Utjecaj punjača električnih vozila na kvalitetu električne energije

Đuzel, Zlatko

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:200:692494

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 OSIJEK

Sveučilišni studij

Utjecaj punjača električnih vozila na kvalitetu električne energije

Diplomski rad

Zlatko Đuzel

Osijek, 2024 godina.

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. PREGLED PODRUČJA TEME 2

3. ELEKTRIČNA VOZILA I PUNJAČI 3

3.1. Električna vozila 6

3.2. Baterija 6

3.3. Punjači 7

4. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE 11

4.1. Promjena frekvencije 11

4.2. Pouzdanost distribucije 12

4.3. Upravljanje naponom u distribucijskom sustavu 13

4.4. Naponski propadi i kratki prekidi opskrbe 14

4.5. Kolebanje napona i treperenje (flickeri) 16

4.6. Nesimetrija struje i napona 17

4.7. Strujni i naponski harmonici 19

4.8. Prenaponi 22

5. MJERENJE I ANALIZA PODATAKA KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE 25

5.1. Analiza mjerenih podataka u softveru *WinPQ Mobile* 25

5.2. Simulacija u softveru *DigSilent Powerfactory* 36

6. ZAKLJUČAK 45

LITERATURA 47

SAŽETAK 49

ABSTRACT 50

ŽIVOTOPIS 51

1. UVOD

Sve je veći i brži razvoj električnih vozila, što predstavlja značajan pomak u automobilskoj industriji, a najveći razlog takvog brzog napretka je globalna težnje ka smanjenju emisije stakleničkih plinova i potrošnje fosilnih goriva. Uz povećanje broja električnih vozila, javlja se i potreba za infrastrukturom koja podržava njihovo punjenje, čime se otvaraju nova pitanja vezana uz utjecaj te infrastrukture na kvalitetu električne energije. Ovaj rad istražuje utjecaj punjača električnih vozila na kvalitetu električne energije, s naglaskom na izazove koje punjenje električnih vozila predstavlja za postojeći elektroenergetski sustav. Rad se sastoji od nekoliko ključnih dijelova koji su podijeljeni u poglavlja. U poglavlju pregleda područja teme daje se pregled problematike kvalitete električne energije i pregled dosadašnjih istraživanja na ovu temu temeljeno na literaturi korištenoj u radu. Sljedeće poglavlje obrađuje povijest električnih vozila te baterija od njihovog nastanka do danas, osnovne karakteristike električnih vozila i njihovih baterija te su navedene i vrste punjača koji se koriste za njihovo punjenje. U trećem dijelu analiziraju se različiti pokazatelji kvalitete električne energije, a tu pripadaju promjena frekvencije, pouzdanost distribucije, naponski propadi, kolebanje napona i treperenje, nesimetrija struje i napona, naponski i strujni harmonici te prenaponi. Posljednji dio rada posvećen je mjerenju i analizi kvalitete električne energije pri punjenju električnih vozila, korištenjem softvera za simulaciju i analizu. Cilj ovog istraživanja je identificirati i analizirati izazove koji se javljaju pri masovnoj implementaciji punjača za električna vozila te predložiti moguća rješenja za minimiziranje negativnih utjecaja na kvalitetu električne energije. Rezultati ovog rada mogu poslužiti kao smjernica za daljnji razvoj infrastrukture za električna vozila i poboljšanje regulacije kvalitete električne energije u budućnosti.

2. PREGLED PODRUČJA TEME

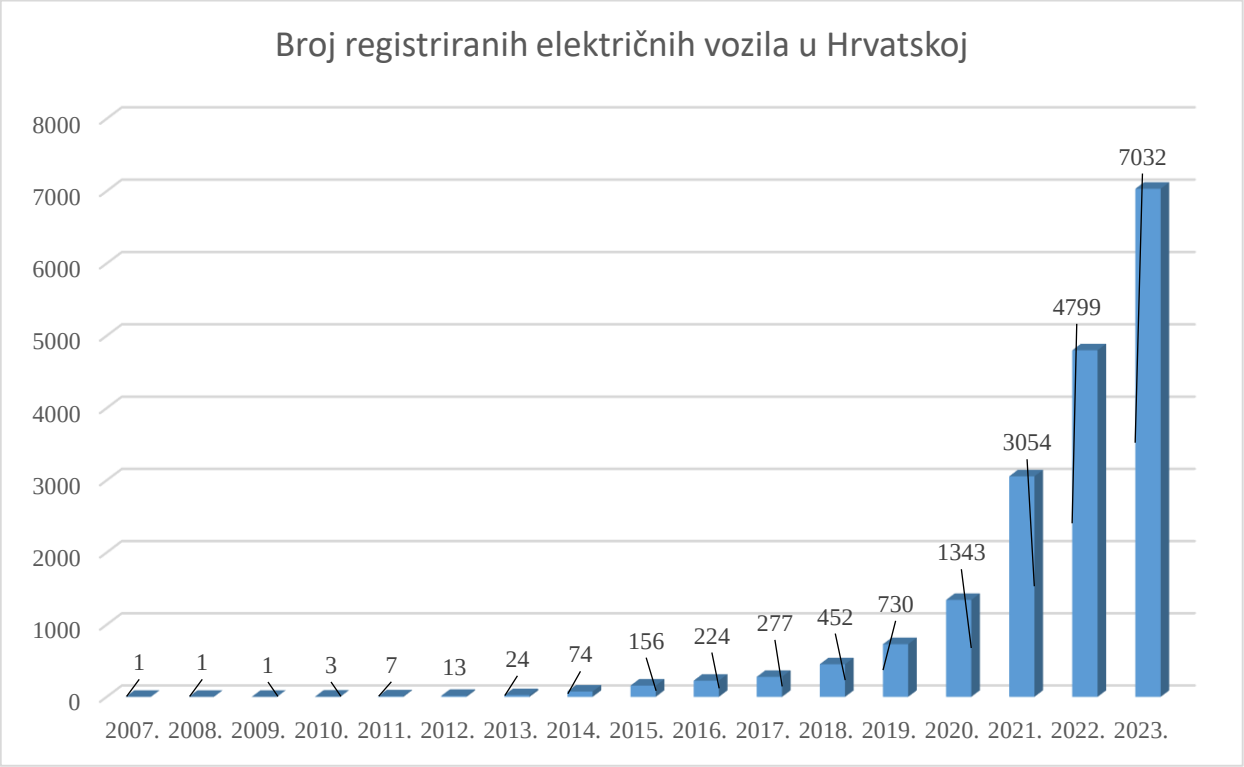
U ovom radu razmatrat će se utjecaj punjača električnih vozila na kvalitetu električne energije. U literaturi [1] pružen je pregled problema kvalitete električne energije i rješenja, obuhvaćajući teme poput padova napona, kolebanje napona, harmonika, odstupanje frekvencije, šumova, prekida i metoda za praćenje i dijagnostiku. O sličnim temama se govori i u literaturi [2], gdje autorova knjiga služi kao vodič inženjerima za dublje razumijevanje teorije i koncepta kvalitete električne energije, dok su se autori u literaturi [1] više fokusirali na praktične aspekte problema kvalitete električne energije i pružanje konkretnijih smjernica za rješavanje tih problema u elektroenergetskim sustavima. Literatura [11] odnosi se općenito na električna vozila, vrste baterija i načini punjenja istih. U literaturi [14] su autori opisali povijest električnih i hibridnih vozila, njihove dijelove i princip rada. Prikaz vrsta punjača za električna vozila nalaze se u literaturi [12]. Autori u literaturi [13] donose informacije o napretku baterija te predviđaju napredak u razvoju baterija za električna vozila, kako njihovog kapaciteta, tako i brzinu njihovog punjenja. Literatura [3] opisuje načine na koje je moguće zamijeniti vozila na fosilna goriva za električna vozila, pri tome naravno uz minimalan ili gotovo nikakav utjecaj na elektroenergetski sustav. Povijest električnih vozila te njihov razvoj prikazan je u literaturi [4]. Autori u literaturi [5] su opisali detaljnije utjecaj punjenja električnih vozila na niskonaponsku mrežu u stambenim područjima. U literaturi [6] autori su istražili utjecaj električnih vozila na mrežu, sa i bez upravljanje mrežom, identificiraju nedostatke u postojećim radovima te daju preporuku budućim istraživačima. Tema punjenja električnih vozila se obrađuje u [7], gdje autori govore o punjačima električnih vozila u kućanstvima i njihovom utjecaju na opterećenje sustava. U [8] se metodom vjerojatnosti istražuju utjecaj punjača električnih vozila na niskonaponsku distribucijsku mrežu, dok su u [9] prikazane prednosti i načini prilagodbe električnih vozila u sustav. U [10] opisano je nekontrolirano i neizravno kontrolirano punjenje električnih vozila na niskonaponskoj mreži.

3. ELEKTRIČNA VOZILA I PUNJAČI

Početkom 20. stoljeća razvija se automobilska industrija jer potreba za prijevoznim sredstvima raste drastično. Od motoriziranih vozila kupcima su ponuđena ona koja su pokretana parom, motorom s unutarnjim izgaranjem te električna vozila [4]. Svaki tip vozila je imao svoje nedostatke i prednosti. Tema ovoga diplomskog rada su električna vozila te je u ovom poglavlju dan opis električnih vozila.. U samim počecima su električna vozila bila zastupljena kao novi tip prijevoznog sredstva. Tome svjedoči i podatak iz 1904. godine, kada su u New Yorku, Chicagu i Bostonu trećina vozila bila električna [4]. No kako su godine prolazile, kako je cestovna infrastruktura napredovala, potreba za vozilima koja imaju veću brzinu i mogu preći veće udaljenosti biva sve veća te je upotreba električnih vozila bila postupno sve manja, a zamijenjena su vozilima s motorom s unutarnjim izgaranjem. Električna vozila neće biti tema gotovo do kraja 20. stoljeća. Početkom 21. stoljeća na snagu stupaju razni zakoni, vezani za smanjenje ugljičnog dioksida u zraku. U literaturi [4], dan je podatak da je ugljični dioksid 2007. godine prepoznat kao jedan od glavnih uzroka klimatskih promjena. Na Slici 3.1. mogu se vidjeti različiti električni automobili kroz povijest.

Slika 3.1. Električni automobili kroz povijest [15]

U cilju snižavanja koncentracije ugljičnog dioksida u atmosferi, električna vozila ponovo su postala tema razgovora, a glavno pitanje i problem električnih vozila postaju kapacitet baterije te brzina punjenja. Ubrzo se i na to pitanje odgovara razvojem litij-ionskih, litij-polimernih i NiMh baterija, koje imaju veći kapacitet i manju težinu. Također jedan od bitnijih faktora za ubrzani razvoj električnih vozila je mogući nedostatak fosilnih goriva u budućnosti. Idući problem koji i dalje predstavlja kupcima prepreku pri odabiru električnih vozila je njihovo punjenje: neodgovarajuća infrastruktura za punjenje, uvođenje posebnih punjača u stambene prostore, brzina punjenja te općenito utjecaj punjenja električnih vozila na kvalitetu električne energije. Tijekom idućih godina, daljnjim razvojem električnih vozila, baterija i punjača te stanica za punjenje, električna vozila postaju sve popularnija. Na slici 3.2. prikazan je godišnji broj registriranih električnih automobila u Republici Hrvatskoj od 2007. do 2023. godine. Na slici se može vidjeti gotovo eksponencijalan rast registriranih električnih automobila, ali je važno napomenuti da je postotak registriranih električnih automobila u odnosu na ukupan broj registriranih automobila u 2023. godini vrlo nizak – samo 0,275 %.



Slika 3.2. Grafički prikaz registracije električnih automobila u Hrvatskoj, izradio autor po uzoru na [16]

No, kao što je prethodno navedeno, vrlo je bitan i razvoj punionica i punjača, njihova sve češća izgradnja na javnim mjestima i ugradnja u kućanstvima. U Europi, točnije Europskoj Uniji, jedan

od boljih prikaza brzog porasta broja električnih punionica je Norveška. Tablica 3.1 prikazuje trend porasta norveških javnih punionica kroz godine, ovisno o tipu ulaza za punjenje.

Tablica 3.1. Prikaz porasta broja javnih punionica u Norveškoj ovisno o tipu, izradio autor po uzoru na [3]

	2011.	**2012.**	**2013.**	**2014.**	**2015.**	**2016.**	**2017.**	**2018.**
Normal	3105	3688	4511	5471	6253	6413	7141	7910
CHAdemo 50 kW+	18	58	83	140	284	516	843	1103
CCS 50 kW+			4	76	224	477	796	1087
Type 2 43 kW				40	104	65	48	49
Tesla supercharger			44	132	190	228	338	562

Zahvaljujući novim vrstama baterija, kupcima su pažnju privukla električna vozila, ali najviše hibridna vozila. Njihov razvoj kroz godine je omogućio da baterije imaju sve manju dimenziju, težinu, ali i veći kapacitet. Pojava pojma vozilo-mreža (eng. *vehicle-to-grid;* V2G), odnosno mogućnost spremanja električne energije u bateriju vozila te predaja električne energije u mrežu također privlači kupce kupnji električnog vozila jer na taj način mogu smanjiti troškove električne energije.

No kod takvog brzog razvoja električnih vozila i sve veća potražnja za njima donosi nove probleme, a to je utjecaj punjenja električnih vozila na kvalitetu električne energije. U literaturi [5] gdje je promatran utjecaj punjenja električnih vozila na elektroenergetski sustav Malte, u teoriji je prikazan porast najveće prosječne potražnje u kućanstvu sa 0,5 kW na 1,55 kW kada bi svako kućanstvo posjedovalo električno vozilo te time dokazan značajan utjecaj električnih vozila na električnu mrežu. Glavni nedostatak kod većine istraživanja utjecaja punjenja električnih vozila na sustav je upravo taj što nema konkretnih podataka o potrošnji, nego su uglavnom istraživanja temeljena na podatcima simulacija [7]. Čak i ona istraživanja koja su temeljena na realnim podatcima o potrošnji električne energije za potrebe punjenja električnih vozila su većinom rađena na podatcima tek nekoliko desetaka domaćinstava.

3.1. Električna vozila

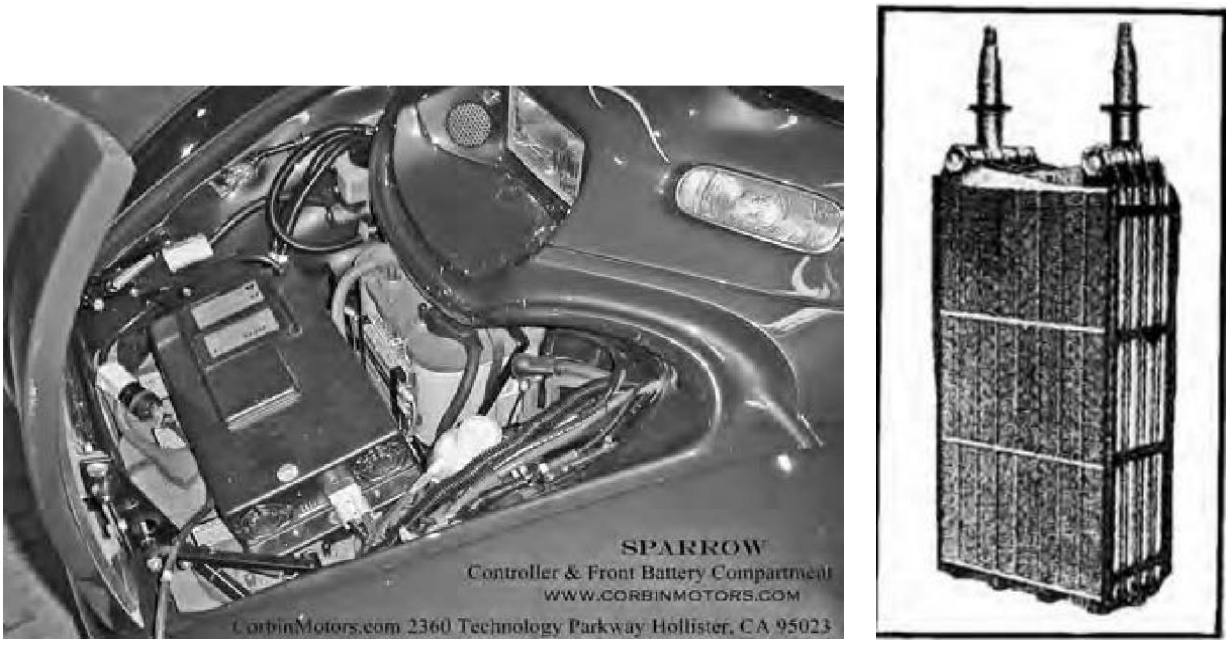
Električna vozila dijelimo na hibridna vozila i isključivo električna vozila. Glavna razlika između njih je što električna vozila imaju samo elektromotor i njega pokreće električna energija, a hibridna vozila pokreće i električna energija i izgaranje fosilnog goriva unutar motora. Električna vozila pokreće elektromotor, za razliku od tradicionalnih vozila koja koriste motor s unutarnjim izgaranjem. Upravo je električni motor, uz bateriju, glavna komponenta svakog električnog vozila. Električni motor je električni stroj, a kao takav služi za pretvaranje električne energije u mehaničku energiju principom elektromagnetske indukcije. Konstrukcija motora obično uključuje dva namota, stator i rotor, od kojih jedan služi kao uzbudni namot, a drugi kao radni ili armaturni. U nekim konstrukcijama, uzbudni namot se zamjenjuje permanentnim magnetima. [14].

Glavna razlika kod električnih motora je izvor napajanja. Oni koji koriste izmjeničnu struju su izmjenični (AC) motori, koji koriste istosmjernu su DC motori, a postoje i koračni elektromotori [14]. Drugi dijelovi vozila koja pokreće elektromotor su: analogno-digitalni pretvarač signala papučice gasa, koji prenosi informaciju o željenoj brzini od vozača, prekidač ili osigurač, sklopnik, te istosmjerni pretvarač napona za napajanje uobičajenih potrošača u vozilu na naponskoj razini od 12 V, a to su svjetla, brisači, pokazivači smjera, radio uređaj, zvučni signal i slično, mjerni instrumenti koji služe za upravljanje vozila, poput napona, struje, snage, pokazivača preostalog kapaciteta baterije i brzine vozila, te punjač baterija. Dodatni elementi koje električno vozilo mora sadržavati uključuju kabele pogonskog napona, kabele pomoćnog napona od 12 V, baterije za pomoćni napon od 12 V, kabelske stopice i priključke. [14].

3.2. Baterija

O bateriji je potrebno napraviti posebno poglavlje, jer je ona jednako važna komponenta kao i elektromotor. Ujedno kako je i baterija u današnjici glavna briga svakog kupca električnog vozila, bitno ju je zasebno dobro pojasniti. Prema literaturi: „Baterija je komponenta koja određuje ukupne karakteristike električnog vozila, definira njegovu cijenu, autonomiju (doseg) i njegovu raspoloživost.“ [14]. Za uspjeh električnog vozila bitni su sljedeći parametri baterije: omjer snage i energije, težina baterije, mogućnosti punjenja te reakcija baterije na hladno i toplo [4]. Spor razvoj baterije električnih vozila doveo je do slabe upotrebe električnih vozila kroz povijest. Iako su u ranim začetcima, 1900-ih, postojale baterije i razni napreci u razvoju tih baterija, inženjerima je glavni problem stvarala promjena vanjske temperature koja ima značajan utjecaj na rad i kapacitet baterije. Bilo je rješenja da se temperatura baterije kontrolira grijačima koji se napajaju iz baterije ili da se baterija smjesti u izoliranu kutiju, ali oba rješenja nisu bila prihvaćena od strane

tržišta. Značajnije promjene za baterije električnih vozila se događaju na samom kraju 20. i početku 21. stoljeća. Tu se prvi puta koriste nove vrste baterija: NiMh, litij-ionske i litij-polimerne [4]. Izgled moderne baterije i stare baterije za električna vozila prikazani su na Slici 3.3.



Slika 3.3. Modernija baterija (lijevo) i jedna od prvih baterija (desno) za električni automobil [4]

Energijski učinak baterije se izražava kao omjer izlazne energije koju daje baterija i njezine težine. Ako se radi omjer preko težine, odnosno Wh/kg, onda se govori o specifičnoj energiji, ali se isto tako može izraziti preko omjera izlazne energije i volumena baterije, a tada se govori o gustoći električne energije čija je mjerna jedinica Wh/L [17]. O brzini razvoja baterije u posljednjim godinama govori upravo podatak da je od 2020. do 2023. godine specifična energija baterije rasla sa 110 Wh/kg na 275 Wh/kg, a predviđa se da će ovim tempom specifična energija 2030. godine biti 450 Wh/kg [13]. Također, gustoća električne energije je kroz 10 godina porasla sa 300 Wh/L na 560 Wh/L, a nastavi li se taj trend, do 2030. gustoća električne energije bi mogla iznosit 1100 Wh/L [13]. Cijena baterije također pada, gdje je u početku cijena za kWh iznosila 1200 €/kWh, a sada 120 €/kWh i uskoro bi mogla cijena baterije pasti na oko 50 €/kWh [13].

3.3. Punjači

U ovom potpoglavlju opisani su punjači kućanstva. Električna vozila se mogu puniti sa istosmjernog (DC) ili izmjeničnog (AC) izvora napajanja. Stanice za punjenje su javne te stoga češće imaju istosmjerni izvor napajanja jer je on brži, dok punjač za vlastite potrebe vlasnika

električnog vozila koristi izmjenični izvor napajanja jer je jednostavan za ugradnju i primjenu u kućanstvima gdje nije previše bitna brzina punjenja. Trenutno su zastupljeniji AC punjači. Jedan od takvih punjača je EVC 04, kojeg se može pronaći u literaturi [12], prikazanog na Slici 3.4. Detaljnije se o podatcima punjača može pronaći u literaturi [12].

Slika 3.4. EVC 04, AC punjač tvrtke Vestel [12]

Da bi električna vozila mogla puniti bateriju putem izmjeničnog punjača, unutar automobila imaju sustav sastavljen od potrebnih elemenata za pretvaranje izmjenične struje u istosmjernu. Naziv takvog punjača je ugrađeni punjač (eng. *on-board charger*; OBC). Strukturu OBC-a čine sljedeći elementi: ispravljač, DC-DC pretvarač, jedinica za upravljanje snagom i zaštitni strujni krugovi [11]. Trenutni iznos snage koju OBC maksimalno može preuzeti iz izvora napajanja je 22 kW, a važno je napomenuti da do 7,2 kW izlazne snage koristi jednofazni izvod iz izvora napajanja, a trofazni za iznad 7,2 kW. OBC omogućava vlasniku električnog vozila da bateriju, osim putem punjača, puni i putem obične kućne priključnice, bez potrebe za punjačem. Iako je to sporiji način punjenja električnog vozila, vlasnik nema potrebe puniti vrijeme na javnoj punionici , a ne mora kupovati ni punjač, nego je dovoljno priključiti električno vozilo na jednofazni izvor napajanja. Takav način punjenja pruža vlasniku prije svega komfor punjenja vozila u vlastitom domu, čak i bez trofaznog punjača. Kada je sustav potreban za punjenje baterije električnog vozila, sličan kao

prethodno navedeni uz još više elemenata, izvan električnog vozila (eng. *off-board charger*), onda se koristi DC izvor napajanja za punjenje. Stanice za punjenje, koje predaju snagu putem istosmjerne struje, mogu dati izlaznu snagu do reda 240 kW. Upravo zato se istosmjerni izvor ne može koristiti za punjenje u domaćinstvima, jer se radi o prevelikoj izlaznoj snazi, za koju je potreban posebni transformator. Razine na koje se dijele različiti izvori napajanja za punjenje prikazane su u Tablici 3.2., a različiti načini punjenja u Tablici 3.3.[18].

Tablica 3.2. Razine punjenja električnih vozila u EU, izradio autor po uzoru na [12] [18]

Naponska razina (V)	**Upotreba**	**Sučelje**	**Snaga punjenja (kW)**	**Vrijeme punjenja**
Level 1				
230 (EU) AC	Punjenje kod kuće ili na radnom mjestu	Najobičnija kućna priključnica	1,38 – 7,4 (6 – 32 A) jednofazno	200 km: ~ 20 h
Level 2				
240 (EU) AC	Javna i privatna mjesta za punjenje	Oprema za opskrbu električnih vozila	2,88 – 19,2 (12 – 80 A) jednofazno	200 km: ~ 5 h
Level 3				
240 (EU) AC 300-800 DC	Komercijalna mjesta punjenja	Oprema za opskrbu električnih vozila	20 – 350 (250 – 500 A) trofazno	160 km: ~ 30 min
Level 4				
1000 DC i više	Komercijalna mjesta punjenja	Oprema za opskrbu električnih vozila	više od 350 (400 A i više) višefazno	200 km: ~ 5 min

Tablica 3.3. Različiti načini punjenja, izradio autor po uzoru na [18]

Način punjenja	**Izvor napajanja i broj aktivnih faza**	**Struja [A]**	**Napon [V]**	**Razina snage (kW)**	**Sučelje**
1. način	AC – jednofazno AC – trofazno	16	230 – 250 480	3,8 7,6	Ne
2. način	AC – jednofazno AC – trofazno	32	230 – 250 480	7,6 15,3	Ne
3. način	AC – jednofazno AC – trofazno	32 – 250	230 – 250 480	60 120	Da
4. način	DC	250 – 400	600 – 1000	više od 150	Da

Neke od dobrih strana OBC-a, uspoređujući ga sa *off-board chargerom*, je taj što se električno vozilo može puniti bilo gdje, laka komunikacija sa sustavom za upravljanje baterijom, nema potrebe za dodatnom elektronikom te je visok učinak uz nisku cijenu [11]. Ali, *off-board charger* ima jako veliku prednost, a to je brže vrijeme punjenja [11].

4. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Pojam kvaliteta električne energije je postao jedan od najzvučnijih pojmova energetske industrije još od kraja 1980-ih [1]. Obuhvaća razne individualne poremećaje u elektroenergetskom sustavu koje inženjeri pokušavaju riješiti sistemski, a ne pojedinačno. Prema literaturi [1], glavni razlozi zbog kojih je očuvanje kvalitete električne energije bitno su:

1. Nova električna oprema, noviji potrošači, koriste elemente koji su osjetljivi na nepravilnosti u kvaliteti električne energije.
2. Pojavom elemenata za poboljšanje efikasnosti elektroenergetskog sustava došlo je i do pojave većih razina harmonika, koji imaju utjecaj na buduće sposobnosti sustava.
3. Krajnji korisnici sve su osviješteniji o važnosti kvalitete električne energije, jer svaka veća nepravilnost dovodi do prekida napajanja električnom energijom, padovima napona, što loše utječe na električnu opremu i pojavu drugih problema.
4. Razni sustavi, priključeni na elektroenergetsku mrežu, imaju elemente međusobno povezane putem internetske veze, a nepravilnost u kvaliteti električne energije mogu dovesti do kvara pojedinog elementa što dalje može imati daleko veći utjecaj na ostatak sustava.

Glavni faktori koji obilježavaju kvalitetu električne energije su: promjena frekvencije, kontinuitet opskrbe, upravljanje naponom u distribucijskom sustavu, naponski propadi i kratki prekidi opskrbe, kolebanje napona i treperenje (flikeri), nesimetrija napona i struje, strujni i naponski harmonici te prenaponi [2].

4.1. Promjena frekvencije

Jedan od najvažnijih parametara bilo kojeg energetskog sustava je frekvencija te je vrlo bitno da razina frekvencije bude u za to predviđenim granicama. Frekvencija je u sustavu stabilna u stvarnom vremenu onda kada su proizvodnja i potrošnja električne energije u ravnoteži. Potrebno je centralizirano upravljanje ili upravljanje na razini zona elektroenergetskog sustava, jer je frekvencija zajednička svim točkama napajanja u mreži [2]. Kako bi se osiguralo potrebno upravljanje frekvencije u sustavu u stvarnom vremenu, operator ima pristup podacima pomoću pouzdane i obilne informacijske mreže. Ukoliko operator uoči problem s frekvencijom, potrebno je imati dovoljan broj rezervi snage koje se gotovo automatski puštaju u pogon da bi se održala uravnoteženost proizvodnje i potrošnje. Do prekoračenja frekvencije izvan dopuštenih granica dolazi u slučajevima kada se veliki potrošač naglo odspoji od mreže, ako se veliki proizvođač

isključi ili ako dođe do kvara, odnosno prekida, u prijenosnom sustavu velike snage [1]. Promjena frekvencije se izračunava uz pomoću poznavanja stvarne vrijednosti frekvencije, f_r, i nazivne frekvencije, f, što se uvrštava u formulu 4-1 [2]:

$$\Delta f = f - f_r \text{ , Hz} \tag{4-1}$$

Relativna promjena frekvencije se izražava preko formule 4-2 [2]:

$$\Delta f = \frac{f - f_r}{f_r} \times 100 \text{ , \%} \tag{4-2}$$

Dnevna promjena frekvencije se izražava uz pomoću integrala, prikazano u formuli 4-3 [2]:

$$I_f = \int_0^{24} \Delta f \times dt \text{ , \%} \tag{4-3}$$

Prema standardu EN 50160, nazivna frekvencija sustava je 50 Hz, a prema standardu zadane su prethodno spominjane granice unutar kojih se frekvencija mora nalaziti. Granice su prikazane u Tablici 4.1.

Tablica 4.1. Granice frekvencije prema standardu EN 50160, izradio autor po uzoru na [2]

EN 50160					
Sustavi sa sinkronom vezom u međusobno povezanom sustav			**Sustavi koji nemaju sinkronu vezu u međusobno povezanom sustavu**		
Granične vrijednosti	Promatrano razdoblje	Razdoblje za granične vrijednosti	Granične vrijednosti	Promatrano razdoblje	Razdoblje za granične vrijednosti
$50\text{Hz} \pm 1\%$	1 godina	99,5%	$50\text{Hz} \pm 2\%$	1 godina	95%
$50\text{Hz} \pm 4\%/-6\%$	1 godina	100%	$50\text{Hz} \pm 15\%$	1 godina	100%

Mjerenje frekvencije, odnosno interval usrednjavanja, se vrši u intervalima od 10 sekundi.

4.2. Pouzdanost distribucije

Potrošači danas imaju svakodnevno, u bilo koje doba dana i noći, pristup električnoj energiji. Ujedno ta električna energija ispunjava sve potrebne zahtjeve kvalitete električne energije. Pouzdanost distribucije je sposobnost distribucijskog sustava da obavlja svoju funkciju u

navedenim uvjetima tijekom određenog vremenskog razdoblja bez kvara [2]. Upravo se pouzdanost distribucijskog sustava izražava preko dva pojma, trajanje prekida i učestalost prekida. Kvaliteta opskrbe potrošača električnom energijom promatra se kroz usluge koje opskrbljivač pruža korisnicima, što manji broj prekida te što kraće vrijeme trajanja istog, a zadnje, no ne i manje važno, je kvaliteta napona [2].

4.3. Upravljanje naponom u distribucijskom sustavu

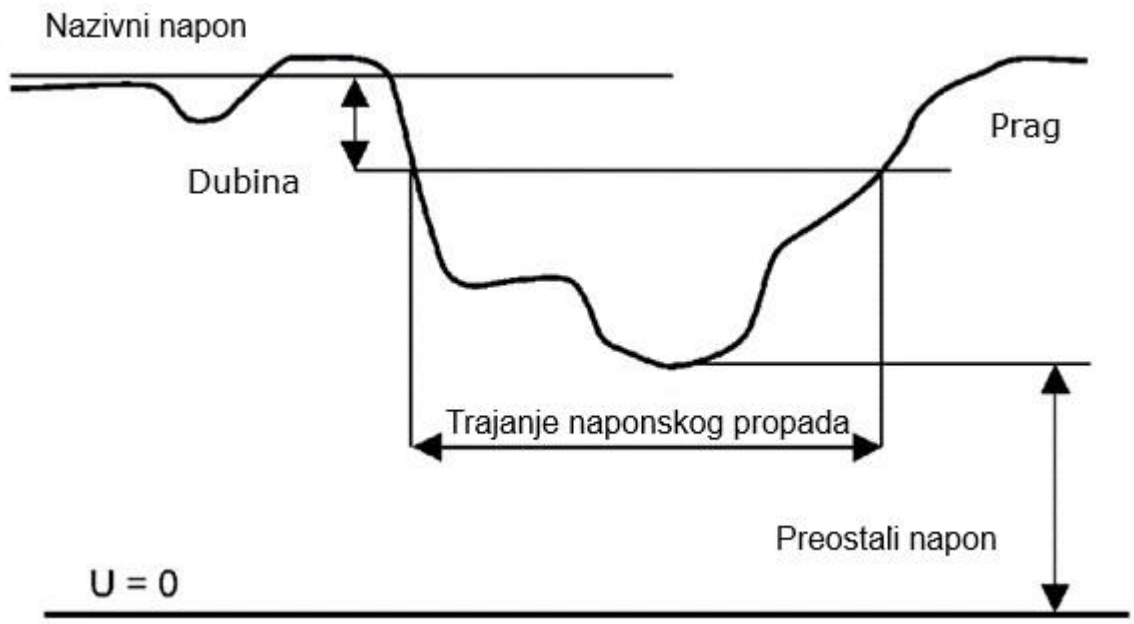
Pod upravljanjem naponom u distribucijskom sustavu se podrazumijeva upravljanje promjene iznosa napona unutar dopuštenih granica, prema EN 50160. Uzroci promjene iznosa napona su nagle promjene tereta u sustavu, naglo isključenje ili uključenje većih potrošača, te još značajniji utjecaj ima ravnoteža između proizvedene i potrošene reaktivne snage. Ako je potrošnja reaktivne snage veća nego proizvodnja, razina napona pada, a vrijedi i obratno [2]. Probleme koje može prouzrokovati manji iznos napona od dopuštenog su povećani gubici prijenosa električne energije prijenosnom mrežom, gubici u transformatorima i ostalim uređajima, a najgora posljedica je što može izazvati nestabilnost sustava. S druge strane, ako je iznos napona veći od dopuštenog, dolazi do povećanja struja magnetiziranja motora i transformatora te izolacija uređaja biva oslabljena. Kako bi se spriječili slučajevi previsoke ili preniske razine napona, primjenjuju se sljedeće metode i uređaji [2]:

1. Upravljanje naponom za slučaj promjene toka reaktivne snage: sinkroni generatori i kompenzatori, transformator s regulacijom broja zavoja bez i pod opterećenjem, paralelni spoj kondenzatora i prigušnica, STATCOM i SVC.
2. Upravljanje naponom s obzirom na promjenu impedancije mreže: promjene konfiguracije mreže i serijski spoj kondenzatora.
3. Upravljanje naponom putem isključenja opterećenja zbog niskog napona.

Promjene razine napona se s obzirom na duljinu trajanja dijele na kratkotrajne i dugotrajne varijacije napona, koje su opisane u literaturi [1]. Dugotrajne su one promjene koje traju duže od 1 minute, a čine ih pojave podnapona i prenapona. Uzrok prenapona i podnapona su promjene u opterećenju mreže i sve operacije uklapanja i isklapanja koje se odvijaju u sustavu. Kratkotrajne promjene su uzrokovane kvarovima, priključenjem velikih opterećenja na mrežu koji zahtijevaju velike početne struje ili lošim vezama na spojevima instalacija. Tako nastaju naponski propadi, kratkotrajni prenaponi ili potpuni gubitak napona.

4.4. Naponski propadi i kratki prekidi opskrbe

Naponski propad je pojava iznenadnog propada napona, iznosa 0,1 do 0,9 od referentnog napona, koja se javlja u vremenskom intervalu ne kraćem od 10 milisekundi te se nakon toga kratkog intervala vrati u normalu [1]. Na Slici 4.1 se može vidjeti kako je pad napona dvodimenzionalan, određen naponom i vremenom.



Slika 4.1. Karakteristike naponskog propada [2]

Glavni uzrok propada napona u sustavu su kratki spojevi na prijenosnoj mreži, koji su neizbježni jer ih izazivaju promjene sklopnih stanja elemenata mreže te atmosferska pražnjenja. Kratki spoj izaziva visoke struje koje uzrokuju veliki broj propada napona. Uzrok pojave propada napona može biti i isključenje velikih opterećenja, uključivanje velikih motora koji se nalaze na kraju opskrbnog ili rad uređaja koji imaju velike i nagle promjene u snazi [1]. Na strani potrošača, problem koji izaziva propad napona ovisit će o iznosu propada, vremenu trajanja i iznosu propada te o drugim faktorima, poput: pomaka faza i nesimetrije, prekida opskrbe, nesimetrije napona tri faze. Uređaji koji su osjetljivi na naponski propad, (npr. naponski propad dubine 20% nazivne vrijednosti napona), su podnaponski releji, uređaji za procesno upravljanje, automatizirani strojevi i drugi. Naponski propad, iznosom i vremenom trajanja, ima utjecaj na gotovo sve uređaje koji koriste električnu energiju, jer ti uređaji više ne rade ispravno.

Kratki prekid opskrbe je poseban slučaj pada napona, gdje se vrijednost napona na svim fazama snizi ispod minimalne vrijednosti preostalog napona od 10 % [2]. Ako je vrijeme trajanja prekida

opskrbe kraće od 1 minute, ili kod nekih slučajeva automatskog ponovnog uklapanja (APU-a) kraće od 3 minute, taj se prekid klasificira kao kratki prekid opskrbe [2]. Upravo je APU glavni uzrok pojave kratkog prekida opskrbe. APU-om se pokušava ukloniti nastali problem u sustavu, najčešće pojava prethodno spominjanog kratkog spoja, na način da se na kratko vrijeme isključi dio sustava u kojemu se nalazi problem. Često je potrebno više od jednog ponovnog isklapanja i uklapanja sustava da bi se otklonio problem [2]. Ako problem nije uklonjiv preko automatskog ponovnog uklapanja, prekidač ostaje otvoren te je potrebno fizički ukloniti problem, što dovodi do prekida napajanja koje više nije kratkotrajno.

Naponski propadi i kratkotrajni prekidi opskrbe se mogu svesti na minimalne razine, ako bi se koristile slijedeće metode [2]:

1. Smanjenje broja grešaka koje izazivaju kratke spojeve – zamjena nadzemnih vodova podzemnim, održavanje krošnji drveta oko prijenosnih vodova, ograđivanje od životinja, unapređenje održavanja, povećanje stupnja izolatora itd.
2. Skraćivanje vremena potrebnog za uklanjanje problema – korištenje osigurača za limitiranje struje.
3. Modifikacija sustava za opskrbu – izgradnja generatora bliže osjetljivim opterećenjima, povećanje broja sabirnica, napajanje sabirnica osjetljivih potrošača preko više trafostanica.
4. Stabilizatori napona – korištenje uređaja energetske elektronike poput sustava sa spremnikom energije (neprekidni izvori napajanja, supravodljivo magnetsko skladište energije, rotacijski strojevi itd.), sustav bez spremnika energije (transformatori konstantnog napona, statičko brzo prebacivanje opterećenja, statički generatori itd.).
5. Poboljšanje otpornosti opreme.

Mjerenje naponskog propada i kratkotrajnog prekida opskrbe se provodi kroz 5 koraka [2]. U prvom koraku se provodi uzimanje uzoraka napona, gdje se većinom uzima 128 do 256 uzoraka po ciklusu. Kako je uzorkovanje napona sinkronizirano sa frekvencijom, frekvencija uzorkovanja nije izražena kao broj uzoraka po sekundi nego po ciklusu. Drugi korak je izračunavanje karakteristike događaja kao funkcije vremena iz uzorkovanih napona. U trećem koraku se izračunaju pojedinačni indeksi događaja na temelju karakteristika događaja. Zatim, četvrti korak je računanje indeksa pojedinačnih lokacija koristeći pojedinačne indekse događaja mjerenih tijekom određenog vremenskog razdoblja. I zadnji, peti korak, provodi se proračun za indekse sustava iz indeksa lokacija za sve (nadzirane) lokacije u određenoj regiji ili dijelu

elektroenergetskog sustava. Ovi indeksi zahtijevaju dulje razdoblje praćenja, minimalno godinu dana. Za pouzdanu prognozu potrebno je višegodišnje mjerenje.

4.5. Kolebanje napona i treperenje (flickeri)

Treperenje i kolebanje napona su dva blisko povezana pojma, jer i jedno i drugo imaju utjecaj na rasvjetna tijela. Kolebanje napona utječe na intenzitet rasvjete, dok treperenje utječe na percepciju ljudskog oka, stvarajući dojam vizualne nestabilnosti zbog promjene svjetline ili spektralne distribucije svjetlosnog izvora tijekom vremena. Dakle, treperenje, iako izazvano naponskim kolebanjem, proučava se s psihološkog stajališta zbog utjecaja na promatrača, dok je kolebanje napona strogo električni pojam. Treperenje se dijeli na periodično i ne-periodično treperenje, uzrokovano periodičnim ili ne periodičnim kolebanjem napona. Kolebanje napona definirana je kao periodična ili ne-periodična varijacija napona čija amplituda ne prelazi 10%, dok treperenje opisuje promatračevo psihološko stanje na pojavu uzrokovanu naponskim kolebanjem, odnosno promjenu intenziteta rasvjete rasvjetnog tijela [2].

Glavni izvor varijacije napona su velika industrijska opterećenja, koja su povezana na visokonaponske ili srednjenaponske mreže, te u slučaju da izazovu primjetno treperenje, mogu utjecati na veliki broj potrošača povezanih na istu mrežu. Takvim opterećenjima pripadaju elektrolučne peći sa svojim velikim razlikama u snazi tijekom rada, uređaji za varenje, električni bojleri koji u industriji služe za proizvodnju pare itd. Zajedničko svojstvo svim uređajima je to što pri radu koriste visoke struje, uz česte promjene vrijednosti struje. Često ovakvi uređaji rade u promjenjivom režimu rada, odnosno često se uključuju i isključuju iz pogona. Takve nagle promjene i izazivaju fluktuaciju napona. Osim industrijskih opterećenja, naponsko treperenje mogu izazivati i uređaji na razini uslužnih djelatnosti i kućanstava. Električni uređaji koji se napajaju iz niskonaponskih mreža poput pumpe, pogona za dizala, ventilatora, komore za hlađenje, električnog bojlera i štednjaka ili klimatizacijska oprema, koji imaju značajnu snagu i koji se periodično ili nepravilno uključuju i isključuju, potencijalni su izvori treperenja [2].

Najčešći način za rješavanje problema fluktuacije napona i treperenja je smanjenje varijacije snage, uglavnom reaktivne snage, priključenih opterećenja. Uređaj koji se koristi još od 1970-ih je statički var kompenzator, ujedno je i danas jedan od najčešćih uređaja kojima se kompenzira problem flikera uzrokovanih elektrolučnim pećima [1]. Neizravni pretvarač s utisnutim naponom, odnosno sa naponskim ulazom u izmjenjivač se također koristi za rješavanje problema kolebanja napona. Serijski spoj kondenzatora koristi se u industriji za strojeve poput drobilice kamena ili testnih uređaja za gume.

4.6. Nesimetrija struje i napona

Nesimetrija struje i napona se javlja u trofaznom sustavu, a rezultat nesimetrije je jednak i za struju i napon. Ako iznos struje, odnosno napona, nije jednak za sve tri faze, ili je kut pomaka između faza različit od 120°, onda se radi o nesimetriji [1]. Pri analizi nesimetrije napona i struje u sustavu, koristi se metoda simetričnih komponenti, a izražava se preko slijedećih formula [2]:

1. Direktni sustav :

$$\overline{U_{1a}} = U_{1a} \qquad \overline{U_{1b}} = a^2 U_{1a} \qquad \overline{U_{1c}} = a U_{1a} \tag{4-4}$$

2. Inverzni sustav:

$$\overline{U_{2a}} = U_{2a} \qquad \overline{U_{2b}} = a U_{2a} \qquad \overline{U_{2c}} = a^2 U_{2a} \tag{4-5}$$

3. Nulti sustav:

$$\overline{U_{0a}} = \overline{U_{0b}} = \overline{U_{0c}} \tag{4-6}$$

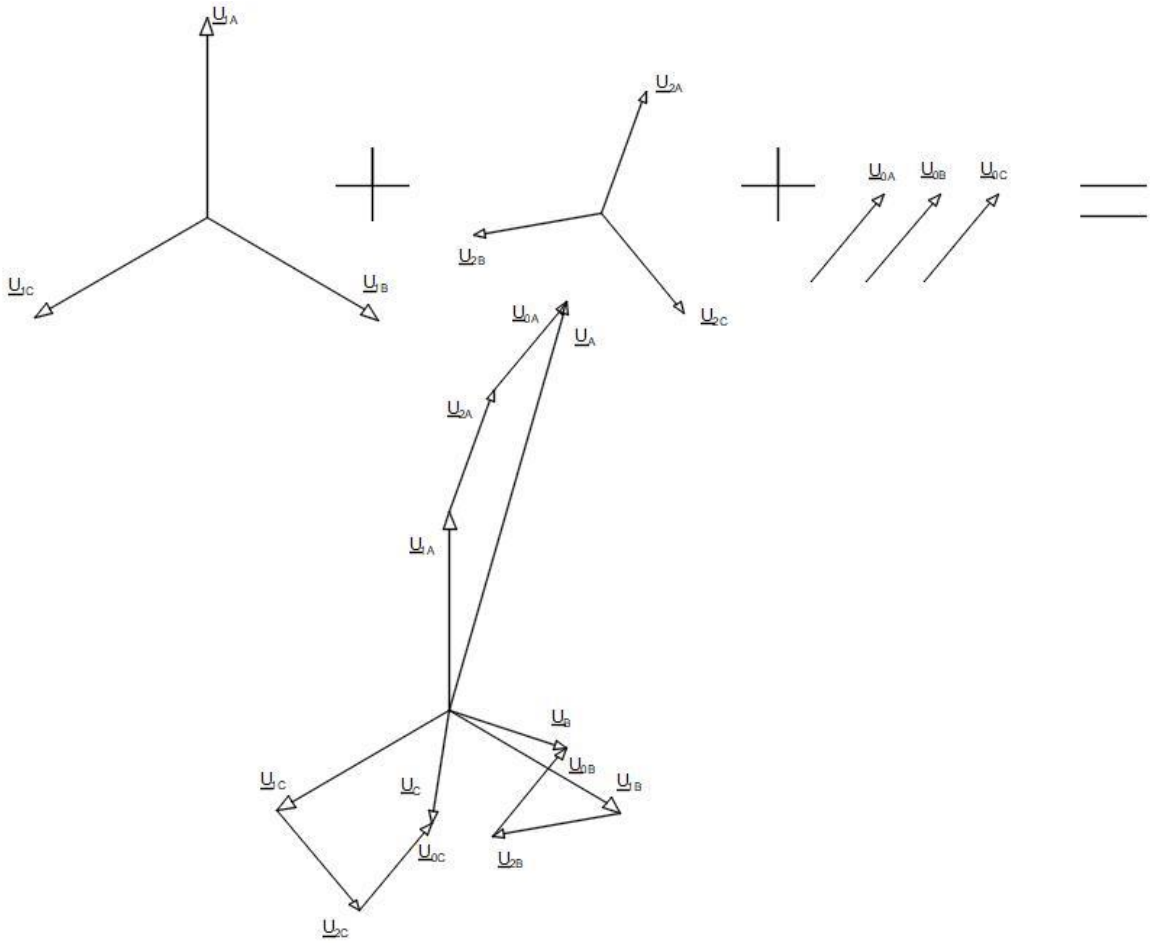
Operator „a“, koji se nalazi u formulama, služi za zakretanje referentnog vektora. Vektor zakreće za 120°, a zakreće ga u smjeru obratnom od kazaljke na satu. U formuli 4-7 se prikazan je izraz operatora „a“:

$$a = e^{j\frac{2}{3}} = \frac{-1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \tag{4-7}$$

Formula 4-8 iskazuje kako se računaju fazni iznosi napona:

$$\begin{gathered} \overline{U_a} = U_{1a} + U_{2a} + U_{0a} \\ \overline{U_b} = U_{1b} + U_{2b} + U_{0b} = a^2 U_{1a} + a U_{2a} + U_{0a} \overline{U_c} = U_{1c} + U_{2c} + U_{0c} \\ = a U_{1a} + a^2 U_{2a} + U_{0a} \end{gathered} \tag{4-8}$$

Primjena formule 4-8 na trofazni nesimetrični sustav prikazan je na Slici 4.2.



Slika 4.2. Nesimetrični sustav i njegove simetrične komponente, izradio autor po uzoru na [2]

Nesimetrija u sustavu se izražava preko faktora K, prikazanog u formuli 4-9 [2]:

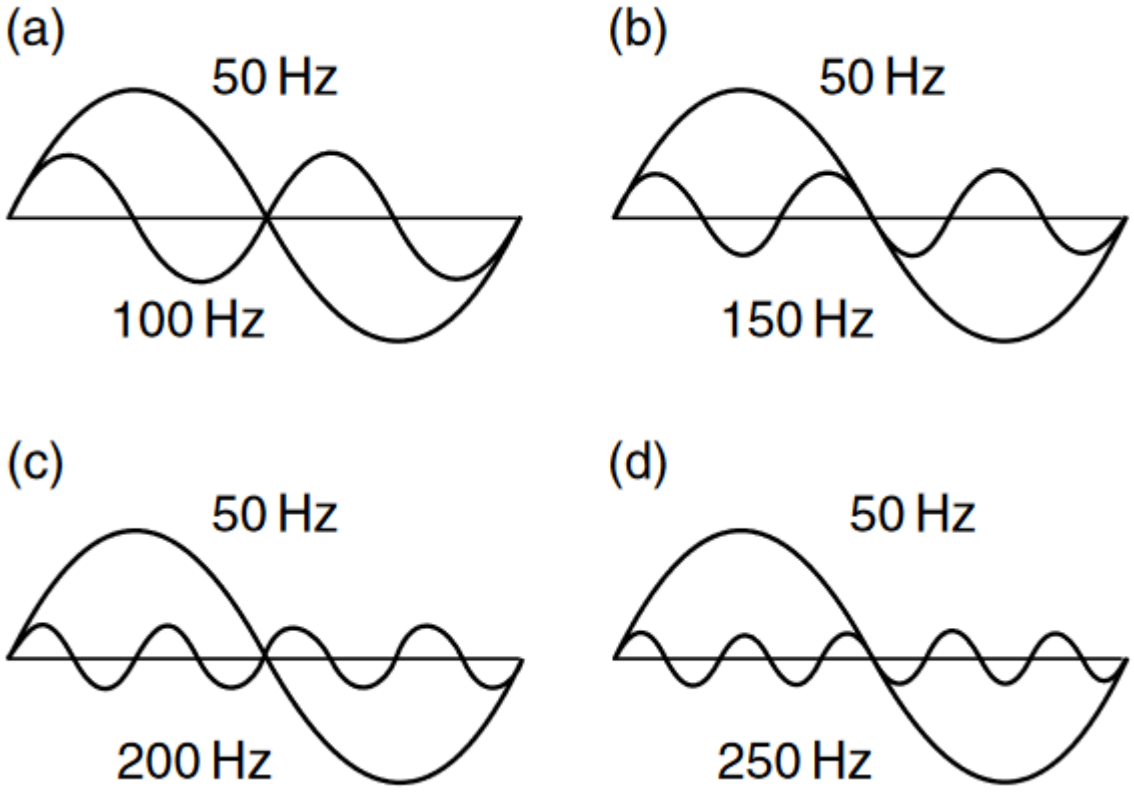
$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \times 100\,\% \qquad K_{2U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \times 100\,\% \tag{4-9}$$

Indeks (1) u formuli 4-9 označava prvi harmonik. Na jednak se način iskazuju i formule za fazne struje kao prethodno navedene formule te se faktor K može zapisati isto preko faznih struja.

Najčešći uzroci nestabilnosti napona i struje u trofaznom sustavu su jednofazna opterećenja [1]. Od trofaznih opterećenja koji uzrokuju poremećaje u sustavu su uglavnom elektrolučne peći, ali i poneke trofazne komponente prijenosnog sustava. Problemi koji nastaju zbog nesimetrije su uzrokovani strujama inverznog i nultog sustava, a to su gubici snage i energije, dodatna zagrijavanja što smanjuje prijenosni kapacitet struja direktnog sustava te nesimetrije napona u čvorovima mreže [2]. Uređaji koji su najosjetljiviji na utjecaj nesimetrije su asinkroni motori, sinkroni generatori i ispravljači. Problem nesimetrije se rješava pomoću konvencionalnih statičkih var kompenzatora, u paralelnom ili serijskom spoju [2]. Prema standardu EN 50160, faktor K može iznositi 2%, na nekim mjestima maksimalno 3%, a da nije narušena kvaliteta električne energije.

4.7. Strujni i naponski harmonici

Harmonici su oduvijek bili prisutni u sustavu, ali raširenijom primjenom elemenata energetske elektronike postaju glavni problem elektroenergetskog sustava. Uglavnom ih izazivaju uređaji sa nelinearnim strujno-naponskim karakteristikama, koji su većinom uređaji krajnjih potrošača [2]. Općenito, harmonici su cjelobrojni višekratnici frekvencije sustava (50 ili 60 Hz) [1]. Ukupno harmonijsko izobličenje (eng. *total harmonic distortion*; THD) koristi se kao mjera efektivne vrijednosti harmonijskog izobličenja. Što je iznos THD-a veći, postoji veća opasnost za sustav. Broj koji označava harmonik opisuje koliko je puta veći taj harmonik od osnovne frekvencije. Na Slici 4.3. priakzano je nekoliko harmonika.



Slika 4.3. Sinusoidni oblik sa temeljnom frekvencijom 50 Hz i njegovi harmonici: a) drugi harmonik, b) treći harmonik, c) četvrti harmonik, d) peti harmonik [2]

Prvi harmonik jednak je osnovnoj frekvenciji sustava od 50 ili 60 Hz, drugi harmonik ima frekvenciju od 100 ili 120 Hz itd. Osim sinusoidnog vala, postoji i distorzirani, koji se dobije superpozicijom sinusoidnih valnih oblika različitih amplituda i frekvencija [1]. Kada je valni oblik identičan iz perioda u period, može se reprezentirati kao suma čistih sinusnih valova, pri čemu je frekvencija svake sinusoide cjelobrojni višekratnik temeljne frekvencije distorziranog vala [1].

Zbroj sinusoida, na koji se može razdvojiti distorzirani val, čini Fourierovu seriju, tehnika koju je osmislio francuski matematičar Jean Baptiste Joseph Fourier. Formula 4-10 [2] glasi:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_{(n)} cos(nx) + \sum_{n=1}^{\infty} b_{(n)} sin(nx) \tag{4-10}$$

Gdje su:

$f(x)$ – generički periodički valni oblik

a_0 – DC komponenta koja se dobije formulom 4-11 [2]:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x)dx \tag{4-11}$$

$a_{(n)}, b_{(n)}$ – koeficijenti koji se dobiju formulom 4-12 i 4-13 [2]:

$$a_{(n)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) cos\ (nx)dx \tag{4-12}$$

$$b_{(n)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) sin\ (nx)dx \tag{4-13}$$

n – cijeli broj između 1 i beskonačno

Formula za THD_U je slična formuli za THD_I, a glasi 4-14 [2]:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n_{limit}} U^2{}_{(n)}}}{U_{(1)}} \tag{4-14}$$

Gdje su:

THD_U – ukupno naponsko harmonijsko izobličenje

n – cijeli broj između 1 i beskonačno

$U_{(n)}$ – amplituda napona n-tog harmonika

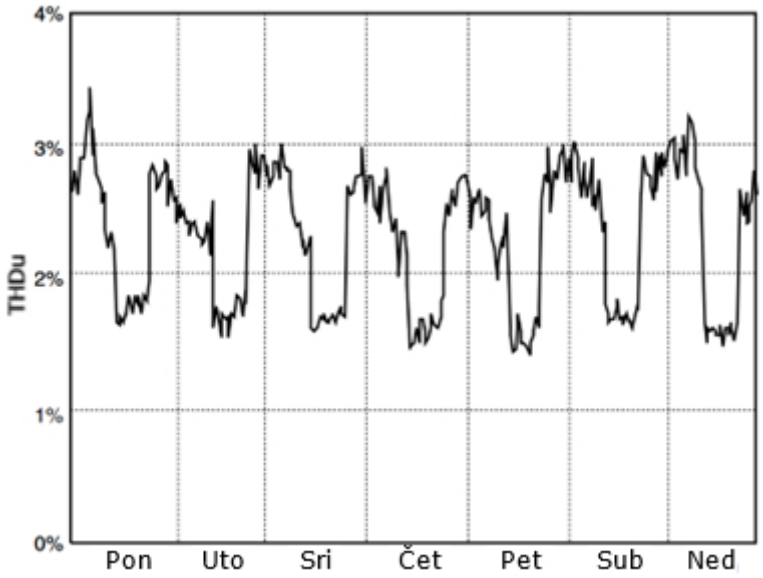
$U_{(1)}$ – amplituda osnovnog napona

Na mjestu n_{limit} se nalazi broj 50, koji označava 50. harmonik, jedino ako je rizik od rezonancije za visokofrekventne harmonike nizak uzima se broj 25, što je češće jer harmonici od 25. do 50. nisu uobičajeno štetni za elektroenergetski sustav [1]. Konkretni izvori harmonika u sustavu od opreme su [2]:

1. Uređaji sa magnetskom jezgrom – transformatori, motori, generatori itd.
2. Elektrolučne peći, elektrolučno varenje, svjetiljke s izbojem visokog intenziteta.

3. Elektronski uređaji i uređaji energetske elektronike.

Slika 4.4. prikazuje prosječnu promjenu u THD-u tijekom tjedna.



Slika 4.4. Promjena THD-a tijekom tjedna [1]

Može se uočiti kako krajem svakog dana i tjedna raste THD, odnosno kad su potrošači kod kuće i kad koriste uređaje poput TV-a, računala, mikrovalne, pećnice, printeri itd. [2]. Time se potvrđuje kako su krajnji potrošači glavni uzroci porasta THD-a u niskonaponskoj distribucijskoj mreži. Efekt koji harmonici imaju na mrežu, proizvođače i potrošače je vrlo velik [2]:

1. Pregrijavanje neutralnog i faznih vodiča – strujni harmonici izazivaju preopterećenje faznih vodiča i neutralnog vodiča, što dalje vodi prema razvijanju visokih temperatura u kabelima i vodovima zbog Jouleovog efekta te smanjenja prijenosnog kapaciteta.
2. Skin efekt – protjecanje struje na vanjskoj površini vodiča, još izraženiji je efekt pri višim frekvencijama, iznad 350 Hz, te dovodi do dodatnih gubitaka i zagrijavanja.
3. Rotacijski uređaji (generatori i motori) – poraste radne temperature zbog rasta gubitka snage te slabljenje izolacije.
4. Transformatori – gubici uzrokovani vrtložnim strujama utječu na veće radne temperature i kraći životni vijek, gubici u namotima su povećani i jezgri.
5. Kondenzatori – porast vršne vrijednosti napona izazvana je harmonicima i stvara stres na dielektrik. Dolazi do djelomičnog pražnjenja u izolaciji i kratkog spoja folije te se tako trajno ošteti kondenzator. Za slučaj povećanja struje zbog harmonika, nastaju dodatni gubitci, može pregorjeti osigurač kondenzatorskog bloka, oštećenje dielektrika (starenje i kraći životni vijek dielektrika).

6. Izvori svjetlosti – dodatni gubitci zbog stanja blizu rezonancije i kraći životni vijek zbog visoke vršne vrijednosti napona.
7. Otežan proces prekida struje prekidačima
8. Struje zemljospoja – vrlo visoke vrijednosti struja zemljospoja zbog izobličenja napona.
9. Elektronička oprema i pretvarači – operacije koje izvode mogu zatajiti, uklapanje poluvodičkih uređaja kada se ne smije, kvar u komponentama zbog porasta napona, pogreške pri radu dijagnostičkih i zaštitnih uređaja itd.
10. Mjerni instrumenti – svi su umjereni za mjerenje sinusoidnih vrijednosti, ako se mjeri izobličen valni oblik dolazi do pogreške.
11. Zaštitni sustav sklopnika i releji – harmonici imaju utjecaj na operacije koje provode, dakle na njihovu elektromehaničku strukturu te im opada osjetljivost.
12. Telekomunikacijske prepreke – harmonici uzorkuju prekide, smetnje i šumove u pozivima.

Također je uz THD važno i spomenuti faktor izobličenja ukupne potražnje (eng. *Total Demand Distortion*; TDD) koji se dobije kao omjer ukupnog zbroja strujnih harmonika od drugog do četrdesetog reda i najveće vrijednosti struje koja je zabilježena tijekom nekog mjerenja, $I_{(1u)}$. Formula za TDD glasi 4-15 [2]:

$$TDD = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} (\frac{I_{(n)}}{I_{(1u)}})^2} \times 100\% \quad (4\text{-}15)$$

Rješenja za smanjenje harmonika u sustavu su modifikacija strukture nelinearnih uređaja, filteri harmonika i aplikacija izolacijskih transformatora [2]. Prije nego se odluči na koji će se način, od prethodno navedenih, riješiti problem harmonika, mora se provesti analiza problema kako bi se odabrao najefikasniji način.

4.8. Prenaponi

Prenapon se definira kao prosječna vrijednost napona koja je veća od maksimalno dopuštene razine napona za koji je oprema projektirana [2]. Vrste prenapona su trajni, prolazni, prijelazni i kombinirani. Najčešće ih uzrokuju procesi sklapanja opterećenja poput isklapanja velikih opterećenja ili uklapanje kondenzatorskih blokova radi punjenja. Prolazni prenaponi su neprigušeni ili slabo prigušeni prenaponi iste frekvencije kao i frekvencija sustava, a traju nekoliko sekundi te ponekad par minuta. Ovisno o trajanju i amplitudi prenapona, ovisiti će težina štete koja

može biti nanesena sustavu i uređajima. Prolazni prenaponi su uzrokovani zemljospojem, iznenadnim promjenama opterećenja te rezonancijom i ferorezonancijom. Prijelazni prenapon je trajanja od nekoliko milisekundi ili manje, jako prigušen oscilatoran ili neoscilatoran te podijeljen na [2]:

1. Polagan porast čela – trajanje čela od 20 do 5000 μs, trajanje hrpta manje ili jednako 20 ms.
2. Brz porast čela – trajanje čela od 0,1 do 20 μs, trajanje hrpta manje ili jednako 300 μs.
3. Vrlo brz porast čela – trajanje čela manje od 0,1 μs, ukupno trajanje manje od manje od 3 ms.

Kombinirani prenapon je sastavljen od dvije komponente napona, ovisno o komponenti više vršne vrijednosti se klasificira, javljaju se između dviju faza te ponekad između faze i drugih dijelova sustava. Kombinirani su ujedno i najčešća vrsta prenapona. Prenaponi mogu tvorit razne valne oblike te jedni od bitnijih su atmosferski ili vanjski i sklopni ili unutarnji prenaponi, a oni čine udarne napone koji služe u svrhu ispitivanja opreme. Kratkog su trajanja, a to se vidi po tome što kod atmosferskog prenapona vrijeme trajanja čela je 1,2 μs, a hrpta 50 μs, dok kod sklopnih prenapona vrijeme porasta čela je 250 μs, a trajanje hrpta je 2500 μs [2]. Ovisno o izvoru prenapona u sustavu, razlikuju se:

1. Unutarnje porijeklo – nepredvidivo isklapanje opterećenja, samouzbudni generatori, rezonantni fenomen, kvarovi na dalekovodu i procesi sklapanja. Frekvencija ovakvih prenapona je ispod 500 Hz, u trajanju od milisekunde do nekoliko sekundi, a amplituda napona može dosegnuti čak 2-2,5 puta od nazivne vrijednosti (p.u.). Što je veća vrijednost amplitude napona, kraćeg je trajanja prenapon.
2. Vanjsko porijeklo – elektrostatički napon, elektrostatička ili elektromagnetska indukcija na vodovima te direktni udar munje. Najgori slučaj nastaje ako dođe do direktnog udara munje u vodove dalekovoda ili stup.

Negativne efekte koji prenaponi imaju na sustav su razni. Među bitnijima su isključenje zaštitnih uređaja, uništenje opreme, prekid procesa svaki put kada dođe do kvara [2]. No nije samo problem u materijalnoj šteti, nego su i ljudski životi u riziku ako bi došlo do takvih kvarova u velikim industrijama, čeličanama npr., ili bolnicama. Dolazi i do nestabilnosti sustava, tvrtke mogu izgubiti podatke na računalima, gubici industrija zbog prekida rada postrojenja itd. Za zaštitu opreme od prenapona, koriste se sljedeći principi: ograničenje napona za osjetljiviju izolaciju, odvesti prenaponsku struju od opterećenja, blokirati prenaponsku struju da uopće ne dođe do opterećenja,

povezati uzemljenja na opremi, smanjiti ili spriječiti prenaponsku struju da teče između uzemljenja te napraviti niskopropusni filter koristeći principe blokiranja i ograničenja [1].

5. MJERENJE I ANALIZA PODATAKA KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE

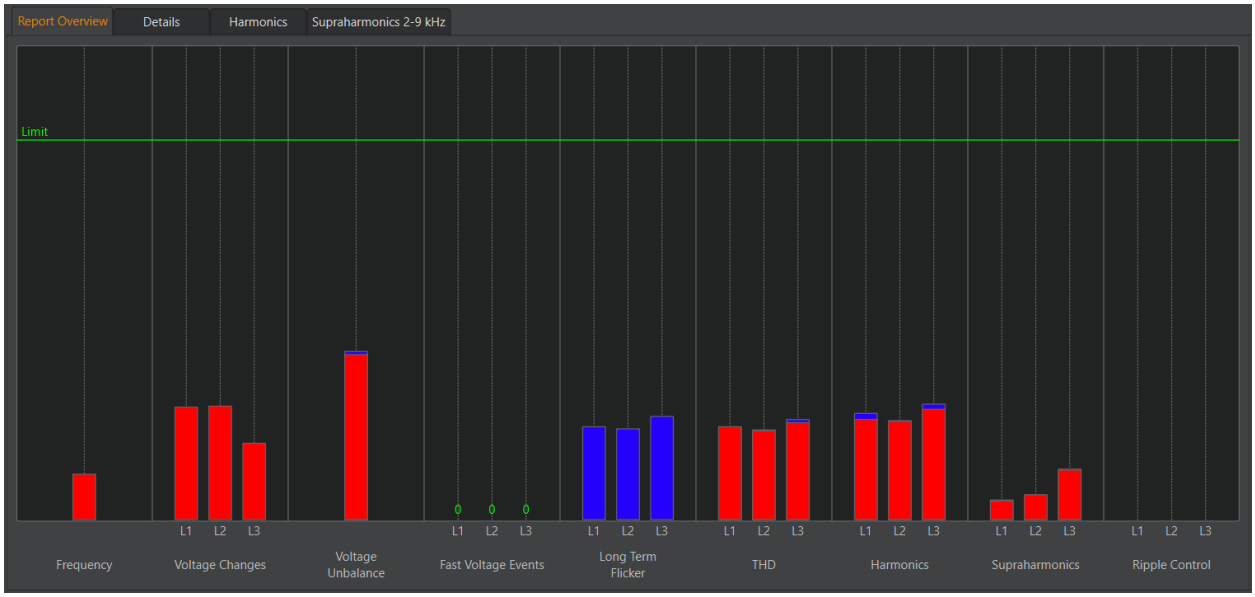
5.1. Analiza mjerenih podataka u softveru *WinPQ Mobile*

Za potrebe detaljne analize utjecaja punjača električnih vozila na kvalitetu električne energije snimljeno je jedno punjenje električnog vozila čija baterija ima kapacitet 75 kW. Vozilo se punilo pomoću SCHRACK punionice. Vrijeme trajanja punjenja je 8 sati. Za mjerenje pokazatelja kvalitete električne energije korišten je mjerni uređaj PQ-Box 200, tvrtke A. Eberle GmbH & Co. KG, prikazan na Slici 5.1.

Slika 5.1. Mjerni uređaj PQ-Box 200

U daljnjem dijelu koristit će se softver *WinPQ Mobile*, tvrtke A. Eberle GmbH & Co. KG, za potrebu analize utjecaja punjenja 75 kW baterije na kvalitetu mreže.

Tijekom jednog punjenja baterije snage 75 kW, koje je trajalo 8 sati, nisu zabilježene previsoke vrijednosti pokazatelja kvalitete električne energije, a limiti pokazatelja kvalitete su određeni prema normi EN 50160. Prva 4 sata električno vozilo se punilo jednofazno, a zatim druga 4 sata trofazno. Tako su frekvencija, naponske promjene, nestabilnost napona, dugotrajni flickeri, THD i harmonici zadovoljili kvalitetu električne energije što je prikazano na Slici 5.2 i 5.3.

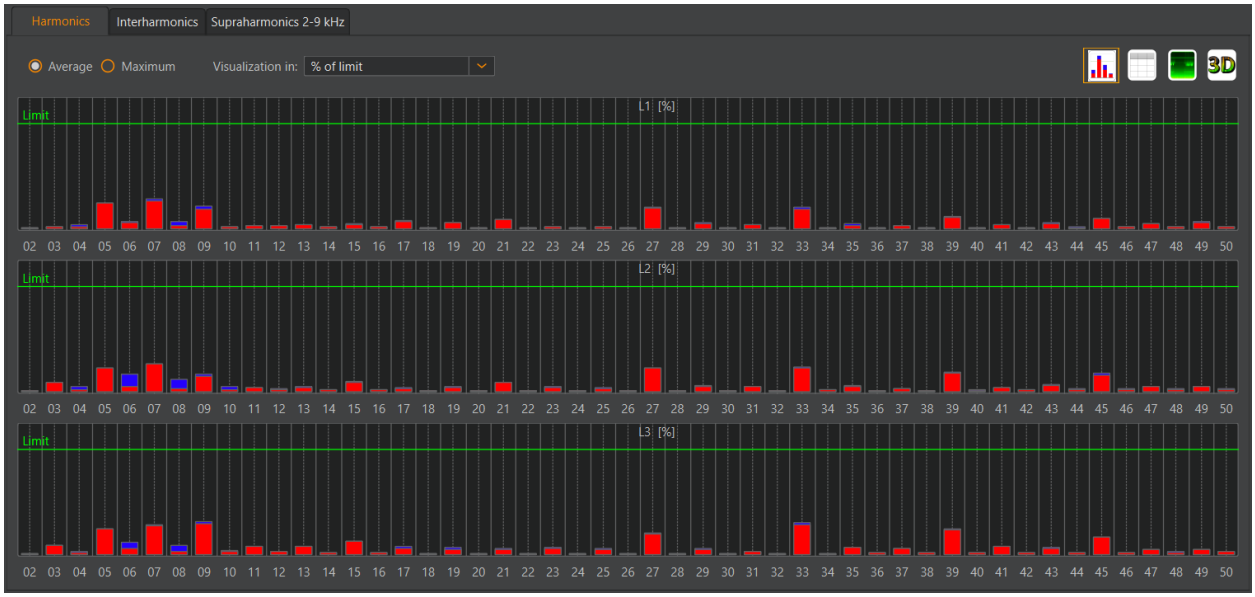


Slika 5.2. Analiza pokazatelja kvalitete električne energije pri jednofaznom punjenju

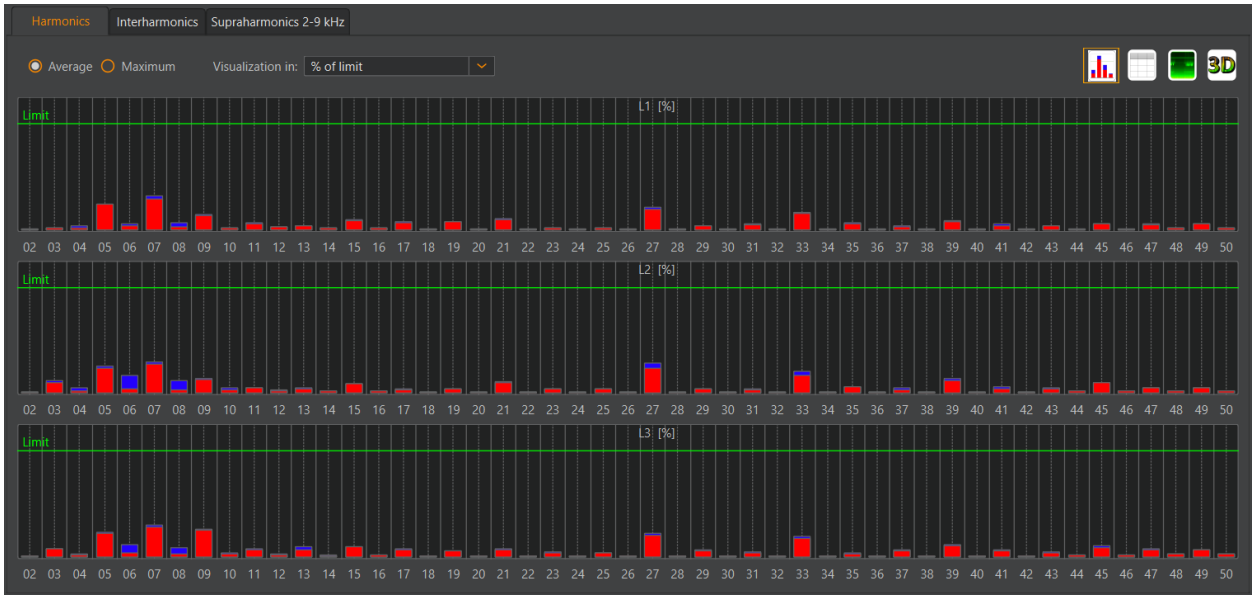
Slika 5.3. Analiza pokazatelja kvalitete električne energije pri trofaznom punjenju

Naponski harmonici – na Slici 5.4. i 5.5. je prikazan harmonijski spektar koji stvara punjač za jednofazno i trofazno punjenje. Harmonici koji se ističu iznosom kod jednofaznog punjenja u ovom primjeru su 5., 7., 9., 27., 33., 39. i 45 za oba mjerenja. Kod trofaznog punjenja, harmonici

koji se ističu po svome iznosu su 5., 7., 9., 27., i 33. Kada se usporede iznosi harmonika pri jednofaznom i trofaznom punjenju, uočava se kako kod trofaznog punjenja 39. i 45. harmonik nisu po iznosu značajni kao kod jednofaznog punjenja. Također je 9. i 33. harmonik pri trofaznom punjenju malo manji od 9. i 33. harmonika pri jednofaznom punjenju. Usporedno tome, kod trofaznog punjenja su 5., 7. i 27. harmonik malo veći nego isti ti harmonici pri jednofaznom punjenju. Iako nijedan harmonik nije prešao limit zadan normom EN 50160 za promatrani primjer, istaknuti harmonici mogu stvoriti problem u mreži kada bi se na ovaj način pri sličnim uvjetima punile baterije električnih vozila u gotovo svakom kućanstvu.

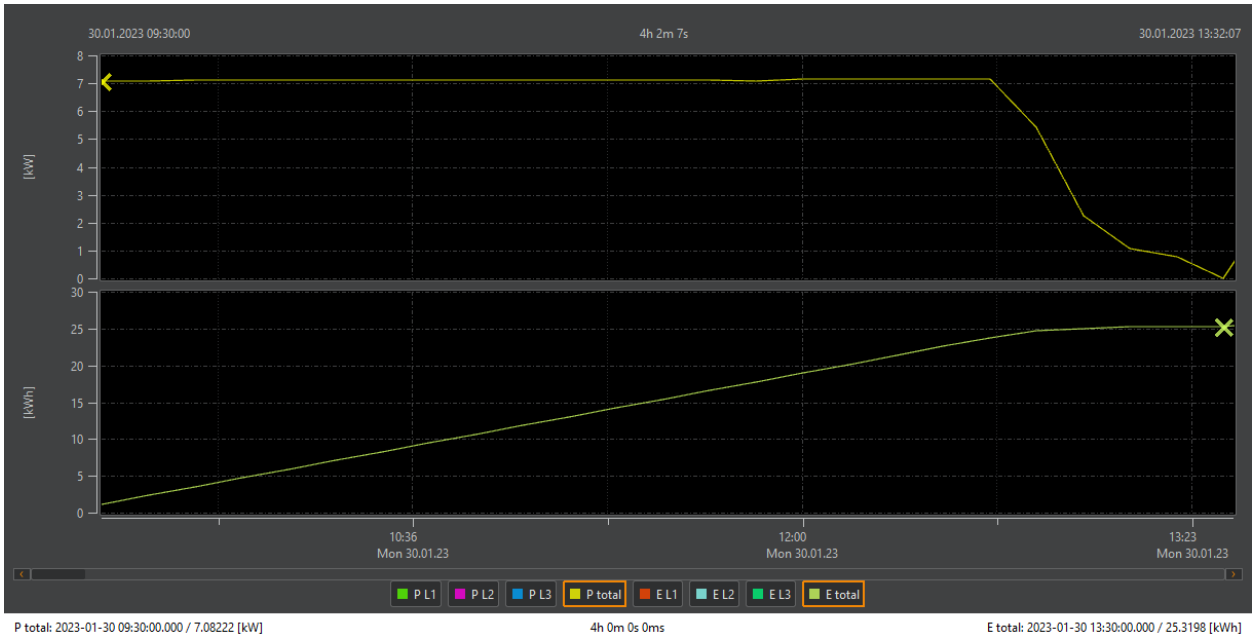


Slika 5.4. Naponski harmonici pri jednofaznom punjenju



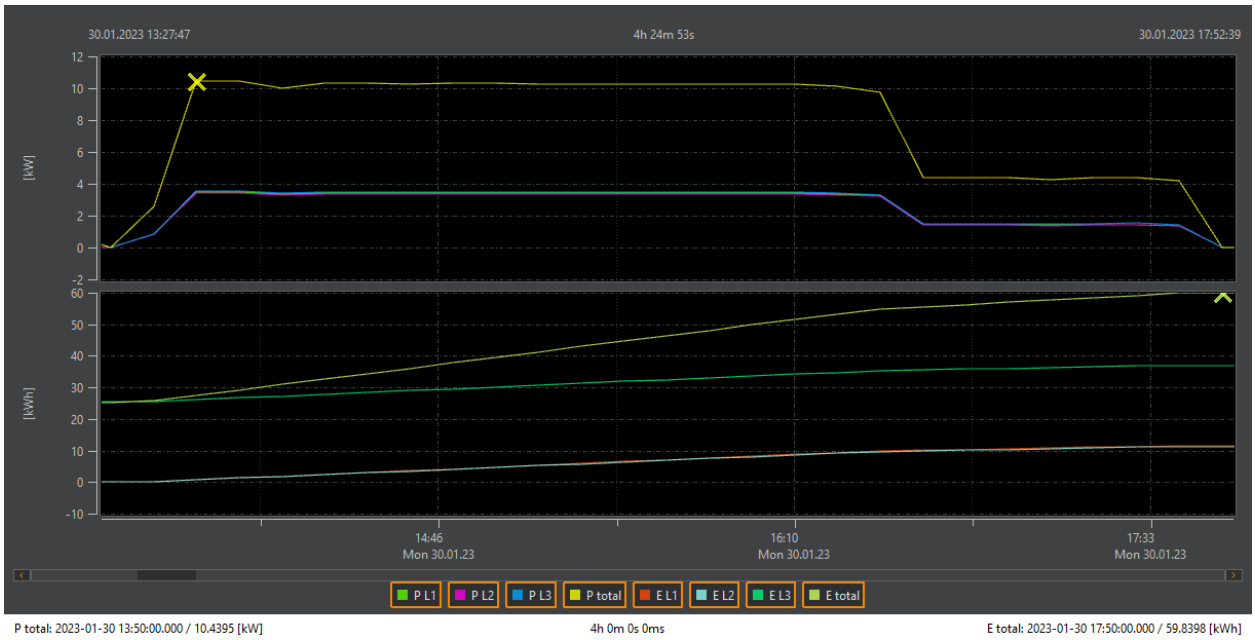
Slika 5.5. Naponski harmonici pri trofaznom punjenju

Na Slici 5.6. je prikazano jednofazno punjenje baterije. Punjenje je trajalo četiri sata. Unutar tih četiri sata punjenja, snaga jedne faze, točnije za ovaj slučaj faza L3, iznosila je približno 7,1 kW. Ujedno tako visok iznos snage ukazuje na to da se punionica ne nalazi u klasičnom kućanstvu, jer za tu razinu snage se koristi osigurač od minimalno 32 A, dok većina domaćinstva u Hrvatskoj koriste osigurače od 16 A. Nadalje, u tome vremenu je punionica iz mreže preuzela približno 25,3 kWh energije. Kako ovaj uređaj mjeri između mreže i punionice, sa sigurnošću se može reći da nije svih 25,3 kWh energije spremljeno u bateriju zbog raznih gubitaka koji se javljaju pri punjenju.



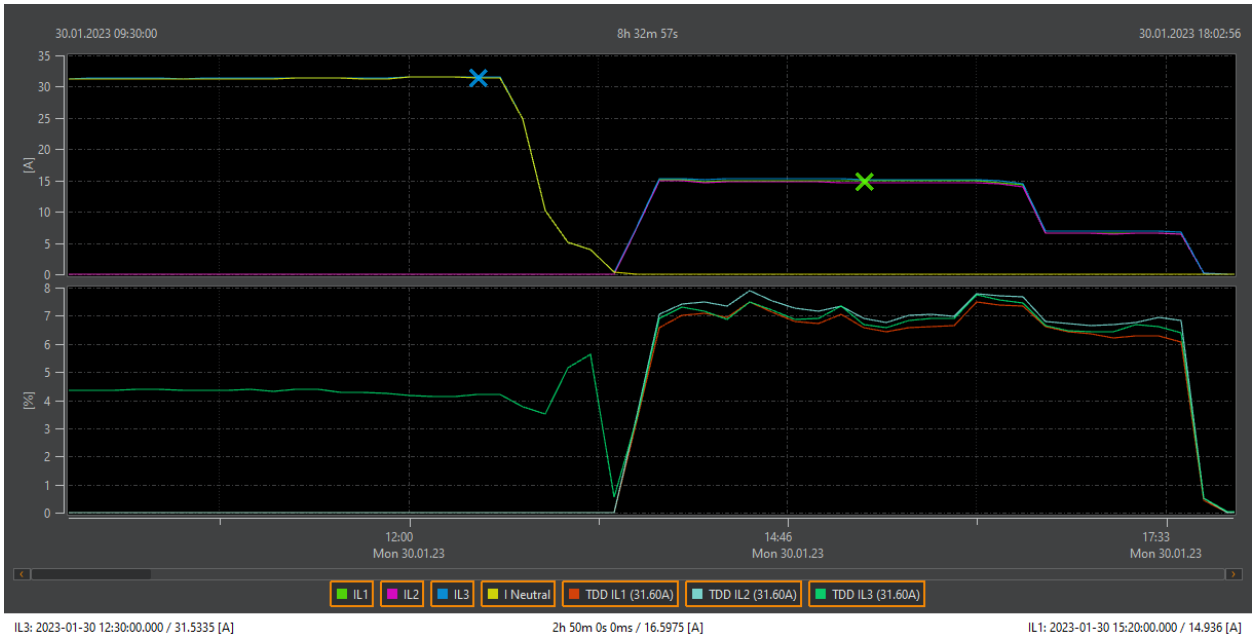
Slika 5.6. Dijagram snage i energije koju punjač uzima iz mreže tijekom jednofaznog punjenja

Iz dijagrama, prikazanog na Slici 5.7., jasno se vidi da se baterija puni trofazno. Sve tri faze su gotovo jednakih snaga, a iznos snage svake faze je približno 3,4 kW. Kada se zbroje snage pojedinih faza dobije se vrijednost ukupne snage od približno 10,4 kW koju punionica koristi za punjenje. Vrijeme punjenja je četiri sata. Vrlo bitno za naglasiti je i krajnji dio dijagrama, gdje snaga opada otprilike u 16:30 sati. Taj dio punjenja trajao je sat vremena, a snaga svake pojedine faze je iznosila približno 1,4 kW, što na kraju daje ukupnu snagu od približno 4,3 kW. Razlog pada snage je pametno punjenje baterije koje imaju punionice, a ono radi na principu da smanji vrijednost snage kojom puni (uspori se brzina punjenja) kada je baterija napunjena na 80 % radi očuvanja zdravlja baterije.



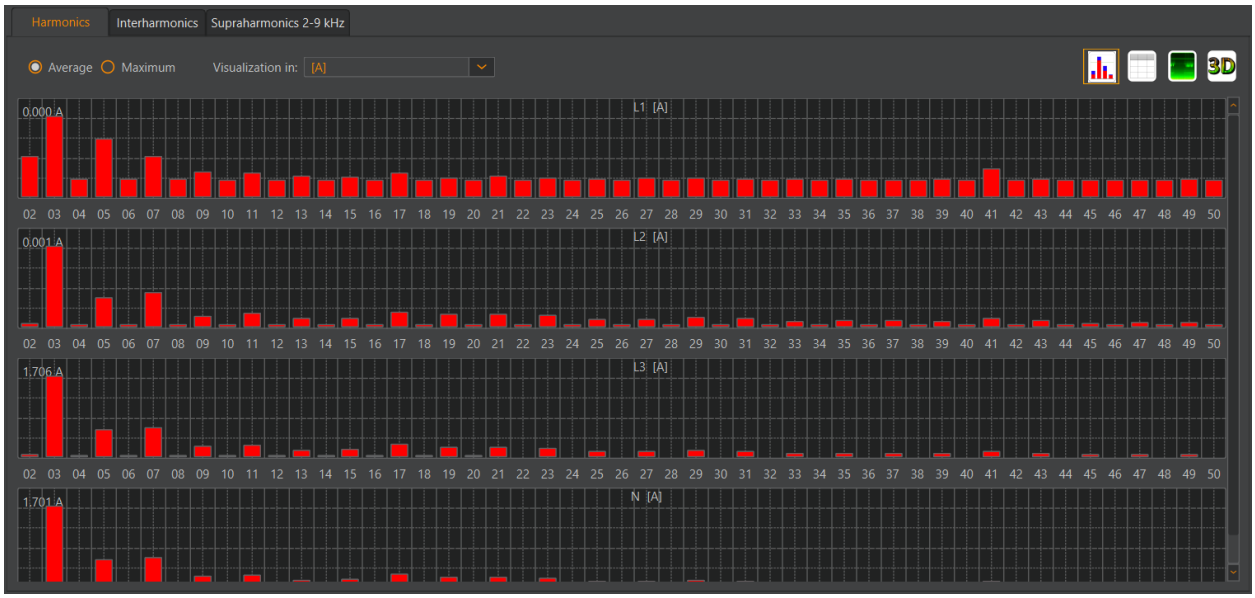
Slika 5.7. Dijagram snage i energije koju punjač uzima iz mreže tijekom trofaznog punjenja

Kao dokaz pravog utjecaja punjača na kvalitetu električne energije za ovo mjerenje su strujni harmonici, jer su tijekom mjerenja strujna kliješta mjerila struje punjenja. Za prikaz je uzet TDD, Slika 5.8. TDD je omjer ukupnog zbroja strujnih harmonika od drugog do četrdesetog reda i najveće vrijednosti struje koja je zabilježena tijekom ovog mjerenja, a formula za proračun TDD-a je dana prethodno u podnaslovu Stujni i naponski harmonici, 4-15.

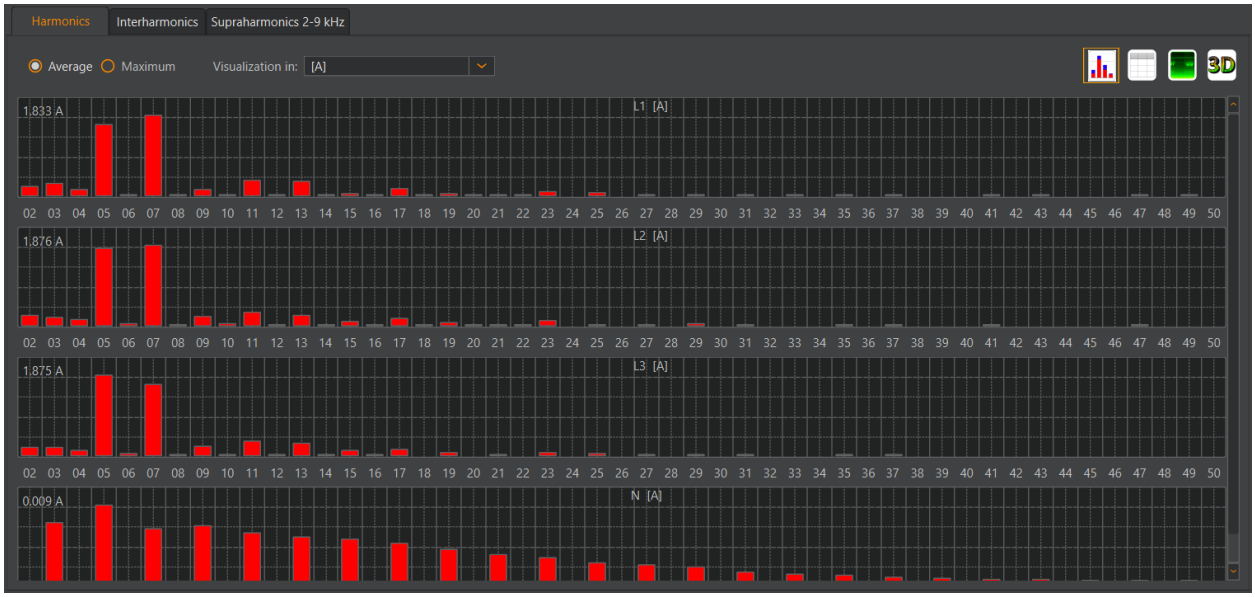


Slika 5.8. Dijagram efektivne vrijednosti struje i TDD

Na Slici 5.9. i 5.10. se vidi prisutnost problematičnih strujnih harmonika, upravo što je i TDD prethodno pokazao. Strujni harmonici koji su visokih vrijednosti u odnosu na druge harmonike su 3. harmonik kod jednofaznog punjenja i 5. i 7. harmonik kod trofaznog punjenja. Treći harmonik se pojavljuje samo u 3. fazi, odnosno L3 te u neutralnom vodiču jer je to vrijeme jednofaznog punjenja. Razlog tome je pojašnjen u daljnjem dijelu, na dijagramu efektivne vrijednosti struje i 3. harmonika.



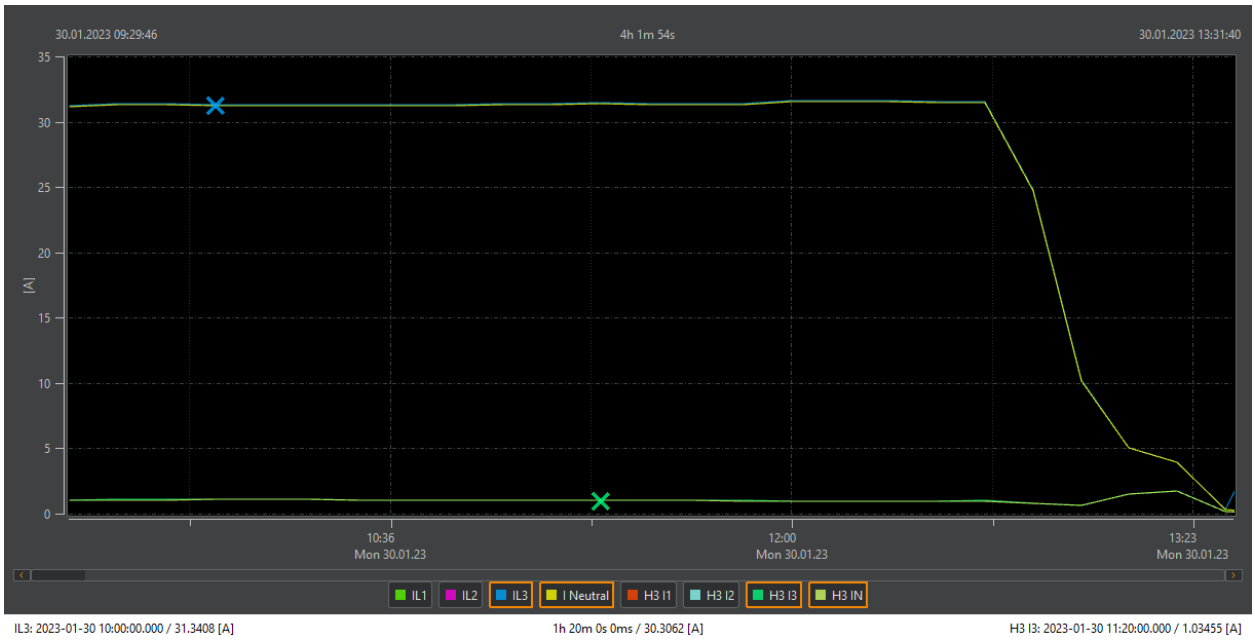
Slika 5.9. Dijagram strujnih harmonika pri jednofaznom punjenju



Slika 5.10. Dijagram strujnih harmonika pri trofaznom punjenju

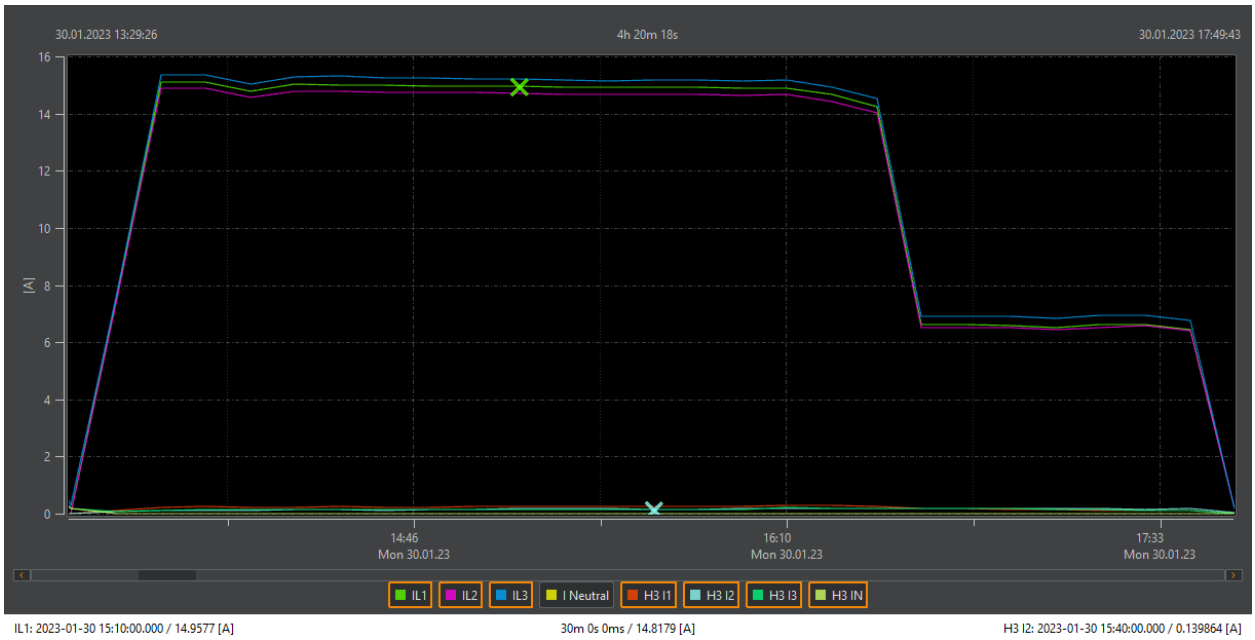
Iz dijagrama prikazanog na Slici 5.11. vidi se prisutnost trećeg harmonika, a njegova vrijednost je približno 1,035 A. Kako se radi o jednofaznom punjenju, tako se i treći harmonik pojavljuje samo

u trećoj fazi L3 i u neutralnom vodiču. Struja u jednofaznom punjenju prolazi samo kroz fazu L3 i zatvara se kroz neutralni vodič te su stoga jednakog iznosa struja faze i neutralnog vodiča. Jedan od glavnih problema koji izaziva treći harmonik je taj što se on zatvara kroz neutralni vodič te tako stvara zasićenje, odnosno preopterećenje neutralnog vodiča.



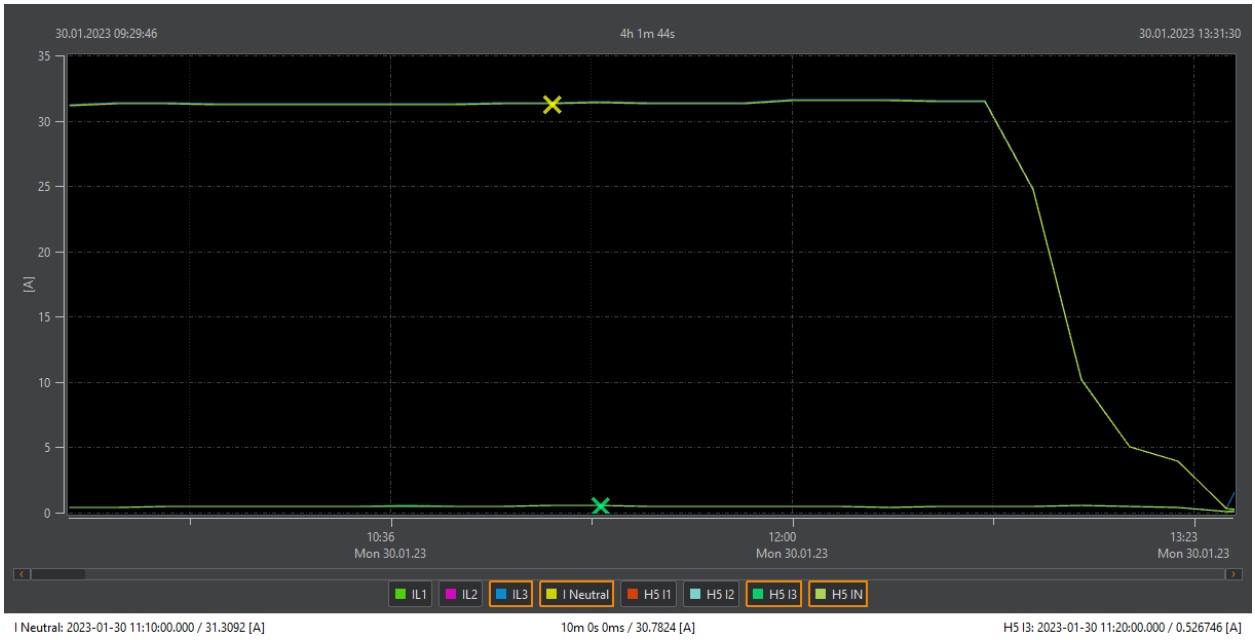
Slika 5.11. Dijagram efektivne vrijednosti struje i 3. harmonika za vrijeme jednofaznog punjenja

Zatim je snimljeno ponašanje efektivne vrijednosti struje i trećeg harmonika za svaku fazu pri trofaznom punjenju, što je predočeno na Slici 5.12. Efektivne vrijednosti struje svake faze su vrlo sličnih vrijednosti te je struja kroz neutralni vodič gotovo jednaka nuli. Stoga, na dijagramu struja neutralnog vodiča nije prikazana radi boljeg pregleda ponašanja trećeg harmonika. Iako je sada treći harmonik prisutan kod sve tri faze, njegov je iznos je usporedno kod jednofaznog mjerenja dosta manji nego kod trofaznog punjenja. Za vrijeme jednofaznog punjenja 3. harmonik iznosi približno 1,035 A, dok kod trofaznog mjerenja vrijednost 3. harmonika je približno 0,139 A. nizak Stoga 3. harmonik ima i manji utjecaj na kvalitetu pri trofaznom punjenju. Može se, u ovom slučaju, zaključiti da treći hamonik ima veći utjecaj na kvalitetu električne energije kod jednofaznog punjenja baterije električnog vozila nego kod trofaznog punjenja.



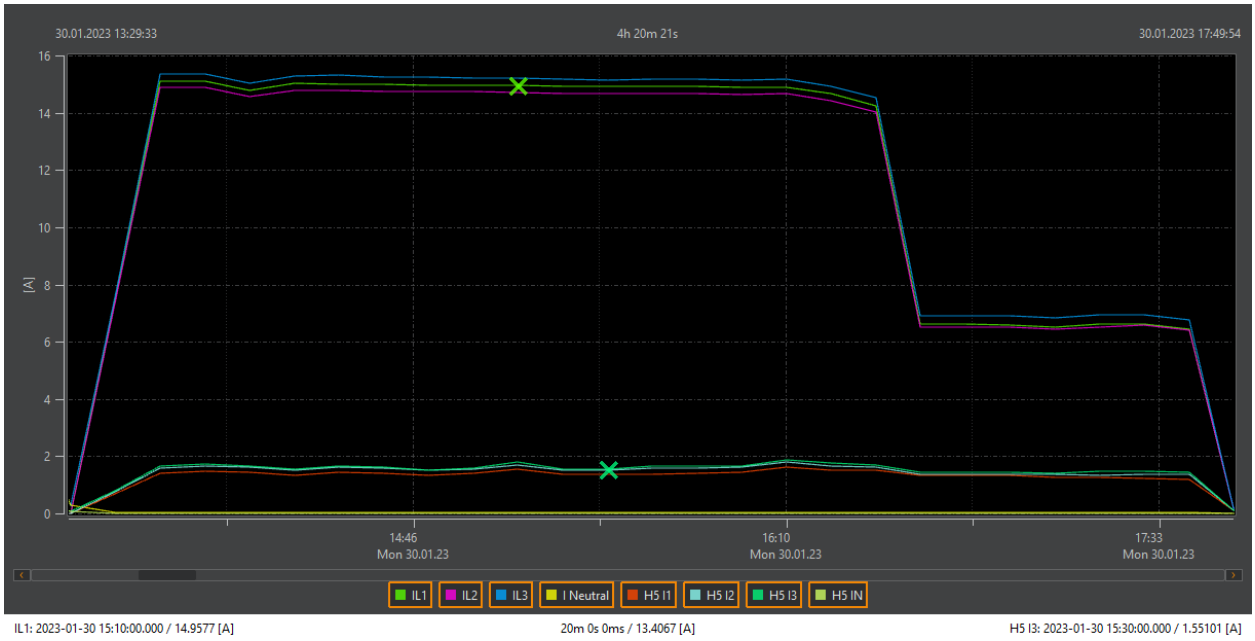
Slika 5.12. Dijagram efektivne vrijednosti struje i 3. harmonika za vrijeme trofaznog punjenja

Slika 5.13. prikazuje ponašanje petog harmonika tijekom jednofaznog punjenja. Za razliku od trećeg harmonika koji se javlja pri jednofaznom punjenju i značajnog je iznosa od približno 1,035 A, peti harmonik je vrlo male vrijednosti, približno 0,527 A, kada se baterija električnog vozila puni jednofazno. Može se zaključiti kako je i dalje treći harmonik dominantan za slučaj jednofaznog punjenja.



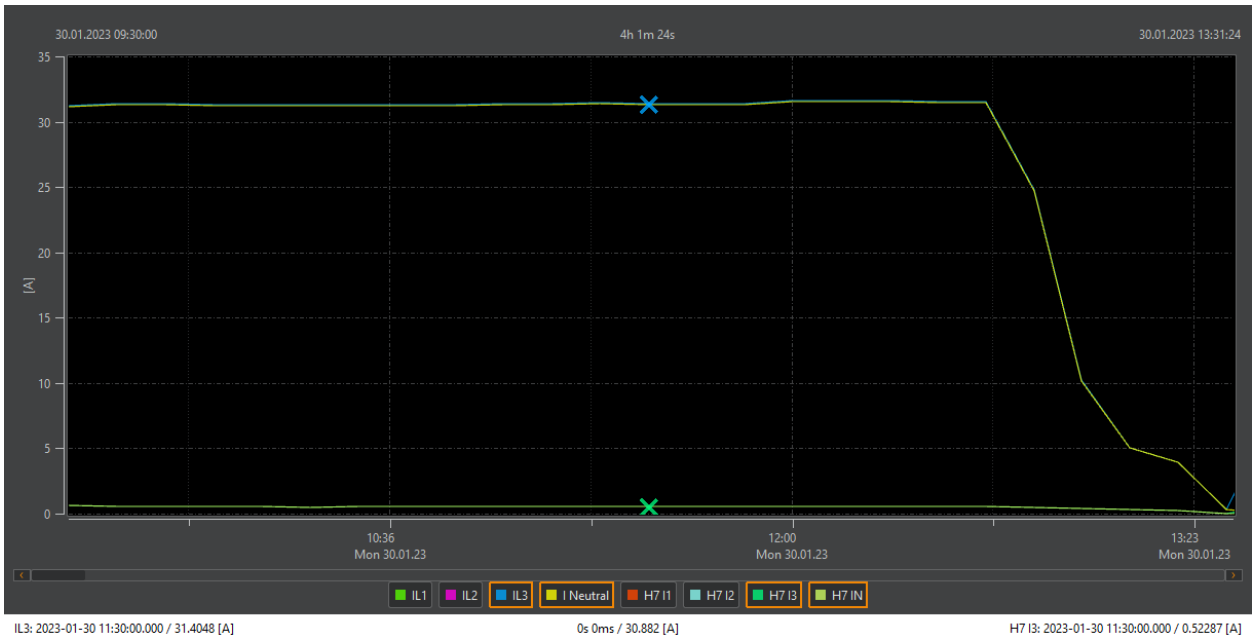
Slika 5.13. Dijagram efektivne vrijednosti struje i 5. harmonika za vrijeme jednofaznog punjenja

Dok već kod trofaznog punjenja, peti harmonik je znatno prisutniji i veći po iznosu, približno 1,551 A, što se i vidi na Slici 5.14. Usporedno sa 1. harmonikom, odnosno temeljnim, 5. harmonik je približno 10% od temeljnog harmonika, osim pri kraju ciklusa punjenja. Njegov utjecaj na kvalitetu je značajniji nego utjecaj trećeg harmonika koji je pri trofaznom punjenju približno 0,139 A. Ujedno je peti harmonik prisutan u sve tri faze s približno jednakim iznosima.



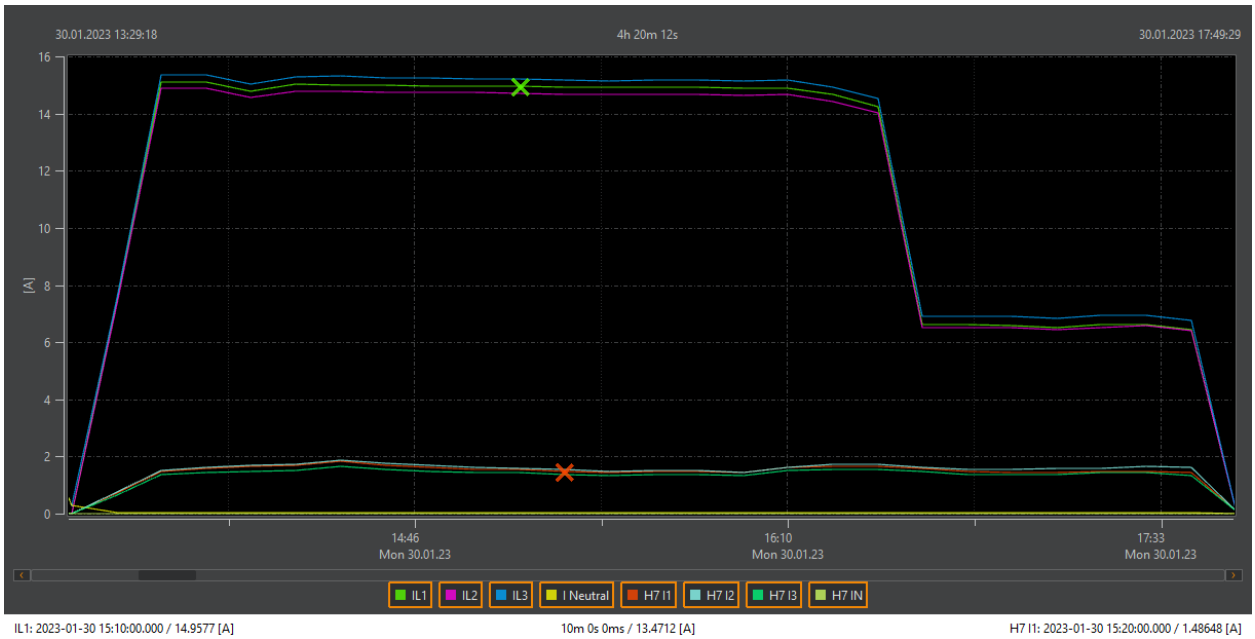
Slika 5.14. Dijagram efektivne vrijednosti struje i 5. harmonika za vrijeme trofaznog punjenja

Vrlo slična situacija kao i kod petog harmonika, Slika 5.15. prikazuje sedmi harmonik koji se pojavljuje samo u trećoj fazi L3 i neutralnom vodiču te je po iznosu vrlo mal u odnosu na vrijednost trećeg harmonika. Vrijednost 7. harmonika je približno 0,523 A, dok je 3. harmonika 1,035 A. Svakako je prisutan i peti i sedmi harmonik pri jednofaznom punjenju, ali je ipak treći najdominantniji.



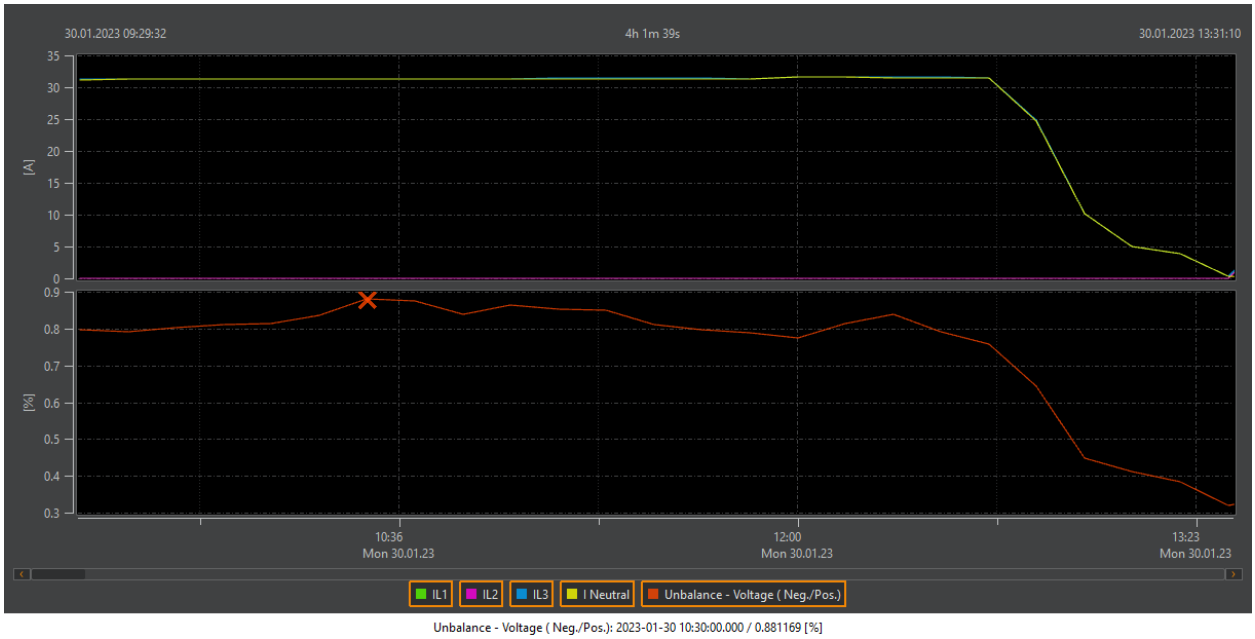
Slika 5.15. Dijagram efektivne vrijednosti struje i 7. harmonika za vrijeme jednofaznog punjenja

Kako je peti harmonik prisutan u trofaznom punjenju, u gotovo jednakoj mjeri je prisutan i sedmi harmonik što dokazuje Slika 5.16. Vrijednost 5. harmonika pri trofaznom punjenju je približno 1,551 A, a 7. harmonika približno 1,486 A. Sedmi harmonik je oko 9,85% od 1. harmonika, odnosno temeljnog, osim pri kraju ciklusa punjenja. Iznosom su 5. i 7. harmonik približno jednaki te stoga imaju i približno jednak utjecaj na kvalitetu električne energije. Također se pojavljuje sedmi harmonik u sve tri faze, s približno jednakim iznosima.



Slika 5.16. Dijagram efektivne vrijednosti struje i 7. harmonika za vrijeme trofaznog punjenja

Na Slici 5.17. je prikazana nesimetrija napona za vrijeme jednofaznog punjenja baterije. Nesimetrija napona za ovaj slučaj iznosi oko 0,88 %. Prema normi, nesimetrija napona nije prešla dozvoljenih 2%.



Slika 5.17. Nesimetrija napona pri jednofaznom punjenju

Kod nesimetrije napona pri trofaznom punjenju, što je prikazano na Slici 5.18., je uočljivo da je iznos nesimetrije značajnije manji nego kod jednofaznog punjenja. Vrijednost nesimetrije napona pri trofaznom punjenju je oko 0,4 %, dvostruko manje vrijednosti nego iznos nesimetrije napona za jednofazno punjenje. Time se dokazuje logična pretpostavka kako je nesimetrija napona veća onda kada se baterija električnog vozila puni jednofazno, a razina utjecaja na kvalitetu električne energije ovisi naravno i o konfiguraciji i stanju u distribucijskoj mreži.

Slika 5.18. Nesimetrija napona pri trofaznom punjenju

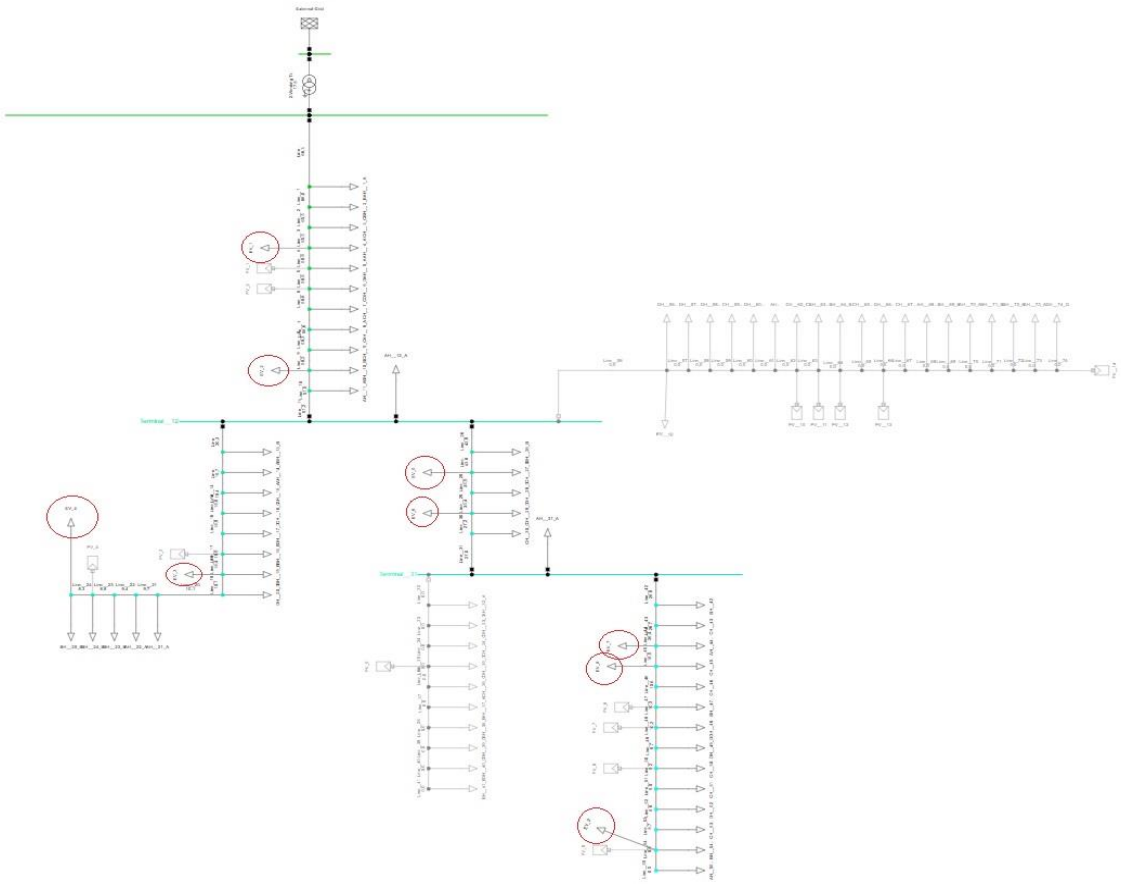
5.2. Simulacija u softveru *DigSilent Powerfactory*

Kako bi se uvidio utjecaj punjača električnih vozila na kvalitetu električne energije u mreži, nije dovoljno snimiti podatke samo jednog vozila i analizirati ih kao u prethodnom poglavlju. Stoga je izvedena simulacija za tri slučaja punjenja električnih vozila, u kojoj je na distribucijskoj mreži, u istom trenutku, bilo priključeno tri električna vozila, zatim šest te na kraju devet. Punjenje električnih vozila je bilo isključivo trofazno. Za svaki od prethodno navedenih slučaja snimljene su vrijednosti neparnih naponskih harmonika i naponski THD (THD_U). Prema normi EN 61000-2-2 i EN 61000-3-2 dane su i granice koje ne smiju preći pojedini naponski harmonici te sam THD_U, a one su prikazane u Tablici 5.1.

Tablica 5.1. EMC standard EN 61000

EN 61000-2-2	**Broj harmonika**		5.	7.	11.	13.		
	Granična vrijednost		6%	5%	3,5%	3%		
EN 61000-3-2	**Broj harmonika**	3.	5.	7.	11.	13.	15.	17.
	Granična vrijednost	5%	6%	5%	3,5%	3%	0,3%	2%

Simulacija je rađena na modelu niskonaponske mreže, sa četiri različita kućanstva s obzirom na potrošnju. Model je prikazan na Slici 5.19., a na slici su crvenom bojom zaokružena sva električna vozila koja su priključena na mrežu.



Slika 5.19. Model niskonaponske mreže

Električna vozila u mreži punjena su tijekom noći te je za potrebe rezultata simulacije uzet samo jedan trenutak. Na Slici 5.19. je prikazan model niskonaponske mreže s vozilima. Model mreže se sastoji od četiri različita izvoda, na koja su priključena 43 kućanstva te devet električnih vozila.. Dva su razloga iz kojega je odabrano da je devet maksimalan broj električnih vozila koji se mogu istovremeno puniti. Tako se može vidjeti na Slici 5.19. da je na najudaljenijoj sabirnici napon iznosio oko 0,95 p.u. te daljnjim dodavanjem električnih vozila bi već napon na sabirnicama bio prema normi EN 50160 na granici dozvoljene varijacije napona. Svako vozilo je modelirano pomoću unošenja podataka prikupljenih sa stvarnog mjerenja. Podatci koje je bilo potrebno unijeti su prikazani u Tablici 5.2. i 5.3..

Tablica 5.2. Tablica aktivne i reaktivne snage

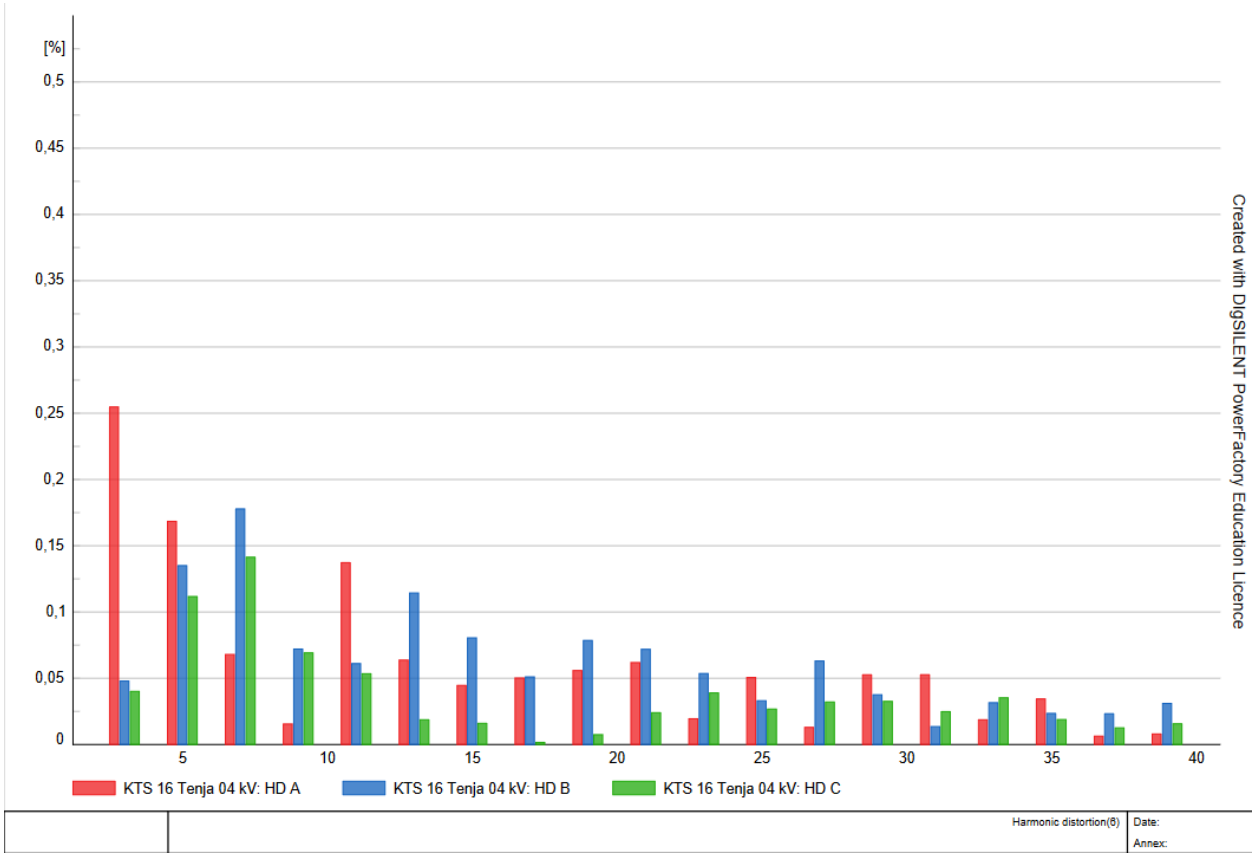
'P_L1_[W]'_abs	'P_L2_[W]'_abs	'P_L3_[W]'_abs	'Q_L1_[Var]'	'Q_L2_[Var]'	'Q_L3_[Var]'
3438,673	3373,848	3481,33	635,42	622,514	619,341

Tablica 5.3. Tablica podataka strujnih harmonika koji se unose u model električnog vozila

phi_A_h-h*phi_A_1	phi_A_h-h*phi_A_1	phi_A_h-h*phi_A_1	(IA_h/IA_1)%	(IB_h/IB_1)%	(IC_h/IC_1)%
0	0	0			
6,981	-512,142	-560,814	1,609195	0,989351	0,849539
-106,433	-700,707	-1307,143	9,364435	10,64239	10,60596
26,484	-806,369	-1645,348	10,54091	11,10271	9,544037
-68,925	-1043,439	-2328,195	0,696416	1,449674	1,3805
-125,092	-1367,533	-2721,75	0,689655	0,645826	1,081834
118,792	-1431,882	-3022,301	1,534821	0,996221	1,254397
-5,933	-1888,123	-3471,499	0,277214	0,432841	0,524325
-74,192	-2126,153	-4134,63	0,581474	0,494675	0,457954
-139,811	-2375,243	-4664,909	0,162272	0,171762	0,106192
115,302	-2535,643	-5142,8	0,196078	0,151151	0,146014
129,32	-2655,738	-5414,596	0,540906	0,666438	0,358399
93,449	-2887,99	-5931,528	0,385396	0,199244	0,278755
130,066	-3140,549	-6544,252	0,067613	0,061834	0,073007
-178,668	-3305,852	-7115,086	0,20284	0,151151	0,146014
-137,873	-3833,84	-7575,668	0,121704	0,096187	0,079644
147,556	-4111,309	-7918,573	0,047329	0,048093	0,046459
46,503	-4160,666	-8365,078	0,121704	0,158021	0,119466
-17,576	-4435,979	-8892,435	0,114943	0,096187	0,073007
-147,853	-4655,951	-9291,915	0,060852	0,054964	0,026548

Prema Tablici 5.2. se može izračunati da je vrijednost maksimalne snage punjenja jednog električnog vozila približno 10,3 kW. Pri modeliranju električnog vozila u softveru *DigSilent Powerfactory* su uzimani podatci mjerenih strujnih harmonika što se i vidi u Tablici 5.3. Pozicija na koja su postavljena električna vozila su odabrana proizvoljno, ali opet sa ciljem da se postigne što veća promjena u ponašanju naponskih harmonika i THD_U-a kada se započne sa isključivanjem pojedinih električnih vozila radi bolje daljnje usporedbe i analize. Pozicija svih devet električnih vozila prikazana je na Slici 5.19. Za snimanje naponskih harmonika mora se prvo u softveru *DigSilent Powerfactory* odrediti točka zajedničkog spoja (eng. *The point of common coupling*; PCC). Za tu točku je određena sabirnica KTS 16 Tenja 0,4 kV jer nam je bitan ukupan utjecaj harmonika na cijelu mrežu. Prvi slučaj za koji su snimljeni naponski harmonici je istovremeno punjenje triju električnih vozila, a naponski harmonici su prikazani na Slici 5.20.

Na početku se provodi simulacija za slučaj kada se u mreži istovremeno pune tri električna vozila. Vozila koja se pune prikazana su na Slici 5.21., dok su ostala vozila isključena. Slika 5.20. prikazuje sve neparne naponske harmonike do 39. Kako su samo tri električna vozila priključena, iznosi harmonika nisu znatno veliki. Sedmi harmonik je najdominantniji, a iznosi približno 0,17 %, uzme li se maksimalna vrijednost naponskog harmonika od triju fazi. Peti harmonik je vrlo blizu vrijednosti sedmog harmonika, a peti harmonik je približne vrijednosti od 0,16 %. Jedino je treći harmonik u prvoj fazi velik po iznosu, vrijednosti približno 0,26% , ali ga ne uzrokuju električna vozila, nego jednofazna trošila u kućanstvima koja su priključena u tome trenutku na mrežu. Ostali harmonici su također malih vrijednosti.

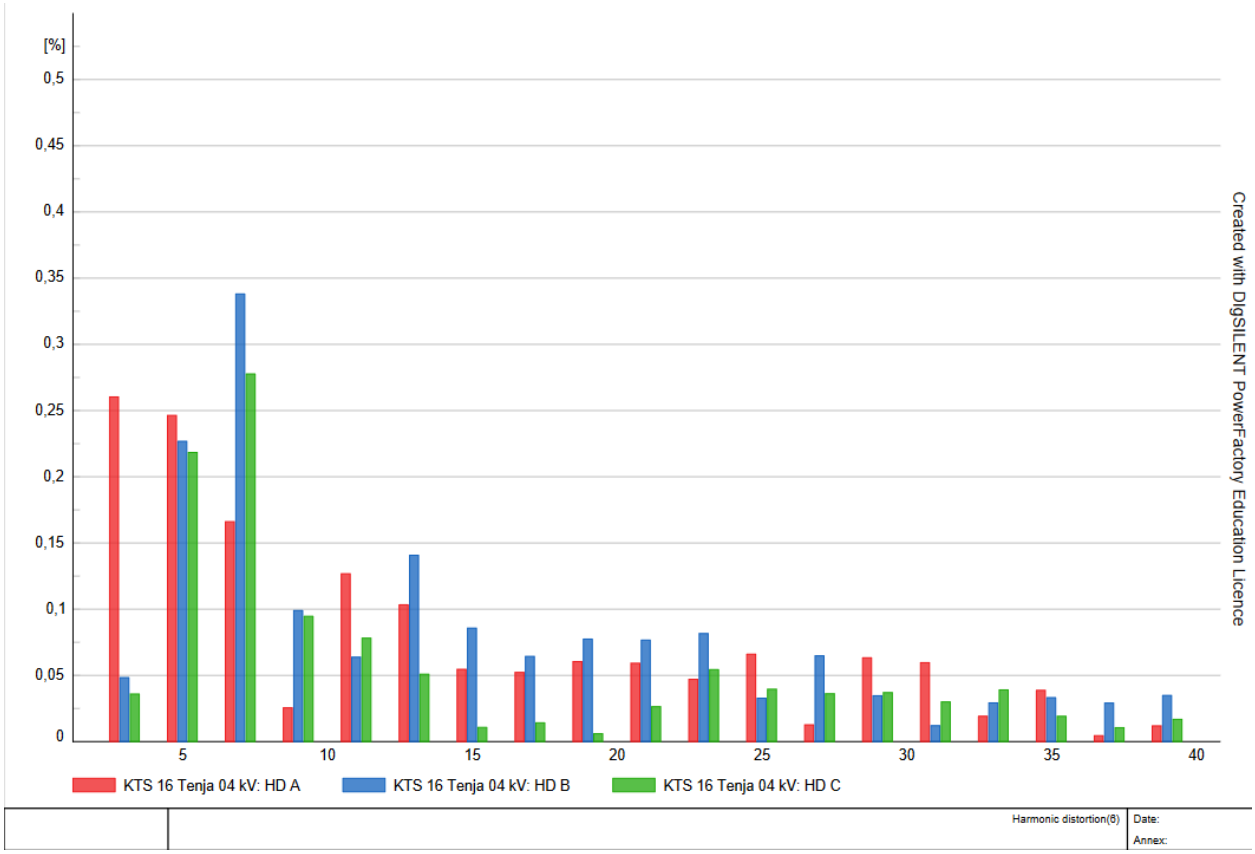


Slika 5.20. Neparni naponski harmonici za istovremeno punjenje tri električna vozila

EV_1	Grid	3pf 15h		Terminal__4		☑	3PH-'D'
EV_2	Grid	3pf 15h		Terminal__10		☐	3PH-'D'
EV_3	Grid	3pf 15h		Terminal__19		☑	3PH-'D'
EV_4	Grid	3pf 15h		Terminal__25		☑	3PH-'D'
EV_5	Grid	3pf 15h		Terminal__27		☑	3PH-'D'
EV_6	Grid	3pf 15h		Terminal__29		☐	3PH-'D'
EV_7	Grid	3pf 15h		Terminal__44		☐	3PH-'D'
EV_8	Grid	3pf 15h		Terminal__45		☑	3PH-'D'
EV_9	Grid	3pf 15h		Terminal__54		☑	3PH-'D'

Slika 5.21. Prikaz triju priključenih električnih vozila na mrežu u istom trenutku

Za idući slučaj, na niskonaponskoj mreži se pune istovremeno šest električnih vozila, a na Slici 5.23. se mogu i vidjeti koja su to. Na punjenje su priključena dodatna tri vozila, odnosno treće, peto i deveto vozilo. Zbog naknadno uključenih vozila dolazi do očigledne promjene, odnosno porasta iznosa harmonika, kao što je i prikazano na Slici 5.22. I dalje je sedmi harmonik najveći, približno 0,33 %, te ga prati peti, približno 0,24 %. Treći harmonik u prvoj fazi je i dalje visok što i potvrđuje prethodnu tvrdnju da na njega nema utjecaja od strane električnih vozila, nego su glavni uzrok jednofazna trošila u kućanstvima.

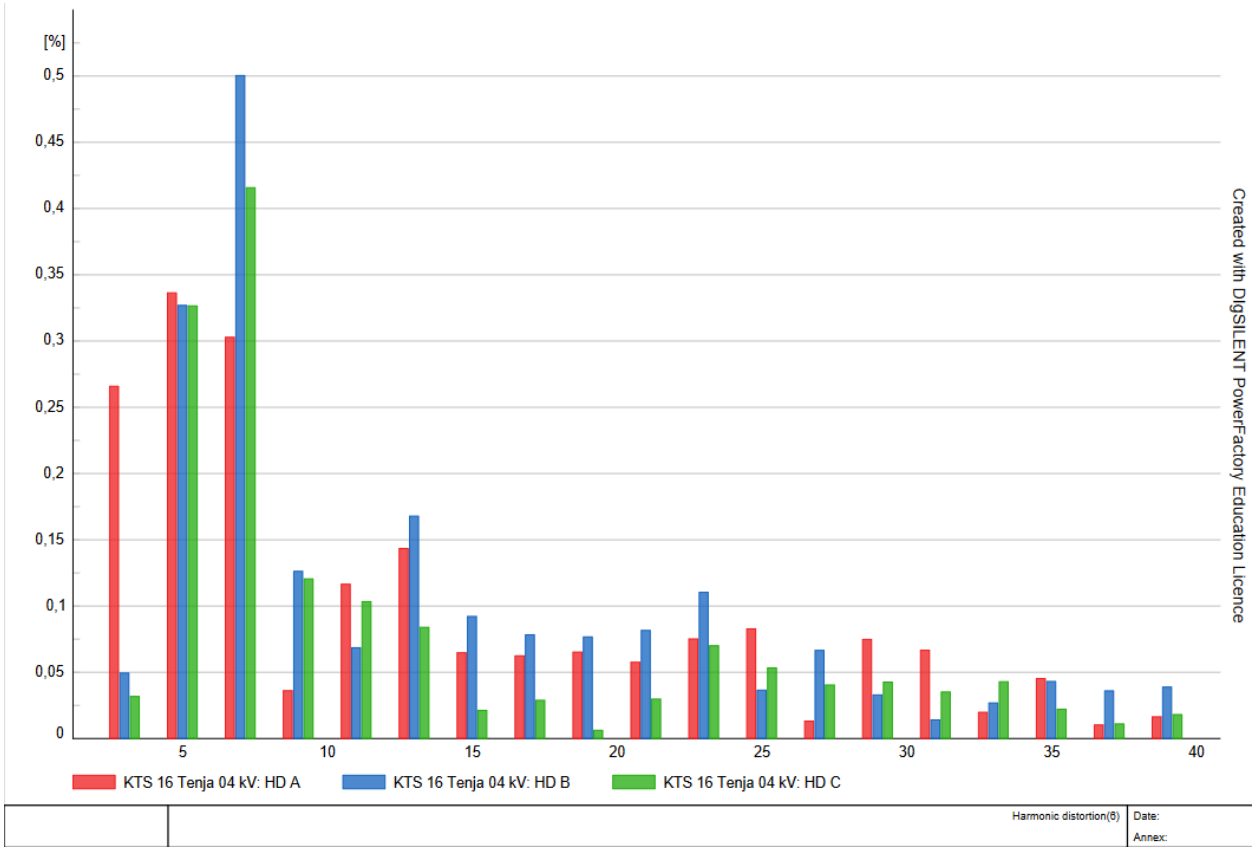


Slika 5.22. Neparni naponski harmonici za istovremeno punjenje šest električnih vozila

–	EV_1	Grid	3pf 15h		Terminal__4		☑	3PH-'D'
✓	EV_2	Grid	3pf 15h		Terminal__10		☐	3PH-'D'
✓	EV_3	Grid	3pf 15h		Terminal__19		☐	3PH-'D'
–	EV_4	Grid	3pf 15h		Terminal__25		☑	3PH-'D'
✓	EV_5	Grid	3pf 15h		Terminal__27		☐	3PH-'D'
✓	EV_6	Grid	3pf 15h		Terminal__29		☐	3PH-'D'
✓	EV_7	Grid	3pf 15h		Terminal__44		☐	3PH-'D'
–	EV_8	Grid	3pf 15h		Terminal__45		☑	3PH-'D'
✓	EV_9	Grid	3pf 15h		Terminal__54		☐	3PH-'D'

Slika 5.23. Prikaz šest uključenih električnih vozila na mrežu u istom trenutku

Te na kraju, prema Slici 5.24. se može primijetiti da pri istovremenom trofaznom punjenju svih devet električnih vozila najveću vrijednost i dalje ima sedmi harmonik, približno 0,5 %, zatim peti, približno 0,33 %, dok su preostali relativno malih iznosa u odnosu na dva prethodno navedena. Jedino je još treći harmonik u prvoj fazi velik po iznosu, ali ga ne uzrokuju električna vozila, nego jednofazna trošila u kućanstvima koja su priključena u tome trenutku na mrežu. Ujedno se vidi da su i sedmi i peti harmonik unutar dozvoljenih granica normi, koje su navedene u Tablici 5.1.



Slika 5.24. Neparni naponski harmonici za istovremeno punjenje devet električnih vozila

Kroz prethodna tri slučaja se može donijeti zaključak da iako je iznos harmonika vrlo nizak i unutar dozvoljenih granica, sa većim brojem električnih vozila istovremeno punjenih preko mreže, u mreži dolazi do znatnog porasta sedmog i petog harmonika.

Nadalje je promatran iznos THD_U -a i iznos najdominantnijeg harmonika, u slučaju ove simulacije sedmog harmonika. Prikaz porasta vrijednosti najdominantnijeg, sedmog harmonika, se vidi u Tablici 5.4. i potvrđuje prethodnu tvrdnju da s povećanjem brojem električnih vozila dolazi do većeg utjecaja harmonika na mrežu, osobito najdominantnijeg.

Tablica 5.4. Prikaz porasta vrijednosti najdominantnijeg, sedmog harmonika, s povećanjem broja električnih vozila u mreži

	HD A, %	HD B, %	HD C, %
3 električna vozila	0,068	0,1776	0,1412
6 električna vozila	0,1661	0,3381	0,2777
9 električna vozila	0,3028	0,5004	0,4157

U Tablici 5.5 su prikazane vrijednosti petog harmonika ovisno o broju priključenih električnih vozila na punjenje.

Tablica 5.5. Prikaz porasta vrijednosti petog harmonika s povećanjem broja električnih vozila u mreži

	HD A, %	HD B, %	HD C, %
3 električna vozila	0,1683	0,1349	0,1116
6 električna vozila	0,2463	0,2268	0,2177
9 električna vozila	0,3364	0,3269	0,3265

Ako se usporede vrijednosti iz Tablice 5.4. i Tablice 5.5. ponovo se potvrđuje prethodna tvrdnja kako je sedmi harmonik najdominantniji.

Jedan od glavnih i najbitnijih pokazatelja kvalitete električne energije u sustavu je THD_U. Iznos ukupnog THD_U-a je dan u Tablici 5.6.

Tablica 5.6. Prikaz THD_U-a ovisno o broju istovremeno punjenih električnih vozila

	THD A, %	THD B, %	THD C, %	Ukupni THD_U, %
3 električna vozila	0,3776	0,327	0,2231	0,3159
6 električnih vozila	0,4611	0,4923	0,3939	0,451
9 električnih vozila	0,5934	0,6784	0,5745	0,6171

Kako THD_U predstavlja ukupno harmonijsko izobličenje signala, može se zaključiti prema prethodno analiziranim naponskim harmonicima da će sa porastom broja istovremeno punjenih električnih vozila rasti i vrijednost THD_U-a u mreži. Upravo to potvrđuje i Tablica 5.6. Za slučaj kada su istovremeno punjeni bili svega tri električna vozila, THD_U je iznosio 0,3159%, za drugi

slučaj kod istovremeno punjenih šest električnih vozila je iznosio THD_U 0,451%, a za zadnji slučaj kada su sva vozila, njih devet, se istovremeno punili, THD_U je iznosio 0,6171 %. Time je trend porasta vidljiv.

Iako je vrijednost samog THD_U-a dobivenog simulacijom vrlo mala, tako ujedno ni broj električnih vozila nije predstavljao realan broj vozila koja će se u budućnosti puniti u kućanstvima. Očigledno je da će sa većim brojem električnih vozila priključenih na mrežu izazivati veće naponske varijacije, porast neparnih harmonika te tako i rast samog THD_U-a. U Tablici 5.1. prikazano je da THD_U mora biti manji od 8%, ali prema dosadašnjim iskustvima ne bi trebao prelaziti ni 5% jer u tome trenutku već nastupaju problemi u mreži.

6. ZAKLJUČAK

Diplomski rad je fokusiran na utjecaj punjača električnih vozila na kvalitetu električne energije. Zahvaljujući mjerenjima i simulacijama izvedenima u poglavlju 5. uočeno je da punjači električnih vozila imaju značajan utjecaj na kvalitetu električne energije, osobito kada se poveća broj vozila koja se istovremeno pune. Uz pomoću softvera *WinPQ Mobile* je rađena analiza mjerenja, a analiza je pokazala kako kod jednofaznog punjenja dolazi do problema sa 3. strujnim harmonikom koji se zatvara kroz neutralni vodič, a trofazno punjenje izaziva povišene vrijednosti 5. i 7. harmonika. Na primjeru jednofaznog i trofaznog punjenja uočeno je da nesimetrija napona varira ovisno o vrsti punjenja, pri čemu jednofazno punjenje uzrokuje veću nesimetriju u odnosu na trofazno punjenje.

Simulacija provedena u softveru *DigSilent PowerFactory* s trofaznim punjenjem devet, šest i tri električna vozila otkriva kako dolazi do promjena u ponašanju naponskih harmonika, što ima direktan utjecaj na kvalitetu električne energije u mreži. Pri punjenju većeg broja vozila, sedmi i peti harmonik pokazuju tendenciju povećanja, što može rezultirati pogoršanjem kvalitete električne energije. Iako su harmonici ostali unutar dozvoljenih granica, njihov porast s povećanjem broja punjača ukazuje na potencijalne probleme u budućnosti, pogotovo ako se poveća broj električnih vozila na mreži. Također je kroz simulaciju popraćena promjena THD_U-a, ili ukupnog harmonijskog izobličenja. Dolazi se do zaključka kako s većim brojem električnih vozila punjenih preko električne mreže raste i vrijednost THD_U-a što također predstavlja problem za implementaciju većeg broja električnih vozila u budućnosti. Ključni problem koji se pojavio tijekom simulacije jest postavljanje ograničenog broja električnih vozila koja se mogu istovremeno puniti. Maksimalan broj od devet vozila je određen zbog prevelikog pada napona na sabirnicama pri dodavanju većeg broja vozila. Ovaj pad napona mogao bi ugroziti stabilnost mreže te dovesti do prekoračenja granica dozvoljene varijacije napona prema normi EN 50160. Nemogućnost implementacije većeg broja punjača zbog tehničkih ograničenja sugerira potrebu za daljnjim istraživanjima i optimizacijom sustava punjenja.

U budućnosti će biti potrebno razviti naprednije metode upravljanja punjenjem i integracijom električnih vozila u mrežu kako bi se izbjegli problemi poput pada napona i prekomjernog porasta harmonika. Predložena rješenja uključuju razvoj pametnih mreža koje bi mogle optimizirati raspodjelu opterećenja i smanjiti negativne utjecaje na kvalitetu električne energije. Također, uvođenje naprednih algoritama za upravljanje punjenjem moglo bi pomoći u izbjegavanju kritičnih situacija na mreži te omogućiti veći broj istovremeno priključenih vozila bez ugrožavanja

stabilnosti mreže. Zaključno, rezultati simulacija ukazuju na to da je povećanje broja električnih vozila izazov za postojeću mrežu, ali se isti može prevladati uz odgovarajuće tehničke prilagodbe i optimizaciju. Budući razvoj punjača i infrastrukture za punjenje ključan je za podršku sve većem broju električnih vozila, a time i za održavanje kvalitete električne energije unutar prihvatljivih granica.

LITERATURA

[1] Dugan R. C., McGranaghan M.F., Santoso S., Beaty H. W.: *Electrical Power System Quality, Second Edition*, McGraw-Hill, New York, 2004.

[2] Baggini A.: *Handbook of Power Quality*, John Wiley & Sons, England, 2008.

[3] Baldursson F. M., Carlson E. W., von der Fehr N. H. M.: *Electric vehicles roll-out in Europe towards an improved regulatory regime,* Centre on Regulation in Europe asbl (CERRE), 2019.

[4] Anderson C. D., Anderson J.: *Electric and Hybrid Cars A History*, Second Edition, McFarland & Company, Inc., North Carolina, 2010.

[5] Azzopardi B., Gabdullin Y.: *Impacts of Electric Vehicles Charging in Low-Voltage Distribution Networks: A Case Study in Malta*, Energies, MDPI, vol. 17(2), stranice 1-18, 2024. dostupno na: https://www.mdpi.com/1996-1073/17/2/289, 11.04.2024.

[6] Nutkani I., Toole H., Fernando N., Andrew L. P. C.: *Impact of EV charging on electrical distribution network and mitigating solutions*, John Wiley & Sons Ltd on behalf of The Institution of Engineering and Technology, 2024. dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/378041065_Impact_of_EV_charging_on_electrical_distribution_network_and_mitigating_solutions_-_A_review, 11.04.2024.

[7] Qiu Y. L., Wang Y. D., Iseki H., Shen X., Xing B., Zhang H.: *Empirical grid impact of in-home electric vehicle charging differs from predictions*, Elsevier, 2022. dostupno na: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0928765521000609, 11.04.2024.

[8] Hungbo M., Gu M., Meegahapola L., Littler T., Bu S.: *Impact of electric vehicles on low-voltage residential distribution networks: A probabilistic analysis*, John Wiley & Sons Ltd on behalf of The Institution of Engineering and Technology, 2023. dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/372960584_Impact_of_electric_vehicles_on_low-voltage_residential_distribution_networks_A_probabilistic_analysis, 11.04.2024.

[9] Genevois M. E., Cedolin M.: *Recharging Stations Implemantation for Electric Vehicles*, International Journal of Energy and Environment, vol. 12, 2018. dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/325088896_Recharging_Stations_Implemantation_for_Electric_Vehicles, 11.04.2024.

[10] Nour M., Ramadan H., Ali A., Farkas C.: *Impacts of Plug-In Electric Vehicles Charging on Low Voltage Distribution Network*, InternationalConference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE 2018), Aswan University, Egypt, 2018. dostupno na:

https://www.researchgate.net/publication/323342227_Impacts_of_Plug-In_Electric_Vehicles_Charging_on_Low_Voltage_Distribution_Network, 11.04.2024.

[11] Jha A.: *Electric vehicle charger*, Conference: 3 Day FDP Program on EV Integrated with Renewable Energy Sources, Under EAP, TEQIP-III, JNTU, Hyderabad at CMR College of EngineeringAt: HyderabadAffiliation: CMR College of Engineering & Technology, 2021. dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/349767681_ELECTRIC_VEHICLE_CHARGER, 11.04.2024.

[12] Tvrtka Vestel: *Electric vehicle chargers 2023-2024*, Vestel, Manisa, Turkey, 2024.

[13] Islam M. S., Ahsan M. S., Rahman M. K., Tanvir F. A.: *Advancements in Battery Technology for Electric Vehicles: A Comprehensive Analysis of Recent Developments*, Global Mainstream Journal of Innovation, Engineering & Emerging Technology, Texas, USA, vol. 02, 2023. dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/376032591_Advancements_in_Battery_Technology_for_Electric_Vehicles_A_Comprehensive_Analysis_of_Recent_Developments, 11.04.2024

[14] Stojkov M., Gašparović D., Pelin D., Glavaš H., Hornung K., Mikulandra N.: *Električni automobil - povijest razvoja i sastavni dijelovi*, 12. skup o prirodnom plinu, toplini i vodi, 5. međunarodni skup o prirodnom plinu, toplini i vodi, Strojarski fakultet Sveučilišta u Slavonskom Brodu, Osijek, 2014, str. 222-230, dostupno na: https://www.croris.hr/crosbi/publikacija/prilog-skup/614647, 16.04.2024.

[15] Wilson K. A.: *Worth the Watt: A Brief History of the Electric Car, 1830 to Present,* Car and Driver, 2023., dostupno na: https://www.caranddriver.com/features/g43480930/history-of-electric-cars/, 06.05.2024.

[16] Autostart: *Broj električnih vozila u Hrvatskoj zabilježio velik rast u 2023*., 2024., dostupno na: https://autostart.24sata.hr/novosti/broj-elektricnih-vozila-u-hrvatskoj-zabiljezio-velik-rast-u-2023-8623, 06.05.2024.

[17] Ready T.B., Linden D.: *Handbook of Batteries, Third Edition*, McGraw-Hill, New York, 2001.

[18] Acharige S. S. G., Haque M. E., Arif M. T., Hosseinzadeh N., Hasan K. N., Oo A. M. T.: *Review of Electric Vehicle Charging Technologies, Standards, Architectures, and Converter Configurations*, IEEE, 2023. dostupno na : https://www.researchgate.net/publication/370036926_Review_of_Electric_Vehicle_Charging_Technologies_Standards_Architectures_and_Converter_Configurations, 06.05.2024.

SAŽETAK

U diplomskom radu je obrađena tema utjecaja punjača električnih vozila na kvalitetu električne energije. Sve se više pridaje pozornosti na rješavanje ekoloških problema te je jedan od načina za smanjenje onečišćenja okoliša postupno izbacivanje vozila pogonjenih fosilnim gorivom te implementacija električnih vozila. U prvom dijelu rada je opisana ukratko cijela povijest električnih vozila, zatim svi glavni dijelovi električnih vozila poput elektromotora i baterije. Također su detaljnije opisani punjači električnih vozila.

Problem koji se javlja kod implementacije velikog borja električnih vozila u postojeću infrastrukturu je značajan utjecaj na kvalitetu električne energije. Upravo zato je u daljnjem dijelu rada opisana sama kvaliteta električne energije i svi parametri koji opisuju kvalitetu.

Glavni dio rada čine analiza mjerenih podataka koji su dobiveni punjenjem električnog vozila tijekom jednog ciklusa i simulacija modela mreže na kojoj se postepeno povećavao broj istovremeno punjenih električnih vozila. Kod analize mjerenih podataka i kod simulacije se obratila pozornost na utjecaj punjenja električnih vozila preko punjača na kvalitetu električne energije. Uz pomoću mjernog uređaja PQ-Box 200 i softvera *WinPQ Mobile* je odrađena analiza mjerenih podataka, a simulacija modela mreže je provedena u softveru *DigSilent Powerfactory*.

Na kraju se dolazi do zaključka kako implementacija velikog broja električnih vozila ima značajan utjecaj na kvalitetu električne energije te da postojeća električna mreža ne može podržati velik broj električnih vozila.

Ključne riječi: električna vozila, punjači, kvaliteta električne energije, DigSilent, harmonici

ABSTRACT

The thesis addresses the topic of the impact of electric vehicle chargers on power quality. Increasing attention is being given to solving environmental issues, and one of the ways to reduce pollution is the gradual phasing out of fossil fuel-powered vehicles and the implementation of electric vehicles. The first part of the thesis briefly describes the entire history of electric vehicles, followed by an overview of the main components of electric vehicles, such as the electric motor and battery. The electric vehicle chargers are also described in greater detail.

The problem that arises with the implementation of a large number of electric vehicles in the existing infrastructure is their significant impact on power quality. Therefore, the subsequent section of the thesis describes power quality itself and all the parameters that define it.

The main part of the thesis consists of an analysis of the measured data obtained during the charging of an electric vehicle over a single cycle and a simulation of a network model in which the number of simultaneously charged electric vehicles was gradually increased. The analysis of the measured data and the simulation focused on the impact of charging electric vehicles via chargers on power quality. The measured data was analyzed using the PQ-Box 200 measuring device and *WinPQ Mobile* software, while the network model simulation was conducted using *DigSilent PowerFactory* software.

In conclusion, it was determined that the implementation of a large number of electric vehicles has a significant impact on power quality and that the existing electrical grid cannot support a large number of electric vehicles.

Keywords: electric vehicles, chargers, power quality, DigSilent, harmonics

ŽIVOTOPIS

Zlatko Đuzel rođen je 28. rujna 2000. godine u Slavonskom Brodu. Osnovnu školu „Ivan Filipović“ pohađao je u Velikoj Kopanici. Sudjelovao je na raznim natjecanjima, uključujući županijsko natjecanje iz kemije gdje je osvojio drugo mjesto. Nakon završetka osnovne škole upisuje Tehničku školu Slavonski Brod. Tijekom srednjoškolskog obrazovanja, sudjelovao je na županijskom natjecanju iz fizike, osvojivši treće mjesto, te na državnom natjecanju iz osnova elektrotehnike i mjerenja u elektrotehnici. Također, prošao je obuku iz elektropneumatike i električnog upravljanja u Škofjoj Loki, Slovenija. Završio je srednju školu s odličnim uspjehom, što mu je omogućilo direktan upis na Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, na prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike. Završio je tri godine prijediplomskog studija elektrotehnike i informacijske tehnologije u roku te odmah nastavio na sveučilišni diplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika, s modulom DEA - Elektroenergetski sustavi. Na ljeto 2024. godine odlazi na razgovor za posao kao nastavnik u Tehničkoj školi Slavonski Brod. Na početku 9. mjeseca započinje sa radom kao nastavnik.

_____

Potpis autora