Utjecaj punionica električnih vozila na kvalitetu električne energije

Valentić, Lovro

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:151359

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-26**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

Sveučilišni studij

UTJECAJ PUNIONICA ELEKTRIČNIH VOZILA NA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Diplomski rad

Lovro Valentić

Osijek, 2024

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju

Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju

Ime i prezime pristupnika:	Lovro Valentić
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. pristupnika, god.	D-1478, 07.10.2022.
JMBAG:	0165083656
Mentor:	prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
Sumentor:	Heidi Adrić, univ. mag. ing. el.
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Član Povjerenstva 1:	prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
Član Povjerenstva 2:	Ružica Kljajić, univ. mag. ing. el.
Naslov diplomskog rada:	Utjecaj punionica električnih vozila na kvalitetu električne energije
Znanstvena grana diplomskog rada:	**Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)**
Zadatak diplomskog rada:	Opisati povijest razvoja električnih automobila, vrste i načelo rada. Objasniti harmonijsko izobličenje i pripadajuće pokazatelje te norme za njihova ograničenja. Analizirati rezultate mjerenja kvalitete električne energije na ultra-brzoj punionici za električne automobile, odrediti utjecaj punjenja električnih automobila na kvalitetu električne energije u distribucijskoj mreži.

Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	08.09.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane diplomskog rada:	20.9.2024.
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	20.09.2024.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 20.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Lovro Valentić
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1478, 07.10.2022.
Turnitin podudaranje [%]:	9

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Utjecaj punionica električnih vozila na kvalitetu električne energije**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Zvonimir Klaić

i sumentora Heidi Adrić, univ. mag. ing. el.

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD 1

1.1. Zadatak diplomskog rada 2

2. PREGLED PODRUČJA TEME 3

3. ELEKTRIČNI AUTOMOBILI 5

3.1. Povijesni razvoj 5

3.2. Pojam električnog automobila 9

3.3. Načelo rada električnih automobila 10

3.3.1. Električni motor 10

3.3.2. Kontroler električnog motora 11

3.3.3. Baterija električnog motora 11

3.4. Učinci električnih automobila 14

3.5. Utjecaj na okoliš 15

3.6. Ekonomski aspekt električnih automobila 18

3.7. Vrste električnih automobila 19

3.8. Infrastruktura i punjenje 21

4. HARMONIJSKO IZOBLIČENJE I POKAZATELJI KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE 23

4.1. Harmonijsko izobličenje 23

4.1.1. Ukupno harmonijsko izobličenje - THD 24

4.1.2. Ukupno harmonijsko izobličenje s obzirom na potražnju - TDD 25

4.1.3. Ukupni faktor snage u odnosu na harmonijsko izobličenje 26

4.2. Izvori viših harmonika 26

4.2.1. Klasični izvori harmonika 27

4.2.2. Suvremeni izvori harmonika 28

4.3. Viši harmonici kao posljedica punjenja električnih vozila 29

4.4. Održivi razvoj i viši harmonici 30

5. ULTRA-BRZE PUNIONICE (engl. *SUPERCHARGERS*) 33
5.1. Klasifikacija punionica za električna vozila 33
5.2. Pojam ultra-brze punionice 34
5.3. Način rada ultra-brzih punionica 35
5.4. Ultra-brze punionice poduzeća Tesla 36
5.5. Kvaliteta Tesla ultra-brze punionice 37
6. ANALIZA PROVEDENIH MJERENJA NA ULTRA-BRZOJ PUNIONICI 39
6.1. Tehnički podatci 39
6.2. Grafički i tablični prikaz provedenih mjerenja 41
7. ZAKLJUČAK 50
LITERATURA 51
SAŽETAK 53
ABSTRACT 54

1. UVOD

Električni automobili su znatno primjereniji za gusto naseljena područja od vozila s unutarnjim izgaranjem jer nemaju izravne emisije stakleničkih plinova. Korištenjem električnih automobila može se barem lokalno smanjiti negativan utjecaj na okoliš i kvalitetu zraka. Korištenjem električnih automobila, smanjuje se potrošnja fosilnih goriva poput benzina i dizela. Ovo je važno za smanjenje ovisnosti o uvozu nafte i za diversifikaciju izvora energije u prometu.

Također, električni automobili su energetski učinkovitiji od vozila s unutarnjim izgaranjem jer električni motori imaju veću učinkovitost pretvaranja energije u pokretanje vozila. To može rezultirati manjom potrošnjom energije za istu udaljenost ili iste performanse. Električni motori su tiši od klasičnih motora s unutarnjim izgaranjem, što rezultira manjom bukom u urbanim područjima te može poboljšati kvalitetu života stanovnika gradova i smanjiti buku koju stvara promet.

Razvoj električnih automobila potiče napredak u tehnologijama poput baterijskih sustava, autonomne vožnje, povezanosti vozila s mrežom i drugih inovacija koje imaju šire primjene u industriji i svakodnevnom životu. Električni automobili često su povezani s inicijativama za održivost i energetsku tranziciju. S obzirom na trenutne globalne okolnosti, mnoge države i gradovi aktivno potiču i subvencioniraju prelazak na električna vozila.

Konačno, električni automobili imaju ključnu ulogu u smanjenju negativnih utjecaja na okoliš, diversifikaciji izvora energije, poticanju tehnološkog napretka i promicanju održive mobilnosti. Njihova sve veća prihvaćenost i razvoj infrastrukture za punjenje predstavljaju ključne korake prema održivoj budućnosti prometa.

Glavni dio rada sastojati će se od tri ključna poglavlja. Prvenstveno, obraditi će se teorijska analiza harmonijskog izobličenja te pokazatelja kvalitete električne energije od kojih su uzeti u obzir ukupno harmonijsko izobličenje, ukupno harmonijsko izobličenje s obzirom na potražnju te ukupni faktor snage u odnosu na harmonijsko izobličenje. Također, u ovom poglavlju biti će obrađena teorijska analiza izvora viših harmonika. Nadalje, obradit će se teorijska analiza ultra-brzih punionica s naglaskom na proizvođača Tesla. Završno, u trećem poglavlju glavnog dijela rada, koje predstavlja praktični dio, prikazati će se analiza provedenih mjerenja na ultra-brzoj punionici pomoću grafičkih i tabličnih prikaza.

1.1. Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu potrebno je obraditi pojam električnih automobila te koncept njihovog punjenja kroz teorijski i praktični primjer. Osvrnut će se na prednosti korištenja ove vrste vozila, ali će se također razmotriti pitanja isplativosti njihove proizvodnje te potencijalni negativni učinci tvornica koje proizvode električnu energiju za napajanje električnih automobila. Uz to, područje istraživanja ovog rada biti će utjecaj ultra-brzih punionica na pokazatelje kvalitete električne energije s naglaskom na harmonijsko izobličenje, odnosno na više harmonike.

Za izradu praktičnog dijela rada preuzeti su podatci mjerenja koje je izvršeno tijekom dvadeset i sedam dana na jednoj od ultra-brzih punionica u Republici Hrvatskoj, snage pojedinog priključka do 150 kW. Za potrebe mjerenja korišten je uređaj PQ-Box 200. Nakon prikupljenih podataka o promatranoj ultra-brzoj punionici potrebno je analizirati iste u softveru WinPQ – mobile te dati jasna obrazloženja dobivenih rezultata.

2. PREGLED PODRUČJA TEME

Razvoj električnih automobila predstavlja jednu od najznačajnijih revolucija u automobilskoj industriji u posljednjim desetljećima. Brzi napredak tehnologije omogućio je električnim vozilima da postanu značajno zastupljeni u prometu, čime se otvaraju nove mogućnosti, ali i izazovi. Punionice za električne automobile igraju ključnu ulogu u ovoj tranziciji, odnosno prijelazu na takvu vrstu vozila, omogućujući vozačima sigurnost i praktičnost potrebnu za svakodnevnu upotrebu.

Ovim poglavljem dati će se uvid u korištenu literaturu koja pruža temelj za razumijevanje trenutnog stanja u svijetu, ali i za identifikaciju potencijalnih problema koji bi mogli utjecati na daljnji razvoj ove tehnologije u budućnosti.

Autori u literaturama [1-5] pružaju sveobuhvatan uvid u tehnologije koje stoje iza hibridnih, električnih i vozila s gorivim ćelijama. Nadalje, autori se fokusiraju na razvoj i primjenu ovih vozila u automobilskoj industriji, objašnjavajući osnovne principe njihovog rada, komponente koje ih pokreću te prednosti i izazove koji su povezani s njihovom proizvodnjom i upotrebom. Također, autori pružaju pregled zakonskih i regulatornih okvira koji su relevantni za upotrebu i razvoj ovih tehnologija, naglašavajući važnost sigurnosnih standarda i ekoloških propisa.

U literaturama [6-11] autori detaljno iznose i opisuju tehnologije koje stoje iza električnih vozila, pri tome detaljno objašnjavajući osnovne komponente kao što su elektromotori, baterije i sustavi za upravljanje energijom. Nadalje, autori detaljno razmatraju infrastrukturu za punjenje, uključujući različite tipove punjača i punionica te izazove vezane za brzu implementaciju. Također, autori se bave i budućim trendovima i razvojem tehnologija koje će oblikovati budućnost električnih vozila, uključujući unaprjeđenja u baterijskim tehnologijama, autonomnu vožnju i integraciju s obnovljivim izvorima energije.

Utjecaj harmonika na elektroenergetske sustave, odnosno distribucijske sustave opisan je u literaturi [13]. Autor daje detaljan pregled uzroka i posljedica pojave harmonika u promatranom sustavu kao i metode za analizu i upravljanje istima. Nadalje, autor se fokusira na praktične aspekte, uključujući metode za minimiziranje negativnih učinaka pojave harmonika na kvalitetu električne energije i pouzdanost sustava. Autor također nudi smjernice za implementaciju rješenja i tehnologija koje pomažu u održavanju stabilnosti i efikasnosti distribucijskih mreža, čime

doprinosi boljem razumijevanju i rješavanju problema povezanih s pojavom harmonika u suvremenim elektroenergetskim sustavima.

Metode punjenja električnih vozila, koje se kategoriziraju prema IEC 62196 standardu, opisane su u literaturi [14]. Autor navodi kako postoje četiri moda istih te objašnjava tehničke karakteristike svakog moda, od sporijih koje se koriste kod kućnih punionica, do bržih koje su prisutne na javnim punionicama.

Istraživanje provedeno zbog pojave "anksioznost zbog dometa" (engl. "*Range anxiety*") opisano je u literaturi [15]. Autori se koriste anketama za prikupljanje podataka o stavovima korisnika i potencijalnih korisnika električnih automobila te analiziraju čimbenike koji doprinose ovom problemu. Autori zaključuju o tome kako različite grupe ljudi doživljavaju ovu anksioznost s posebnim naglaskom na utjecaj dostupnosti punionica i kapaciteta baterija. Također, autori navode preporuke za proizvođače kako bi se smanjio ovaj problem, uključujući pri tome poboljšanje infrastrukture za punjenje i povećanje dometa baterija.

Autori u literaturama [16 i 17] pružaju pregled o ultra-brzim punionicama za električna vozila, ističući kako ove punionice prilagođavaju parametre punjenja na osnovu informacija o vozilu i kontinuirano razmjenjuju podatke s vozilom kako bi pratili napredak i temperaturu baterije. Nadalje, autori spominju kako su često dio pametnih sustava za upravljanje punjenjem koji optimiziraju brzinu i učinkovitost uz minimalne gubitke energije. Također, autori napominju dodatne značajke kao što su brzo plaćanje i integracija s mobilnim aplikacijama, ali i upozorava na ograničenu kompatibilnost budući da su neke punionice specifične za određene marke ili modele vozila.

Tehničke specifikacije te opis uređaja korištenog za provedbu mjerenja u svrhu izrade praktičnog dijela ovog rada, opisani su u literaturama [19 i 20].

3. ELEKTRIČNI AUTOMOBILI

3.1. Povijesni razvoj

Prvi električni automobil osmišljen je te izrađen davnih 1830-ih. Zapravo, bila je to kočija koju je dizajnirao škotski poduzetnik Robert Anderson. Prvi komercijalni električni automobili proizvedeni su 1897. godine, a prva serija tih automobila korištena je za taksi službe u New Yorku. Zanimljivo je primijetiti da je barijeru od 100 km/h prešao upravo električni automobil. Automobil je izgledao poput rakete i postizao je brzinu od 105,88 km/h [1].

Na početku povijesti automobila postojala su dva glavna konkurentska pristupa vozilima s motorom: jedan s motorom s unutarnjim izgaranjem – ICE (engl. *Internal combustion engine*) i drugi s električnim pogonom. Slikom 3.1. prikazan je prethodno spomenuti Andersonov električni automobil, odnosno prvo vozilo koje se pokretalo pomoću električne energije.

Slika 3.1. *Prikaz prvog električnog automobila* [2].

Zaključno, BEV (engl. *Battery electric vehicle*) kao tehnološki koncept ne predstavlja nedavnu visoku i naprednu tehnologiju, već razmjerno jednostavniji koncept koji je više od 110 godina

prisutan, ali su zapravo postignuća u smislu baterija te brzina punjenja, ostvarena u današnje vrijeme, odnosno vrijeme napredne tehnologije. [1].

Nadalje, u 1990-ima električni su se automobili opet nudili kao proizvod koji se proizvodi serijski u Kaliforniji zbog Zakona o nultim emisijama.

Nakon suspenzije zakona o nultoj emisiji, kalifornijska vlada preferirala je automobile s djelomičnom nultom emisijom, što je potaknulo proizvođača automobila Toyota da razvije hibridno vozilo, kombinirajući motor s unutrašnjim izgaranjem i električni motor. Na ovaj se način drastično poboljšala energetska učinkovitost. Također, ideja o električnom automobilu proširila se svijetom paralelno s uspjehom Toyote Prius. Budući da potpuno hibridno vozilo može voziti na električni pogon, jednostavno mu trebaju utikač i veća baterija da bi se mogao puniti poput BEV-a. Na taj je način stvorena kategorija plug-in hibridnih vozila – PHEV (engl. *Plugin hybrid electric vehicle*).

U posljednjih 10 godina razvijeni su različiti koncepti pogonskog sklopa zasnovani na elektromotorima koji će uskoro ući u masovnu proizvodnju. Potpuno električni pogon i hibridni električni pogon znatno se razlikuju. Za razliku od hibridnog električnog pogona, u potpuno električnom automobilu električni je motor jedini pretvarač energije. Prema UN-ovoj definiciji iz 2003. godine, hibridni električni pogon sastoji se od najmanje dva različita pretvarača energije (npr. ICE i elektromotor) koji doprinose pogonskom sustavu i koriste dva različita skladišta energije (npr. gorivo i baterija) [1].

Uz to, gorivna ćelija može generirati električnu energiju u električnom automobilu. Ova tehnologija istražuje se desetljećima, a proizvodnja malih serija vozila s gorivnim ćelijama – FCV (engl. *Fuel cell vehicle*) već je započeta ili joj proizvođači obećavaju puštanje u promet u sljedećih nekoliko godina. FCV je električno vozilo s drugačijim skladištem energije u usporedbi s električnim vozilima s baterijama. Opremljen je međuspremnikom koji je mnogo manji u odnosu na BEV [1].

Sljedećih će godina električni automobili uglavnom biti manjih ili srednjih veličina prateći dva bitna razloga. Prvi razlog je da težina može ograničavati opseg rada, odnosno ovaj razlog predstavlja faktor prikladnosti za svakodnevnu upotrebu. Drugi razlog je sami trošak baterija, odnosno veći automobili trebaju veće i puno skuplje baterije. Suprotno tome, PHEV i FCV sve su korisniji u segmentu srednjih i velikih automobila jer je u bateriji potreban samo mali dio energije, ali bitno je poznavati i nedostatak, koji se zapravo pojavljuje zbog dodatne težine baterije i

električnog pogona, što kao posljedicu daje veću složenost pogona te veću potrošnju na dužim putovanjima.

Prema Larminieu i Lowryju, glavne komponente BEV-a mogu se podijeliti na elektromotor, električnu bateriju te regulator motora. Tehnička struktura BEV-a jednostavnija je u usporedbi s ICEV-om, jer nije potreban sustav za pokretanje, ispuh ili podmazivanje, uglavnom bez mjenjača, a ponekad nije potreban čak ni sustav za hlađenje.

Baterija se puni električnom energijom ili kad je na električnu mrežu priključena putem uređaja za punjenje ili tijekom kočenja rekuperacijom. Punjač baterije predstavlja ključnu komponentu budući da se njegova učinkovitost može razlikovati između 60 do 97 %, trošeći pri tome 3 do 40 % energije iz mreže kao toplinsku energiju, odnosno toplinu. Upravljač motora služi za opskrbu električnog motora promjenljivom snagom ovisno o trenutnom opterećenju. Elektromotor pretvara električnu energiju u mehaničku, odnosno u zakretni moment ukoliko se koristi unutar pogonskog sklopa. U dosad proizvedenoj seriji BEV korišteni su središnji motori. Međutim, mogući su i mogli bi biti i električni motori s glavčinom dostupno za masovnu proizvodnju [3].

Moderni, visoko učinkoviti električni motori temeljeni su na trajnim magnetskim materijalima kod kojih su najjače legure one koje sadrže neodimij i samarij od rijetkih zemaljskih elemenata (engl. *Rare earth elements* - REE). Uobičajene legure su i magneti NdFeB i SmCo. To je izazvalo određenu zabrinutost jer su REE rijetki, a njihov izvoz kontrolira nekoliko zemalja, uglavnom Kina.

Postoji nekoliko vrsta elektromotora, koji se obično dijele na izmjeničnu i istosmjernu vrstu. Postoje i izmjenični i istosmjerni električni motori izrađeni sa i bez trajnih magneta, prema individualnoj upotrebi. U električnim su automobilima vučni motori bez magneta sasvim uobičajeni jer su jeftiniji. Podvrsta AC motora su indukcijski motori koji ne koriste REE. Tesla *Roadster* opremljen je asinkronim motorom bez REE, kao što će biti i budući model Tesla S i Toyota RAV4EV [3].

Početkom 20. stoljeća poboljšao se koncept baterija, što zapravo omogućuje širu uporabu električnih automobila. Tako 1920-ih električni automobili zbog smanjene buke, neugodnih mirisa te vibracija u usporedbi s konvencionalnim vozilima, postaju vodeći u ukupnom broju automobila u Sjedinjenim Državama. U tim godinama, značajna prednost električnih automobila bila je zapravo sama cijena. Cijene nafte i naftnih derivata bile su znatno visoke pa su električni automobili postali prava senzacija u automobilskoj industriji.

Kasnije, sa sve većim razvojem motora s unutarnjim izgaranjem, došlo je do pada u razvoju i prodaji električnih automobila, koji su utrku s benzinom izgubili 1913. godine, kada je proizvođač Cadillac-a u benzinske motore umjesto radilice instalirao električno paljenje. Zbog masovne proizvodnje benzinskih automobila, električni automobili znatno su izgubili na cijeni, a do 1930. potisnuti su s tržišta u potpunosti.

Razvoj električnih automobila seže daleko unatrag u povijest, a autor u literaturi [1] navodi nekoliko ključnih događaja i inovacija koje su oblikovale povijesni razvoj električnih vozila:

1. Rani eksperimenti (19. stoljeće):

- 1832.: Robert Anderson, škotski izumitelj, konstruirao je prvi električni automobil s baterijom.
- 1880-ih: U SAD-u, Thomas Edison i drugi istraživači razvijali su rane verzije električnih automobila.
- 1899.: Bela Lugosi, kasnije poznat kao filmski glumac, vozio je električni automobil u Mađarskoj.

2. Prvi trend električnih vozila (1900-1920):

- 1900-1910.: Električni automobili bili su popularni u SAD-u i Europi zbog svoje jednostavnosti upravljanja i čistog pogona.
- 1912.: Električni automobili činili su oko jedne trećine svih vozila u New Yorku.
- 1914.: Ford Model T postaje masovno proizvedeno automobilsko vozilo s unutarnjim izgaranjem, što je utjecalo na pad popularnosti električnih automobila.

3. Pad popularnosti (1920-1990):

- Nakon 1920-ih, unutarnje izgaranje postaje dominantan oblik pogona u automobilskoj industriji, što je dovelo do smanjenog interesa za električne automobile.
- 1970-ih i 1980-ih: Interes za električne automobile ponovno raste zbog brige o okolišu i potrebe za alternativnim pogonskim sustavima.

4. Nova pojava električnih automobila (1990-e do danas):

- 1990-e: Pojavljuju se moderni električni automobili poput Honda EV Plus, GM EV1 te Toyota RAV4 EV

- 2008.: Tesla Motors predstavlja Model S, električni automobil s visokim performansama i dugim dosegom, što je potaknulo interes za električnim vozilima.
- 2010-e do danas: Rapidan napredak u tehnologiji baterija, razvoj infrastrukture za punjenje i poticaji za električna vozila doprinijeli su rastućem broju električnih automobila na tržištu.

Danas svjedočimo sve većem broju električnih automobila na cestama diljem svijeta, a tehnološki napredak i ekološka osviještenost nastavljaju poticati inovacije u području električne mobilnosti.

3.2. Pojam električnog automobila

Prema autoru u literaturi [1] električni automobil je svako vozilo koje za pogon koristi električnu energiju kao izvor energije. Promatrajući usporedbu s konvencionalnim automobilima, njihove glavne razlike su:

- koristi električni motor umjesto motora s unutarnjim izgaranjem,
- pohranjuje energiju u baterije, a ne u spremnike za gorivo,
- energiju dobivaju preko utikača i kabela, a ne iz goriva

Te razlike dovode do manjih gubitaka energije kod električnih automobila, odnosno većeg stupnja iskorištenosti, s boljim voznim svojstvima, a motori tih automobila ne stvaraju ispušne plinove tijekom uporabe, niti veću buku i vibracije.

Električni automobili su vozila koja se pokreću pomoću elektromotora koristeći energiju pohranjenu u punjivim baterijama. Za razliku od automobila s motorima s unutarnjim izgaranjem, tiši su i ne ispuštaju štetne plinove. Njihova glavna karakteristika je korištenje električne energije umjesto goriva poput benzina ili dizela za pokretanje vozila.

Autor u literaturi [4] navodi kako se značaj električnih automobila očituje kroz:

- Ekološka održivost: električni automobili smanjuju emisiju štetnih plinova i čestica u usporedbi s vozilima s unutarnjim izgaranjem, što ih čini ekološki prihvatljivijima.

- Smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima: korištenjem električne energije kao pogonskog izvora, smanjuje se potreba za fosilnim gorivima, što može doprinijeti energetskoj neovisnosti i smanjenju ovisnosti o uvozu goriva.
- Ekonomski faktori: električni automobili mogu imati niže troškove održavanja i vožnje u odnosu na vozila s unutarnjim izgaranjem, posebno u zemljama s poticajnim programima za električnu mobilnost.
- Tehnološki napredak: razvoj električnih automobila potiče inovacije u tehnologiji baterija, elektromotora, autonomne vožnje i pametnih sustava za upravljanje vozilima.
- Ublažavanje klimatskih promjena: prijelaz na električne automobile može doprinijeti smanjenju emisija CO2 i drugih stakleničkih plinova, što je važno za borbu protiv klimatskih promjena.

Uz navedene značajke, električni automobili imaju potencijal da postanu ključna komponenta održive mobilnosti u budućnosti, pridonoseći smanjenju onečišćenja zraka, zaštiti okoliša i promicanju energetske učinkovitosti u transportnom sektoru.

3.3. Načelo rada električnih automobila

3.3.1. Električni motor

Najveća razlika između klasičnih i električnih automobila je zapravo sama vrsta motora. Dok konvencionalni automobili koriste benzinske ili dizelske motore, električni automobili koriste električni motor. Također, elektromotori su znatno jednostavnije konstrukcije u usporedbi s motorima s unutarnjim izgaranjem. [1].

Suvremeni motori s unutarnjim izgaranjem sadrže oko tisuću sitnih komponenti, dok elektromotor obično ima samo tri do pet pokretnih dijelova, što ga čini znatno pouzdanijim i dugotrajnijim. Zbog nedostatka potrošnih dijelova, ovi motori zahtijevaju minimalno ili gotovo nikakvo održavanje.

Elektromotor omogućava linearno i kontinuirano ubrzanje vozila, s mnogo boljim karakteristikama u usporedbi s konvencionalnim automobilima. Osim toga, električni automobili ne koriste mjenjače. Uklanjanjem mjenjača značajno se smanjuje težina vozila, što dodatno smanjuje potrošnju energije.

Postoji nekoliko vrsta elektromotora koje se značajno razlikuju u konstrukciji i načinu rada. Prema vrsti struje koju koriste, elektromotori se dijele na DC (engl. Direct current), AC (engl. Alternating current) i univerzalne motore. Motori koji koriste istosmjernu struju nazivaju se DC motori, dok se oni koji koriste izmjeničnu struju nazivaju AC motori. Univerzalni motori su posebni po tome što mogu raditi i na istosmjernu i na izmjeničnu struju. [1].

Tako postoje istosmjerni motori s trajnim magnetima, kao i motori s paralelnim, serijskim ili kombiniranim priključkom, te sinkroni i asinkroni motori izmjenične struje. Ovi motori se razlikuju po potrebnom naponu za rad, a kod motora izmjenične struje važna je i frekvencija struje. Električni automobili koriste sve ove vrste motora za svoj pogon.

3.3.2. Kontroler električnog motora

Jedan od najvažnijih dijelova električnog automobila je kontroler koji upravlja radom elektromotora. U usporedbi s dijelovima klasičnih motora, može se usporediti s Boschovom crpkom u dizelskim motorima ili s rasplinjačem u starijim benzinskim motorima.

Postoje različite varijante regulatora, a njegovo je načelo rada prilično složeno pa se može promatrati kao funkcionalna jedinica s elektromotorom. Cijena regulatora obično iznosi 100-200% cijene motora [4].

3.3.3. Baterija električnog motora

Glavni razlog za sporiji napredak električnih automobila su zapravo same baterije, odnosno problem sa skladištenjem energije. U ranim fazama razvoja koristile su se olovne baterije, ali zbog njihovih relativno loših karakteristika, na tržištu su se pojavile nove litij-ionske baterije. Kapacitet ovih baterija direktno utječe na autonomiju električnog automobila. Litij-ionske baterije su obično tri puta lakše i manje u odnosu na olovne baterije za isti kapacitet. [1].

Neke vrste ovih baterija mogu podnijeti brzo punjenje i mogu se napuniti za samo 20 minuta pomoću dovoljno snažnog punjača. Svjetski proizvođači električnih baterija najavljuju značajno povećanje kapaciteta u bliskoj budućnosti.

Trajanje baterija u električnim vozilima obično je između 8 i 15 godina, ovisno o vrsti i uvjetima uporabe. Moderne litij-ionske baterije imaju dug životni vijek i garancije od 8 do 10 godina. Kada baterije dođu do kraja svog životnog vijeka, pravilno recikliranje je važno. Proizvođači nude

rješenja poput najma baterija, čime preuzimaju odgovornost za recikliranje, čime se smanjuje ekološki utjecaj i troškovi za korisnike.

Studije su pokazale da baterije nisu tako štetne za okoliš kao gorivo, odnosno električna energija ili izvor te energije.

Nikal-metal-hibridne baterije korištene su u međuvremenu kada je devedesetih započela ponovna elektrifikacija automobila. Međutim, oni ne nude dovoljno energije i imaju lošiji utjecaj na okoliš u usporedbi s Li-ion baterijama. Jedina alternativa Li-ion baterijama usporedive snage, zebra ćelija, temelji se na rastopljenoj soli i stoga je korisna samo za neprekidnu svakodnevnu upotrebu. Danas je dostupno puno različitih kemikalija Li, a cijene Liion baterija kontinuirano se smanjuju. Međutim, cijena kompletnog kompleta Li-ionskih ćelija koji nudi kapacitet od 14 kWh, omogućavajući električni domet od 100 km malog automobila, još uvijek iznosi oko 5000 eura, uključujući poreze. Utjecaji različitih životinjskih kemikalija na Li-ion značajno se razlikuju [4].

Litij-željezno-fosfatne baterije koriste željezno-fosfat kao katodni materijal, što ih čini sigurnijim i dugotrajnijim od drugih litij-ionskih baterija. Kao najvažnije karakteristike ističu se: sigurnost (manja sklonost pregrijavanju i termalnom izbijanju) i dugovječnost (često izdrže preko 2000 ciklusa punjenja i pražnjenja).

Emisije stakleničkih plinova BEV-a mogu se lako izračunati na temelju njegove potrošnje električne energije i prateći emisiju stakleničkih plinova povezanih s lokalnom proizvodnjom električne energije. U literaturi postoji obilje podataka koji kvantificiraju emisije stakleničkih plinova električnih automobila u pogonu.

U pregledu koji je ocjenjivao 21 studiju od 1999. do 2009. (18 studija u njima od 2007. do 2009.), BEV i PHEV trošili su prosječno 17,5 kWh/100 km. Suprotno tome, u nekoliko studija usredotočenih na kvantifikaciju LCA - Procjena životnog ciklusa (engl. *Life-cycle assessment*), pretpostavljala se mnogo veća potrošnja električne energije: Na primjer, Helms i sur. svoje su modeliranje temeljili na potrošnji električne energije od 20,4 kWh/100 km u urbanim područjima, 20,8 kWh/100 km u izvangradskim područjima, odnosno 24,9 kWh/100 km na autocesti. Pehnt i sur. sažeo je 21 do 24 kWh/100 km. Held i Baumann temeljili su LCA kvantifikacije potrošnje električne energije od 18,7 kWh/100 km za BEV mini-klase (736 kg vlastite mase, veličina Smart, vidi dolje) i 22,9 kWh/100 km za BEV-a kompaktne klase [1].

U nekim se slučajevima čini se da je pretpostavljena potrošnja električne energije standardnog BEV-a prilično visoka jer se za izračun uzimaju samo automobili srednje veličine opremljeni

teškim baterijama. Projekt e-pretvorbe, izveden u laboratoriju autora 2011. godine, može primjerno prikazati podatke o težini: Smart napravljen 2000. godine e-pretvoren je iz motora s unutrašnjim izgaranjem u električni automobil.

Ugrađeni su električni motor snage 25 kW i LiFePO4 baterija snage 14 kWh, što omogućuje domet do 120 km. Masa praznog vozila povećala se za 161 kg na 880 kg, što je malo više od polovice težine automobila koju su pretpostavili Helms i sur.. Mitsubishi I-MiEV težak je 1.110 kg i opremljen je Li-ion baterijom od 16 kWh. Međutim, Nissan Leaf, prvi električni automobil srednje veličine, težak je 1.525 kg i koristi litijsku bateriju od 24 kWh [4].

Nadalje, podaci o potrošnji električne energije BEV na kojima se temelji LCA modeliranje i koji pokazuju, primjerice, godišnju emisiju CO2 voznog parka, danas su nužno manje-više teorijski. I ovdje podaci o potrošnji izvedeni iz certificiranih ciklusa vožnje simuliraju mnogo nižu potrošnju fosilnog goriva za ICEV od realne i, naprotiv, vjerojatno veću od realne za BEV, kako je utvrđeno u nastavku. Predlažemo da se usporedi potrošnja goriva na ulici i za BEV i za ICEV, uključujući naravno i gubitke zbog punjenja za BEV.

Do sada je dostupno samo nekoliko podataka o stvarnoj potrošnji električne energije, koji se obično ne mogu naći u znanstvenoj literaturi. Smart Fortwo pretvoren u električni automobil u laboratoriju autora troši 14,5 kWh/100 km u gore opisanom testnom ciklusu. Mitsubishi i-MiEV, prvi električni automobil velike količine na tržištu, troši 16,94 kW /100 km na ulici. Očekivano od električnog automobila, potrošnja je najmanja u gradu, gdje ICEV obrnuto pokazuje najveću potrošnju goriva. Mitsubishi I-MiEV pokazao je sljedeće podatke o potrošnji električne energije tijekom ADAC testiranja: 11,3 kWh/100 km (gradsko), 15,0 kWh/100 km (izvangradsko) i 24,6 kWh/100 km na autocesti pri većoj brzini. Ovo ponovno naglašava potrebu za kritičnom procjenom podataka: BEV će zamijeniti ICEV uglavnom u lokalnom urbanom području ili unutar lokalnog regionalnog prometa, stvarajući moguće veće prednosti CO2 nego što se vidi u podacima izvedenim iz standardne potrošnje BEV i ICEV u ciklusu. Zanimljivo je da Mitsubishi objavljuje 13,5 kWh/100 km zbog ciklusa ECE R101, što potvrđuje neovisne rezultate ispitivanja (gore citirane) za gradsku i izvangradsku potrošnju [1].

Čini se da je električni automobil prikladan „instrument“ i održiva mjera prema održivoj budućnosti mobilnosti jer je četiri puta energetski učinkovitiji u odnosu na ICEV. Stoga se na to gleda kao na prekretnicu prema „Velikoj transformaciji“. Prednost BEV u odnosu na ICEV, zajedno sa skokom učinkovitosti pomoću Li-ion baterija, omogućuju elektrifikaciju automobila sve dok se kreće u regionalnim dometima do 100 km dnevno.

Energetska učinkovitost FCV pogonjenog vodikom tek je nešto niža u usporedbi s BEV. Međutim, puno se energije gubi tijekom proizvodnje i pružanja komprimiranog H2, čak i u slučaju elektrolize vode koja se napaja obnovljivom električnom energijom. Također, nedostaje infrastruktura benzinskih postaja za vodik i bila bi vrlo skupa za izgradnju, različita od infrastrukture za punjenje koja je potrebna za električne automobile [4].

Procjena životnog ciklusa mobilnosti električnih automobila prema već dostupnoj literaturi složena je. Većina podataka LCA bavi se potencijalom globalnog zagrijavanja. Budući da emisija ekvivalenata CO2 tijekom rada ukupno dominira LCA-om, električni automobil već može imati prednosti ekološke učinkovitosti kad se napuni mrežnom električnom energijom (pretpostavlja se od 500 do 600 g CO2/kWh).

Neke dosad objavljene studije LCA modelirale su prilično težak BEV, za koji se dodatno pretpostavlja da povremeno voze većim brzinama, obje neučinkovite za BEV. Suprotno tome, mali BEV poput ovdje predstavljenog elektrificiranog *Smart-a* koji se kreće lokalno, kao i samo regionalno, može imati najpovoljniji utjecaj na CO2. Tijekom ekonverzije rabljenog automobila, kao što je prikazano sa Smartom, emisija CO2 u životnom ciklusu može se smanjiti za više od 80% u usporedbi s onom poznatom iz ICEV-a [1].

Althaus čak zaključuje da ovdje 'ugljični otisak nije dovoljan kao pokazatelj ekološke učinkovitosti'. Jedan nedostatak BEV-a je potencijal zakiseljavanja povezan s postupcima topljenja Cu, Ni i Co, jer je puno Cu, a kod nekih vrsta baterija Ni i Co također bitni elementi električnih komponenata. Uz to, postoje zakiseljujuće emisije elektrana na ugljen, ovisno o lokalnoj vrijednosti ove vrste proizvodnje električne energije. Međutim, koliko je lokalna prednost gotovo nulte emisije električnih automobila ugrađena u LCA modele i dalje je pitanje [4].

3.4. Učinci električnih automobila

Vozne performanse vozila obično se procjenjuju vremenom ubrzanja, maksimalnom brzinom i prohodnošću. U dizajnu pogonskog sklopa EV (engl. Electric vehicle), odgovarajuća ocjena snage motora i parametri prijenosa primarni su čimbenici kako bi se udovoljilo specifikacijama performansi.

Osnovne performanse vozila uključuju maksimalnu brzinu, pouzdanost i ubrzanje. Maksimalna brzina vozila može se lako pronaći na mjestu presjeka krivulje vučnog napora s krivuljom otpora

(otpor kotrljanja plus aerodinamički otpor). Treba napomenuti da takva točka presjeka ne postoji u nekim izvedbama, koje obično koriste veći vučni motor ili veliki prijenosni omjer [5].

Učinak vozila opisan u prethodnom odjeljku diktira sposobnosti vozila s obzirom na brzinu, sposobnost kretanja i ubrzanje, pa tako diktira i snagu motora pogonskog sklopa. Međutim, u normalnim uvjetima vožnje te se maksimalne mogućnosti rijetko koriste. Tijekom većeg dijela vremena rada pogonski sklop radi s djelomičnim opterećenjem.

Stvarni vučni napor (snaga) i brzina vozila uvelike se razlikuju ovisno o radnim uvjetima, poput ubrzanja ili usporavanja, kretanja uzbrdo ili nizbrdo, itd. Te su varijacije povezane s prometnim okruženjem i vrstom vozila. Uvjeti gradskog prometa i prometa na autocesti uvelike se razlikuju, kao i različite misije vozila, poput univerzalnog osobnog automobila i vozila s redovitim rutama i rasporedom vožnje [5].

U prijevozu je jedinica energije obično kilovat-sat (kWh), a ne džul ili kilodžul (J ili kJ). Potrošnja energije po jedinici udaljenosti u kWh/km obično se koristi za procjenu potrošnje energije u vozilu.

Međutim, za ICE vozila uobičajena jedinica je fizička jedinica zapremine goriva po jedinici udaljenosti, kao što su litre na 100 km (l/100 km). U SAD-u se obično koristi udaljenost po jedinici volumena goriva; to se izražava kao milje po galonu (mpg). S druge strane, za EV na baterije, prikladnija je izvorna jedinica potrošnje energije u kWh, izmjerena na stezaljkama akumulatora [5].

Kapacitet energije baterije obično se mjeri u kWh, što omogućava jednostavno izračunavanje raspona vožnje po punjenju. Slično vozilima ICE, l/100 km (za tekuća goriva) ili kg/100 km (za plinska goriva, kao što je vodik) ili mpg, ili milje po kilogramu prikladnija je mjerna jedinica za vozila koja koriste plinovita goriva [5].

3.5. Utjecaj na okoliš

Mišljenja su podijeljena kada se raspravlja o tome koliko električna vozila zapravo utječu na smanjenje onečišćenja okoliša.

Neka istraživanja su pokazala da klasični automobili s motorima s unutarnjim izgaranjem mogu manje zagađivati okoliš u usporedbi s određenim elektranama koje proizvode električnu energiju za pogon električnih vozila. Ova istraživanja provedena su u Kini, gdje su električna vozila,

uključujući automobile i bicikle, izuzetno popularna i čine 50 posto više od konvencionalnih vozila. [6].

Pokazalo se da elektrane koje proizvode električnu energiju za električna vozila emitiraju više finih čestica nego uobičajeni automobili. Te čestice nastaju izgaranjem fosilnih goriva i sastoje se od kiselina, organskih kemikalija, metala i prašine. Znanstvenici napominju da su električna vozila prihvatljiva i ekološki prihvatljiva samo u regijama gdje se energija dobiva iz obnovljivih izvora.

Međutim, pozitivan utjecaj na cjelokupnu floru i faunu je neprocjenjiv. Nagli porast broja automobila i velike količine ispušnih plinova doveli su do ozbiljnih problema zagađenja okoliša. Globalno, promet motornih vozila je u stalnom porastu.

U Europi su sve vidljiviji znakovi početka električne revolucije. Europska unija postavila je jasne ciljeve za smanjenje emisija CO2 iz automobila, s ciljem da one padnu ispod 95 g/km. Na primjer, trenutne emisije hibridnog Toyota Priusa, koje su među najnižima u svijetu, iznose 105 g/km. Međutim, ova vrijednost također ovisi o ukupnoj proizvodnji energije u zemlji – što veći udio obnovljivih izvora, to će niže biti emisije CO2 od električnih vozila. Uvođenje električnih vozila u gradove pomoći će u smanjenju emisija na lokalnoj razini. [7].

Kao što je već spomenuto, klasični motori s unutarnjim izgaranjem imaju značajan utjecaj na ljude, okoliš te cjelokupnu floru i faunu. Glavni nedostaci dizelskih i benzinskih motora uključuju emisije štetnih plinova, buku, vibracije i potrošnju neobnovljivih izvora energije.

Elektromotor ima nulte emisije štetnih tvari tijekom rada. Međutim, iako elektromotori ne emitiraju štetne plinove, proizvodnja električne energije potrebne za njihov rad može povećati zagađenje na mjestima kao što su hidroelektrane, nuklearne elektrane te termoelektrane. Ova postrojenja, iako često koriste manje fosilnih goriva i rade u optimalnim uvjetima, ili se oslanjaju na obnovljive izvore energije, i dalje mogu imati određeni utjecaj na okoliš. No, budući da su ova postrojenja smještena izvan gradova, upotreba elektromotornog pogona značajno bi mogla poboljšati kvalitetu zraka u urbanim sredinama[7].

Velika prednost elektromotora zapravo je njihova mehanička jednostavnost i visoki stupanj učinkovitosti, koji omogućava iskorištavanje energije od 90% ili više. Elektromotori mogu generirati veliki zakretni moment, što znači da im nije potreban mjenjač. Za razliku od klasičnih dizelskih i posebno benzinskih motora, koji postižu mali zakretni moment pri niskim brzinama, elektromotori pružaju veliki zakretni moment pri pokretanju, odnosno na niskim brzinama. Također, električna vozila mogu postići istu, pa čak i veću snagu i ubrzanje u usporedbi s

današnjim vozilima, čime primjena elektromotora ne samo da poboljšava performanse vozila, već ih i unaprjeđuje.

Oporavak energije kočenja je također vrlo važna prednost električnih automobila. Ovaj sustav omogućava da se energija koja se obično gubi tijekom kočenja pretvara u električnu energiju putem generatora i pohranjuje u akumulator. Ova funkcionalnost je posebno korisna u gradskim sredinama gdje su česti zaustavljanja i kretanja, čime se dodatno povećava učinkovitost i autonomija vozila.

Električna vozila imaju dugu povijest, a do 1920-ih bila su konkurentna vozilima s unutarnjim izgaranjem. Međutim, ubrzani razvoj motora s unutarnjim izgaranjem potisnuo je električna vozila iz raširene upotrebe. U novije vrijeme, zahvaljujući tehnološkom napretku, komercijalna upotreba električnih vozila postaje relevantna. Moderni EV modeli, kao što su oni proizvedeni od strane kompanija Tesla, Rivian, Volkswagen i drugih, postižu iznimne performanse – standardni modeli mogu dosegnuti brzine od preko 200 km/h, a ubrzanje od 0 do 100 km/h kod nekih modela iznosi ispod 3 sekunde. [8].

Što se tiče dosega, najnoviji modeli električnih vozila opremljeni naprednim litij-ionskim baterijama imaju domet između 400 i 600 kilometara s jednim punjenjem, dok luksuzni i *premium* modeli mogu čak premašiti 600 kilometara. Ova se brojka stalno povećava kako tehnologija baterija napreduje, a razvoj novih baterijskih tehnologija poput *solid-state* baterija obećava još veći doseg i brže vrijeme punjenja.

Unatoč svim prednostima, učinkovitost električnih vozila ograničena je težinom baterije, koja čini oko četvrtinu ukupne težine vozila. Zbog toga mnoge organizacije rade na razvoju novih vrsta baterija koje bi omogućile bolje vozne osobine i veću učinkovitost električnih vozila.

Elektromotorni pogon u vozilima trenutno je najbolje ekološki prihvatljivo rješenje bez konkurencije. Prednosti su mu brojne, a nedostataka vrlo malo. Elektromotorno vozilo ima nulte emisije tijekom rada i trenutno je jedino vozilo s takvom karakteristikom. Međutim, povećana upotreba ovakvih vozila zahtijeva i povećanje proizvodnje električne energije, što može rezultirati zagađenjem na drugim mjestima tijekom proizvodnje te energije [9].

Osim problema s baterijama, visoka cijena električnih vozila također predstavlja izazov, ali se očekuje da će taj problem biti riješen kada dođe do masovne proizvodnje i prodaje. Još jedan potencijalni problem je potreba za zamjenom baterija. Međutim, s obzirom na to da su električna vozila do danas postigla visok stupanj razvoja, baterije bi trebale trajati barem deset godina bez potrebe za promjenom, što ublažava ovaj problem.

Razvijene su različite vrste baterija za električna vozila, pri čemu je najrazvijenija litij-ionska baterija koja se koristi u većini hibridnih i električnih vozila. Osim litij-ionskih baterija, za pohranu energije koriste se i olovno-kiselinske, nikal-kadmijske baterije, natrij-nikal-hidrogen-klorid baterije, nikal-metal-hibridne baterije i baterije na bazi litij-ionskih polimera.

Baterije koje se koriste u automobilima moraju ispunjavati određene zahtjeve kako bi bile učinkovite i prikladne za tu namjenu. Ti zahtjevi uključuju:

- visoku specifičnu energiju (izraženu u kWh/kg), što znači da baterije trebaju biti lagane uz veliku količinu pohranjene energije
- veliku specifičnu snagu (izraženu u W/kg), što označava visoku snagu po jedinici mase, omogućujući brzo isporučivanje energije
- veliku gustoću energije (izraženu u kWh/m³), što znači da baterije trebaju biti kompaktne s velikom količinom uskladištene energije
- dugo razdoblje rada, što uključuje mogućnost višestrukog punjenja i pražnjenja bez značajnog smanjenja kapaciteta baterije
- kratko vrijeme punjenja kako bi se baterije mogle brzo napuniti
- duboki radni ciklus, što znači da baterije mogu raditi učinkovito i pri niskim razinama napunjenosti
- sigurnost, kako bi se smanjili rizici od nesreća i oštećenja
- mogućnost recikliranja, kako bi se smanjio okolišni utjecaj nakon kraja životnog vijeka baterije
- širok temperaturni raspon za rad u različitim klimatskim uvjetima te povoljnu cijenu, kako bi bile pristupačne za široku primjenu [1].

3.6. Ekonomski aspekt električnih automobila

Osnovna ideja pri kupnji električnih automobila je smanjenje ovisnosti o naftnim derivatima. Iako električni automobili trenutno koštaju značajno više od konvencionalnih vozila, njihova kupnja postaje ekonomski isplativa dugoročno. Električni automobili koriste vrlo malo ili nimalo ulja i njegovih proizvoda. S obzirom na današnje cijene goriva, ovaj alternativni oblik prijevoza vrijedi razmotriti zbog njegovih dugoročnih prednosti i potencijalnih ušteda [9].

Većina ljudi ne razmišlja o dobivanju raznih pogodnosti za kupnju takvih automobila, poput poticaja za ekološki prihvatljiviju vožnju, besplatnog parkiranja u nekim područjima i slično.

Uzimajući u obzir ogroman porast mobilnosti u svijetu koji se očekuje u budućnosti, smanjenje potražnje za automobilskom energijom jedan je od najvažnijih izazova. Da bi se procijenile dostupne tehnologije, potrošnja energije dijeli se na zahtjeve dobro napunjenog spremnika (WTT) (engl. *Well-to-tank*) i na zahtjev spremnika-vučnog kotača (engl. *Tank-to-wheel* - TTW). WTT se odnosi na fazu od vađenja sirovine do isporuke goriva u spremnik vozila. TTW kvantificira performanse pogonskog sklopa. Zajedno, oba rezultiraju ukupnom učinkovitošću dobrog upravljanja - WTW (engl. *Well-to-wheel*) [9].

Procjena WTW-a omogućuje procjenu ukupne energije i učinkovitosti automobila s različitim pogonskim tehnologijama.

Automobili s gorivnim ćelijama na vodik još uvijek nisu široko dostupni kao serijski proizvodi, no proizvođači poput Mercedesa i Toyote obećali su da će uskoro postati dostupni ili su već predstavili male serije automobila s gorivim ćelijama (FCV). Glavna prednost FCV-a u odnosu na baterijska električna vozila (BEV) je znatno veći domet i brzo punjenje spremnika goriva. [10].

Međutim, potrebna infrastruktura benzinskih postaja H2 nije dostupna nigdje u svijetu, ne uzimajući u obzir neke pojedinačne benzinske postaje u nekoliko gradskih središta koje omogućuju regionalnu mobilnost vozila s gorivim ćelijama na pogon vodikom, koja se svakodnevno moraju vraćati na istu benzinsku postaju.

Utjecaj izgradnje, održavanja i odlaganja cesta ovdje se zanemaruje, jer nema razlike između ICEV i BEV. LCA se obično izračunava zasebno za platformu = vozila bez motora, mjenjača, sustava goriva ili bilo koje komponente s unutarnjim izgaranjem), pogonskog sklopa (električni motor i pripadajuće smjese, infrastruktura za prijenos i punjenje), proizvodnju baterija, te održavanje i liječenje na kraju života. Druga istraživanja također razlikuju dijelove poput pretvarača/elektronike, generatora i ostalih komponenata [9].

Međutim, o potencijalima globalnog zagrijavanja proizvodnje i upotrebe BEV-a raspravlja se kontroverzno u znanosti i javnosti, dok se ostali kriteriji nalaze samo u znanstvenoj raspravi.

3.7. Vrste električnih automobila

Autor u literaturi [1] navodi četiri glavne vrste električnih automobila:

1. Hibridna električna vozila,
2. Priključna hibridna električna vozila,
3. Električni automobil proširenog dometa,
4. Električni automobil s baterijom.

Hibridna vozila koriste malu električnu bateriju za zamjenu klasičnog motora s unutarnjim izgaranjem i za poboljšanje potrošnje goriva za približno 25 posto u usporedbi s klasičnim vozilima. Elektromotor minimalizira prazan hod i povećava sposobnost automobila za pokretanje i ubrzanje, što je izuzetno važno u gradskoj vožnji.

Nadalje, koriste kombinaciju električnog motora i motora s unutarnjim izgaranjem za vožnju. Električni motor ubrzava automobil do otprilike 40 km/h, nakon čega preuzima motor s unutarnjim izgaranjem. Baterija se puni putem benzinskog motora i regenerativnog kočenja. Regenerativno kočenje pretvara kinetičku energiju, koja bi se inače izgubila kao toplina, u električnu energiju koja se potom pohranjuje u bateriji [4].

Priključno hibridno vozilo (engl. *Plugin hybrid vehicle* - PHV) je hibridno vozilo opremljeno punjivom baterijom koja se puni u utičnici. PHV koristi električni motor za vožnju bez ispuštanja štetnih plinova na kratkim udaljenostima, dok za veće udaljenosti prelazi u režim rada klasičnog hibridnog vozila.

Njegova prednost je što, kada se baterija isprazni, nije potrebno brinuti o pronalaženju mjesta za punjenje. Vozilo će se automatski prebaciti u hibridni način rada i nastaviti s vožnjom kao klasično hibridno vozilo, odnosno omogućuje dolazak do odredišta bez brige o punjenju baterije.

Električni automobil proširenog dometa, ova vrsta električnih automobila koristi motor s unutarnjim izgaranjem za pokretanje električnog generatora koji puni baterije. U odnosu na hibridne priključne hibridne automobile, ovaj tip vozila pokreće isključivo električni motor, dok se motor s unutarnjim izgaranjem koristi samo za punjenje baterija [9].

Električni automobili nominalno pružaju brojne prednosti u usporedbi s konvencionalnim automobilima, kao što su:

- Uštede u operativnim troškovima električnih vozila rezultat su nižih troškova električne energije u usporedbi s cijenom naftnih derivata, kao i njihove veće učinkovitosti i nižih troškova održavanja

- Mogućnost punjenja električnom energijom iz lokalnog (vlastitog) obnovljivog izvora energije
- Smanjenje emisija plinova, posebno kada se koristi električna energija iz obnovljivih izvora
- Poboljšanje kvalitete zraka, posebno u urbanim područjima, zbog nulte emisije ispušnih plinova
- Smanjenje prometne buke gotovo nečujnim radom električnih automobila [11].

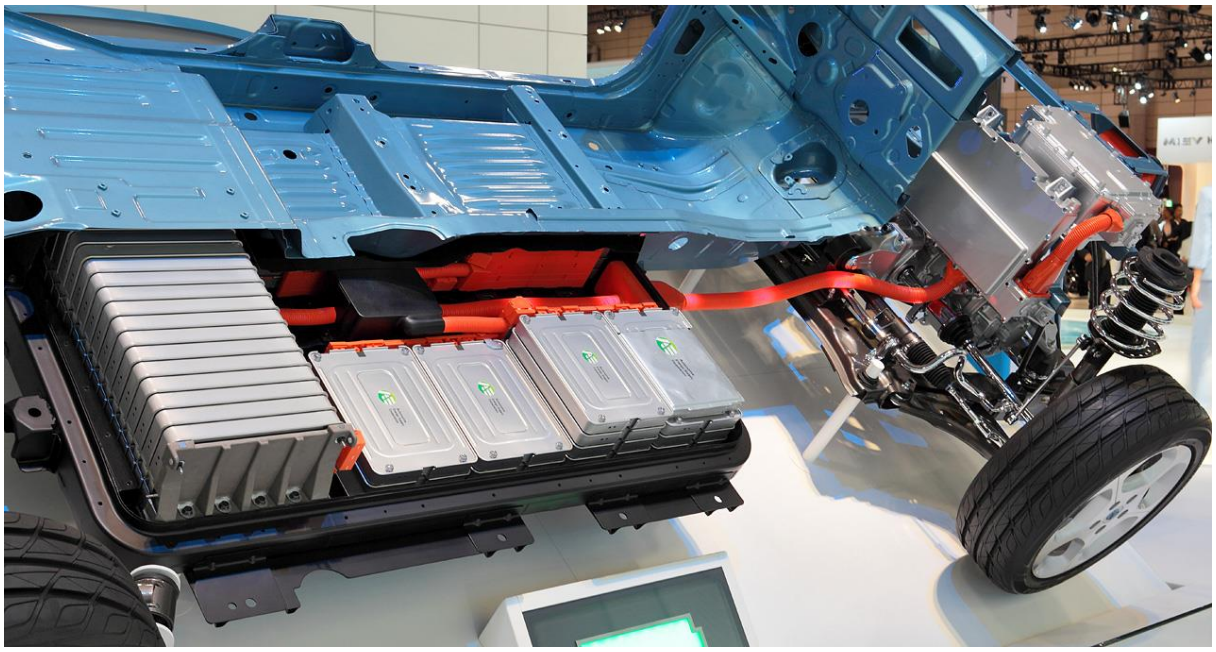
S druge strane, gradski promet, koji čini 75 do 80 posto ukupne kilometraže automobila širom svijeta, doprinosi oko 20 posto ukupnoj svjetskoj potrošnji naftnih derivata. Ako bi sav gradski promet bio zamijenjen električnim vozilima, globalna potrošnja naftnih derivata mogla bi se smanjiti za 20 posto. Ovo bi značajno smanjilo ovisnost o naftnim derivatima. Iako se proizvođači suočavaju s mnogim izazovima, konačni rezultat bi bio smanjenje ovisnosti o vanjskim izvorima energije i povećanje ljudske sigurnosti [1].

3.8. Infrastruktura i punjenje

Za razliku od drugih alternativnih goriva, električna vozila zahtijevaju znatno manje ulaganja i napora za razvoj infrastrukture za punjenje. Struja je već dostupna u svakom domaćinstvu, na radnim mjestima, u trgovačkim centrima i u urbanim područjima.

U usporedbi s postojećim rasporedom i zastupljenošću klasičnih benzinskih postaja, gustoća punionica za električna vozila u urbanim područjima bit će znatno veća. To je zbog toga što proces punjenja električnih vozila traje dulje i može potrajati i do tri sata na standardnim punionicama, što je tipično za instalaciju u urbanim sredinama poput javnih parkirališta, garaža, trgovačkih centara, kina i logističkih centara. Stoga će u budućnosti biti potrebno osigurati veći broj električnih punionica kako bi se zadovoljile potrebe za punjenjem vozila.

Slikom 3.2. prikazano je na kojem mjestu automobila su pozicionirane baterije za punjenje.



Slika 3.2. *Prikaz položaja baterije za punjenje* [12].

Brzo punjenje omogućuje da se baterije električnih vozila napune u roku od 30 minuta. Punionice za brzo punjenje imaju snagu između 50 i 250 kW i povezane su na trofazni napon od 400 V/63 A u distribucijskoj mreži. S druge strane, punionice srednje brzine, koje su pogodne za instalaciju na javnim gradskim površinama i u garažama, omogućuju punjenje u roku od do 3 sata. Takvi punjači obično koriste trofazni priključak 230 V/16 A, s maksimalnom snagom do 11 kW [9].

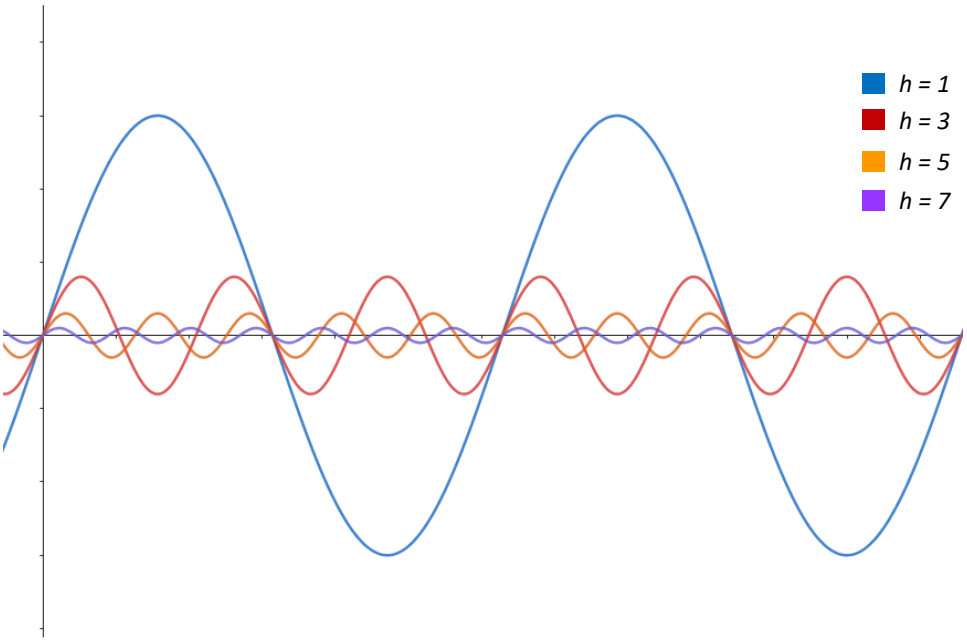
Očekuje se da će vlasnici vozila s vlastitim garažama kod kuće koristiti kućne punjače za električna vozila. Ovi punjači omogućuju punjenje baterije u vozilu u vremenskom okviru od 6 do 8 sati. Kućni punjači povezani su na standardni jednofazni kućni priključak 230 V/16 A, sa snagom koja se kreće od 2,3 do 3,7 kW ili na standardni trofazni kućni priključak 3 × 230 V/16 A, snage do 11 kW.

4. HARMONIJSKO IZOBLIČENJE I POKAZATELJI KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE

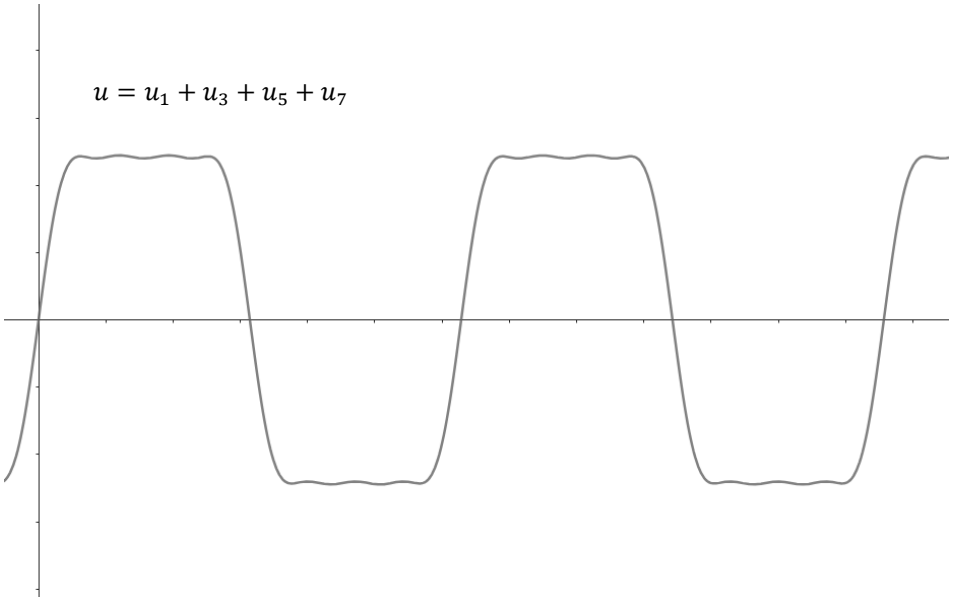
4.1. Harmonijsko izobličenje

Harmonijsko izobličenje predstavlja značajan izazov u suvremenim elektroenergetskim sustavima, utječući na stabilnost i pouzdanost opskrbe električnom energijom. Iako bi idealna opskrba trebala pokazivati savršeno monoharmonijski signal napona na svakoj lokaciji korisnika, različiti čimbenici, poput nelinearnih opterećenja i primjene kondenzatora za korekciju faktora snage, često rezultiraju odstupanjima od željenih uvjeta. Nastanak harmonika može biti posljedica različitih uzroka, uključujući zasićenje transformatora, industrijske lučne peći i statičke pretvarače snage koji se sve češće koriste u industriji. Povećana uporaba elektroničkih uređaja, osobito u stambenom sektoru, dodatno je pogoršala problem harmonijskog izobličenja, što zahtijeva pažljivo planiranje i dizajn elektroenergetskih sustava kako bi se održala stabilnost i pouzdanost mreža. Stoga, detaljne analize harmonika od faze planiranja do faze implementacije postaju ključne za održavanje prihvatljivih radnih uvjeta i za sprječavanje potencijalnih problema uzrokovanih nelinearnim opterećenjima.

Razumijevanje utjecaja harmonijskog izobličenja na elektroenergetske sustave ključno je za osiguranje optimalnog djelovanja opreme i mreža. Njihovo prisustvo može rezultirati pregrijavanjem transformatora, povećanim rizikom od kvarova i smanjenjem radnog vijeka opreme. Dodatno, povećanje oscilatornih struja i napona može stvoriti izazove u održavanju integriteta izolacije, što zahtijeva sustavno praćenje i kontrolu. S obzirom na rastuću uporabu nelinearnih opterećenja i primjenu kondenzatora za korekciju faktora snage, nužno je razviti strategije za smanjenje utjecaja harmonijskog izobličenja i održavanje stabilnosti elektroenergetskih sustava. Uključivanje analize harmonika u sve faze planiranja, projektiranja i održavanja elektroenergetskih sustava postaje neophodno kako bi se osigurala efikasna opskrba električnom energijom uz minimalne rizike i troškove [13]. Slikom 4.1. prikazan je treći, peti i sedmi harmonik u odnosu na osnovi, te slikom 4.2. prikazan je distorzirani valni oblik napona s prisutnim trećim, petim i sedmim harmonikom.



Slika 4.1. *Prikaz trećeg, petog i sedmog harmonika u odnosu na osnovni.*



Slika 4.2. *Prikaz distorziranog valnog oblika napona s prisutnim trećim, petim i sedmim harmonikom.*

4.1.1. Ukupno harmonijsko izobličenje - THD

U suvremenim elektroenergetskim sustavima, ukupno harmonijsko izobličenje (engl. *Total harmonic distortion* - THD) predstavlja ključni pokazatelj za procjenu kvalitete energije u prijenosu i distribuciji. THD pruža detaljan uvid u jačinu utjecaja punionica na kvalitetu električne

energije u kontekstu izobličenja napona. Važno je istaknuti da se THD definira kako za naponske tako i za strujne signale, koristeći omjer između efektivnih vrijednosti signala koji uključuju harmonike i onih koji uzimaju u obzir samo osnovnu frekvenciju. Razumijevanje THD-a ključno je za identifikaciju i rješavanje problema povezanih s izobličenjem signala, što omogućuje optimizaciju performansi elektroenergetskih sustava i osigurava stabilnost i pouzdanost u radu. Konačno, ukupno harmonijsko izobličenje definira se prema sljedećem matematičkom izrazu:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (4\text{-}1)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (4\text{-}2)$$

Gdje je: [13]

- $h -$ red harmonika
- $U_1 -$efektivna vrijednost napona harmonika osnovne frekvencije
- $\mathrm{I}_1 -$ efektivna vrijednost struje harmonika osnovne frekvencije
- $U_h -$ efektivna vrijednost napona *h*-tog harmonika
- $I_h -$ efektivna vrijednost struje *h*-tog harmonika.

U teoretskim razmatranjima gornja granica sume je, naravno, beskonačno, no u praksi se ne razmatraju harmonici viši od pedesetog.

4.1.2. Ukupno harmonijsko izobličenje s obzirom na potražnju - TDD

Harmonijsko izobličenje ključni je aspekt električnih sustava koji zahtijeva pažljivo praćenje, posebno na točki zajedničkog povezivanja, koja obično odgovara mjernom mjestu kupca. Prema standardu IEEE-519, preporučuje se praćenje tijekom razdoblja koje odražava maksimalnu potražnju kupca, što je obično između 15 i 30 minuta. Važno je napomenuti da slabiji izvori, koji imaju veliku potražnju struje u odnosu na njihovu nazivnu struju, obično pokazuju veće izobličenje valnog oblika. S druge strane, izvori koji su karakterizirani za rad pri niskim potražnjama struje imaju tendenciju pokazivati smanjeno izobličenje valnog oblika. Ukupno harmonijsko izobličenje s obzirom na potražnju (engl. *Total demand distortion* -TDD) mjera je harmonijske distorzije u

elektroenergetskom sustavu relativno prema nazivnoj struji tereta. Prema navedenom definira se formula za TDD:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{nT}} \cdot 100\% \quad (4\text{-}3)$$

Gdje je: [13]

- $h -$ red harmonika
- $I_h -$ efektivna vrijednost struje harmonika *h*-tog harmonika
- $I_{nT} -$ efektivna vrijednost nazivne struje tereta.

4.1.3. Ukupni faktor snage u odnosu na harmonijsko izobličenje

U suvremenim električnim sustavima, s rastućom prisutnošću harmonijskog izobličenja, tradicionalna definicija faktora snage kao kosinusa kuta između napona temeljne frekvencije i struje evoluira kako bi uzela u obzir efektivne vrijednosti signala, koje reflektiraju doprinos komponenata različitih frekvencija. U tom kontekstu, faktor snage pomaka (engl. *displacement power factor* - DPF) i dalje je važan u karakteriziranju faktora snage na frekvenciji snage, dok se izobličenje (ili stvarni) faktor snage (engl. *power frequency factor, while distortion (or true) power factor* - TPF) pojavljuje kao ključni pokazatelj koji prati varijacije efektivnih vrijednosti signala. Ukupni faktor snage (engl. *Total power factor* - PF_{total}) predstavlja produkt harmonijskog izobličenja i stvarnih faktora snage, čime se osigurava cjelovita slika o energetskoj učinkovitosti i stabilnosti električnog sustava u uvjetima povećanog harmonijskog izobličenja [13].

4.2. Izvori viših harmonika

Harmonijsko izobličenje u električnim sustavima predstavlja kompleksan izazov s kojim se suočavaju industrijski, komercijalni i stambeni sektori. Važno je shvatiti da izobličenje valnih oblika predstavlja samo jednu od mnogih smetnji koje utječu na funkcionalnost električnih sustava. S obzirom na sve veću upotrebu elektronike, problem harmonijskog izobličenja postaje još izazovniji. Srećom, izvori harmonijskih struja dovoljno su dobro identificirani, što omogućava industrijskim, komercijalnim i stambenim objektima da se suoče s poznatim obrascima izobličenja valnih oblika.

Različiti nelinearni tereti proizvode različite, ali prepoznatljive harmonijske spektre, olakšavajući zadatke pronalaženja uzroka harmonijskog izobličenja. Stoga je ključno da opskrbljivači i korisnici električne energije postanu upoznati s potpisima različitih izobličenja valnih oblika proizvedenih određenim harmoničnim izvorima. Ovo će olakšati razvoj i implementaciju boljih metoda za ograničavanje i uklanjanje tih izobličenja na mjestima njihova nastanka, smanjujući njihovu štetu na susjedne instalacije.

Dodatno, procjena rasprostiranja harmonika u distribucijskoj mreži zahtijeva precizno predstavljanje izvora energije. Slabi izvori mogu biti povezani sa značajnim harmonijskim izobličenjem koje može utjecati na veliki broj korisnika, osobito kada se harmonici stvaraju na više lokacija, poput industrijskih postrojenja napajanih s istog izvoda [13].

Konačno, razumijevanje i upravljanje harmonijskim izobličenjem od velikog je značaja za održavanje stabilnosti i učinkovitosti električnih sustava u različitim sektorima. Ovaj rad pružit će temeljno razumijevanje problema harmonijskog izobličenja te pregled kako nadzirati i održavati pojavu viših harmonika u granicama propisanim normom.

4.2.1. Klasični izvori harmonika

Harmonijsko izobličenje u električnim sustavima predstavlja kompleksan problem koji se razvio tijekom vremena, od prije razvoja elektroničkih prekidačkih uređaja. Prije toga, harmonijska struja promatrana je kroz prizmu dizajna i rada uređaja za snagu s magnetskim jezgrama poput transformatora i električnih strojeva. Glavni izvori harmonika tada su uključivali transformatore podstanica i potrošača koji rade u zasićenom području, što je rezultiralo izobličenjem valnog oblika napona. Danas, s razvojem tehnologije, situacija se promijenila, a izvori izobličenja su mnogobrojni i raznoliki. Primjerice, električne peći postale su jedan od glavnih izvora zabrinutosti u visokonaponskim primjenama u industriji, dok su pretvarači snage postali drugi važan izvor harmonika. Osim industrijskih instalacija, i komercijalni te stambeni objekti mogu postati značajni izvori harmonika, posebno kada se uzmu u obzir kombinirani učinci svih pojedinačnih opterećenja na istom izvodu. Stoga je važno razumjeti i upravljati ovim izobličenjem kako bi se osigurala stabilnost i pouzdanost električnih sustava.

Harmonijsko izobličenje također može nastati i zbog drugih uzroka poput velikih početnih struja pri pokretanju kondenzatora, transformatora i rotirajućih strojeva u distribucijskom sustavu. IEEE-519 standard dopušta privremeno povećanje granica harmonijskog izobličenja tijekom pokretanja

i neobičnih uvjeta, ali takvi događaji mogu prouzročiti ozbiljne smetnje i oštećenja opreme. Fenomeni poput ferorezonancije mogu ostati neotkriveni tijekom dužeg vremenskog razdoblja, što dodatno otežava kontrolu i održavanje stabilnosti elektroenergetskih sustava. Stoga je važno kontinuirano praćenje, analiza i implementacija mjera za smanjenje i kontrolu harmonijskog izobličenja kako bi se osigurala pouzdanost i sigurnost električnih sustava u industriji i distribucijskim mrežama [13].

4.2.2. Suvremeni izvori harmonika

U današnjem svijetu, projektanti elektroenergetskih sustava suočavaju se s neprekidnim izazovima prilagođavanja postojećih sustava ili stvaranja novih kako bi se uspješno nosili s rastućim razinama harmonika. Očekuje se da će izvori harmonika postati raznoliki i brojniji, što dodatno komplicira situaciju. Povećana upotreba osjetljive elektronike u industrijskim procesima, osobnim računalima, digitalnim komunikacijama te multimediji dodatno opterećuje električne sustave. Uz to, integracija distribuiranih izvora u porastu, poput fotonaponskih elektrana, vjetroelektrana, prirodnog plina, karbonskih gorivnih ćelija i čak vodika, bit će ključna za upravljanje budućim potrebama za električnom energijom. Sadašnji distribuirani generatori koji pružaju podršku energetskim poduzećima tijekom vršnih sati potražnje bit će pridruženi brojnim jedinicama koje proizvode harmonike, kao što su mikroturbine pokretane prirodnim plinom ili vjetrom. S obzirom na ovu dinamiku porasta harmonijskih izvora, projektanti se moraju aktivno prilagođavati i inovirati kako bi osigurali pouzdanost i učinkovitost elektroenergetskih sustava za budućnost.

Nadalje, još jedan od suvremenih izvora harmonika su punionice električnih automobila. Električne punionice automobila imaju značajan utjecaj na harmonijsko izobličenje u elektroenergetskim mrežama. Kada se vozila pune, dolazi do povećane potrošnje električne energije, što može rezultirati pojavom harmonijskih izobličenja u sinusnom obliku struje i napona. Ovo harmonijsko izobličenje može izazvati probleme u elektroenergetskoj mreži, uključujući pregrijavanje vodiča, gubitke energije i oštećenje električnih uređaja. Stoga je važno razmotriti mjere za smanjenje ovog utjecaja, poput upotrebe sustava filtera koji minimiziraju štetne harmonijske komponente i primjene standarda koji ograničavaju dopuštene razine izobličenja. Integracija inteligentnih sustava upravljanja punionicama može također pomoći u optimizaciji punjenja vozila kako bi se smanjili negativni utjecaji na harmonijsko izobličenje i očuvala stabilnost elektroenergetskog sustava.

Osim toga, važno je razmotriti i utjecaj električnih vozila na lokalne distribucijske mreže. Koncentrirano punjenje vozila na određenim lokacijama može rezultirati lokalnim preopterećenjem mreže i povećanim harmonijskim izobličenjem na tim područjima. Stoga je potrebno pažljivo planirati lokacije punionica i implementirati strategije za distribuciju opterećenja kako bi se izbjegli problemi s harmonijskim izobličenjem. Također, razvoj tehnologija za pohranu energije i pametnih mreža može pružiti dodatne mogućnosti za upravljanje ovim izazovima i minimiziranje negativnih utjecaja na kvalitetu električne energije. Sve te mjere zajedno mogu doprinijeti održavanju stabilnosti elektroenergetskih sustava i osigurati učinkovitu integraciju električnih vozila u elektroenergetsku infrastrukturu [13].

4.3. Viši harmonici kao posljedica punjenja električnih vozila

Harmonici su dodatne frekvencije koje se mogu pojaviti u električnoj mreži, a viši harmonici su one frekvencije koje su višekratnici osnovne frekvencije (50 Hz ili 60 Hz, ovisno o regiji).

Kada se govori o višim harmonicima u kontekstu električnih vozila i infrastrukture punjenja, obično se misli na to da električna vozila i punionice mogu generirati ili emitirati signale napona frekvencija koje su više od osnovne frekvencije električne mreže. To može biti posljedica raznih faktora, uključujući karakteristike samih električnih vozila, sustave za punjenje, ili čak karakteristike električne mreže.

Prema autoru u literaturi [10] viši harmonici kao posljedica punjenja električnih vozila mogu imati nekoliko implikacija:

- Utjecaj na kvalitetu električne energije: viši harmonici mogu utjecati na kvalitetu električne energije u smislu narušavanja monoharmonijskog oblika struje i napona, što može uzrokovati probleme u elektroenergetskom sustavu
- Potreba za filtriranjem: da bi se osigurala stabilnost i kvaliteta električne energije, može biti potrebno ugraditi filtre za smanjenje ili uklanjanje viših harmonika generiranih tijekom punjenja električnih vozila
- Norme i standardi: industrijski standardi i propisi često propisuju maksimalne dopuštene razine viših harmonika kako bi se zaštitili elektroenergetski sustavi i uređaji od negativnih utjecaja

- Kvaliteta punjenja: punjenje električnih vozila treba biti stabilno i pouzdano, a viši harmonici mogu utjecati na stabilnost i kvalitetu punjenja. Stoga je važno osigurati da infrastruktura punjenja bude dizajnirana i implementirana uzimajući u obzir ove tehničke aspekte.

Viši harmonici mogu imati utjecaj na električne uređaje, komponente i sustave u punionicama i samim vozilima. Na primjer, mogu uzrokovati zagrijavanje kablova ili komponenti, povećati gubitke energije ili smanjiti učinkovitost punjenja. Industrijski standardi i propisi često propisuju maksimalne dopuštene razine viših harmonika kako bi se osigurala stabilnost i kvaliteta električne energije. Punionice i električni automobili moraju zadovoljiti ove zahtjeve kako bi se osiguralo sigurno i učinkovito punjenje [10].

Da bi se smanjili ili eliminirali negativni učinci viših harmonika, može biti potrebno ugraditi filtre ili druge sustave za filtriranje u punionicama ili električnim vozilima. Ti filtri pomažu u smanjenju smetnji i održavanju kvalitete napajanja tijekom punjenja.

4.4. Održivi razvoj i viši harmonici

Masovna upotreba električnih automobila ne samo da pruža značajnu priliku za smanjenje onečišćenja okoliša i emisija, već također može značajno povećati korištenje obnovljivih izvora energije. Nedavna istraživanja pokazuju da bi prelazak milijuna benzinskih automobila na električna mogao smanjiti emisiju štetnih tvari za između 150 000 i 300 000 tona godišnje. Ako bi se ta električna vozila napajala iz obnovljivih izvora energije, emisija ugljičnog dioksida (CO_2) mogla bi se smanjiti za 3,8 milijuna tona godišnje. [1].

Nadalje, prelazak milijun automobila na električni pogon mogao bi omogućiti proizvodnju gotovo 45 000 GWh obnovljive energije. To bi dodatno moglo smanjiti emisiju CO_2 za oko 41 milijun tona.

Međutim, ove se koristi mogu ostvariti samo ako opskrbljivač energijom pametno upravlja infrastrukturom za punjenje uravnotežujući broj punionica i količinu električne energije dostupne u tom području.

Iako električni automobili nude mnoge prednosti u odnosu na klasične automobile, potrebno je uložiti značajan trud kako bi se prevladale prepreke koje trenutno ograničavaju njihovu masovnu kupnju. Ključni izazov je osigurati da budu jednostavni za korištenje i punjenje. To se može postići povećanjem broja dostupnih punionica, uključujući instalaciju u kućama i na parkiralištima.

Električna vozila troše znatno manje energije u usporedbi s vozilima na fosilna goriva. Ukupna potrošnja energije "od spremnika do kotača" (poznata kao "Tank-to-Wheel") kod električnih vozila je približno tri puta manja u odnosu na vozila s fosilnim gorivima (benzin, dizel) iste težine i performansi [9].

Kada se uzme u obzir ukupna potrošnja energije, uključujući energiju potrebnu za proizvodnju i distribuciju goriva ili električne energije, razlika između vozila na fosilna goriva i električnih vozila postaje još izraženija. Ova sveobuhvatna analiza, poznata kao analiza "*Well-to-Wheel*", pokazuje da konvencionalna vozila na fosilna goriva troše između 20% i 80% više primarne energije u usporedbi s električnim vozilima. Ova razlika ovisi o vrsti goriva i načinu proizvodnje energije: u usporedbi s dizelskim vozilima (korištenjem olovnih baterija), potrošnja primarne energije može biti veća za oko 20 % te u usporedbi s benzinskim vozilima (korištenjem litij-ionskih baterija), potrošnja primarne energije može biti veća za čak 80% [1].

Cestovna vozila u Europi odgovorna su za oko 20 % emisija ugljičnog dioksida, dok putnička vozila čine oko 12 % tih emisija. Povećanje emisije CO2 iz vozila moglo bi se zaustaviti početkom sljedećeg desetljeća ako se primjeni integrirani pristup. Ovaj pristup uključuje poboljšanje energetske učinkovitosti motora s unutarnjim izgaranjem, korištenje druge generacije biogoriva, širenje upotrebe električnih vozila i poboljšanje prometa kako bi se smanjili zastoji i neefikasnosti.

Polovica emisija mogla bi se smanjiti ako automobilska industrija poveća ulaganja u motore s boljom energetskom učinkovitošću. Od tog smanjenja, četvrtina bi se mogla postići primjenom čistih tehnologija, uključujući: hibridna vozila, priključna hibridna vozila te električna vozila s baterijom.

Električna vozila predstavljaju značajan napredak u smanjenju emisija CO2 i drugih štetnih plinova u odnosu na konvencionalna vozila s unutarnjim izgaranjem. Na temelju potrošnje "Spremnik do kotača", električna vozila ne proizvode štetne plinove i stakleničke plinove i na taj način značajno smanjuju zagađenje u usporedbi s drugim vozilima. konvencionalnim vozilima.

Ako uzmemo u obzir ukupne emisije CO2 temeljem potrošnje energije "Tank-To-Wheel", što uključuje sve korake od proizvodnje primarne energije do isporuke energije kotačima vozila, električna vozila proizvode samo polovicu emisija CO2 u usporedbi s konvencionalnim vozilima [9].

Veza između viših harmonika u električnom punjenju i održivog razvoja leži u povezanosti s kvalitetom električne energije, učinkovitosti punjenja, sigurnosti sustava i smanjenju negativnih

utjecaja na okoliš. Evo kako viši harmonici u električnom punjenju mogu biti povezani s održivim razvojem:

Pravilno filtriranje i kontrola viših harmonika mogu doprinijeti većoj učinkovitosti punjenja električnih vozila. Manje smetnje i električni šumovi znače manje gubitaka energije tijekom punjenja, što je važno za održavanje visoke energetske učinkovitosti. Viši harmonici mogu uzrokovati oscilacije i nestabilnosti u električnim sustavima. Kontrola ovih harmonika osigurava stabilnost sustava za punjenje i održava pouzdanost električne mreže, što je ključno za održivi razvoj električne mobilnosti [10].

Električna vozila se pune s visokim naponima i strujama te je sigurnost tijekom punjenja od velike važnosti. Viši harmonici mogu utjecati na sigurnost punjenja, pa je potrebno provoditi mjere zaštite kako bi se osigurala sigurnost korisnika, vozila i infrastrukture punjenja.

Smanjenje viših harmonika može imati pozitivan utjecaj na okoliš jer doprinosi većoj energetskoj učinkovitosti i smanjenju potrošnje električne energije tijekom punjenja. To se uklapa u širi kontekst održivog razvoja i smanjenja negativnih utjecaja na okoliš.

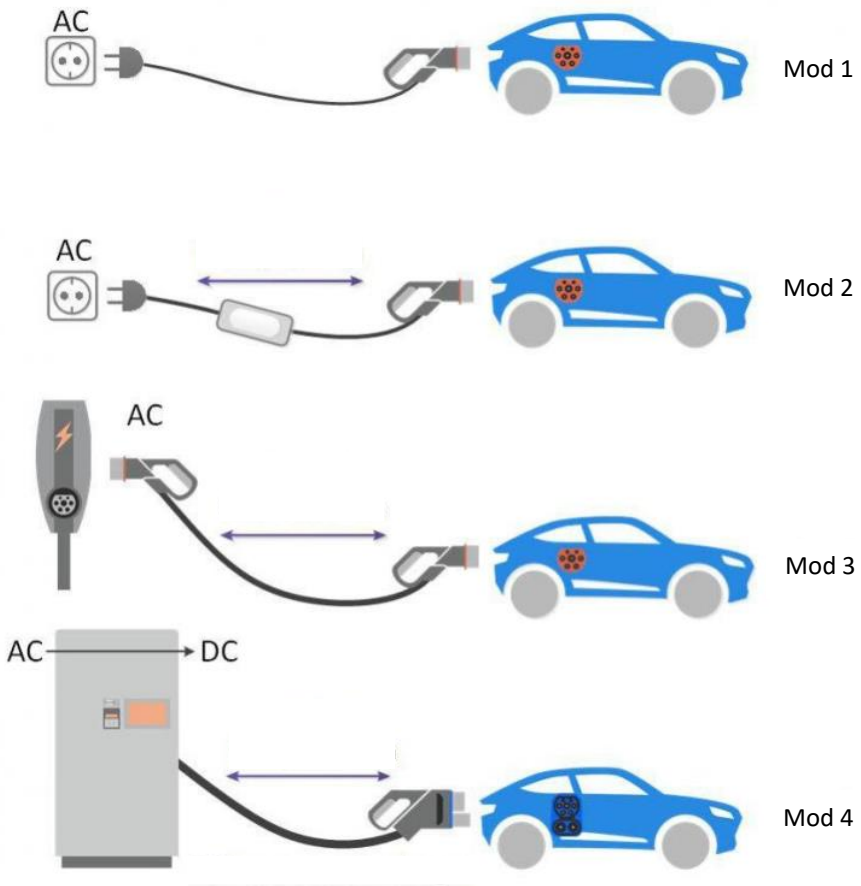
Kontrola viših harmonika u punjenju električnih vozila često je usklađena s industrijskim standardima i propisima koji promiču održivi razvoj, uključujući standarde za kvalitetu napajanja, energetsku učinkovitost i zaštitu okoliša.

Kroz primjenu tehnologija filtriranja, upravljanja harmonicima i inženjerskih rješenja za sigurno i učinkovito punjenje, može se osigurati da električna mobilnost pridonosi održivom razvoju kroz smanjenje negativnih utjecaja na okoliš, veću energetsku učinkovitost i sigurnost električnih sustava.

5. ULTRA-BRZE PUNIONICE (engl. *SUPERCHARGERS*)

5.1. Klasifikacija punionica za električna vozila

Punionice za električna vozila mogu se podijeliti na tri osnovne kategorije: privatne, javne i djelomično javne punionice. Prema IEC 62196 standardu definirana su četiri moda punjenja električnih vozila. Slikom 5.1. prikazani su modovi punjenja električnih vozila [14].



Slika 5.1. *Modovi punjenja električnih vozila [14].*

Mod 1 predstavlja način punjenja električnih vozila izmjeničnom strujom putem jednofaznog priključka preko kućne utičnice. Ovaj mod koristi struju u rasponu od 10 do 16 A, a snaga punjenja varira između 2 kW i 3,7 kW. Zbog nedostatka zaštitnog uređaja i komunikacije između punionice i vozila, može doći do pregrijavanja kabela, što je razlog zašto je ovaj način punjenja zabranjen u

mnogim zemljama EU. Iako je spor, s vremenom punjenja od 4 do 8 sati, Mod 1 se koristi za kućno punjenje kada vozilo može ostati priključeno duže vrijeme.

Mod 2 je način punjenja električnih vozila izmjeničnom strujom, pri čemu se vozilo može priključiti na mrežu putem jednofaznog ili trofaznog priključka preko kućne utičnice. Ovaj način punjenja uključuje uzemljen kabel i zaštitni uređaj koji, iako povećavaju troškove, značajno unaprjeđuju sigurnost. Također, postoji komunikacija između zaštitnog uređaja i vozila. Kao i mod 1, mod 2 je namijenjen za kućno punjenje i omogućuje sporo punjenje s vremenom od 2 do 4 sata. Struja punjenja kreće se u rasponu od 16 do 32 A, dok najveća snaga za jednofazni priključak iznosi 7 kW, a za trofazni priključak 22 kW. Mod 2 predstavlja dobro prijelazno rješenje prema bržim metodama punjenja.

Mod 3 je metoda punjenja izmjeničnom strujom koja koristi trofazni priključak za povezivanje vozila s mrežom. Ovaj način punjenja omogućuje bržu i sigurniju vezu, jer uključuje komunikaciju između vozila i punionice te zaštitni uređaj unutar punionice. Električno vozilo se povezuje putem sigurnog kabela i mora imati ugrađeni punjač. Vrijeme punjenja kod moda 3 je između 1 i 2 sata, što ga čini srednje brzim načinom punjenja. Struja punjenja varira od 32 do 63 A, dok snaga punjenja može biti između 22 kW i 43 kW. Za razliku od moda 1 i moda 2, električna instalacija punionice kod Mod 3 mora biti potpuno odvojena od instalacija drugih potrošača kako bi se osigurala nesmetana funkcionalnost punionice.

Mod 4 je metoda punjenja istosmjernom strujom koja omogućuje brzo punjenje električnih vozila. U ovom načinu punjenja, punionica je povezana s mrežom preko izmjenjivača, a vozilo se direktno puni istosmjernom strujom, čime se izbjegava potreba za ugrađenim punjačem u vozilu. Mod 4 se često koristi za javne punjače na parkiralištima i uz autoceste. Ova metoda omogućuje brzo punjenje baterije do 85% kapaciteta u vremenskom rasponu od 5 do 30 minuta. Snaga punjenja varira od 50 kW do 240 kW, s naponom do 500 V i strujom do 400 A [14].

5.2. Pojam ultra-brze punionice

Ultra-brze punionice za električne automobile su brze punionice koje omogućuju značajno ubrzanje punjenja baterija električnih vozila u usporedbi s običnim kućnim punionicama ili sporijim javnim punionicama. Spomenute punionice su često dio mreže punionica koju razvijaju proizvođači automobila ili specijalizirane tvrtke za infrastrukturu punjenja.

Autor u literaturi [15] navodi nekoliko ključnih karakteristika i aspekata ultra-brzih punionica za električne automobile:

- Brzo punjenje: ultra-brze punionice omogućuju visoke snage punjenja, često iznad 100 kW pa čak i do nekoliko stotina kW, ovisno o modelu i tehnologiji punjenja. To omogućuje brzo punjenje baterija i skraćuje vrijeme potrebno za dopunjavanje električnog vozila.
- Visoki napon i snaga: ultra-brze punionice koriste visoki napon i snagu kako bi osigurali brzo punjenje. To može zahtijevati specifičnu infrastrukturu i opremu kako bi se podržale visoke razine snage punjenja.
- Povezanost s mrežom: ultra-brze punionice su često povezane s pametnim sustavima upravljanja kako bi se optimiralo punjenje, rasporedila opterećenja mreže i smanjilo opterećenje tijekom punjenja više vozila istovremeno.
- Kompatibilnost s vozilima: ultra-brze punionice su obično dizajnirane za podršku specifičnim modelima i markama električnih vozila. Za primjer, Tesla *Supercharger* mreža građena je prvenstveno za Tesla automobile, ali je standardna i kompatibilna i za vozila drugih proizvođača.
- Lokacije punionica: ultra-brze punionice se često nalaze na strateškim lokacijama poput autocesta, cestama između gradova ili na prometnim mjestima kako bi se omogućilo brzo punjenje električnih vozila tijekom dužih putovanja.
- Korisničko iskustvo: ultra-brze punionice obično nude dobro korisničko iskustvo s jasnim uputama za punjenje, brzim plaćanjem ili integracijom s mobilnim aplikacijama za upravljanje punjenjem.

Punjači ultra-brzih punionica su ključni element infrastrukture punjenja električnih vozila jer omogućuju vozačima brzo i učinkovito punjenje tijekom dužih putovanja ili kada je potrebno brzo dopuniti baterije. Kod ovakvih punionica, brzi punjači su važni za širenje i prihvaćanje električne mobilnosti te pružaju korisnicima praktično i učinkovito iskustvo punjenja.

5.3. Način rada ultra-brzih punionica

Punjači kod ultra-brzih punionica za električne automobile rade na sličan način kao i drugi brzi punjači, ali često imaju svoje specifičnosti koje ih razlikuju od drugih punionica.

Kada vozač priključi svoje električno vozilo na ultra-brzu punionicu, komunikacija između vozila i punionice se uspostavlja kako bi se identificiralo vozilo i odredila potrebna snaga punjenja [15].

Na temelju informacija o vozilu i njegovim mogućnostima, ultra-brza punionica postavlja parametre punjenja kao što su snaga punjenja, trenutno stanje baterije i maksimalna dopuštena snaga punjenja. Tijekom punjenja, punionica i vozilo stalno razmjenjuju informacije kako bi pratili napredak punjenja, temperatura baterije i ostale važne parametre.

Ultra-brze punionice su obično dio pametnih sustava za upravljanje punjenjem koji optimiziraju punjenje kako bi se osiguralo brzo i učinkovito punjenje uz minimalne gubitke energije i očuvanje dugoročne trajnosti baterije vozila [16].

Kada je vozilo dovoljno napunjeno prema postavljenim parametrima ili kada korisnik prekine punjenje, ultra-brza punionica završava punjenje i priprema se za sljedećeg korisnika.

Osim osnovnog načina rada, ultra-brze punionice često imaju i dodatne značajke kao što su brzo plaćanje, integracija s mobilnim aplikacijama za upravljanje punjenjem, prikaz informacija o punjenju na ekranima ili putem mobilnih uređaja te mogućnost nadogradnje i prilagodbe infrastrukture prema potrebama.

5.4. Ultra-brze punionice poduzeća Tesla

Ultra-brze punionice Tesle su visoko-energetske punionice dizajnirane specifično za brzo punjenje Tesla električnih vozila. Evo kako se pojam i razvoj ultra-brzih punionica Tesle mogu opisati:

Ultra-brze punionice Tesle su dio mreže brzog punjenja koju je razvila tvrtka Tesla Motors. One pružaju visokokvalitetno i brzo punjenje za Tesla električne automobile, omogućujući vozačima da brzo obnove energiju svojih vozila tijekom dužih putovanja.

Ove punionice koriste visoke snage punjenja, obično između 120 kW i 250 kW, što omogućuje značajno skraćivanje vremena punjenja u usporedbi s konvencionalnim punionicama [16].

Ultra-brze punionice su dio strategije Tesla Motorsa za stvaranje održive i praktične infrastrukture punjenja koja potiče prihvaćanje električnih vozila.

Prve ultra-brze punionice Tesle su instalirane 2012. godine, a od tada je Tesla kontinuirano širila svoju mrežu punionica kako bi pokrila veće geografske regije i omogućila lakše putovanje električnim vozilima.

Kroz različite generacije ultra-brzih punionica, Tesla je unaprjeđivala tehnologiju punjenja, povećavala snage punjenja, poboljšavala korisničko iskustvo i integrirala napredne značajke poput navigacije do punionica putem određenog sustava.

Tesla je također proširila svoju mrežu ultra-brzih punionica izvan Sjeverne Amerike, pokrivajući Europa, Aziju, Australiju i druge dijelove svijeta kako bi podržala globalne vozače Tesla vozila. Tesla je uvijek do sada bila na čelu tehnoloških inovacija u području električnih vozila i infrastrukture punjenja [17].

Ultra-brze punionice su integrirane s naprednim softverom i hardverom kako bi omogućile optimirano punjenje, upravljanje opterećenjem mreže, praćenje stanja punjenja i druge funkcije.

Uvođenje V3 ultra-brzih punionica donijelo je još veće snage punjenja i napredne značajke kao što su dostupnost maksimalne snage punjenja na svakom od punjača, odnosno dva susjedna punjača ne dijele snagu te dinamičko upravljanje punjenjem.

Ukratko, ultra-brze punionice Tesle su ključni element Tesla sustava koji omogućuje vozačima brzo i praktično punjenje svojih električnih vozila, što pridonosi prihvaćanju i širenju električne mobilnosti diljem svijeta.

5.5. Kvaliteta Tesla ultra-brze punionice

Kvaliteta ultra-brzih punionica Tesle je visoko ocijenjena u industriji električnih vozila i infrastrukture punjenja zbog nekoliko ključnih karakteristika.

Ultra-brze punionice pružaju visoke razine snage punjenja, često od 120 kW pa sve do 250 kW (ovisno o modelu i generaciji punionice), što omogućuje brzo obnavljanje energije baterija električnih vozila. Tesla je poznata po visokoj pouzdanosti svojih ultra-brzih punionica. Redovito održavanje i nadogradnje infrastrukture osiguravaju da su punionice operativne i funkcionalne većinu vremena [16].

Tesla je proširila svoju mrežu ultra-brzih punionica na mnoge lokacije diljem svijeta, uključujući autoceste, gradske centre i popularne destinacije za putovanja. To pruža korisnicima Tesla vozila širok izbor lokacija za brzo punjenje tijekom putovanja.

Ultra-brze punionice su integrirane s vozilima Tesla putem softverskog sustava. To omogućuje korisnicima da lako pristupe informacijama o punjenju, planiraju rute s uključenim stanicama za punjenje te upravljaju procesom punjenja putem zaslona u vozilu [17].

Tesla se trudi pružiti korisnicima ugodno iskustvo korištenja ultra-brzih punionica. To uključuje jasne upute za punjenje, jednostavno plaćanje (obično putem Teslinog računa ili aplikacije), kao i podršku putem korisničke službe za eventualne poteškoće ili pitanja.

U cjelini, kvaliteta ultra-brzih punionica Tesle se ogleda u njihovoj visokoj snazi punjenja, pouzdanosti, dostupnosti na različitim lokacijama diljem svijeta te integraciji s tehnološki naprednim Tesla vozilima, što pridonosi ugodnom i praktičnom iskustvu punjenja za vozače električnih vozila.

6. ANALIZA PROVEDENIH MJERENJA NA ULTRA-BRZOJ PUNIONICI

6.1. Tehnički podatci

Mjerenje je izvršeno tijekom dvadeset i sedam dana na jednoj od ultra-brzih punionica u Republici Hrvatskoj, snage pojedinog priključka do 150 kW. Za potrebe mjerenja korišten je uređaj a-eberle PQ-Box 200. Navedeni uređaj predstavlja klasu A (engl. *Power Quality Analyzer Class A*) te je dizajniran tako da je pogodan za mjerenje na mrežama niskog, srednjeg i visokog napona.

Slika 6.1. *Primjer ultra-brze punionice [18].*

PQ-Box 200 je visokoučinkovit, prijenosni mrežni analizator, mjerač snage i snimač prijelaznih pojava, osmišljen s naglaskom na jednostavnost korištenja. Ovaj uređaj, razvijen za mobilno korištenje sa stupnjem zaštite IP65, idealan je za mjerenja u javnim mrežama te u industrijskim okruženjima s mjernim naponom do 690V. Svojom iznimnom funkcionalnošću i prilagodljivošću, PQ-Box 200 predstavlja sveobuhvatno rješenje za precizno praćenje i analizu kvalitete električne

energije, pružajući korisnicima pouzdane podatke potrebne za održavanje i optimizaciju električnih mreža [19].

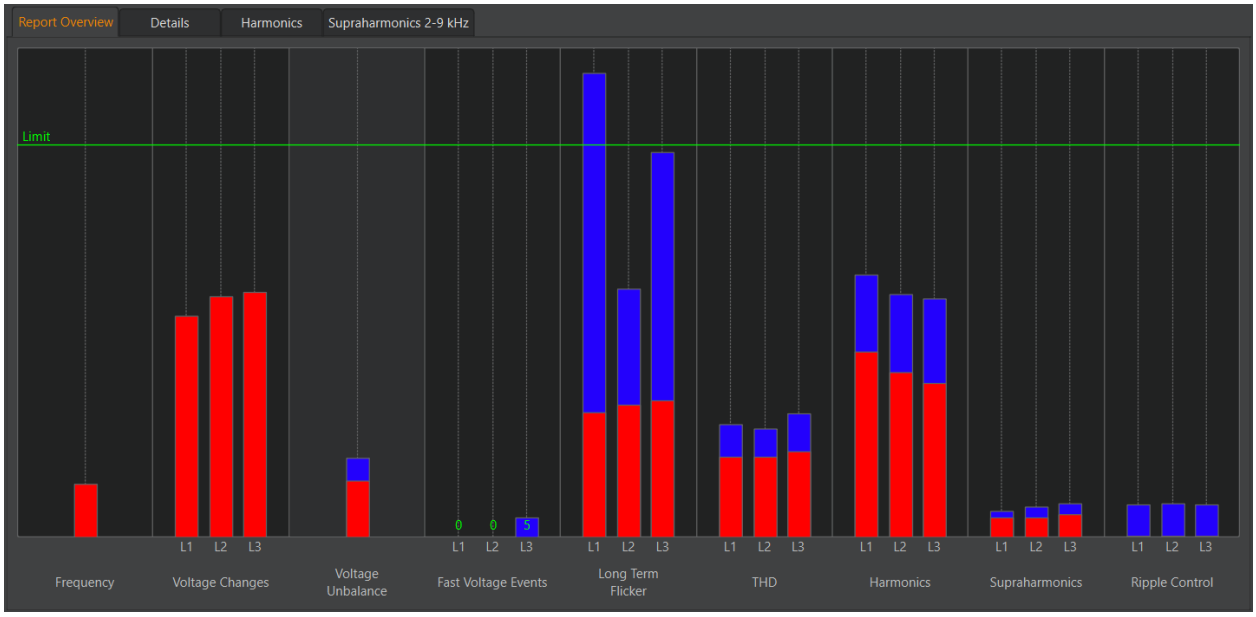
Slika 6.2. *Prikaz a-eberle PQ-Box 200 analizatora [20].*

Nadalje, za analizu mjerenja koristi se softver WinPQ – mobile. Navedeni softver omogućuje pregled snimljenih podataka u grafičkom i tabličnom obliku. Snimljeni podatci koriste se kako bi se iz njih pomoću softvera mogli promatrati pokazatelji kvalitete električne energije te će se prema tome zaključivati o mogućim poteškoćama u promatranoj mreži. Također, program je usklađen prema europskim standardima norme EN50160.

Konačno, kao uvod u ovo poglavlje, bitno je razumjeti se kako porast broja električnih automobila dovodi do sve veće potrebe za boljom infrastrukturom punjenja istih. Kao rezultat toga, dolazi do širenja različitih vrsta punionica, uključujući kućne punionice koje omogućuju vlasnicima vozila da napune svoja vozila u udobnosti vlastitih domova te punionice smještene na javnim područjima kao što su trgovački centri ili benzinske postaje. Kao što je već prethodno spomenuto ovo poglavlje rada nužno je za razumijevanje trenutne situacije nastale zbog naglog porasta električnih automobila kao i punionica za iste, ali i razumijevanje o mogućim te potencijalnim problemima u budućnosti ukoliko dođe do neplaniranog, odnosno nekontroliranog dodatnog porasta pojave ovakvih vozila na prometnicama.

6.2. Grafički i tablični prikaz provedenih mjerenja

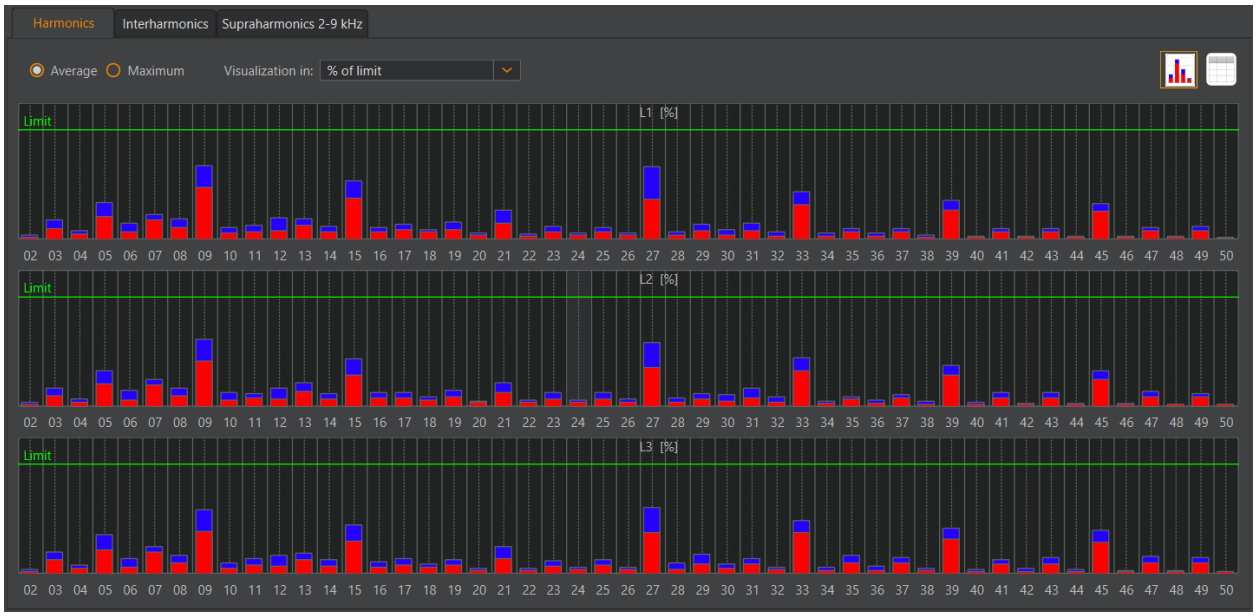
Prema slici 6.3. vidljivo je kako su svi pokazatelji kvalitete električne energije zapravo u granicama propisanim normom EN50160. Također, jedino odstupanje od limita koje je vidljivo prema grafu predstavlja pokazatelj dugotrajnog flikera. Kod navedenog odstupanja vrijednosti prikazane plavom bojom prelaze limit, ali to zapravo ne predstavlja problem iz razloga što se spomenute vrijednosti odnose na previsoke desetominutne vrijednosti kojih ima manje od 5 % trajanja tjedno. Nadalje, vrijednosti prikazane crvenom bojom predstavljaju previsoke vrijednosti čije je ukupno trajanje duže od 5 % tjedna. Konačno, zaključuje se kako bi problem postojao ukoliko bi vrijednosti prikazane crvenom bojom prelazile limit iz razloga što bismo onda imali previsoke vrijednosti koje traju duže od 5 % tjedna. Spomenuti zahtjev definiran je normom EN50160.



Slika 6.3. *Grafički prikaz pokazatelja kvalitete električne energije.*

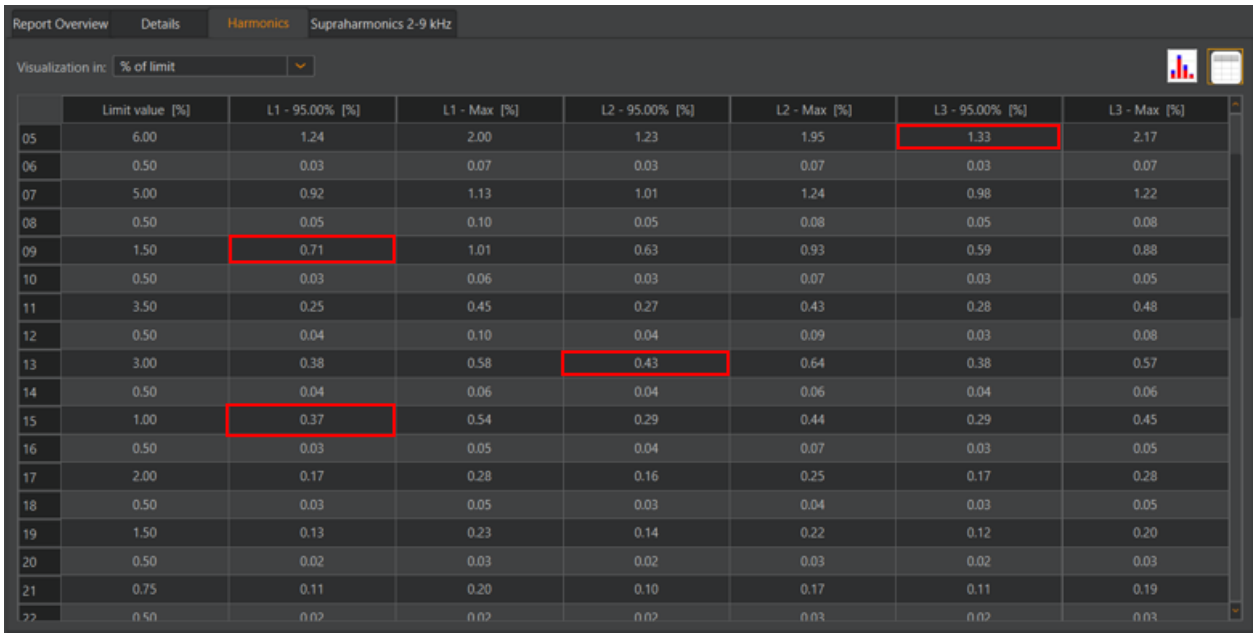
Na slici 6.4. vidljiv je grafički prikaz naponskih harmonika. Svaki od harmonika je različite vrijednosti, prikazani su od drugog do pedesetog te se svaki od njih nalazi ispod granične vrijednosti, odnosno zadovoljava uvjete norme EN50160. Također, vidljivo je kako se neki redovi harmonika ističu, a to su 9., 15., 27., 33., 39., 45. Navedeni redovi harmonika su neparni te su djeljivi s brojem tri, a zapravo su to oni koji su nepogodni, odnosno treći harmonik i redovi višekratnika broja tri zatvaraju se kroz neutralni vodič te samim time isti može biti preopterećen. Bitno je naglasiti kako naponski harmonici mogu biti uzrokovani od strane promatranog ultra-

brzog punjača, ali isto tako to ne mora biti slučaj te mogu biti uzrokovani zbog nekog drugog susjednog trošila koje se napaja s istog transformatora. Konačno, zaključuje se kako za promatrani ultra-brzi punjač treći harmonik ne predstavlja problem te su zapravo kod nižih redova harmonika veće vrijednosti kod petog i sedmog harmonika.



Slika 6.4. *Grafički prikaz naponskih harmonika*.

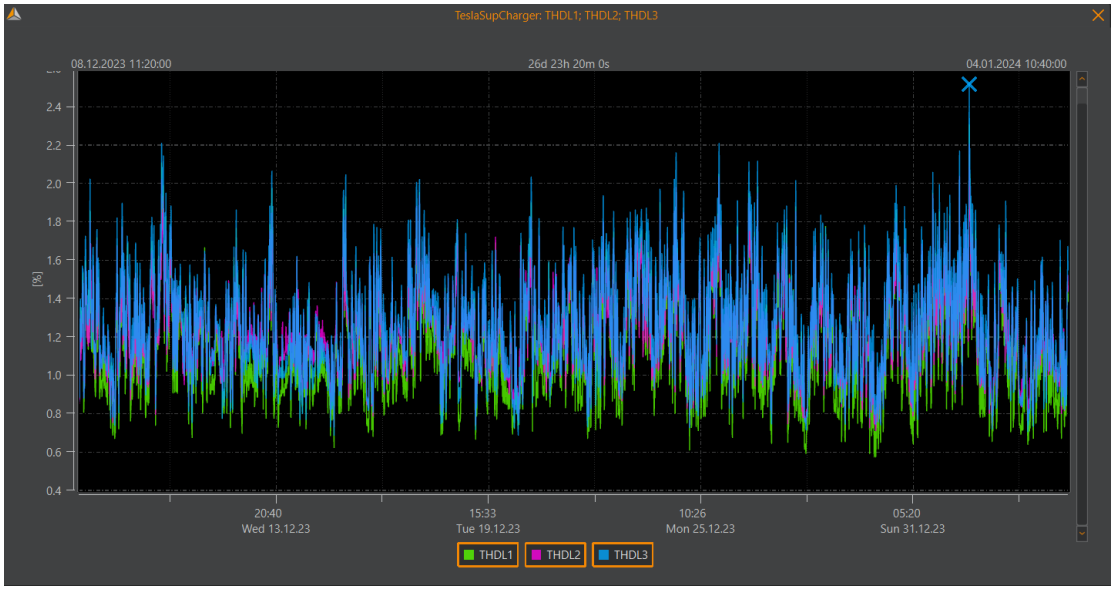
Na slici 6.5. vidljiv je tablični prikaz vrijednosti pojedinih naponskih harmonika izraženih u postotku. Bitno je naglasiti kako je kod naponskih harmonika uvijek praktično uzeti postotnu vrijednost u odnos na nazivni napon, u ovom slučaju iznosa 230 V. Također, svaki od pojedinih harmonika ima dozvoljeno odstupanje od nazivnog napona prema normi EN50160 te kao što je već u prethodnom tekstu navedeno, u promatranom slučaju svi naponski harmonici zadovoljavaju uvjete norme. Konačno, prema tablici na slici 6.5. vidljivo je kako su devedeset i pet postotne vrijednosti za 5., 9., 13. i 15. harmonik najveće, odnosno navedeni harmonici su najdominantniji.



	Limit value [%]	L1 - 95.00% [%]	L1 - Max [%]	L2 - 95.00% [%]	L2 - Max [%]	L3 - 95.00% [%]	L3 - Max [%]
05	6.00	1.24	2.00	1.23	1.95	1.33	2.17
06	0.50	0.03	0.07	0.03	0.07	0.03	0.07
07	5.00	0.92	1.13	1.01	1.24	0.98	1.22
08	0.50	0.05	0.10	0.05	0.08	0.05	0.08
09	1.50	0.71	1.01	0.63	0.93	0.59	0.88
10	0.50	0.03	0.06	0.03	0.07	0.03	0.05
11	3.50	0.25	0.45	0.27	0.43	0.28	0.48
12	0.50	0.04	0.10	0.04	0.09	0.03	0.08
13	3.00	0.38	0.58	0.43	0.64	0.38	0.57
14	0.50	0.04	0.06	0.04	0.06	0.04	0.06
15	1.00	0.37	0.54	0.29	0.44	0.29	0.45
16	0.50	0.03	0.05	0.04	0.07	0.03	0.05
17	2.00	0.17	0.28	0.16	0.25	0.17	0.28
18	0.50	0.03	0.05	0.03	0.04	0.03	0.05
19	1.50	0.13	0.23	0.14	0.22	0.12	0.20
20	0.50	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03
21	0.75	0.11	0.20	0.10	0.17	0.11	0.19
22	0.50	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03

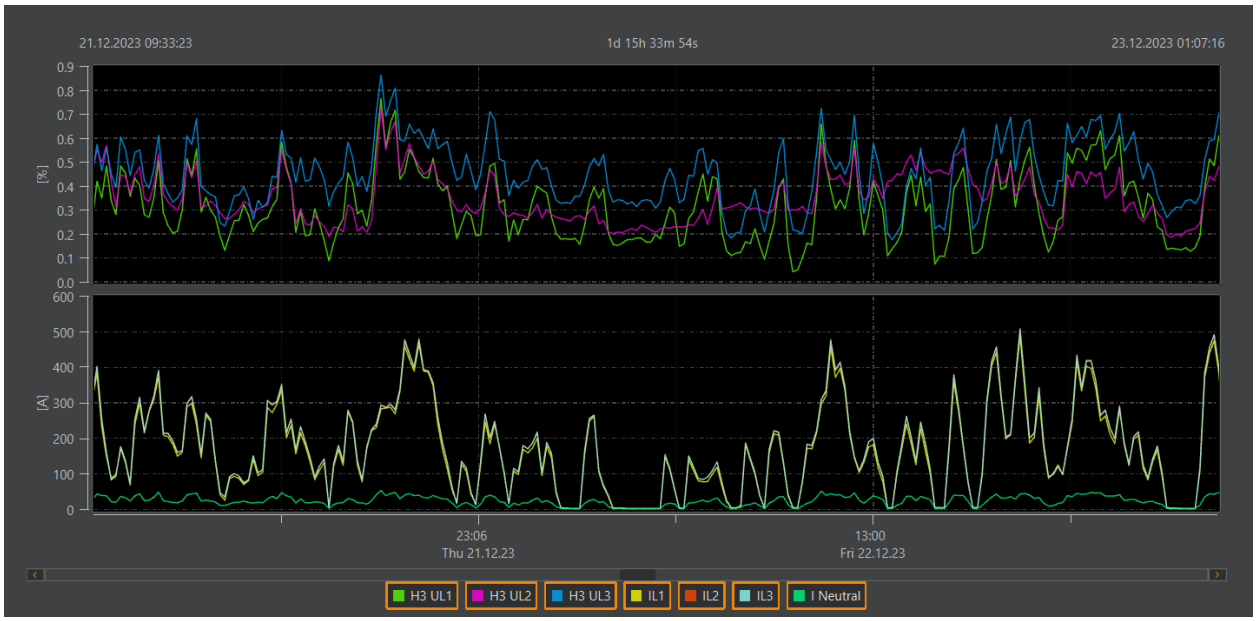
Slika 6.5. *Tablični prikaz maksimalnih vrijednosti pojedinih naponskih harmonika izraženih u postotku.*

Na slici 6.6. vidljiv je grafički prikaz naponskog THD-a te maksimalna dosegnuta vrijednost istog. Prema normi EN50160 uvjetovano je da THD ne smije prelaziti 8 %, a za promatranu ultra-brzu punionicu navedene vrijednosti se većinom kreću u rasponu od 0,8 do 1,8 % U_n. Također, najveća vrijednost izmjerena je u fazi L3, dana 01.01.2024. u 18:00 h te iznosi 2,52 % U_n što uvelike zadovoljava zahtjeve norme.



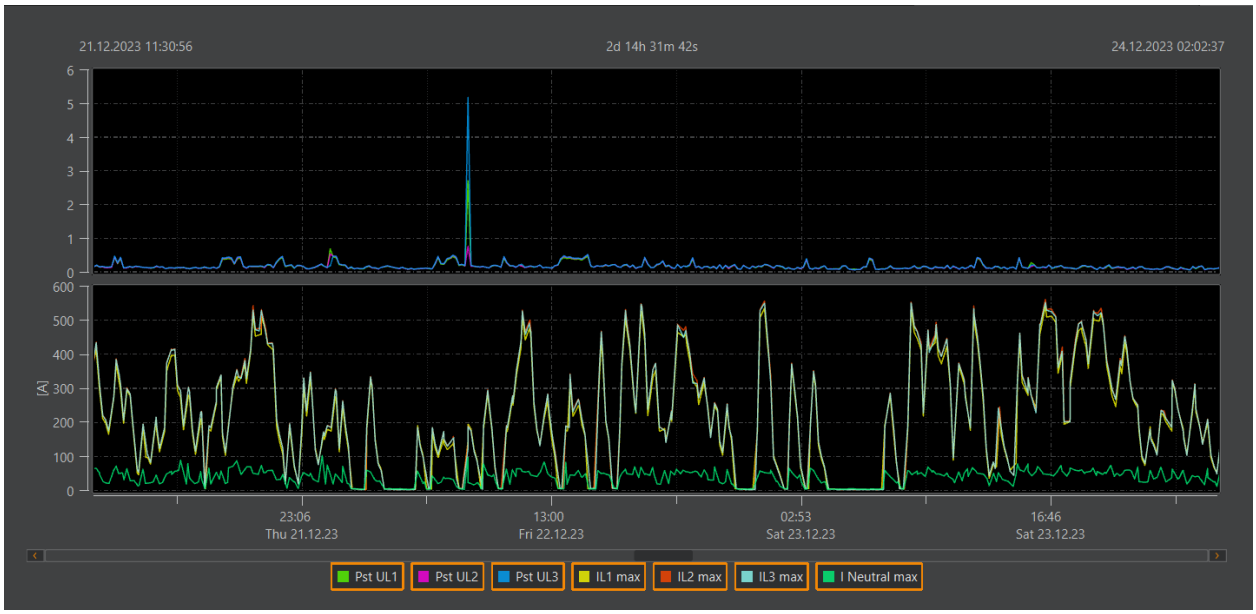
Slika 6.6. *Grafički prikaz naponskog THD-a.*

Na slici 6.7. grafički je prikazan korelacijski odnos efektivnih vrijednosti struja ultra-brzog punjača i trećeg naponskog harmonika. Gornja krivulja predstavlja vrijednosti trećeg harmonika u sve tri faze, dok donja krivulja predstavlja struje punjenja samog automobila, također u sve tri faze. Prema navedenim krivuljama i sličnosti njihovih oblika može se zaključiti da struje punjenja promatranog ultra-brzog punjača izazivaju treći harmonik.



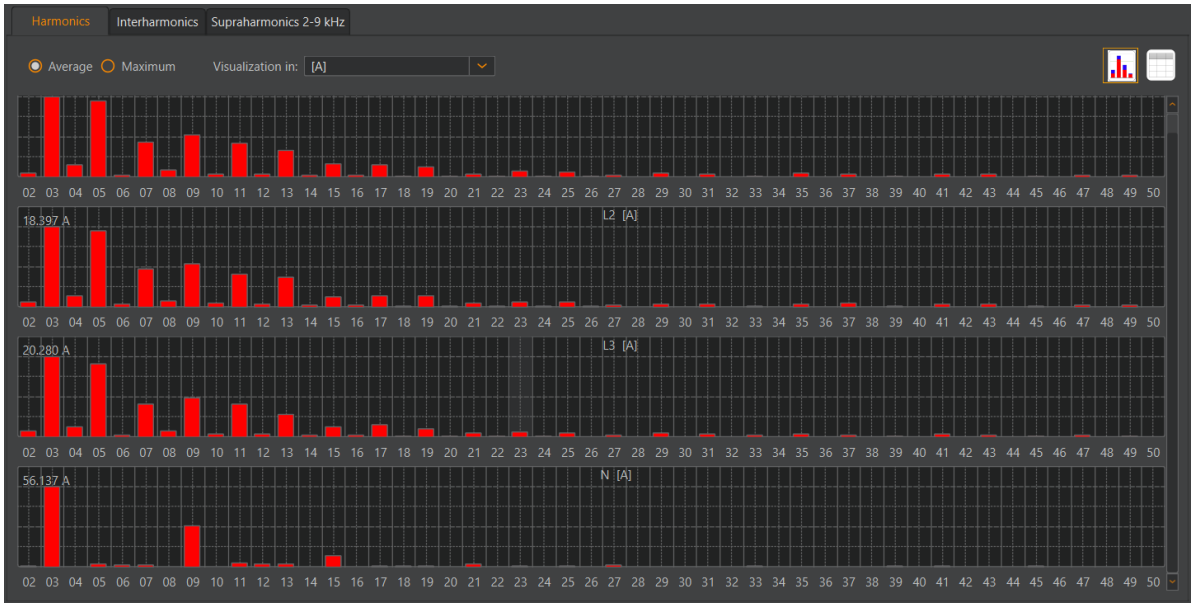
Slika 6.7. *Grafički prikaz korelacijskog odnosa napona trećeg harmonika i efektivnih vrijednosti struja ultra-brzog punjača.*

Na slici 6.8. prikazan je korelacijski odnos kratkotrajnog flikera i maksimalnih struja ultra-brzog punjača. Ova analiza provedena je kako bi se pokazalo izaziva li struja ultra-brzog punjača naponski kratkotrajni fliker. Konačno, prema grafu sa slike 6.8. zaključuje se kako struja promatranog ultra-brzog punjača većinom nije izazvala promatrani poremećaj, odnosno fliker. Razlog tome je vidljiv sa samog grafa, odnosno u trenutcima porasta flikera ne postoje strujni skokovi koji bi potvrdili ovu povezanost.



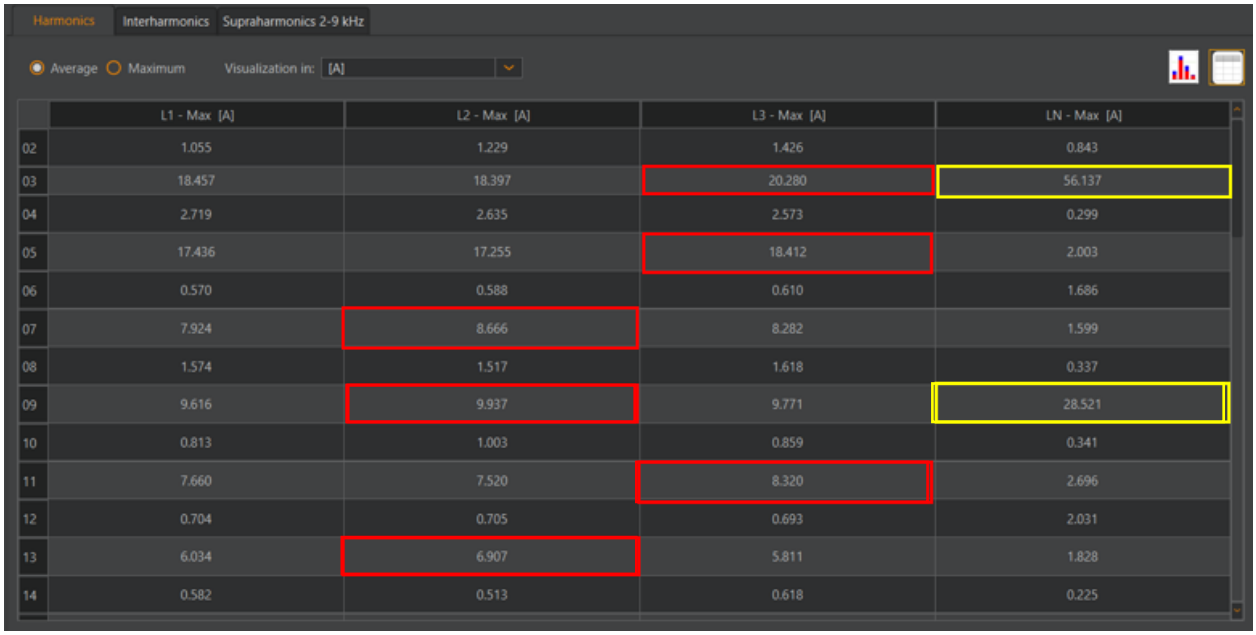
Slika 6.8. *Grafički prikaz korelacijskog odnosa flikera i struje ultra-brzog punjača.*

Slika 6.9. prikazuje strujne harmonike promatranog ultra-brzog punjača. Kao i kod naponskih harmonika, svaki red strujnih harmonika je različite vrijednosti, a prikazani su od drugog do pedesetog reda. Također, vidljivo je kako se pojedini redovi harmonika ističu, a to su 3., 5., 7., 9., 11., i 13. u faznim vodičima, dok se u neutralnom vodiču ističu 3., 9. i 15. red harmonika. Konačno, zaključuje se kako struje promatranog ultra-brzog punjača sadrže više strujne harmonike, koji sigurno u određenoj mjeri utječu na naponske prilike.



Slika 6.9. *Grafički prikaz strujnih harmonika.*

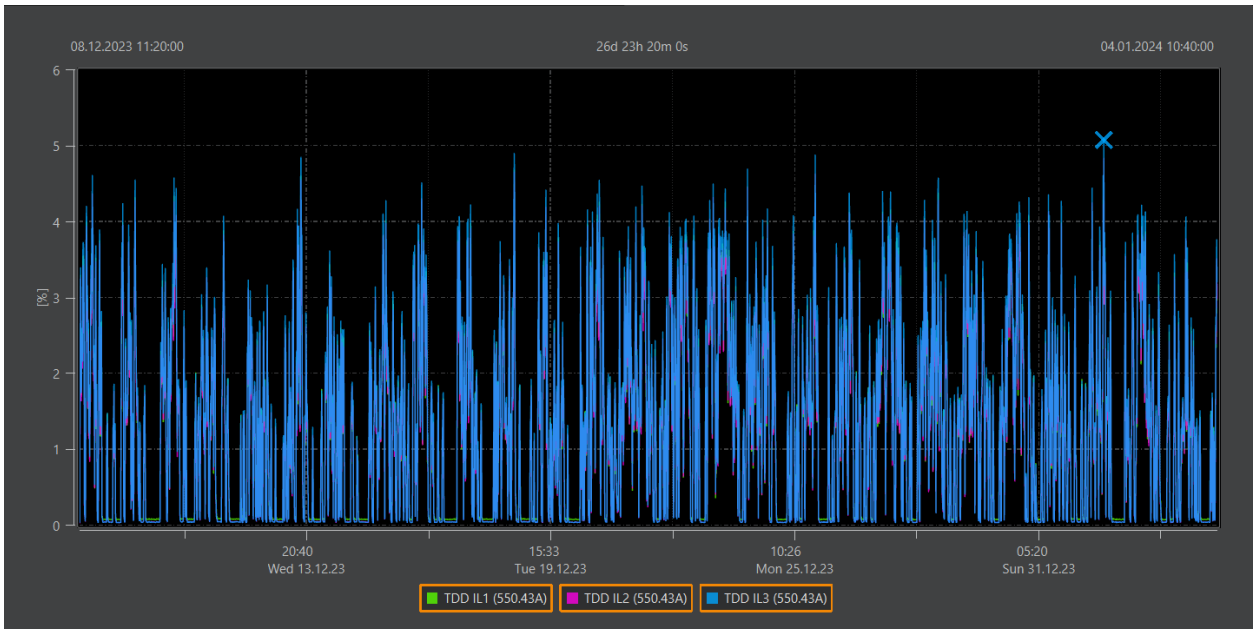
Na slici 6.10. vidljiv je tablični prikaz vrijednosti pojedinih strujnih harmonika izraženih u postotku. Bitno je naglasiti kako kod strujnih harmonika nemamo izražen 5., 7., 11. i 13. harmonik kroz neutralni vodič. Razlog tome je što se treći harmonik i svi neparni harmonici čiji je red djeljiv s brojem tri, zbrajaju u neutralnom vodiču, dok se drugi harmonici poništavaju zbog kutova te se zatvaraju u neutralni vodič. Vidljivo je kako u fazama L1, L2 i L3 prevladavaju 3., 5., 7., 9., 11. i 13. harmonik, dok je u neutralnom vodiču izražen samo 3. i 9. harmonik.



	L1 - Max [A]	L2 - Max [A]	L3 - Max [A]	LN - Max [A]
02	1.055	1.229	1.426	0.843
03	18.457	18.397	20.280	56.137
04	2.719	2.635	2.573	0.299
05	17.436	17.255	18.412	2.003
06	0.570	0.588	0.610	1.686
07	7.924	8.666	8.282	1.599
08	1.574	1.517	1.618	0.337
09	9.616	9.937	9.771	28.521
10	0.813	1.003	0.859	0.341
11	7.660	7.520	8.320	2.696
12	0.704	0.705	0.693	2.031
13	6.034	6.907	5.811	1.828
14	0.582	0.513	0.618	0.225

Slika 6.10. *Tablični prikaz maksimalnih vrijednosti pojedinih strujnih harmonika izraženih u postotku.*

Na slici 6.11. vidljiv je grafički prikaz vrijednosti TDD-a te maksimalna dosegnuta vrijednost TDD-a. Bitno je naglasiti kako u korištenom softveru imamo mogućnost analize i strujnog THD-a, ali on nije pogodan za analizu. Razlog tome je što strujni THD predstavlja zbroj vrijednosti harmonika od drugog do četrdesetog podijeljen s vrijednosti prvog harmonika. Navedeni problem se pojavljuje iz razloga što se vrijednost prvog harmonika učestalo mijenja. Zbog toga za analizu koristimo TDD koji predstavlja zbroj vrijednosti harmonika od drugog do četrdesetog podijeljen s maksimalnom vrijednosti struje koja je snimljena u promatranom razdoblju. Maksimalna vrijednost TDD-a izmjerena je u istom danu kao i maksimalna vrijednost naponskog THD-a, odnosno dana 01.01.2024. u 18:20 h te iznosi 5,07 %.



Slika 6.11. *Grafički prikaz TDD-a.*

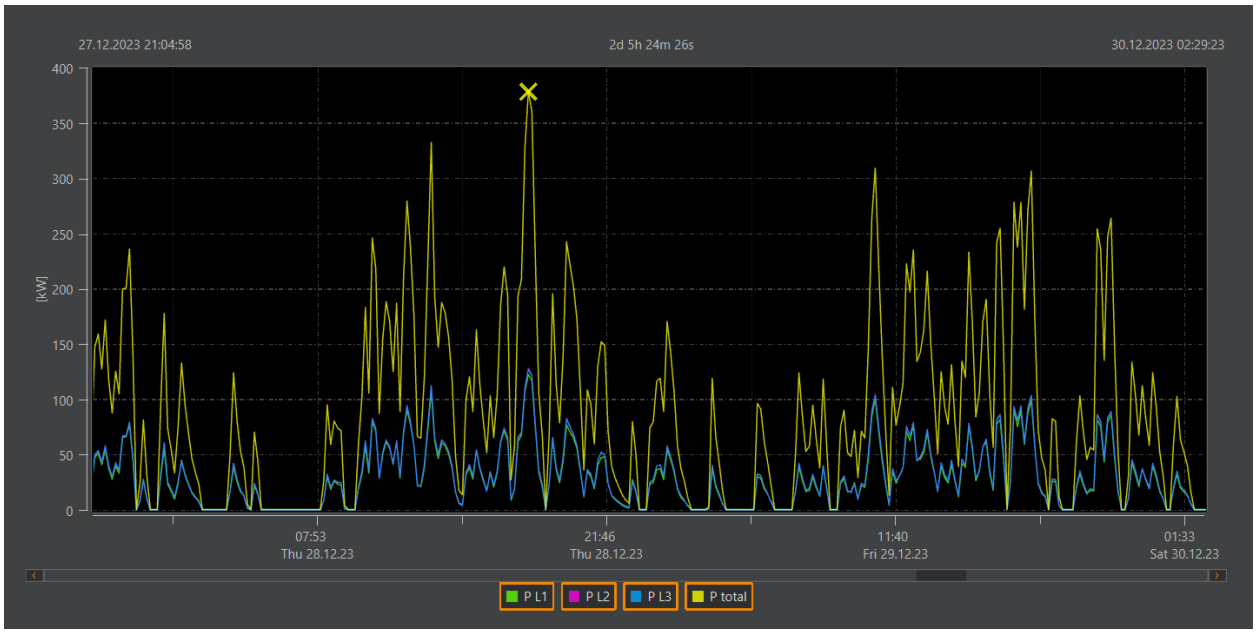
Slika 6.12. prikazuje odnos naponskog THD-a i TDD-a. Gornje krivulje prikazuju vrijednosti TDD-a u sve tri faze, dok donje krivulje predstavljaju vrijednosti naponskog THD-a, također u sve tri faze. Prema navedenom grafu, mogu se prepoznati brojni trenutci u kojima TDD, odnosno struje promatrane punionice utječu na naponski THD. Također, graf predstavlja snimanje podataka tijekom jednog dana, a opsežnija mjerenja TDD-a i naponskog THD-a, prethodno su prikazana slikama 6.6 te 6.11.

Slika 6.12. *Grafički prikaz naponskog THD-a u odnosu na TDD.*

Na slici 6.13. prikazan je korelacijski odnos efektivnih vrijednosti struja ultra-brzog punjača i vrijednost naponskog THD-a. Gornje krivulje predstavljaju struje punjenja na punionici, dok donje krivulje predstavljaju naponski THD, u sve tri faze. Prema navedenim krivuljama i sličnosti oblikom istih, zaključuje se da postoji uzročno-posljedična veza što znači da struje promatranog ultra-brzog punjača direktno utječu na naponski THD, odnosno na naponske harmonike. Navedena uzročno-posljedična veza može uvelike uzrokovati problem iz razloga što struje promatranog ultra-brzog punjača mogu direktno utjecati na napon kojim se napajaju i neka druga susjedna trošila.

Slika 6.13. *Grafički prikaz korelacijskog odnosa efektivnih vrijednosti struja ultra-brzog punjača i naponskog THD-a.*

Na slici 6.14. grafički je prikazana snaga koju promatrani ultra-brzi punjač uzima iz mreže tijekom nekoliko dana te maksimalna vrijednost snage u promatranom razdoblju. Vidljivo je kako snaga podosta varira te da se kreće od nule, kada nema punjenja na punionici pa sve do maksimalne vrijednosti snage od 378,62 kW (28.12.2023. u 18:00 h). Kada se može pretpostaviti da su na punionici bila punjena vozila na svih šest punjača.



Slika 6.14. *Grafički prikaz snage koju punjač uzima iz mreže.*

7. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu istražen je utjecaj ultra brzih punionica na kvalitetu električne energije u distribucijskoj mreži, s posebnim fokusom na harmonijsko izobličenje i više harmonike. Rezultati istraživanja, provedenih analizom mjernih podataka s jedne od ultra brzih punionica u Republici Hrvatskoj, pokazuju kako su svi pokazatelji kvalitete električne energije u skladu s dozvoljenim granicama propisanim normom EN50160. Ova saznanja potvrđuju da trenutni sustav može adekvatno podržati kvalitetu električne energije pri korištenju ultra brzih punionica, ali problem bi se mogao pojaviti ukoliko se u mreži pojavi znatno veći broj ovakvih punionica.

Mnoge države i gradovi nude poticaje za kupnju električnih vozila, subvencije za instalaciju punionica, porezne olakšice i druge mjere koje potiču prelazak na električnu mobilnost. Kako bi rastao broj električnih automobila, analogno tome povećavao bi se i broj instaliranih punionica za iste te se zaključuje kako u budućnosti može doći do problema u trenutno postojećoj infrastrukturi distribucijske mreže.

Detaljna analiza TDD-a (engl. *Total demand distortion*) i naponskog THD-a (engl. *Total harmonic distortion*) ukazuje na značajnu korelaciju između trećeg harmonika i efektivne vrijednosti struje ultra brzog punjača. Ova korelacija potvrđuje da struje ultra brzog punjača izravno izazivaju promatrane više harmonike. Uz to, pokazano je da postoji uzročno-posljedična veza, što implicira da struje punjača imaju direktan utjecaj na naponski THD i naponske harmonike. Ova veza može uzrokovati probleme s obzirom na to da struje punjača mogu utjecati na napon drugih susjednih potrošača.

Prema provedenom istraživanju i na osnovi dobivenih rezultata, zaključuje se kako postoji potreba za proaktivnim pristupom elektrodistribucijskih tvrtki u pogledu nadogradnje i usavršavanja postojećeg sustava kako bi se osigurala stabilnost opskrbe električnom energijom s povećanjem broja električnih vozila. Također, daljnje unaprjeđenje infrastrukture punionica, uključujući povećanje njihovog broja, bit će ključno za poticanje prelaska na električna vozila i osiguranje kvalitetne električne energije za sve korisnike.

Konačno, zaključuje se o potrebi razumijevanja utjecaja ultra brzih punionica na kvalitetu električne energije kao i o potrebi o daljnjim istraživanjima i razvoju strategija za upravljanje energijom u kontekstu rasta električnih vozila.

LITERATURA

[1] Erjavec, J. Hybrid, Electric and Fuel – Cell Vehicles. 2nd ed. Delmar Cengage Learning, 2013.

[2] ENERGY STORY, dostupno na: https://energystory.org/history-electric-cars/ [07.04.2024.]

[3] Husain, I. Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals. 1st ed. CRC Press, 2003.

[4] Chan, C.C.; Chau, K.T. Modern Electric Vehicle Technology. 1st ed. Oxford University Press, 2001.

[5] Ehsani, M.; Gao, Y.; Emadi, A. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. 1st ed. CRC Press, 2005.

[6] Larminie, J.; Lowry, J. Electric vehicle technology explained. 2nd ed. Wiley, 2012.

[7] Aifantis, K.E.; Hackney, S.A.; Kumar, R.V. High Energy Density Lithium Batteries. 1st ed. Wiley – VCH, 2010.

[8] "Global EV Outlook 2024"", International Energy Agency, dostupno na: https://www.iea.org/ [05.09.2024.]

[9] Rubenstein, J. M. Making and Selling Cars: Innovation and Change in the U.S. Automotive industry. 1st ed. The Johns Hopkins University Press, 2001.

[10] Alanazi, F. Electric Vehicles: Benefits, Challenges, and Potential Solutions for Widespread Adaptation, Applied Sciences 13(10), 2023., str.6.-16.

[11] Metikoš – Huković, M. Elektrokemija. Interni udžbenik. Zagreb: Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2000.

[12] e-MOPOLI Interreg Europe, dostupno na: https://www.interregeurope.eu/e-mopoli/news/news-article/8961/news-rombat-will-produce-batteries-for-e-cars/ [27.04.2024.]

[13] De La Rosa, F. HARMONICS AND POWER SYSTEMS, Distribution Control Systems, Inc., Hazelwood, Missouri, U.S.A., 2006., str.1.-36.

[14] "Pohrana i električna vozila u EES-u", bilješke s predavanja, izv. prof. dr. sc. Danijel Topić, 2023.

[15] Pevec, D.; Babic, J.; Carvalho, A.; Ghiassi-Farrokhfal, Y.; Ketter, W.; Podobnik, V. A survey-based assessment of how existing and potential electric vehicle owners perceive range anxiety. J. Clean Prod. 2020, 276, str. 122.-179.

[16] Cui, Y.; Liu, J.; Cong, B.; Han, X.; Yin, S. Characterization and assessment of fire evolution process of electric vehicles placed in parallel. Process Saf. Environ. Prot. 2022, 166, str. 524.–534.

[17] Chang, C.; Zhou, X.P.; Jiang, J.; Gao, Y.; Jiang, Y.; Wu, T. Micro-fault diagnosis of electric vehicle batteries based on the evolution of battery consistency relative position. J. Energy Storage 2022, 52, str. 104.-146.

[18] Grasen Power Technologies, dostupno na: https://www.grasen.com/ [18.06.2024.]

[19] A. Eberle GmbH & Co. KG, Technical data - Network Analyzer/Transient Recorder - Model PQ-Box 200, Nuernberg, 2019., str. 1.

[20] A. Eberle GmbH & Co. KG, PQ-Box 200 - Technical Specification -Mobile Power-Quality Analyser for Low, Medium and High Voltage networks, Nuernberg, str. 1.

SAŽETAK

Diplomski rad istražuje utjecaj električnih automobila i ultra-brzih punionica na kvalitetu električne energije s naglaskom na harmonijsko izobličenje, odnosno više harmonike. Uvod ističe prednosti električnih vozila, uključujući smanjenje emisija i energetsku učinkovitost te izazove vezane uz proizvodnju električne energije za punjenje vozila.

Teorijski dio rada pokriva harmonijsko izobličenje i pokazatelje kvalitete električne energije s posebnim naglaskom na izvore viših harmonika. Također, analizira se utjecaj ultra-brzih punionica. Praktični dio uključuje analizu mjerenja provedenog na jednoj od ultra-brzih punionica u Republici Hrvatskoj, koristeći a-eberle PQ-Box 200 i softver WinPQ – mobile.

S obzirom na pretpostavku daljnjeg povećanja broja električnih automobila, a time i veće potrebe za javnim punionicama, potrebno je redovito pratiti razinu kvalitete električne energije u distribucijskoj mreži i po potrebi strateški ulagati.

Ključne riječi: električni automobil, kvaliteta električne energije, harmonijsko izobličenje, viši harmonici, ultra-brze punionice

The Impact of Electric Vehicle Charging Stations on the Power Quality

ABSTRACT

This thesis examines the impact of electric vehicles and ultra-fast chargers on power quality , with emphasis on harmonic distortion, i.e. higher harmonics. The introduction highlights the advantages of electric vehicles, including emission reduction and energy efficiency, along with challenges associated with power generation for EV charging.

Theoretical section of thesis addresses harmonic distortion and power quality indicators, focusing specifically on the sources of higher harmonics. Additionally, impact of ultra-fast chargers is analysed. The practical section includes an analysis of measured data conducted on one of the ultra-fast charging stations in the Republic of Croatia, using a-eberle PQ-Box 200 and WinPQ – mobile softwer.

Considering the assumption of a further increase in the number of electric vehicles, and thus a greater need for public charging stations, it is necessary to regularly monitor the power quality in the distribution network and strategically invest when needed.

Keywords: electric vehicle, power quality, harmonic distortion, higher harmonics, ultra-fast chargers