

Utjecaj električnih vozila na kvalitetu električne energije

Mesić, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:435648>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**

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 ELEKTRIČNIH VOZILA NA KVALITETU
ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Diplomski rad

Josip Mesić

Osijek, 2021

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

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 17.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Ime i prezime studenta:	Josip Mesić
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-1249, 06.10.2019.
OIB studenta:	68832012639
Mentor:	Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Član Povjerenstva 1:	Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
Član Povjerenstva 2:	Zvonimir Šimić
Naslov diplomskog rada:	Utjecaj električnih vozila na kvalitetu električne energije
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	Opisati električna vozila - povijest i razvoj te vrste. Objasniti pojam kvaliteta električne energije te detaljno opisati više harmonike. Objasniti utjecaj punjenja električnih vozila na kvalitetu električne energije u elektrodistribucijskoj mreži. Analizirati rezultate mjerenja punjenja električnih automobila na javnoj punionici.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	17.09.2021.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 30.09.2021.

**Ime i
prezime
studenta:**

Josip Mesić

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br.
studenta,
godina
upisa:**

D-1249, 06.10.2019.

**Turnitin
podudaranje
[%]:**

3

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

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

i sumentora

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 studenta:

Sadržaj

1. UVOD	1
2. ELEKTRIČNA VOZILA	2
2.1. Povijest i razvoj	2
2.2. Potrošnja energije.....	3
2.3. Punionice	4
2.4. Vrste električnih vozila	6
3. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE	8
3.1. Što je to kvaliteta električne energije?.....	8
3.2. Harmonici	10
3.3. THD	12
3.4. TDD	13
3.5. Flikeri	13
3.6. Jalova snaga	14
4. UTJECAJ PUNJENJA ELEKTRIČNIH VOZILA NA MREŽU	16
4.1. Utjecaj prilikom punjenja na kućnom priključku	17
4.2. Utjecaj prilikom punjenja na javnoj punionici	18
4.3. Utjecaj na trošila i opremu u distributivnoj mreži.....	19
4.4. Filtri	20
4.4.1. Pasivni filtri	20
4.4.2. Aktivni filtri	21
4.5. K-faktor.....	22
5. ANALIZA MJERENJA	24
6. ZAKLJUČAK	45
LITERATURA	46
SAŽETAK	48
SUMMARY	49

1. UVOD

Električna vozila su sve prisutnija na prometnicama diljem svijeta te kao takva predstavljaju novu vrstu električnih trošila. To su u pravilu trošila velikih snaga kojima je cilj napuniti bateriju u što kraćem vremenu i nastaviti s putovanjem. Sa stanovišta elektroenergetskog sustava ovo predstavlja novi izazov jer je potrošnja nepredvidiva u vidu iznosa i vremena trajanja.

Pojavom velike količine električnih vozila, koja su u svojoj naravi nelinearna trošila, predviđa se značajan utjecaj na distributivnu mrežu, poglavito u pogledu kvalitete električne energije. Taj utjecaj se može bitno razlikovati ovisno o tome puni li se vozilo na kućnom priključku ili na javnoj punionici, koja je za tu potrebu namijenjena. Prema potrebi, između punionice i mreže može se priključiti filter kako bi se smanjio povratni utjecaj na mrežu. Osim utjecaja na kvalitetu električne energije pojavljuje se i problem povećanja potrošnje te tako u slučajevima vršne potrošnje može doći do nedostatka kapaciteta u isporuci električne energije i problema preopterećenja postojećeg distributivnog sustava.

Na primjeru mjerenja s jedne javne punionice koje je provedeno tokom jednog tjedna bit će dan pregled svih bitnih parametara te opisana njihova promjena tijekom ciklusa punjenja električnog vozila. Nadalje, obratit će se pozornost na pokazatelje kvalitete električne energije i zadovoljavaju li oni europsku normu EN 50160, kao i njihov eventualni utjecaj na mrežu na mjestu priključka punionice.

U prvom poglavlju je uvodno razmatranje o temi, u drugom poglavlju je opisano općenito o električnim vozilima, u trećem poglavlju je dan uvid u kvalitetu električne energije i njezine parametre, u četvrtom poglavlju je dan pregled utjecaja punjenja električnih vozila na mrežu, u petom poglavlju analiza mjerenja i u šestom poglavlju zaključak na osnovu mjerenja.

2. ELEKTRIČNA VOZILA

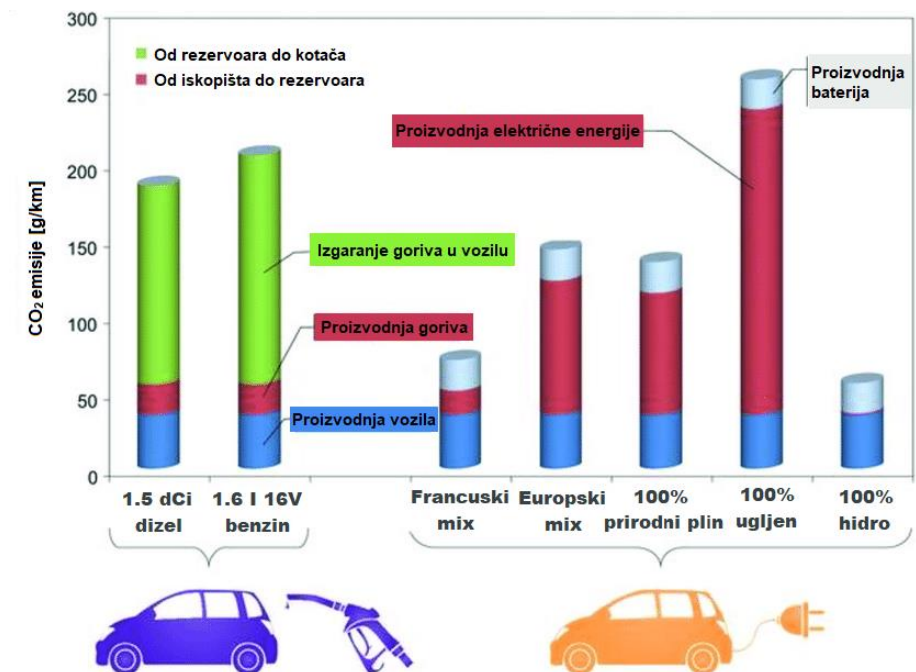
Električna vozila (engl. *Electric Vehicles, EV*) imaju jedan ili više električni motor umjesto motora s unutarnjim izgaranjem. Takva vozila koriste velike baterije koje napajaju električne motore i pune se preko kućnih priključaka ili javnih punionica. Kako se za pogon koristi električna energija, samo vozilo ne emitira ispušne plinove i ne sadrži rezervoar s tekućim gorivom. Današnja električna vozila u pravilu imaju manji domet po punjenju od konvencionalnih automobila i infrastruktura punionica je daleko slabije razvijena nego za tekuća goriva. Gustoća energije u baterijama je manja nego u klasičnim gorivima i često je potrebno puno više vremena za njihovo punjenje u usporedbi sa punjenjem standardnih vozila. Uzevši to u obzir i činjenicu da infrastruktura nije dovoljno razvijena, uz trenutnu visoku cijenu samih vozila, sasvim je razumno da ljudi nisu motivirani za prijelaz na električna vozila. Međutim, domet i infrastruktura se svakodnevno usavršavaju čime električna vozila postaju sve konkurentnija. Električna vozila imaju niske troškove održavanja jer imaju manje pokretnih dijelova i ekološki su prihvatljivija jer koriste malo ili uopće ne koriste fosilna goriva. Iako neka vozila koriste olovne ili NiMH baterije, standard za moderna vozila se smatraju litij-ionske baterije koje imaju duži vijek trajanja i odlične su za skladištenje energije.

2.1. Povijest i razvoj

Prva pojava električnih vozila seže u sredinu 19. stoljeće kada se pojavljuju prvi jednostavniji modeli. To su uglavnom bila manja vozila za osobnu upotrebu, male najveće brzine i kratkog dosega uz veliku masu baterija, koje u nekim slučajevima nisu bile ni punjive. Razvojem motora i olovnih baterija, krajem 19. i početkom 20. stoljeća raste interes za električnim vozilima, pa ona postaju komercijalna, pogotovo zbog toga što su imali prednosti nad vozilima sa unutarnjim izgaranjem. Unaprjeđenjem motora sa unutarnjim izgaranjem električna vozila postaju neisplativa sve do kraja 20. stoljeća kada se zbog velike potrošnje goriva i zagađenja traže ekološki prihvatljivija rješenja. Proizvodnja električnih vozila koja su konkurentna klasičnim vozilima postignuto je 2000-ih kombinacijom MOSFET-a i mikrokontrolera koji omogućuju visoke sklopne frekvencije što olakšava vožnju i smanjuje gubitke te ugradnjom litij-ionske baterije koja omogućava skladištenje dovoljne količine energije za daleka putovanja.

2.2. Potrošnja energije

Električnu energiju, za razliku od tekućih goriva, nije tako jednostavno skladištiti, što sa stajališta kvalitete zraka predstavlja pozitivnu stranu, jer se sva proizvodnja električne energije i emisija stakleničkih plinova nastala tokom proizvodnje energije odvija izvan gradova i u slabije naseljenim područjima što smanjuje zagađenje zraka u urbanim sredinama. Iako električna vozila na prvu izgledaju kao da ne zagađuju okoliš to nije u potpunosti tačno, jer njihova proizvodnja, proizvodnja električne energije i samih baterija imaju određenu emisiju CO₂. Tako, ovisno o izvoru energije, emisija CO₂ po kilometru može uvelike varirati što je vidljivo na slijedećoj slici.



Sl. 2.1. Usporedba emisije CO₂ po kilometru za dizelski, benzinski i električni automobil [1]

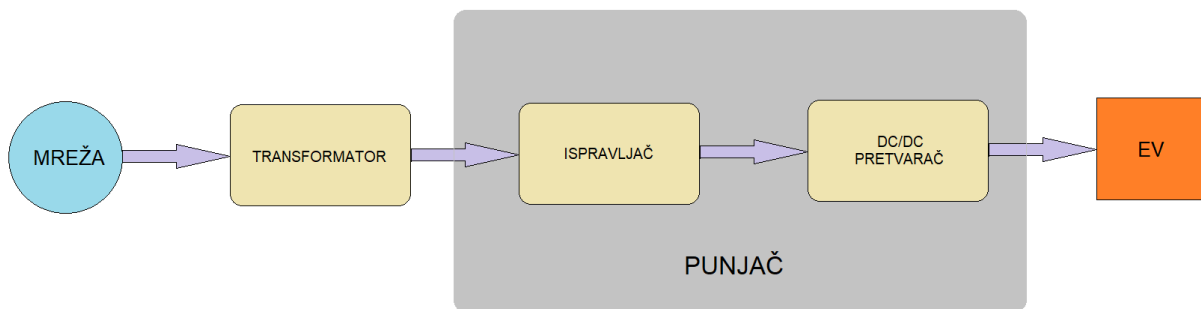
Najprihvatljivije je ukoliko se energija dobiva iz hidroelektrana, jer u tom slučaju tokom proizvodnje energije ne dolazi do emisija CO₂, a najlošije je u slučaju termoelektrana na ugljen jer su tada emisije CO₂ po kilometru čak i veće nego kod dizelskih i benzinskih automobila. Također ukoliko se električno vozilo koristi u Europi, u prosjeku je zagađenje manje nego da se koristi dizelski ili benzinski automobil, zbog velikog udjela obnovljivih izvora energije.

2.3. Punionice

U pravilu postoje dvije kategorije punionica, javne i privatne. Pristup javnim punionicama imaju svi i u Republici Hrvatskoj još uvijek se ne naplaćuje njihovo korištenje. Privatne punionice nalaze se kod kuće i one su značajno manjih snaga. Detaljnije o ovim kategorijama opisano je u 4. poglavlju.

Punionice se također mogu podijeliti i po vrsti napajanja koje koriste pa tako mogu biti jednofazne ili trofazne. Njihov izlazni napon može biti istosmjerni ili izmjenični.

Svaka punionica, neovisno o vrsti, na ulazu je priključena na jednofaznu ili trofaznu mrežu, a na izlazu na električno vozilo. Ono što se nalazi između ta dva elementa može se uvelike razlikovati ovisno o tipu punionice. Na slici 2.2. prikazana je principijelna shema za istosmjernu punionicu. Napajanje iz mreže priključeno je na transformator koji prilagođava naponsku razinu na željenu, zatim na ispravljač koji ispravlja izmjenični napon u istosmjerni te na kraju DC/DC pretvarač koji pretvara ispravljeni istosmjerni napon na potrebnu razinu za punjenje.



Sl. 2.2. Shematski prikaz istosmjerne punionice [2]

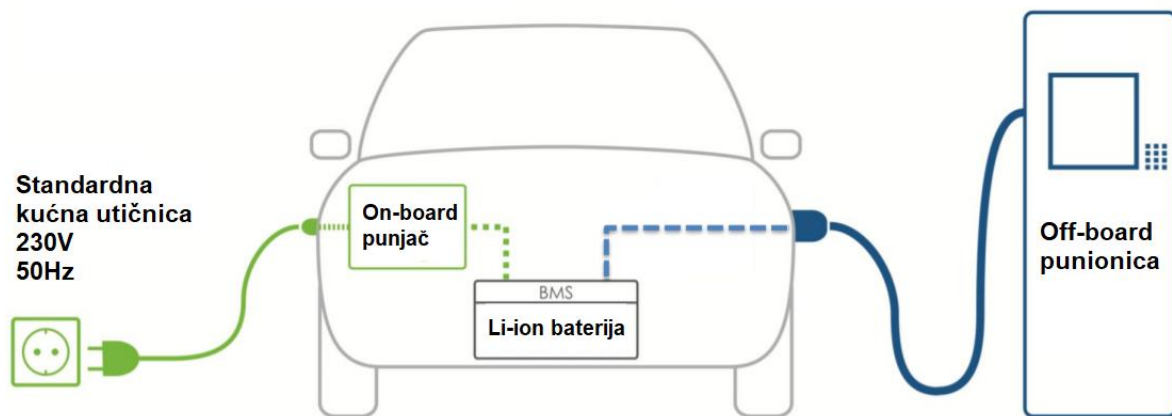
Brze punionice se mogu podijeliti na izmjenične punionice (AC) ili istosmjerne. Od istosmjernih se najviše koriste CHAdeMO (engl. *Charge de Move*) i SAE Combo (ili CCS, engl. *Combo Charging System*). Ove dvije vrste se međusobno ne mogu mijenjati, odnosno ne mogu se koristiti jedna umjesto druge. Treća bitna verzija je ona za vozila Tesla koja se razlikuje od svih, ali uz određene adaptore se može koristiti na ostalim punionicama.

Tab. 2.1. *Vrste punionica električnih vozila [3]*

Tip	Vrsta	Snaga [kW]	Upotreba
1	Spora punionica	3,6	Kućna punionica, parking
2	Polu-brza punionica	22	Uredi, javne punionice
3	Brza punionica	24 - 300	Autoceste, urbana područja

Bitna razlika kod električnih vozila je način punjenja, odnosno priključuje li se vozilo direktno na gradsku mrežu ili preko punionice. Tako se razlikuju dvije verzije punjača [4]: „*on-board*“ i „*off-board*“. *On-board* ili sustav koji je ugrađen u vozilo se uglavnom koristi kod hibridnih vozila i u tom slučaju se vozilo puni direktno iz gradske mreže. Takav punjač se nalazi u samom automobilu i služi za pretvorbu izmjeničnog napona u istosmjerni potreban za punjenje baterije. Ovakvi punjači se mogu razlikovati po razini snage pa time i brzini punjenja. Prednost ovakvog sustava je što se napaja iz obične kućne utičnice koje su prisutne na svakom koraku. Također pruža dvosmjernan tok energije pa vozilo osim što uzima energiju iz mreže može ju i vratiti. Ova mogućnost pretvara vozilo u prijenosno „skladište energije“ koja može služiti za uravnoteženje energije u mreži ili pružanje izvora energije na mjestima gdje je to potrebno. Naravno, nedostatak je što takav sustav zauzima prostor u vozilu, zagrijava se prilikom punjenja i povećava masu vozila. Još jedan nedostatak je vrijeme punjenja koje je značajno duže nego kod standardnih punionica.

Off-board sustav s druge strane koristi vanjske punionice koje iz mreže uzimaju energiju i prilagođavaju u oblik prikladan za punjenje vozila. Njihova glavna značajka je mogućnost da u relativno kratkom vremenu napune bateriju vozila. Također punionice mogu biti puno većih dimenzija što omogućuje veće snage i bolje performanse punjenja. Uz to nema potrebe da svako vozilo ima svoje sklopovlje jer jednu punionicu može koristiti više vozila. Glavni nedostatak je dostupnost punionica čija infrastruktura još nije dovoljno razvijena. Na slijedećoj slici prikazana je usporedba *on-board* i *off-board* načina punjenja.



Sl. 2.3 Usporedba *on-board* i *off-board* načina punjenja [5]

2.4. Vrste električnih vozila

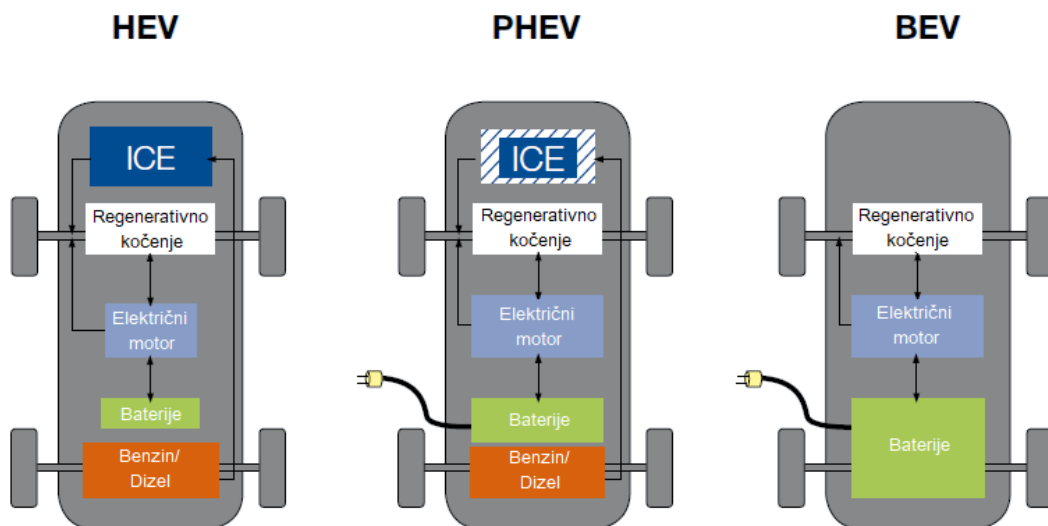
Električna vozila su, osim električnih automobila, također električni vlakovi, bicikli, skuteri, romobili i slično, ali oni nisu tema ovog rada jer se ne priključuju na punionicu električnih vozila. Postoje tri bitne podjele električnih vozila prema tehnologiji izvedbe [6]:

- HEV (Hibridna električna vozila, engl. *Hybrid Electric Vehicles*)
- PHEV (Plug-in hibridna električna vozila, engl. *Plug-in Hybrid Electric Vehicles*)
- BEV (Električna vozila na baterije, engl. *Battery Electric Vehicles*)

HEV sadrže motor sa unutarnjim izgaranjem (ICE) koji se pokreće na konvencionalna tekuća goriva, ali također sadrži električni motor i bateriju. Takva vozila imaju malu bateriju koja preko električnog motora potpomaže motor sa unutarnjim izgaranjem i dio energije kočenja vraća u baterije, tzv. regenerativno kočenje. Ova vozila se ne mogu puniti iz vanjskog izvora električne energije.

PHEV, kao i HEV sadrži i motor sa unutarnjim izgaranjem i električni motor koji se napaja iz baterije. U ovom slučaju baterije se mogu puniti na tri različita načina [6]: priključivanjem na električnu mrežu, preko motora sa unutarnjim izgaranjem ili regenerativnim kočenjem.

BEV se također nazivaju potpuno električna vozila (engl. *all-electric vehicles*) jer ne sadrže motor sa unutarnjim izgaranjem. Njihov jedini izvor energije je baterija koja je veća nego u prethodno navedenim verzijama.



Sl. 2.4. Usporedba tehnologija izvedbi električnih vozila [7]

3. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

3.1. Što je to kvaliteta električne energije?

Kvaliteta električne energije (engl. *Power Quality, PQ*) definirana je normom EN 50160, to je europska norma koja definira kvalitetu napona na priključnoj točki potrošača (engl. *Point of Common Coupling, PCC*) sa javnom niskonaponskom, sredjenaponskom i visokonaponskom distributivnom mrežom pri normalnim pogonskim uvjetima.

Kvaliteta električne energije (KEE) se odnosi na skup ograničenja koja omogućavaju sustavu električne energije da funkcionira na odgovarajući način. Koristi se za opisivanje električne energije koja se koristi za pogon električnih uređaja i mogućnost uređaja da normalo funkcionira koristeći tu istu energiju. Bez kvalitetne električne energije uređaji mogu imati poteškoće u normalnom radu, može doći do trajnih posljedica ili uopće neće raditi na takvoj mreži. Postoje mnogi uzroci koji mogu dovesti do narušavanja kvalitete električne energije, a u novije vrijeme najveći izazov su nelinearna trošila. Trenutno je velik interes za kvalitetom električne energije jer su sve veći ekonomski gubici operatorima mreže i njihovim korisnicima. Trošak povezan s manjkom kvalitete može biti ogroman, pogotovo za industrijske korisnike jer u slučaju zastoja proizvodne linije može biti potrebno i nekoliko sati da se proizvodnja nastavi, što za sobom vuče velike financijske štete.

Uređaji i oprema koji se koriste u modernim industrijskim postrojenjima i komercijalnim objektima su osjetljiviji nego oni koji su se koristili u prošlosti. S druge strane, ti isti uređaji koji su osjetljivi često istovremeno i uzrokuju naponske smetnje za druge korisnike ili čak sami za sebe.

Analiza kvalitete električne energije obično obuhvaća sljedeće osobine napona: naponski propadi i prekidi, naponska kolebanja, harmonici i međuharmonici, prijelazni prenaponi, valovitost (viši harmonici), naponska nesimetrija, promjene osnovne frekvencije mreže, prisutnost DC komponente u AC komponenti, prisutnost signalnih napona. [8]

Tab. 3.1. Parametri kvalitete električne energije prema normi EN 50160

Parametri	Vrijeme usrednjavanja	Granične vrijednosti tijekom 95% tjedna	Granične vrijednosti tijekom cijelog tjedna
Kolebanje napona	10 min	+/- 10%	
Treperenje (Flikeri)	$P_{st} - 10 \text{ min}$ $P_{lt} - 120 \text{ min}$	$P_{lt} < 1$	
Harmonici	10 min	Sl. 3.2.	
THD	10 min	< 8%	
Signalni napon	3 s	< 5% U_n (1-10 kHz) u 99% od 24 h	
Frekvencija	10 s	+/- 1%	+ 4% / - 6%
Nesimetričnost	10 min	< 2%	
Naponski propadi	10 ms	Nije egzaktno definirano	
Prekidi	10 ms	Nije egzaktno definirano	

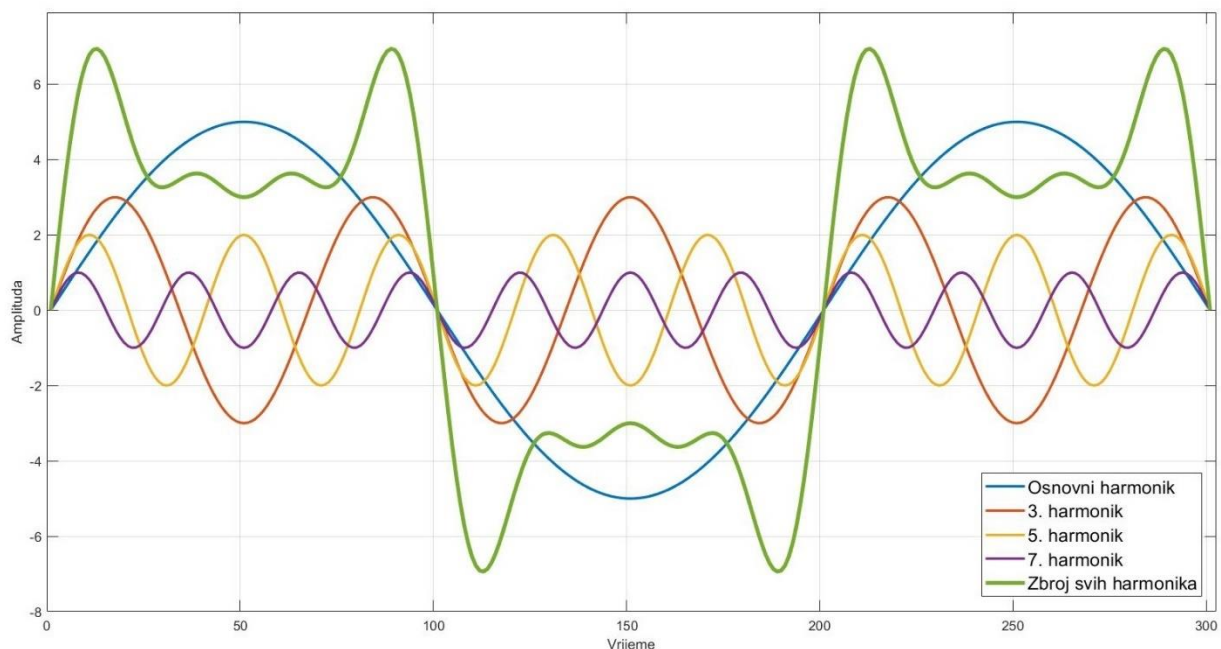
U slučaju nelinearnih trošila kao što su punionice za električna vozila vrlo su česta izobličenja struje zbog korištenja energetske elektronike za pretvorbu napona iz izmjeničnog u istosmjerni. Kada govorimo o linearnim trošilima to znači da se struja mijenja proporcionalno narinutom naponu. Pri tome ne dolazi do izobličenja valnih oblika struje i napona. Međutim, u mreži se sve više pojavljuju nelinearna trošila kod kojih se impedancija mijenja ovisno o naponu, pa tako ni struja više nije sinusoidna nego izobličena, tj. sadrži više harmonike. Takva nesinusoidna struja sadrži harmonike viših frekvencija koji na impedancijama distributivne mreže stvaraju naponska izobličenja koja negativno utječu i na opremu distributivne mreže i na priključena trošila.

Norma IEEE 519-1992 definira harmonike kao sinusnu komponentu periodičkog vala ili veličine čija je frekvencija višekratnik osnovne frekvencije. [9]

3.2. Harmonici

U idealnom slučaju opskrba električnom energijom bi trebala imati savršeni sinusni valni oblik napona u svakoj točki mreže. Zbog mnogobrojnih razloga to nije moguće održavati te dolazi to izobličenja valnog oblika i pojave viših harmonika. Prisutnost nelinearnih trošila u mreži je sve veća pa je tako i harmonijsko izobličenje sve veće. Primjer takvih trošila velikih snaga su statički pretvarači koji su sastavni dio gotovo svake industrije, a u zadnje vrijeme je sve veće prisustvo obnovljivih izvora energije u distribucijskoj mreži koji također posjeduju statičke pretvarače.

Harmonici valnih oblika struje i napona su sinusne veličine, frekvencija im je višekratnik osnovne, a amplituda im je značajno manja nego osnovnom valnom obliku. Tako na primjer 3 harmonik osnovne frekvencije od 50 Hz iznosi 150 Hz, a 5 harmonik iznosi 250 Hz. Na slici 3.1. vidljivi su osnovni harmonik te 3, 5 i 7 harmonik kao i njihov zbroj. Na ovaj način je prikazano kako se zbrojem više sinusoida dobiva izobličeni valni oblik. Također vrijedi i obrat tj. dobiveni valni oblik može se rastaviti u više sinusnih valnih oblika pomoću Fourierove transformacije, kao i bilo koji periodički valni oblik.

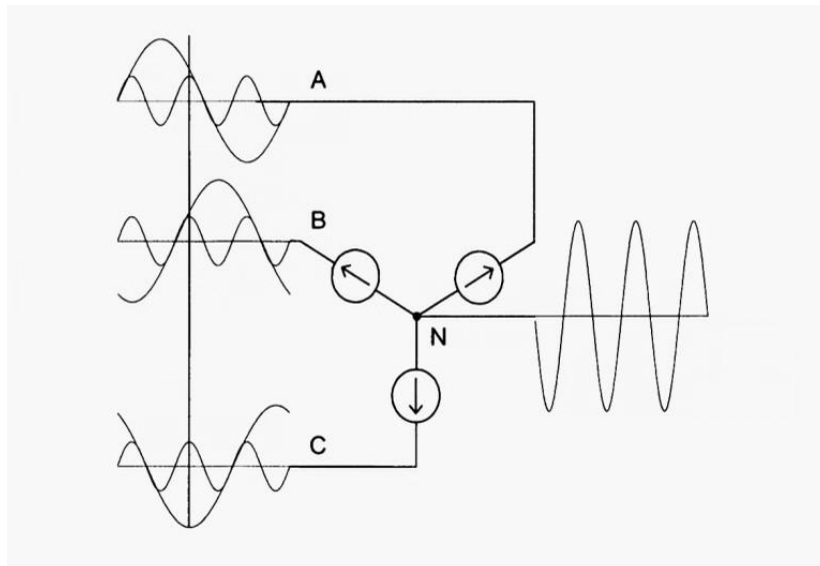


Sl. 3.1. Harmonici raznih frekvencija i njihov zbroj

Neparni viši harmonici				Parni viši harmonici	
koji nisu višekratnik od 3		koji su višekratnik od 3			
redni br. h	U_h u % U_n	redni br. h	U_h u % U_n	redni br. h	U_h u % U_n
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 do 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Sl. 3.2. Najveće dopuštene vrijednosti harmonika prema normi EN 50160 [8]

Numeracija viših harmonika kreće od 2, 1 predstavlja osnovni harmonik, dok 0 predstavlja istosmjernu komponentu signala. Parni harmonici nisu toliko česti u praksi, do njih dolazi kada valni oblik iznad i ispod vremenske osi nisu isti. Bitni za naglasiti su neparni harmonici koji su višekratnik broja 3 jer uzrokuju tok struje kroz neutralni vodič, čak i u slučaju simetričnog opterećenja. Ovi harmonici pripadaju nultoj komponenti sustava i u fazi su u sve tri faze koje su međusobno pomaknute za 120° pa se točno preklapaju i zbrajaju, što je prikazano na slici 3.3. To može dovesti do pregrijavanja distribucijskih transformatora i neutralnog voda. [10]



Sl. 3.3. Zbroj trećih harmonika u neutralnom vodu [11]

3.3. THD

THD dolazi od engleskog naziva *Total Harmonic Distortion* što znači ukupno harmonijsko izobličenje. Ono u osnovi predstavlja mjeru poremećaja valnog oblika napona (THD_U) ili struje (THD_I) do kojeg dolazi zbog prisustva harmonika. Ovo je važan pokazatelj često korišten za opisivanje kvalitete električne energije u prijenosnoj i distribucijskoj mreži, a uzima u obzir utjecaj svakog pojedinog harmonika do 40. ili 50. reda.

THD je definiran za napon i struju kako slijedi:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} \quad (3-1)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_1} \quad (3-2)$$

Gdje je:

h – red harmonika

U_1 – efektivna vrijednost napon osnovnog harmonika

I_1 – efektivna vrijednost struje osnovnog harmonika

U_h, I_h – efektivna vrijednost h-tog reda harmonika

Iz gornjih relacija vidi se kako je THD definiran kao omjer efektivnih vrijednosti svih harmonika koje signal sadrži (uobičajeno do 40. ili 50. reda) i efektivne vrijednosti signala koji je na osnovnoj frekvenciji. Zbog toga se ne dobiva realna slika situacije u slučaju strujnih harmonika jer iznosi struja mogu biti mali ali izobličeni te se izračunom dobije visok iznos THD-a iako možda niti nema utjecaja na mrežu zbog male amplitude. Kako bi se riješio taj problem uvodi se TDD.

3.4. TDD

TDD (engl. *Total Demand Distortion*) je vrlo sličan kao THD, jedina razlika je što se on računa u odnosu na najveću zabilježenu vrijednost struje u intervalu mjerenja. Osnovna komponenta struje mijenja se s promjenom tereta. Upravo zbog toga je TDD bolji nego THD jer sigurno neće doći do pogrešne interpretacije stvarne situacije. TDD se izračunava prema sljedećoj relaciji [12]:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_L} \quad (3-3)$$

Gdje je:

h – red harmonika

I_h – efektivna vrijednost h -tog reda harmonika

I_L – najveća zabilježena struja na osnovnoj frekvenciji

TDD se također može izračunati i iz THD-a prema sljedećoj relaciji iz čega je i vidljiva njihova osnovna razlika [13]:

$$TDD = THD \times \frac{I_1}{I_L} \quad (3-4)$$

3.5. Flikeri

Promjena tereta trošila direktno utječe na napon napajanja na način da što je veći teret to se napon više mijenja, tj. treperi. Do toga dolazi kada trošila rade u isprekidanom režimu rada, tj. u svom ciklusu rada sadrže intervale opterećenja i stanke, bilo to potpuno mirovanje ili rad bez opterećenja. Te su promjene relativno kratke i nazivaju se treperenje napona ili flikeri (engl. *Flicker*). Takve promjene možemo svakodnevno primijetiti u svome kućanstvu u trenutku paljenja kućanskih uređaja veće snage, a očituje se promjenom intenziteta rasvjete.

Ukoliko se takva promjena dogodi u nekom industrijskom postrojenju velike snage, učinak može biti vidljiv na širem području, npr. na cijelom dijelu grada u blizini industrije. [14] Ove promjene su u pravilu do 5% nazivnog napona, osim u određenim slučajevima kada mogu biti i do 10%.

Flikeri su definirani na slijedeći način: Ako je u prostoriji prisutno 100 ljudi i ako se jakost svjetla promjeni toliko da tu promjenu primijeti 50 od ukupno 100 ljudi, tada fliker ima iznos 1. Prema normi, vrijednost dugotrajnih flikera ne smije premašiti iznos 1 u 95% vremena tjedna. Za mjerenje flikera najbolje je koristiti žarulju sa žarnom niti jer je najosjetljivija na promjene napona.

Flikeri se prema vremenu mjerenja dijele na kratkotrajne (P_{st}) i dugotrajne (P_{lt}). Kratkotrajni flikeri se računaju u vremenskom periodu od 10 minuta, dok se dugotrajni računaju iz 12 kratkotrajnih, odnosno u periodu od 120 minuta, prema slijedećim relacijama [15]:

$$P_{st} = \sqrt[3]{\frac{\sum t_f}{10 \text{ min}}} \quad (3-5)$$

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{j=1}^{12} P_{stj}^3}{12}} \quad (3-6)$$

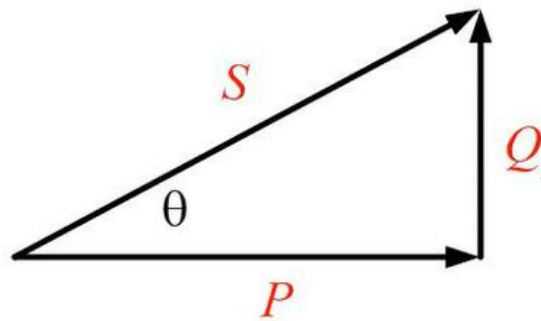
Gdje je:

t_f – vrijeme trajanja kratkotrajnih flikera

3.6. Jalova snaga

Jalova snaga (Q) je snaga koja teče u oba smjera, od izvora prema trošilu i obratno. Mjerna jedinica joj je VAR ili češće kVAR i MVAR. Ova vrsta snage zapravo ne vrši nikakav rad, a nastaje na reaktivnim komponentama kao što su zavojnice i kondenzatori. Induktivna trošila kao što su motori uzrokuju kašnjenje struje za naponom, dok kapacitivna trošila kao što su računalna oprema, punjači i slično uzrokuju da struja prethodi naponu.

Bitnije od određivanja jalove snage je odrediti radnu (P) i prividnu snagu (S), jer radna snaga definira koliko snage se zapravo troši, dok prividna snaga definira koliki mora biti kapacitet mreže i opreme na koju se priključuje. Odnos među snagama, odnosno trokut snaga prikazan je na slijedećoj slici.

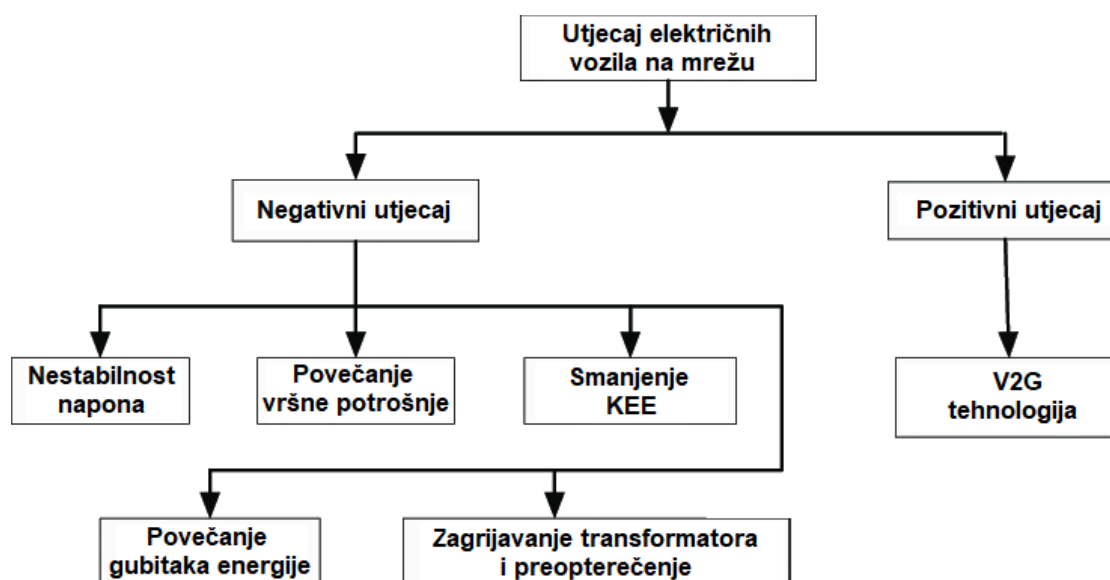


Sl. 3.4. Trokut snaga

Bitan pokazatelj kvalitete električne energije vezan za snagu je faktor snage (engl. *Power Factor, PF*). On je definiran kao kosinus kuta između radne i prividne snage ili kao omjer radne i prividne snage. U idealnom slučaju iznosi 1 što znači da su radna i prividna snaga jednake, a jalove nema. U tom slučaju napon i struja su u fazi. Kako bi se faktor snage držao u blizini iznosa 1 osmišljeni su tzv. sustavi za korekciju faktora snage (engl. *Power Factor Correction, PFC*). Takvi uređaji povećavaju faktor snage trošila čime poboljšavaju efikasnost distribucijske mreže na koju je spojeno. Na nekim trošilima kao što su motori faktor snage se može povećati spajanjem kondenzatorskih baterija paralelno, što se još naziva kompenzacija jalove snage, što je ujedno pasivna korekcija. Kod nelinearnih trošila kao što su ispravljači, frekventni pretvarači i slično ugrađuju se aktivni sustavi za korekciju faktora snage koji uključuju aktivne elemente, tj. elektroničko upravljanje.

4. UTJECAJ PUNJENJA ELEKTRIČNIH VOZILA NA MREŽU

Kao i svako drugo nelinearno trošilo i trošilo velike snage, električna vozila negativno utječu na električnu mrežu i kvalitetu njezine energije. Takva vozila, odnosno njihove punionice, doprinose nestabilnosti napona, povećavaju vršnu potrošnju, povećavaju gubitke energije i doprinose zagrijavanju transformatora zbog injektiranja viših harmonika u mrežu. Posljedica njihovog punjenja u vremenu vršne potrošnje je potreba za proizvodnjom još više energije te postoji mogućnost da mreža neće imati dovoljan kapacitet za takvo opterećenje. Uz to, može doći i do preopterećenja vodova i transformatora u tim trenucima. Utjecaj električnih vozila na mrežu prikazan je na slici 4.1.



Sl. 4.1. Utjecaj električnih vozila na mrežu [16]

No ipak, postoji i pozitivan utjecaj na mrežu, a to je mogućnost povratka energije iz vozila u mrežu (engl. *Vehicle-to-Grid*, V2G). Ova tehnologija radi na način da u trenucima kada mreža to zahtjeva, uskladištenu energiju se iz baterije vraća u mrežu i vozilo se ponaša kao izvor energije. U tom slučaju potrebna je dobra koordinacija između mreže i vozila i njihovih potreba. Vozila bi se u tom slučaju punila u vrijeme niske potražnje energije, odnosno noćnim satima.

4.1. Utjecaj prilikom punjenja na kućnom priključku

Pojavom električnih vozila, tadašnjih plug-in hibridnih električnih vozila, infrastruktura punionica nije bila razvijena, pa su se takva vozila punila isključivo kod kuće. U današnje vrijeme javne punionice su široko dostupne u urbanim područjima, ali se neki korisnici i dalje odlučuju na punjenje kod kuće zbog jednostavnosti, odnosno javne punionice su im daleko od kuće. Ovdje se javlja problem jer kućni priključci na distributivnu mrežu nisu predviđeni za takvu vrstu trošila, odnosno toliku snagu i takvu promjenu u kvaliteti električne energije. Takvi priključci imaju snagu od približno 3,6 kW te im je zbog toga potrebno i preko 10 sati za punjenje, što i nije problem ukoliko se vozilo puni preko noći.

No, do problema dolazi ukoliko se više električnih vozila nalazi u istoj ulici, odnosno priključenih na istu transformatorsku stanicu. U tom slučaju može doći do pregrijavanja vodova zbog nedovoljnog presjeka i preopterećenja transformatora jer mreža nije projektirana za toliku potrošnju te može doći i do pada napona ispod propisane razine onim korisnicima koji su električki udaljeniji od transformatorske stanice. Također, trebao bi se postaviti veći presjek nultog vodiča zbog nesimetrije napona i pojave neparanih harmonika koji su višekratnici broja 3 te se zbrajaju u nultom vodu. Primjer punjenja vozila kod kuće prikazan je na slijedećoj slici.



Sl. 4.2. *Primjer kućne punionice električnih vozila [17]*

4.2. Utjecaj prilikom punjenja na javnoj punionici

Za razliku od punjenja na kućnom priključku, javne punionice su predviđene i projektirane za tu namjenu. Njihove snage su značajno veće nego kod kućnih punionica, reda veličine 50 kW i više uz svakodnevni razvoj i povećanje snage, zbog čega je i samo vrijeme punjenja vozila značajno kraće. Kod ovakvih punionica potrebna snaga nije problem jer su priključene izravno na mrežu koja ima potreban kapacitet i dovoljan presjek spojnih vodiča. Samim time što je snaga veća značajniji je i utjecaj na mrežu u vidu potrošnje energije i smanjenje kvalitete električne energije. Iz tog razloga potrebno je između punionice i mreže spojiti filter koji će smanjiti utjecaj na mrežu. U slučaju jednofaznog priključka moguća je pojava nesimetrije u mreži, dok kod trofaznog priključka to nije slučaj. Infrastruktura je još uvijek u razvoju, a kako se broj električnih vozila povećava usavršavati će se i infrastruktura. Punionice su u Hrvatskoj još uvijek besplatne za sve, što predstavlja uštedu korisnicima. Primjer javne punionice prikazan je na slijedećoj slici.



Sl. 4.3 Primjer javne punionice električnih vozila [18]

4.3. Utjecaj na trošila i opremu u distributivnoj mreži

Povratni utjecaj na mrežu prisutan je, u većoj ili manjoj mjeri, kod svih nelinearnih trošila. Sva trošila i oprema distributivne mreže projektirani su za idealni sinusni napon. To dovodi do ubrzanog starenja trošila i opreme i prijevremenih kvarova. U nastavku je opisan utjecaj na pojedinu opremu i trošila prema [9].

Najveći utjecaj viših harmonika na generator je povećano zagrijavanje zbog povećanja gubitaka u željezu i bakru jer su gubici ovisni o frekvenciji i rastu sa povećanjem harmonika. Kako bi se smanjilo zagrijavanja generatora koji napajaju nelinearna trošila potrebno ih je dimenzionirati veće nego što bi se inače dimenzioniralo. Također, prisustvo viših harmonika uzrokuje lokalna zagrijavanja u generatoru i pulsiranje momenta što uzrokuje vibracije.

Utjecaj harmonijskih struja i frekvencija u transformatoru uzrokuju, kao i kod generatora, povećanje zagrijavanja jezgre zbog povećanja gubitaka u željezu. Također, povećanje gubitaka u bakru i rasipnog toka uzrokuju dodatna zagrijavanja i naprezanje izolacije namota. Moguća rezonancija između induktiviteta namota i kapaciteta napajanja mogu dovesti do dodatnih gubitaka. Do povećanja buke transformatora dolazi zbog povećanja vibracija lamelirane jezgre transformatora uslijed viših harmonika.

Harmonijsko izobličenje povećava gubitke u izmjeničnim motorima na sličan način kao i kod transformatora i dovodi do povećanja zagrijavanja zbog gubitaka u željezu i bakru na statorskom namotaju i u rotorskom krugu. Ovim gubicima dodatno doprinosi utjecaj *skin* efekta, pogotovo kada se radi o frekvencijama iznad 300 Hz, odnosno višim harmonicima iznad 6. Pretjerano zagrijavanje može pogoršati podmazivanje ležajeva i uzrokovati njihov kvar. Također, harmonijske struje mogu uzrokovati struje u ležajevima, ali taj problem se lako rješava korištenjem izoliranih ležajeva. Uslijed prisustva viših harmonika, kao i kod generatora, dolazi do pulsiranja momenta i vibracija.

Gubici u vodovima se također očituju kao zagrijavanje i značajno se povećavaju kada kroz njih teku harmonijske struje zbog povećanja I^2R gubitaka i povećanja otpora uslijed *skin* efekta. Impedancija voda ovisna je o frekvenciji pa se tako i ona mijenja pod utjecajem viših harmonika.

Većina niskonaponskih prekidača koji reagiraju na toplinu koriste bi-metalne mehanizme za otvaranje kontakata koji reagiraju na toplinski učinak RMS struje (srednja kvadratna vrijednost struje). Za nelinearna trošila, RMS iznos struje je veći nego za linearna trošila iste snage što može dovesti do nepotrebnog okidanja prekidača.

Pregaranje osigurača zbog previsoke struje ili kratkog spoja ovisi o toplinskom efektu RMS struje prema I^2t karakteristici. Što je struja veća, osigurač će prije reagirati. Iz tog razloga, osigurači se trebaju dimenzionirati veći ukoliko napajaju nelinearna trošila. Također, pod utjecajem viših harmonika dolazi do *skin* efekta što rezultira nejednolikom razdiobom struje kroz nit osigurača što dovodi do toplinskih naprezanja.

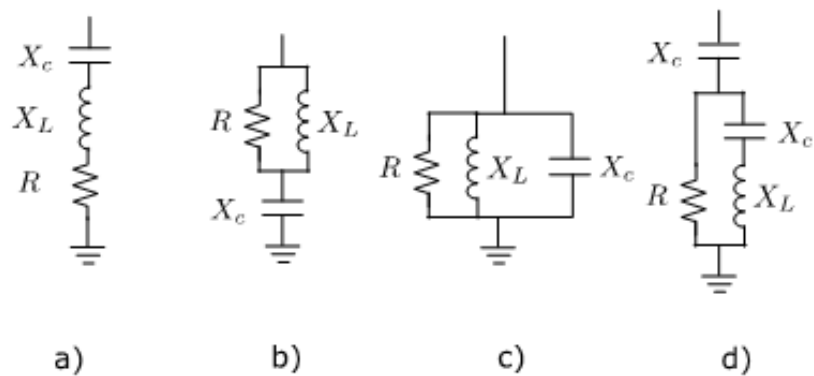
4.4. Filtri

4.4.1. Pasivni filtri

Pasivni filtri su u osnovi sačinjeni od otpornika, kondenzatora i zavojnica, pa tako razlikujemo RC, RL i RLC filtere. Za svoj rad ne zahtijevaju vanjski izvor napajanja nego koriste energiju signala kojeg filtriraju.

Pasivni filtri su najčešće korišteni filtri u industriji, imaju vrlo nisku impedanciju na zadanoj frekvenciji kroz koju se usmjerava sva struja na toj frekvenciji, a visoku impedanciju za ostale frekvencije. Zbog toga se prilikom dizajniranja pasivnih filtera mora uzeti u obzir očekivani rast harmonijskog sastava struje ili promjena trošila koje se napaja jer u suprotnom može doći do preopterećenja i termalnog uništenja filtera. Dizajniranje filtra zahtjeva precizno poznavanje trošila koje proizvodi harmonike kao i cjelokupnog sustava, jer svako trošilo je drugačije i samim time zahtjeva poseban filter. U novije vrijeme do velike su pomoći simulacijski softveri u kojima se može odrediti koja konfiguracija filtra je optimalna. Osim toga što filtriraju više harmonike, pasivni filtri ujedno kompenziraju jalovu energiju jer u sebi sadrže kondenzatorsku bateriju, koja se dizajnira prema potrebi sustava [12].

Na slici 4.4. prikazane su izvedbe pasivnih filtera, i to a) serijski, b) visoko propusni, c) pojasno propusni, d) C-tip [19]



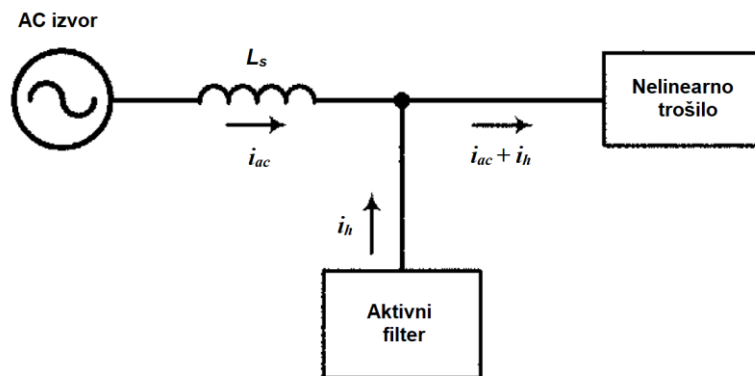
Sl. 4.4. Primjeri izvedbi pasivnih filtera [19]

4.4.2. Aktivni filtri

Aktivni filtri koriste aktivne elemente kao što su tranzistori i operacijska pojačala te također koriste i kondenzatore i otpornike, ali ne i zavojnice, što ih čini kompaktnijim i lakšima. Za razliku od pasivnih filtera, aktivnima je potrebno vanjsko napajanje za njihov rad. U novije vrijeme relativno su česti u industrijskoj primjeni kako za smanjenje harmonika tako i za kompenzaciju jalove snage.

Aktivni filtri mjere valni oblik izobličene struje filtrirajući osnovnu komponentu struje iz valnog oblika nelinearnog trošila, koji nakon toga dovodi u upravljačku jedinicu i generira odgovarajuće impulse za okidanje tranzistora kako bi replicirao i pojačao izobličenu struju te na taj način generirao kompenzacijsku struju koju injektira prema trošilu u protufazi izobličenoj struji kako bi se one poništile, tj. kompenzirale. Ako je ispravno podešen, aktivni filter isporučuje nelinearnom trošilu harmonijske struje potrebne za rad, dok iz izvora uzima osnovnu sinusnu komponentu struje. Filtri ovakve vrste su kompleksni i skupi. [9]

Uobičajeno spajanje aktivnih filtera je paralelno sa nelinearnim trošilom, kao što je prikazano na slici 4.5., a sam filter se sastoji od tranzistorskog mosta i istosmjerne sabirnice (engl. *DC-link*).



Sl. 4.5. Shema spoja aktivnog filtra između trošila i mreže [9]

4.5. K-faktor

K-faktor je mjera opterećenja harmonijskom strujom u odnosu na zagrijavanje i gubitke transformatora. Iznos K-faktora 1 znači da je trošilo linearno, odnosno nisu prisutni harmonici. Što je iznos veći, veće je zagrijavanje uslijed djelovanja harmonika. K-faktor se izračunava prema slijedećoj relaciji [20]:

$$K = \sum (I_h)^2 h^2 \quad (4-1)$$

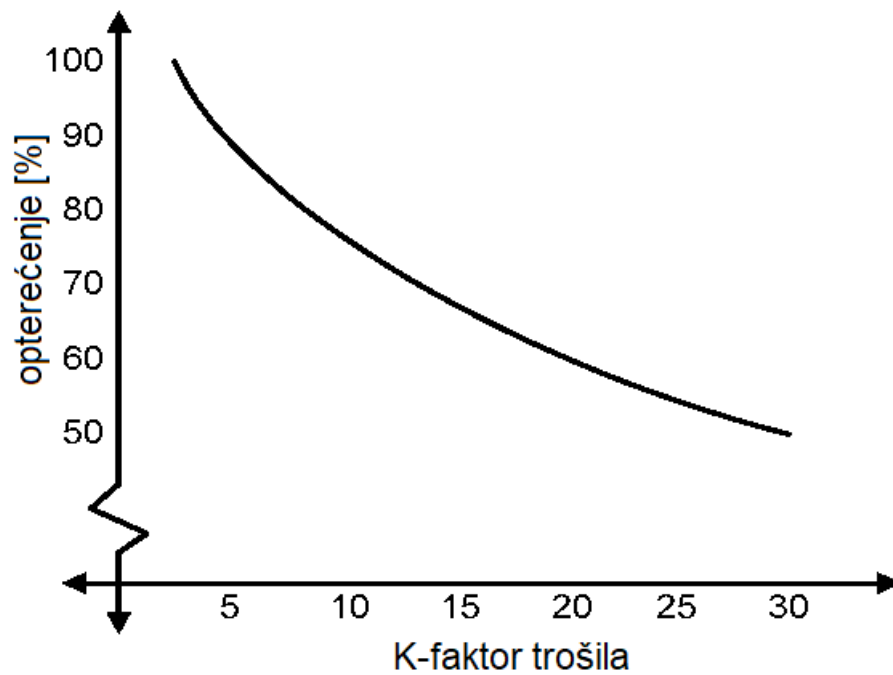
Gdje je:

h – red harmonika

I_h – efektivna vrijednost h -tog harmonika izražena u jediničnoj vrijednosti, odnosno u p.u.

U praksi se vrlo rijetko pojavljuje iznos K-faktora veći od 20. Primjerice, uredski prostori, koji su puni nelinearnih trošila, obično imaju K-faktor između 4 i 9, a područja s visokom koncentracijom jednofaznih računala i terminala između 13 i 17. U slučaju kada se više nelinearnih trošila napaja iz istog izvora primijećen je pad harmonijskog sastava jer dolazi do zbrajanja valnih oblika i poništavanja određenih harmonika, pa je ukupni utjecaj na mrežu manji.

Transformatori građeni za određeni iznos K-faktora se mogu opteretiti nazivnom snagom i sigurno raditi ukoliko napajaju nelinearno trošilo s K-faktorom jednakim ili manjim od nazivnog. Ukoliko se standardnim transformatorom koji je dizajniran za linearno trošilo želi napajati nelinearno trošilo, ne smije se opteretiti nazivnom snagom, nego manjom, a ovisnost K-faktora trošila i razine opterećenja prikazana je na slici 4.6.



Sl. 4.6. Ovisnost dozvoljenog opterećenja transformatora o K-faktoru trošila [21]

5. ANALIZA MJERENJA

Mjerenja su provedena tijekom 7 dana na punionici s tri priključka slijedećih karakteristika:

- 43 kW AC
- 50 kW DC CHAdeMO
- 50 kW DC CCS



Sl. 5.1. Priključci punionice

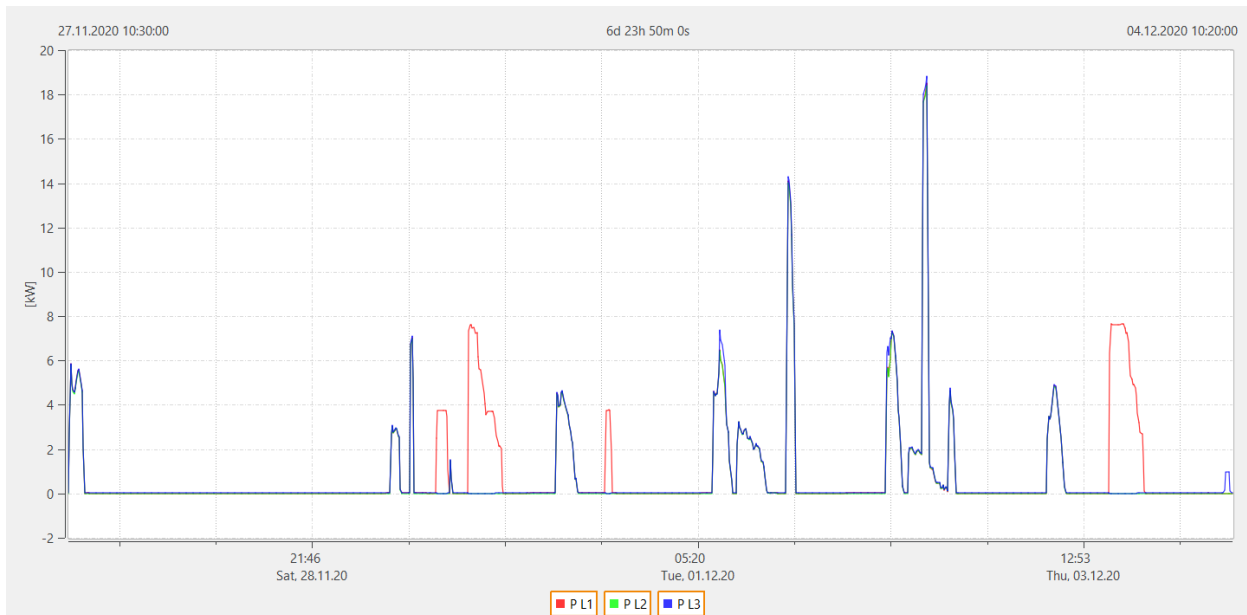
Za mjerenje je korišten uređaj PQ-Box 200 proizvođača A. Eberle koji služi za brzo pronalaženje, mjerenje i dokumentiranje nepovoljnih događaja u mreži. PQ-Box 200 je analizator kvalitete električne energije i mjerac snage uz mogućnost snimanja tranzijenata. Uređaj je razvijen za mjerenja na niskonaponskim, srednjenaponskim i visokonaponskim mrežama te za korištenje u težim uvjetima rada. [22]



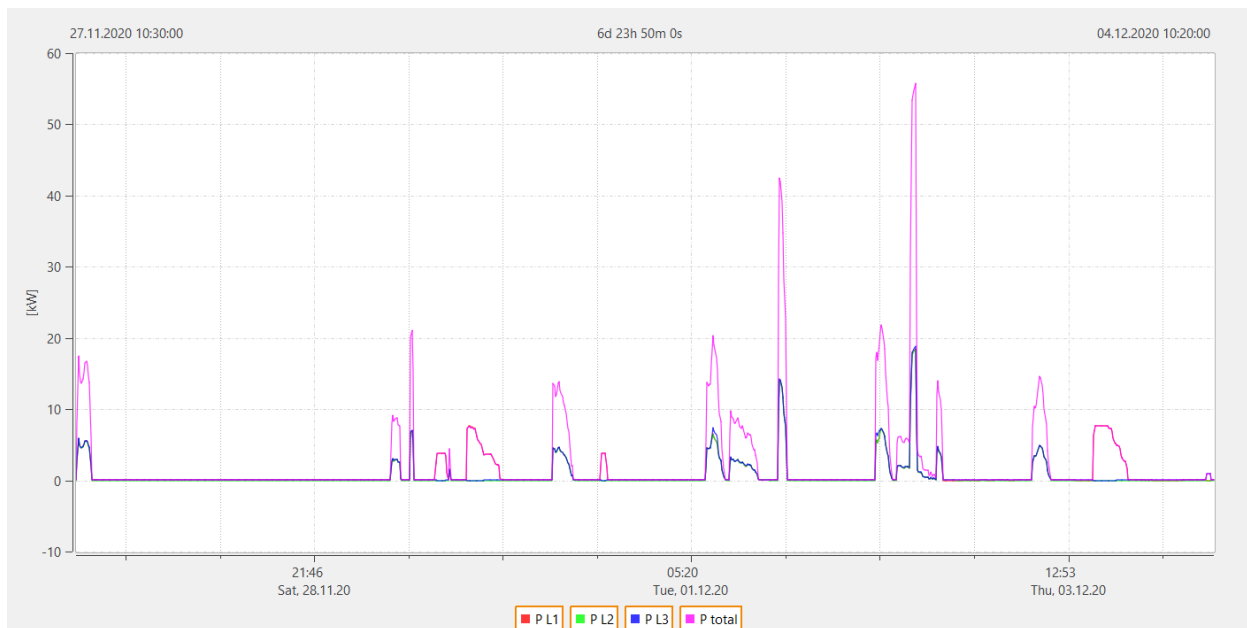
Sl. 5.2. Uređaj za mjerenje PQ-Box 200 proizvođača A. Eberle [22]

Za analizu rezultata korišten je softver WinPQ mobil koji omogućuje pregled podataka u grafičkom obliku. Podatke koje želimo prikazati sami odabiremo iz ponuđenih, moguće je usporedno prikazati više podataka na istom ili različitim dijagramima, kao i očitati vrijednost pojedine veličine u željenom trenutku. Spomenuti softver prikazuje analizu rezultata prema zahtjevima norme HRN EN 50160:2012.

Ukoliko se pogleda potrošnja tijekom cijelog tjedna (Slike 5.3. i 5.4.) vidljivo je da ona uvelike varira i po amplitudi snage i po vremenu trajanja. Ukupno je utrošeno 389 kWh električne energije, za čiju proizvodnju je emitirano približno 215 kg CO₂. Faze L₂ i L₃ cijelo vrijeme imaju jednaku potrošnju, dok L₁ uz to ima određene intervale gdje jedina ima potrošnju jer se radi o jednofaznom načinu punjenja. Također, faza L₁ ima konstantnu potrošnju u iznosu od približno 10 W što vjerojatno odlazi na potrošnju same punionice. Najveća zabilježena ukupna snaga iznosi 55 kW, uzevši tu snagu u obzir i dijagram snage može se zaključiti da su u to vrijeme bila priključena dva vozila.



Sl. 5.3. *Dijagram snage pojedinih faza kroz tjedan*

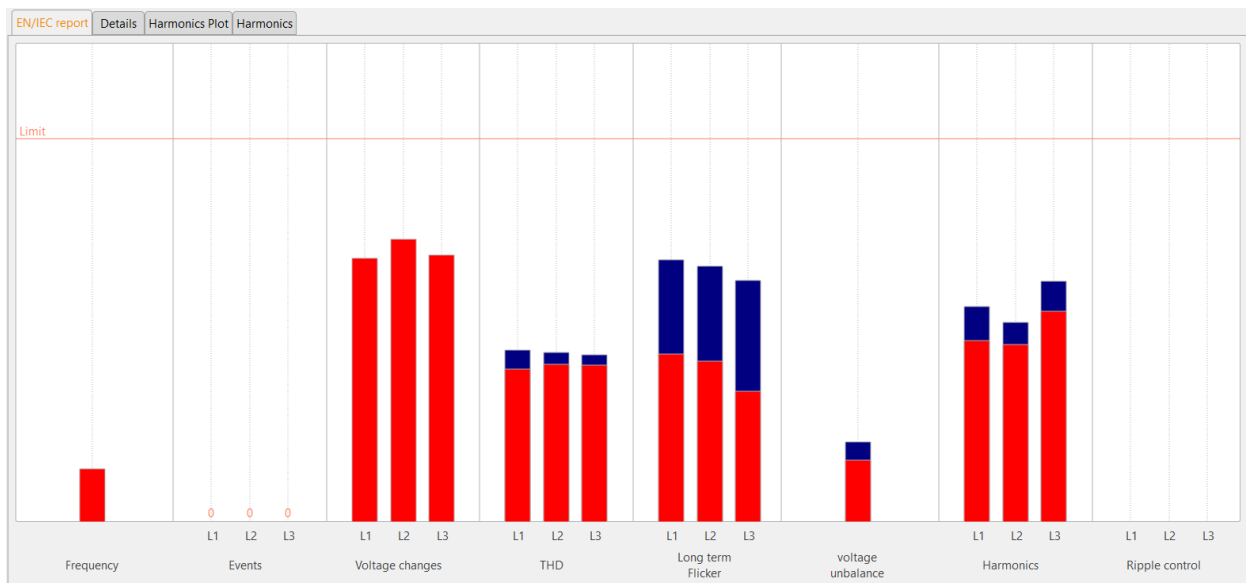


Sl. 5.4. *Dijagram snaga pojedinih faza i ukupne snage kroz tjedan*

Unutar perioda od tjedan dana, koliko je trajalo mjerenje, uređaj nije registrirao odstupanje po niti jednom pokazatelju kvalitete električne energije, što znači da je sve u skladu sa normom EN 50160, a prikazano je na slici 5.5. i 5.6.

PQ-events	Number
<input type="checkbox"/> Frequency deviation	0
<input type="checkbox"/> Transient overvoltage	0
<input type="checkbox"/> Swell (single phase)	0
<input type="checkbox"/> Swell (poly phase)	0
<input type="checkbox"/> Dip (single phase)	0
<input type="checkbox"/> Dip (poly phase)	0
<input type="checkbox"/> Rapid voltage change (single phase)	0
<input type="checkbox"/> Rapid voltage change (poly phase)	0
<input type="checkbox"/> Interruption (single phase)	0
<input type="checkbox"/> Interruption (poly phase)	0
<input type="checkbox"/> Ripple control detection	0
<input type="checkbox"/> Slow voltage change	0
<input type="checkbox"/> Long-term flicker	0
<input type="checkbox"/> Unbalance	0
<input type="checkbox"/> THD	0

Sl. 5.5. *Događaji kvalitete električne energije*

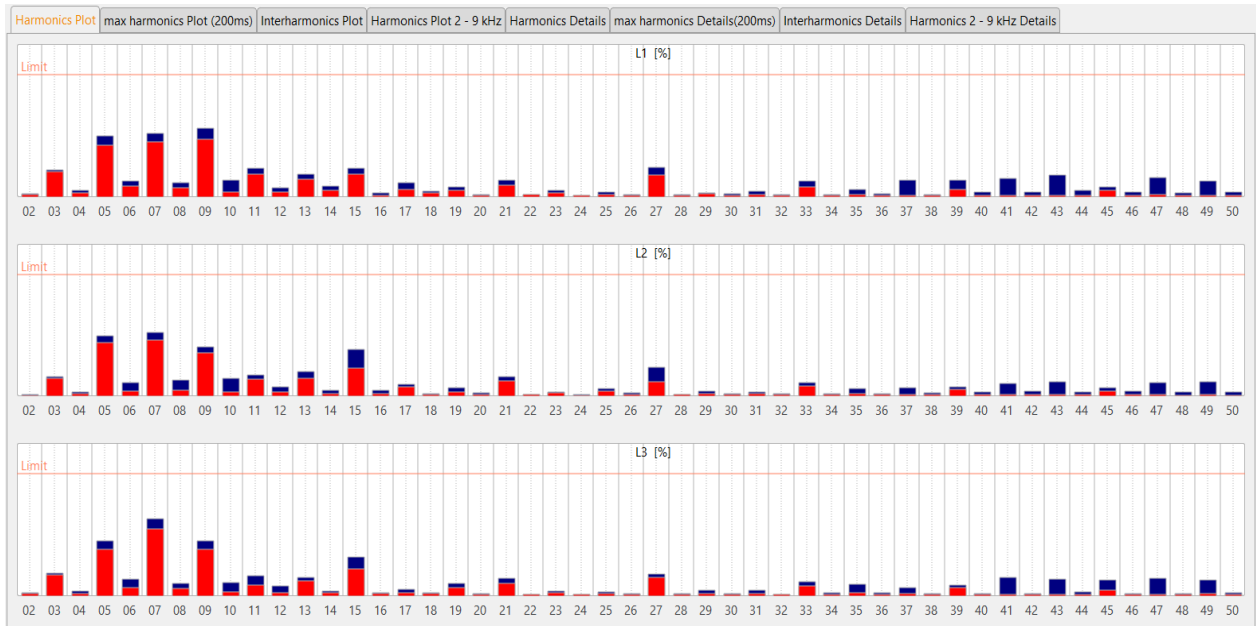


Sl. 5.6. *Pokazatelji kvalitete električne energije*

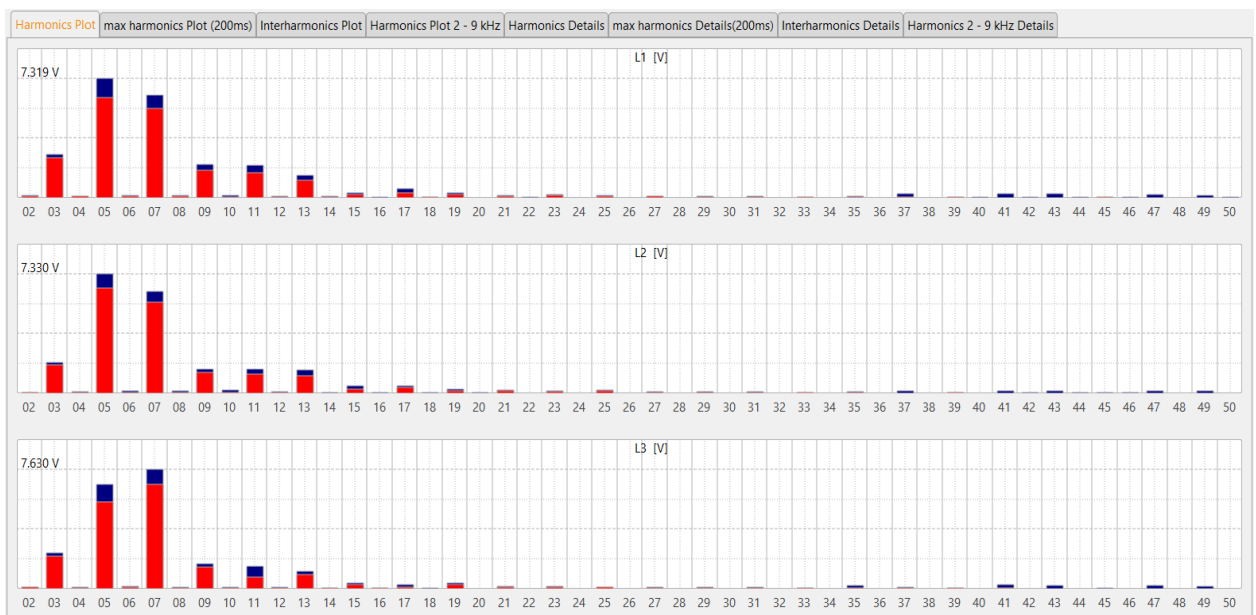
Iz slike 5.7. vidljivo je kako su svi naponski harmonici unutar granica propisanih normom te nisu niti blizu toga da prekorače tu vrijednost. Ali, ovo ne znači da su harmonici sa višim stupićem dominantniji jer norma propisuje graničnu vrijednost za svaki harmonik posebno. To se vidi i iz slike 5.8. gdje je harmonijski spektar prikazan u voltima te slike 5.9. gdje su ispisane postotne vrijednosti pojedinih harmonika u usporedbi sa osnovnim harmonikom napona.

U fazama L_1 i L_2 je najdominantniji 5 harmonik, a slijede ga 7, 3, 9, 11 i 13. Kod faze L_3 najdominantniji je 7 harmonik te za njim 5, 3, 9, 11 i 13.

Na prikazu harmonijskog spektra u voltima na slici 5.8. vidljivo je kako su parni harmonici neznatni, te prema slici 5.7. daleko unutar propisanih granica.



Sl. 5.7. Harmonijski spektar napon unutar tjedan dana mjerenja u postocima



Sl. 5.8. Harmonijski spektar napona unutar tjedan dana mjerenja u voltima

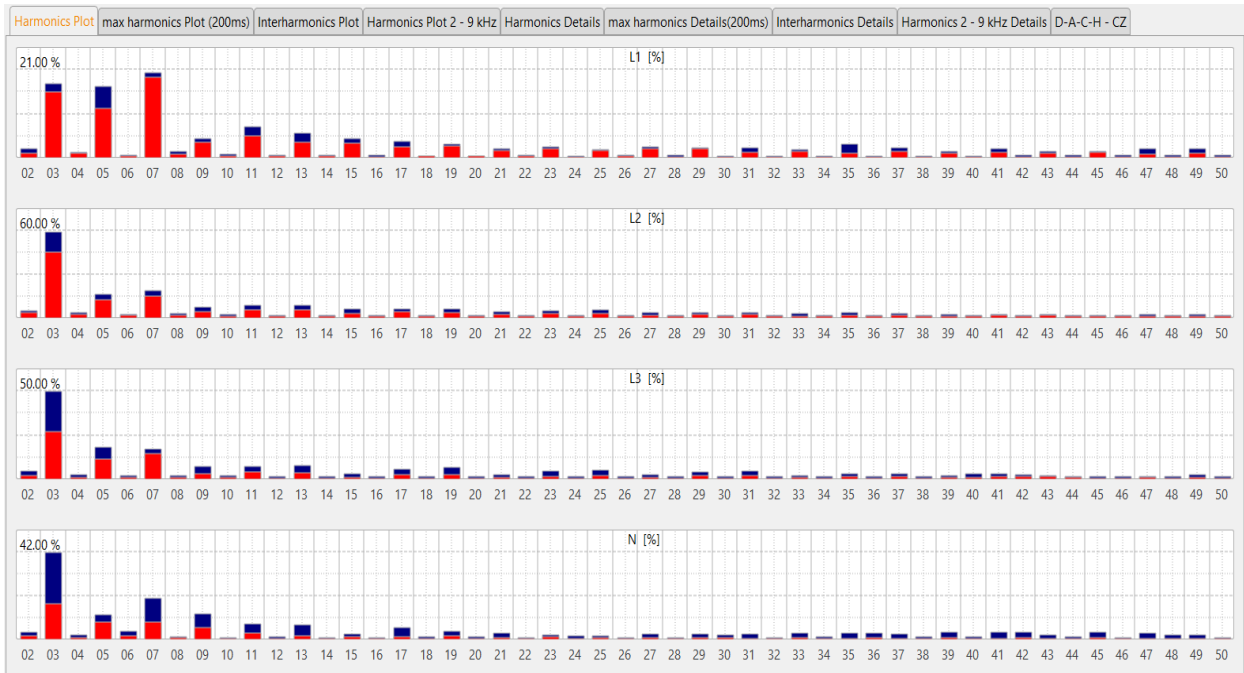
	L1 - 95% [%]	L1 - Max [%]	L2 - 95% [%]	L2 - Max [%]	L3 - 95% [%]	L3 - Max [%]
02	0.05	0.05	0.02	0.03	0.05	0.05
03	1.03	1.12	0.72	0.79	0.87	0.95
04	0.03	0.05	0.02	0.03	0.02	0.04
05	2.53	3.01	2.64	2.99	2.27	2.73
06	0.04	0.07	0.02	0.06	0.03	0.07
07	2.27	2.61	2.31	2.60	2.75	3.14
08	0.04	0.06	0.02	0.07	0.03	0.05
09	0.71	0.84	0.53	0.61	0.57	0.68
10	0.02	0.02	0.02	0.07	0.02	0.05
11	0.65	0.83	0.49	0.61	0.31	0.59
12	0.02	0.04	0.02	0.04	0.01	0.04
13	0.44	0.57	0.44	0.60	0.38	0.46
14	0.03	0.05	0.01	0.02	0.02	0.02
15	0.09	0.12	0.11	0.19	0.11	0.16
16	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01
17	0.13	0.23	0.15	0.20	0.05	0.11
18	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
19	0.08	0.12	0.06	0.10	0.10	0.16
20	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Sl. 5.9. Postotne vrijednosti pojedinih harmonika

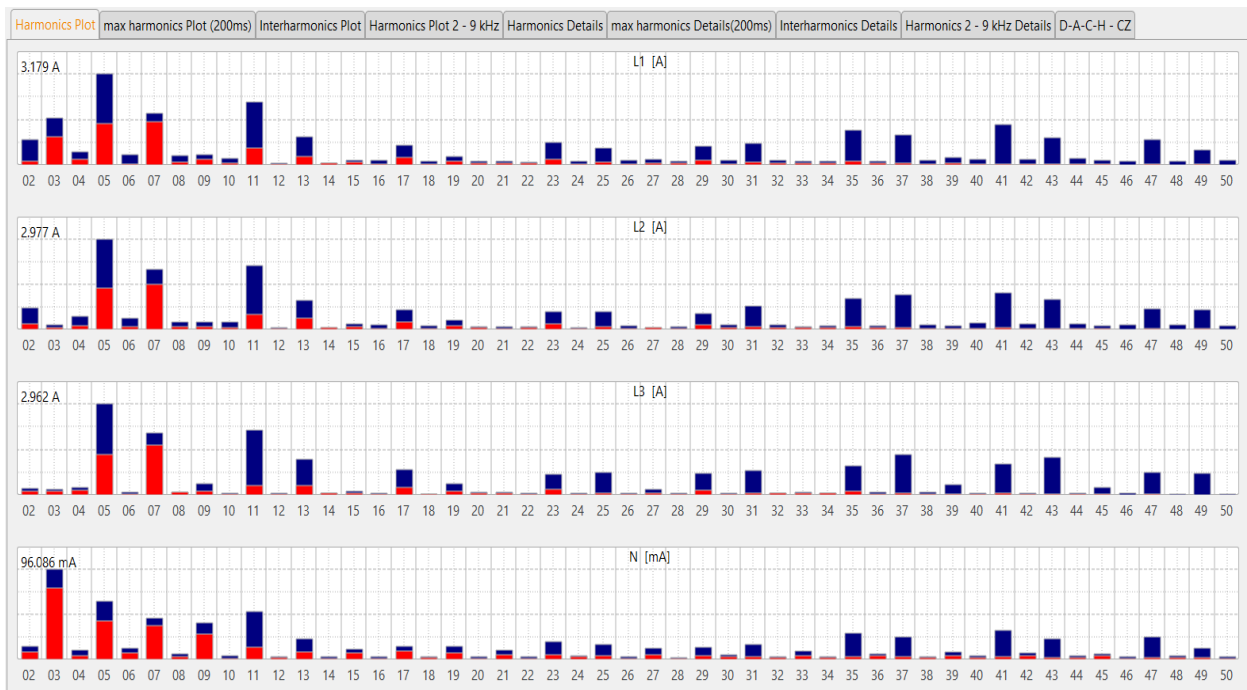
Slika 5.10. prikazuje harmonijski spektar struje u postocima, ali takvo mjerenje nije mjerodavno za analizu jer se računa na osnovu prvog harmonika koji se stalno mijenja

Iz harmonijskog spektra struje u amperima (Slika 5.11.) vidljiva je velika razlika između faze L₁ i faza L₂ i L₃. Do toga dolazi jer faza L₁, osim što se koristi za trofazno punjenje, napaja i jednofazni punjač. Faza L₁ ima veću potrošnju te se u njoj zbrajaju harmonici i iz jednofaznog i iz trofaznog punjača. Upravo zbog toga je vidljivo da je u njoj harmonijski spektar nepovoljniji.

Najdominantnije 95-postotne vrijednosti za fazu L₁ ima 7 harmonik, a slijede ga 5, 3, 11 i 13. Kod faza L₂ i L₃ najdominantniji je opet 7 harmonik, a za njim 5, 11 i 13 (Slika 5.11. i 5.12.). Struja kroz neutralni vod je praktički zanemariva pa ju nije potrebno detaljno analizirati.



Sl. 5.10. Harmonijski spektar struje unutar tjedan dana mjerenja u postocima

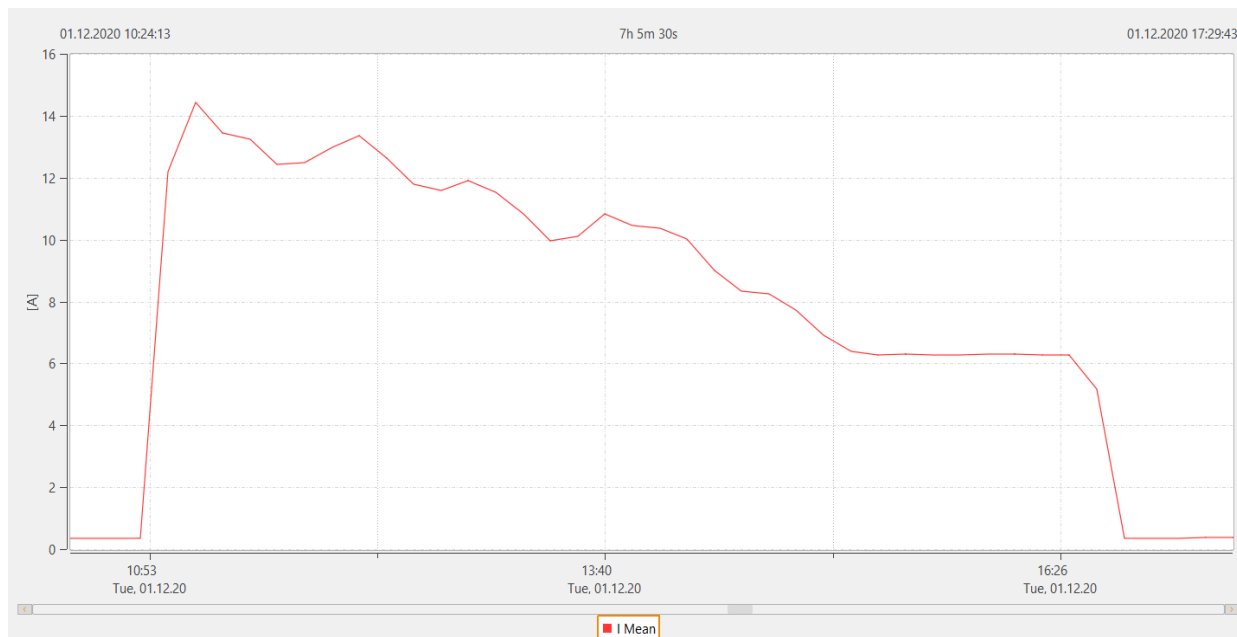


Sl. 5.11. Harmonijski spektar struje unutar tjedan dana mjerenja u amperima

	L1 - 95% [A]	L1 - Max [A]	L2 - 95% [A]	L2 - Max [A]	L3 - 95% [A]	L3 - Max [A]	LN - 95% [mA]	LN - Max [mA]
02	0.143	0.879	0.176	0.725	0.108	0.226	8.400	14.144
03	0.978	1.657	0.060	0.151	0.114	0.178	76.029	96.086
04	0.195	0.458	0.139	0.422	0.141	0.250	3.803	9.646
05	1.430	3.179	1.367	2.977	1.323	2.962	40.862	61.670
06	0.048	0.366	0.079	0.378	0.045	0.091	7.053	12.371
07	1.503	1.798	1.488	1.993	1.607	2.016	36.181	44.042
08	0.109	0.317	0.105	0.250	0.083	0.105	2.737	5.629
09	0.186	0.350	0.104	0.241	0.130	0.364	27.369	38.944
10	0.058	0.236	0.058	0.262	0.044	0.068	1.494	3.990
11	0.577	2.200	0.496	2.096	0.291	2.115	12.610	50.555
12	0.041	0.069	0.038	0.070	0.029	0.049	2.090	3.283
13	0.287	1.002	0.357	0.972	0.309	1.173	8.408	22.380
14	0.059	0.074	0.047	0.063	0.048	0.069	1.450	2.730
15	0.089	0.174	0.082	0.177	0.070	0.133	6.512	11.025
16	0.039	0.165	0.031	0.147	0.036	0.052	1.440	2.603
17	0.276	0.704	0.260	0.648	0.235	0.835	8.752	13.896
18	0.030	0.136	0.029	0.118	0.029	0.039	2.069	2.990
19	0.128	0.305	0.129	0.295	0.114	0.377	6.863	14.496
20	0.066	0.117	0.060	0.094	0.051	0.084	1.252	2.549

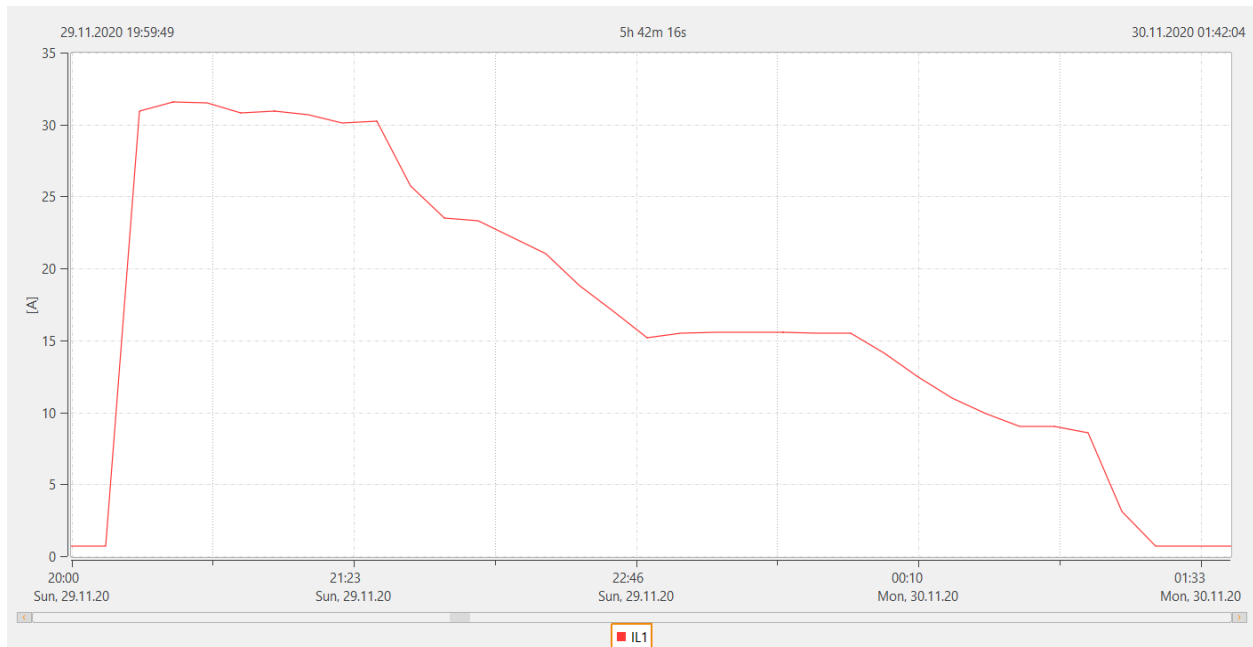
Sl. 5.12. *Iznosi struje pojedinih harmonika*

Na slici 5.13. prikazana je struja jednog od ciklusa trofaznog punjenja. Struja u početku očekivano raste te unutar prvih 20 minuta dosegne svoj maksimum u iznosu od 14,45 A po fazi, nakon čega polagano opada. Ukupno trajanje punjenja vozila je približno 6 sati.



Sl. 5.13. *Srednja vrijednost struje svih faza za jedan od ciklusa punjenja*

Na slici 5.14. prikazana je struja jednofaznog punjenja. Oblik grafa struje sličan je kao i kod trofaznog punjenja, ali je fazna struja dvostruko veća. Ukupno trajanje punjenja vozila je 5 sati i 10 minuta, a najveća vrijednost struje iznosi 31,5 A koju dosegne unutar prvih 10 minuta punjenja.



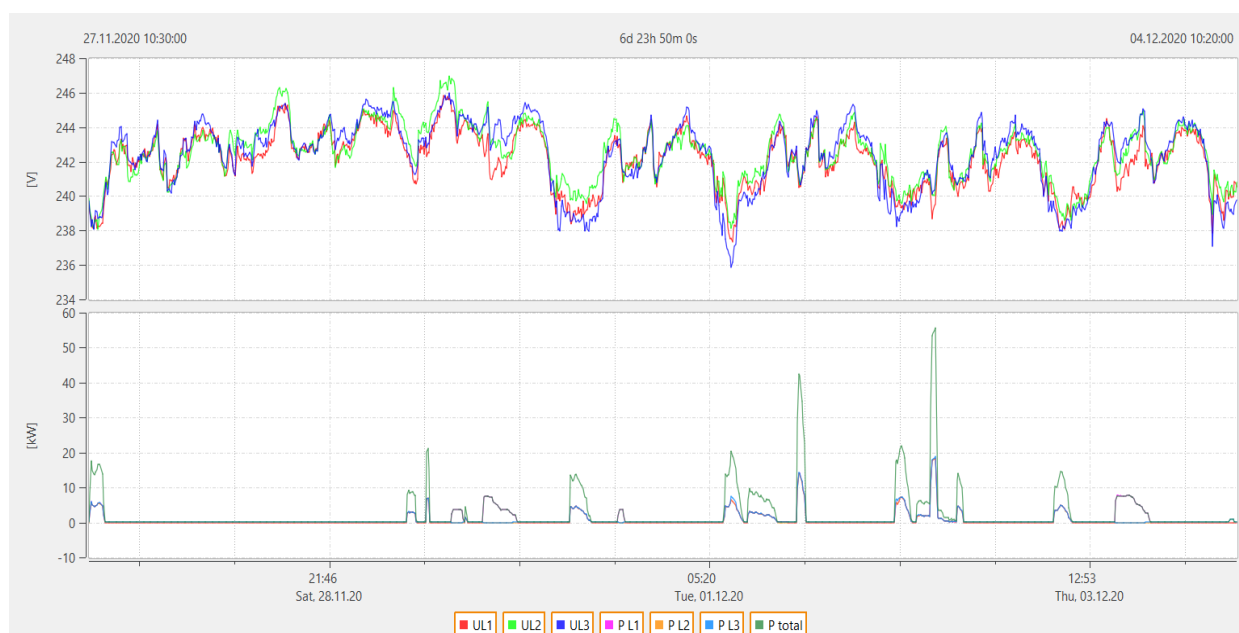
Sl. 5.14. Graf struje za jednofazno punjenje

Iz slike 5.15. vidljivo je kako u trenutku spajanja vozila na punionicu u nekim slučajevima dolazi do propada frekvencije te porasta frekvencije u trenutku isključenja, ali značajnije oscilacije u frekvenciji vidljive su u trenucima kada nema priključenih vozila pa se može zaključiti da punjenje vozila nije značajno utjecalo na iznos frekvencije.

Što se tiče napona (Slika 5.16.), opet su vidljivi propadi prilikom uključanja kao i kod frekvencije i to do nekoliko volta. Kod jednofaznog punjenja dolazi do povećanja nesimetrije napona zbog propada napona samo u fazi L_1 .

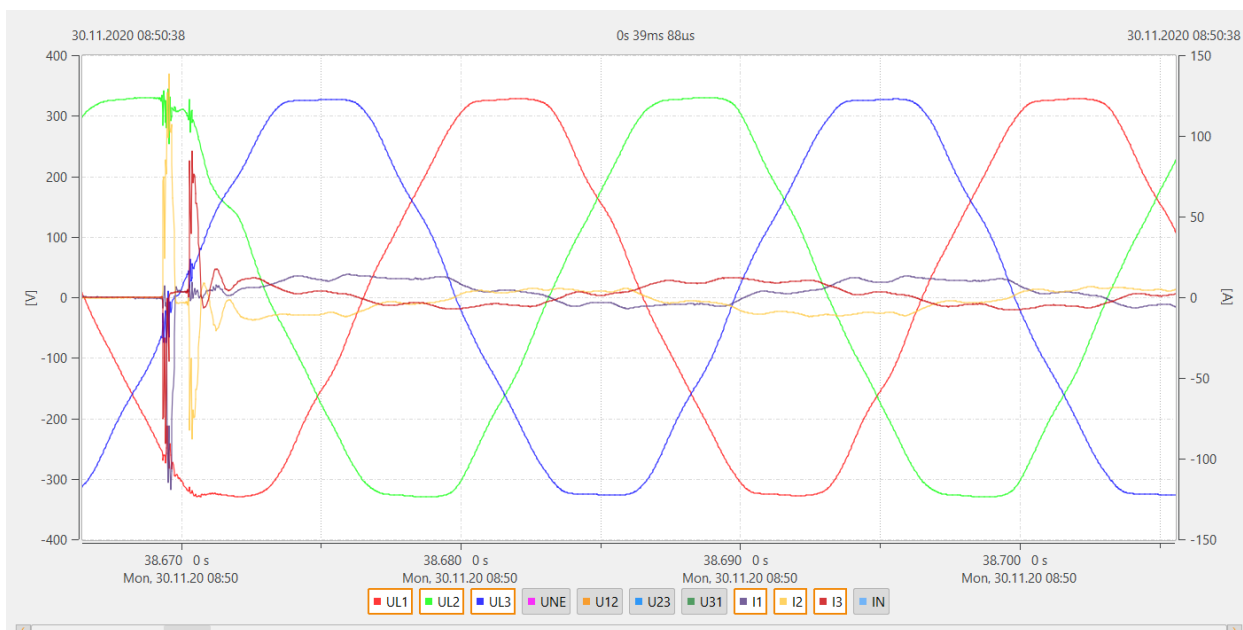


Sl. 5.15. *Frekvencija i snaga kroz tjedan*

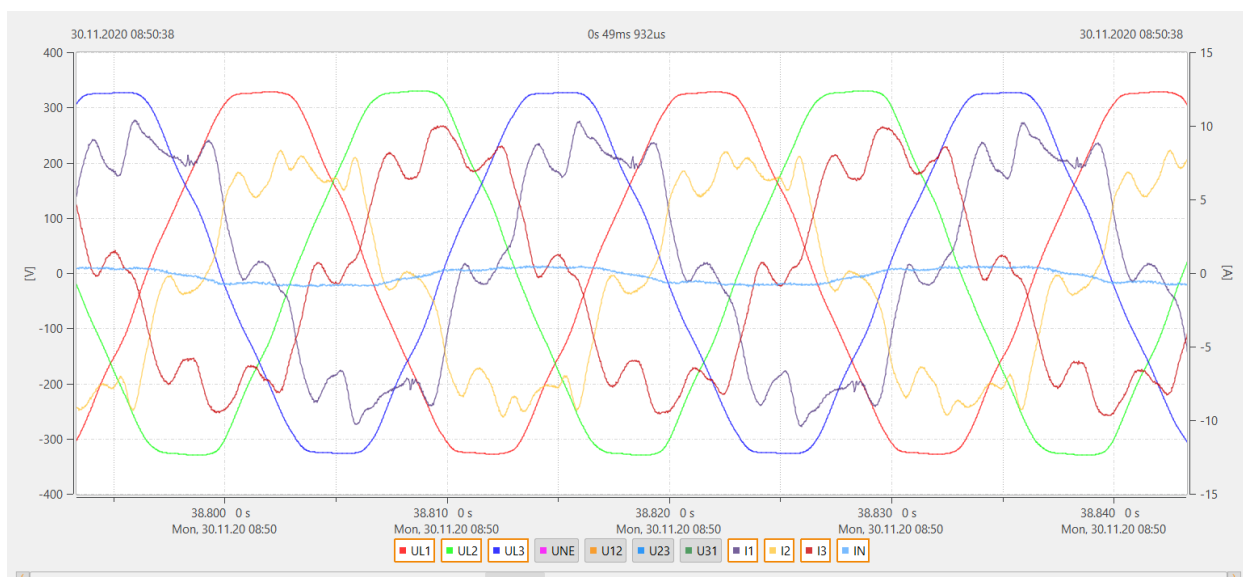


Sl. 5.16. *Napon i snaga kroz tjedan*

Ukoliko pogledamo struju uklopa (Slika 5.17.), vidimo da se ona ponaša kao i kod većine drugih trošila, tj. da dolazi do naglih skokova struje u početku, ali oni brzo opadaju. Također vidljivi su propadi napona u tim trenucima.

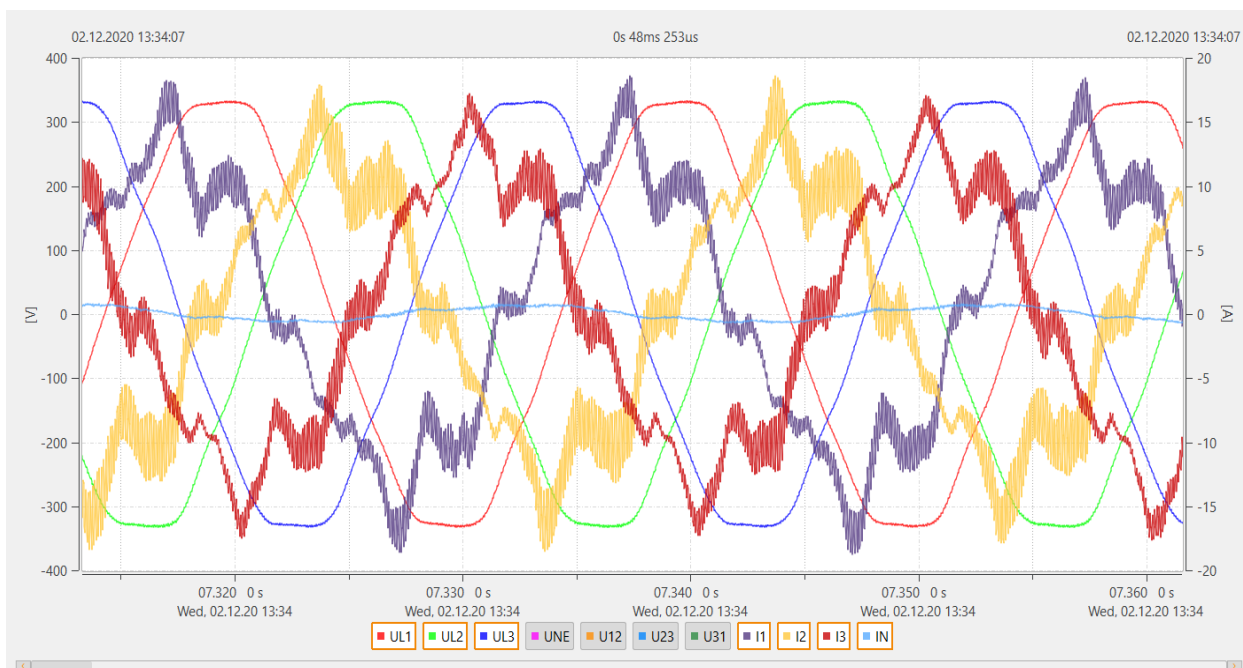


Sl. 5.17. *Napon i struja u trenutku spajanja vozila na punionicu*



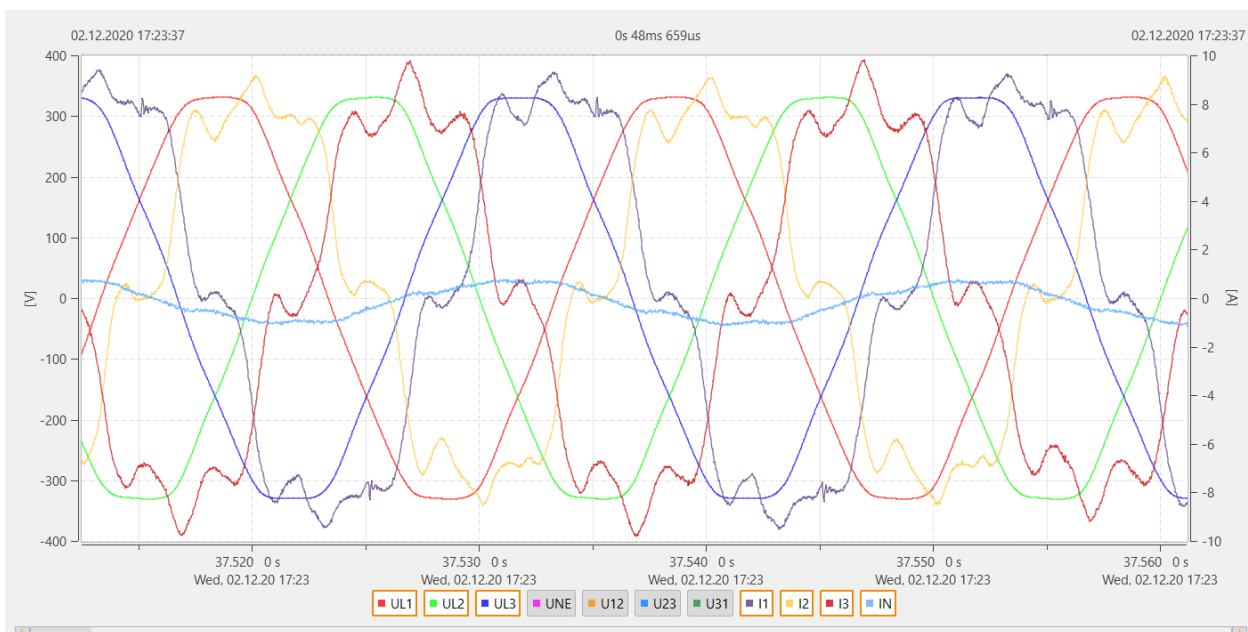
Sl. 5.18. *Napon i struja neposredno nakon uklopa*

Na sljedećoj slici prikazan je valni oblik struje nakon jednog sata punjenja. Nažalost nije moguće prikazati struju na početku punjenja konkretno za ovaj slučaj jer uređaj sprema valne oblike samo u slučaju pojave tranzijenata. Zato ćemo za usporedbu uzeti valni oblik sa slike 5.18. te primjećujemo kako se struja uvelike razlikuje, i po valnom obliku i po treperenju struje. Naravno razlikuje se i po amplitudi struje koja je veća na početku punjenja. Harmonijski spektar za ovaj valni oblik vidljiv je na slici 5.22.



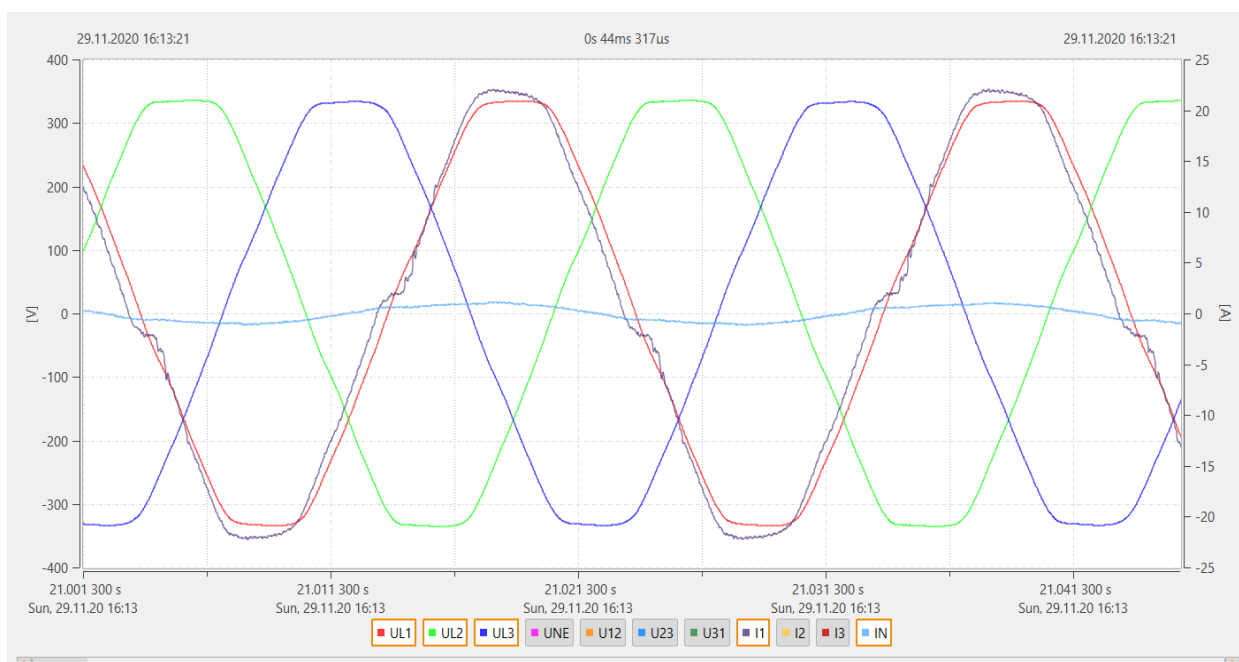
Sl. 5.19. Napon i struja nakon jednog sata punjenja

Valni oblik struje istog ciklusa punjenja nakon 5 sati i 50 minuta prikazan je na slici 5.20. Struja je dvostruko manje amplitude nego prije i više nije prisutno toliko izraženo treperenje valnog oblika. THD valnih oblika približno je jednak i iznosi oko 20 %. Upravo iz toga vidimo kako THD nije dobar pokazatelj utjecaja na mrežu jer, iako su približno jednaki, u drugom slučaju ima značajno manji utjecaj zbog iznosa amplitude struje. Harmonijski spektar za ovaj valni oblik vidljiv je na slici 5.23.



Sl. 5.20. Napon i struja nakon 5 sati i 50 minuta punjenja

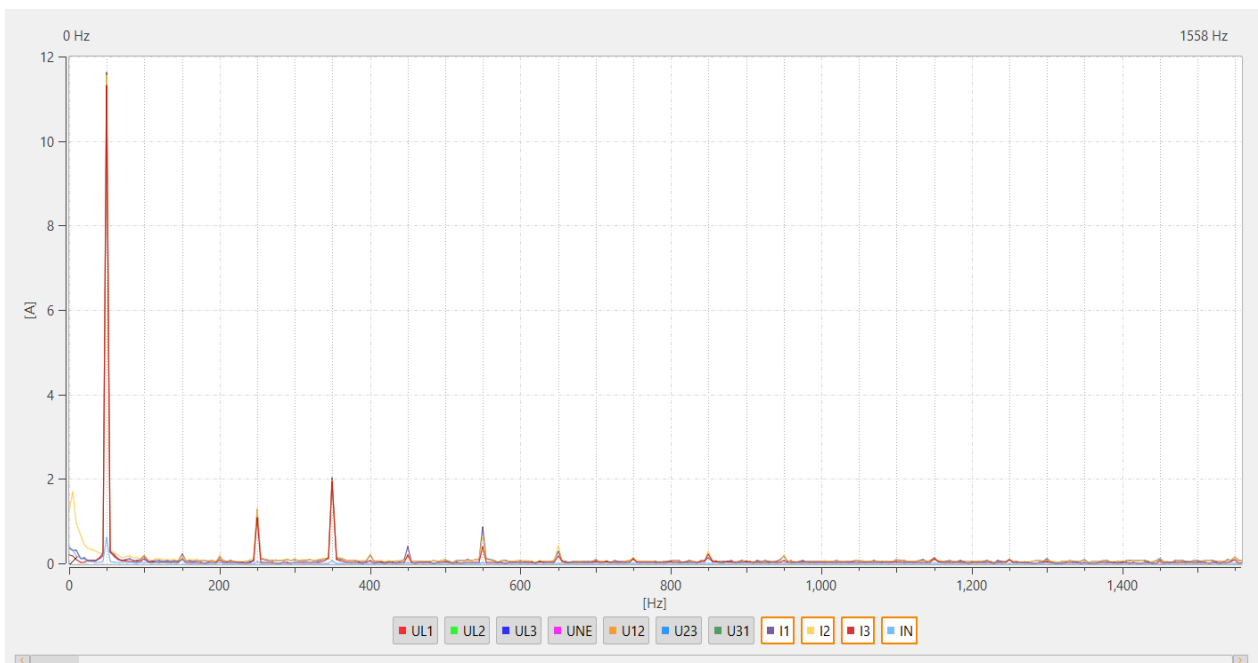
Za jednofazno punjenje imamo očitavanje nakon 43 minute, prikazano na slici 5.21., gdje vidimo kako praktički nema faznog pomaka između struje i napona te je struja jako slična sinusnom obliku (također vidljivo i iz harmonijskog spektra na slici 5.25.), što je sa stanovišta kvalitete električne energije vrlo poželjna situacija, jer je utjecaj na mrežu minimalan.



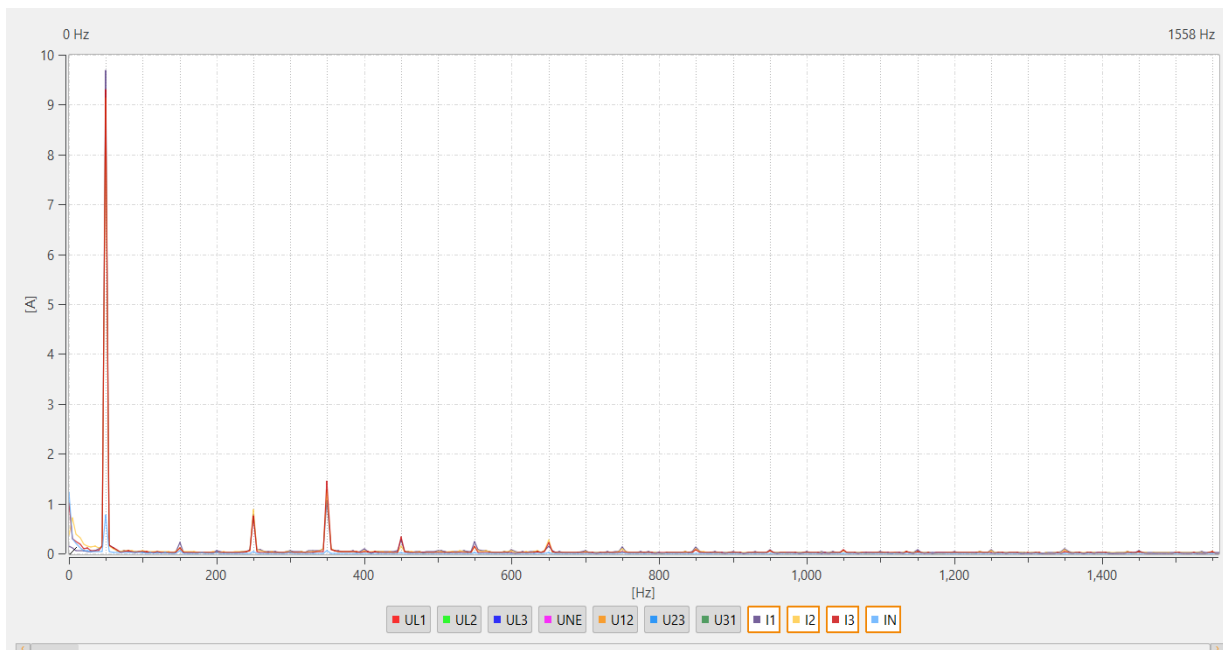
Sl. 5.21. Valni oblici napona i struje nakon 43 minute punjenja

Slika 5.22. i 5.23. prikazuju spektralni sastav za trofazno punjenje. U harmonijskom spektru vidljivi su harmonici na 0Hz, oni predstavljaju istosmjernu komponentu struje koja je u početku izraženija i s vremenom opada. Nakon jednog sata punjenja ističu se redom 7, 5, 11, 9 i 13. harmonik. Nema izraženih parnih harmonika što znači da je valni oblik struje jednak iznad i ispod vremenske osi. Ukoliko malo bolje pogledamo slike 5.22. i 5.23. primijetit ćemo kako harmonijski spektar nije isti za sve tri faze iz čega zaključujemo da je prisutna nesimetrija napona.

Treba naglasiti kako je ovo samo primjer za jedno vozilo u jednom ciklusu punjenja, harmonijski spektar se može značajno razlikovati ovisno o tome koje vozilo i s koliko kvalitetnom upravljačkom elektronikom je priključeno na istu punionicu.

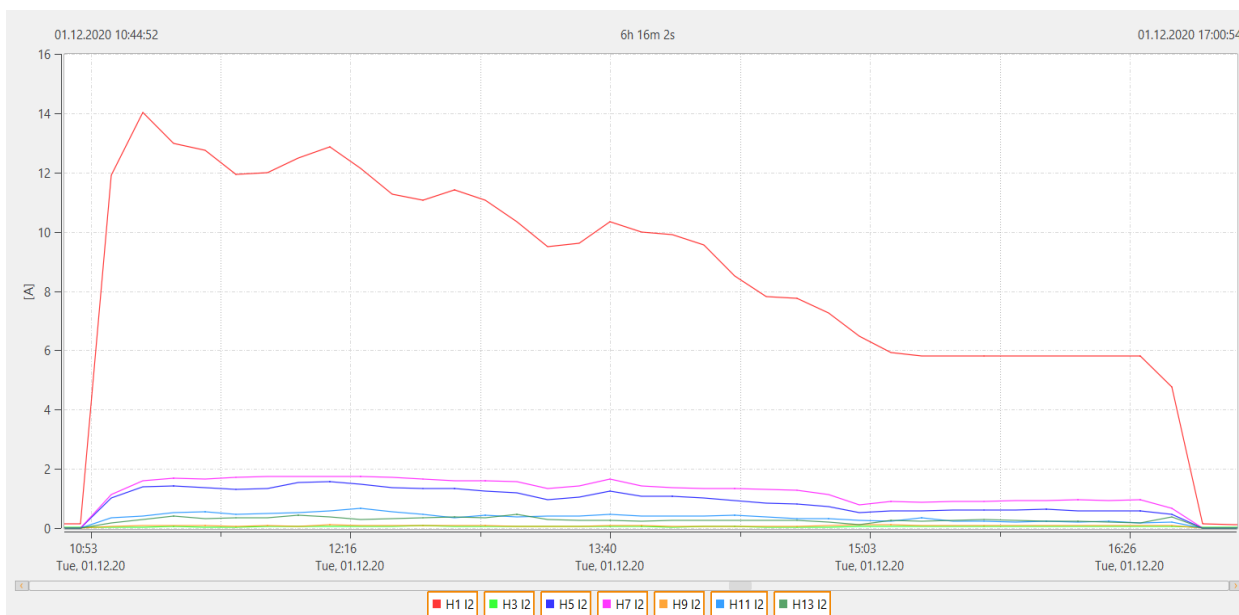


Sl. 5.22. *Harmonijski spektar nakon jednog sata za trofazno punjenje*



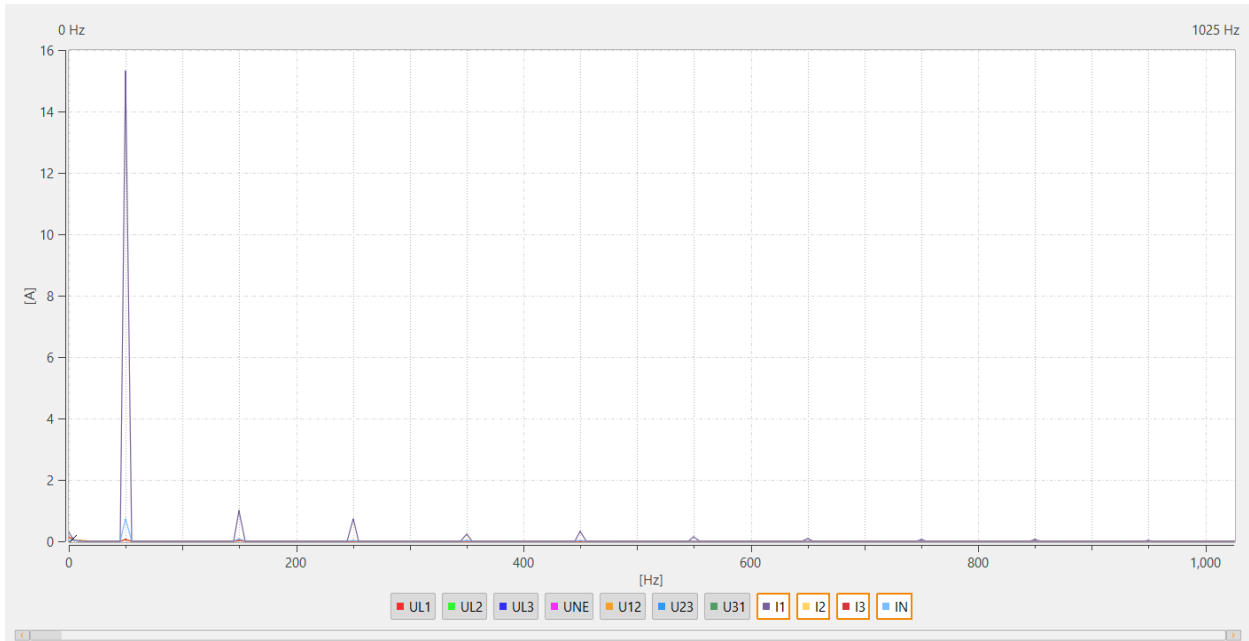
Sl. 5.23. *Harmonijski spektar nakon 5 sati i 50 minuta za trofazno punjenje*

Na slici 5.24. prikazan je harmonijski spektar kroz cijelo vrijeme punjenja za trofazni punjač. Kako se ne radi o istom ciklusu punjenja kao na Slici 5.22. i 5.23. vidljive su određene razlike, odnosno harmonici su redom 1, 7, 5, 11, 13, 9 i 3. Također, 11 i 13 harmonik se mjestimično isprepliću iz čega vidimo kako utjecaj na mrežu nije isti tokom cijelog punjenja.

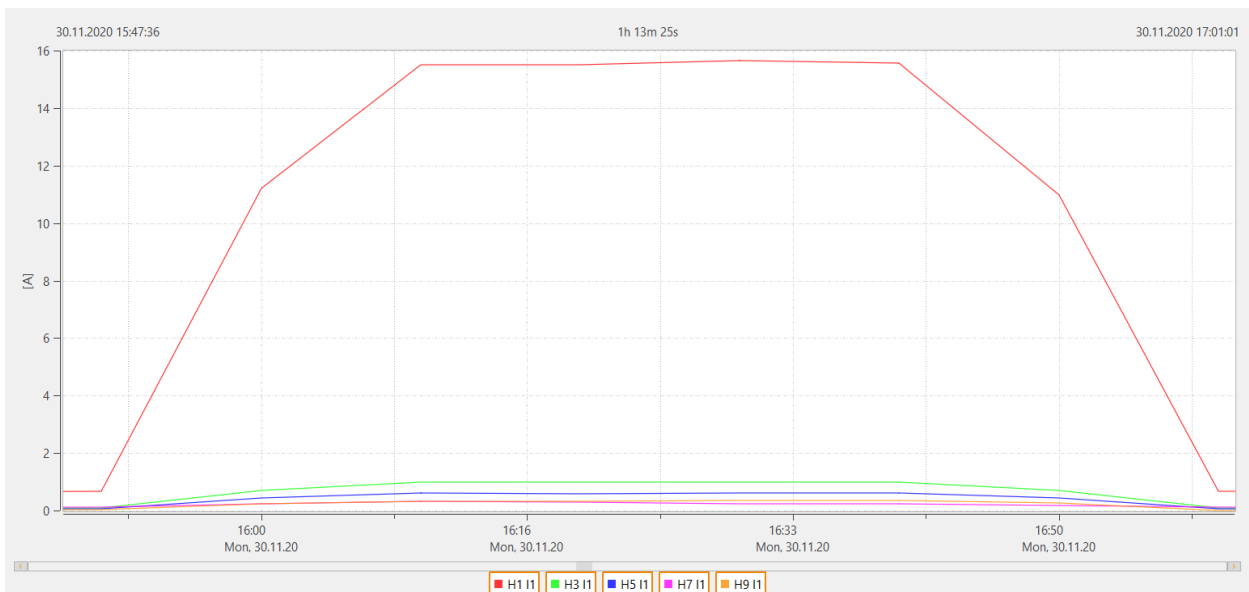


Sl. 5.24. *Harmonijski spektar kroz cijelo vrijeme punjenja za trofazno punjenje*

Nažalost, za jednofazno punjenje imamo prikaz harmonijskog spektra u samo jednom trenutku (Slika 5.25.). Kako je vidljivo na slici 5.21. valni oblik struje je približno sinusoida što je vidljivo i iz slike 5.25. Dominantni harmonik je 1, a značajno manji su redom 3, 5, 9 i 7 te intenziteti harmonika opadaju velikom brzinom. Harmonik na 0 Hz, odnosno istosmjerna komponenta je neznatna.

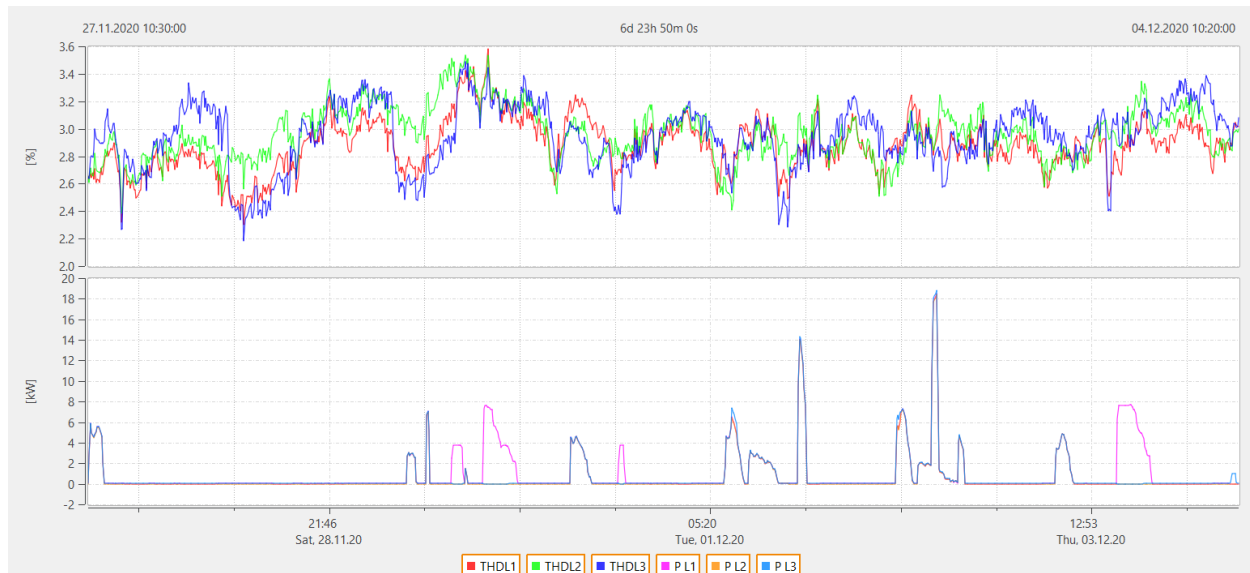


Sl. 5.25. *Harmonijski spektar nakon 43 minute za jednofazno punjenje*



Sl. 5.26. *Harmonijski spektar kroz cijelo vrijeme punjenja za jednofazno punjenje*

Slijedeća slika prikazuje THD napona kroz cijeli tjedan. Iznos mu varira između 2,2 % i 3,6 %. To je svakako unutar 8 % koje propisuje norma EN 50160. Uspoređujući graf THD-a sa vremenima uključenosti vozila na punionicu može se zaključiti kako je punionica samo u nekim slučajevima doprinijela rastu THD-a, dok u većini slučajeva nije.



Sl. 5.27. THD napona i snage kroz tjedan

Na slijedećoj slici prikazane su relativne i apsolutne vrijednosti strujnog THD-a gdje je vidljivo da THD u postocima nije dobar pokazatelj jer je visok kada uopće nema tereta, a kada je teret prisutan on je niži. To naravno nije dobro jer daje krivu sliku situacije, on se računa u usporedbi sa osnovnim harmonikom u tom trenutku te ako je npr. struja mala ali izobličena dobit će se dojam da je situacija loša, iako praktički nema utjecaja na mrežu. Također, vidi se da u periodima kada je priključen jednofazni punjač na fazu L_1 , THD u fazi L_2 i L_3 snažno raste iako one uopće nisu opterećene. S druge strane, THD u amperima daje punu vjerniju sliku jer je prisutan samo u slučajevima kada su vozila priključena i raste kako se ciklus punjenja približava kraju, što se i očekuje jer struja postaje sve nepovoljnijeg valnog oblika.



Sl. 5.28. *Usporedba strujnog THD-a – relativni i apsolutni iznosi*

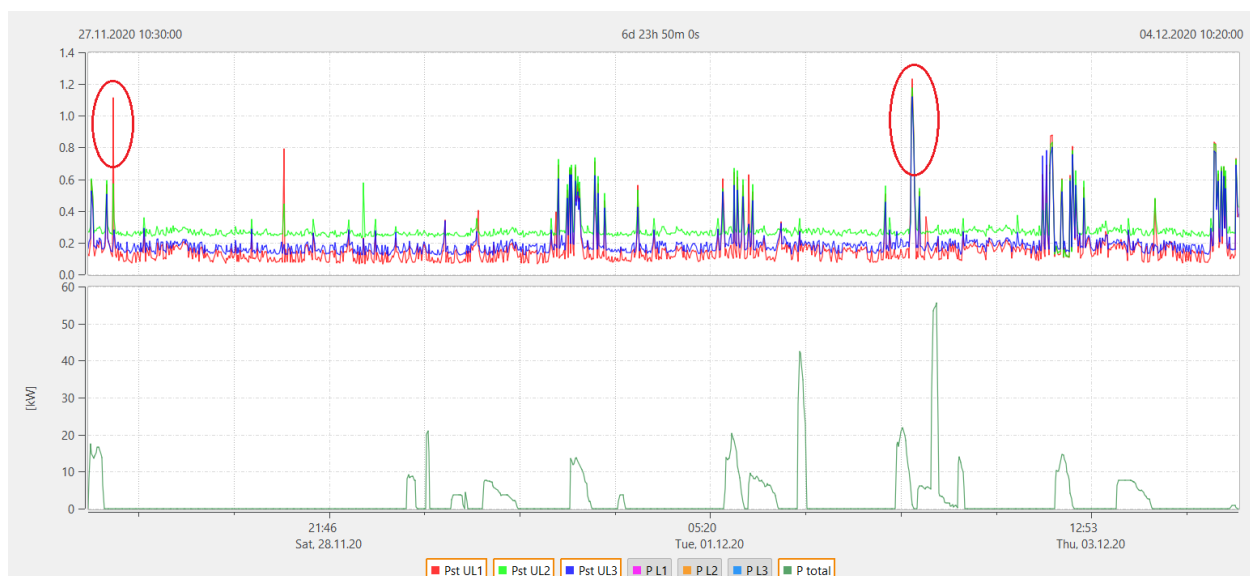
TDD kao osnovu za računanje uzima najveću zabilježenu vrijednost struje u cijelom periodu mjerenja i sve računa na osnovu nje. U ovom slučaju ta struja iznosi 78,48 A u trenutku kada su na punionicu priključena dva vozila.



Sl. 5.29. *Dijagram TDD-a i struje kroz tjedan*

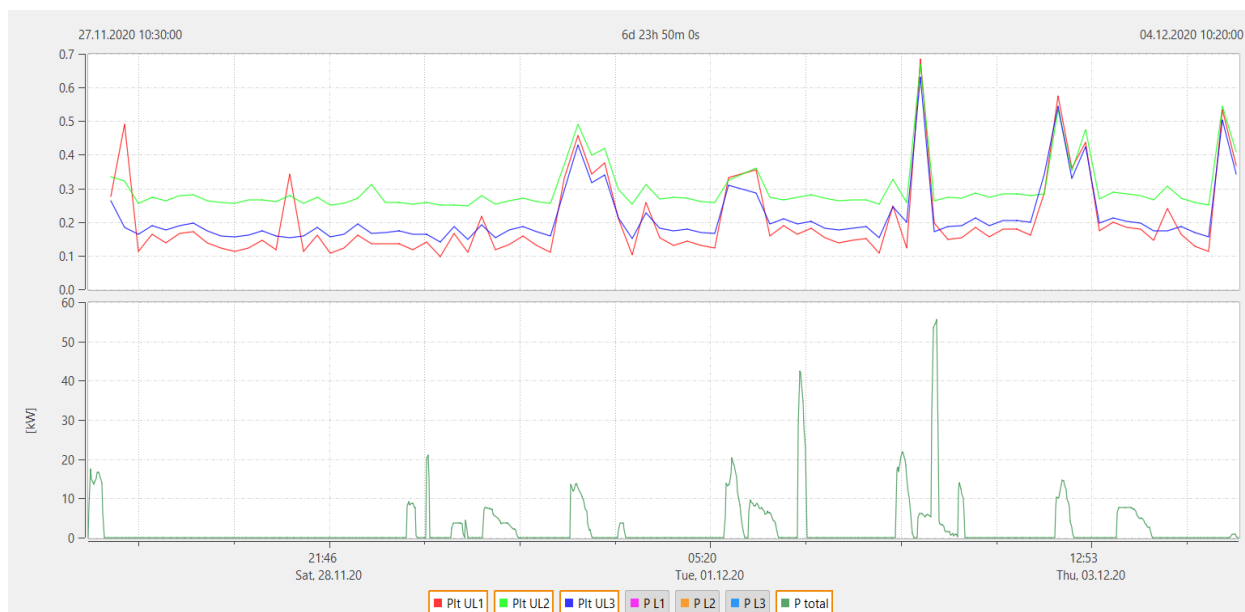
Dijagram je vrlo sličan THD-u u amperima, ali ovdje se dobivaju postotne vrijednosti koja su jednostavnije za vrednovanje i usporedbu. Trofazne punionice imaju veći TDD od jednofaznih jer im je valni oblik struje nepovoljniji.

Na slici 5.30. prikazani su kratkotrajni flikeri i snaga. Osim pri uključenju, u nekim slučajevima značajniji flikeri se javljaju i prilikom isključenja, što je i očekivano jer dolazi do promjene tereta pa tako i do treperenja napona. Većina kratkotrajnih flikera ima jakost manju od 0,8 te je izražen utjecaj punionice na njihov iznos, osim u rijetkim slučajevima kada oni dolaze iz mreže. U dva trenutka dolazi do prekoračenja iznosa od 1, u prvom slučaju samo u fazi L1 i to nezvezano za punionicu, a u drugom slučaju u sve tri faze uz jasno vidljiv doprinos punionice.



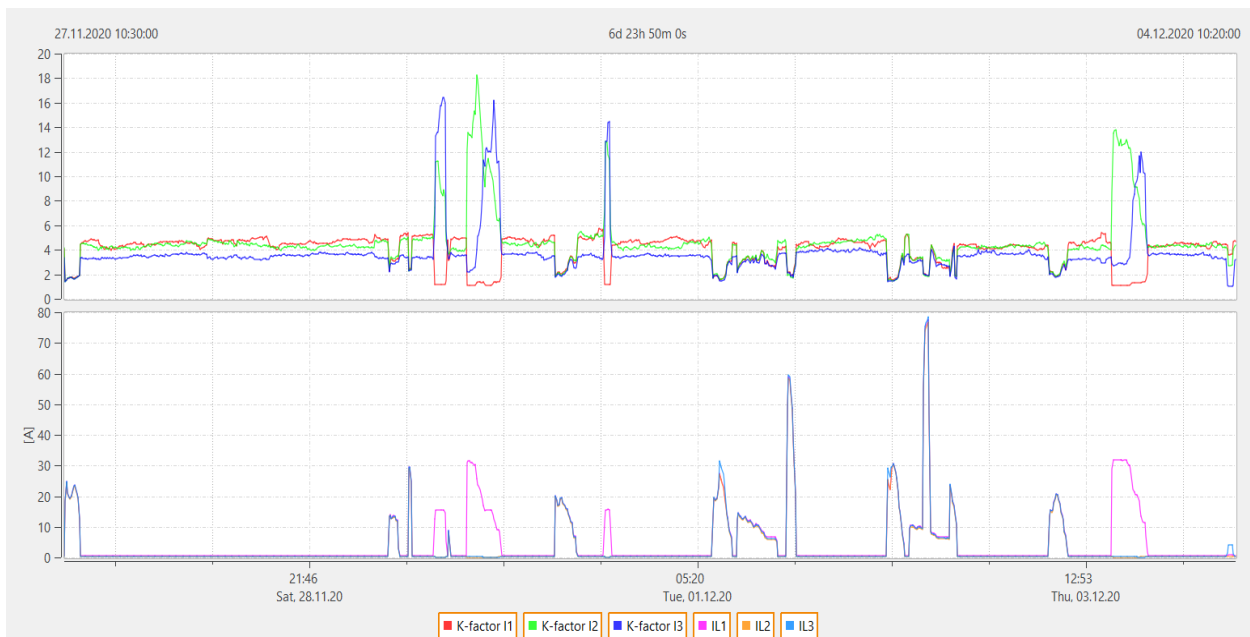
Sl. 5.30. *Kratkotrajni flikeri (P_{st}) i snaga kroz tjedan*

No, dugotrajni flikeri su bitniji jer se oni vrednuju u normi EN 50160. Iz slike 5.31. vidljivo je kako se većina dugotrajnih flikera događa u periodima punjenja vozila, ali oni svi imaju vrijednost nižu od 0,7, a norma propisuje graničnu vrijednost od 1.



Sl. 5.31. Dugotrajni flikeri (P_{fl}) i snaga kroz tjedan

Na slici 5.32. prikazani su K-faktor i struja punionice. Kao i kod THD-a vidljivo je kako je iznos veći u vremenu kada nema priključenog trošila nego kada je trošilo priključeno što dolazi iz načina na koji se izračunava i govori nam kako taj pokazatelj nije najpouzdaniji. Vidljivo je kako K-faktor raste kako se ciklus punjenja približava kraju, što je i očekivano jer je izobličenje struje veće. U svim periodima punjenja iznos je manji od 3, što znači da i standardni transformator može bez problema pogoniti ovo opterećenje gotovo cijelim svojim kapacitetom. U slučajevima kada je aktivno samo jednofazno punjenje iznosi u fazama L_2 i L_3 snažno rastu, ali oni ne utječu na kapacitet transformatora jer su te dvije faze neopterećene i ti iznosi nisu mjerodavni. Također je vidljivo kako je K-faktor prihvatljiviji kod jednofaznog punjenja, a to se već vidjelo i kod harmonijskog spektra.



Sl. 5.32. *K-faktor i struja po fazama kroz tjedan*

6. ZAKLJUČAK

Električna vozila velikom brzinom postaju dio svakodnevnog života. Takav brzi rast za postojeću distributivnu mrežu predstavlja prijetnju ukoliko se mreža ne prilagodi novoj vrsti trošila.

Kvaliteta električne energije, odnosno njezini pokazatelji, od iznimnog su značaja za odražavanje sustava u normalnom pogonu. Ukoliko bilo koji od pokazatelja odstupa od definiranih granica moguće su ozbiljne i dugotrajne posljedice na opremi distributivne mreže kao i trošilima krajnjih korisnika.

Električna vozila su nelinearna trošila pa problem za postojeći sustav predstavljaju prvenstveno struje viših harmonika. Taj utjecaj se razlikuje ovisno o tome pune li se vozila na kućnom priključku ili na javnoj punionici, pri čemu je na punionici manji jer je ona za tu namjenu predviđena.

Analizom mjerenja na punionici zaključeno je kako u niti jednom trenutku nije došlo do prekoračenja limita definiranih normom EN 50160 po niti jednom pokazatelju, što znači da punionica nema značajnijeg utjecaja na mrežu. Analizom dijagrama napona i frekvencije zaključeno je kako punionica gotovo nema utjecaja na te pokazatelje.

Harmonijski spektar za jednofazno i trofazno punjenje bitno se razlikuje te je jasno vidljivo kako je ono kod jednofaznog punjenja povoljnije po harmonijskom spektru, ali kod njega se javlja problem nesimetrije jer je opterećena samo jedna faza sustava. Usporedbom dijagrama THD-a i TDD-a zaključeno je kako je TDD puno vjerniji pokazatelj i daje realniju sliku stvarne situacije. Uzevši u obzir vrijednost K-faktora promatrane punionice vidljivo je kako on nije značajan te prema tome zaključujemo kako se standardni transformator može opteretiti gotovo nazivnom snagom bez posljedica i nema potrebe za njegovom zamjenom.

Kako bi bili sigurni da će s daljnjim povećanjem električnih vozila na prometnicama sve biti u redu sa opskrbom električne energije, elektrodistribucijske tvrtke trebaju na vrijeme početi sa usavršavanjem i nadogradnjom postojećeg sustava. Također, kako bi se korisnike potaknulo na prijelaz na električna vozila potrebno je usavršiti infrastrukturu punionica, tj. povećati njihov broj.

LITERATURA

- [1] M.R. Othman, Z. Helwani, I. Idris, Diversifying bio-petro fuel sources for future energy sustainability and its challenges, ResearchGate, 2018, dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/324486523_Diversifying_bio-petro_fuel_sources_for_future_energy_sustainability_and_its_challenges, 12.05.2021
- [2] M. Sabarimuthu, Measurement and Analysis of Power Quality Issues Due to Electric Vehicle Charger, IOP Publishing Ltd, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1055 012131, str. 3, 2021
- [3] M. E. Genevois, M. Cedolin, Recharging Stations Implementation for Electric Vehicles, INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY and ENVIRONMENT, Vol. 12, str. 11, 2018
- [4] J. Lamar, Deliver Power More Efficiently with On-board and Off-board Charging Systems, Wolfspeed, 2020, dostupno na: <https://www.wolfspeed.com/knowledge-center/article/deliver-power-more-efficiently-with-on-board-and-off-board-charging-systems>, 12.07.2021
- [5] M. Hale, ABB Product Group EV Charging Infrastructure, Society Of Motor Manufacturers And Traders Limited, 2011, dostupno na: <https://www.smmt.co.uk/wp-content/uploads/sites/2/ABB-Product-Group-EV-Charging-Infrastructure.pdf>, 12.07.2021
- [6] A. Dubey, S. Santoso, Electric Vehicle Charging on Residential Distribution Systems: Impacts and Mitigations, IEEE Access, Vol. 3, str. 1875, rujan 2015
- [7] Swing Electric's Ultimate EV Buyer's Guide, Swing Electric, 2019, dostupno na: <https://www.swingelectric.com/buyers-guide/picking-an-electric-car/>, 13.07.2021
- [8] Z. Klaić, S. Nikolovski, KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE – MJERENJA PREMA NORMI EN 50160, Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2003
- [9] N. Shah, Harmonics in power systems - Causes, effects and control, Siemens Industry, Inc., SAD, 2013
- [10] TRIPLEN HARMONIC MITIGATION, Larsen & Toubro, dostupno na: https://corpwebstorage.blob.core.windows.net/media/39909/triple-n-harmonics_blog.pdf, 06.08.2021
- [11] E. Csanyi, What are Triplen Harmonics and where do they happen?, Electrical Engineering Portal, 2018, dostupno na: <https://electrical-engineering-portal.com/what-are-triplen-harmonics>, 06.08.2021
- [12] Francisco C. De La Rosa, HARMONICS AND POWER SYSTEMS, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, SAD, 2006

- [13] Cadence System Analysis, Current Harmonics Indexing Using Total Demand Distortion, Cadence, dostupno na: <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2021-current-harmonics-indexing-using-total-demand-distortion>, 03.08.2021
- [14] R. Frank, Power Quality And Voltage Flicker Explained, The Electricity Forum, dostupno na: <https://www.electricityforum.com/iep/power-quality/power-quality-voltage-flicker>, 03.08.2021
- [15] T. Swayne, Voltage Flicker Calculation Methodology, Leidos, 2016, dostupno na: <https://www.edockets.state.mn.us/EFiling/edockets/searchDocuments.do?method=showPoup&documentId=%7B99AE7636-467A-422E-B8A1-080E568F8D02%7D&documentTitle=201612-127423-04>, 04.08.2021
- [16] H. Shareef, Md. M. Islam, A. Mohamed, A review of the stage-of-the-art charging technologies, placement methodologies, and impacts of electric vehicles, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 64, str. 403 - 420, listopad 2016, dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116302568?via%3Dihub>, 07.09.2021
- [17] J. R. Nerad, How to Install an Electric Car Charging Station, J.D. Power, 2021, dostupno na: <https://www.jdpower.com/cars/shopping-guides/how-to-install-an-electric-car-charging-station>, 19.08.2021
- [18] M. Maisch, The weekend read: EV charging meets Blockchain, pv magazine, 2018, dostupno na: <https://www.pv-magazine.com/2018/09/29/the-weekend-read-ev-charging-meets-blockchain/>, 19.08.2021
- [19] Passive Filter Design, Manitoba Hydro International, Ltd., dostupno na: https://www.pscad.com/webhelp/Master_Library_Models/Passive/Filters/Passive_Filter_Design.htm, 24.08.2021
- [20] K. Deshpande, R. Holmukhe, Y. Angal, K-Factor Transformers and Non-linear Loads, Liebert Corporation, Pune, India, dostupno na: <http://www.kennisplatform-emc.nl/wp-content/uploads/2017/10/K-factor-transformers.pdf>, 07.09.2021
- [21] S. Deokar, L. Waghmare, Impact of power system harmonics on insulation failure of distribution transformer and its remedial measures, 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, Vol. 3, str 136 – 140, 2011, dostupno na: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5941817>, 07.09.2021
- [22] The mobile Tool for the power Quality Expert, a-eberle, dostupno na: <https://www.a-eberle.de/produkte/the-mobile-tool-for-the-expert-pq-box-200/?lang=en>, 16.06.2021

SAŽETAK

Smanjenjem rezervi fosilnih goriva i povećanjem brige za okoliš postepeno se uvode nove tehnologije, među njima i električna vozila kao sredstvo prijevoza. Iako pozitivno utječu na smanjenje utjecaja na okoliš, predstavljaju novu prijetnju elektroenergetskom sustavu. Kako su električna vozila, odnosno njihove punionice nelinearna trošila, u mrežu vraćaju struje viših harmonika i na taj način utječu i na opremu distributivnog sustava i na trošila koja se iz njega napajaju. Područjem povratnog utjecaja na mrežu bavi se kvaliteta električne energije, a granične vrijednosti parametara definirane su normom EN 50160.

Ovim diplomskim radom pokazano je na primjeru mjerenja na jednoj punionici kako ona povratno utječe na mrežu. Za mjerenje je korišten mjerni uređaj PQ-Box 200, a za analizu podataka softver WinPQ mobil. Prikazane su osnovne električne veličine trošila, analizirani svi bitni parametri koji utječu na kvalitetu električne energije uz naglasak na harmonijskom spektru i njegovu promjenu tokom ciklusa punjenja vozila. Zaključeno je kako punionica nije u značajnoj mjeri utjecala na ostatak mreže.

Ključne riječi: električna vozila, EN 50160, harmonici, javne punionice, kvaliteta električne energije

SUMMARY

IMPACT OF ELECTRIC VEHICLES ON POWER QUALITY

By reducing fossil fuel reserves and increasing care for the environment, new technologies are gradually being introduced, including electric vehicles as a means of transport. Although they have a positive effect on reducing the impact on the environment, they pose a new threat to the power system. As electric vehicles, or their charging stations, are non-linear loads, they inject harmonic currents to the grid and in that way affect both the distribution system equipment and the consumers that are powered from it. Electric power quality deals with impact on the grid, and the limit values of the parameters are defined by the EN 50160 standard.

This master's thesis shows the example of measurements at a charging station and how it affects the network. The measuring device PQ-Box 200 was used for measurement, and the WinPQ mobil software was used for data analysis. The fundamental electrical quantities of the load are presented, all important parameters that affect the power quality are analyzed, with an emphasis on the harmonic spectrum and its change during the vehicle charging cycle. It was concluded that the charging station did not significantly affect the grid.

Keywords: electric vehicles, European norm EN 50160, harmonics, charging stations, electric power quality