

Marko Rekić

mrekic@etfos.hr

Krešimir Fekete
Elektrotehnički fakultet Osijek
kfekete@etfos.hr

Zvonimir Klaić
Elektrotehnički fakultet Osijek
klaic@etfos.hr

UTJECAJ ELEKTRIČNIH VOZILA NA OPTEREĆENJE I KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI

SAŽETAK

Broj električnih automobila u zadnjih nekoliko godina je znatno porastao, kako u ostalim europskim zemljama, tako i u Hrvatskoj. Povećanje broja električnih vozila nosi za sobom i određene posljedice, a neke od njih su izgradnja punionica i utjecaj punjenja baterija električnih vozila na opterećenje sustava i kvalitetu električne energije.

U radu će biti analizirani rezultati mjerenja kvalitete električne energije pri punjenju električnog vozila. U cilju analize mogućeg utjecaja električnih vozila na opterećenje sustava, za potrebe ovoga rada snimljeno je i opterećenje jedne transformatorske stanice 10/0,4 kV. Na osnovu podataka o opterećenju, simuliran je utjecaj punjenja električnih vozila te je idejno razmotrena opcija kontroliranog (pametnog) punjenja električnih vozila.

Ključne riječi: električni automobil, kvaliteta električne energije, opterećenje, distribucijska mreža, kontrolirano punjenje električnog automobila

IMPACT OF ELECTRIC VEHICLES ON DISTRIBUTION NETWORK'S LOAD AND POWER QUALITY

SUMMARY

Number of electric vehicles in recent years has increased significantly in European countries, including Croatia. Increased number of electric vehicles has certain consequences: building of charging stations for electric vehicles and the impact of charging electric vehicle batteries on load and power quality in distribution network.

This paper will analyze the results of power quality measurements during charging of electric vehicle. Also, measurements were performed in low voltage substation, in order to analyze the potential impact of electric vehicles on the load of the distribution system. The impact of electric vehicles charging on the distribution network is simulated and preliminary options of controlled (smart) charging of electric vehicles are considered.

Key words: electric vehicle, power quality, consumption, distribution network, controlled charging of electric vehicles

1. UVOD

Električni automobili za pogon koriste elektromotor koji se napaja iz akumulatora, baterija ili nekog drugog izvora električne energije. Prvi električni automobil potječe iz 19. stoljeća (1832.-1839.), a konstruirao ga je škotski izumitelj Robert Anderson [1]. U to vrijeme električna vozila konstruirali su i Sibrandus Stratingh (njemački kemičar, profesor i izumitelj) te Christopher Becker (tvorac instrumenata) [2].

Zbog unapređivanja motora s unutrašnjim izgaranjem tijekom 20. stoljeća, proizvodnja i razvoj električnih automobila pala je u drugi plan. Početkom 21. stoljeća ponovo se pojavljuje interes za električnim automobilima pa je tako danas proizvodnja električnih automobila znatno zastupljena, a i proizvođači motora s unutrašnjim izgaranjem proizvode električne automobile. Neki od spomenutih proizvođača su: BMW, Volkswagen, Volvo, Mercedes, Mitsubishi, Honda, Nissan, Smart, Toyota, Renault i mnogi drugi.

1.1. Vrste električnih automobila

Električni automobili, ovisno o vrsti motora koja ih pokreće i načinu punjenja baterija se mogu podijeliti na:

- baterijska električna vozila (BEV - Battery Electric Vehicle)
- hibridna električna vozila (HEV - Hybrid Electric Vehicle)
- plug-in hibridna električna vozila (PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle)

1.1.1. Baterijska električna vozila (BEV)

Baterijska električna vozila za svoj pogon koriste elektromotor koji se napaja pomoću baterija smještenih u vozilu. Punjenje baterija izvodi se spajanjem na električni izvor, a najčešće je to električna mreža. Za ovakav tip električnih vozila važno je to da nemaju nikakav motor s unutrašnjim izgaranjem, nego svu potrebnu energiju za njihovo kretanje i normalno funkcioniranje dobivaju iz baterija, a samim time ne stvaraju emisije CO₂ u svome kretanju i radu. Baterije se još mogu puniti i pomoću regenerativnog kočenja, prilikom kojega se energija kočenja pretvara u električnu i na taj način puni baterije.

Osnovni dijelovi baterijskih električnih vozila su punjive baterije, elektromotor i kontroler elektromotora.

Elektromotor je središnji dio baterijskog električnog vozila i to je jedina vrsta pogonskog motora u ovakvim vrstama električnih vozila. On pretvara električnu energiju iz baterija u mehaničku i na taj način pokreće vozilo. Elektromotorom se upravlja preko kontrolera motora, a na kontroler motora se djeluje pritiskom na papučicu gasa, koja ima ulogu analognog - digitalnog pretvarača, ili pritiskom na kočnicu (ako električno vozilo ima opciju regenerativnog kočenja).

1.1.2. Hibridna električna vozila (HEV)

Po svojim konstrukcijskim dijelovima, ova vrsta vozila razlikuje se od baterijskih električnih vozila utoliko što koriste motor s unutrašnjim izgaranjem kao osnovni motor za pokretanje vozila, a uz motor s unutrašnjim izgaranjem imaju i električni motor koji se napaja pomoću baterija koje se pune putem regenerativnog kočenja. Ovakva vrsta vozila nema mogućnost plug-in punjenja.

Baterije u hibridnim električnim vozilima znatno su manjeg kapaciteta u odnosu na baterije u baterijskim električnim vozilima jer se baterije kod hibridnih električnih vozila pune isključivo putem regenerativnog kočenja.

Ova vrsta vozila uz motor s unutrašnjim izgaranjem imaju i manji elektromotor. Taj elektromotor ima funkciju generatora i elektromotora. Naime, prilikom kočenja vozila elektromotor ulazi u područje generatorskog rada i proizvodeći električnu energiju puni baterije. Elektromotor pri manjim brzinama (do 60 km/h) može raditi samostalno ali kratko, jer baterije takve vrste vozila nisu velikog kapaciteta u odnosu na druge vrste električnih vozila. Elektromotor kod HEV-a može raditi istovremeno s benzinskim motorom dok god ima pohranjene energije u baterijama i u tom se režimu rada postiže optimalna potrošnja goriva. Kod HEV puštanjem papučice gasa, benzinski motor se gasi, a elektromotor prelazi u generatorski način rada, kao i kod kočenja, prilikom kojeg elektromotor prelazi u generatorski način rada i pohranjuje tu energiju u bateriju vozila.

1.1.3. Plug-in hibridna električna vozila (PHEV)

Plug-in hibridno električno vozila po svojim osnovnim dijelovima isto je kao i hibridno električno vozilo uz dodatak priključka na vanjski izvor napajanja. Ova vozila imaju bateriju većeg kapaciteta nego hibridna električna vozila zato što se baterije uz punjenje putem regenerativnog kočenja mogu puniti i spajanjem na vanjski izvor.

Ovakva vozila rade na električni pogon dokle god je moguće zadovoljiti potrebe za brzinom ili dok se baterija ne isprazni. S pražnjenjem baterije ili porastom brzine na onu vrijednost koju više ne može pogoniti elektromotor, uključuje se motor s unutrašnjim izgaranjem i vožnja se nastavlja bez narušenog komfora za korisnika.

2. PUNJENJE ELEKTRIČNIH VOZILA

2.1. Vrste punjenja električnih vozila

Snaga punjača električnih vozila definira vrijeme punjenja pa se tako većom snagom punjača, vrijeme punjenja smanjuje. U tablici I prikazane su vrste punjača električnih vozila podijeljenih prema snazi.

Tablica I. Podjela snaga punjača električnih vozila, prema [3] i [4].

Vrsta snage	Vrsta priključka	Snaga [kW]	Struja [A]	Domet po satu punjenja [km]
Normalna snaga	1 F AC priključak	$\leq 3,7$	10 - 16	< 20
Srednja snaga	1 F ili 3 F AC priključak	3,7 - 22	16 - 32	20 - 110
Velika snaga	3 F AC priključak	>22	>32	> 110
Velika snaga	Istosmjerni priključak	>22	>32	> 110

Iz tablice I je jasno vidljivo da veća snaga punjača smanjuje vrijeme punjenja, tj. povećava domet vozila po satu punjenja. Domet po satu punjenja izračunat je na temelju prosječne potrošnje električnog vozila od 20 kWh/100 km.

Punjenje električnih vozila se može podijeliti na standardno, ubrzano ili brzo punjenje [3]. U tablici II je prikazana podjela vrsta punjenja električnih vozila.

Punionice za brza punjenja mogu biti isključivo na mjestima gdje to omogućuje postojeća infrastruktura elektroenergetskog sustava, jer takve punionice imaju veliku snagu opterećenja (do 250 kW).

Tablica II. Podjela vrsta punjenja električnih vozila, [3].

	Standardno punjenje	Ubrzano punjenje	Brzo punjenje
Snaga punjača [kW]	3	7 - 40	50 - 250
Vrijeme punjenja praznog vozila [h]	6 - 9	0.5 - 3	0,08 - 0,35
Lokacija punjača	kuće, poslovne zgrade, javna parkirališta	trgovački centri, centar grada	postaje uz autoceste, namjenske punionice u gradovima
Ponašanje korisnika	Ostavljanje vozila i vraćanje nakon nekoliko sati	Ostavljanje vozila i vraćanje nakon kraćeg vremena	Ostajanje kod vozila za vrijeme punjenja

3. KARAKTERISTIKA PUNJENJA ELEKTRIČNOG VOZILA I UTJECAJ NA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Za potrebe ovog rada izvršeno je snimanje kvalitete električne energije tijekom punjenja električnog vozila Peugeot Partner. Peugeot Partner Electric ima snagu elektromotora od 49 kW, kapacitet litij-ionskog paketa baterija od 22,5 kWh, a deklarirana autonomija automobila je 170 km [5]. Na slici 1 prikazan je spomenuti automobil Peugeot Partner Electric.



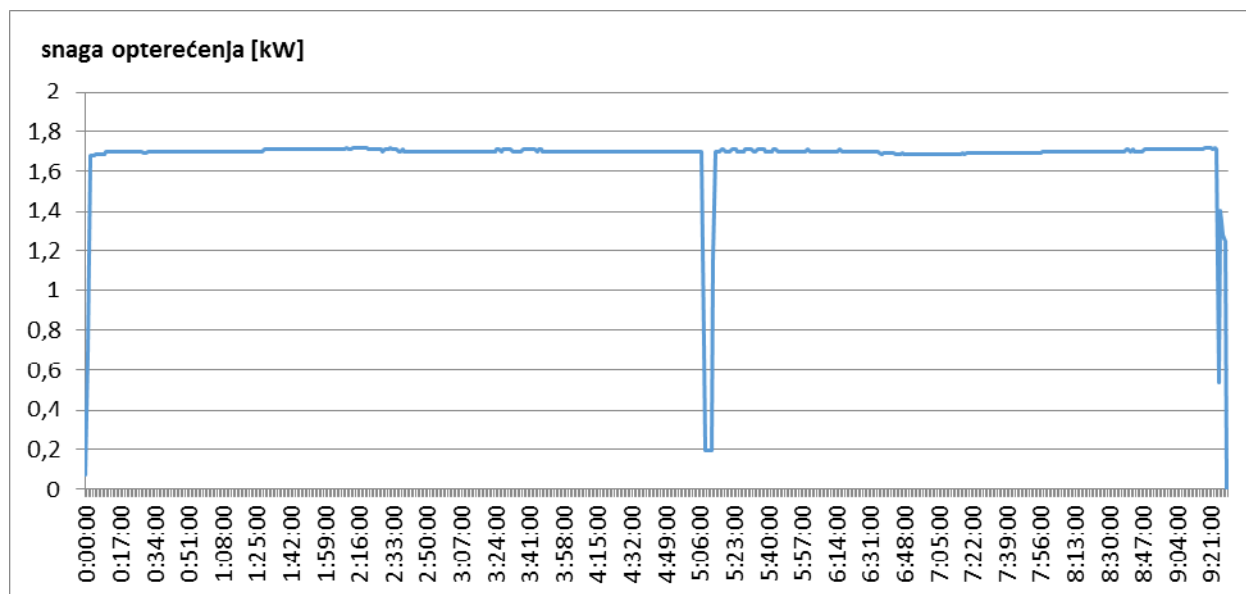
Slika 1: Peugeot Partner Electric.

Baterije spomenutog električnog vozila pune se spajanjem na kućnu utičnicu 230 V. Tijekom punjenja snimani su struja i napon u minutnim intervalima. Mjerenje i snimanje struje i napona izvedeno je prijenosnim mjernim uređajem za snimanje parametara kvalitete električne energije PQube – PCM, proizvođača Tectra.

PQube – PCM je modularni ugradbeni monitor kvalitete električne energije klase točnosti A koji se može montirati na DIN vodilicu. Osim snimanja osnovnih električnih veličina (napon, struja, snage...) ima mogućnost detekcije i snimanja i ukupnog harmoničkog izobličenja (THD), trendova naponskih propada, prenapona, impulsa, vlage i temperature.

Punjenje električnog vozila započelo je 11.06.2015. u 14:30, a završeno je 11.06.2015. u 23:59. Prije samog početka punjenja, preostala autonomija električnog vozila iznosila je oko 40 km, tj. preostali kapacitet baterija bio je na približno 30% (oko 6 kWh).

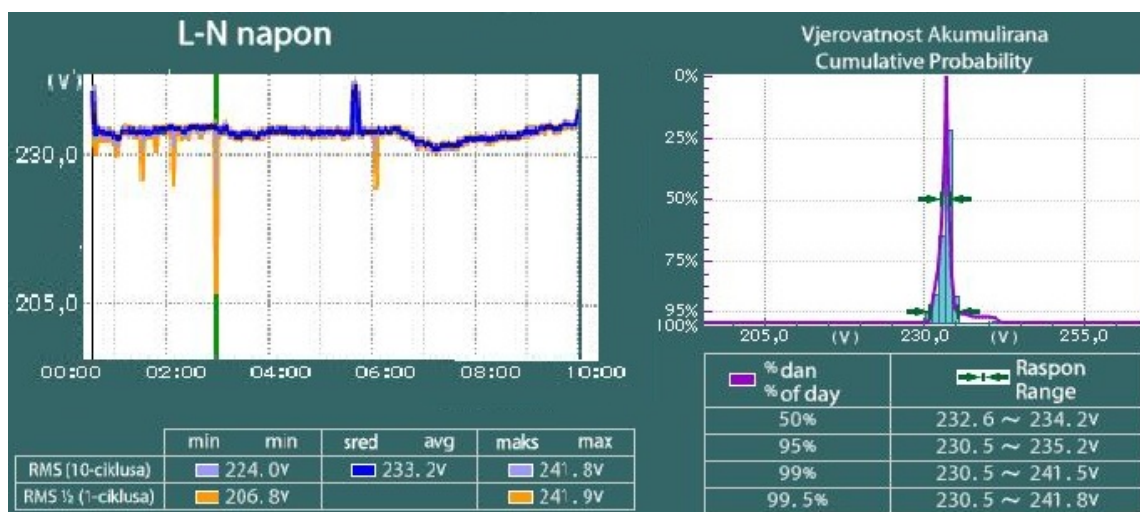
Na slici 2 nalazi se graf koji prikazuje snagu opterećenja pri punjenju baterija automobila Peugeot Partner Electric.



Slika 2. Krivulja opterećenja snage pri punjenju baterija električnog automobila.

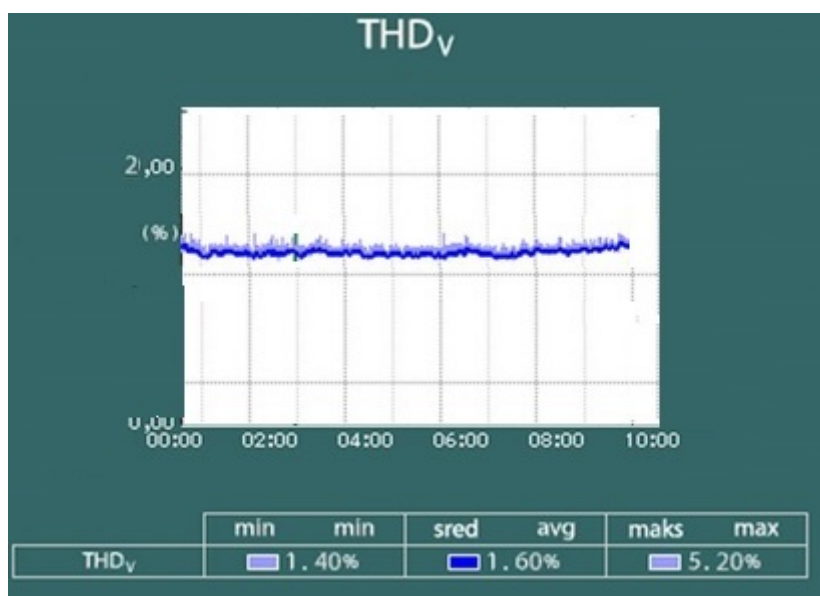
Na slici 2 vidljivo je da je prosječna snaga opterećenja tijekom punjenja baterija 1,7 kW, a uzme li se trajanje punjenja od 9,5 sati, dobije se da ukupna električna energija koja je predana iz mreže električnom vozilu iznosi približno 16,15 kWh. Znatno niže vrijednosti snage kratkotrajno su zabilježene od 5:08 sati do 5:13 sati. Radi se o nižim vrijednostima struje, dakle promjena je vezana za režim punjenje automobila.

Na daljnjim slikama bit će prikazani rezultati mjerenja kvalitete električne energije - na slici 3 prikazan je napon tijekom punjenja električnog vozila. Prema statističkim podacima sa slike, vidi se da su i 95 % vrijednosti i maksimalne vrijednosti unutar zadanih ograničenja norme EN 50160.



Slika 3. Napon tijekom punjenja električnog vozila.

Tijekom punjenja baterija električnog vozila snimljeni su i viši harmonici, što je iskazano pomoću ukupnog harmoničkog izobličenja (THD – engl. Total Harmonic Distortion). Vrijednosti THD-a prikazane na slici 4 također su unutar ograničenja norme EN 50160 – ispod su 8 % U_n .



Slika 4. Vrijednosti ukupnog harmoničkog izobličenja (THD) tijekom punjenja električnog vozila.

Statističke vrijednosti svih ostalih pokazatelja kvalitete el. energije navedeni su u tablici III. Prema rezultatima mjerenja može se zaključiti kako su na mjestu priključenja električnog automobila, tijekom punjenja automobila, svi pokazatelji kvalitete električne energije bili unutar ograničenja norme EN 50160.

Tablica III. Parametri kvalitete električne energije i ostali podaci tijekom punjenja baterija električnog vozila

Parametar		Prosječna vrijednost	95 % vrijednost	Max. vrijednost
Efektivna vrijednost napona L-N		233.2 V	235.2V	241.9V
Efektivna vrijednost struje faze		7.192 A		7.890A
Frekvencija		49.998 Hz	50.034Hz	50.056Hz
THD-V		1.60 %	2.05%	5.20%
TDD-A		0.80 %	1.35%	2.30%
Fliker	P_{st}	0.11	0.71	2.04
	P_{LT}	0.42	0.90	0.90
Prividna snaga		1.68 kVA		1.82kVA
Jalova snaga		0.20 kVAr		0.32kVAR
Radna snaga		1.67 kW		1.81kW
Energija		15.75 kWh		

4. UTJECAJ ELEKTRIČNIH VOZILA NA OPTEREĆENJE U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI

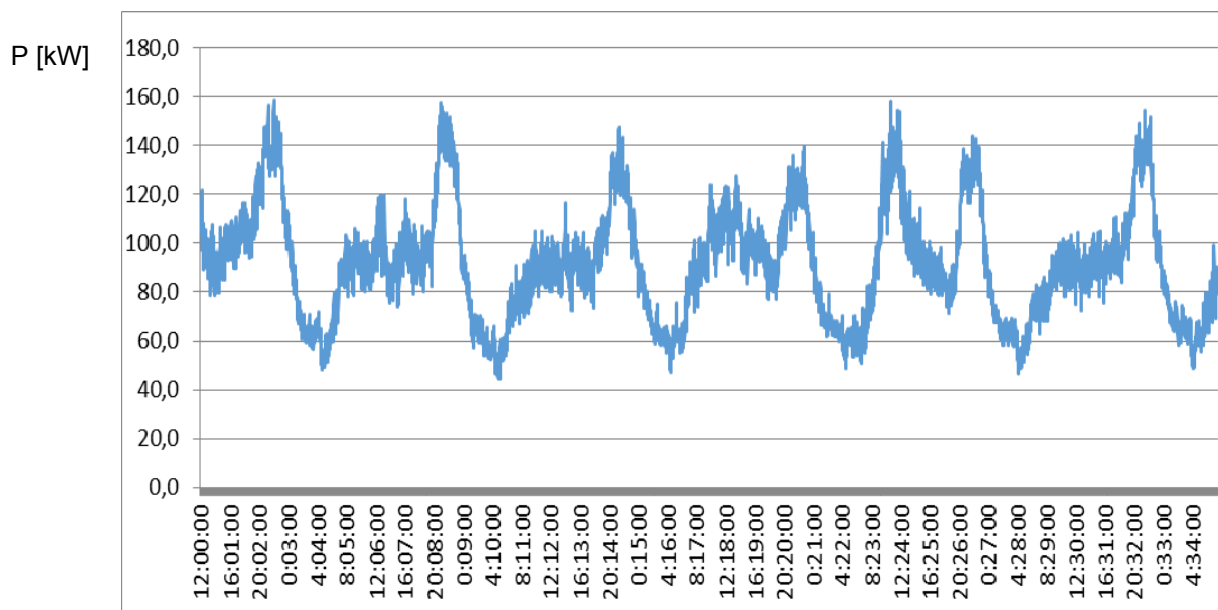
4.1. Opterećenje bez utjecaja punjenja električnih vozila

Za potrebe ovog rada snimljena je snaga opterećenja na sekundarnoj strani transformatora 10/0,4 kV u KTS 163 (kabelska trafostanica) u Lastovskoj ulici u Osijeku. U toj KTS nalazi se transformator u spoju Dy 5, nazivne snage 630 kVA.

KTS 163 napaja oko 170 stambenih jedinica i javnu rasvjetu područja: dakle ima 8 izvoda prema potrošačima na sekundarnoj strani i izvod za javnu rasvjetu.

Snimanje opterećenja, tj. mjerenje struje i napona te pohranjivanje vrijednosti mjerenja, vršeno je mjernim uređajem Eltek 1000 Series SQUIRREL meter/logger.

Krivulja snimljenog opterećenja KTS 163 od 27.05.2015. do 02.06.2015. prikazana je na slici 5. Maksimalno opterećenje u periodu snimanja iznosi 158,5 kW, minimalno 44,4 kW, dok je prosječno opterećenje 91,5 kW.



Slika 5. Opterećenje KTS 163 od 27.05.2015. do 02.06.2015.

4.2. Opterećenje s utjecajem punjenja električnih vozila

Simulacija utjecaja punjenja električnih vozila na distribucijsku mrežu izvedena je na način da je na snagu opterećenja transformatorske stanice (KTS 163) dodana snaga punjenja električnih vozila. Pretpostavljeno je da 170 kućanstva, koliko ih se napaja iz KTS 163, posjeduje ukupno 170 automobila (izračunato na temelju broja kućanstava u RH i broja registriranih vozila u RH [6] [7]) te je pretpostavljen udio od 10% električnih automobila. Snaga električnih vozila dodana je u 22 sata jer u 22 sata počinje obračun energije po nižoj dnevnoj tarifi. Simulacija je izvedena za dan 28.5.2015.

Rezultat simulacije je porast prosječnog opterećenja s 91,5 kW na 102 kW, maksimalno opterećenje je poraslo s 158,5 kW na 193,5 kW, a minimalno opterećenje s 44,4 kW na 50,7 kW. Ovi rezultati prikazani su u tablici IV.

Tablica IV. Prikaz rezultata prije i nakon simulacije utjecaja punjenja električnih vozila na distribucijsku mrežu

Parametar	Bez utjecaja punjenja električnih vozila	S utjecajem punjenja električnih vozila	Postotna promjena
Maksimalna snaga	158,5 kW	193,5 kW	22,08 %
Minimalna snaga	44,4 kW	50,7 kW	14,19 %
Prosječna snaga	91,5 kW	102 kW	11,48 %

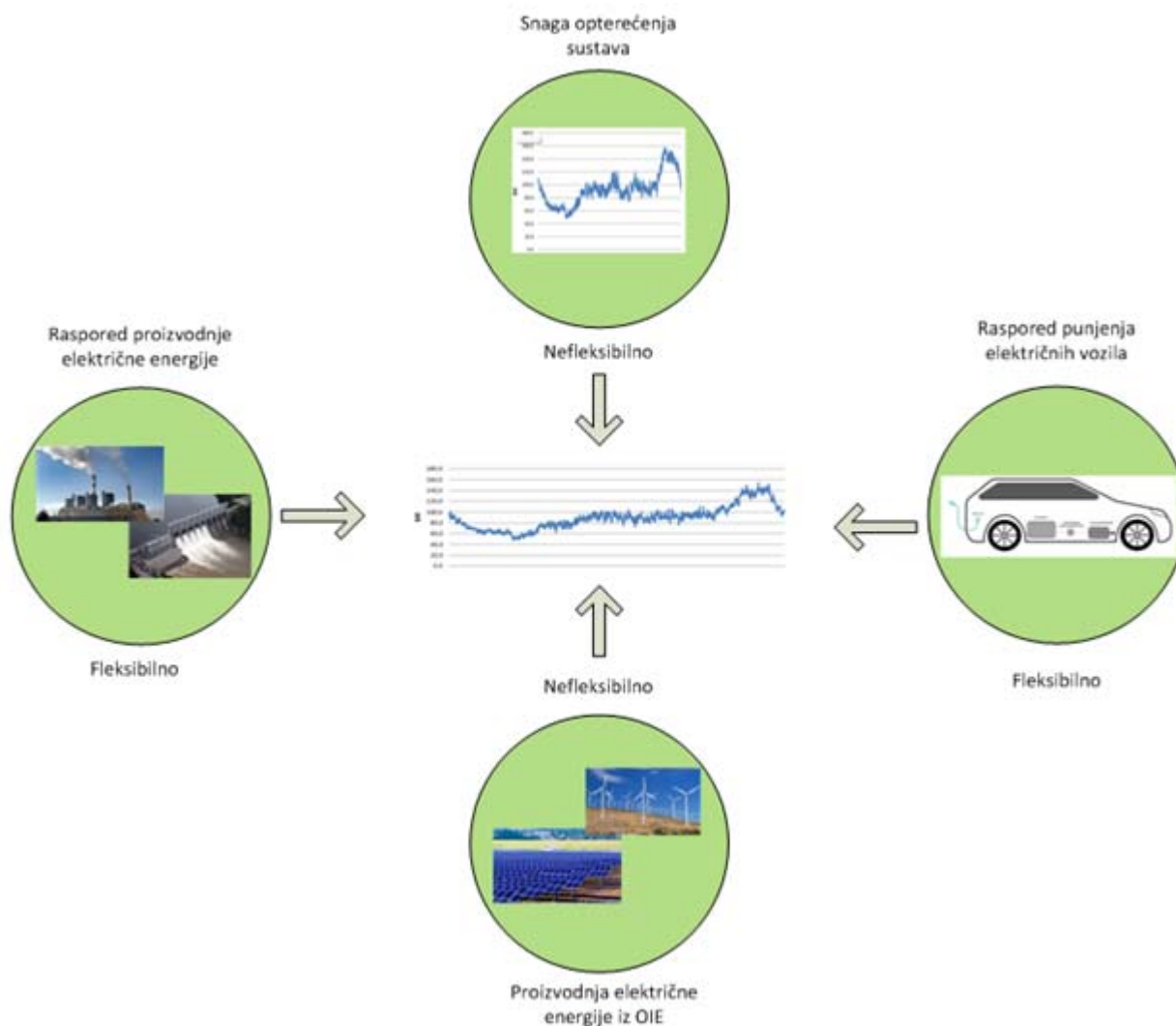
Premda je ova simulacija temeljena na gornjim pretpostavkama, dobivene vrijednosti porasta maksimalne snage za 22,08 % te prosječne snage od 14,19 % su znatne, a pogotovo bi bilo interesantno istražiti utjecaj električnih automobila na neko veće konzumno područje.

4.3. Kontrolirano punjenje električnih vozila

U cilju sniženja vršnog opterećenja na trafostanici prilikom punjenja električnih automobila potrebno je kontrolirano puniti električna vozila, tj. puniti električna vozila prema određenom rasporedu. Takav način punjenja se još zove i pametno punjenje električnih vozila (engl. Smart Charging).

Jedan od načina kontroliranog punjenja električnih automobila je dvostrana komunikacija između vlasnika vozila i distributera električne energije putem pametnog telefona ili računala. Takvim načinom punjenja električnog vozila može se znatno promijeniti izgled krivulje opterećenja u određenom vremenskom razdoblju.

Slika 6 pokazuje kako se kontroliranim punjenjem električnih vozila može utjecati na oblik krivulje opterećenja, tj. može se postići optimalan oblik te krivulje koji ima blaže promjene snage, ali površina ispod grafa, tj. potrošena električna energija ostaje ista.



Slika 6. Načelna shema funkcioniranja kontroliranog punjenja električnih automobila [8], [9], [10]

4.3.1. Primjer kontroliranog punjenja električnih vozila

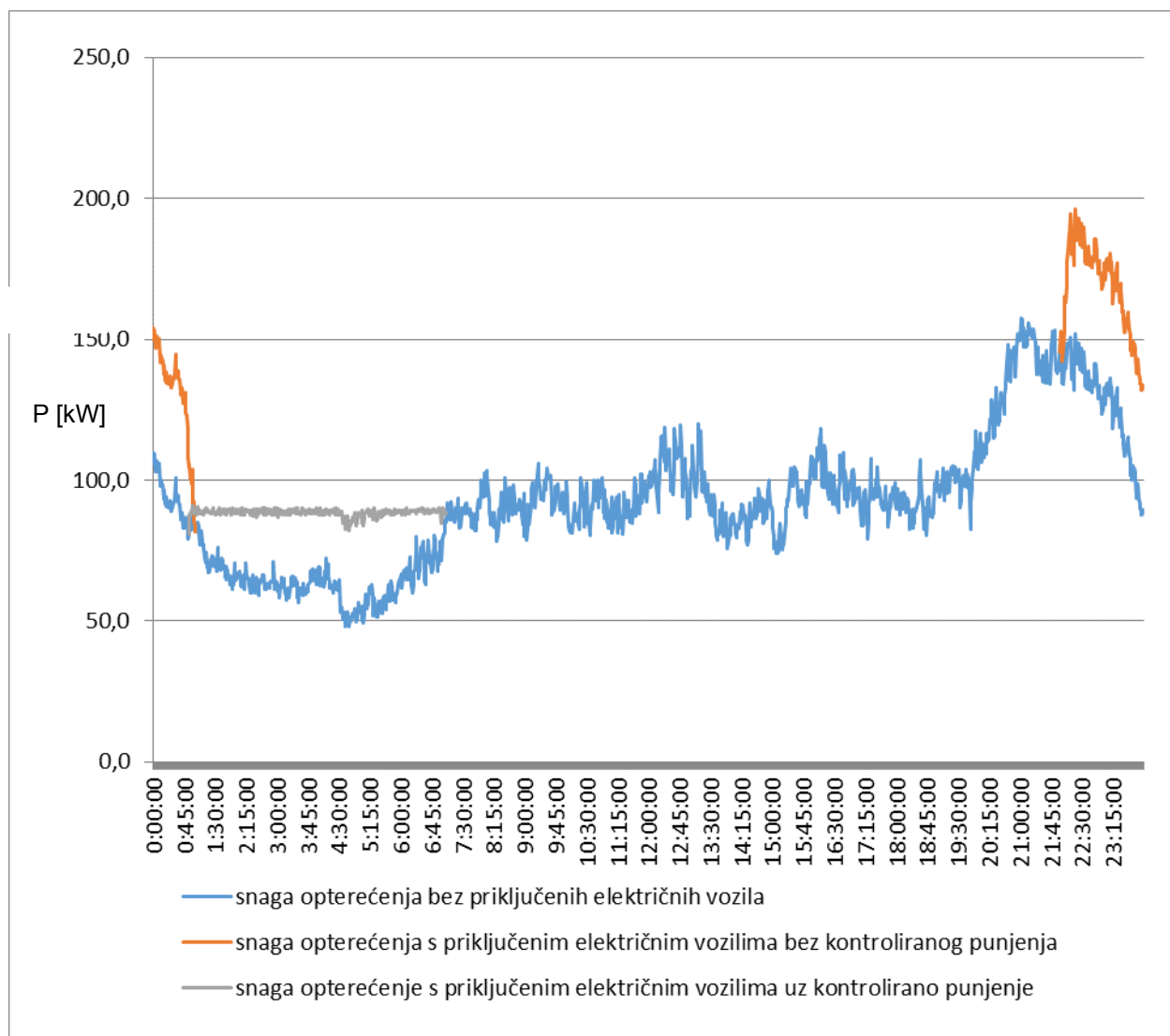
Kako bi se mogao izvesti primjer pametnog punjenja električnih vozila u tablici V dani su prosječni podaci vezani za električna vozila u zemljama Europske Unije.

Tablica V. Prosječni podaci za električna vozila

Prosječna autonomija električnih vozila	125,5 km
Prosječna dnevna vožnja	50 km/dan
Potrošena električna energija vozila po danu	9,21 kWh/dan

Prema podacima iz tablice V i pretpostavljenom udjelu električnih automobila od 10%, dijagram opterećenja za četvrtak 28.05.2015. prikazan je na slici 7.

Pretpostavka u izradi dijagrama opterećenja na slici 7 je da se 50 % električnih vozila puni snagom 1,7 kW (kao Peugeot Partner Electric, čija je krivulja snage opterećenja prikazana na slici 2), a druga polovica snagom 3,5 kW, što daje prosječnu snagu punjenja električnog vozila od 2,6 kW.



Slika 7. Grafovi snaga opterećenja pri kontroliranom punjenju električnih vozila

Na grafu sa slike 7 plava krivulja predstavlja snagu opterećenja bez priključenih električnih vozila. Crvena krivulja predstavlja snagu opterećenja kada se priključe električna vozila na mrežu. Kod izrade crvene krivulje pretpostavka je bila da se svih 10 % električnih vozila priključuje na mrežu u 22 sata i kreću s punjenjem. Zelena krivulja predstavlja snagu opterećenja uslijed kontroliranog (pametnog) punjenja električnih vozila. Pretpostavka kod kontroliranog punjenja je bila da su sva električna vozila spojena na mrežu između 00:30 i 7:30. Dakle, rezultati analize pokazuju da je promjenom vremena punjenja automobila moguće sniženje vršne snage s 193,5 kW na 158,5 kW.

5. ZAKLJUČAK

U radu je obrađena tematika porasta broja električnih vozila, s aspekta njihovog mogućeg utjecaja na električne veličine u distribucijskom sustavu. Prikazan je konkretan slučaj punjenja električnog vozila, a za isti slučaj dana je i karakteristika punjenja. Na temelju mjerenja prikazan je utjecaj na kvalitetu električne energije. S obzirom na rezultate mjerenja, može se zaključiti da se radi o kvalitetnom potrošaču jer su svi pokazatelji kvalitete električne energije unutar dozvoljenih granica, a struja punjenja nema velikih oscilacija.

Razmatran je i utjecaj električnih vozila na opterećenje sustava. Za potrebe rada snimljeno je opterećenje jedne transformatorske stanice 10/0,4 kV koja napaja pretežito kućanstva, a na osnovu snimljenog opterećenja simuliran je utjecaj punjenja električnih vozila na spomenuto opterećenje. Idejno je razmotrena opcija kontroliranog (pametnog) punjenja električnih vozila i to na osnovu pretpostavki kao što su broj vozila i termini punjenja električnih vozila. Pokazalo se da bi se kontroliranim punjenjem električnih automobila moglo utjecati na smanjenje dnevnog vršnog opterećenja.

Sve veći broj električnih automobila na osječkom području te instaliranje novih punionica, otvaraju mogućnosti za konkretnija i kvalitetnija istraživanja u ovom smjeru.

5. LITERATURA

- [1] M. Stojkov, D. Gašparović, D. Pelin, H. Glavaš, K. Hornung, N. Mikulandra, Električni automobil - povijest razvoja i sastavni dijelovi, 12. Skup o prirodnom plinu, toplini i vodi 5. Međunarodni skup o prirodnom plinu, toplini i vodi, Osijek, Hrvatska 24.-26.09.2014.
- [2] Nigel Burton, A History of Electric Cars, Ramsbury, Marlborough, Great Britain, 2013.
- [3] Davor Škrlec – Elektroenergetska infrastruktura za prihvat hibridnih i električnih vozila, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva
- [4] Eurelectric - European Electricity Industry Views on Charging Electric Vehicles, Brussels, travanj 2011.
- [5] <http://www.peugeot.co.uk/news/new-peugeot-partner-electric-van/> (pristup ostvaren 22.06.2015.)
- [6] http://www.dzs.hr/Hrv/censuses/census2011/results/htm/h02_01_01/H02_01_01.html (pristup ostvaren 03.07.2015.)
- [7] http://www.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2014/05-01-08_01_2014.htm (pristup ostvaren 03.07.2015.)
- [8] http://www.g4v.eu/datas/Session_II_Impact_of_Electromobility_on_Electricity_networks.pdf
- [9] <http://delmondmc.com/ProductImages/solar%20Grid%20plant1.jpg> (pristup ostvaren 23.07.2015.)
- [10] http://www.abrasmedia.info/sites/default/files/field/image/vjetroelektrane_podvelezje.jpg (pristup ostvaren 23.07.2015.)