila te pružanje fleksibilnosti, stabilnosti i održivosti elektroenergetskog sustava čini ih ključnim elementom u elektroenergetskoj tranziciji.

## 6. Zaključak

Na samome početku ovoga rada upoznali smo se s procesom elektroenergetske tranzicije u kojem se trenutno nalazi elektroenergetski sustav. Elektroenergetska tranzicija zahtjeva velike probleme u svim sektorima energetike. Najveći problem je što se proces dešava bez povijesnog iskustva ali je nužan kako bi se održala stabilnost energetskeg sustava. Radi sve većih klimatskih promjena i globalnog zatopljenja, čiji je glavni uzročnik emisija stakleničkih plinova, potrebno je stvoriti novi čisti i održivi elektroenergetski sustav. Konačni cilj elektroenergetske tranzicije je stvoriti elektroenergetski sustav sa nulnim emisijama štetnih plinova ali istovremeno poboljšati kvalitetu i standard življenja. Najveća promjena prema ostvarenju toka cilja biti će promjena u načinu proizvodnje i korištenju električne energije. Potrebno je izgraditi veliki broj novih elektrana koje koriste čiste i obnovljive izvore. Također, velika promjena desit će se u prometnom sektoru, koji se smatra drugim najvećim izvorom emisije štetnih plinova.

S povećanom integracijom obnovljivih izvora energije i električnih vozila potreba za prilagodbom sustava postaje sve veća. U tom kontekstu, koncept virtualnih elektrana izrasta kao ključni instrument za integraciju i upravljanje raznovrsnim izvorima energije. Virtualne elektrane su pametni sustavi koji održavaju optimalan tok energije unutar svog sustav, omogućuju krajnjim korisnicima da postanu aktivni sudionici na tržištu električne energije i održavaju stabilnost sustava.

Nadalje, uloga električnih vozila u elektroenergetskoj tranziciji postaje sve značajnija. Električna vozila koriste elektromotor koji koristi električnu energiju za svoj pogon te na taj način ne emitiraju štetne plinove. Uz to veoma su tihi što doprinosi kvaliteti življenja u urbanim mjestima. Osim što električna vozila doprinose smanjenju emisija štetnih plinova njihova kombinacija sa pametnim tehnologijama, poput V2G, može doprinijeti u očuvanju stabilnosti elektroenergetskog sustava.

Na kraju rada upoznali smo se sa virtualnim baterijama. U trenutku kada je električno vozilo priključeno na sustav ono može postati dio jedne virtualne baterije. Virtualna baterija tada može upravljati punjenjem i pražnjenjem električnog vozila. Pametnim upravljanjem punjenja električnog vozila virtualna baterija osigurava da električno vozilo ne predstavlja dodatno opterećenje sustavu već da služi kao dinamički sustav skladištenja električne energije.

Koncept virtualne baterije je koristan ako se svi ili većina korisnika električnih vozila slože s korištenjem svojih vozila za pružanje sistemskih usluga. S obzirom na istraživanje koje smo prikazali, jasno je kako pametno korištenje virtualnih baterija može imati značajan pozitivan utjecaj na elektroenergetski sustav. Virtualne baterije omogućuju punjenje električnih vozila tijekom perioda niskih opterećenja u sustavu, umjesto tijekom vršnih opterećenja, što olakšava bržu integraciju električnih vozila u elektroenergetski sustav. Također, virtualna baterija može osigurati kombinaciju između održavanja maksimalne napunjenosti i minimalne napunjenosti virtualne ba-

terije, čime se izbjegavaju negativni utjecaji koje električna vozila mogu imati na elektroenergetski sustav.

Uz pomoć virtualnih baterija, električna vozila se mogu puniti tijekom noći kada je cijena električne energije obično niža, te tijekom perioda niskog opterećenja u mreži, što dodatno optimizira njihovo korištenje. Nadalje, virtualne baterije mogu pružiti podršku elektroenergetskom sustavu tijekom vršnih opterećenja pružajući električnu energiju pohranjenu u baterijama električnih vozila. Dakle, uz pomoć prikazanog istraživanja smo pokazali da virtualne baterije, kada se koriste na ispravan način, mogu doprinijeti efikasnijem korištenju resursa i dovesti do stabilnosti i održivosti elektroenergetskog sustava.

Ovaj rada naglašava važnost i potencijal virtualnih baterija u elektroenergetskoj tranziciji. Njihova sposobnost integracije električnih vozila ali i obnovljivih izvora može biti ključna za postizanje ciljeva stabilnosti i efikasnosti elektroenergetskog sustava u budućnosti. Međutim, iako smo danas na dobrom putu prema ostvarivanju ciljeva za koje se zalaže elektroenergetska tranzicija, daljnja istraživanja i razvoj tehnologije su nužni. Samo na taj način ćemo osigurati da virtualne baterije ali i virtualne elektrane, električna vozila i obnovljivi izvori energije postanu nezaobilazan element u stvaranju održive i čiste energetske budućnosti.

## Literatura

- [1] International Energy Agency, s interneta: <https://www.iea.org/>
- [2] Our World in Data, s interneta: <https://ourworldindata.org/>
- [3] dr. sc. Goran Granić i suradnici, " U susret energetske tranziciji"
- [4] ResearchGate, s interneta: <https://www.researchgate.net/>
- [5] Heydarian-Forushani, E., et.al. 2023. "Virtual Power Plant Solution for Future Smart Energy Communities"
- [6] Jaroslaw Milewski, Warsaw University of Tehnology "Virtual Power Plants-general review: structure, application and optimization"
- [7] Solar secure, s interneta: <https://www.solar-secure.com.au/>
- [8] Prof. dr. sc. Alfredo Višković, "Aspekti liberalizacije električnih sustava za energiju"
- [9] Tešnjak S., Banovac E., Kuzle I. " Tržište električne energije"
- [10] Siemens, s interneta:  
<https://www.smart-energy.com/renewable-energy/siemens-pilots-vpp-technology-in-finland/>
- [11] ABB Ability™ Virtual Power Pools, Central control and optimization system
- [12] Heping J., Xuanyuan W., Xian Z., Dunnan L. "Business Models and Reliable Operation of Virtual Power Plants"
- [13] VPP4ISLANDS, s interneta: <https://vpp4islands.eu/>
- [14] Tesla, s interneta: [https://www.tesla.com/en\\_eu](https://www.tesla.com/en_eu)
- [15] Autoportal, s interneta: <https://autoportal.hr//>
- [16] Auto World, s interneta:  
<https://www.autoworlddergisi.com/tesla-charging-network-all-the-upcoming-compatible-evs/>
- [17] U.S. Departmen of Energy, s interneta:  
<https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>
- [18] S. Padmanaban, M. N. Mollah, E. Hossain "A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development"

- [19] H. Shareef, Md. M. Islam, A. Mohamed, "A review of the state-of-the-art charging technologies, placement, methodologies, and impacts of electric vehicles"
- [20] A. Špelko, M. Antončič, prof. dr. Marko Čepin, prof. dr. Boštjan Blažič, Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko: "Uporaba virtualne baterije v elektroenergetskem sistemu"

# Popis slika

2.1	Ukupna opskrba fosilnim gorivima. Izvor: [1] . . . . .	4
2.2	Globalne $CO_2$ emisije. Izvor: [1] . . . . .	5
2.3	Proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora energije. Izvor: [2] . . . . .	6
2.4	Broj novih električnih automobila prodanih godišnje. Izvor: [1] . . . . .	7
3.1	Prikaz virtualne elektrane. Izvor: [4] . . . . .	9
3.2	Prikaz centralizirane virtualne elektrane. Izvor: [6] . . . . .	12
3.3	Prikaz distribuirane virtualne elektrane. Izvor: [6] . . . . .	13
3.4	Prikaz potpuno distribuirane virtualne elektrane. Izvor: [7] . . . . .	14
3.5	Shematski prikaz rada virtualne elektrane tvrtke Bosch. Izvor: [12] . . . . .	21
3.6	Prikaz operativnog tijeka virtualne elektrane u Hebeiiju. Izvor: [12] . . . . .	22
4.1	Električni automobil tvrtke Tesla. Izvor [14] . . . . .	24
4.2	Prvi hibridni električni automobil na svijetu. Izvor: [15] . . . . .	25
4.3	Prikaz plug-in električnog vozila koji može imati ulogu virtualne baterije. Izvor: [16] . . . . .	27
4.4	Prikaz glavnih dijelova električnog vozila. Izvor: [17] . . . . .	28
4.5	Klasifikacija utjecaja električnih automobila. . . . .	34
5.1	Prikaz korištenih vozila prema kapacitetu baterije. Izvor: [20] . . . . .	42
5.2	Prikaz stanja električnih vozila za svaki sat. Izvor: [20] . . . . .	43
5.3	Prikaz punjenja i pražnjenja baterije jednog EV-a. Izvor: [20] . . . . .	46
5.4	Prikaz postotka punjenosti virtualne baterije. Izvor: [20] . . . . .	47
5.5	Prikaz snage punjenja virtualne baterije. Izvor: [20] . . . . .	48

# Popis tablica

2.1	Prikaz opskrbe fosilnim goriva. Izvor: [1] . . . . .	4
4.1	Usporedba različitih vrsta električnih vozila i konvencionalnih vozila. . . . .	33



## Sažetak

Elektroenergetski sustav se trenutno nalazi u energetske tranziciji. Energetska tranzicija zahtjeva prestanak proizvodnje električne energije iz konvencionalnih goriva te prelazak na obnovljive izvore energije. Također, zahtjeva prestanak korištenja konvencionalnih goriva i u svim ostalim sektorima, a posebno u prometnom sektoru.

Radi brže i efikasnije implementacije obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sustav započeli su se razvijati sustavi poput virtualnih elektrana. Ovi sustavi objedinjuju sve distribuirane izvore energije te omogućuju optimalno korištenje energije u sustavu.

Jedan od elemenata virtualne elektrane je i električno vozilo. Električno vozilo se pojavilo kao zamjena za konvencionalna vozila koja koriste fosilna goriva. Električno vozilo kao izvor energije koristi električnu energiju stoga ne proizvodi nikakve štetne plinove poput konvencionalnih vozila.

Električno vozilo u kombinaciji sa pametnim mrežama i tehnologija poput V2G može aktivno sudjelovati u očuvanju stabilnosti elektroenergetskog sustava. Ti sustavi pretvaraju električno vozilo u virtualne baterije koje se mogu koristiti kao dinamički sustav skladištenja energije te na taj način doprinijeti optimizacije elektroenergetskog sustava.

**Ključne riječi:** Elektroenergetska tranzicija, obnovljivi izvori energije, virtualne elektrane, distribuirani izvori, tržište električne energije, električna vozila, pametne mreže, V2G (Vehicle-to-Grid), virtualne baterije

## Summary

The power system is currently undergoing an energy transition. This transition requires the cessation of electricity production from conventional fuels and a shift to renewable energy sources. It also demands the cessation of conventional fuel use in all other sectors, particularly in the transportation sector.

In order to facilitate the rapid and efficient implementation of renewable energy sources into the power system, systems such as virtual power plants have begun to be developed. These systems integrate all distributed energy sources and enable the optimal use of energy within the system.

One of the elements of a virtual power plant is the electric vehicle. The electric vehicle has emerged as a replacement for conventional vehicles that use fossil fuels. As an energy source, the electric vehicle utilizes electrical energy, thereby producing no harmful gases like conventional vehicles.

When combined with smart grids and technologies such as Vehicle-to-Grid (V2G), the electric vehicle can actively participate in preserving the stability of the power system. These systems transform the electric vehicle into virtual batteries that can be used as dynamic energy storage systems, thereby contributing to the optimization of the power system.

**Keywords:** Energy transition, renewable energy sources, virtual power plants, distributed sources, electricity market, electric vehicles, smart grids, V2G (Vehicle-to-Grid), virtual batteries