

Lovro Valentić
HEP Plin d.o.o.
lovro.valentic4@gmail.com

Heidi Adrić
Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih
tehnologija Osijek
heidi.margus@ferit.hr

Zvonimir Klaić
Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih
tehnologija Osijek
zvonimir.klaic@ferit.hr
Mario Primorac
Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih
tehnologija Osijek
mario.primorac@ferit.hr

UTJECAJ ULTRA BRZE PUNIONICE NA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI

SAŽETAK

U referatu je prikazan utjecaj ultra brze punionice na kvalitetu električne energije u distribucijskoj mreži, s posebnim naglaskom na harmonike kao ključnim parametrom kvalitete električne energije. Prikazani podaci prikupljeni su mjerenjem na jednoj ultra brznoj punionici u Hrvatskoj u razdoblju od dvadeset šest dana. Rezultati mjerenje kvalitete električne energije analizirani su u skladu s ograničenjima propisanih normom HRN EN 50160:2023 (*Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava*).

Ključne riječi: ultra brza punionica, kvaliteta električne energije, harmonici, ukupno harmonijsko izobličenje (THD), HRN EN 50160:2023

THE INFLUENCE OF SUPERCHARGERS ON POWER QUALITY IN DISTRIBUTION NETWORK

SUMMARY

This paper presents the influence of superchargers on power quality in distribution networks. The main focus is on harmonics since they are considered one of the most essential power quality parameter. The data presented was collected from a supercharging station in Croatia over a period of twenty-six days. The results of the power quality measurements were analyzed following the limits prescribed by the HRN EN 50160:2023 (*Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks*) standard.

Key words: superchargers, power quality, harmonics, total harmonic distortion (THD), HRN EN 50160:2023

1. UVOD

Električna vozila često su povezana s inicijativama za održivost i energetska tranziciju te s obzirom na trenutne globalne okolnosti, mnoge države i gradovi aktivno potiču i subvencioniraju njihovu kupovinu i upotrebu. Električna vozila mogu doprinijeti smanjenju negativnih utjecaja na okoliš, diversifikaciji izvora energije, poticanju tehnološkog napretka i promicanju održive mobilnosti. Rastom uporabe električnih vozila, porasla je potreba za promjenom infrastrukture distribucijske mreže integracijom punjača električnih vozila. Brzi napredak tehnologije omogućio je električnim vozilima da postanu značajno zastupljeni u prometu, čime se stvaraju nove mogućnosti, ali i izazovi za distribucijske mreže. Jedan od izazova za distribucijske mreže je i kvaliteta električne energije.

Harmonijsko izobličenje smatra se jednim od ključnih pokazatelja kvalitete električne energije te predstavlja značajan izazov u suvremenim distribucijskim mrežama, utječući na stabilnost i pouzdanost opskrbe električnom energijom. Razumijevanje utjecaja harmonijskog izobličenja na distribucijske mreže doprinosi optimalnom radu mreže i opreme. Velike vrijednosti harmonijskih izobličenja (naponskih i strujnih) mogu imati štetne posljedice na distribucijsku mrežu kao što su: pregrijavanje transformatora, povećani rizik od kvarova i smanjenje radnog vijeka opreme. Dodatno, povećanje struja i napona viših harmonika može stvoriti izazove u održavanju integriteta izolacije, što zahtijeva sustavno praćenje i kontrolu. S obzirom na rastuću uporabu nelinearnih opterećenja i primjenu filtera za korekciju faktora snage, nužno je razviti strategije za smanjenje utjecaja harmonijskog izobličenja i održavanje stabilnosti distribucijskih mreža. Uključivanje analize harmonika u sve faze planiranja, projektiranja i održavanja distribucijskih mreža postaje neophodno kako bi se osigurala efikasna opskrba električnom energijom uz minimalne rizike i troškove [1].

Harmonijska izobličenja napona i struje, smatraju se glavnim problemom kvalitete električne energije kada su električna vozila spojena na distribucijsku mrežu [2]. Ovisno o mjestu punjenja električnog vozila, punjači se mogu podijeliti na kućne punjače te punjače na javnim prostorima (punionice električnih vozila) [3]. Punjači električnih vozila mogu se klasificirati kao brzi i spori punjači, ovisno o vremenu potrebnom za punjenje baterije do maksimalne napunjenosti. Spori punjači su oni punjači kojima potrebno između osam do šesnaest sati kako bi maksimalno napunili bateriju, brzi punjači bateriju pune između četiri do osam sati. Ultra brzi punjači mogu napuniti bateriju električnog vozila do 80 % stanja napunjenosti baterije u vremenu od petnaest minuta [4]. Glavna prednost ultra brzih punjača je stvaranje mogućnosti vozačima da brzo i učinkovito napune električna vozila tijekom dužih putovanja. Ovi ultra brzi punjači značajno doprinose širenju i prihvaćanju električne mobilnosti te pružaju korisnicima praktično i učinkovito iskustvo punjenja.

U referatu je analiziran utjecaj jedne ultra brze punionice u Republici Hrvatskoj na kvalitetu električne energije s naglaskom na harmonijska izobličenja. Mjerenje kvalitete električne energije izvedeno je suvremenim trofaznim mrežnim analizatorom a-eberle PQ-Box 200, u razdoblju od 27 dana, a rezultati mjerenja kvalitete električne energije analizirani su u skladu s ograničenjima norme HRN EN 50160:2023 (*Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava*).

Radom je obuhvaćeno pet poglavlja. Pojam harmonijskog izobličenja kao pokazatelja kvalitete električne energije opisan je u drugom poglavlju. U trećem poglavlju analizirani su prikupljeni podaci dobiveni mjerenjem kvalitete električne energije na jednoj ultra brznoj punionici. Zaključak referata dan je u četvrtom poglavlju, dok je popis literature prikazan u petom poglavlju.

2. HARMONIJSKO IZOBLIČENJE

Loša kvaliteta električne energije je bilo koji problem napajanja koji se očituje kao promjena napona, struje i frekvencije koja može rezultirati kvarom ili nepravilnim radom opreme korisnika. Kvalitetu električne energije moguće je opisati različitim pokazateljima, ali se harmonici smatraju jednim od ključnih pokazatelja u suvremenoj distribucijskoj mreži. Harmonici su sinusni oblici napona ili struje čije su frekvencije cjelobrojni višekratnici nazivne frekvencije opskrbnog sustava [5]. Dva su parametra kojima se može opisati harmonijsko izobličenje, a to su: ukupno harmonijsko izobličenje (engl. *Total harmonic distortion - THD*) te ukupno harmonijsko opterećenje s obzirom na potražnju (engl. *Total demand distortion – TDD*).

2.1. Ukupno harmonijsko izobličenje

Ukupno harmonijsko izobličenje (*THD*) predstavlja ključni pokazatelj za procjenu kvalitete energije u prijenosnoj i distribucijskoj elektroenergetskoj mreži. *THD* pruža detaljan uvid na utjecaj punionica električnih vozila na kvalitetu električne energije s naglaskom na izobličenja napona. Naponski i strujni *THD* definiraju se omjerom efektivnih vrijednosti sume signala koji uključuju harmonike i onih koji uzimaju u obzir samo osnovnu frekvenciju. Razumijevanje *THD*-a ključno je za identifikaciju i rješavanje problema povezanih s izobličenjem signala, što omogućuje optimizaciju rada elektroenergetskog sustava i osigurava stabilnost i pouzdanost. Izrazima (1) i (2) definirano je naponsko i strujno ukupno harmonijsko izobličenje [1] :

$$THD_U = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \frac{U_h^2}{U_1^2}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

$$THD_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \frac{I_h^2}{I_1^2}} \cdot 100 \% \quad (2)$$

Gdje je:

THD_U – ukupno harmonijsko izobličenje (napona)

U_h – srednja vrijednost harmonijskog sadržaja

U_1 – srednja vrijednost osnovnog harmonika napona

THD_I – ukupno harmonijsko izobličenje (struje)

I_h – srednja vrijednost harmonijskog sadržaja

I_1 – srednja vrijednost osnovnog harmonika struje.

2.2. Ukupno harmonijsko izobličenje s obzirom na potražnju

Slabiji izvori, koji imaju veliko opterećenje u odnosu na njihovu nazivnu struju, imaju visoke vrijednosti strujnog *THD*-a. S druge strane, izvori koji su karakterizirani za rad pri niskim potražnjama struje, imaju niske vrijednosti strujnog *THD*-a. Stoga se uvodi pojam ukupnog harmonijskog izobličenja s obzirom na potražnju koji je mjera harmonijskog izobličenja u elektroenergetskom sustavu relativno prema nazivnoj struji opterećenja. Izrazom (3) definiran je parametar ukupnog harmonijskog izobličenja s obzirom na potražnju (*TDD*) [1] :

$$TDD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \frac{I_h^2}{I_L^2}} \cdot 100 \% \quad (3)$$

Gdje je:

TDD – koeficijent ukupnog harmonijskog izobličenja u odnosu na potražnju

I_h – izmjerena harmonijska struja

I_L – struja pri maksimalnom opterećenju.

2.3. Viši harmonici kao posljedica punjenja električnih vozila

Kada se govori o višim harmonicima u kontekstu električnih vozila i infrastrukture punjenja, obično se misli na to da električna vozila i punionice mogu generirati napon frekvencija koje su više od osnovne

frekvencije električne mreže. To može biti posljedica raznih faktora kao što su: karakteristike električnih vozila, sustava za punjenje te karakteristike distribucijske mreže.

Prema [6] viši harmonici kao posljedica punjenja električnih vozila mogu imati nekoliko implikacija:

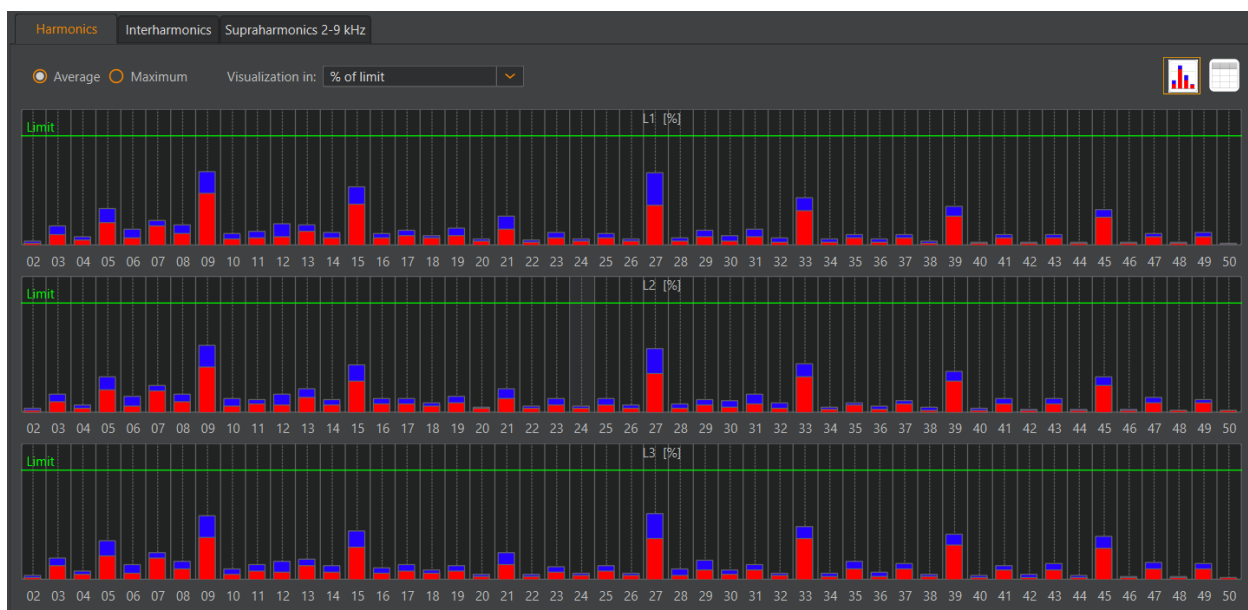
- Utjecaj na kvalitetu električne energije: viši harmonici mogu utjecati na kvalitetu električne energije u smislu narušavanja sinusoidalnog oblika struje i napona, što može uzrokovati probleme u elektroenergetskom sustavu
- Potreba za filtriranjem: da bi se osigurala stabilnost i kvaliteta električne energije, može biti potrebno ugraditi filtere za smanjenje ili uklanjanje viših harmonika generiranih tijekom punjenja električnih vozila
- Norme i standardi: industrijski standardi i propisi često propisuju maksimalne dopuštene razine viših harmonika kako bi se zaštitili elektroenergetski sustavi i uređaji od negativnih utjecaja
- Kvaliteta punjenja: punjenje električnih vozila treba biti stabilno i pouzdano, a viši harmonici mogu utjecati na stabilnost i kvalitetu punjenja. Stoga je važno osigurati da infrastruktura punjenja bude projektirana i implementirana uzimajući u obzir ove tehničke aspekte.

Viši harmonici mogu imati utjecaj na električne uređaje, komponente i sustave u punionicama i samim vozilima. Na primjer, mogu uzrokovati zagrijavanje kablova ili komponenti, povećati gubitke energije ili smanjiti učinkovitost punjenja.

3. ANALIZA PROVEDENIH MJERENJA NA ULTRA-BRZOJ PUNIONICI

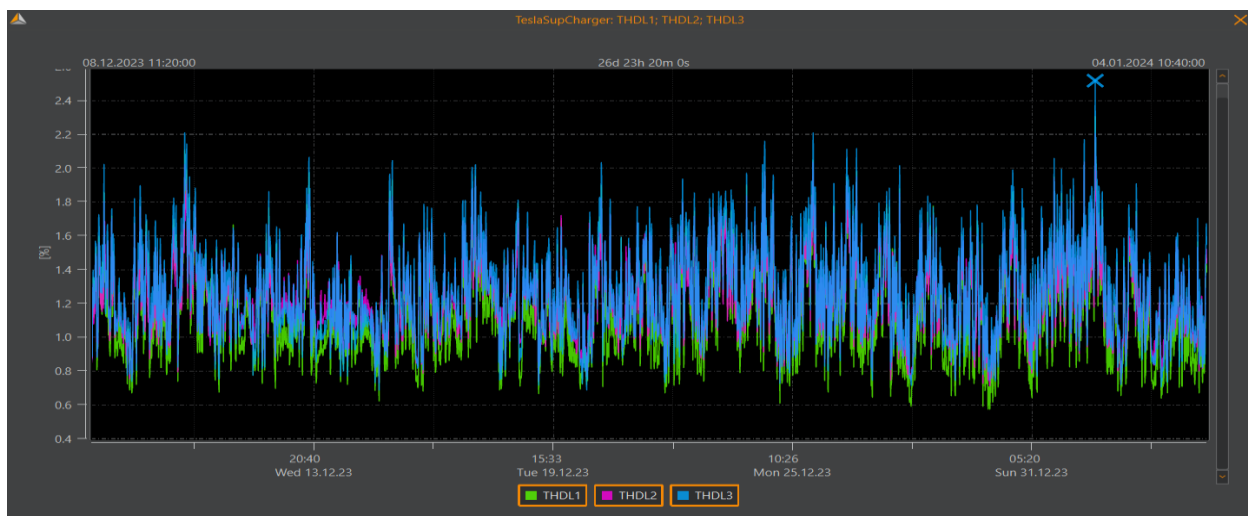
Mjerenje je izvršeno tijekom dvadeset i sedam dana na jednoj od ultra brzih punionica u Republici Hrvatskoj. Na ultra-brzoj punionici nalazi se šest punjača maksimalnih snaga 110 kW. Mjerenja su provedena pomoću mrežnog analizatora a-eberle PQ-Box 200 namijenjenog za mjerenja na mrežama niskog, srednjeg i visokog napona. Za analizu mjerenih podataka korišten je programski paket WinPQ – mobile te su podaci analizirani prema standardu HRN EN 50160:2023 (*Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava*).

Analizom mjerenih podataka zaključeno je kako su svi pokazatelji kvalitete električne energije (pogonska frekvencija, naponski događaji, kolebanje napona, dugotrajno treperenje napona – flikeri, naponska nesimetrija, *THDU*, harmonici) u skladu s vrijednostima propisanih normom HRN EN 50160:2023. Uzimajući u obzir ranije navedene razloge, u radu je prikazana detaljna analiza vrijednosti harmonika (naponskih i strujnih). Grafički prikaz spektra naponskih harmonika prikazan je slikom 1. Svi prikazani naponski harmonici (od drugog do pedesetog harmonijskog reda) imaju vrijednosti manje od vrijednosti propisanih za pojedinačne harmonike te prema tome zadovoljavaju uvjete propisane normom HRN EN 50160:2023. Neparni harmonici (osobito oni redova djeljivih s tri) imaju povišene vrijednosti, a to su 9., 15., 27., 33., 39., 45. naponski harmonici. Navedeni redovi stvaraju nepogodne prilike jer se treći harmonik i redovi višekratnika broja tri zatvaraju kroz neutralni vodič te mogu preopteretiti neutralni vodič. Bitno je naglasiti kako naponski harmonici mogu biti posljedica promatranog ultra brzog punjača, ali mogu biti i posljedica nekog drugog potrošača koji se napaja iz iste trafostanice. Uočljivo je kako za promatrani ultra brzi punjač treći naponski harmonik ne predstavlja problem te su zapravo zapažene veće vrijednosti naponskih harmonika viših redova. U prvoj fazi (L1) uočene su maksimalne vrijednosti naponskog harmonika 9.reda (0,71 %) i 15. reda (0,37 %), u drugoj fazi (L2) maksimalnu vrijednost ima naponski harmonik 13.reda (0,43 %) te u trećoj fazi (L3) maksimalnu vrijednost ima naponski harmonik 5. reda (1,33 %).



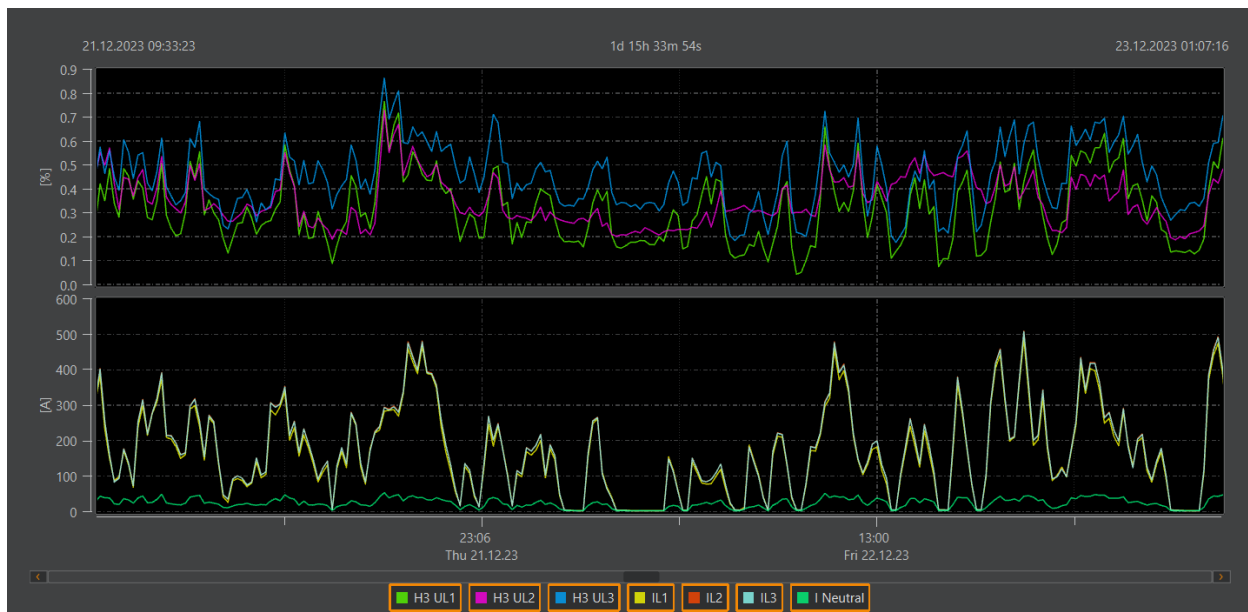
Slika 1. Spektar naponskih harmonika

Na slici 2. prikazan je naponski THD (THD_U) te je plavim markerom X označena maksimalna vrijednost zabilježena u mjerenom periodu. Prema normi HRN EN 50160:2023 definirana je maksimalna vrijednost THD_U od 8 %, a za promatranu ultra brzu punionicu navedene vrijednosti se većinom imaju vrijednosti u rasponu između 0,8 i 1,8 % nazivnog napona (U_n) [7]. Najveća vrijednost THD_U izmjerena je u fazi L3, dana 1.1.2024. u 18:00 h te iznosi 2,52 % U_n te zadovoljava zahtjeve propisane normom HRN EN 50160:2023.



Slika 2. Ukupno naponsko harmonijsko izobličenje (THD)

Korelacijski odnos efektivnih vrijednosti struja ultra brzog punjača i trećeg naponskog harmonika nalazi se na idućoj slici (Slika 3.). Gornja krivulja predstavlja vrijednosti trećeg naponskog harmonika u sve tri faze, dok donja krivulja predstavlja struje punjenja električnog vozila za sve tri faze. Prema navedenim krivuljama i sličnosti njihovih oblika može se zaključiti da struje punjenja promatranog ultra-brzog punjača u većini mjernog razdoblja izazivaju treći harmonik.



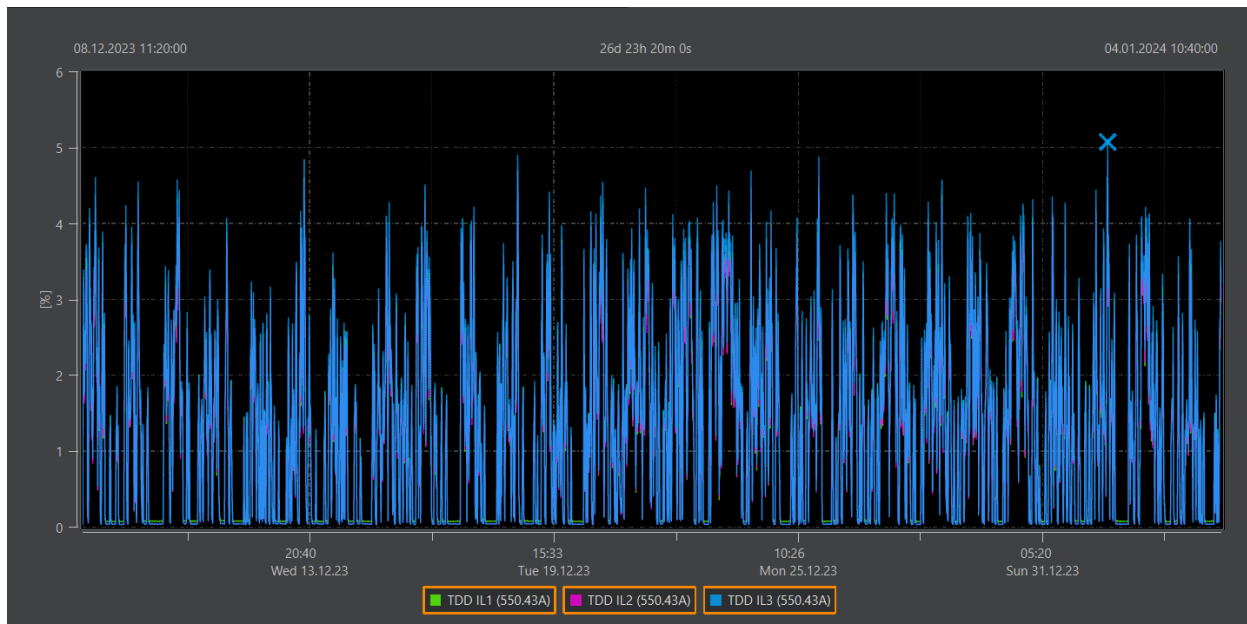
Slika 3. Korelacijski odnos trećeg naponskog harmonika i efektivne vrijednosti struja ultra-brzog punjača

Vrijednosti strujnih harmonika promatranog ultra brzog punjača prikane su slikom 4. Pojedini redovi strujnih harmonika se ističu, a to su 3., 5., 7., 9., 11., i 13. u faznim vodičima, dok se u neutralnom vodiču ističu 3., 9. i 15. red harmonika. Moguće je zaključiti kako struje promatranog ultra-brzog punjača sadrže više strujne harmonike, koji utječu na naponske prilike. Kako je već navedeno, treći harmonik i harmonici reda višekratnika broja tri, zbrajaju se u neutralnom vodiču, dok se drugi harmonici poništavaju zbog različitih kuteva. Stoga strujni harmonici 5., 7., 11. i 13. reda nemaju značajne vrijednosti u neutralnom vodiču. Vidljivo je kako u fazama L1, L2 i L3 prevladavaju 3., 5., 7., 9., 11. i 13. strujni harmonici, dok je u neutralnom vodiču izražen samo 3. i 9. strujni harmonik.



Slika 4. Spektar strujnih harmonika

Strujni THD (THD_I) predstavlja zbroj vrijednosti harmonika od drugog do četrdesetog harmonijskog reda podijeljenog s vrijednosti osnovnog strujnog harmonika. Kako vrijednosti strujnog THD često mogu dovesti do krivog zaključka zbog čestih promjena vrijednosti osnovnog strujnog harmonika, umjesto THD_I često se koristi prikaz $TDD - a$. Snimljene vrijednosti $TDD - a$ kao i maksimalna vrijednost $TDD - a$ prikazane su slikom 5. Maksimalna vrijednost $TDD - a$ izmjerena je u istom danu kao i maksimalna vrijednost THD_U , odnosno dana 1.1.2024. u 18:20 h te iznosi 5,07 %.



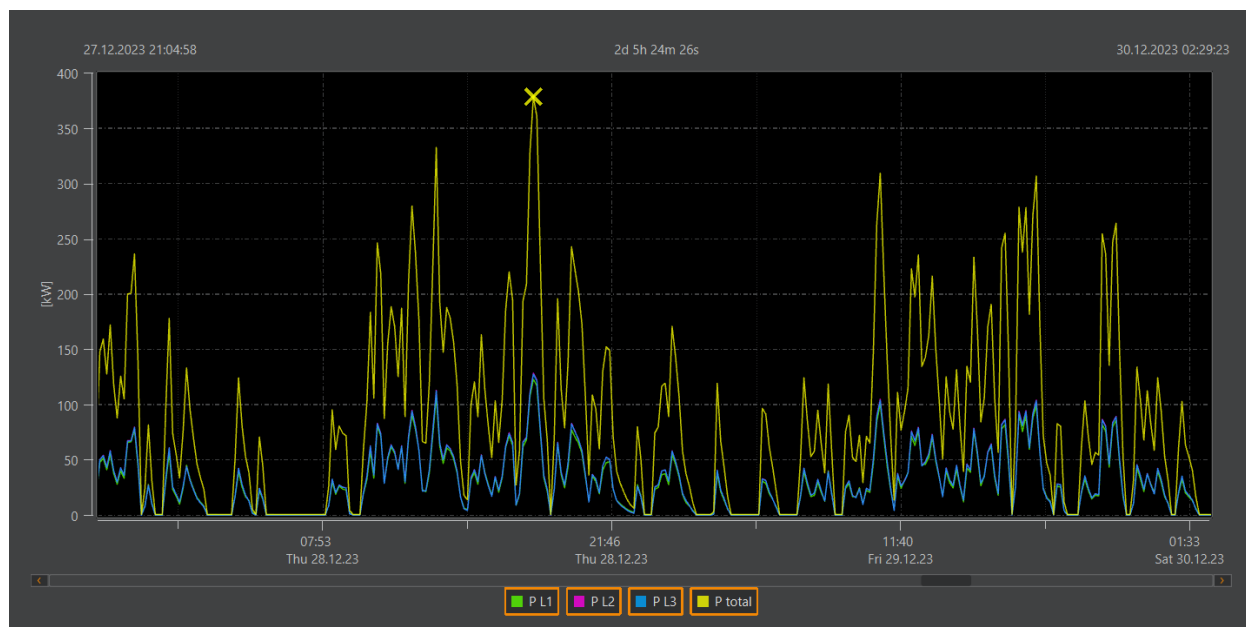
Slika 5. Ukupno harmonijsko izobličenje s obzirom na maksimalno opterećenje (TDD)

Korelacijski odnos efektivnih vrijednosti struja ultra-brzog punjača i vrijednost $THD_U - a$ prikazane su slikom 6. Gornje krivulje predstavljaju struje punjenja električnih vozila (1. harmonik), dok donje krivulje predstavljaju THD_U , u sve tri faze. Prema navedenim krivuljama i sličnosti oblika istih, uočljiva je uzročno-posljedična veza te se može zaključiti kako struje promatranog ultra brzog punjača direktno utječu na THD_U , odnosno na naponske harmonike. Upravo ta povezanost struja ultra-brzog punjača i THD_U , pokazuje utjecaj na napon na mjestu priključka, a time i na naponske prilike drugih potrošača napajanih iz iste trafostanice.



Slika 6. Korelacijski odnos efektivnih vrijednosti struja ultra - brzog punjača i naponskog THD-a

Na slici 7. grafički je prikazana snaga koju promatrana ultra brza punionica preuzima iz mreže tijekom nekoliko dana te maksimalna vrijednost snage u promatranom razdoblju. Vrijednosti snage osciliraju u ovisnosti o broju i vrsti punjenih vozila - od vrijednosti nula (nema električnih vozila priključenih na ultra brzi punjač) pa sve do maksimalne vrijednosti snage od 378,62 kW. U vremenu kada je bila postignuta maksimalna mjerena snaga može se pretpostaviti da su na ultra brzom punionici bila punjena električna vozila na svih šest ultra brzih punjača.



Slika 7. Snaga ultra-brze punionice

4. ZAKLJUČAK

U referatu je analiziran utjecaj ultra-brze punionice sa šest punjača električnih vozila, na kvalitetu električne energije s naglaskom na harmonijsko izobličenje i više harmonike. Rezultati analize pokazali su kako su sve mjerene vrijednosti unutar vrijednosti propisanih normom HRN EN 50160 te trenutna infrastruktura distribucijske mreže nema problema s kvalitetom električne energije pri korištenju ultra-brzih punionica električnih vozila.

Detaljna analiza naponskog ukupnog harmonijskog izobličenja kao i ukupnog harmonijskog izobličenja s obzirom na maksimalno opterećenje ukazuje na značajnu korelaciju između trećeg naponskog harmonika i efektivne vrijednosti struje ultra brzog punjača. Ova korelacija potvrđuje da struje ultra-brzog punjača izravno izazivaju promatrane više naponske harmonike. Uz to, pokazano je da postoji uzročno-posljedička veza između struja punjača i ukupnog harmonijskog izobličenja napona THD_U , što implicira da struje ultra brzog punjača imaju direktan utjecaj na ukupno naponsko harmonijsko izobličenje i naponske harmonike. Ova veza može uzrokovati probleme s kvalitetom električne energije uzimajući u obzir da struje ultra brzog punjača mogu utjecati na napon drugih susjednih potrošača spojenih na istu trafostanicu. Kako su vrijednosti pojedinih naponskih harmonika bile povišene, dodatna integracija ovakvih punionica električnih vozila na istom mjestu bila bi moguća samo uz pažljivu i detaljnu analizu budućih strujnih i naponskih prilika kako se ne bi narušila postojeća zadovoljavajuća razina kvalitete električne energije.

S obzirom na očekivani rast broja električnih vozila, prema provedenom mjerenju kvalitete električne energije i analizom dobivenih rezultata, zaključuje se kako postoji potreba za proaktivnim pristupom razvoja i nadogradnje postojeće distribucijske mreže kako bi se osigurala dobra kvaliteta električne energije s povećanjem broja električnih vozila i punionica istih.

5. LITERATURA

- [1] F. C. De La Rosa, Harmonics and Power Systems. 2006.
- [2] X. Wang, H. J. Kaleybar, M. Brenna, and D. Zaninelli, "Power Quality Indicators of Electric Vehicles in Distribution Grid," Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP, vol. 2022-May, pp. 1–6, 2022, doi: 10.1109/ICHQP53011.2022.9808823.
- [3] P. S. (Editor) Padmanaban Sanjeevikumar (Editor), Sharmeela Chenniappan (Editor), Jens Bo Holm-Nielsen (Editor), Power Quality in Modern Power Systems. 2021.
- [4] M. R. Khalid, M. S. Alam, A. Sarwar, and M. S. Jamil Asghar, "A Comprehensive review on electric vehicles charging infrastructures and their impacts on power-quality of the utility grid," eTransportation, vol. 1. 2019, doi: 10.1016/j.etrans.2019.100006.
- [5] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. Wayne Beaty, "Electrical Power Systems Quality , Second Edition."
- [6] F. Alanazi, "Electric Vehicles: Benefits, Challenges, and Potential Solutions for Widespread Adaptation," Appl. Sci., vol. 13, no. 10, p. 6016, May 2023, doi: 10.3390/app13106016.
- [7] "HRN EN 50160:2023 (Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava)."