

# Analiza utjecaja infrastrukture V2G (vehicle to grid) sustava na stabilnost mikromreže

---

**Potočki, Rudolf**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*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:200:768734>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-29**

*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**

**ANALIZA UTJECAJA INFRASTRUKTURE V2G**  
**(VEHICLE TO GRID) SUSTAVA NA STABILNOST**  
**MIKROMREŽE**

**Diplomski rad**

**Rudolf Potočki**

**Osijek, 2022**

---

# SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| <b>1. UVOD</b> .....  | 3  |
| <b>1.1 Opis zadatka</b> .....   | 4  |
| <b>2. PREGLED PODRUČJA LITERATURE</b> .....   | 5  |
| <b>3. MIKROMREŽE</b> .....  | 6  |
| <b>3.1 Komponente mikromreže</b> .....  | 8  |
| <b>3.2 Podjela mikromreže</b> .....   | 10 |
| <b>3.3 Povezivanje mikromreže i distribucijske proizvodnje</b> .....  | 11 |
| <b>3.4 Kontrola frekvencije i napona u mikromrežama</b> .....   | 13 |
| <b>4. ELEKTRIČNA VOZILA</b> .....   | 15 |
| <b>4.1 Djelovanje električnih vozila na elektroenergetski sustav</b> .....  | 16 |
| <b>4.2 Osnovne komponente pogona električnog vozila</b> .....   | 17 |
| <b>5. PUNIONICE ELEKTRIČNIH VOZILA</b> .....  | 19 |
| <b>5.1 Standardizacija punionica</b> .....  | 19 |
| <b>5.2 Podjela priključaka punionica</b> .....  | 20 |
| <b>5.3 Uporaba i razmjena informacija između vozila i punionice</b> .....   | 23 |
| <b>5.4 Djelovanje punionica na električnu mrežu</b> .....   | 24 |
| <b>6. ANALIZA I SIMULACIJA DIPLOMSKOG RADA</b> .....  | 25 |
| <b>6.1 Integracija obnovljivih izvora električne energije u IEEE 13 sabirnički testni sustav</b> .....                    | 26 |
| <b>6.3 Integracija električnih punionica za električna vozila u IEEE 13 sabirnički testni sistem</b> .....                | 49 |
| <b>6.4 Integracija električnih punionica za električna vozila snage 50 kW u IEEE 13 sabirničkom testnom sistemu</b> ..... | 63 |
| <b>6.5 Simulacija uključenja punionica za električna vozila</b> .....   | 77 |
| <b>7. ZAKLJUČAK</b> .....   | 83 |
| <b>LITERATURA</b> .....   | 85 |
| <b>SAŽETAK</b> .....  | 89 |
| <b>ŽIVOTOPIS</b> .....  | 90 |

## 1. UVOD

Razvitak novih tehnoloških koncepata i korištenje obnovljivih izvora električne energije, koji imaju uzlaznu putanju razvoja i usavršavanja, pridonosi minimiziranju upotrebe fosilnih goriva i stakleničkih plinova. Pod obnovljivim izvorima energije se smatraju solarne elektrane, vjetroelektrane, elektrane na biomasu i razni načini eksploatacije rijeka i mora. Sve navedeno zahtjeva integraciju u već postojeću mrežu, najčešće distributivnu. Uz sve češću integraciju obnovljivih izvora energije, smanjenje zagađenja se postiže i postupnim prelaskom na korištenje električnih vozila. Korištenje električnih vozila prati sve veći broj punionica čija integracija u postojeći sustav predstavlja svojevrsan izazov.

U budućnosti, zbog očuvanja okoliša i prirode, očekuje se potpuno potiskivanje vozila na fosilni pogon u korist električnih vozila. Razvoj električnih vozila je uvjetovan tehnološkom, gospodarskom i političkom klimom. Nestabilna cijena fosilnih energenata može pogurati razvoj i dodatno povećati interes za električnim vozilima. Kroz rad biti će pojašnjene vrste takvih vozila kao i njihove karakteristike. Ako je riječ o baterijskim vozilima koji zahtijevaju punjenje, korisnicima je potrebno osigurati napajanje preko javnih punionica ili kućno punjenje. Svaka punionica je spojena na distributivnu mrežu te pri punjenju vozila dolazi do problema kao što je odnos snaga u mreži, promjena napona i struje te značajan utjecaj na frekvenciju mreže. Vozilo spojeno na punionicu predstavlja nesimetrično opterećenje, te kako takvo zahtjeva rješenje problema u vidu njegove integracije sa mrežom. Pod tim pojmom se smatra „*vehicle to grid*“ odnosno vozilo spojeno na mrežu. Integracija javnih punionica i distribuirani izvori su obično blisko vezani jer obnovljivi izvori često predstavljaju dodatnu opskrbu za punionice čija pak integracija može dovesti do preopterećenja mreže i raznih drugih problema.

Ovaj rad se sastoji od sedam poglavlja od kojih su prva dva poglavlja vezana za uvod i pregled područja literature. U trećem poglavlju je opisano značenje, podjela i načini povezivanja mikromreža. Opis i funkcija punionica i električnih vozila bit će predstavljen u poglavlju četiri i pet. Analiza rada obuhvaća šesto poglavlje, a simulacija će se provesti u programskom paketu *DIgSILENT Power Factory 2022*. U sedmom poglavlju bit će predstavljen zaključak kao opus na rad.



## **1.1 Opis zadatka**

U diplomskom je radu potrebno izvršiti analizu utjecaja povećanja integracije punionice električnih vozila i plug-in hibrida na aspekte stabilnosti mikromreže. Nakon teorijskog pregleda područja stabilnosti mikromreže, te izrade simulacijskog modela mikromreže, kroz scenarije povećanja integracije jednofaznih i trofaznih punionica u varijacijama različitih pogonskih režima integriranih OIE u mikromreži izvršiti analizu osjetljivosti pokazatelja stabilnosti mikromreže.

## 2. PREGLED PODRUČJA LITERATURE

Literatura [1] govori kako i na koji način je električno vozilo povezano na distributivnu mrežu, te koji su značajniji problemi u vezi regulacije napona i snage u elektroenergetskom sustavu kao i frekvencije. Kako bi se ustanovili problemi i prepreke koje se susreću pri povezivanju električnog vozila i mreže, provode se testiranja i ispitivanja u raznim programskim paketima ili na stvarnim sustavima.

Štoviše literatura [2] razmatra probleme pri samom priključenju, a riječ je o višim harmonicima i prijelaznim pojavama koji imaju utjecaj na kvalitetu električne energije, pouzdanost opreme kao i stabilnost u sustava. Cilj je postići manje kvarova opreme, te podići zaštitu sustava na višu razinu.

Naponi i opterećenje nemaju stalan iznos tokom dana nego se mijenjaju. Literatura [3] razmatra na koji način se te promjene mogu ublažiti korištenjem distributivnih izvora i baterijskih spremnika. Iako je model Indijski, može se lako implementirati u zemlje Europske unije.

Glavna komponenta svakog električnog vozila je baterija, čija je uloga opskrba vozila električnom energijom. No bez adekvatne punionice električno vozilo ne može opstati. Literatura [4] razmatra infrastrukturu punionica kao i sustave kontrole i nadzora. Pored toga, razmatra se i brzo punjenje razine tri koje je predstavljeno u ovoj literaturi. Na osnovu modela i simulacije utvrđeno je da minimalna harmonijska izobličenja mreže povećavaju struju što regulatoru punionice povoljno utječe na stabilnost napona, pogotovo ako se radi o istosmjernom punjenju.

Ako je riječ o frekvenciji, literatura [5] daje uvid o regulaciji kao i stabilnosti mreže na koje se električno vozilo spaja. Kao primjer analiziraju se elektroenergetske prilike u Sjedinjenim Američkim Državama. Promjena frekvencije u mreži je rezultat neravnoteže proizvodnje i potrošnje djelatne snage. U slučaju nekakvog kvara u mreži, nastupa stanje otočnog pogona. U literaturi je navedeni slučaj razmatran sa stajališta vojne primjene kako bi se u slučaju havarije i prestanka napajanja, uspješno napajala električna vozila unutra mikromreže. Ovo su pilot programi za koje se očekuje da će biti uspješno provedeni.

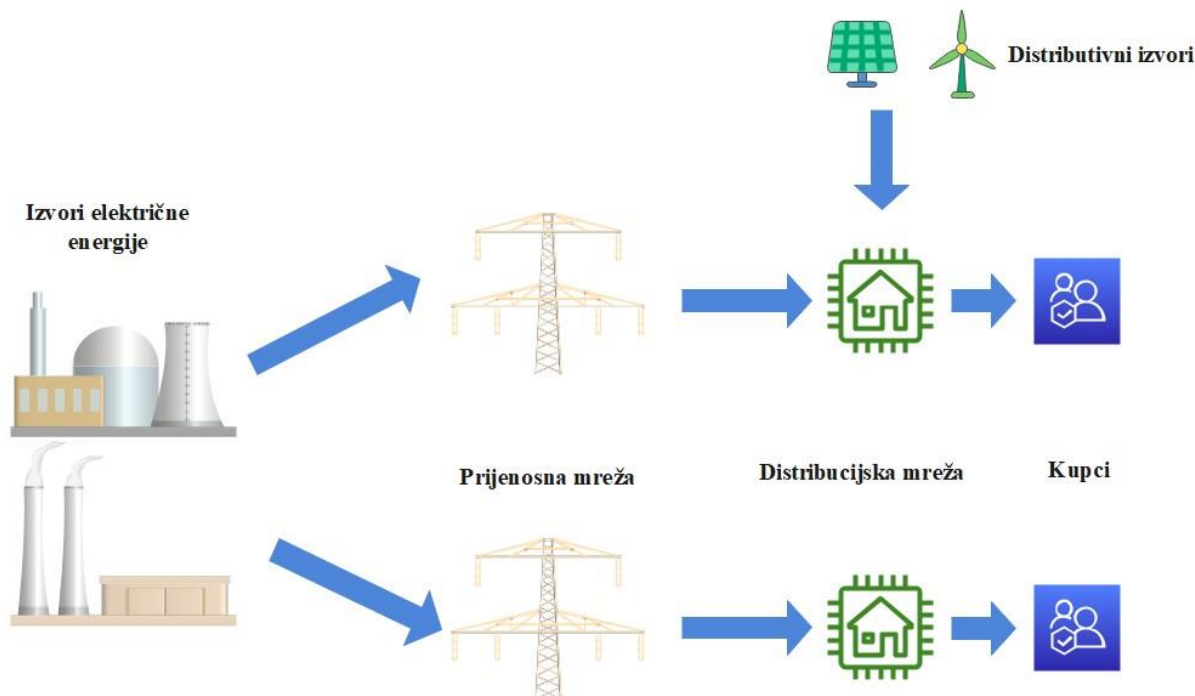
### 3. MIKROMREŽE

Napredak tehnologije i ekonomski problemi utječu na postojeći današnji elektroenergetski sustav. Poseban naglasak se stavlja na sigurnost elektroenergetskog sustava pri čemu se javljaju novi problemi i izazovi za inženjere. Potrošači zahtijevaju stalnu dostupnost energije, u svakom trenutku i u dovoljnim količinama, a proizvođači očekuju da su pri tome troškovi proizvodnje i dostave električne energije optimizirani sa što većom učinkovitosti. Pri razvoju mikromreža važno je uzeti u obzir prethodno navedene probleme i ciljeve, gdje se nastoji eliminirati određene nedostatke unutar sustava ali i poboljšati već postojeći sustav. Mikromreža ima mogućnosti rada u otočnom pogonu (stanje sustava kada je dio distribuirane mreže isključen od ostatka sustava i napajan od strane distribuiranih generatora), koji je pogodan pri nastanku kvarova, ali i pri transportu električne energije u ruralne krajeve. Jedan od nedostataka ovakvog pogona je nadzor napona, aktivne i reaktivne snage i frekvencije [6].

Mikromreža i postojeći sustav mogu raditi paralelno kao jedna cjelina, a njihov rad nadzire operator sustava. Obnovljivi izvori energije unutar mikromreže rezultiraju fiksnim i visoko učinkovitim spojem s ostatkom mreže. Takav spoj je fleksibilan i pruža veliku učinkovitost. Lokalni izvor smanjuje opterećenje sustava, gubici u distribuciji i prijenosu se smanjuju što rezultira boljom učinkovitosti [7].

Potrošači, pogotovo oni koji mogu upravljati svojom potrošnjom, postaju sve značajniji u sustavu. Najčešći potrošači su u vidu rasvjete, grijanja, hlađenja i punionica za električna vozila (sustavi današnjice). Još jedna značajna karakteristika koja se može implementirati uz obnovljive izvore u sustavu mikromreže su sustavi pohrane električne energije koji daju dodatnu fleksibilnost. To je realizirano pomoću baterija, ali i drugih raznih oblika kao što su zamašnjaci, toplinski spremnici, kemijski spremnici i mnogi drugi. Da bih elektroenergetski sustav doživio napredak, mora se omogućiti da distribucijska mreža, koja biva napajana od strane obnovljivih izvora električne energije, ima mogućnost spajanja komunikacijskog sustava. Takav sustav je baziran na komunikaciji s krajnjim potrošačima, zbog prikupljanja parametara o količini zahtijevane električne energije. Međusobna komunikacija svih sudionika ili elemenata, uz distribuirane izvore i mogućnost upravljanja potrošnjom pretvaraju pasivnu mrežu u aktivnu. Izmjene topologije i integracija potrošača u distributivnu mrežu rezultira mijenjanje tokova snaga u sustavu [8].

Aktivna mreža zahtjeva moderniju opremu i usluge, kao i zaštitu postojećeg sustava i izračune tokova snaga koji otežavaju rad sustava dispečara. Usklađen sustav i pravovremena mjerenja osiguravaju ravnotežu proizvodnje i potrošnje električne energije u stvarnom vremenu.

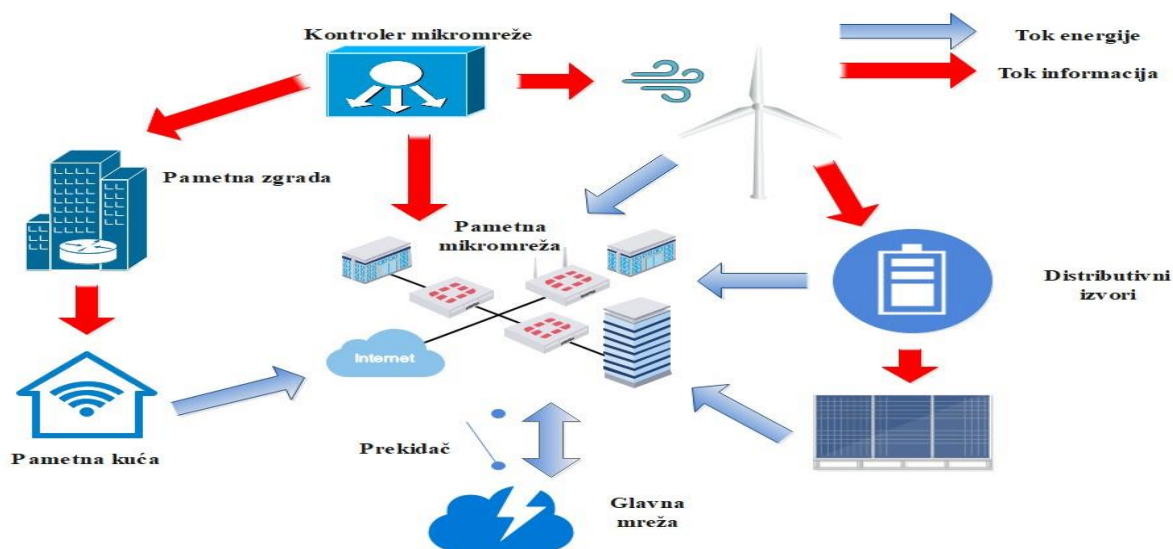


**Slika 3.1** Prikaz blok sheme aktivne(gore) i pasivne mreže(dolje) [9]

Struktura mikromreža podrazumijeva klasičnu distribucijsku mrežu, koja se sastoji od potrošača i proizvođača električne energije, potpomognutu sa upravljačkim elementima kao što su sustavi pohrane električne energije te obnovljivi izvori energije. U slučaju kvarova i havarija ovakav sustav kontinuirano vrši opskrbu električne energije [10].

U zemljama sa hladnijom klimom, ovakvi sustavi pružaju da krajnji potrošači imaju mogućnost lokalne uporabe neiskorištene topline kao dodatak pri proizvodnji električne energije. Kada je riječ o iskoristivosti, upotreba sustava mikromreža rezultira smanjenjem upotrebe prijenosnih i distribucijskih sustava. Pri velikim opterećenjima mikromreža može biti oslonac mreži [10].

Primjer jedne mikromreže koja objedinjuje upravljačke elemente sa klasičnom distribucijskom mrežom je prikazana na slici 3.2 [11].



Slika 3.2 Prikaz modela mikromreže [11]

### 3.1 Komponente mikromreže

Kako bi mikromreža funkcionirala kao jedna cjelina potrebno je posjedovati konekcije između povezanih komponenti. Prvom komponentom se smatra distribucijska mreža nižeg napona koja ima konekciju sa mikromrežom. Drugom komponentom se smatra prekidač koji je baziran na principu uklopa ili isklopa potrošača iz distribucijske mreže, koji se napaja od strane distribuiranih izvora. U slučaju kvara ili preopterećenja nastupa stanje otočnog pogona, a prekidač je u većini vremena zatvoren [12].

Obnovljivi izvori energije su u većini slučajeva najzastupljeniji distributivni izvori u sustavu mikromreža. Osim obnovljivih izvora energije mogu se koristiti i neobnovljivi izvori energije. Pod distribuiranim izvorima se smatraju [13]:

- vjetroelektrane
- mikrogeneracijska postrojenja ili kogeneracijska postrojenja
- gorivi članci
- elektrane na foto-napon
- mirkoturbine i klipni motori



*Slika 3.3 Prikaz fotonaponskih panela [14]*

Važno je naglasiti da se obnovljivi izvori u današnjici koriste iz razloga očuvanja okoliša, a da pritom instalirana snaga mikromreže nije veća od 1MW. Za spremanje električne energije se koriste posebni spremnici koji predaju energiju u distributivnu mrežu samo u slučaju punog spremnika ili u slučaju nedostatka energije u sustavu. Najčešće se upotrebljavaju baterije, superkondenzatori i mnoge vrste zamašnjaka. Uloga spremnika energije je održavanje balansa između proizvodnje i potrošnje jer se time utječe na stabilnost distribuirane proizvodnje, a najviše u pogledu stalne vrijednosti napona i frekvencije unutar unaprijed određenih granica za vrijeme promjene opterećenja, što se smatra bitnom činjenicom kod distribuiranih izvora gdje proizvodnja često oscilira. Oscilacije proizvodnje su posebno izražene kod vjetroelektrana čija snaga ovisi o brzini vjetra te fotonaponskih elektrana kod kojih intenzitet sunčevog zračenja odnosno perioda sunčanih razdoblja utječe na proizvodnju energije [15].



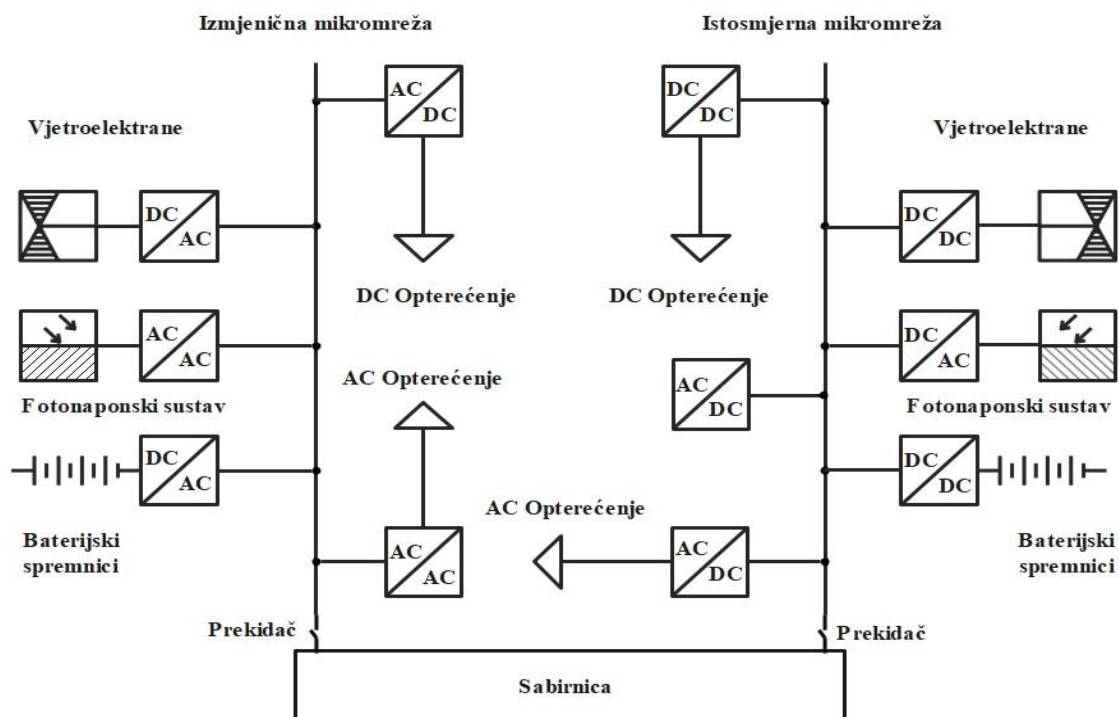
*Slika 3.4 Prikaz baterijskog spremnika [16]*

### 3.2 Podjela mikromreže

Mikromreže se mogu podijeliti na sljedeće dijelove: istosmjerna i izmjenična mikromreža koja se dalje dijeli na mrežno-frekvencijske i visoko-frekvencijske mikromreže, te hibridne izmjenično-istosmjerne mikromreže [17].

Za napajanje potrošača istosmjernom energijom se koriste istosmjerne mreže (eng. *DC-grid-direct current grid*). U takve sustave spadaju električna vozila V2G, električni brodovi i telekomunikacijski sustavi. Istosmjerna mreža je predviđena za poslovne sektore i u svrhe sa osjetljivom elektronikom [17]. Istosmjerne mreže koriste DC-AC pretvarače, primjerice modul foto-napona [18].

Svi distribuirani izvori koji daju izmjeničnu električnu energiju spadaju u izmjeničnu mrežu (eng. *AC-grid-alternating current grid*), primjerice vjetroelektrane spojene na sabirnicu izmjeničnog napona. Kao i što je prethodno navedeno, izmjenične mreže se dijele na mrežno-frekvencijske sustave i visoko-frekvencijske sustave mikromreža. Visoko-frekvencijske mreže se koriste u vojnim i zrakoplovnim sustavima za nadzor zračne plovidbe i uočavanje objekata pri frekvenciji 400 Hz. Ovakva mreža ima nadzor nad oscilacijama reaktivne snage. Na udaljenim mjestima se koriste tako zvane linijske mikromreže koje su bazirane na frekvenciji mreže [17].



Slika 3.5. Prikaz izmjenične i istosmjerne mikromreže [18]



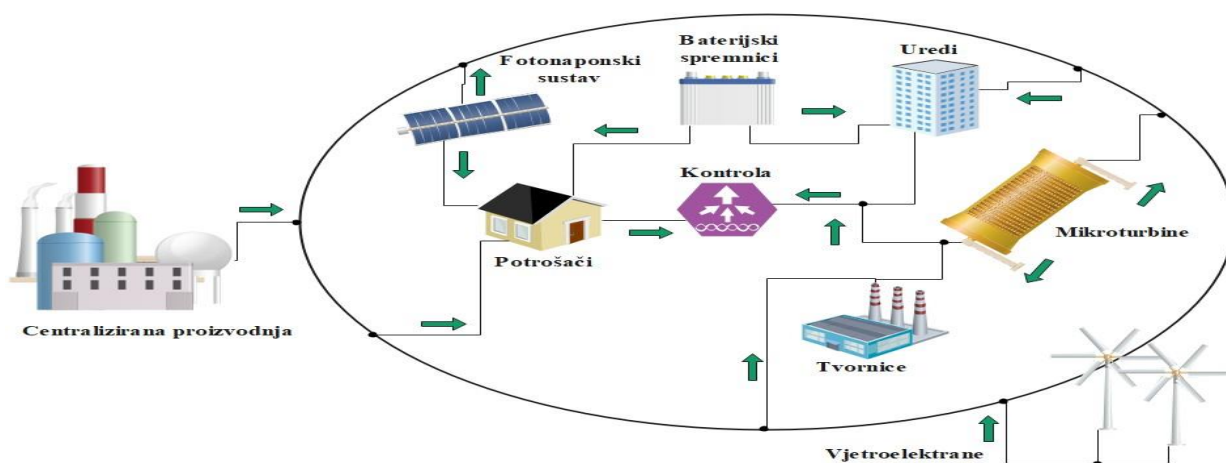
Kombinacija izmjenične i istosmjerne mreže se naziva hibridna mreža. Zadaća ovakve mreže je da istosmjernom električnom energijom vrši konekciju između uređaja za spremanje električne energije. Pri spajanju na izmjenična trošila (potrošače) potrebna je upotreba dvosmjernih pretvarača za uspješno povezivanje [17].

Kada je riječ o lokaciji, primjeni i vrsti korisnika (potrošača) unutar sustava mikromreže, može se podijeliti na odvojene mikromreže, industrijsko-poslovne mikromreže i potrošačke ili korisničke mikromreže [18].

### 3.3 Povezivanje mikromreže i distribucijske proizvodnje

Po definiciji distribuirana proizvodnja je naziv za proizvodnju električne energije na mjestu potrošača (korisnika) [19].

Distribuirani izvori su spojeni na distribucijsku mrežu višeg ili srednjeg napona, a potrošači su pasivni tako da su rezultanti tokovi snaga usmjereni od trafostanice prema krajnjim korisnicima. U ovom slučaju tokovi snaga su usmjereni od trafostanice do krajnjih korisnika. Jedinice kao što su mikroturbine, gorive ćelije, vjetroturbine i fotonaponski sustavi predstavljaju sigurnu opciju potrošačima kojima je glavni cilj postići pouzdanu, kvalitetnu i učinkovitu električnu energiju. Stavljanjem ovakvih tehnologija u prvi plan mreža niskog napona se ne smatra pasivnom u konekciji sa prijenosnom mrežom [10]. Primjer mreže sa distribucijskim izvorima prikazan je slikom 3.6. Mrežu sa distribucijskim izvorima čine potrošači, tvornice, uredi i upravljačke jedinice koji primaju energiju, te vjetroelektrane, mikroturbine, fotonaponski sustavi, baterijski spremnici i centralizirana proizvodnja koji daju energiju.



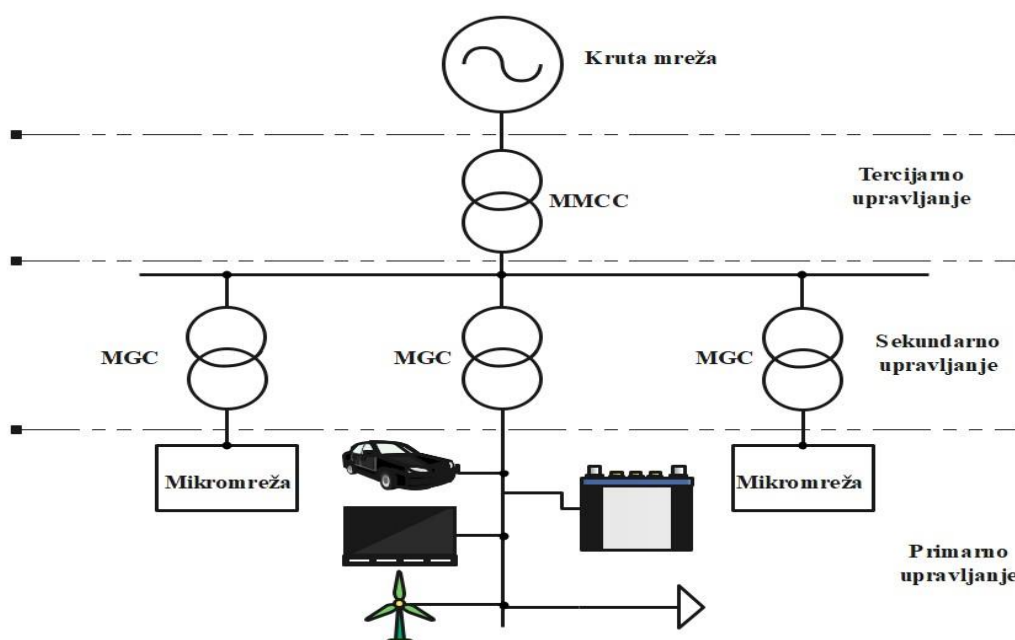
*Slika 3.6 Konfiguracijski prikaz EE sustava sa distribucijskim izvorima električne energije [10]*



Kada je riječ o ravnoteži proizvodnje, mikro izvori imaju značajan utjecaj naročito u pogledu održavanja frekvencije. Kako bih se olakšalo integriranje mikro-proizvodnje potrebno je adekvatno nadzirati i upravljati mikromrežu. Ujedno, olakšava se i regulacija upravljanja sustava u slučaju opterećenja što donosi mnoge prednosti po pitanju stabilnosti distribucijske mreže, kako naponske tako i frekvencijske. Kako bi došlo do toga, važno je uspostaviti piramidu hijerarhijskog nadzora ili upravljanja. Ekonomski razlozi za primjenu distribuiranih izvora su smanjenje gubitaka, primjerice topline tijekom pretvorbe pri proizvodnji električne energije. Kogeneracijska postrojenja su bazirana na primjeni osnovnih OIE u kojima se relativno dobro upravlja gubitcima uz minimalan utjecaj na povećanje stakleničkih plinova. Druga ekonomska prednost se vidi u pružanju podrške sustavu u slučaju kvarova ili poremećaja unutar sustava [10].

Struktura upravljanja mikromrežom je hijerarhijska sa tri razine: primarnom, sekundarnom i tercijarnom. Primarni stupanj upravljanja karakterizira brz odziv sa zadaćom održavanja vrijednosti primarnog stupnja je održavanje vrijednosti napona i frekvencije. Obuhvaća mjesto nadzora proizvodnje električne energije kod potrošača, mjesto spremanja električne energije i mjesto kontrole opterećenja. Sekundarni stupanj upravljanja je zaslužan za kvalitetu električne energije i kontroliranje vrijednosti odstupanja napona i frekvencije od normalno postavljene vrijednosti na primarnom kontroleru. Tercijarni stupanj upravljanja donosi najveći stupanj nadzora koji je zadužen, ako je riječ o optimalnim tokovima snaga, o stanju distribuiranih izvora, tržišnih signala i drugih zahtjeva sustava [6].

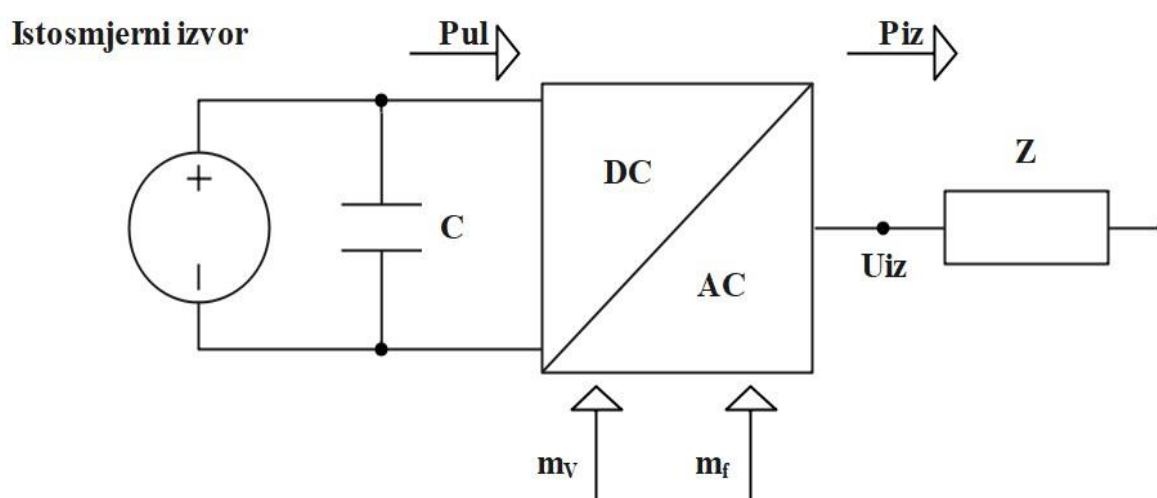
Kontroler mikromreže upravlja i nadzire proizvodnju električne energije, zaštitu i preopterećenje. Skraćena oznaka je MGC (eng. *Microgrid Controller*). Mikromrežni multicentralni kontroler je kontroler tercijarnog stupnja upravljanja. Skraćena oznaka je MMCC (eng. *Multi Microgrid Central Controller*). Lokalni kontroleri se upravljaju od strane MGC-a koji je važan za podatkovnu razmjenu sa tercijarnim stupnjem upravljanja odnosno MMCC-om. Operater distribucijskog sustava je neovisan od strane MGC-a. MMCC ima zadaću da vrši koordinaciju rada distribucijskog sustava upotrebom svih raspoložениh resursa ubrojivši i resurse od strane operatora mikromreža [20].



Slika 3.7 Struktura upravljanja mnogostrukih mikromreža [20]

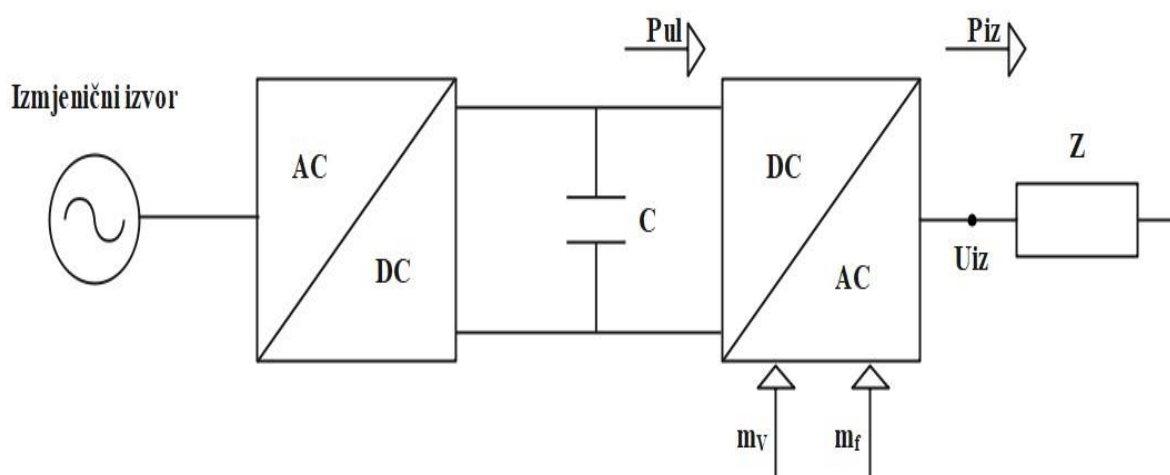
### 3.4 Kontrola frekvencije i napona u mikromrežama

Kada se ne koriste sinkroni generatori u mikromrežama, distributivni izvori električne energije se združuju pomoću pretvarača snage. Fotonaponski izvori koji daju istosmjernu energiju sadrže pretvarače istosmjerno izmjenične pretvorbe i prikazani su pretvarači su prikazani na slici 2.9 [21].



Slika 3.8 Konekcija DG-a sa istosmjernim naponom [21]

Kada distributivni izvori daju izmjeničnu izlaznu energiju pri kojoj frekvencija i napon variraju od nazivne vrijednosti mreže, upotrebljava se izmjenična pretvorba energije u istosmjernu energiju, a poslije toga opet u izmjeničnu energiju kako bih se ostvarila određena vrijednost napona i frekvencije. Združivanje distribucijskog generatora prikazano je na slici 3.10 [22].



*Slika 3.10 Konekcija DG-a sa izmjeničnim naponom[21]*

Preko pretvarača napona se može kontrolirati izlazne vrijednosti frekvencije i napona. Također se može kontrolirati jalovom i djelatnom snagom. Postoje dva moguća načina kontrole [21]:

-PQ-kontrola/upravljanje pretvaračem

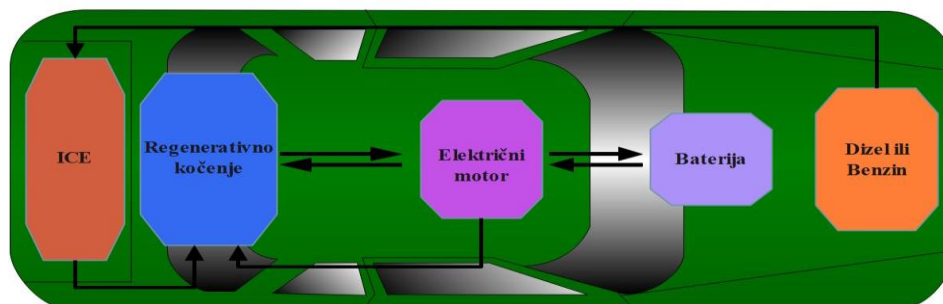
-U/f-kontrola/upravljanje pretvaračem

PQ način služi za osiguranje da jalova snaga i djelatna snaga imaju iste referentne vrijednosti, a ima primjenu pri spajanju mikromreža sa distributivnom mrežom i na distribucijske izvore. U/f način vrši regulaciju vrijednosti frekvencije i napona, a primjenu ima u izoliranom radu mikromreže u slučaju kada u njoj nema sinkronog generatora koji bi poslužio za regulaciju vrijednosti frekvencije i napona [21].

## 4. ELEKTRIČNA VOZILA

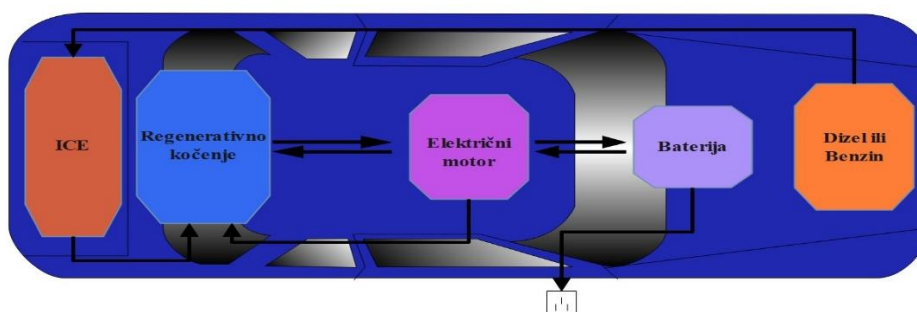
Težnja za smanjenjem utjecaja stakleničkih plinova u atmosferi, minimiziranjem uporabe fosilnih goriva i energetska sigurnost su utjecali i na promjene u načinu prijevoza. Tako su danas sve češće korištena električna vozila, a tehnologije koje se danas koriste su različite [18]. Električna vozila se prema svojem načinu rada dijele na hibridna, punjiva hibridna i električna baterijska vozila [18]. Podjela električnih vozila [22]:

Hibridna vozila (eng. *Hybrid electric vehicle - HEV*) su vozila čiji je rad baziran na kombinaciji električnih motora i motora sa unutarnjim izgaranjem. Tijekom vožnje i kočenja dolazi do punjenja akumulatora, a domet ovakvih vozila je ograničen svega nekoliko kilometara [22]. Hibridno vozilo prikazano je na slici 3.1 [23].



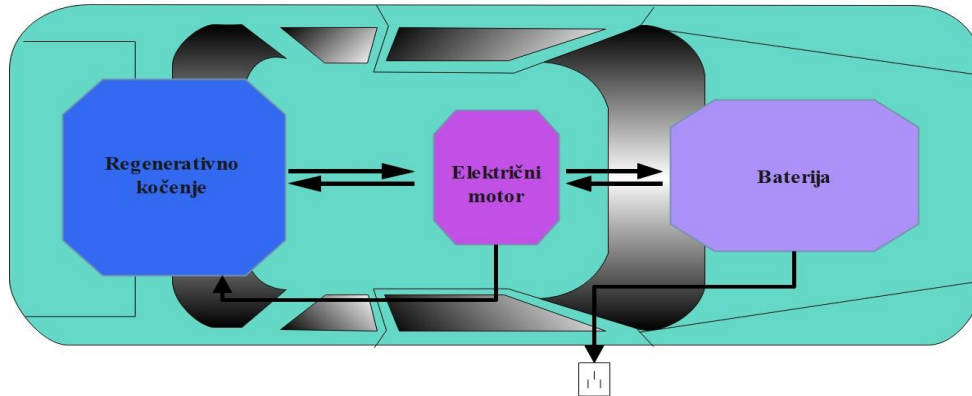
*Slika 4.1 Prikaz hibridnog vozila [23]*

Punjiva hibridna vozila (eng. *Plug-in hybrid electric vehicle - PHEV*) su vozila koja sadrže baterije velikog kapaciteta, za razliku od hibridnih vozila. Ovakva vozila imaju veći domet koji iznosi otprilike oko 10km. Najpoznatija punjiva hibridna vozila su: Chevrolet Volt, Mitsubishi outlander P-HEV, Toyota Pirus PHV i mnoge druge [18]. Punjivo hibridno vozilo prikazano je na slici 3.2 [23].



*Slika 4.2 Prikaz punjivog hibridnog vozila [23]*

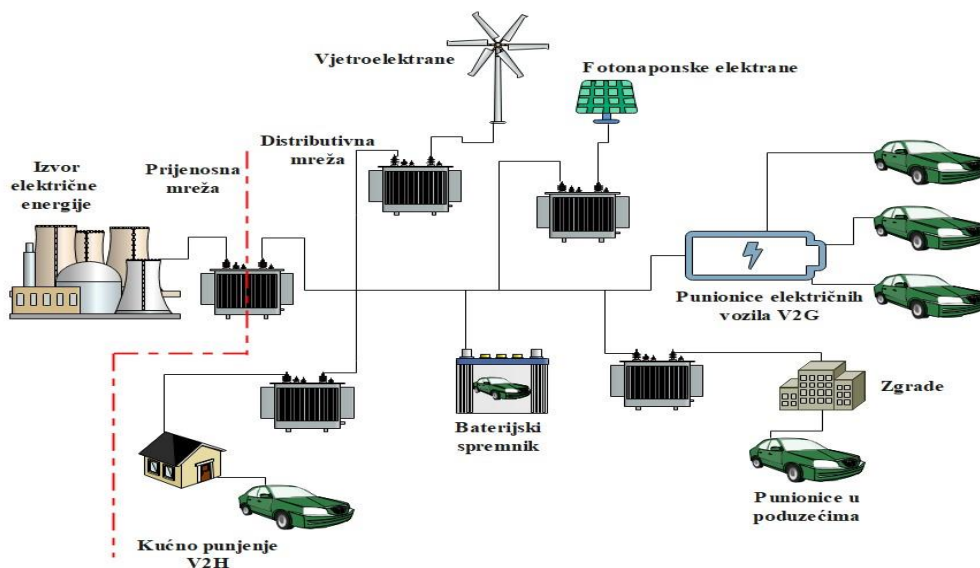
Električna baterijska vozila (eng. *Electric vehicle - EV*) posjeduju samo električni motor. Najpoznatiji modeli su: Nissan Leaf, Tesla Model S, Chevrolet Spark EV, Renault ZOE i mnogi drugi [18]. Električno baterijsko vozilo prikazano je na slici 3.3 [23].



Slika 4.3 Prikaz električnog baterijskog vozila [23]

#### 4.1 Djelovanje električnih vozila na elektroenergetski sustav

Proces zamjene motora sa unutarnjim izgaranjem u sadašnjim automobilima neće biti lagan jer omjer električnih i motornih vozila u svijetu nije jednak. Kako bih se izvela ovakva transformacija potrebno je uspostaviti što optimalnije analize u elektroenergetskom sustavu. V2G (*Vehicle to grid*) je sustav koji obuhvaća sve benefite koji se očekuju pri spajanju vozila na mrežu [24].



Slika 4.4 Struktura V2G sustava[24]

Kako bih ovakav sustav funkcionirao potrebno je imati distribuirani sustav kontrole, zbog toga što centralizirana kontrola električnog vozila manifestira određene probleme. Cilj je da vozila u mreži budu povezane u male grupe, koje se kontroliraju iz jednog centra, a da su pri tom svi centri u međusobnoj konekciji. Centri bi razmjenjivali podatke i vršili kontrolu nad energijom koja se daje ili uzima i koristili bi bi-direkcijske punjače vozila. Zadaća bi-direkcijskih punjača je prikupljanje podataka o razmjeni električne energije, tokovima električne energije u svakom trenutku i razmjena informacija unutra sustava [24].

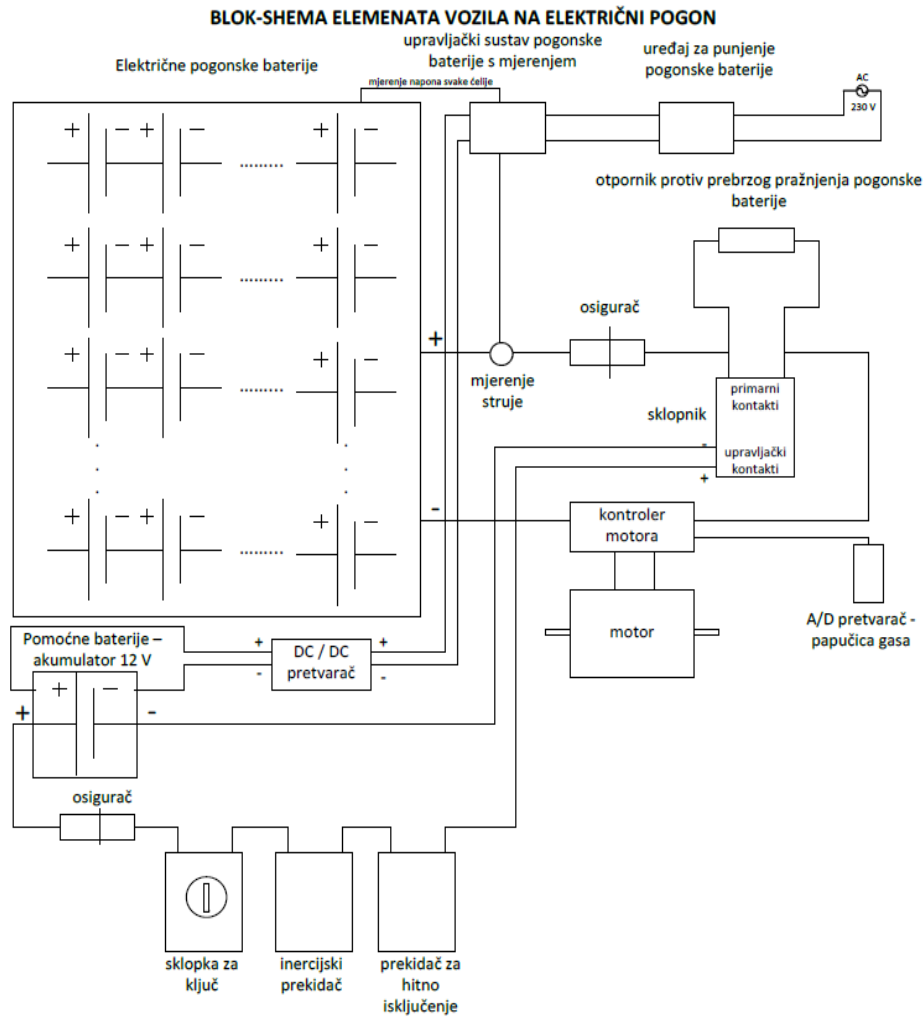
Prednosti električnih vozila koja su povezana na elektroenergetski sustav [24]:

- 1.) Kontrola napona i frekvencije - upotreba električnih vozila u kontroli sustava kada je to potrebno. Ovakav proces traje nekoliko minuta.
- 2.) Poboljšanje karakteristike opterećenja sustava - električna vozila imaju mogućnost povratka energije u mrežu, pri čemu se baterije ponašaju kao generatori u sustavu, a ovo je najpotrebnije u periodima velikih opterećenja. Ovakav način nudi smanjenje cijene energije.
- 3.) Promjenjivo opterećenje u mreži – baterije se mogu puniti različitim iznosima snaga, što otvara mogućnost nad regulacijom energetske prilike u mreži. U ovisnosti o potrebi same mreže, nudi se mogućnost povećanja ili smanjenja punjenja baterija [24].

## **4.2 Osnovne komponente pogona električnog vozila**

Osnovne komponente pogona električnog vozila su: električne baterije, električni motor i upravljač motora. Ostale komponente električnog vozila su: prekidač, istosmjerni pretvarač napona, osigurač, trošila vozila, analogno-digitalni pretvornik signala papuče gasa, mjerni instrumenti i punjači baterija. Tu se još nalaze i kabeli pogonskog i pomoćnog napona, baterije pomoćnog napona, priključci za kabele i stopice za kabele. Pomoćni napon iznosi oko 12V [25].

Ukupne specifikacije električnog vozila se opisuju pomoću baterije, a to definira cijenu, domet i raspoloživost vozila. Dva parametra koji opisuju karakteristike baterije su: snaga(akceleracija) i energija(domet). Dijelove koje može sadržavati električno vozilo su: prekidač brzog isključenja, tromi prekidač, otpornik za kontrolu brzog pražnjenja, upravljački baterijski sustav, upravljački sustav vozila, električna i vakumska pumpa, servo sustav i sklopka za ključ. Struktura je prikazana shemom na slici 4.5 [25].



*Slika 4.5 Blok struktura komponenti električnog vozila[25]*

## 5. PUNIONICE ELEKTRIČNIH VOZILA

Razvitkom vozila na električnu energiju važno je omogućiti adekvatnu infrastrukturu, koja će pridonijeti većoj upotrebi vozila na električnu energiju. Punionice za električna vozila su objekti na prometnoj trasi koji služe za opskrbu električne energije vozila i mogu biti smještene pored prometnica, tvrtkama ili u trgovačkim lancima za vrijeme radnog vremena ili privremenog boravka. S obzirom na način punjenja mogu se podijeliti na sljedeći način [26]:

- 1.) Punionica koja daje izmjeničnu struju (AC) – punjenje je polagano
- 2.) Punionica koja daje istosmjernu struju (DC) – punjenje je brzo
- 3.) Punionica koja je kombinacija izmjenične i istosmjerne struje

### 5.1 Standardizacija punionica

Standardizaciju punionica provode sljedeće organizacije: IEC (eng. *International Electrotechnical Commission*), SAE (eng. *Society of Automotive Engineering*) i CHAdeMO (eng. *DC charging standard for electric vehicles*).

U tablici 4.1 predstavljeni su standardi predviđeni za punjenje električnih vozila.

**Tablica 5.1** Standardizacija punionica[26]

| Standard | Način punjenja         | Maksimalna struja<br>[A] | Maksimalna snaga<br>[kW] |
|----------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| CHAdeMO  | DC brzo punjenje       | 125                      | 62,5                     |
| IEC      | AC Način 1             | 16                       | 11                       |
|          | AC Način 2             | 32                       | 22                       |
|          | AC Način 3             | 63                       | 43,5                     |
|          | AC Način 4             | 400                      | 350                      |
| Tesla    | DC super brzo punjenje | 340                      | 136                      |
| SAE      | AC Način 1             | 12                       | 1,44                     |
|          |                        | 16                       | 1,92                     |
|          | AC Način 2             | 80                       | 19,2                     |
|          | DC Način 1             | 80                       | 80                       |
|          | DC Način 2             | 400                      | 400                      |



Priključak punionice je važan faktor koji određuje brzinu punjenja. Standardizacija punionica za električna vozila u svijetu teži ka njihovoj jednakosti.

Bitne su dvije karakteristike: maksimalna struja i maksimalna snaga punjenja. Standardi CHAdeMO i Tesla imaju mogućnosti istosmjernog punjenja, a SAE i IEC imaju mogućnost izmjeničnog punjenja. Najveću maksimalnu struju i snagu ima IEC AC Način 4 za punjenje izmjeničnom strujom i SAE DC Način 2 za punjenje istosmjernom strujom.

Pored nabrojanih organizacija jedino je Tesla implementirao vlastitu standardizaciju električnih vozila. Razvitak brzog punjenja baterija električnih vozila pridonosi upotrebi brzih punjača. Potrošačima je glavni cilj ostvariti brzo punjenje kako bih se uspješno prevezli do željene točke putovanja. Negativna strana brzog načina punjenja je mogućnost oštećenja baterija zbog velikog zagrijavanja prouzrokovanog od velikog iznosa struje, što rezultira minimizacijom vijeka trajanja baterije. Pored javnih punionica, koriste se i kućne punionice kod kojih se vozilo puni od 6 do 9 sati, naročito za vrijeme kada je jeftina struja odnosno tijekom noći. Kako bih se poboljšale karakteristike baterije preporučeno je vršiti sporo punjenje [27].

## 5.2 Podjela priključaka punionica

Priključci punionica se dijele na osnovu struje, a mogu biti priključci koji daju izmjeničnu struju (AC) i priključci koji daju istosmjernu struju (DC). Tipovi priključaka punionica [28]:

### 1.) TIP 1 SAE J1772-2009

- priključak je jednofazan i daje izmjeničnu struju
- upotrebljava se u Japanu i Americi
- koristi Načine 1 i 2 prema SAE standardu
- daje maksimalnu struju od 32 A i snagu od 7,4 kW



*Slika 5.1 Prikaz priključka Tip 1 SAE J1772-2009[29]*

2.) TIP 2 SAE

- naziva se Mennekes (Njemačka)
- može biti jednofazni ili trofazni (izmjenična struja)
- trofazni priključak se najviše koristi u Europu
- daje maksimalnu struju od 63 A ako je trofazni i 70 A ako je jednofazni



*Slika 5.2 Prikaz priključka TIP 2 SAE[29]*

3.) TIP 3C

- daje izmjeničnu struju
- upotrebljava se u Francuskoj i Italiji
- nema široku primjenu zbog šire upotrebe TIP 2
- može doći kao jednofazni ili trofazni
- baziran na IEC standardu



*Slika 5.3 Prikaz priključka TIP 3C[30]*

## 4.) CHAdeMO

- omogućuje brzo punjenje pri snazi od 62,5 kW i struji od 125 A
- razvijen je u Japanu 2018. godine
- verzija 2.0 može vršiti punjenje snagom od 400 kW



*Slika 5.4 Prikaz priključka CHAdeMO[30]*

5.) CCS1 i CCS2 COMBO priključak (eng. *Combined Charging System*)

- ovaj priključak je poboljšana verzija priključaka TIP1 i TIP2
- baziran je na istosmjernom brzom punjenju
- posjeduje dodatna dva konektora
- Europsko tržište – TIP2 + CCS2 COMBO (dvije kontaktne igle)
- Američko i Japansko tržište – TI1 + CCS1 COMBO (dvije kontaktne igle)



*Slika 5.5 Prikaz priključaka CCS1 i CCS2 COMBO[31]*

## 6.) Priključak iz tvrtke TESLA

- razvijen u tvrtki Tesla
- predviđen je za vozila koja su načinjena u sklopu tvrtke
- baziran je na brzom punjenju snage 250 kW



*Slika 5.6 Prikaz priključaka tvrtke TESLA – desno (Američko tržište), lijevo (Europsko tržište)[32]*

## 7.) WALLBOX

- omogućuje punjenje od kuće koristeći utičnicu (jednofazna ili trofazna)
- korištenje kućne utičnice za punjenje je vrlo sporo
- WALLBOX daje mogućnost bržeg punjenja kod kuće
- punjenje je pri snazi od 22 kW



*Slika 5.7 Prikaz priključka WALLBOX0[33]*

### 5.3 Uporaba i razmjena informacija između vozila i punionice

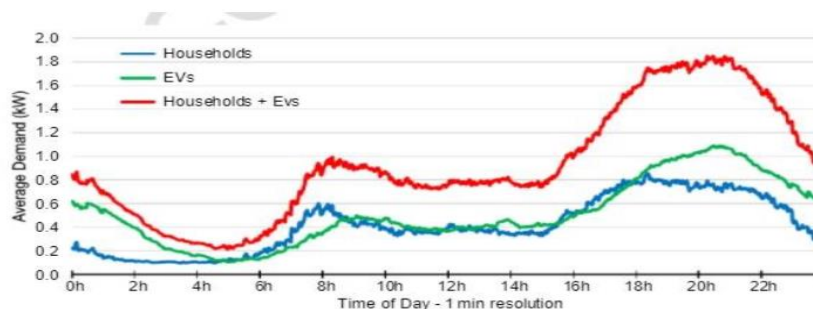
Električno vozilo posjeduje posebnu utičnicu za punjenje preko punjača, odnosno pin CP (*control pilot*) čija je namjena razmjena informacija između vozila i punionice. Do razmijene informacija dolazi pri punjenju istosmjernom i izmjeničnom električnom strujom. Pin CP odašilje digitalne informacije i analogne signale koji su zaslužni za pametno vođenje mrežom. Između CP pina i punionica netom prije punjenja vozila se razmjenjuju analogni signali, koji diktiraju trenutno stanje vozila i punionice. Tu je riječ o podacima kao što je maksimalna dozvoljena struje pri samom punjenju, te dostupnosti punionica i mreže. Prema standardu IEC-

61851 propisano je da električna vozila mogu vršiti punjenje na električnim punionicama, samo ako su proizvedena na osnovu ovog standarda. Ovo se odnosi na električna, hibridna i punjiva hibridna vozila [34].

Potrošači ili korisnici koji posjeduju električna vozila i parkirno ili garažno mjesto će u većini vremena koristiti vlastitu kućnu utičnicu kako bi napunili svoje vozilo. Sva ostala punjenja vrše se na javnim dostupnim mjestima. Nakon kupnje električnog vozila, vlasnik potpisuje Ugovor o pravu na pristup javnim dostupnim punionicama. Time se vlasniku omogućuje da bira jednog ili više pružatelja usluge punjenja. Postoje još i punionice kod kojih se usluge punjenja vrše bez sklopljenog prethodnog ugovora. Za punionice sa prethodno sklopljenim ugovorom, provjera ili legitimacija se vrši pomoću kartice, aplikacije, SMS-a i metodom pristupa P&C (eng. *plug and charge*). Uspješno punjenje je ostvarivo nakon primjene jedne od nabrojanih metoda [35].

#### 5.4 Djelovanje punionica na električnu mrežu

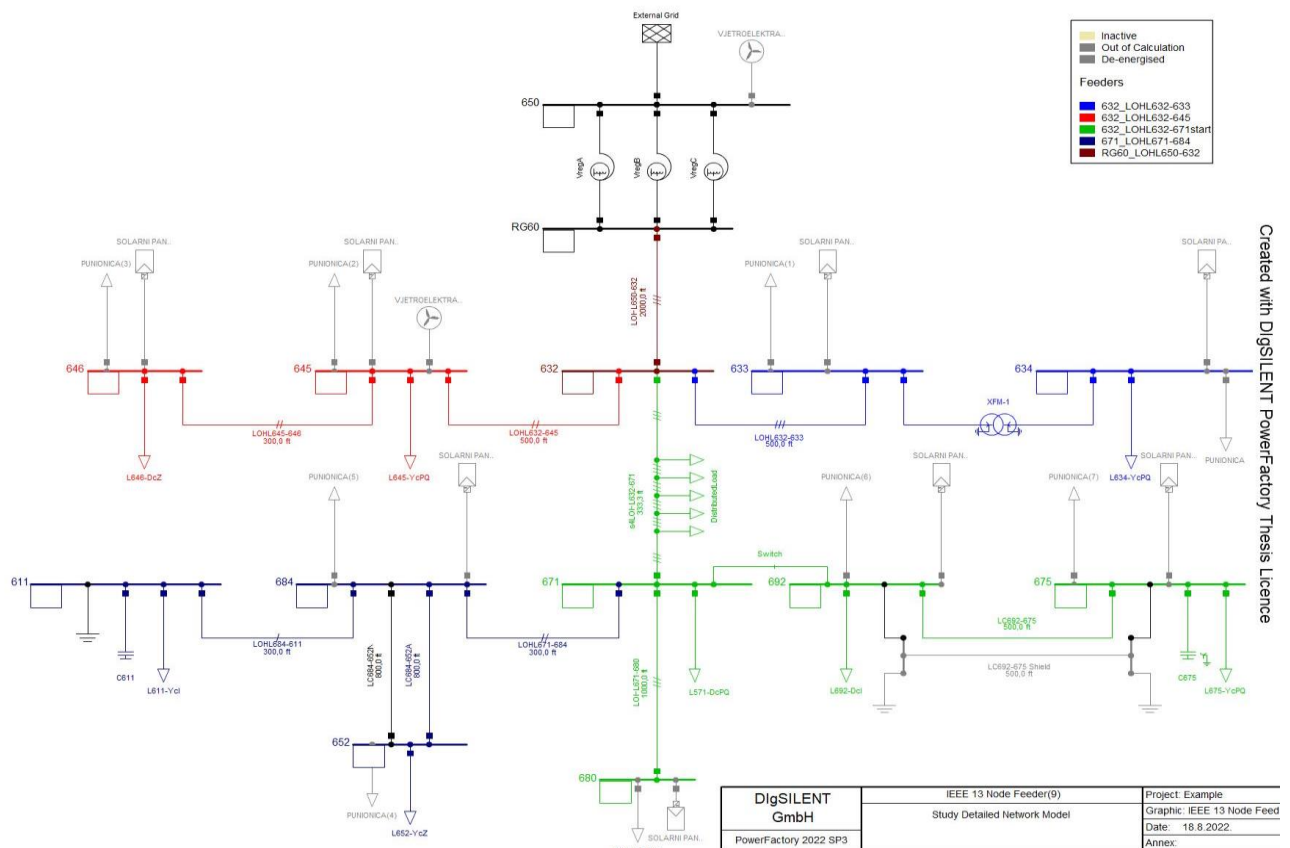
Rastom broja korisnika električnih vozila punjenje električnih vozila može djelovati loše na distribucijsku mrežu, pogotovo ako se pretpostavi da korisnici pune svoja vozila kada se vrate sa posla, naročito u razdoblju popodnevnih i večernjih sati kad je najveća potrošnja električne energije. U budućnosti će u Republici Hrvatskoj potrošnja električne energije skočiti za 70 % do 2025. za razliku od 2014. godine što će rezultirati tehničkim problemima koji će se manifestirati na distribucijsku električnu mrežu [36]. Zbog povećane potražnje za električnom energijom. Korisnici u prosjeku troše oko 1 kW energije, a na osnovu slike 4.8 se uočava kako kućni potrošači i punjenje električnih vozila prelaze već spomenutu vrijednost. Kako bih se zadovoljila potražnja teži se ka implementaciji fotonaponskih ćelija smještenih na punionicu. Takve punionice imaju mogućnost spremanja energije u vidu svjetlosti što bi rezultiralo i smanjenjem opterećenja na električnu mrežu [37].



Slika 5.8 Potražnja za električnom energijom [38]

## 6. ANALIZA I SIMULACIJA DIPLOMSKOG RADA

Testiranje različitih metoda provodi se na standardiziranim modelima mreža čime se otvara mogućnost jednostavne usporedbe primijenjenih metoda. Neki od standardnih modela koji se koriste su IEEE testni sustavi. Jedan od standardnih modela je IEEE 13 sabirnički testni sustav prikazan na slici 6.1 [39]. Ova mreža je relativno mala no sadrži interesantne parametre i karakteristike jer sadrži radijalne nesimetrično opterećene izvođe [39]. Mreža sastavljena od 13 sabirnica sadrži transformatore, podzemne i nadzemne vodove, pojne vodove napona 4,16 kV, opterećenja koja su nesimetrično distribuirana.



*Slika 6.1 Shema 13 sabirničkog testnog sustava*

U analizi rada su provedene simulacije proračuna tokova snaga, harmonijska analiza i EMT simulacija kako bi se uvidjelo ponašanje smjerova snaga u mreži, strujno-naponske prilike te valni oblici napona i struja. Simulacija se sastoji od četiri dijela, a to su integracija obnovljivih izvora energije u IEEE 13 sabirnički testni sustav, integracija punionica za električne automobile za slučaj kućnog punjenja snage 1,8 kW i za slučaj javnog punjenja električnog vozila snage 50

kW te simulacija priključenja punionica. Svaka simulacija je predstavljena pomoću stupčastih grafikona i valnih oblika napona i struja kao bi se lakše uvidjele razlike između pojedinih slučajeva.

### 6.1 Integracija obnovljivih izvora električne energije u IEEE 13 sabirnički testni sustav

U ovom dijelu analize provedena je integracija obnovljivih izvora električne energije u već postojeći IEEE 13 sabirnički testni sustav, kako bih se uvidjelo ponašanje cijelog sustava. Pozornost se prije svega stavlja na strujno naponske prilike na svakoj sabirnici, harmonijskoj analizi i proračunu tokova snaga. Pod obnovljivim izvorima, za potrebe mjerenja, implementirani su vjetroelektrane i fotonaponski paneli.

**Tablica 6.1** Prikaz odabranih sabirnica za testiranje

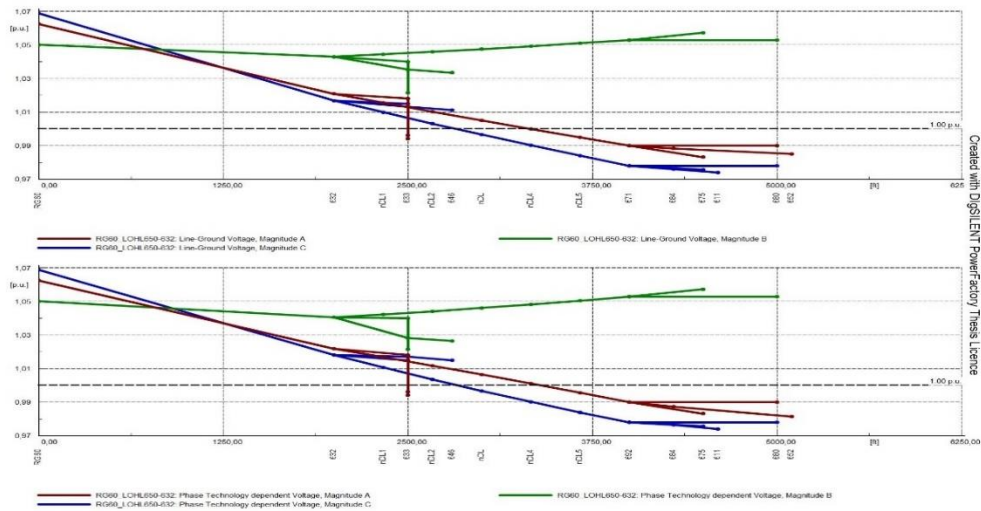
| Sabirnica | Obnovljivi izvor energije            | Punionica |
|-----------|--------------------------------------|-----------|
| 650       | Vjetroelektrana                      | NE        |
| 646       | Fotonaponski panel                   | DA        |
| 645       | Vjetroelektrana / Fotonaponski panel | DA        |
| 633       | Fotonaponski panel                   | DA        |
| 634       | Fotonaponski panel                   | DA        |
| 684       | Fotonaponski panel                   | DA        |
| 692       | Fotonaponski panel                   | DA        |
| 675       | Fotonaponski panel                   | DA        |
| 652       | /                                    | DA        |
| 680       | Fotonaponski panel                   | DA        |

Tablica 6.1 prikazuje elemente koji su spojeni na sabirnicu. Sabirnice su nasumično odabrane kako bi se na njima vršila analiza. Na sabirnice 646, 645, 633, 634, 684, 692, 675 i 680 su priključeni fotonaponski paneli uključujući punionice za električna vozila, a na sabirnice 650 i 645 su priključene vjetroelektrane snage 2500 kW.

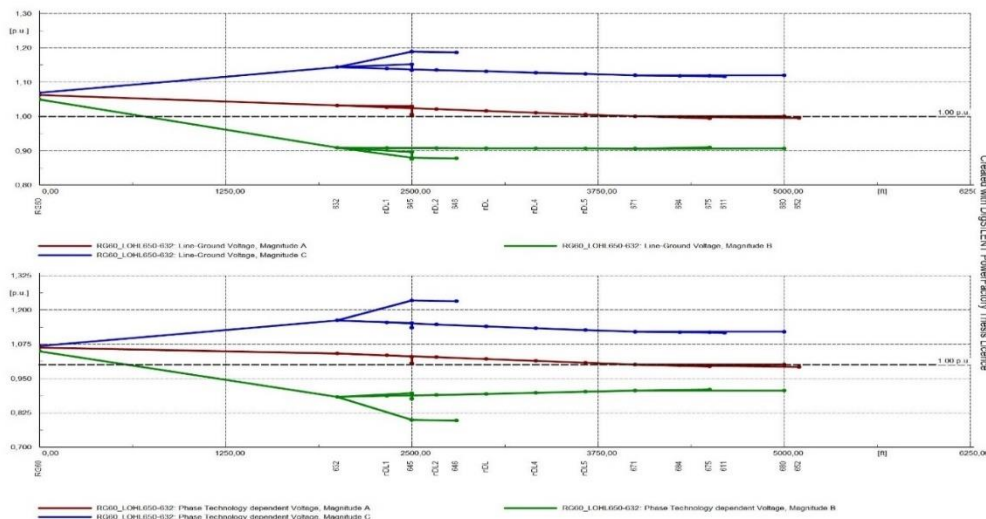


## Tokovi snaga

Integriranjem obnovljivih izvora energije dolazi do promjena u sustavu. Te se promjene odnose na strujno-naponske prilike kao i promjene smjerova tokova snaga. Na slikama 6.24 , 6.25 vidi se promjena naponskih profila nakon integracije OIE.



*Slika 6.2 Prikaz naponskih profila prije integracije OIE*

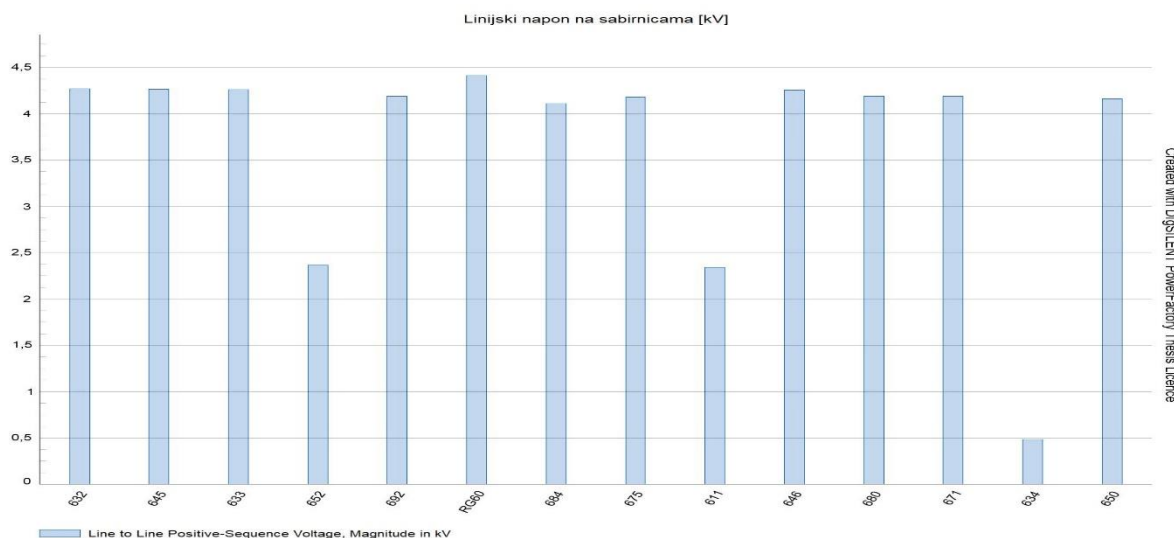


*Slika 6.3 Prikaz naponskih profila poslije integracije OIE*

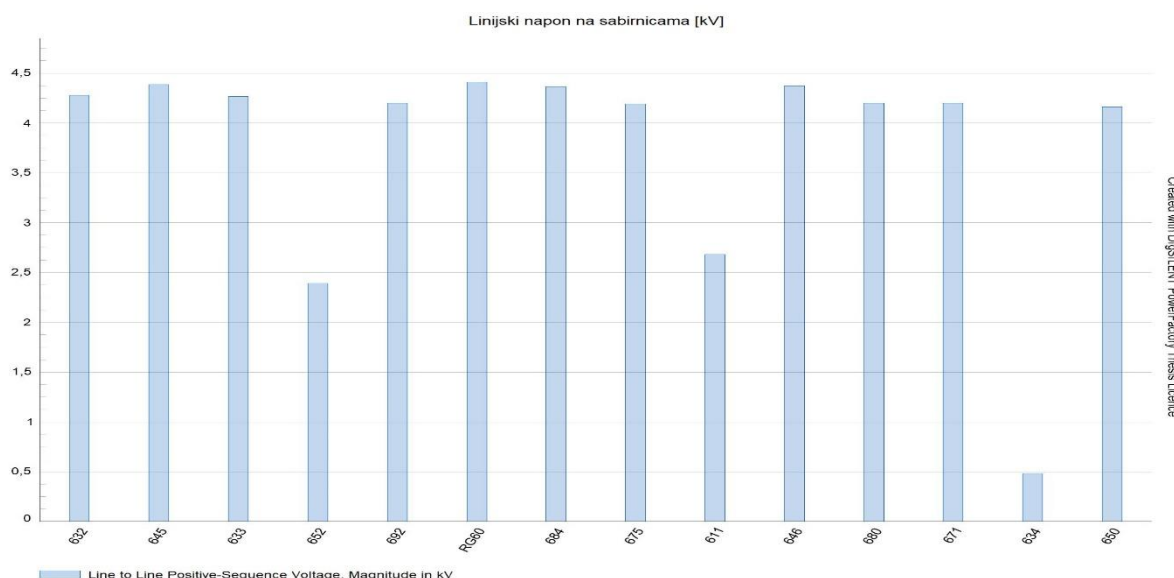
Na slikama 6.2, 6.3 su prikazani naponski profili za sve tri faze, prije i poslije integracije obnovljivih izvora električne energije. Vidljivo je da je prije integracije OIE najveći fazni napon na sabirnici 675 koji iznosi 1,06 p.u. faze B , a najmanji fazni napon na sabirnici 611 koji iznosi 0,97 p.u. faze C. Nakon priključenja OIE dolazi do porasta faznih napona, a najveći napon



iznosi 1,19 p.u. na sabirnici 646 faze C, dok je najmanji na istoj sabirnici koji iznosi 0,88 p.u. faze B.

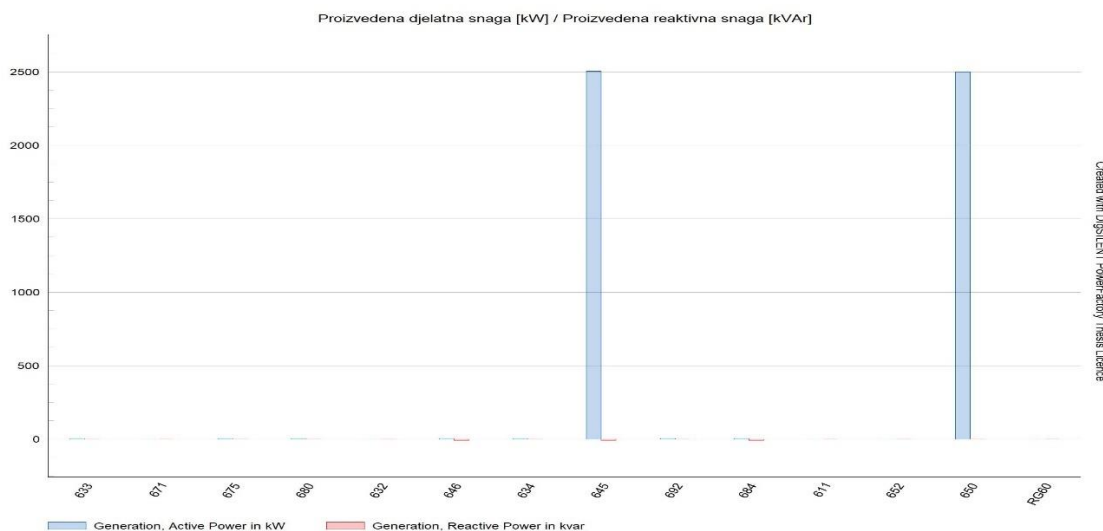


**Slika 6.4** Stupčasti grafikon linijskih napona sabirnica prije integracije OIE



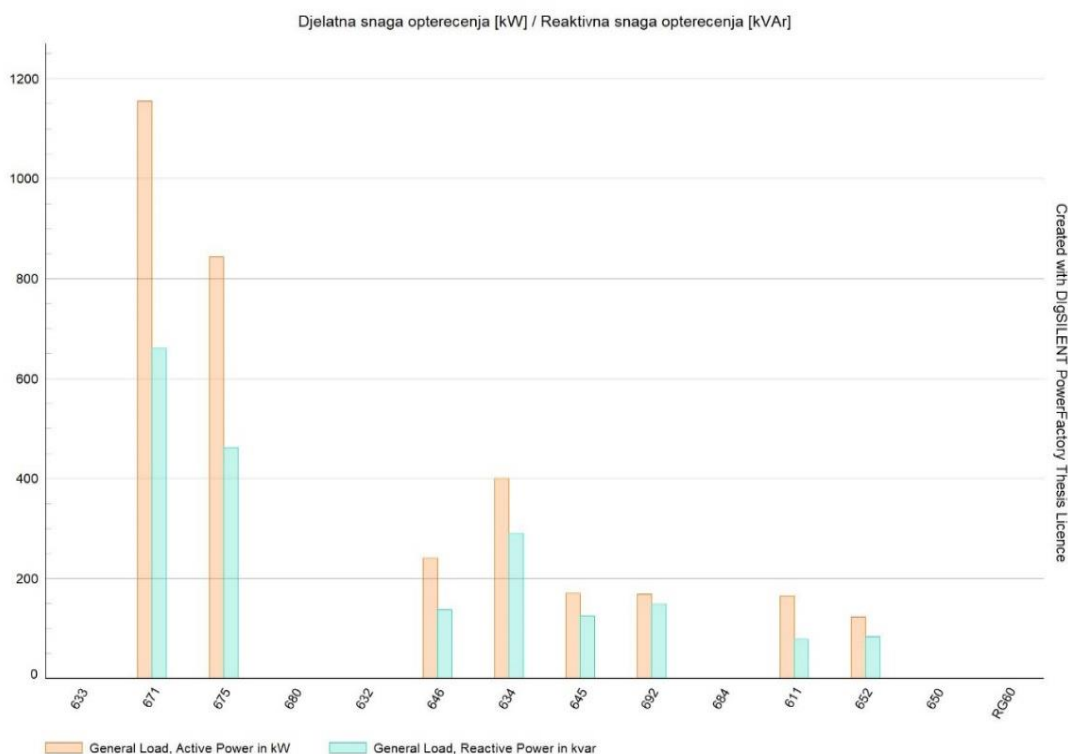
**Slika 6.5** Stupčasti grafikon linijskih napona sabirnica poslije integracije OIE

Na slikama 6.4 i 6.5 su prikazani stupčasti grafikoni linijskih napona na sabirnicama IEEE 13 sabirničkog testnog sustava prije i poslije integracije OIE. Iz stupčastog dijagrama je vidljiv porast iznosa linijskog napona sa 4,26 kV na 4,37 kV sabirnice 646, sa 4,19 kV na 4,37 kV sabirnice 684, sa 4,19 kV na 4,39 kV sabirnice 675 i sa 2,34 kV na 2,68 kV sabirnice 611 kao rezultat priključenja obnovljivih izvora električne energije u vidu vjetroelektrana i fotonaponskih sustava.



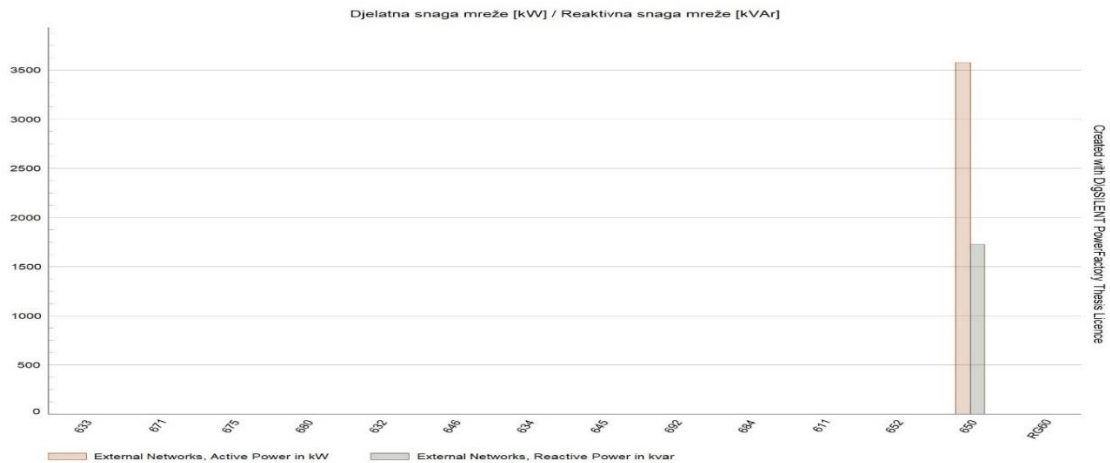
**Slika 6.6** Prikaz proizvedene djelatne i reaktivne snage poslije integracije OIE

Na sabirnice 645 i 650 su priključenje vjetroelektrane snage 2500 kW , a prikaz njihove proizvedene snaga je prikazan na slici 6.6, gdje je iznos proizvedene djelatne snage 2500 kW.

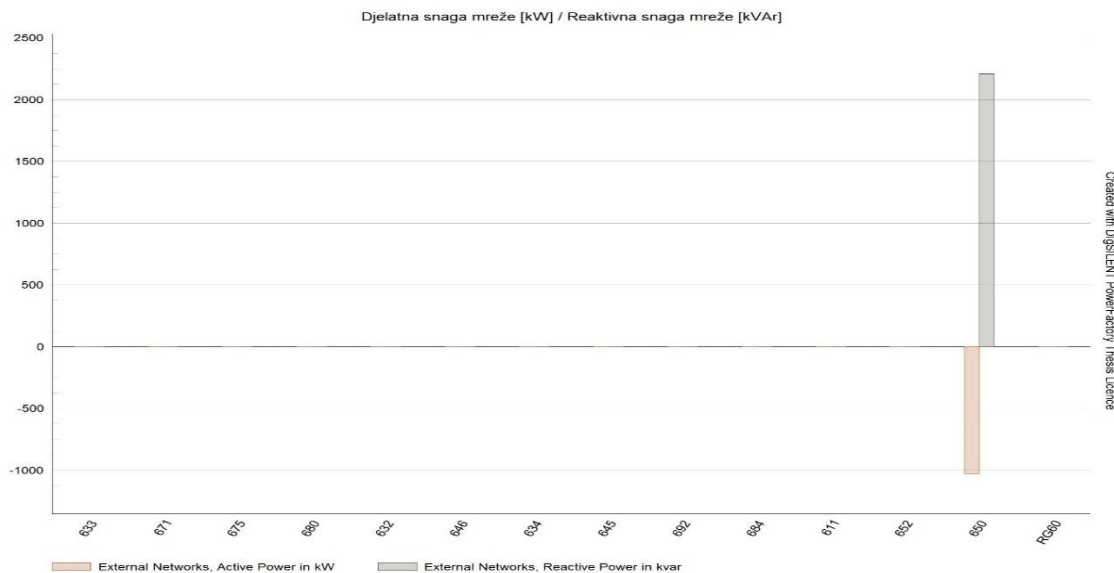


**Slika 6.7** Prikaz djelatne i reaktivne snage tereta spojenog na sabirnice

Snage tereta ostaju iste na sabirnicama 671, 675, 646, 634, 645, 692, 611 i 652, iz razloga što na njih nije spojen izvor snage. Iznosi tereta navedenih sabirnica su prikazani na slici 6.7.

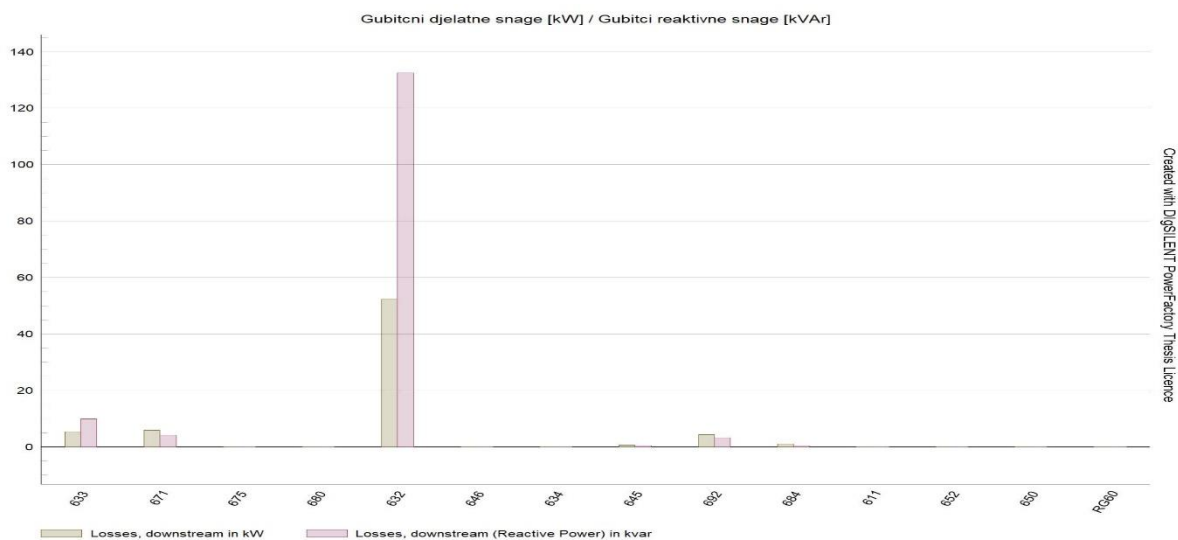


**Slika 6.8** Prikaz djelatne i reaktivne snage mreže koja napaja sabirnice prije integracije OIE

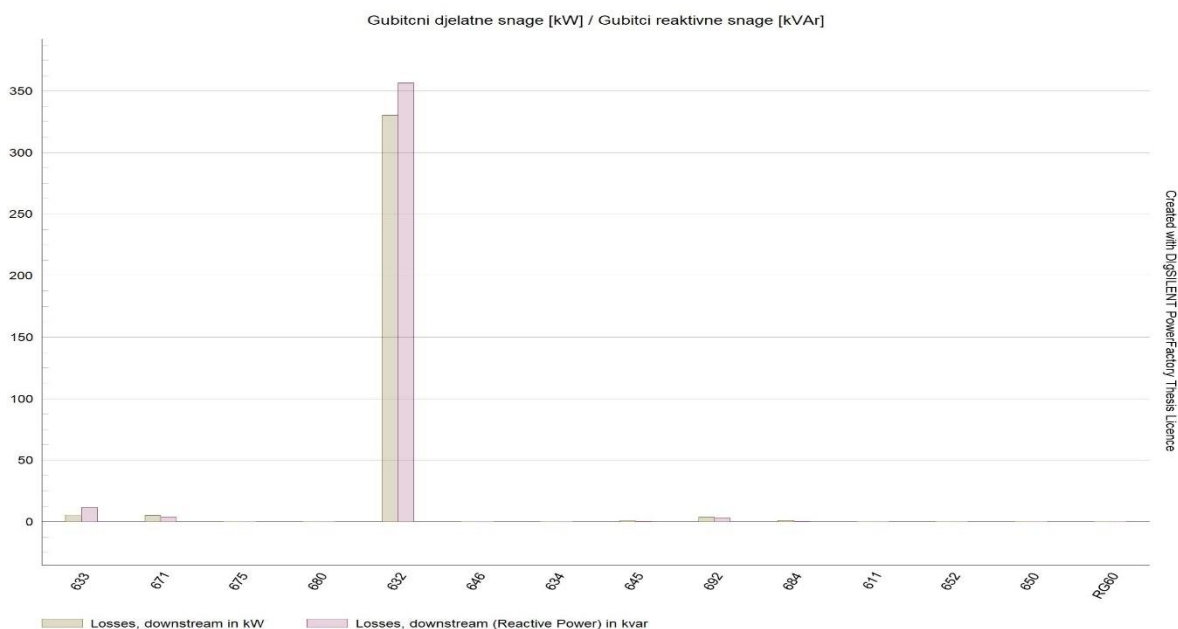


**Slika 6.9** Prikaz djelatne i reaktivne snage mreže koja napaja sabirnice poslije integracije OIE

Vidljiva je razlika nakon priključenja vjetroelektrane na sabirnicu 650 na koju je ujedno priključena i mreža. Priključak vjetroelektrane izazvao je negativnu radnu snagu na sabirnici dok je pritom povećao iznos reaktivne snage. Na slikama 6.8 i 6.9 su prikazani stupčasti grafikoni snaga na sabirnici 650. Prije priključenja vjetroelektrane djelatna snaga iznosi preko 3500 kW, a reaktivna snaga preko 1500 kVAr. Nakon uključivanja vjetroelektrane djelatna snaga iznosi -1000 kW, a reaktivna snaga preko 2000 kVAr. Razlog negativne djelatne snage je taj da vjetroelektrana daje snagu u mrežu

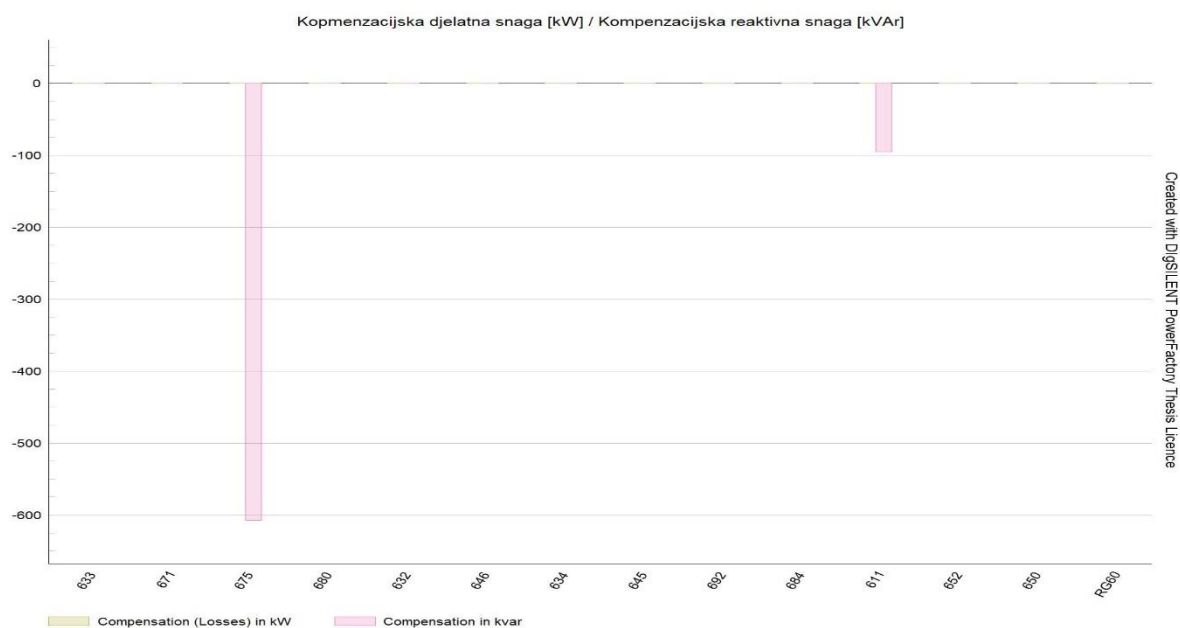


**Slika 6.10** Prikaz gubitaka djelatne i reaktivne snage po sabirnicama prije integracije OIE

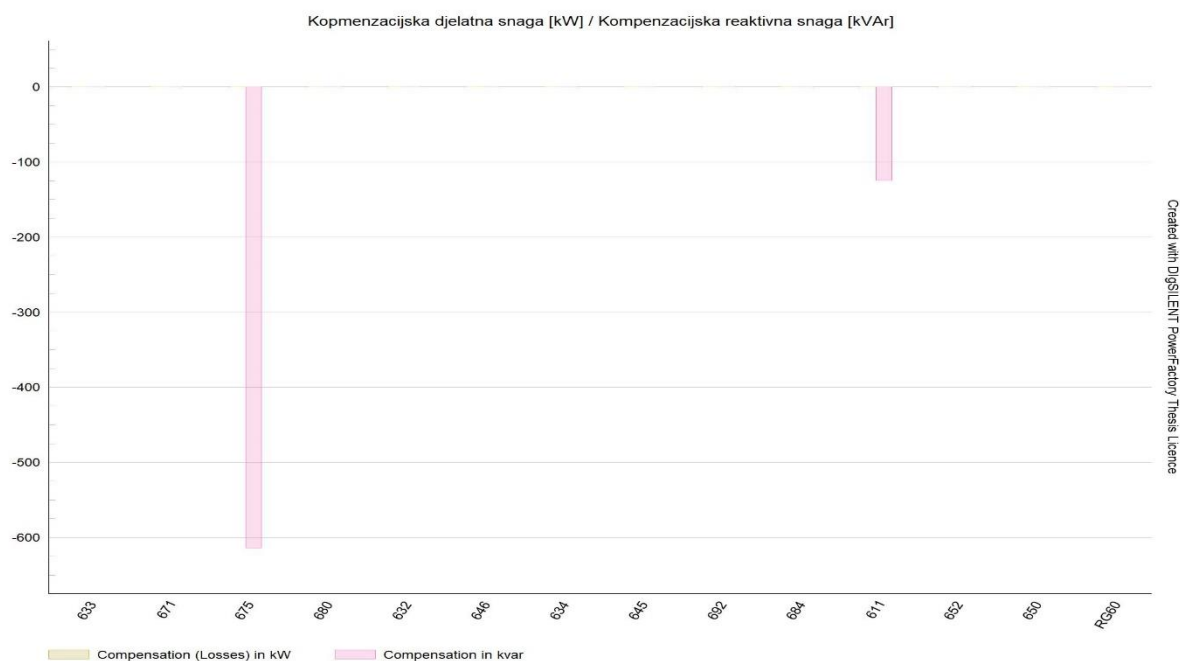


**Slika 6.11** Prikaz gubitaka djelatne i reaktivne snage po sabirnicama poslije integracije OIE

Na slikama 6.10 i 6.11 vidljiv je porast gubitaka djelatne i jalove snage na sabirnici 632 nakon priključenja OIE, dok su se na sabirnicama 633, 671 i 692 smanjili gubi djelatne i jalove snage. Gubitci na sabirnici 633 su iznosili oko 55 kW djelatne i oko 130 kVAr jalove snage, dok su se nakon integracije povećali na 325 kW djelatne i 351 kVAr jalove snage.

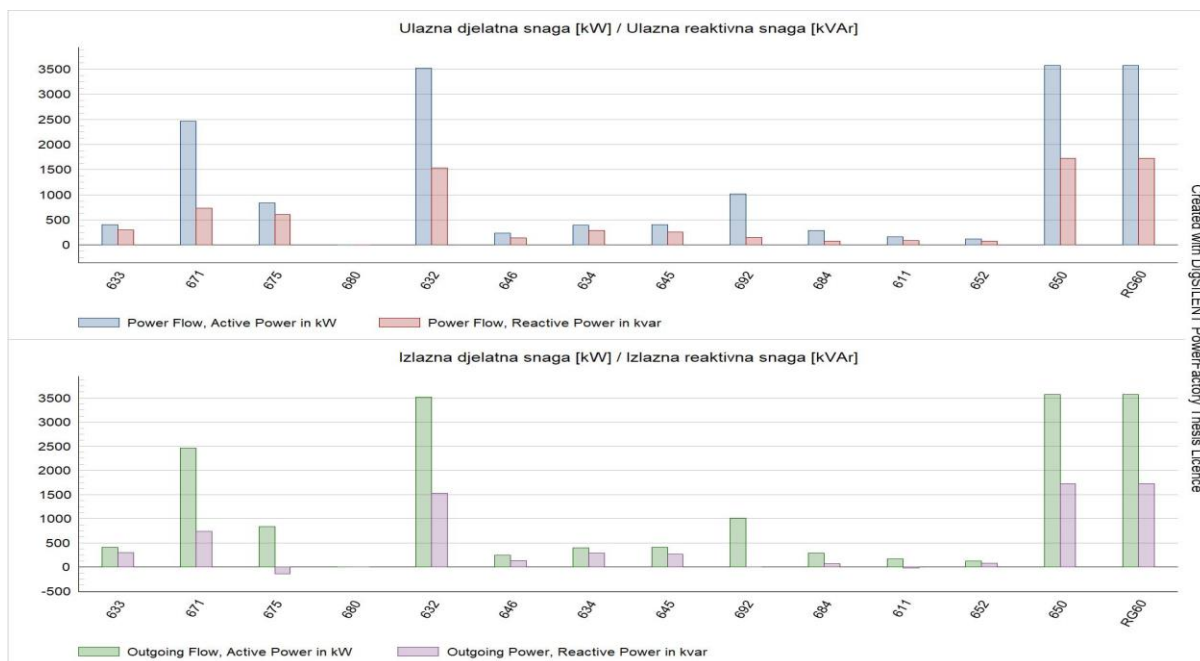


**Slika 6.12** Prikaz kompenzacije djelatne i reaktivne snage prije integracije OIE

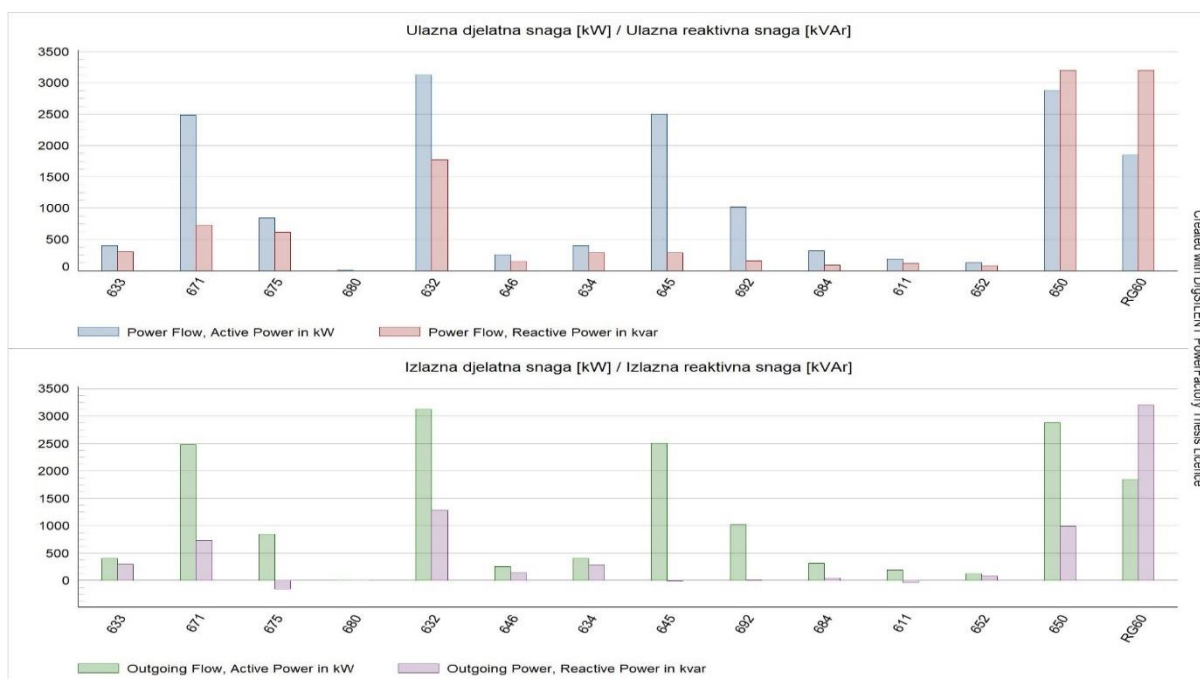


**Slika 6.13** Prikaz kompenzacijske djelatne i reaktivne snage poslije integracije OIE

Na sabirnicama 675 i 611 postoji „shunt filter“ koji ima zadatak kompenzirati jalove gubitke i uklanjanja strujnih viših harmonika. Slike 6.12 i 6.13 prikazuju porast jalove snage preko -600 kVAr na sabirnici 675 i preko -100 kVAr na sabirnici 611 nakon priključenja OIE.



**Slika 6.14** Prikaz ulaznih i izlaznih snaga na sabirnicama sustava prije integracije OIE

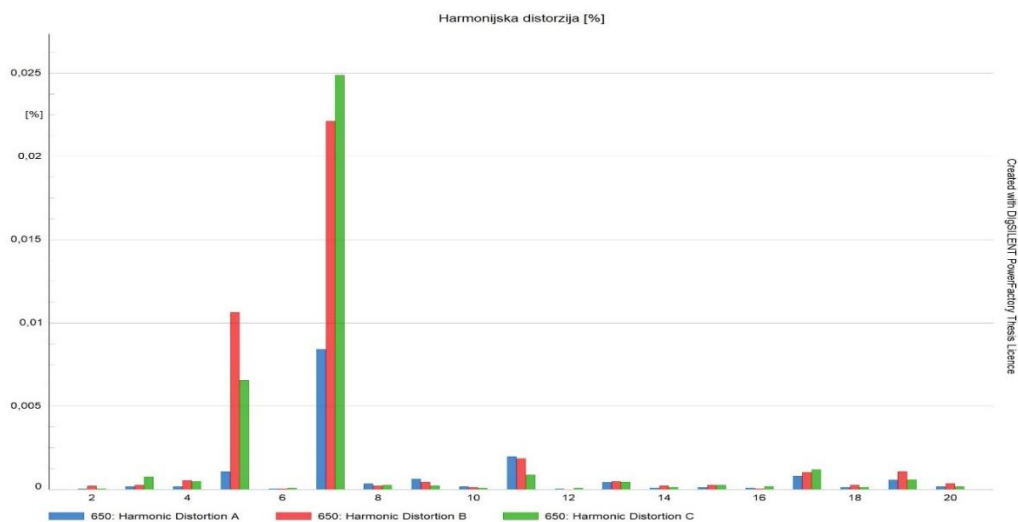


**Slika 6.15** Prikaz ulaznih i izlaznih snaga na sabirnicama sustava prije integracije OIE

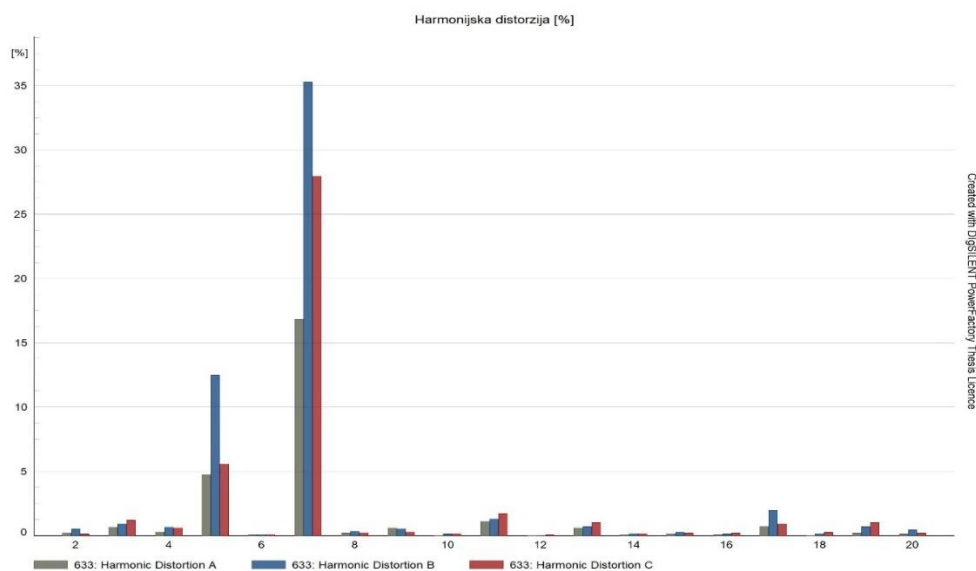
Nakon priključenja OIE vidljive su promjene na sabirnicama 632, 645, 692, 650 i RG60 kada je riječ o ulaznim snagama. Ulazna djelatna snaga se povećava kod sabirnica 645 i 692 dok reaktivna snaga ostaje ista, a sabirnice 632, 650 i RG60 bilježe porast reaktivne ulazne snage i smanjenje djelatne snage zbog integracije OIE. Analogno tome ista je situacija i sa izlaznim djelatnim i reaktivnim snagama kao što je prikazano na slikama 6.14 i 6.15.

## Harmonijska analiza

Integracija OIE u IEEE 13 sabirnički testni sustav izaziva pojavu viših harmonika, te su prikazani stupčasti dijagrami harmonijske distorzije nasumično odabranih sabirnici kao što je prikazano u tablici 6.1. Na osnovu grafikona se prikazuje najveći udio harmonika u pojedinoj fazi nakon priključenja obnovljivih izvora. Na osnovu norme IEC 50160 će se usporediti koji harmonik prelazi dopuštene vrijednosti.



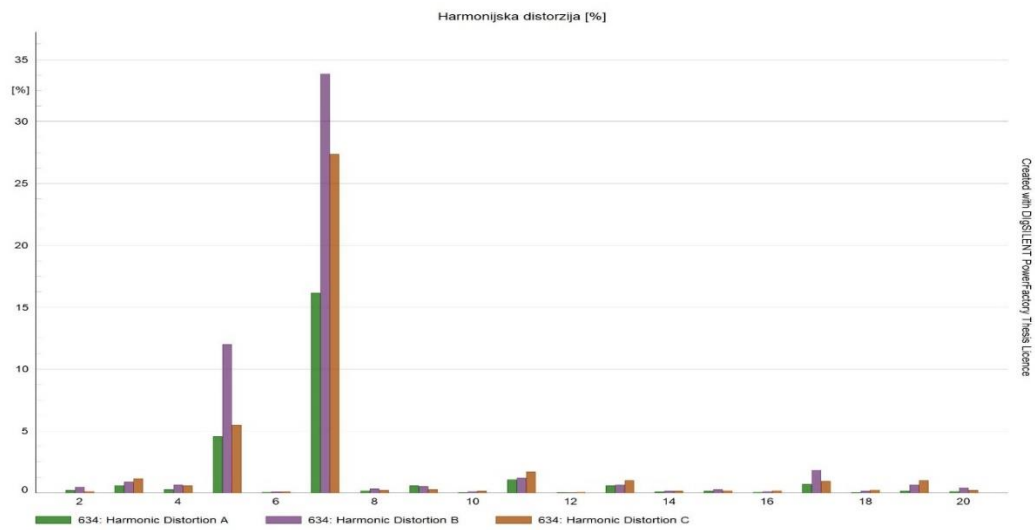
*Slika 6.16 Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 650*



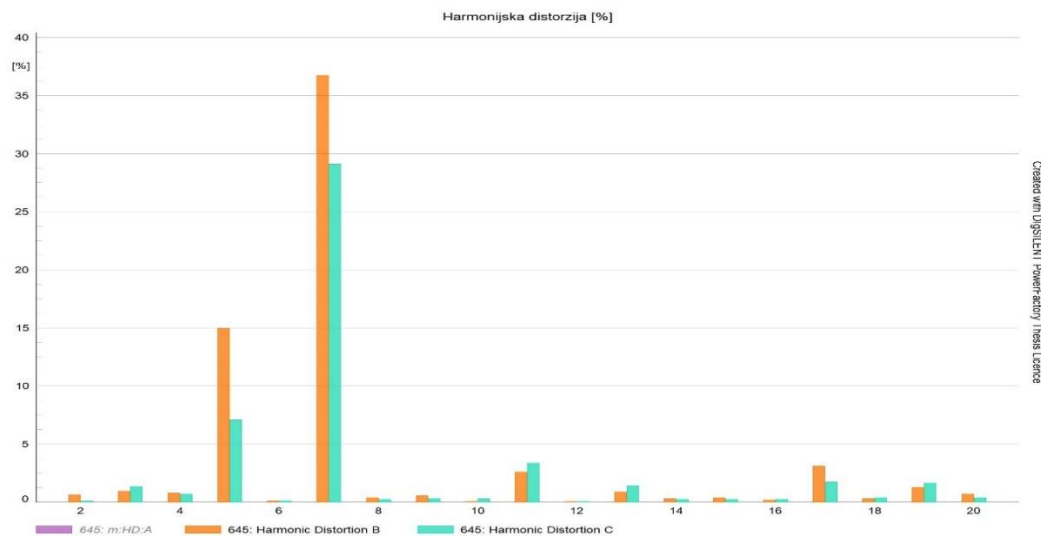
*Slika 6.17 Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 633*

Na slikama 6.16 i 6.17 je prikazan graf harmonijske distorzije napona na sabirnicama 650 i 633, kod koji su dominantni neparni harmonici, a najviše sedmi harmonik. Na sabirnici 650 udio iznosi 0,025 % faze C, a na sabirnici 633 preko 35 % faze B, dok je normom IEC 50160 najviše

dozvoljeno 5 % za sedmi harmonik. U oba slučaja peti harmonik prelazi dopuštenu vrijednost od 6 %.



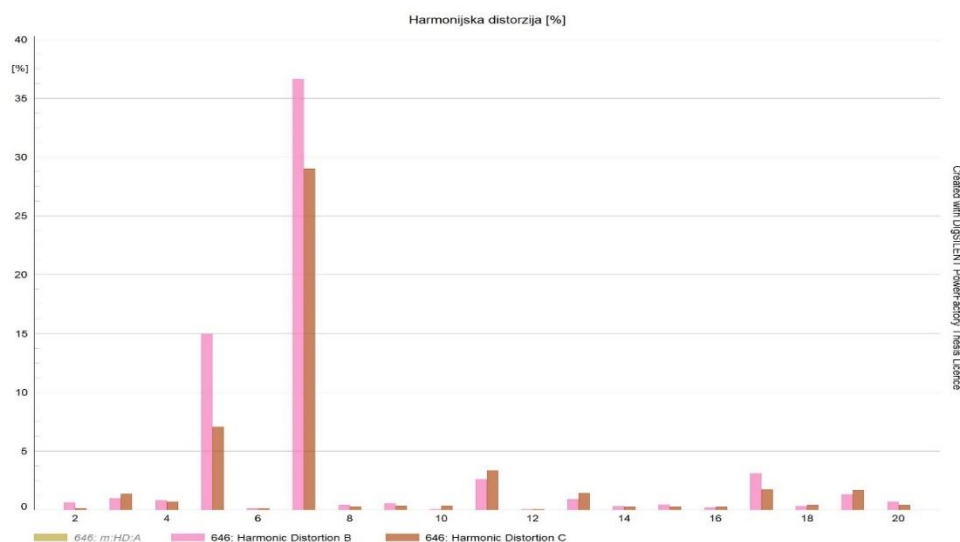
*Slika 6.18 Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 634*



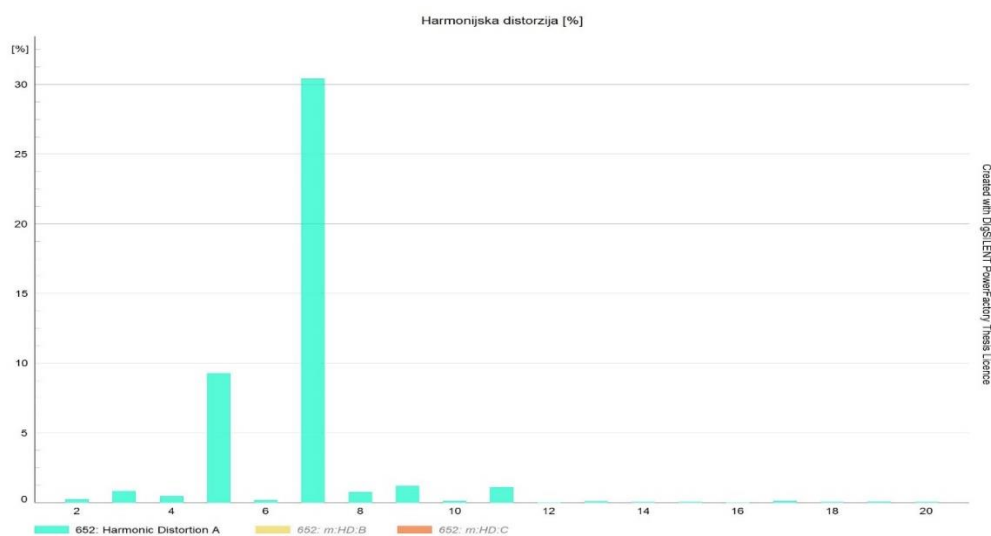
*Slika 6.19 Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 645*

Oba grafa harmonijske distorzije prikazani su na slikama 6.18 i 6.19, a najveći udio je sedmog harmonika. Na sabirnici 634 udio iznosi 34 %, a na sabirnici 633 preko 37 % dok je normom IEC 50160 dozvoljeno 5 % za sedmi harmonik. Najviše je zastupljen u fazi B, a prevladavaju neparni harmonici. U oba slučaja peti harmonik prelazi dopuštenu vrijednost od 6 %.



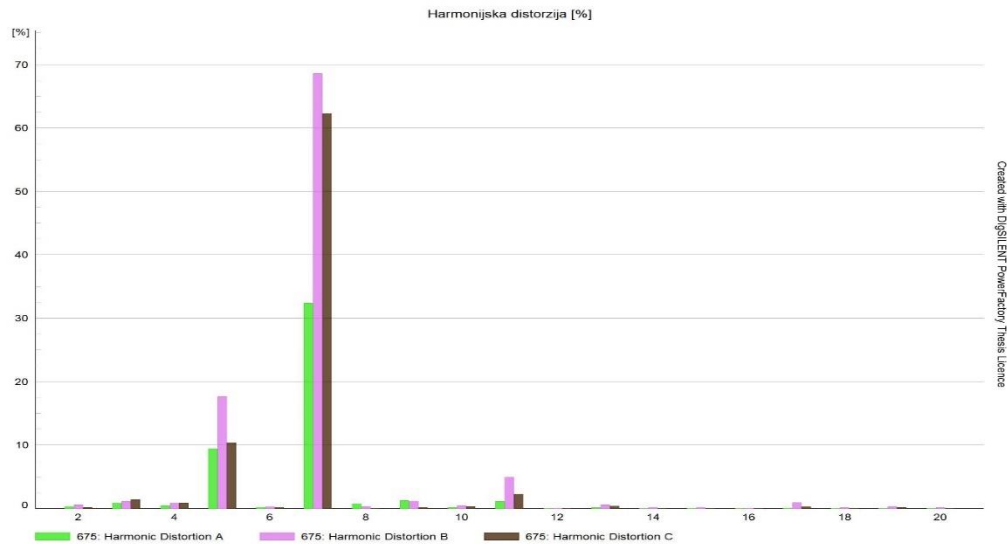


**Slika 6.20** Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 646

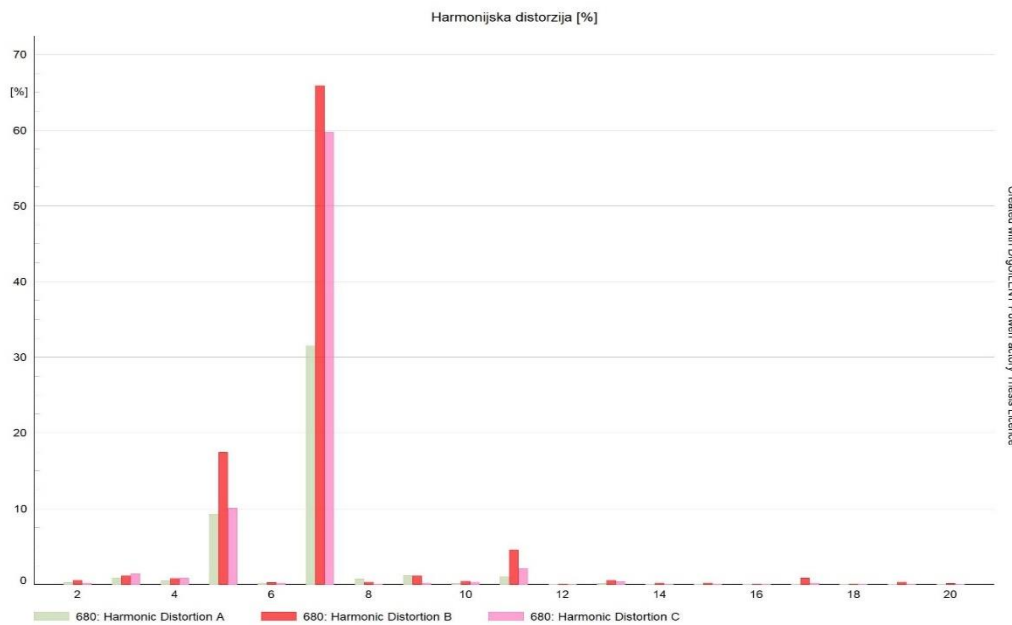


**Slika 6.21** Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 652

Isto kao u prethodnim slučajevima nakon integracije OIE, najzastupljeniji su neparni harmonici kao što je prikazano na slikama 6.20 i 6.21. Dominantan je sedmi harmonik iznosa udjela 37 % na sabirnici 646 faze B, dok je iznos udjela na sabirnici 652 preko 30 % , što nije dozvoljeno prema normo IEC 50160 od 5 % za sedmi harmonik. Dopuštenu vrijednost od 6 % prelaze peti harmonici u oba slučaja.

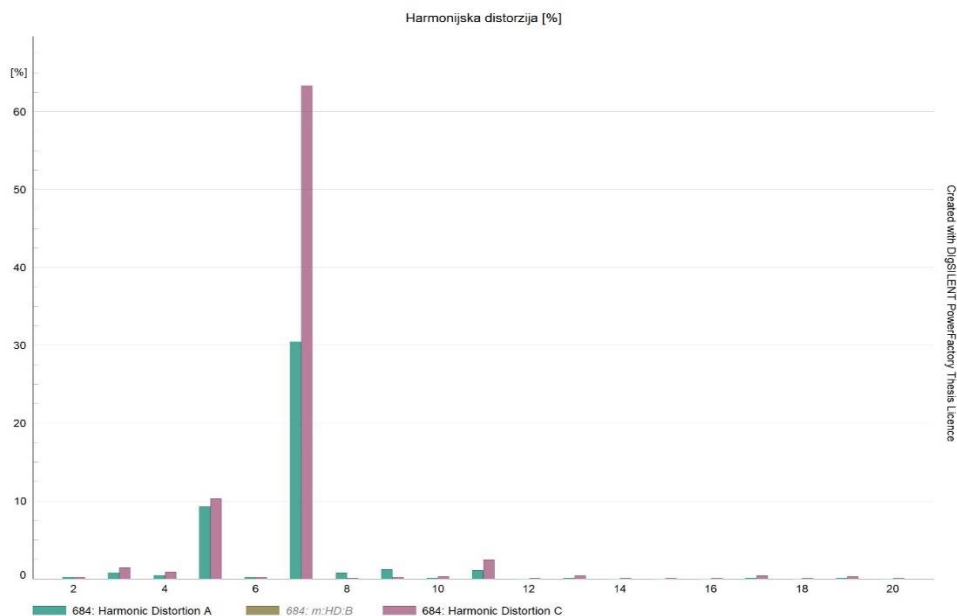


*Slika 6.22 Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 675*

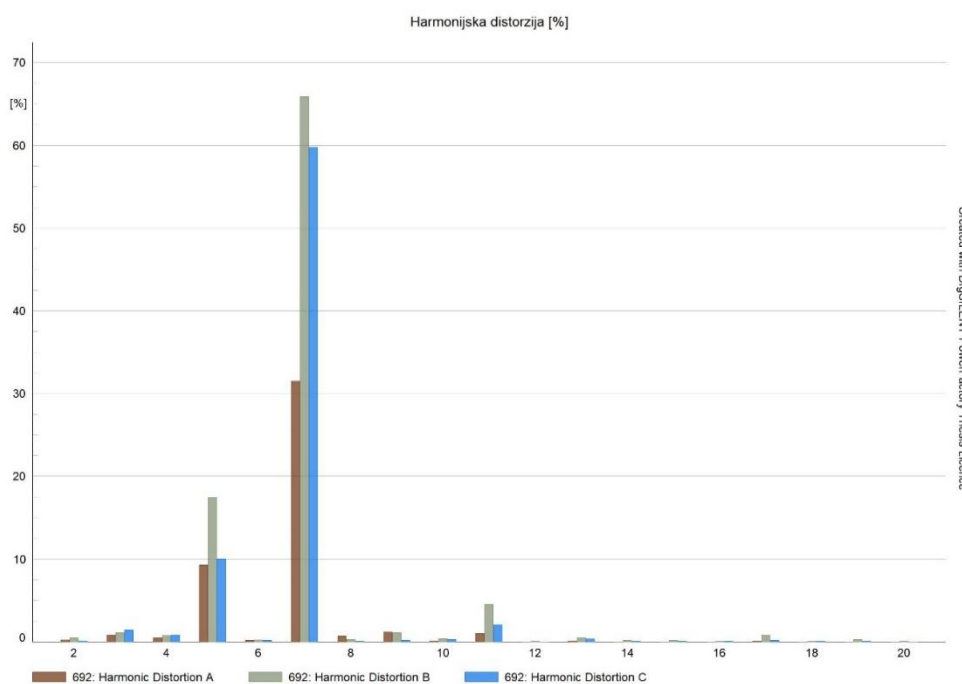


*Slika 6.23 Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 680*

Grafovi harmonijske distorzije su prikazani na slikama 6.22 i 6.23. Vidljivo je dominacija neparnih harmonika kao i u prethodim slučajevima, a najveći udjel je sedmog harmonika. Na sabirnici 675 udio iznosi 69%, a na sabirnici 680 preko 65% što nije u dopuštenim granicama od 5 % uključujući i peti harmonik od 6% kako je propisano normom IEC 50160. Najviše je zastupljen u fazi B, dok prevladavaju neparni harmonici.



*Slika 6.24 Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 684*

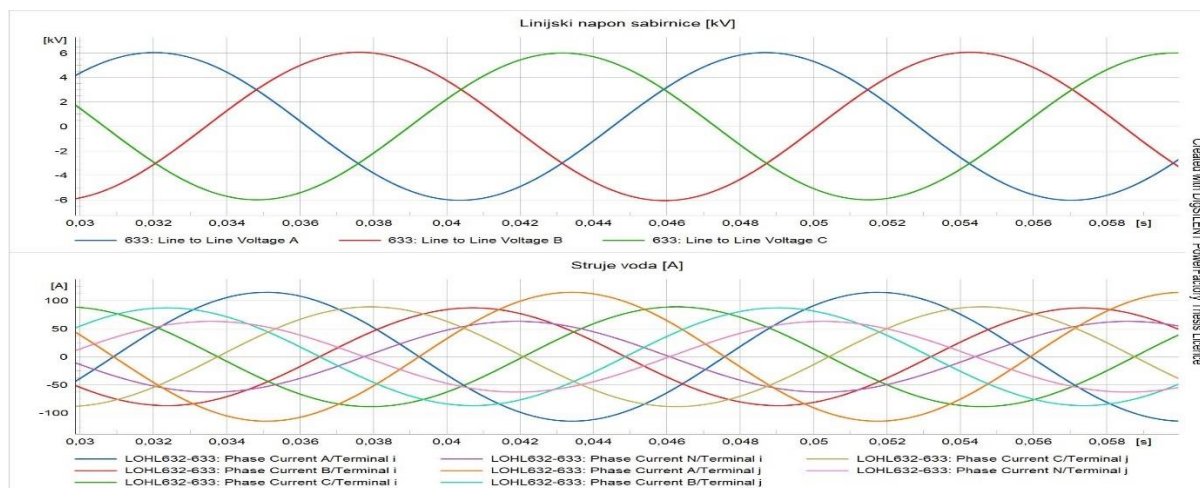


*Slika 6.25 Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 692*

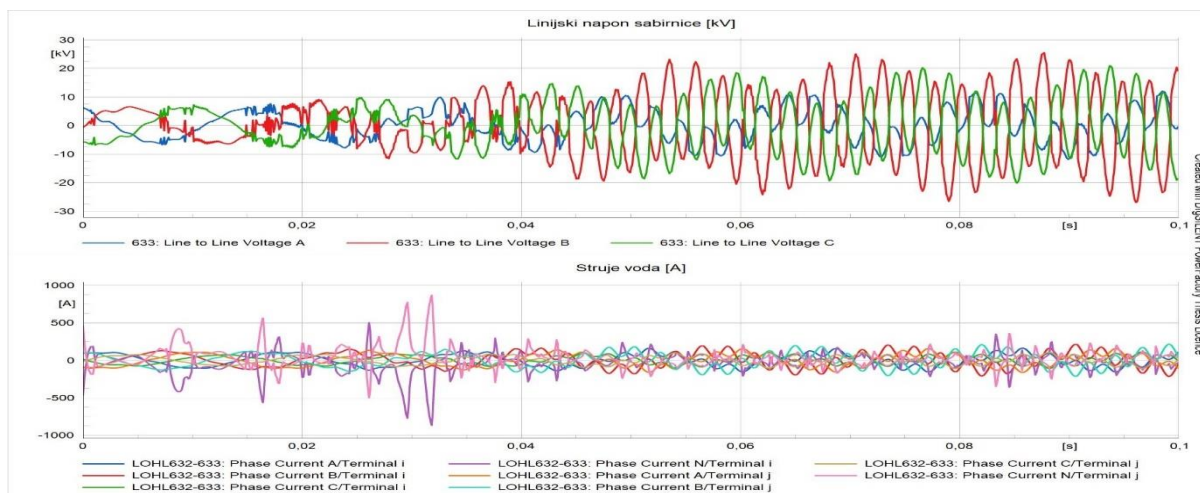
Isto kao i u prethodnim slučajevima, dominantan je sedmi harmonik. Kod sabirnice 684 ima udjel od 65%, a kod sabirnice 692 ima udjel od 67%. Najviše je zastupljen u fazi C sabirnice 685, a u fazi B sabirnice 692.

## EMT simulacija

Kako bi se uvidjelo ponašanje strujno-naponskih prilika sabirnica i vodova, provodi se EMT simulacija. Preko valnih oblika napona i struja se prikazuje utjecaj integracije obnovljivih izvora električne energije na IEEE 13 sabirnički testni sustav.

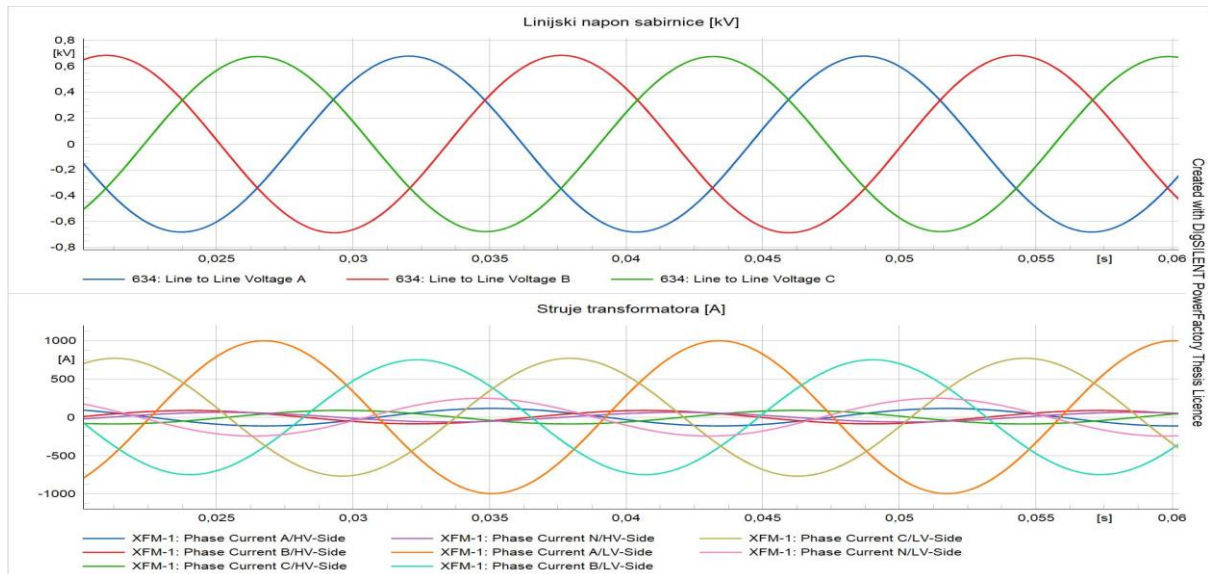


*Slika 6.26 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 633 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL632-633 prije integracije OIE*

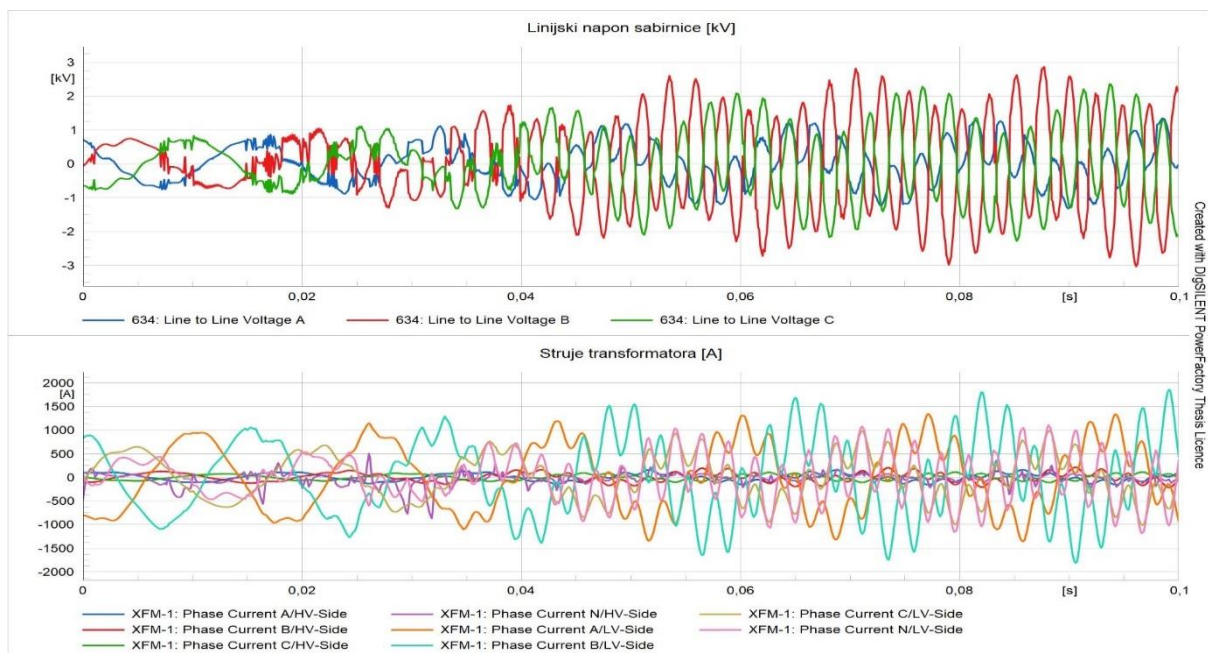


*Slika 6.27 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 633 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL632-633 poslije integracije OIE*

Na slikama 6.26 i 6.27 su prikazani valni oblici linijskih napona sabirnica i struja na ulazu i izlazu voda. Prije uključenja, linijski napon sabirnica 633 i struje na početku i kraju voda LOHL632-633 imaju sinusni oblik jer u mreži nema OIE i viših harmonika. Uključenje OIE rezultira izobličenjem valnog oblika napona i struje uključujući i titranje. Vidljivo je kako na nesimetričnu mrežu djeluju viši harmonici.



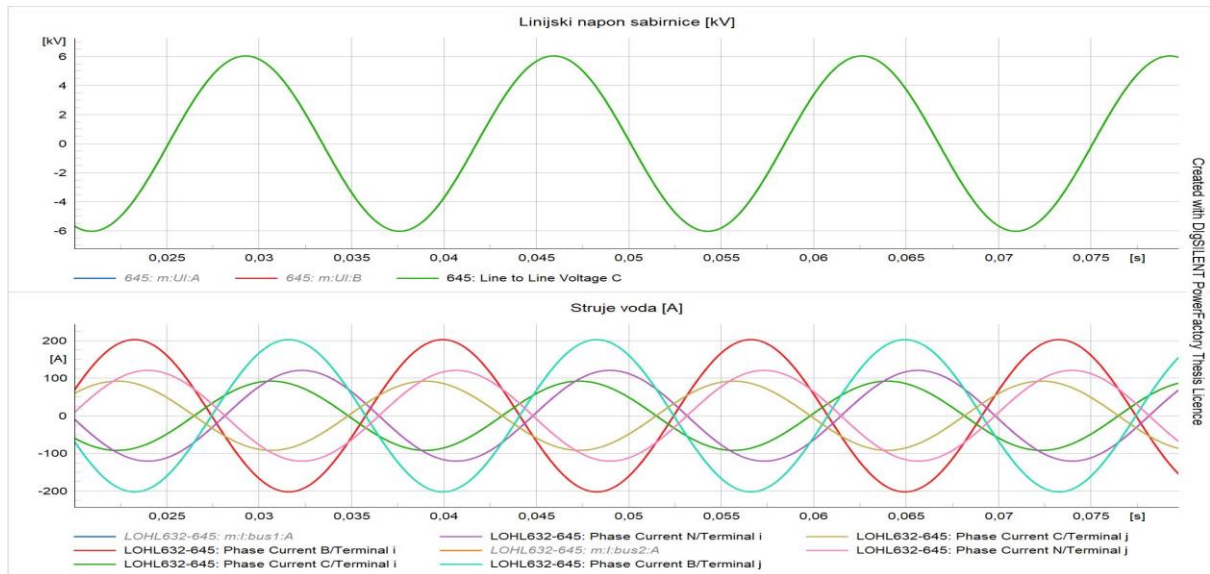
*Slika 6.28 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 634 i struja na ulazu i izlazu transformatora XFM-1 prije integracije OIE*



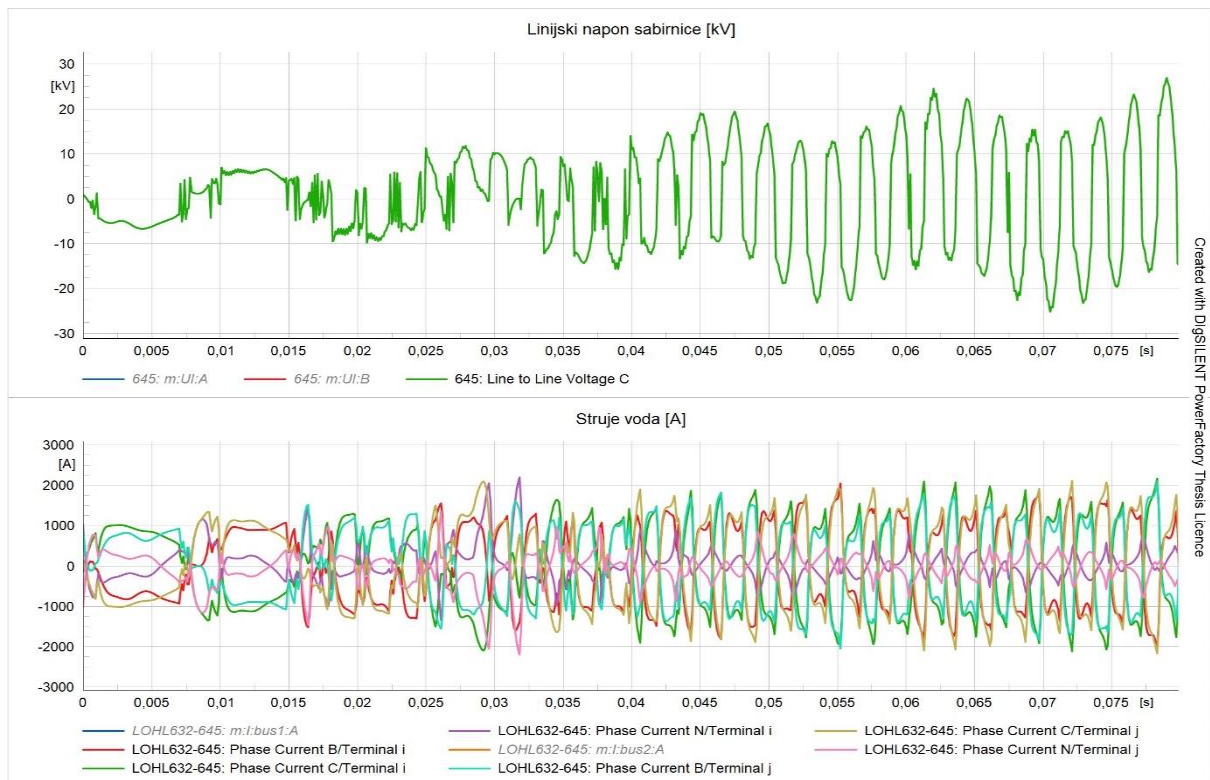
*Slika 6.29 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 634 i struja na ulazu i izlazu transformatora XFM-1 poslije integracije OIE*

Prikaz valnih oblika linijskih napona i struja na ulazu i izlazu transformatora XFM-1 je dan na slikama 6.28 i 6.29. Vidljivo izobličenje valnog oblika linijskog napona sabirnice 634 i struja na ulazu i izlazu transformatora XFM-1 zbog uključanja OIE koji injektiraju više harmonike u mrežu kao i titranje valnog oblika linijskog napona sabirnice na početku promatranja.



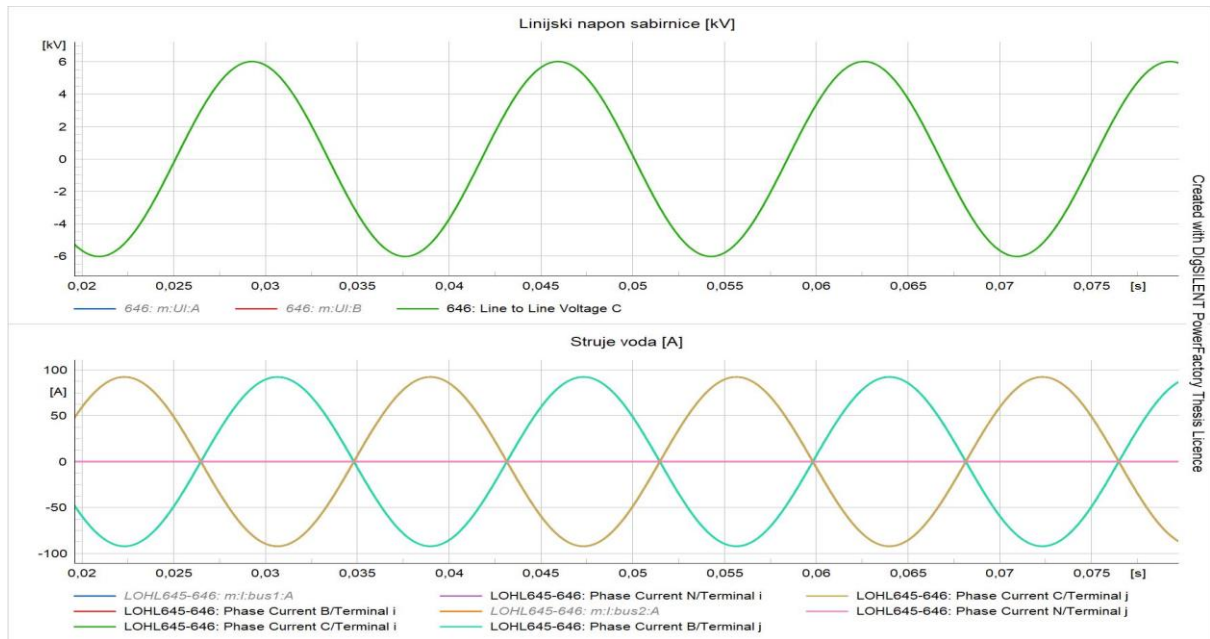


*Slika 6.30* Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 645 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL632-645 prije integracije OIE

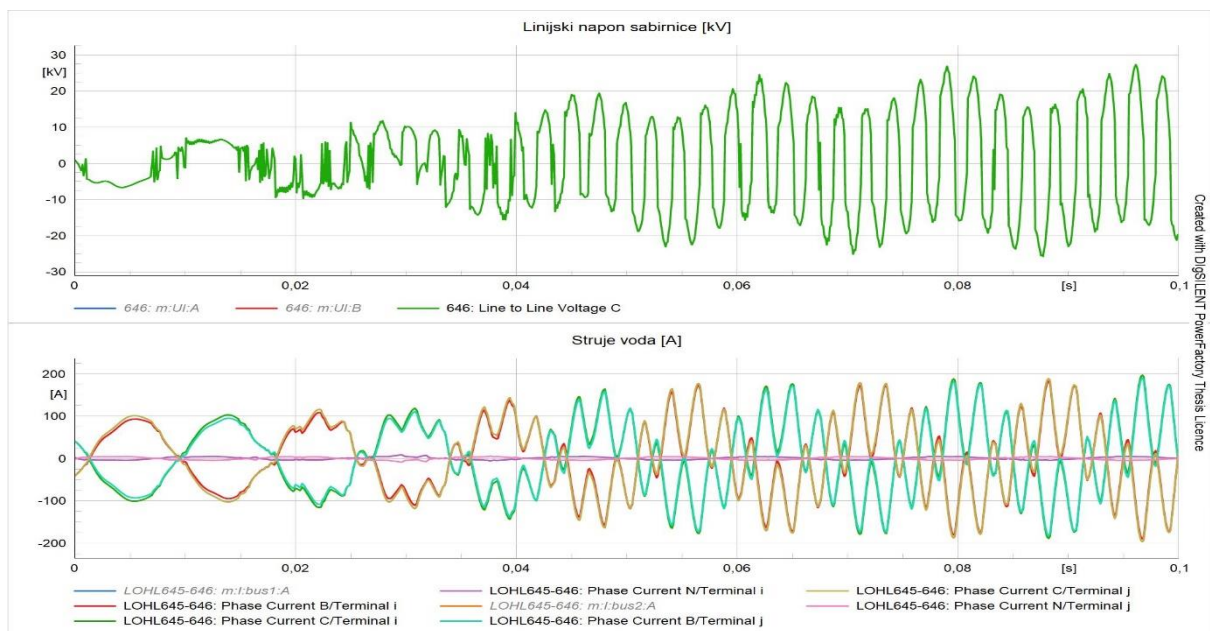


*Slika 6.31* Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 645 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL632-645 poslije integracije OIE

Vidljivo izobličenje valnog oblika linijskog napona sabirnice 645 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL632-645 zbog uključivanja OIE kao što je prikazano na slikama 6.30 i 6.31. Zbog utjecaja viših harmonika dolazi do izobličenja valnih oblika kao i titranja valnog oblika napona.

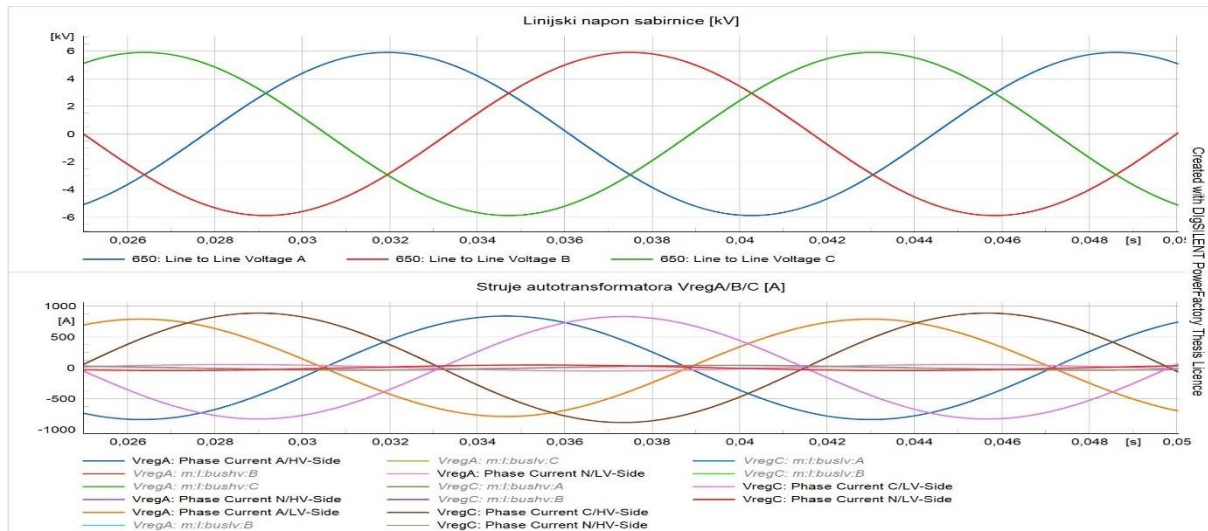


**Slika 6.32** Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 646 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL645-646 prije integracije OIE

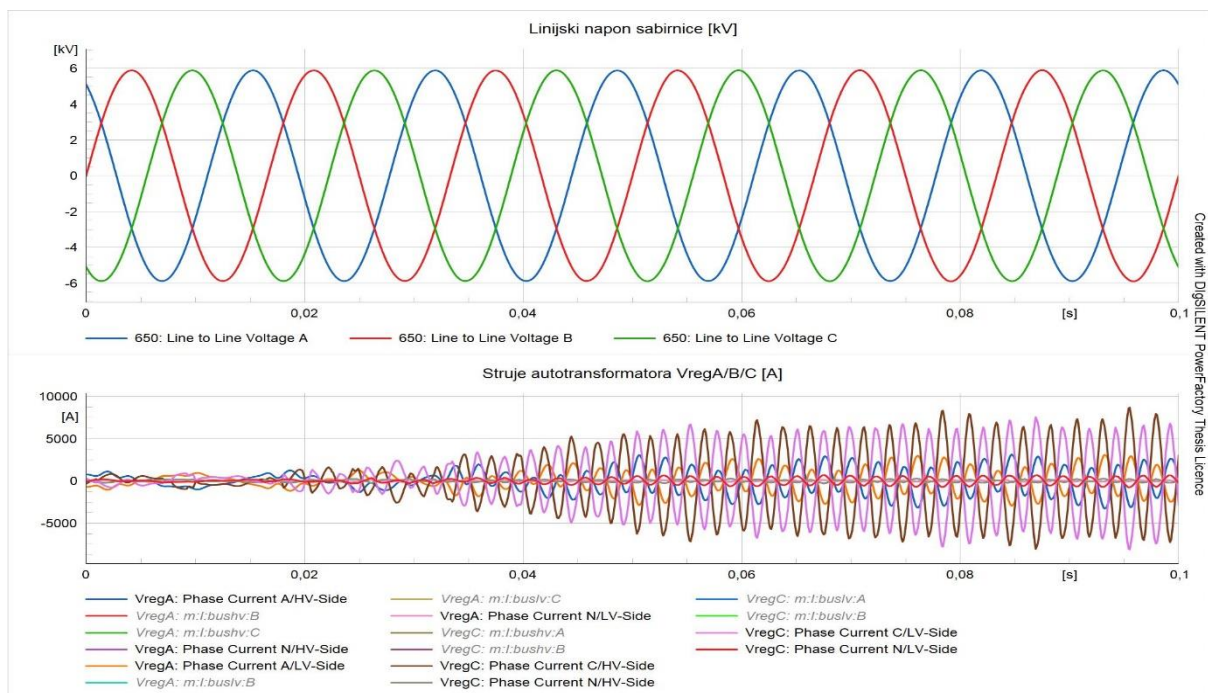


**Slika 6.33** Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 646 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL645-646 poslije integracije OIE

Integracijom OIE je vidljivo izobličenje valnih oblika napona i struja kao što je prikazao na slikama 6.32 i 6.33. Nastupilo je izobličenje valnog oblika linijskog napona sabirnice 646 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL645-646 zbog uključivanja OIE koji injektiraju više harmonike u mrežu kao i pojave titranja napona.



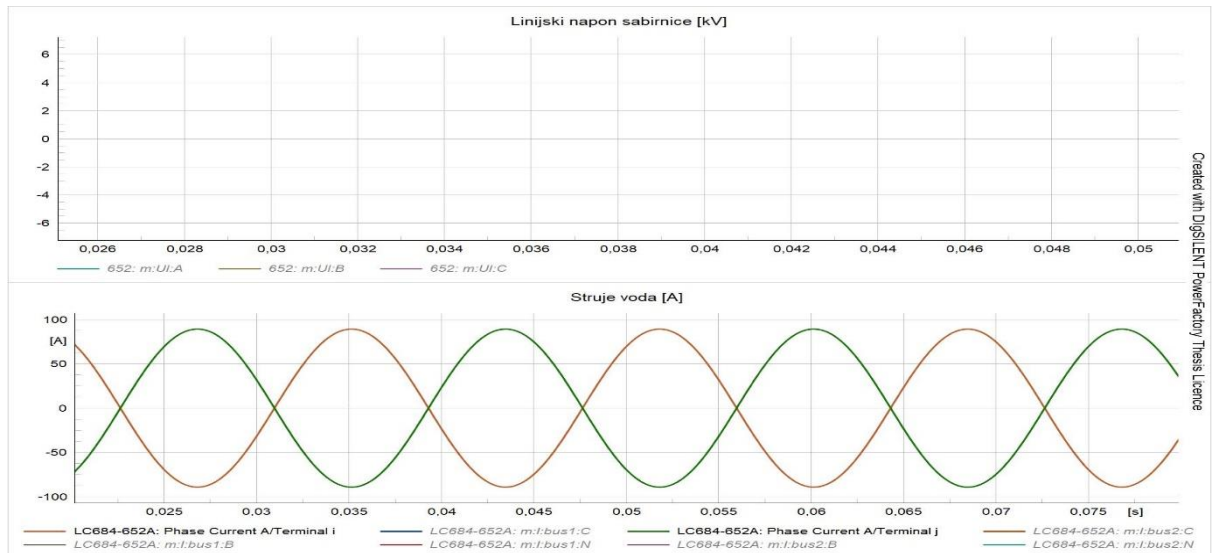
**Slika 6.34** Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 650 i struja na ulazu i izlazu autotransformatora VregA/B/C prije integracije OIE



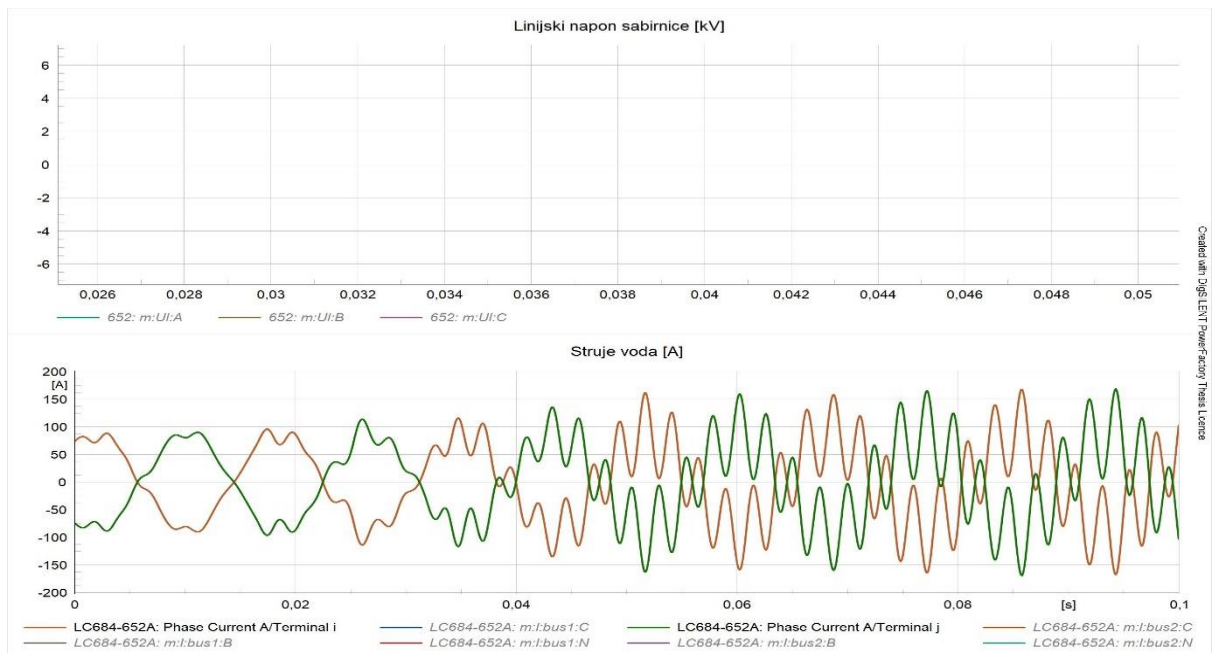
**Slika 6.35** Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 650 i struja na ulazu i izlazu autotransformatora VregA/B/C poslije integracije OIE

Nakon integracije OIE linijski napon sabirnice 650 je zadržao sinusni oblik jer je diktiran od strane mreže, ali valni oblici struja na ulazu i izlazu autotransformatora VregA/B/C podliježu višim harmonicima koje injektira vjetroelektrana spojena na sabirnicu 650. Na valnom oblika linijskog napona sabirnice 650 nema titranja i dodatnih oscilacija.



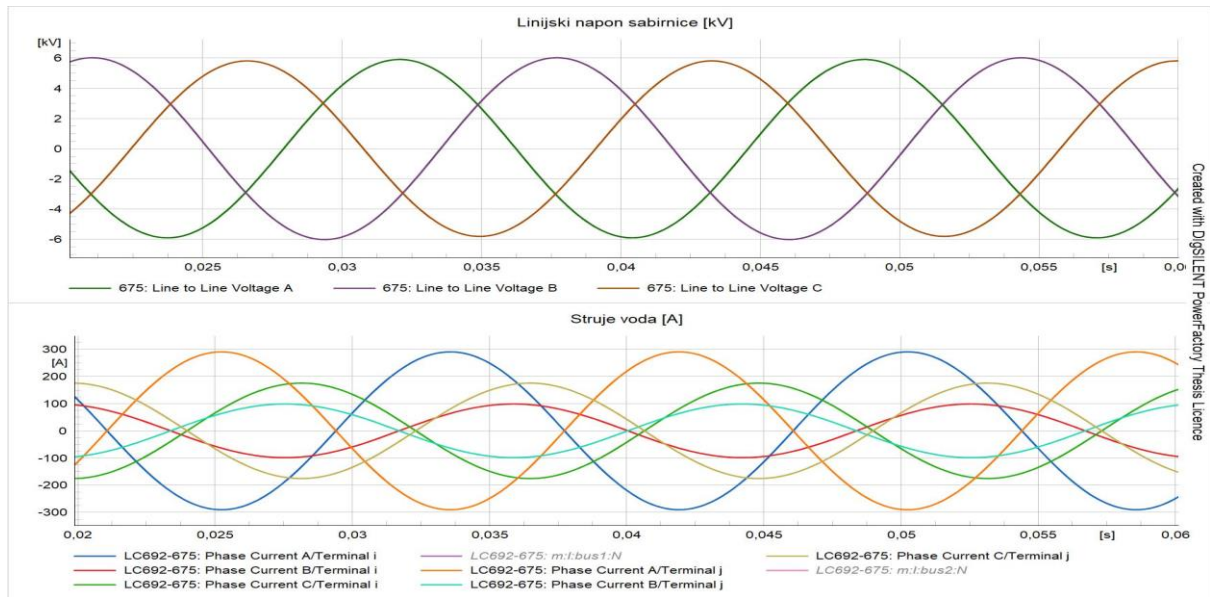


*Slika 6.36 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 652 i struja na ulazu i izlazu voda LC684-652A prije integracije OIE*

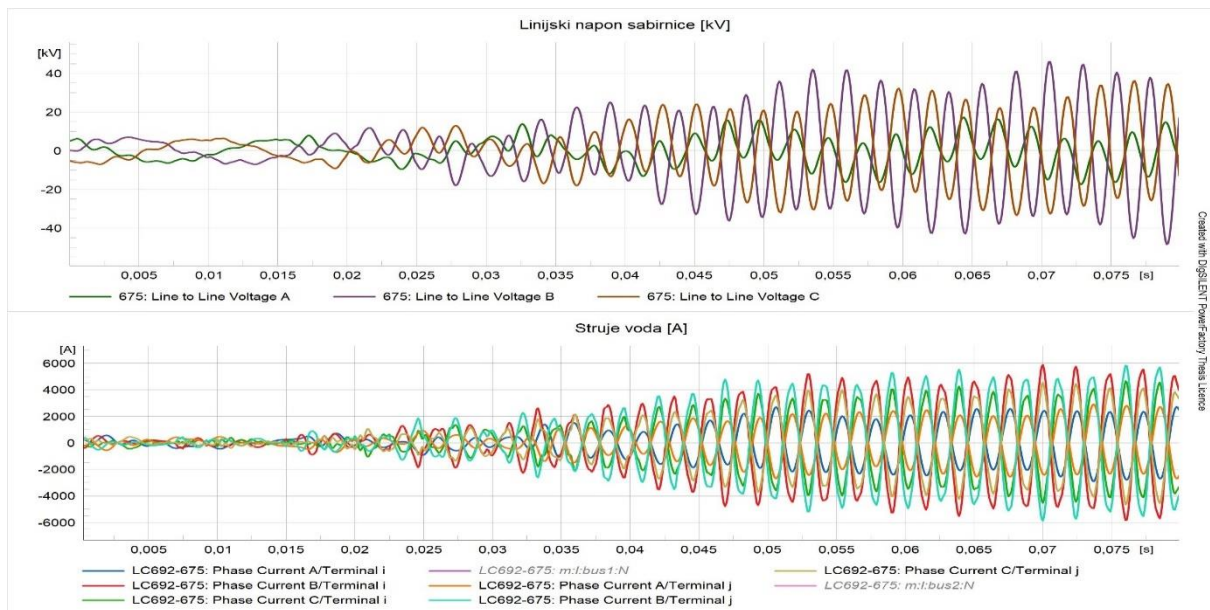


*Slika 6.37 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 652 i struja na ulazu i izlazu voda LC684-652A poslije integracije OIE*

Napon na sabirnici 652 iznosi nula, te nema prikaza valnog oblika na slikama 6.36 i . 6.37. Zbog priključenja OIE struje voda LC684-652A podliježu utjecaju viših harmonika i dolazi do izobličenja valnog oblika i stvaranja oscilacija.

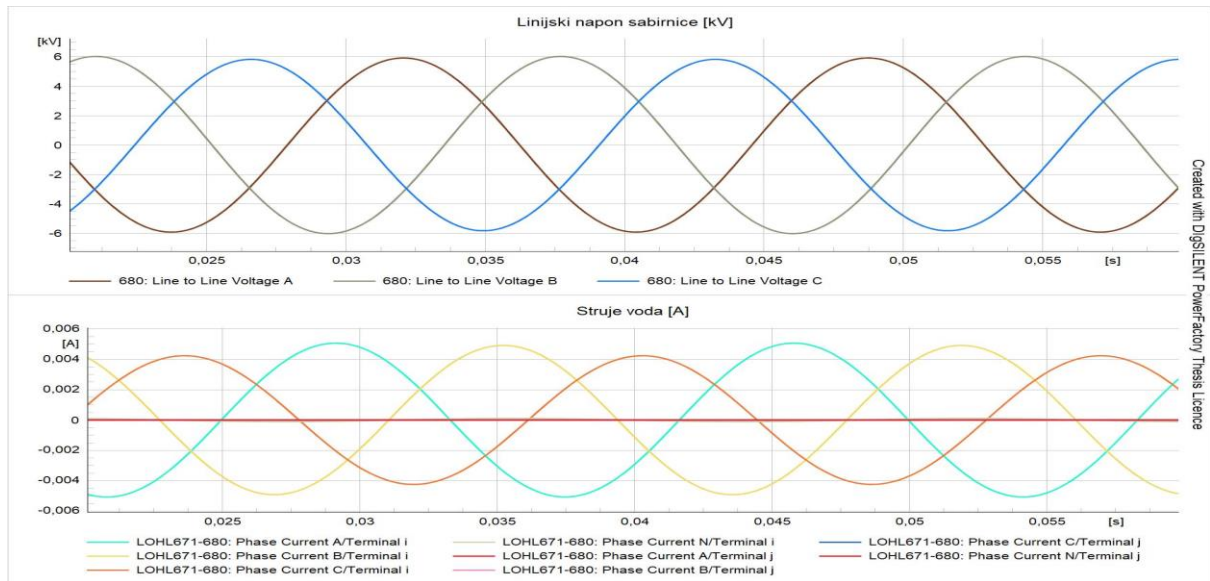


*Slika 6.38 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 675 i struja na ulazu i izlazu voda LC692-657 prije integracije OIE*

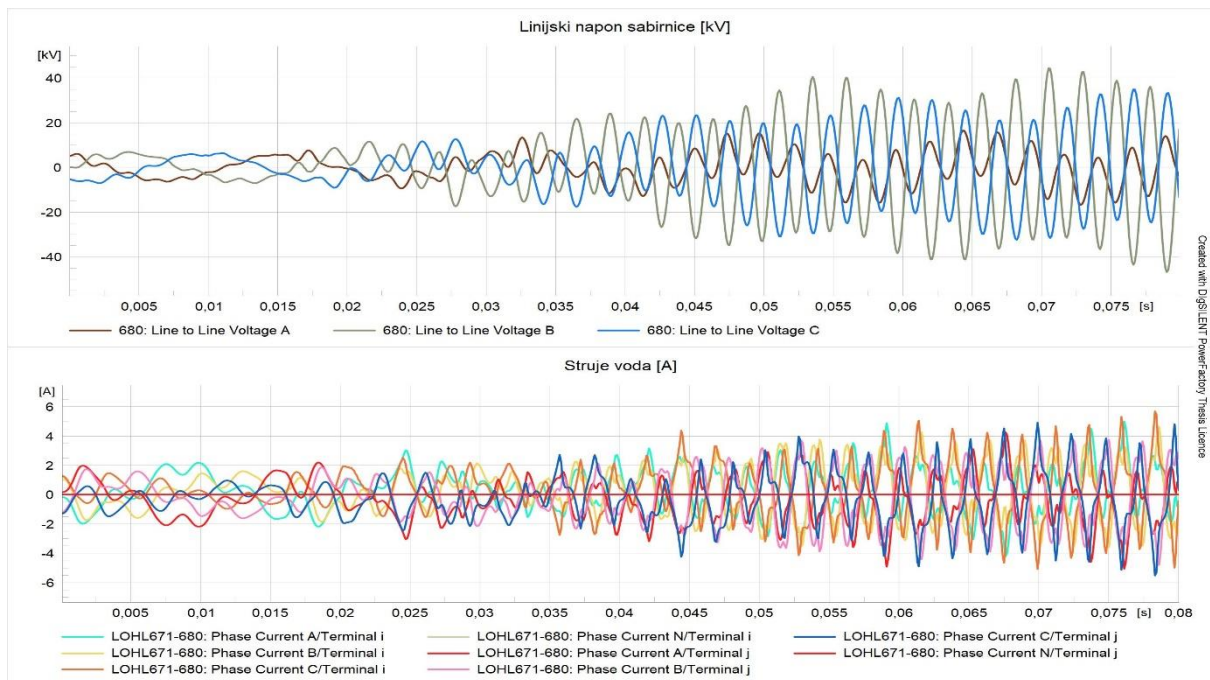


*Slika 6.39 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 675 i struja na ulazu i izlazu voda LC692-657 poslije integracije OIE*

Na slikama 6.38 i 6.39 je prikazano valno izobličenje linijskog napona na sabirnici 675 koji je prije integracije OIE bio sinusan, a isto vrijedi i za struje na ulazu i izlazu voda LC692-657. Vidljivo je širenje oscilacija i titranja valnih oblika uslijed djelovanja viših harmonika.



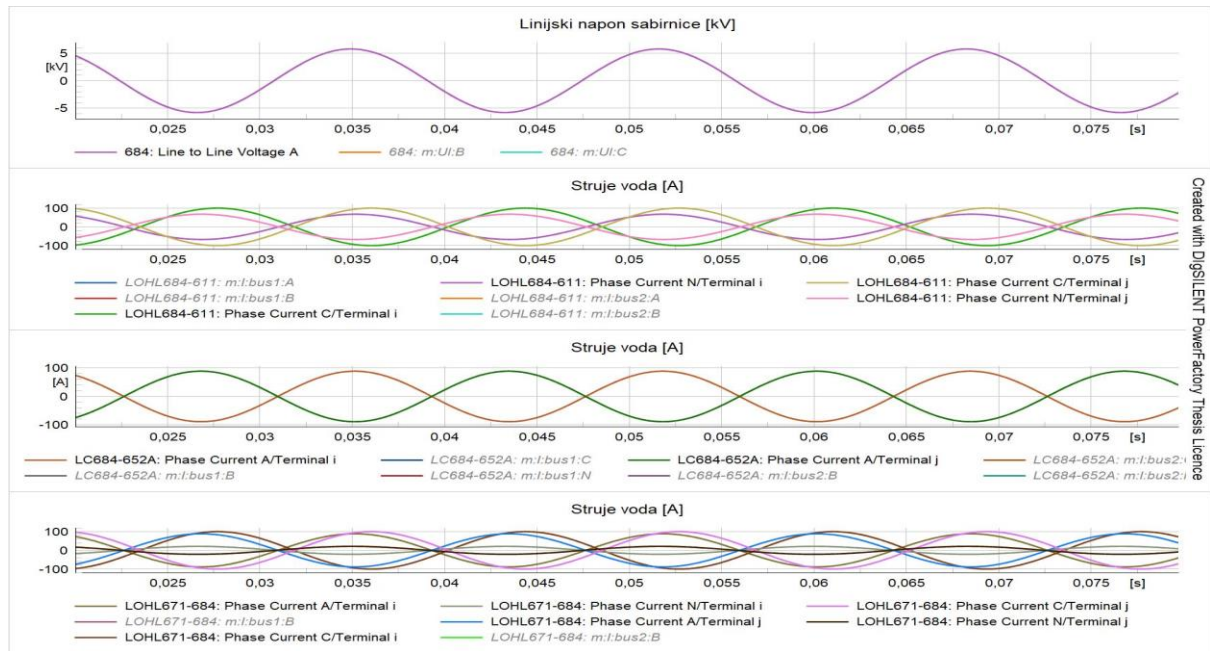
*Slika 6.40 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 680 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL671-680 prije integracije OIE*



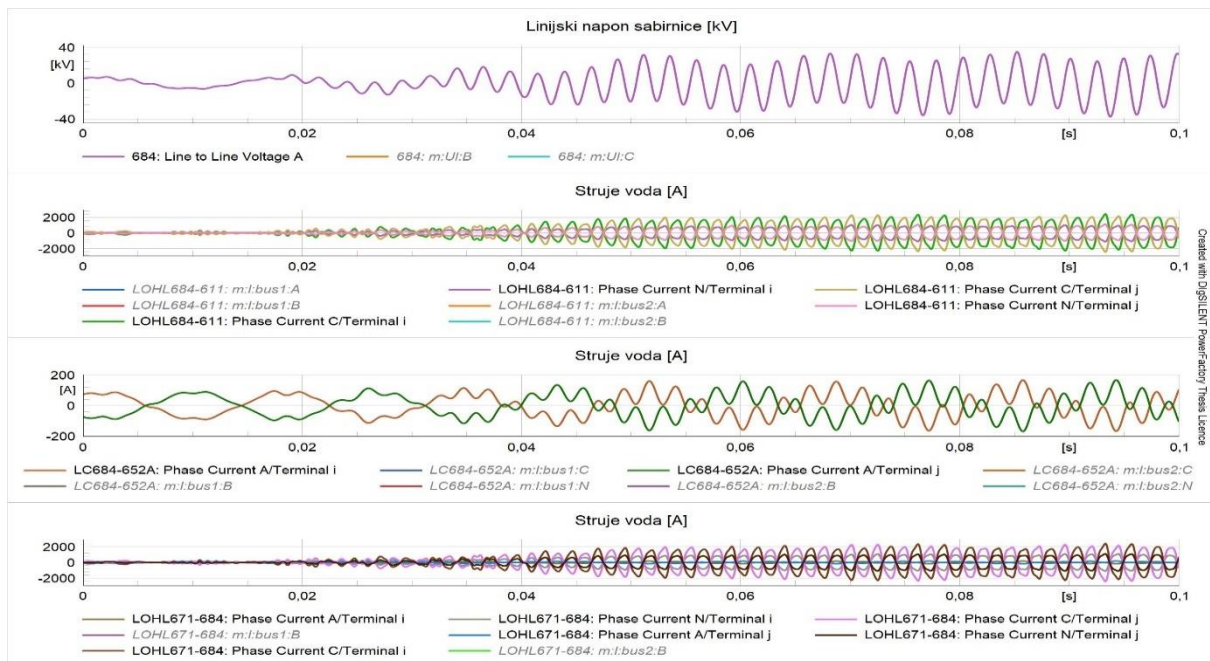
*Slika 6.41 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 680 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL671-680 poslije integracije OIE*

Vidljivo izobličenje sinusnog valnog oblika linijskog napona na sabirnici 680 i na valnom obliku struja na početku i kraju voda LC671-680 prilikom priključenja OIE na sabirnice. Viši harmonici utječu na izobličenje valnih oblika napona i struja.



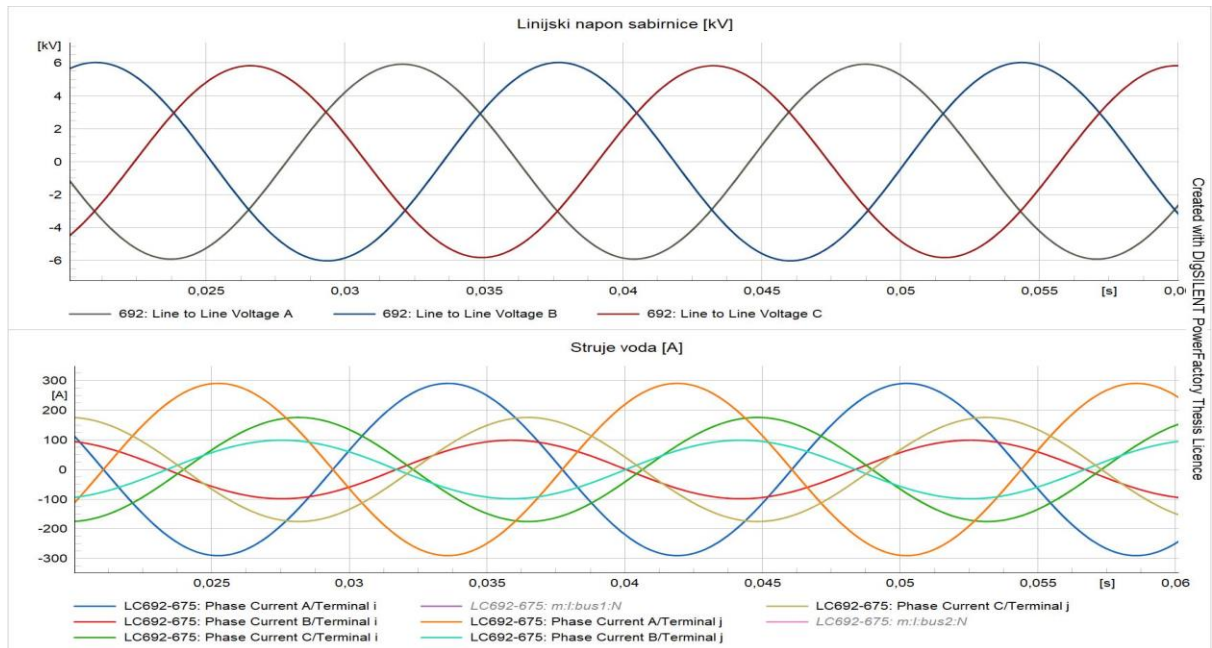


**Slika 6.42** Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 684 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL671-684, LOHL684-611, LC684-652A prije integracije OIE

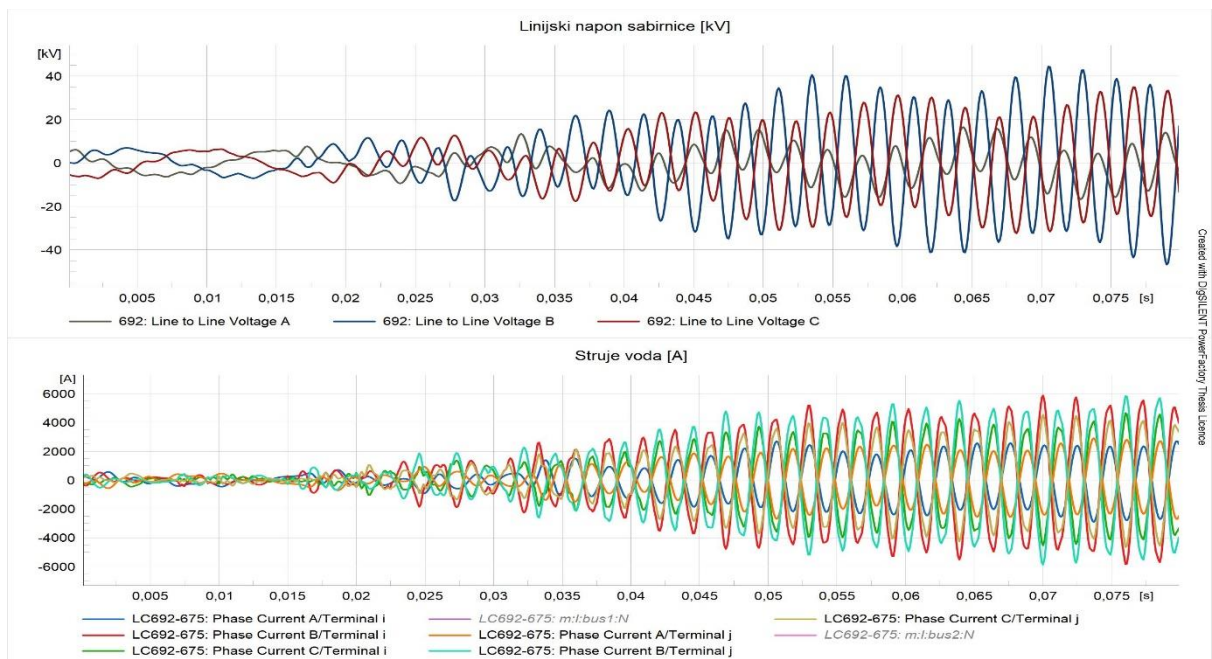


**Slika 6.43** Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 684 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL671-684, LOHL684-611, LC684-652A poslije integracije OIE

Prikazani su valni oblici linijskog napona na sabirnici 684 i valnih oblika struja na ulazu i izlazu vodova LOHL671-684, LOHL684-611, LC684-652A prije i poslije integracije OIE zbog utjecaja viših harmonika i dodatnih oscilacija. Valni oblici su prikazani na slikama 6.42 i 6.43.



**Slika 6.44** Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 692 i struja na ulazu i izlazu voda LC692-675 prije integracije OIE



**Slika 6.45** Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 692 i struja na ulazu i izlazu voda LC692-675 poslije integracije OIE

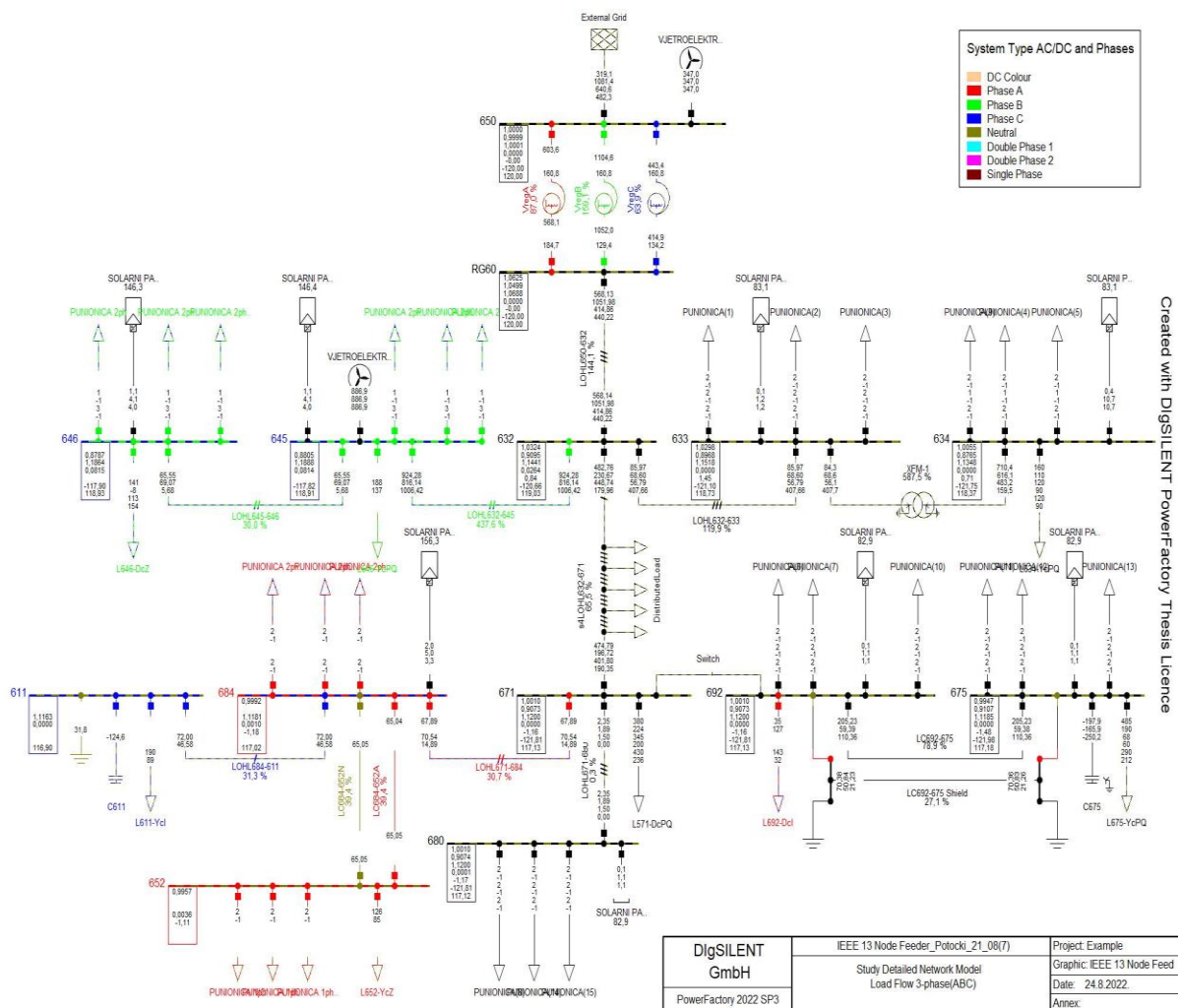
Na slikama 6.44 i 6.45 je prikazano valno izobličenje linijskog napona na sabirnici 692 koji je prije integracije OIE bio sinusan, a isto vrijedi i za struje na ulazu i izlazu voda LC692-675. Vidljivo je širenje oscilacija i titranja valnih oblika uslijed djelovanja viših harmonika.

### 6.3 Integracija električnih punionica za električna vozila u IEEE 13 sabirnički testni sistem

U ovom dijelu analize je provedena integracija punionica na već postojeći IEEE 13 sabirnički testni sistem na koji su prethodno priključeni obnovljivi izvori energije. Potrebno je usporediti snage, napone i struje prije i poslije integracije punionica. Simulacija je provedena na isti način kao i prethodni slučaj. Sve simulacije su provedena na način da je na sabirnice kao što je prikazano u tablici 6.1 spoji po tri punionice. Iznos snage jedne punionice iznosi 1,8 kW što predstavlja kućnu punionicu električnih vozila.

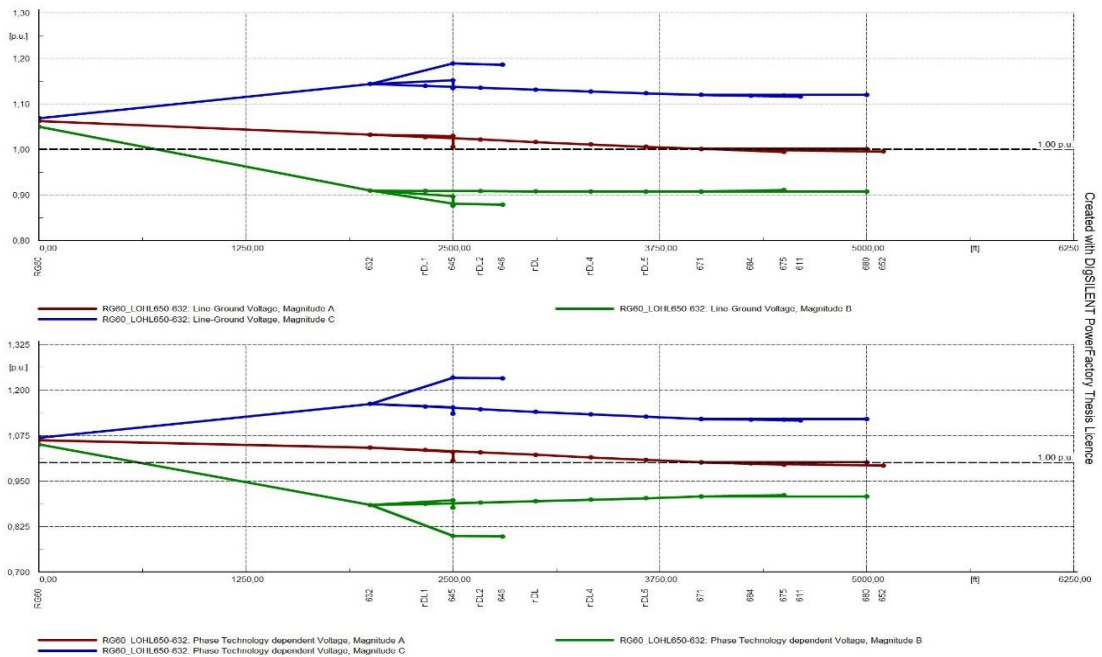
#### Tokovi snaga

Cilj je uočiti promjenu napona na sabirnicama testnog sustava kada se u njega implementira punionica za električna vozila. Analogno tome isto vrijedi i za sve snage na sabirnicama u sustavu.



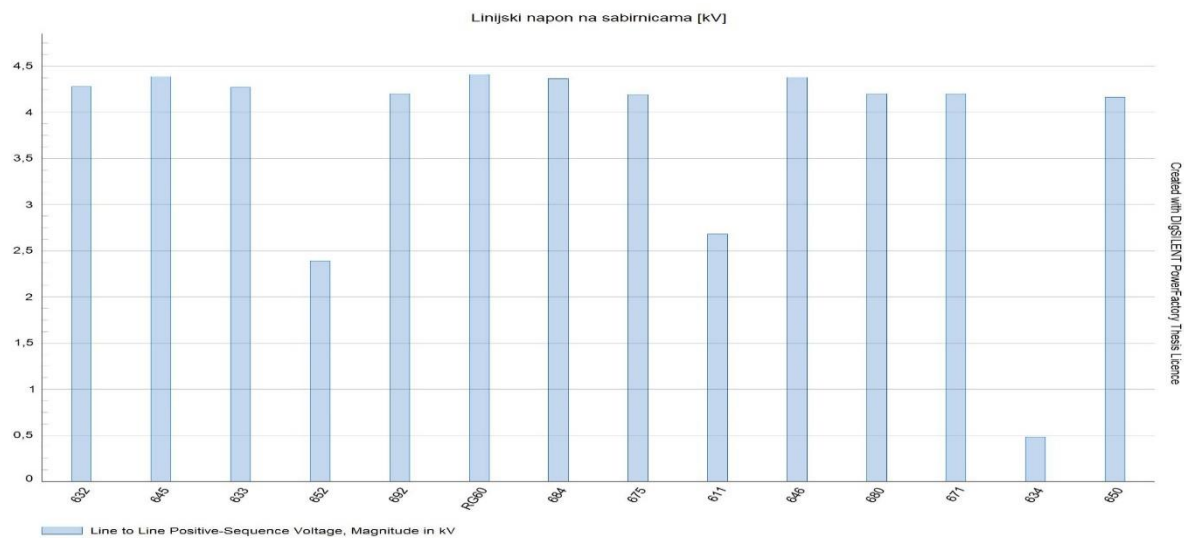
Slika 6.46 Prikaz sheme sustava nakon provedenih tokova snaga





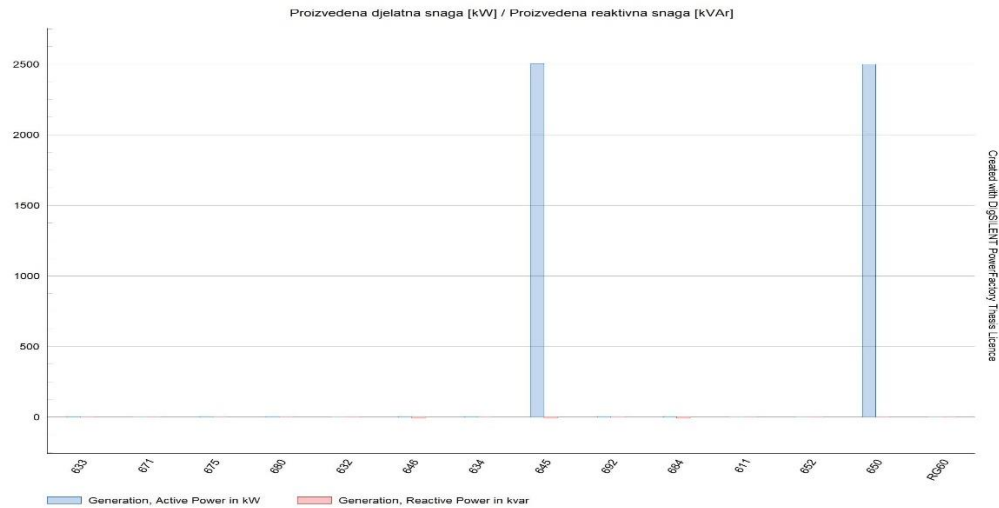
**Slika 6.47** Prikaz naponskih profila poslije integracije punionica

Na slici 6.47 su prikazani naponski profili sabirnica poslije integracije punionica za električna vozila snage 1,8 kW. Kao i u prethodnom slučaju, kada su se integrirali OIE, nije došlo do promjene faznog napona na sabirnicama u sustavu. Najveći napon iznosi 1,189 p.u. na sabirnici 645, a najmanji iznosi 0,88 p.u. na sabirnici 646.



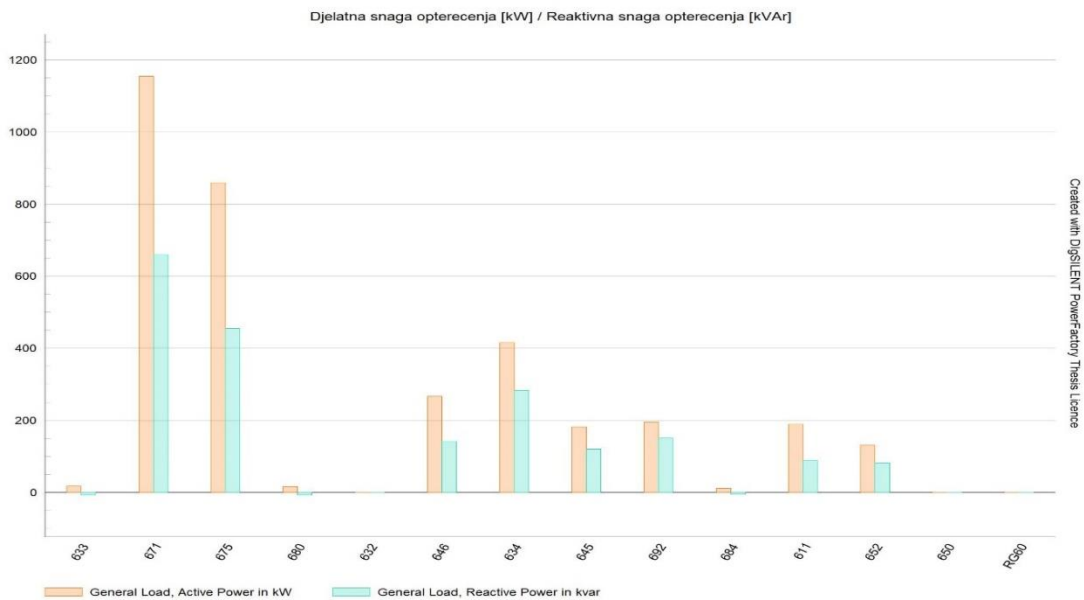
**Slika 6.48** Stupčasti grafikon linijskih napona sabirnica poslije integracije punionica

Kao i što je prikazano na slici 6.84 iznosi linijskih napona na sabirnicama u sustavu su ostali ne promijenjeni, kada se integriraju punionice snage 1,8 kW po tri na svaku promatranu sabirnicu kako je označeno u tablici 6.1.



**Slika 6.49** Prikaz proizvedene djelatne i proizvedene reaktivne snage poslije integracije punionica

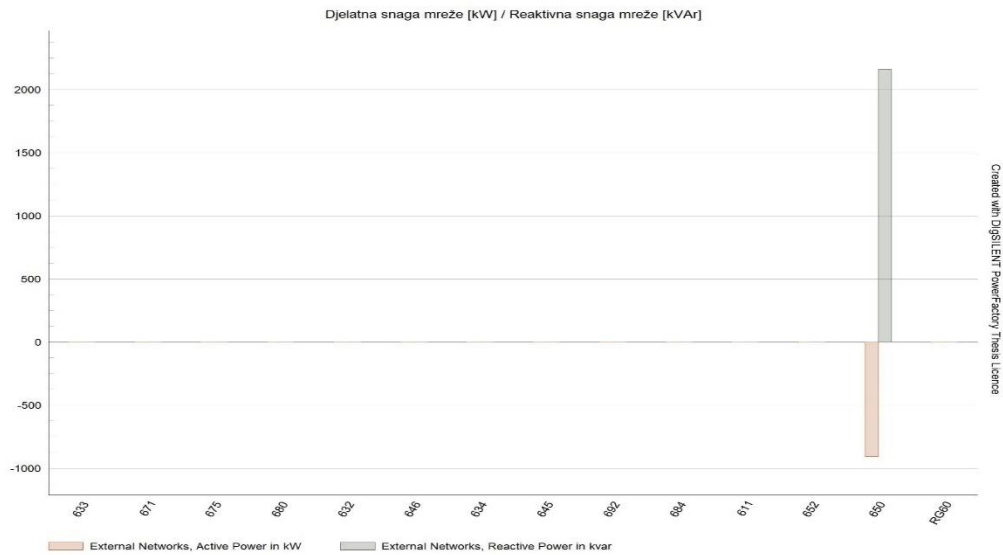
Prikaz proizvedene djelatne i jalove snage mreže prikazan je na slici 6.49, gdje je vidljivo da je proizvedena snaga ista kao i u prethodnom slučaju kada je provedena integracije OIE. Priključenje punionica nije izazvalo nikakve promjene.



**Slika 6.50** Prikaz djelatne i reaktivne snage opterećenja sabirnica poslije integracije punionica

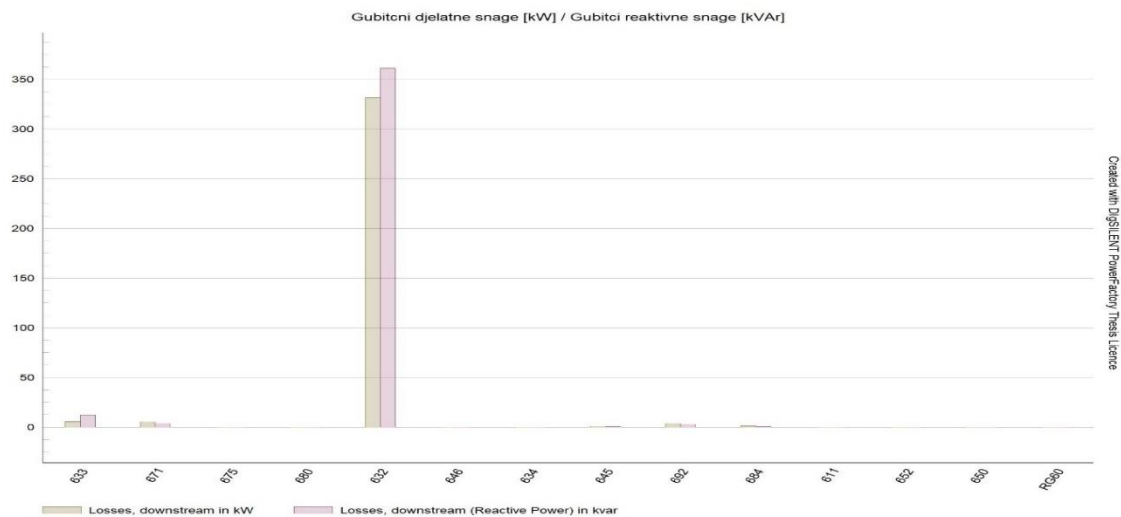
Poslije integracije punionica snage 1,8 kW vidljiv je blagi porast tereta na sabirnicama 646, 645, 633, 675, 684, 652, 634, 692 i 680. Na slici 6.50 je su prikazane snage tereta sabirnica u IEEE 13 sabirničkom testnom sustavu.





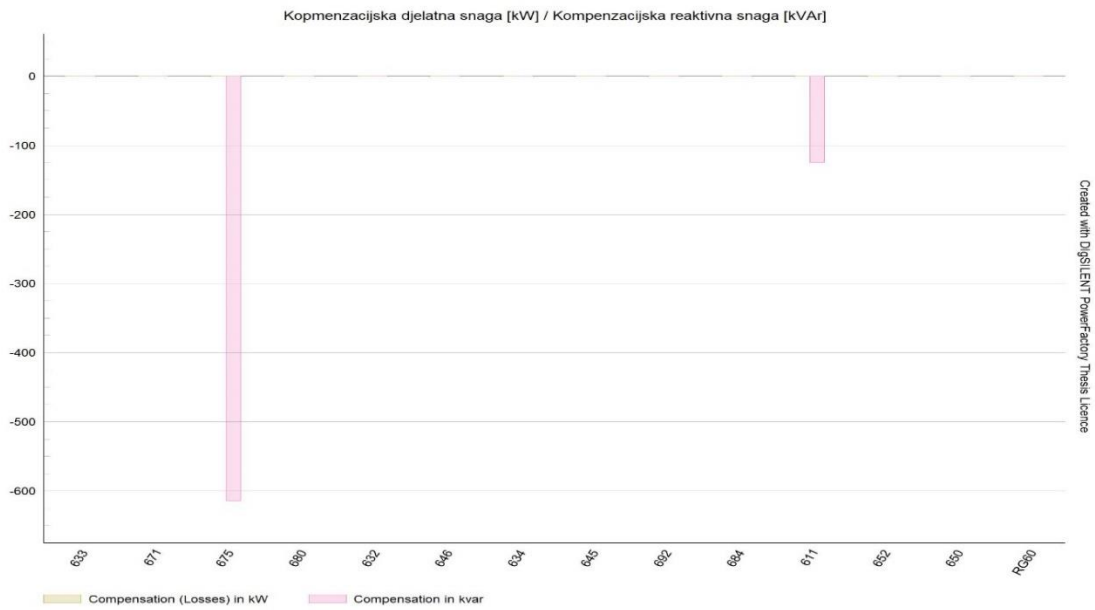
*Slika 6.51 Prikaz djelatne i reaktivne snage mreže koja napaja sabirnice poslije integracije punionica*

Nakon integracije punionica došlo je do smanjenja djelatne snage mreže sa -1000 kW na -800 kW, dok se jalova snaga blago smanjila. Na slici 6.51 su prikazan djelatna i jalova snaga mreže poslije priključenja punionica snage 1,8 kW. Punionice u ovom slučaju uzimaju snagu iz mreže.

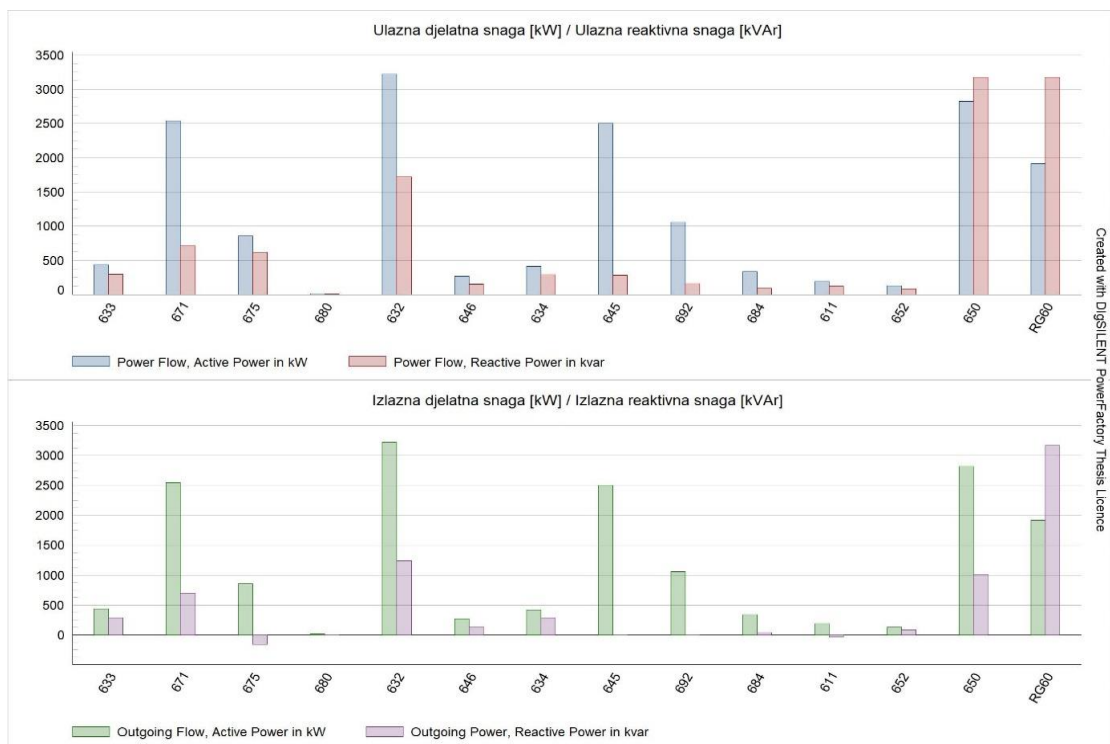


*Slika 6.52 Prikaz gubitaka djelatne i reaktivne snage po sabirnicama poslije integracije punionica*

Na slici 6.52 su prikazani gubitci djelatne i jalove snage na sabirnici 632 koji su identični kao u slučaju integracije OIE. Najveći gubitci su na sabirnici 632 koja je ujedno i čvorište mreže.



**Slika 6.53** Prikaz kompenzacije djelatne i reaktivne snage poslije integracije punionica

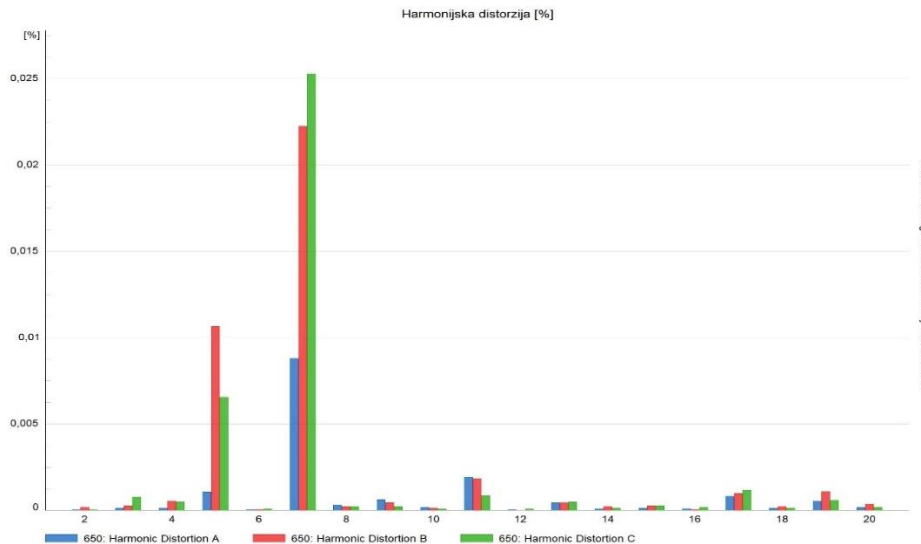


**Slika 6.54** Prikaz ulaznih i izlaznih snaga na sabirnicama sustava poslije integracije punionica

Punionice snage 1,8 kW predstavljaju kućni način punjenja električnog automobila, te njihovom integracijom kompenzacijska jalova snaga, kao što je prikazano na slici 6.53, je ostala ista kao i ulazne i izlazne snage na sabirnicama u sustavu, kao što je prikazano na slici 6.54. Pri kućnom punjenju punionice vuku snagu iz mreže.

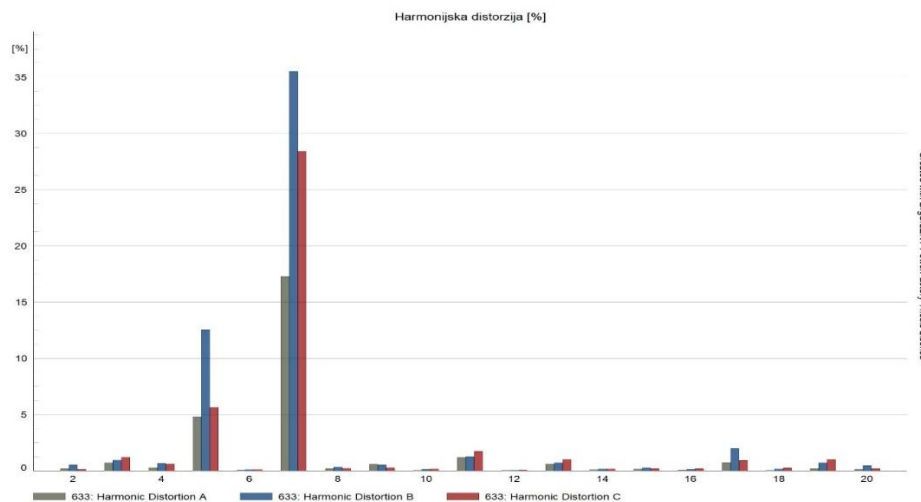
## Harmonijska analiza

U nastavku rada je prikazana harmonijska distorzija kojom se prikazuje kojeg reda harmonik ima najviše udjela po svakoj fazi sabirnice. Simulacija se izvodi pri integraciji punionica za električna vozila snage 1,8 kW. Punionice injektiraju više harmonike u mrežu i manifestiraju se kao nelinearna trošila.



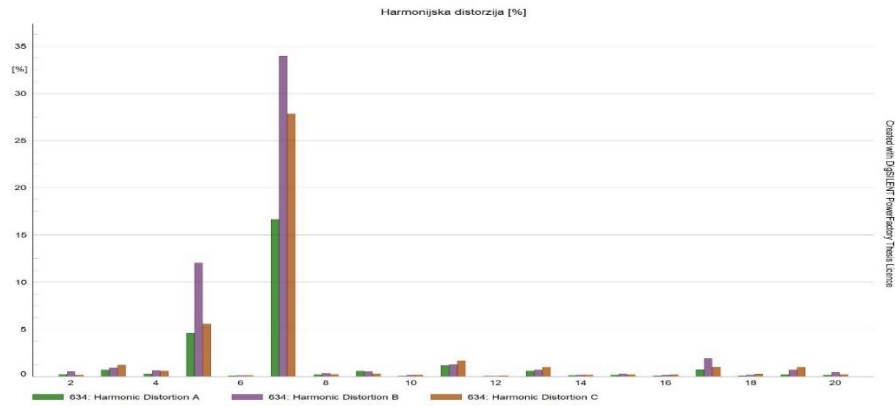
*Slika 6.55 Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 650 nakon priključenja punionica*

U oba slučaja dominantan harmonik je sedmi, dok se integracijom punionica njegov udjel povećao preko 0,025% na sabirnici 650 faze C, kao što je prikazano na slici 6.55. Sedmi harmonik se nalazi unutar granica norme IEC 50160 od 5 %.

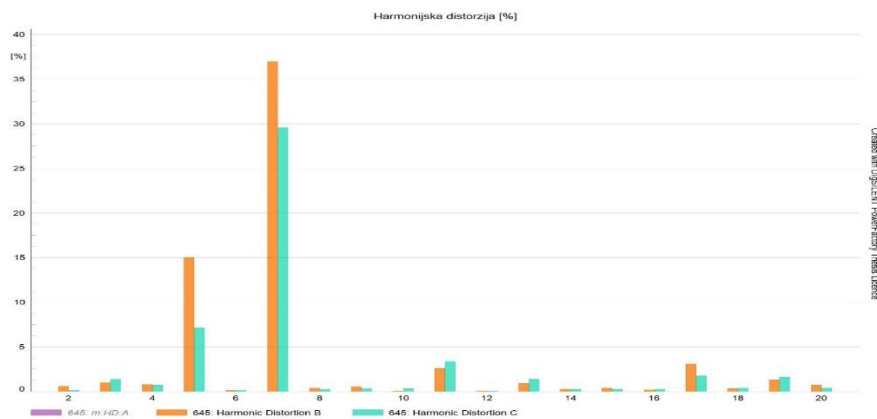


*Slika 6.56 Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 633 nakon priključenja punionica*

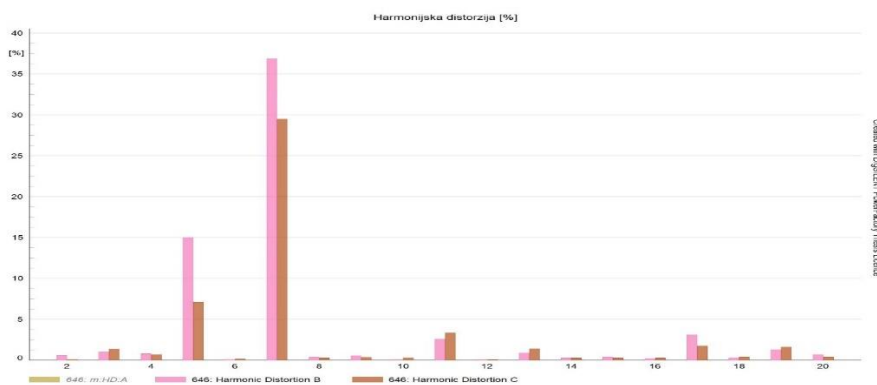
Na slici 6.56 je prikazana harmonijska distorzija napona na sabirnici 633, gdje je dominantan sedmi harmonik, a njegov udjel iznosi 35% na sabirnici 633 faze B, a to se ne nalazi u granicama norme IEC 50160 OD 5 %.



Slika 6.57 Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 634 nakon priključenja punionica

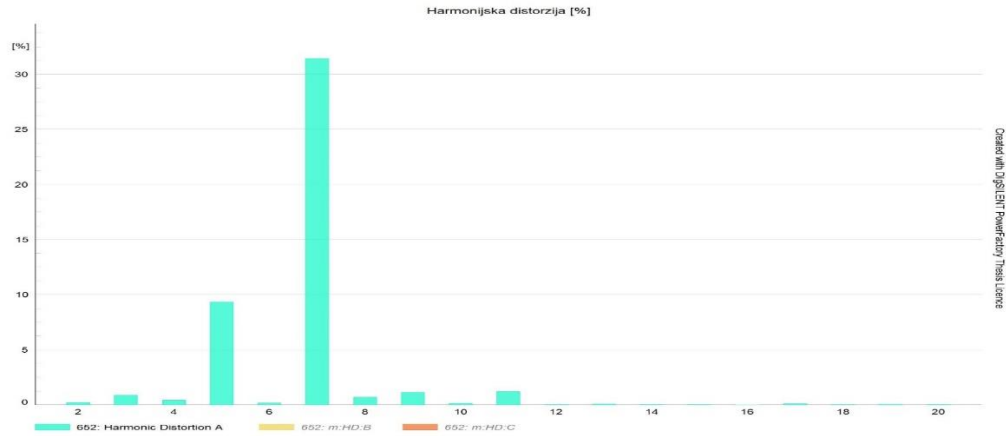


Slika 6.58 Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 645 nakon priključenja punionice

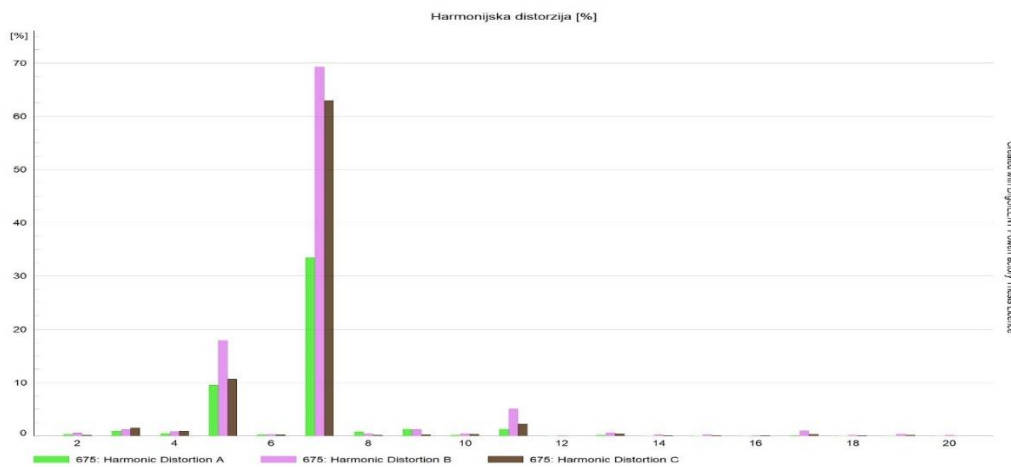


Slika 6.59 Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 646 nakon priključenja punionica

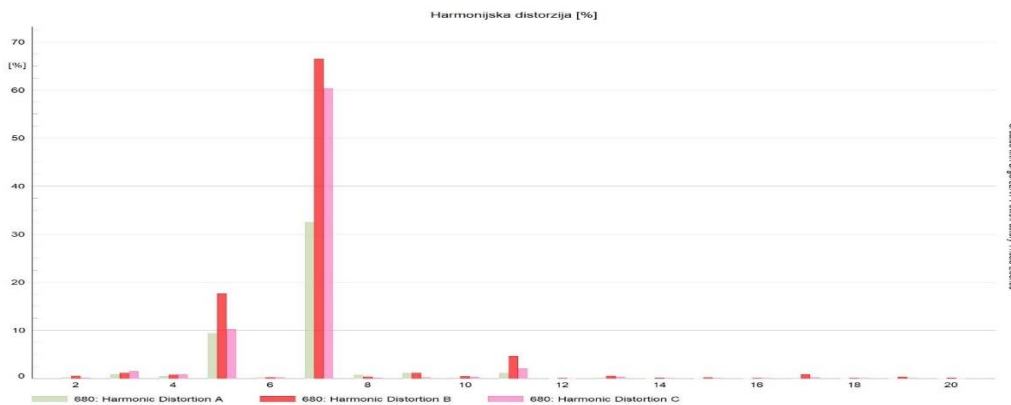
Na slikama 6.57, 6.58 i 6.59 su prikazane harmonijske distorzije napona na sabirnicama 634, 645 i 646, gdje je vidljivo da je dominantan sedmi harmonik. Udjel sedmog harmonika iznosi preko 37% na sabirnici 646 faze B, 34% na sabirnici 634 faze B i preko 35% na sabirnici 645 faze B. Niti jedan harmonik nije u granicama koje su propisane normom IEC 50160 od 5 %. Pored sedmog harmonika ističe se peti harmonik koji također nije u granicama od 6 %.



**Slika 6.60** Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 652 nakon priključenja punionica

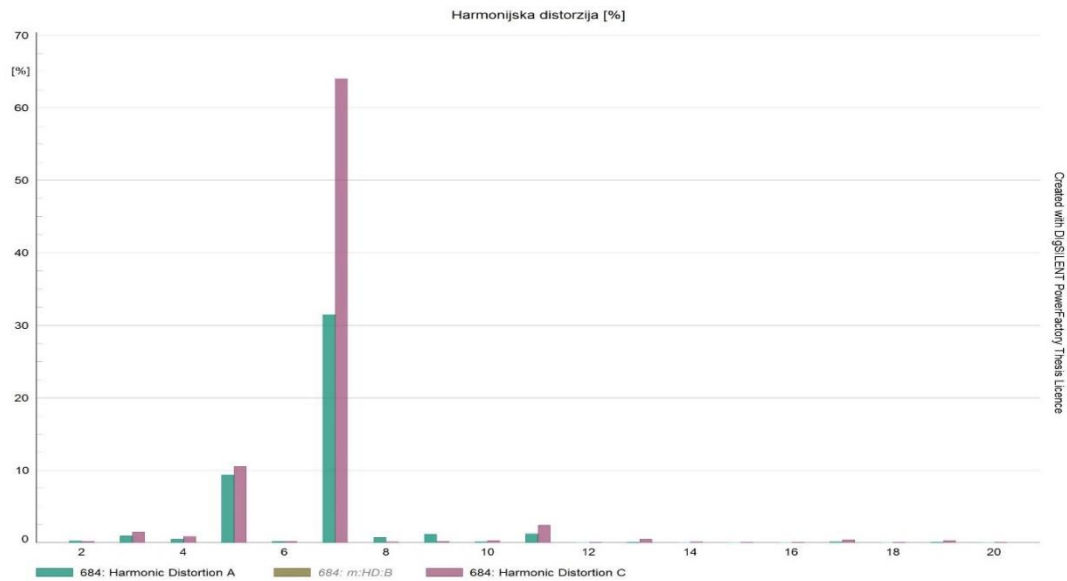


**Slika 6.61** Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 675 nakon priključenja punionica

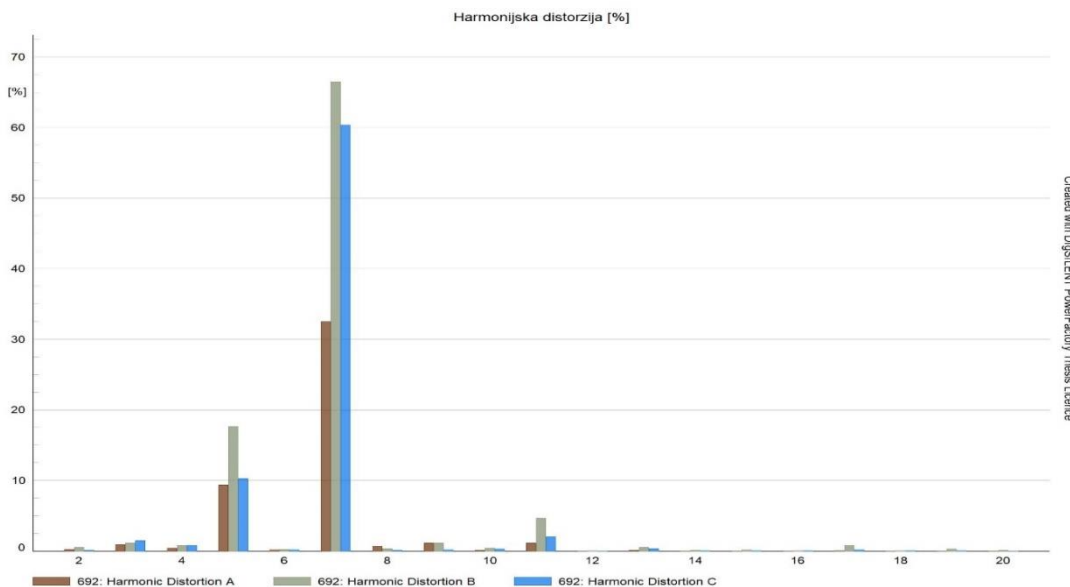


**Slika 6.62** Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 680 nakon priključenja punionica

Kao i u prethodnim slučajevima na slikama 6.60, 6.61 i 6.62 je prikazana dominacija udjela sedmog harmonika, a njegov udjel iznosi 35 % na sabirnici 652 koja je jednofazna, 69 % na sabirnici 675 faze B i 66 % na sabirnici 680 faze B. Također niti jedan sedmi harmonik spomenutih sabirnica nije u skladu sa normom IEC 50160 od 5 %.



**Slika 6.63** Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 684 nakon priključenja punionica



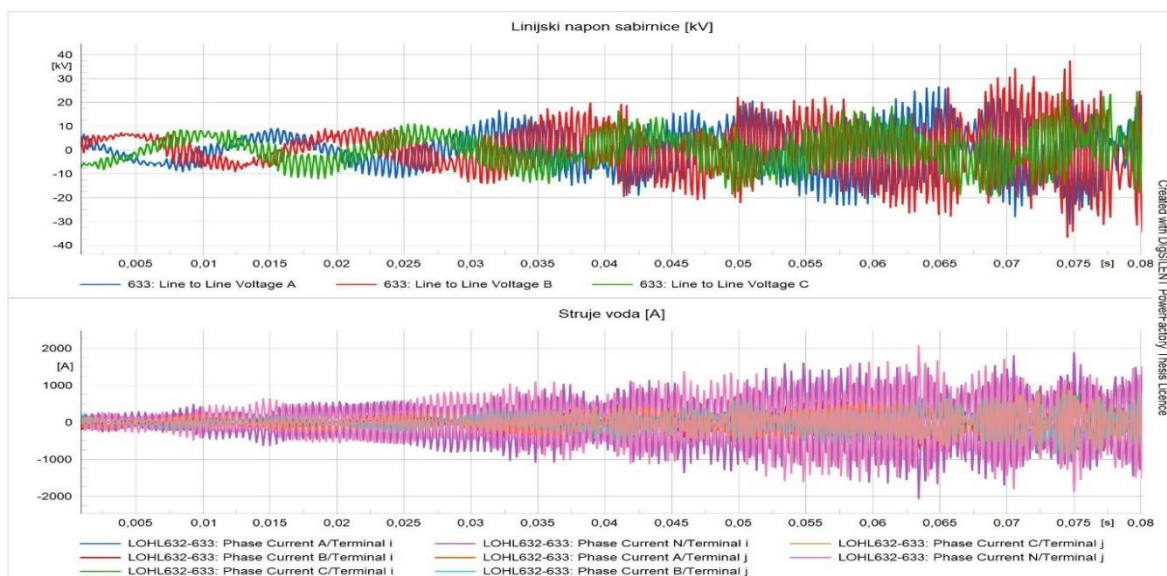
**Slika 6.64** Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 692 nakon priključenja punionica

Priključenje punionica je izazvalo porast udjela neparnih harmonika na sabirnicama 684 i 692 kao što je prikazano na slikama 6.63 i 6.64. Dominantan je sedmi harmonik, a njegov udjel iznosi 65 % na sabirnici 684 faze C i 67% na sabirnici 692 faze B. Pored sedmog ističe se peti harmonik koji također nije u granicama norme IEC 50160 OD 6 %.

Na osnovu provedene harmonijske analize može se zaključiti kako su dominantni neparni harmonici, a ističu se sedmi i peti harmonik. Integracija punionica snage 1,8 Kw injektira u mrežu dodatne harmonike što može narušiti izgled valnih oblika napona i struja.

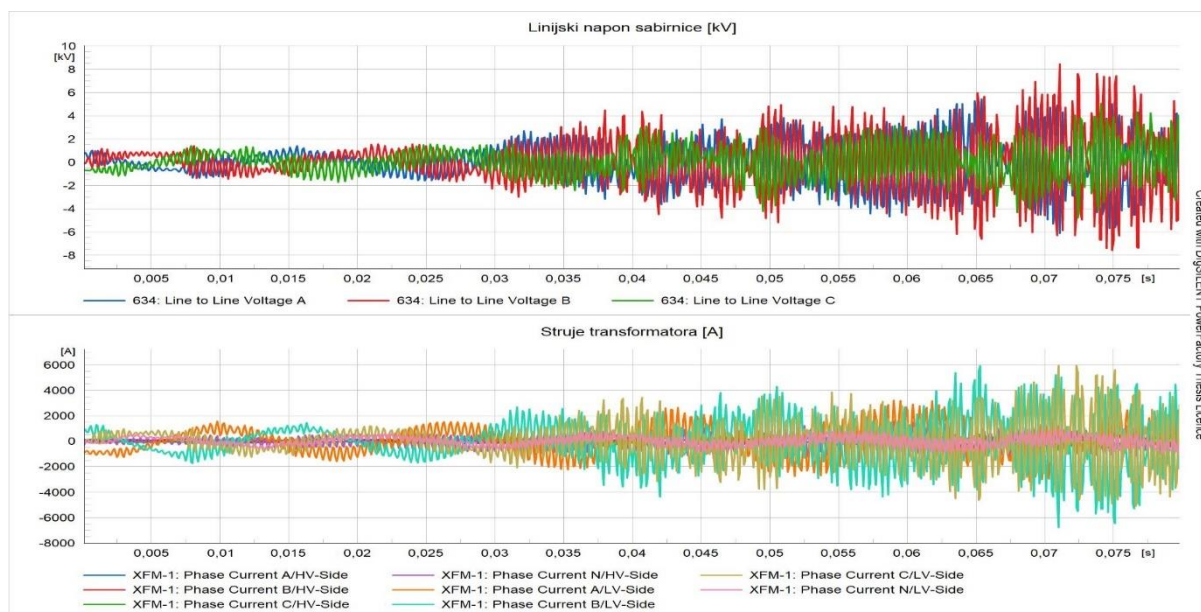
## EMT simulacija

U nastavku rada je prikazana EMT simulacija kako bi se uvidjelo ponašanje valnih oblika napona i struja sabirnica ili vodova pri integraciji punionica snage 1,8 kW.



*Slika 6.65 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 633 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL632-633 poslije integracije punionica*

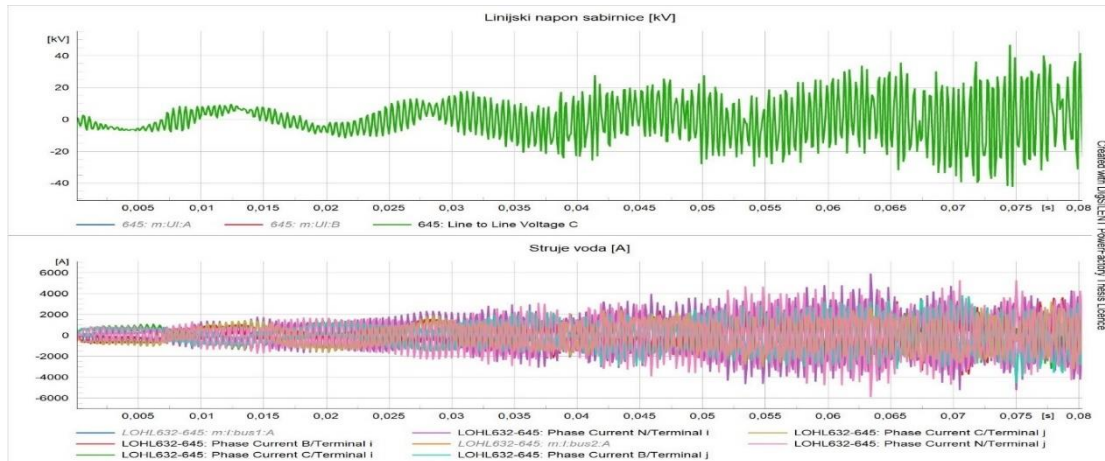
Nakon integracije punionica predviđenih za kućno punjenje došlo je do izobličenja valnih oblika linijskog napona sabirnice 633 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL632-633 kada se u sustav integriraju punionice za električna vozila. Na slici 6.65 je prikazano izobličenje, a vidljivo je i titranje valnih oblika napona na sabirnici i struja na ulazu i izlazu voda.



*Slika 6.66 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 634 i struja na ulazu i izlazu transformatora XFM-1 poslije integracije punionica*

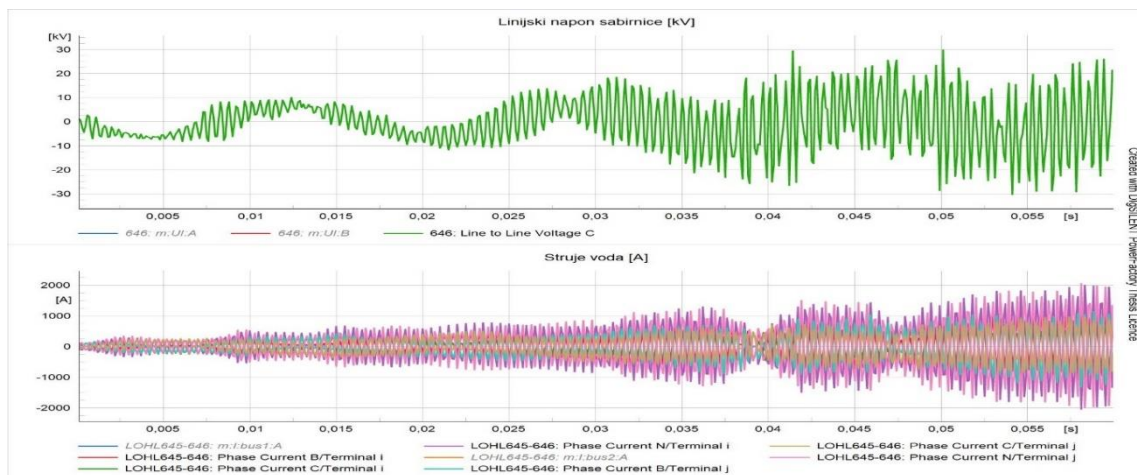


Potpuno izobličenje, uslijed djelovanja viših harmonika valnog, oblika linijskog napona sabirnice 634 i struja na ulazu i izlazu transformatora XFM-1 kada se u sustav integriraju punionice za električna vozila je prikazano na slici 6.66. Uslijed izobličenja dolazi i titranje valnih oblika.



**Slika 6.67** Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 645 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL632-645 poslije integracije punionica

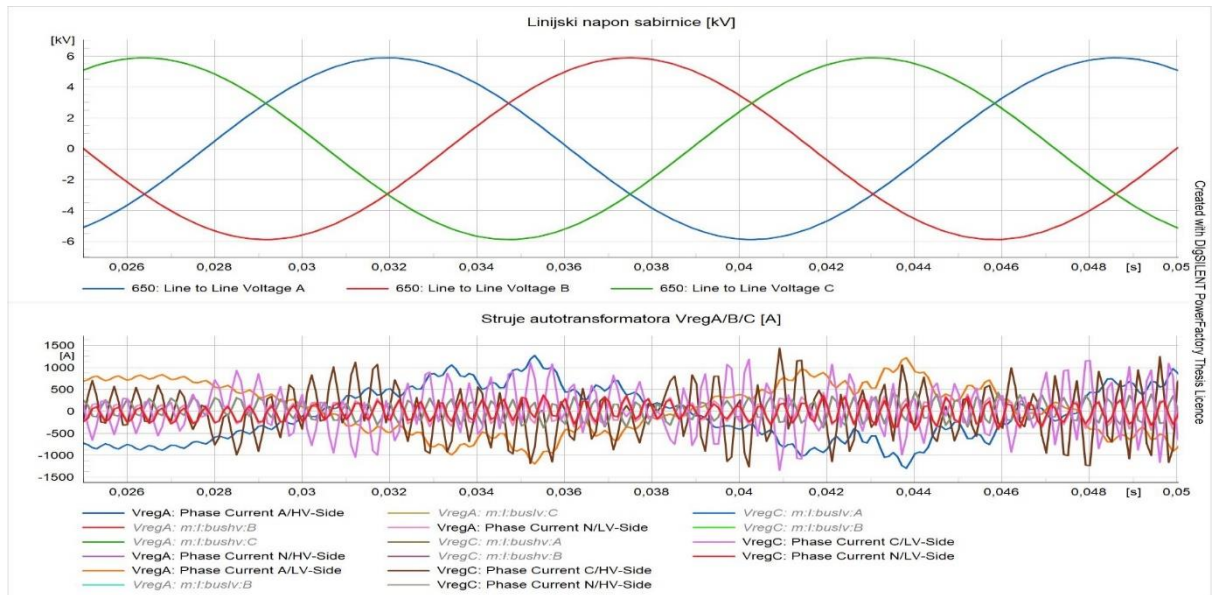
Na slici 6.68 su prikazani valni oblici napona i struja nakon priključenja punionica za kućno punjenje. Viši harmonici prouzrokuju dodatne oscilacije valnih oblika napona i struja. Potpuno izobličenje, uslijed djelovanja viših harmonika valnog, oblika linijskog napona sabirnice 645 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL632-645 kada se u sustav integriraju punionice za električna vozila.



**Slika 6.68** Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 646 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL645-646 poslije integracije punionica

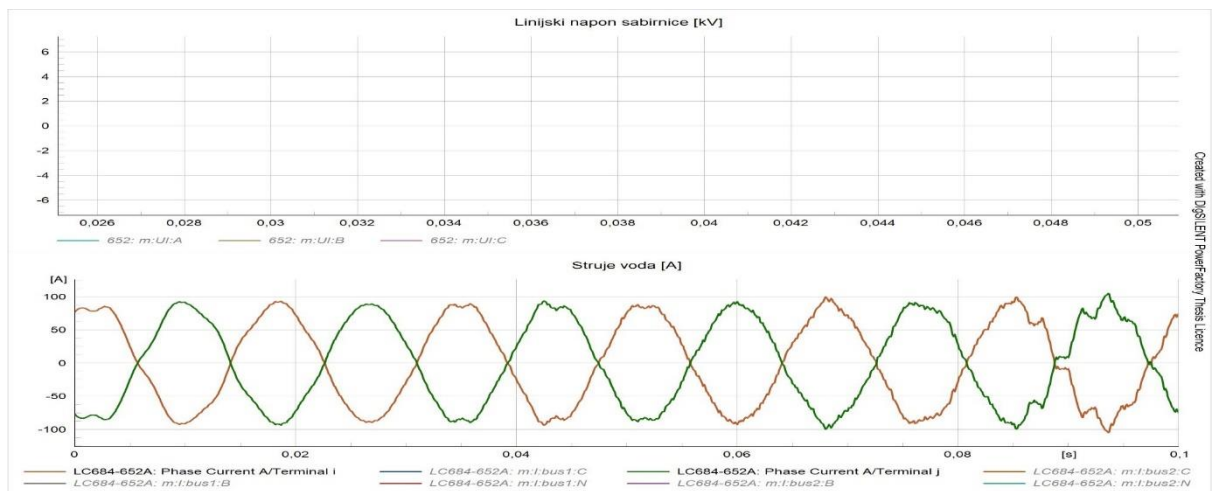
Izobličenje i širenje valnih oblika linijskog napona na sabirnici 646 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL645-646 nakon integracije punionica snage 1,8 kW je prikazano na slici 6.68.





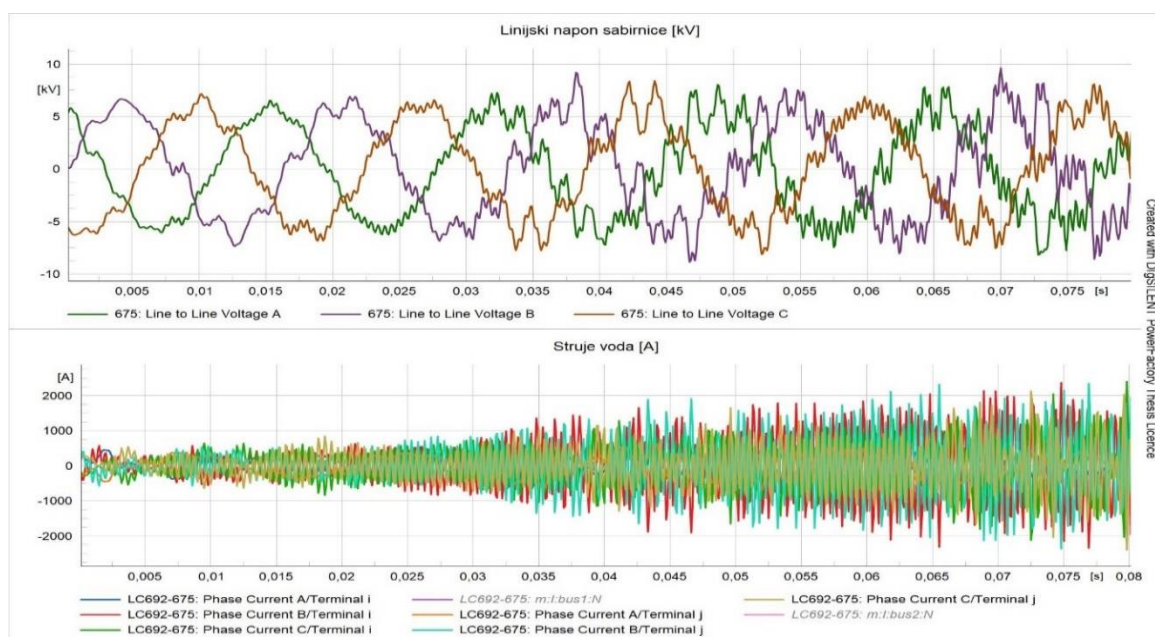
**Slika 6.69** Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 650 i struja na ulazu i izlazu autotransformatora VregA/B/C poslije integracije punionica

Kao što je prikazano na slici 6.69 valni oblik napona na sabirnici 650 je ostao netaknut, dok struje na ulazu i izlazu autotransformatora VregA/B/C podliježu dodatnim višim harmonicima i širenju oscilacija od strane punionica.

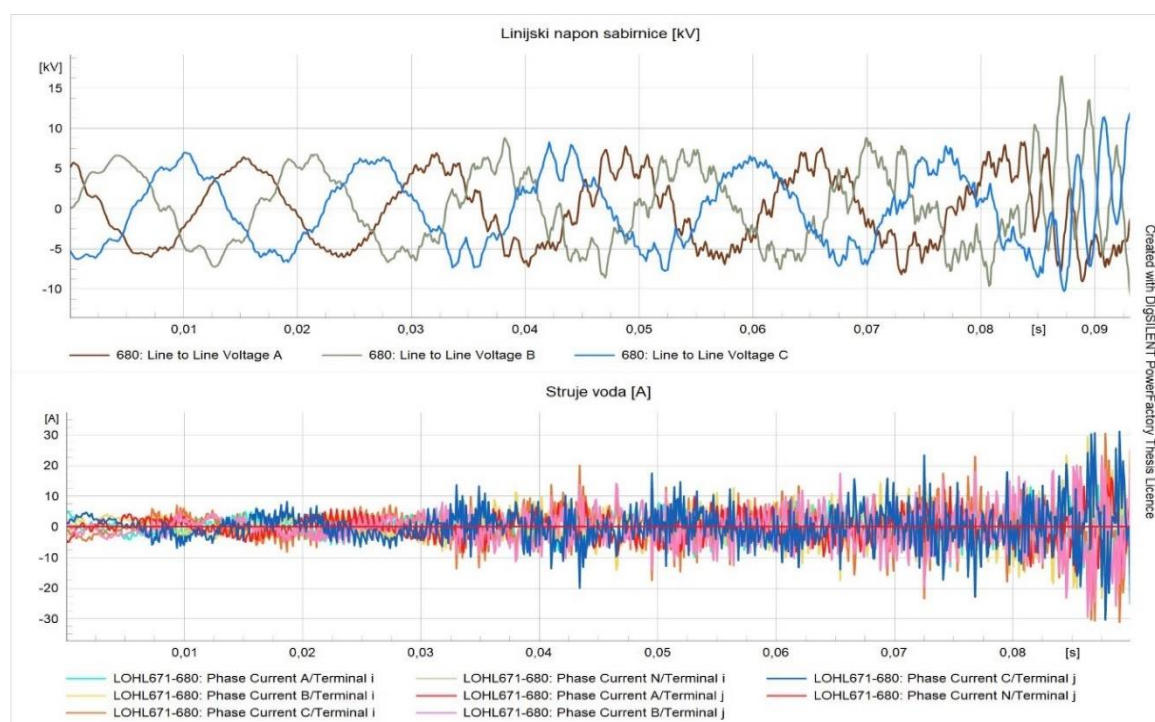


**Slika 6.70** Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 652 i struja na ulazu i izlazu voda LC684-652A poslije integracije punionica

Iznos linijskog napona na sabirnici 652 je nula, a vidljiva je promjena valnih oblika struja na ulazu i izlazu voda LC684-652A kao što je prikazano na slici 6.70 nakon integracije punionica za kućno punjenje električnih automobila.

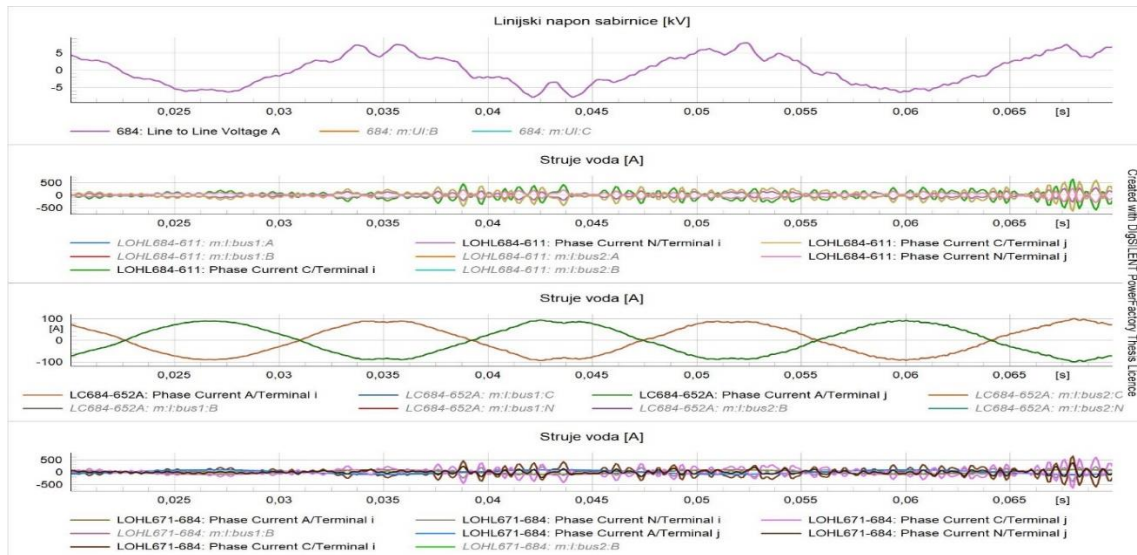


*Slika 6.71 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 675 i struja na ulazu i izlazu voda LC692-675 poslije integracije punionica*

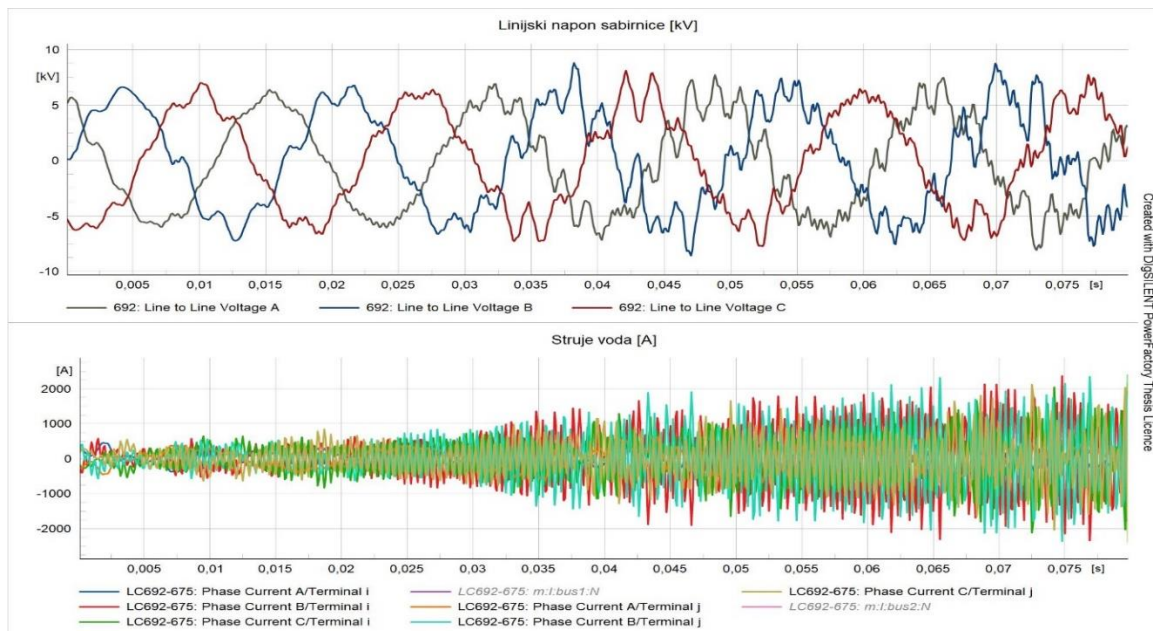


*Slika 6.72 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 680 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL671-680 poslije integracije punionica*

Na slikama 6.71 i 6.72 su prikazani valni oblici linijskih napona na sabirnicama 675 i 680 kao i valni oblici struja na ulazu i izlazu vodova LC692-675 i LOHL671-680 nakon integracije punionica. Oba grafa ukazuju da je došlo do izobličenja valnih oblika i pojave titranja zbog utjecaja viših harmonika od strane punionica i obnovljivih izvora energije.



*Slika 6.73 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 684 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL671-684, LOHL684-611, LC684-652A poslije integracije punionica*



*Slika 6.74 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 692 i struja na ulazu i izlazu voda LC692-675 poslije integracije punionica*

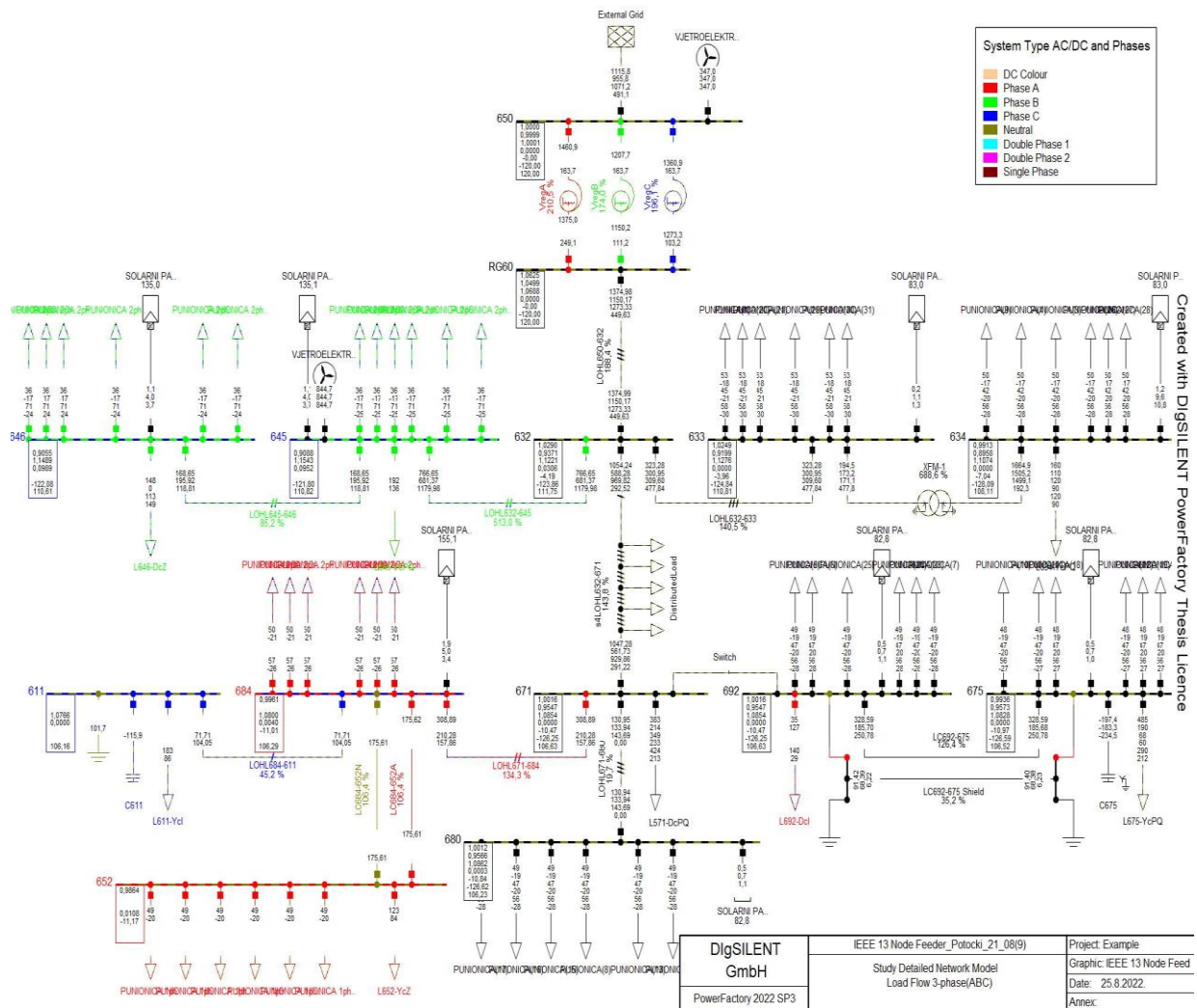
Integracijom punionica se izazvalo izobličenje valnog oblika linijskog napona sabirnice 684 i valnih oblika struja na ulazu i izlazu voda LC684-652A. Nastupilo je i titranje valnog oblika napona, dok vodovi LOHL671-684 i LOHL684-611 podliježu utjecaju viših harmonika. Izobličenje i širenje valnih oblika linijskog napona na sabirnici 692 i struja na ulazu i izlazu voda LC692-675. Sve navedeno je prikazano na slikama 6.73 i 6.74.



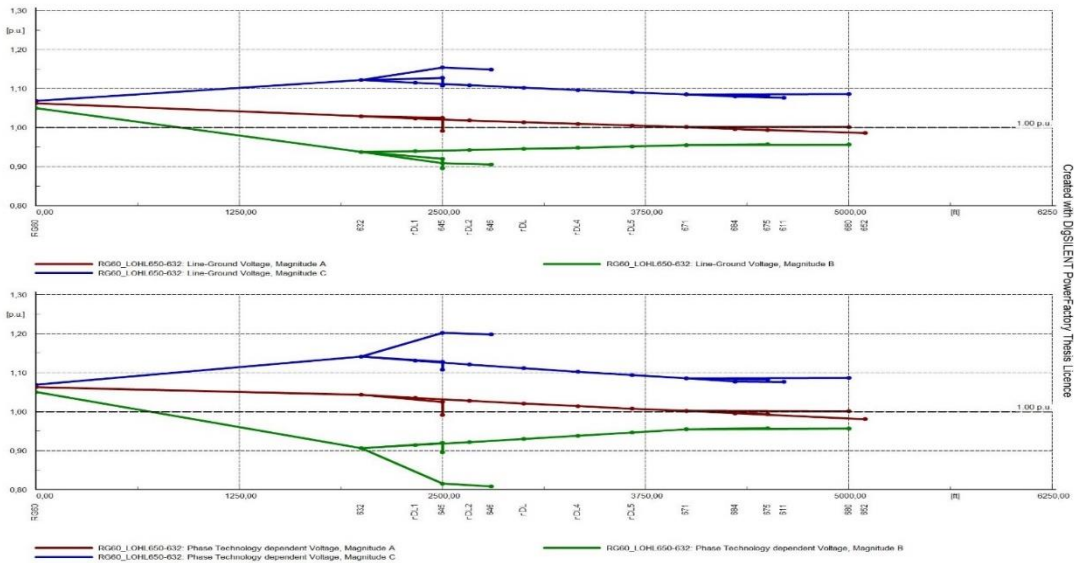
### 6.4 Integracija električnih punionica za električna vozila snage 50 kW u IEEE 13 sabirničkom testnom sistemu

U ovom dijelu analize je provedena integracija javnih punionica snage 50 kW , na način da je na svaku sabirnicu priključi po šest ovakvih punionica kao što je napisano u tablici 6.1. Cilj je utvrditi ponašanje snaga, napona i struja u sustavu u slučaju javnog punjenja električnog vozila. Kao i u prethodnom slučaju biti će odrađene tri načina simulacije. Na osnovu stupčastih grafikona i valnih oblika napona i struja predstaviti će se utjecaj javnih punionica za punjenje električnih automobila na mrežu.

#### Tokovi snaga simulacija

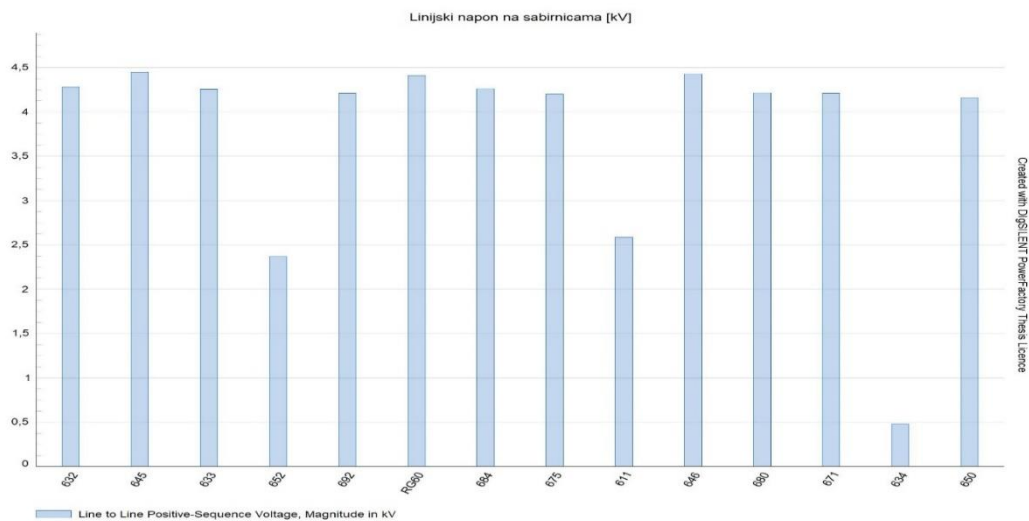


Slika 6.75 Prikaz sheme sustava nakon provedenog toka snage simulacije



*Slika 6.76 Prikaz naponskih profila poslije integracije punionica*

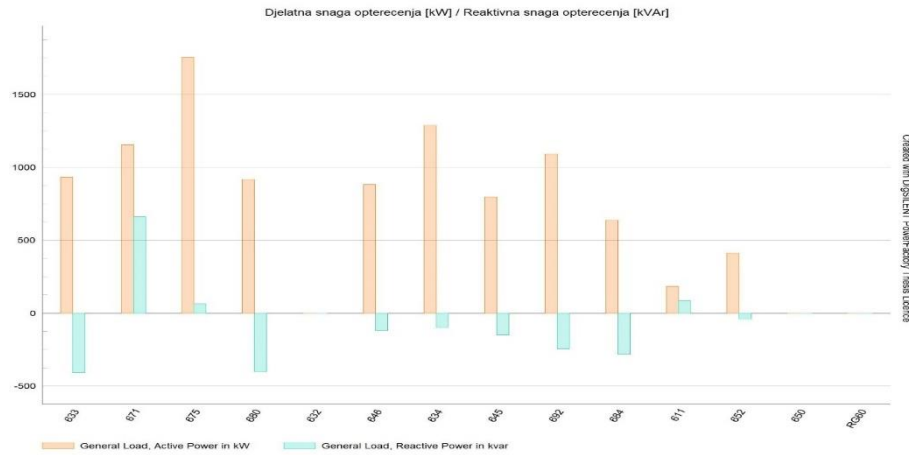
Na slici 6.76 su prikazani naponski profili sabirnica nakon što su se proveli tokovi snaga u mreži poslije priključenja punionica snage 50 kW. Najveći fazni napon iznosi 1,154 p.u. na sabirnici 645 faze C, a najmanji napon na istoj sabirnici iznosa 0,91 p.u. faze B.



*Slika 6.77 Stupčasti grafikon linijskih napona sabirnica poslije integracije punionica*

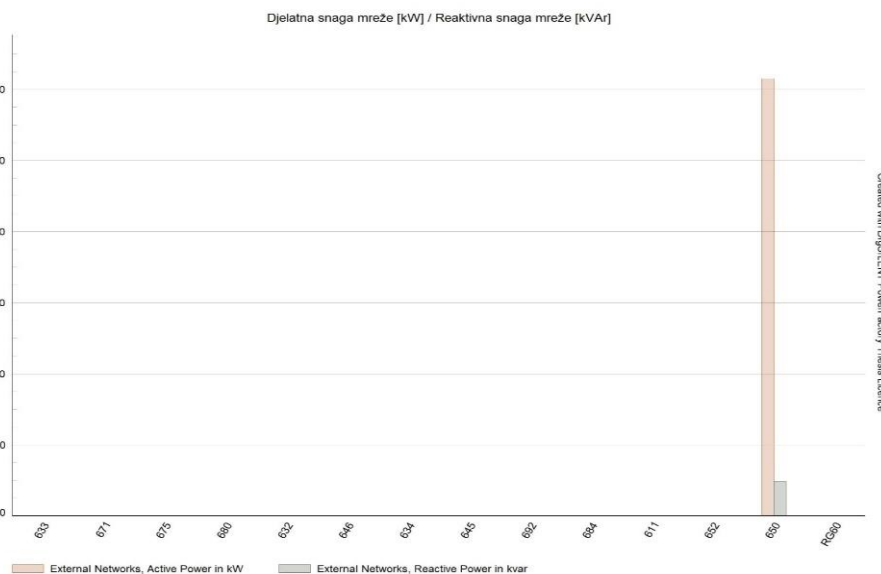
Iz stupčastih grafikona, što je vidljivo na slici 6.77, je dolazi do blagog smanjenje napona na sabirnicama 684 i 611. Na sabirnicu 611 nije spojeno nikakvo opterećenje u vidu OIE ili punionice, a inače je jednofazna sabirnica. Cilj je održati iznose napona unutar granica od -10% i 10 %. Male promjene napona ukazuju na to da je mreža kruta i da ima stabilan napon i frekvenciju.

Proizvedena snaga je i dalje ista iznosa 2500 kW iz razloga što punionice za električna vozila u ovom slučaju uzimaju snagu iz mreže. Snagu u mrežu daju vjetroelektrane priključene na sabirnice 650 i 645.



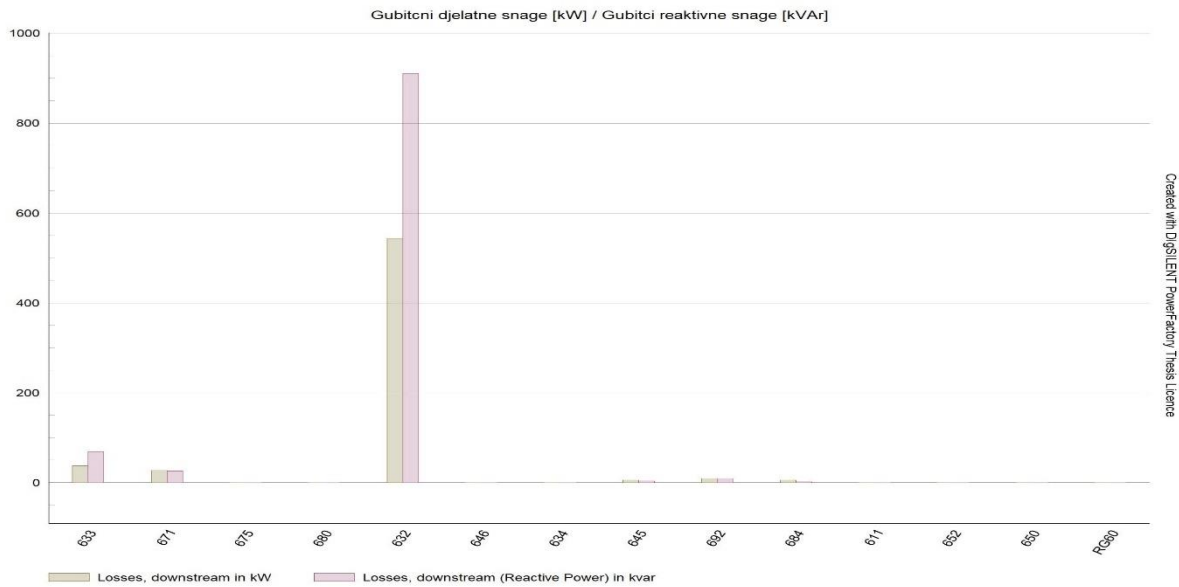
**Slika 6.79** Prikaz djelatne i reaktivne snage opterećenja sabirnica poslije integracije punionica

Nakon spajanja punionica na sabirnice kao što je naznačeno u tablici 6.1, vidljiv je porast djelatne snage opterećenja na sabirnicama 633, 675, 680, 646, 634, 645, 692, 684, 652 kao što je vidljivo na slici 6.79. Isto vrijedi i za povećanje kapacitivne jalove snage na istim spomenutim sabirnicama. Kapacitivna jalova snaga se povećala iz razloga što su punionice kapacitivnog karaktera, pritom je spojeno šest punionica na svaku spomenutu sabirnicu. Svih šest punionica priključenih na sabirnicu čine teret iznosa oko 300 kW.



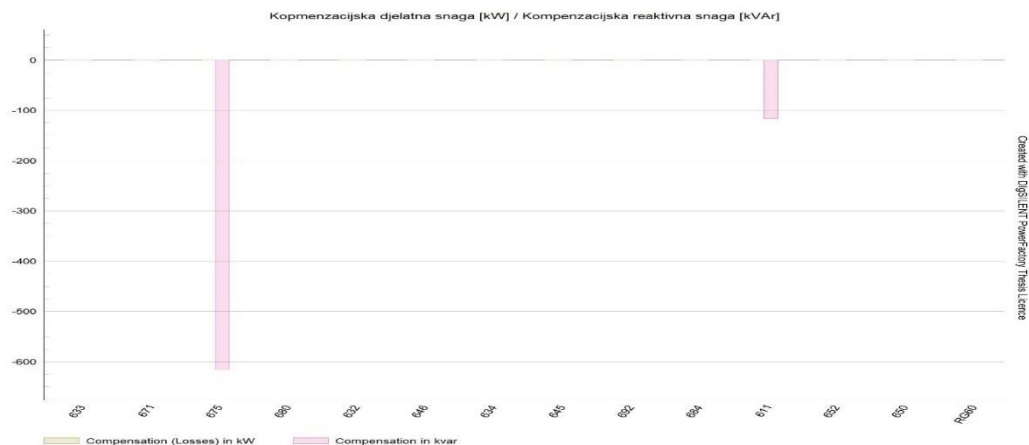
**Slika 6.80** Prikaz djelatne i reaktivne snage mreže koja napaja sabirnice poslije integracije punionica

Integracija punionica je povećala radnu snagu na sabirnici 650, a smanjila reaktivnu snagu. Na slici 6.80 je prikazana radna snaga iznosa preko 6000 kW i jalova iznosa oko 500 kVAR. Spajanjem punionica na mrežu može se kompenzirati jalova snaga, to je postignuto na sabirnici 650 na mjestu gdje su spojeni mreža i vjetroelektrana.

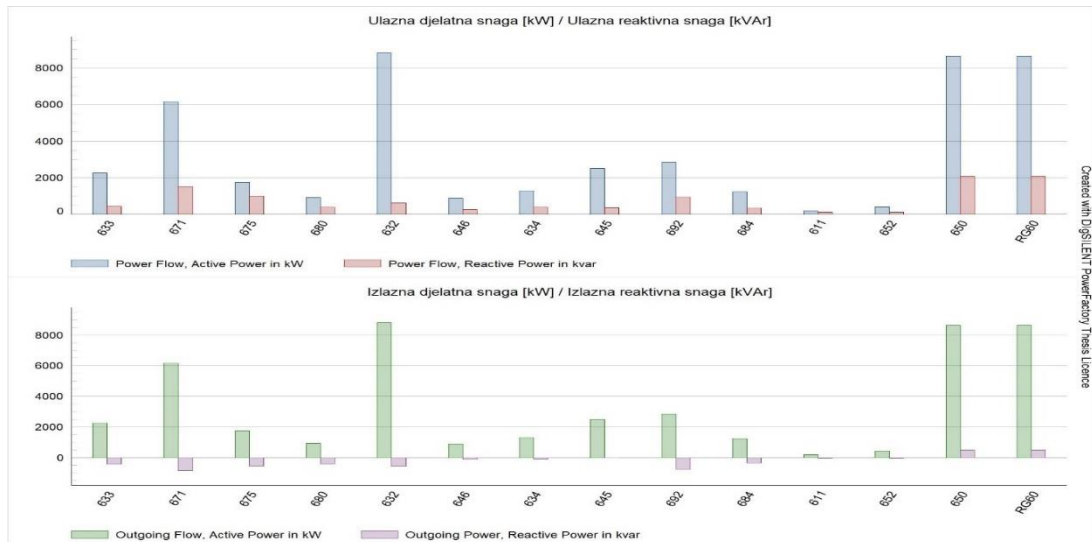


**Slika 6.81** Prikaz gubitaka djelatne i reaktivne snage po sabirnicama poslije integracije punionica

Na slici 6.81 je prikazano povećanje djelatnih i jalovih gubitaka na sabirnicama u sustavu poslije integracije punionica za javno punjenje električnih vozila. Vidljivo je povećanje gubitaka na sabirnici 633, 671 i 632. Sabirnica 632 je čvorište mreže na koju nije spojen niti jedan OIE ili punionica. Iznosi kompenzacijske djelatne i jalove snage su ostali nepromijenjeni kao što je vidljivo na slici 6.82.



**Slika 6.82** Prikaz kompenzacije djelatne i reaktivne snage poslije integracije punionica

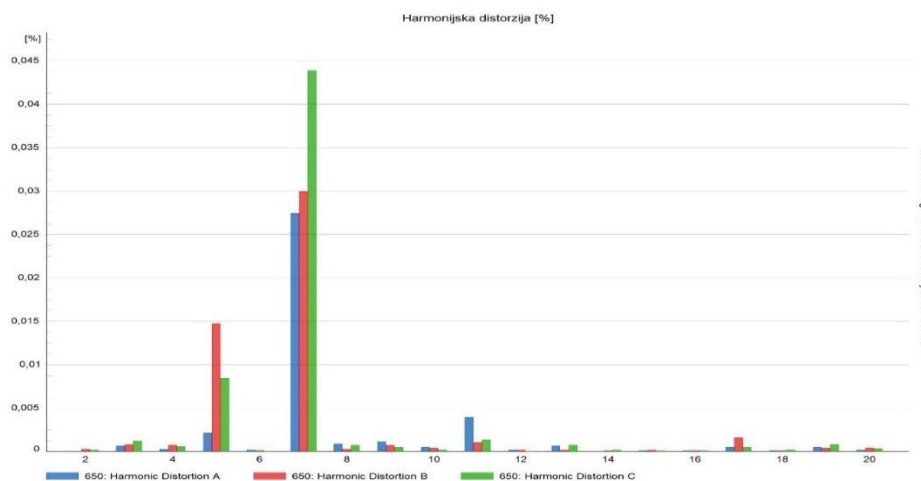


**Slika 6.83** Prikaz ulaznih i izlaznih snaga na sabirnicama sustava poslije integracije punionica

Priključenje punionica za javno punjenje je rezultiralo povećanje ulaznih i izlaznih djelatnih snaga na sabirnicama u sustavu, dok je došlo do smanjenja jalove snage zbog kompenzacije od strane punionica iz razloga što su kapacitivnog karaktera. Takva promjena vidljiva je na slici 6.83. Za razliku od kućnog punjenja, javne punionice mogu smanjiti jalovu snagu u mreži kao rezultat kapacitivnog karaktera. Pored toga što uzimaju snagu iz mreže, mogu je i dati.

### Harmonijska analiza

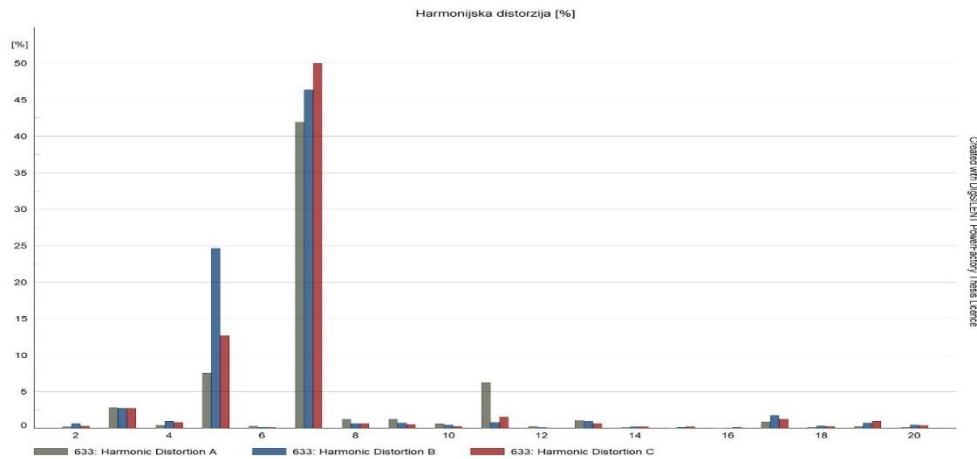
U nastavku rada se prikazuje harmonijska distorzija kojom se prikazuje kojeg reda harmonika ima navise udjela po svakoj fazi sabirnice. Simulacija se izvodi pri integraciji punionica za električna vozila snage 50 kW, dok punionice injektiraju više harmonike u mrežu i manifestiraju se kao nelinearna trošila.



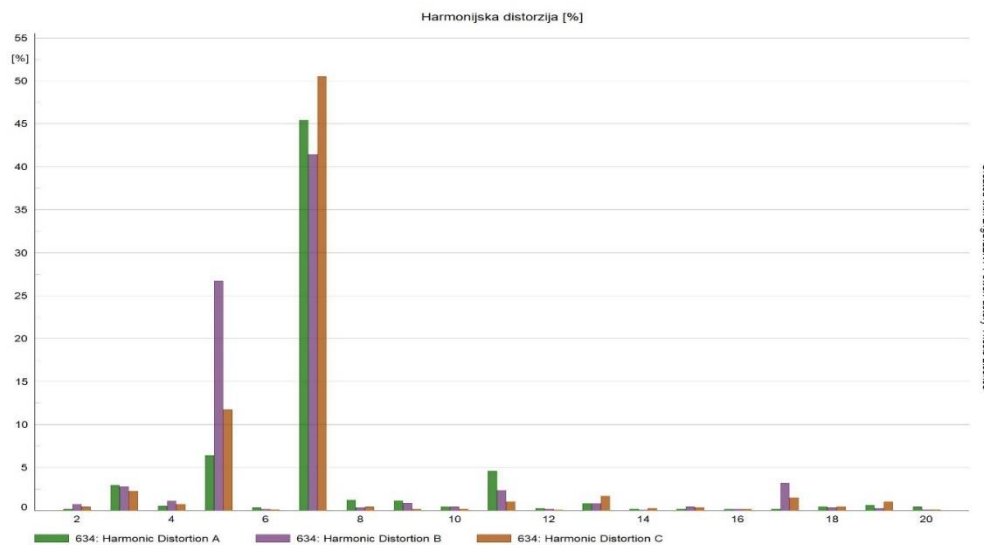
**Slika 6.84** Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 650 nakon priključenja punionica



Kao i u prethodnim slučajevima na slici 6.84 je prikazana harmonijska distorzija napona na sabirnici 650, gdje je dominantan sedmi harmonik, a njegov udjel na sabirnici 650 iznosi 0,043 % faze C. Iznos udjela je u granicama od 5 % kako je propisano normom IEC 50160, dok su dominantni harmonici neparni.

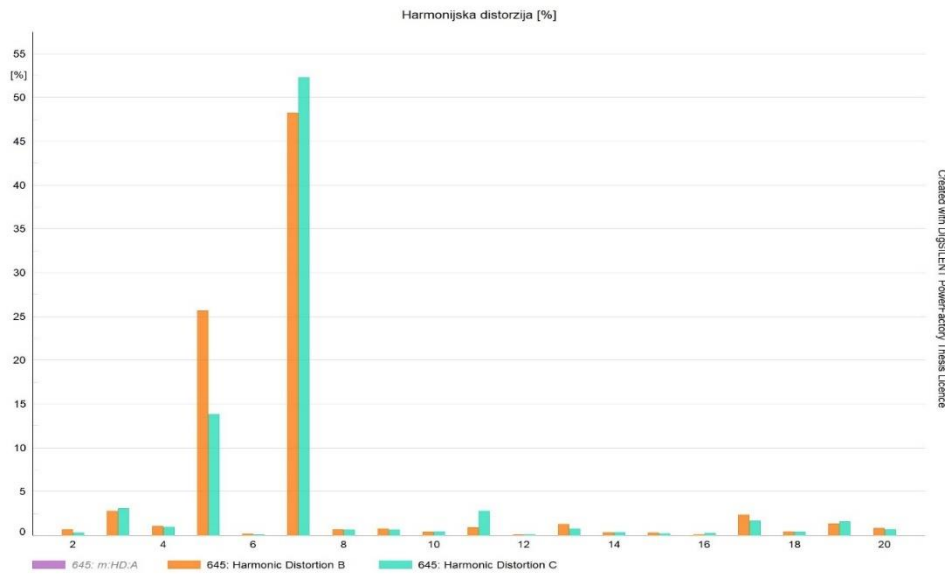


**Slika 6.85** Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 633 nakon priključenja punionica

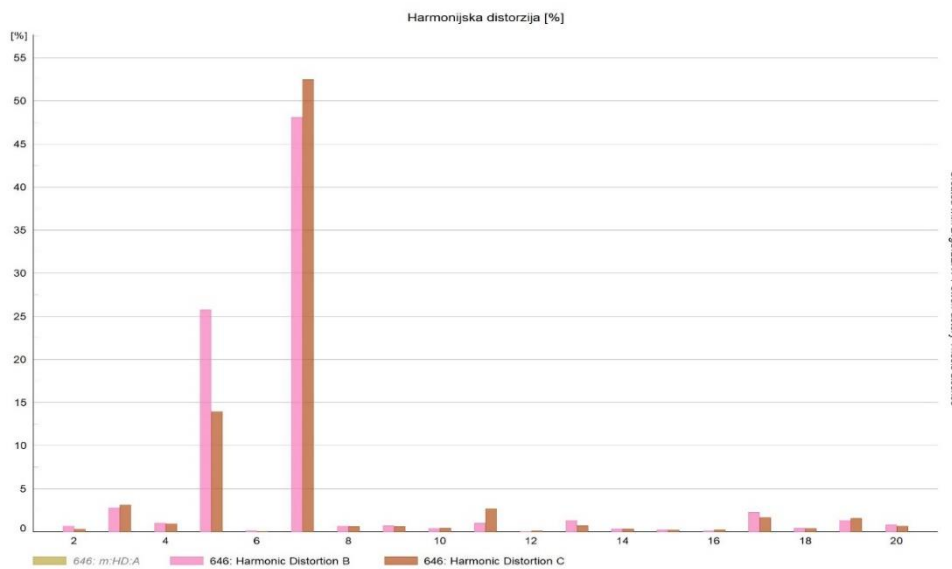


**Slika 6.86** Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 634 nakon priključenja punionica

Na slikama 6.85 i 6.86 je prikazana harmonijska distorzija napona na sabirnicama 633 i 634, gdje je vidljiva dominacija sedmog harmonika. Njegov udjel na sabirnici 633 iznosi 50 % faze C za razliku od prethodnog slučaja gdje je bio dominantan u fazi B. Na grafikonu je vidljiv porast udjela petog harmonika koji iznosi 25% faze B. Porast udjela sedmog harmonika u fazama A i C, gdje za fazu A iznosi 45 % , a za fazu C iznosi preko 50 %. Vidljiv je i porast petog harmonika faze B iznosa preko 25 %. Sedmi i peti harmonik nisu unutra granica norme IEC 50601 iznosa 5 % i 6 %.

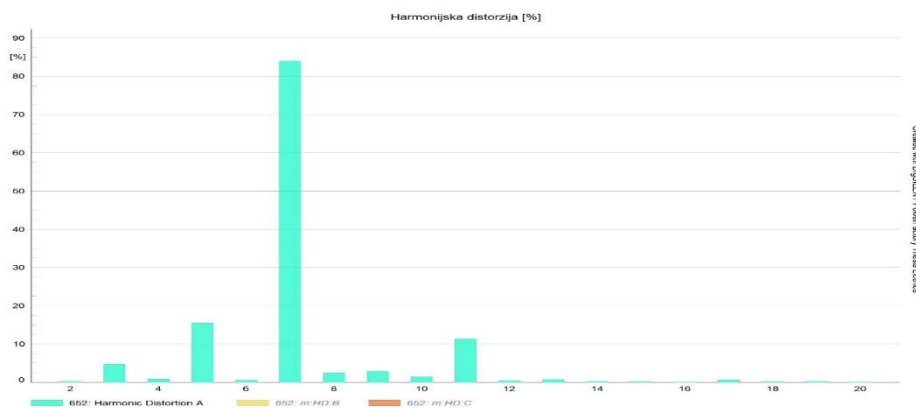


**Slika 6.87** Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 645 nakon priključenja punionica

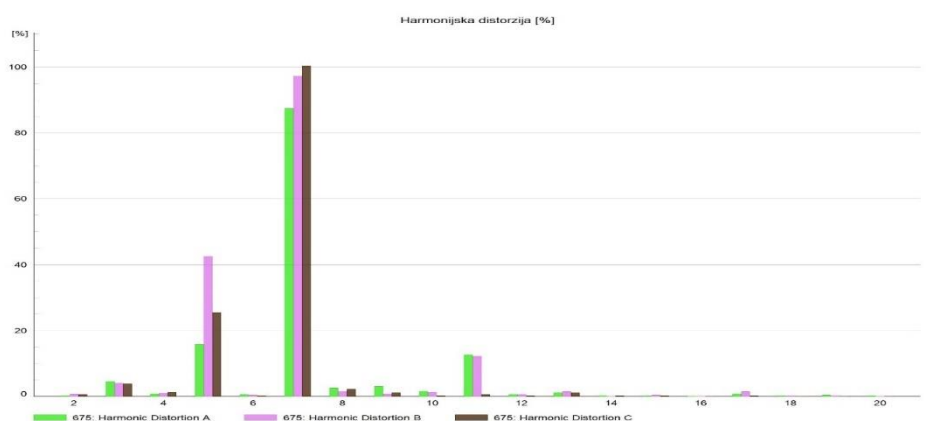


**Slika 6.88** Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 646 nakon priključenja punionica

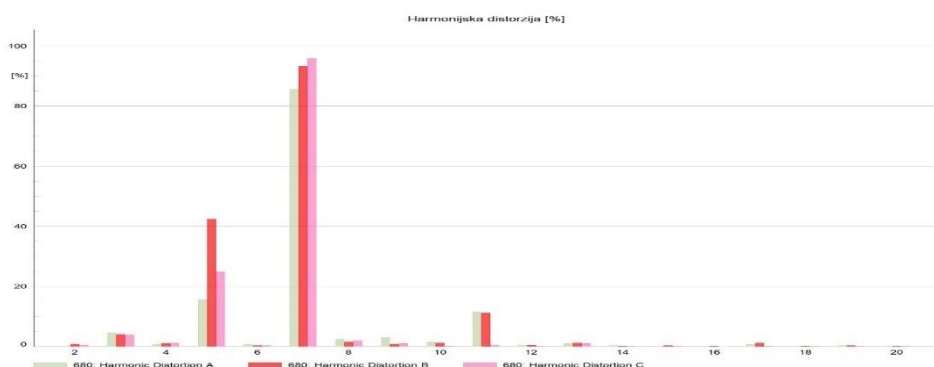
Na sabirnici 645 sa dvije faze je vidljivo povećanje udjela petog i sedmog harmonika. Sedmi harmonik je i dalje dominantan i njegov udjel iznosi 52 % faze C za razliku od prethodnog slučaja gdje je imao najviše udjela u fazi B. Dominantan sedmi harmonik na sabirnici 646, a njegov udjel iznosi 52 % faze C, prethodno je udjel imao u fazi B. Pored navedenog na slikama 6.87 i 6.88 su prikazani porasti udjela petog harmonika preko 25 % što i dalje nije u granicama od 6 % prema normi IEC 50160.



*Slika 6.89* Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 652 nakon priključenja punionica



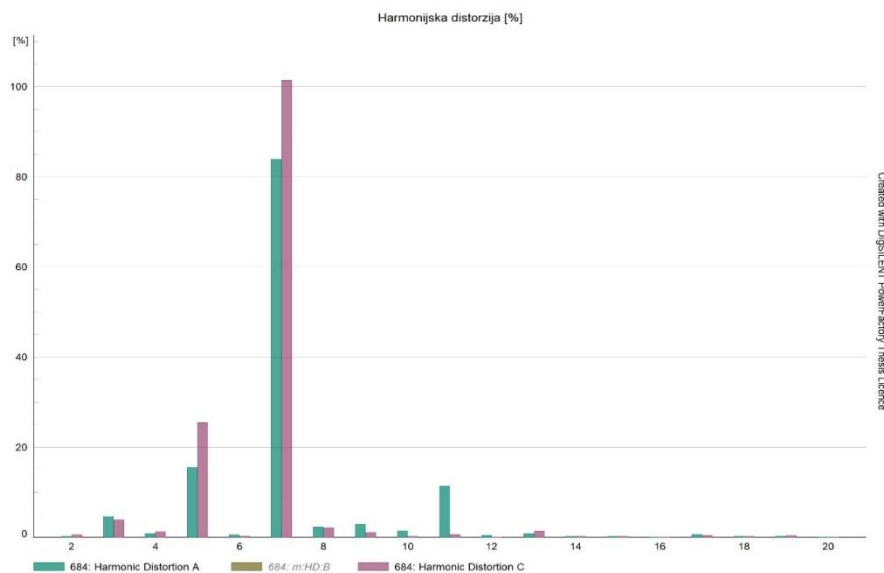
*Slika 6.90* Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 675 nakon priključenja punionica



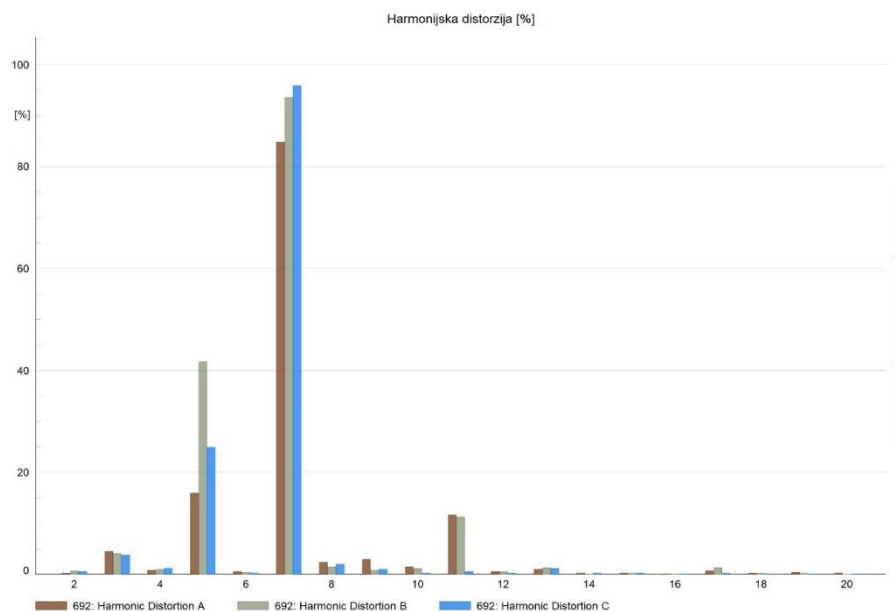
*Slika 6.91* Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 680 nakon priključenja punionica

Integracijom punionica za javno punjenje se povećao udio viših harmonika na sabirnicama 652, 675 i 680 što je vidljivo na slikama 6.89, 6.90 i 6.91. Jednofazna sabirnica 652 ima dominantan sedmi harmonik s udjelom koji iznosi 83 % za razliku od prethodnog slučaja gdje udjel iznosi preko 30 %. Sabirnica 675 ima dominantan sedmi harmonik s udjelom od 100 % faze C ,

za razliku do prethodnog slučaja kada je udjel iznosio 69 % faze B. Sabirnica 680 ima dominantan sedmi harmonik s udjelom od 98 % faze C , za razliku do prethodnog slučaja kada je udjel iznosio 65 % faze B.



*Slika 6.92 Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 684 nakon priključenja punionica*

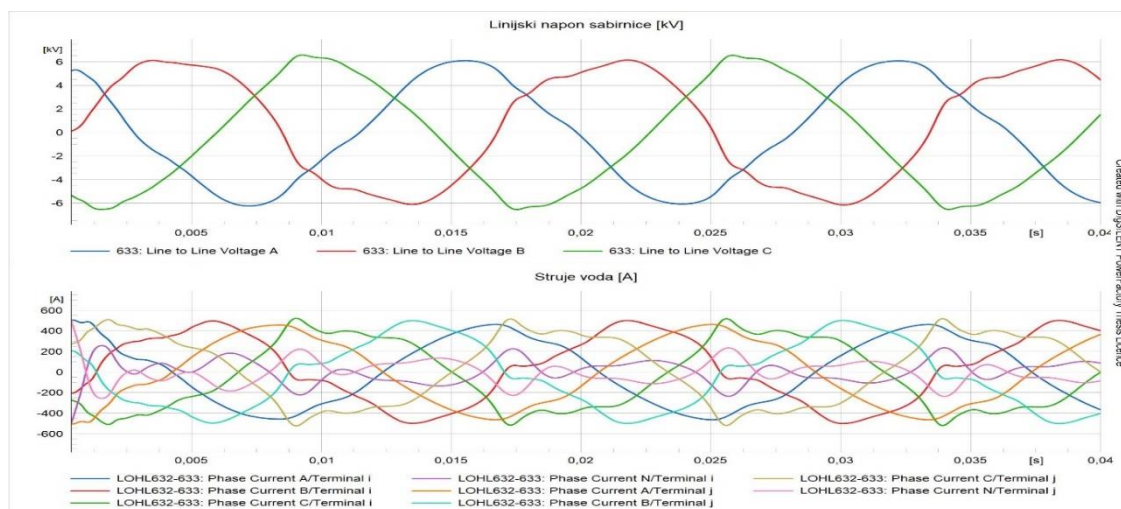


*Slika 6.93 Prikaz udjela viših harmonika po fazama sabirnice 692 nakon priključenja punionica*

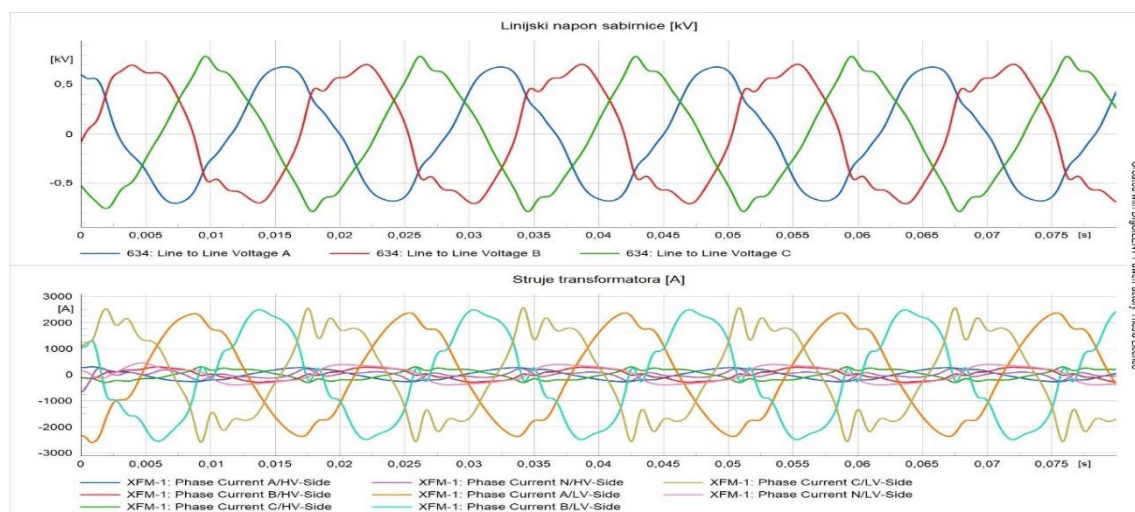
Na slikama 6.92 i 6.93 je prikazan porast udjela sedmog i petog harmonika na sabirnici 684 sa dvije faze. Sedmi harmonik je i dalje dominantan i njegov udjel iznosi preko 100 % faze C. Sabirnica 692 ima dominantan sedmi harmonik s udjelom od 98 % faze C , za razliku do prethodnog slučaja kada je udjel iznosio 65 % faze B.

## EMT simulacija

U nastavku rada se prikazuje EMT simulacija kako bi se uvidjelo ponašanje valnih oblika napona i struja sabirnica ili vodova pri integraciji punionica snage 50 kW.

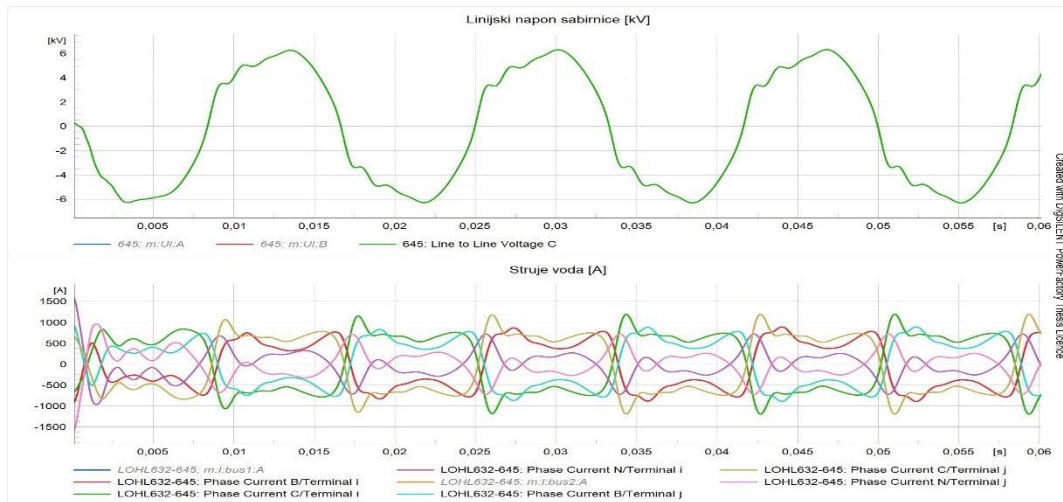


*Slika 6.94 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 633 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL632-633 poslije integracije punionica*

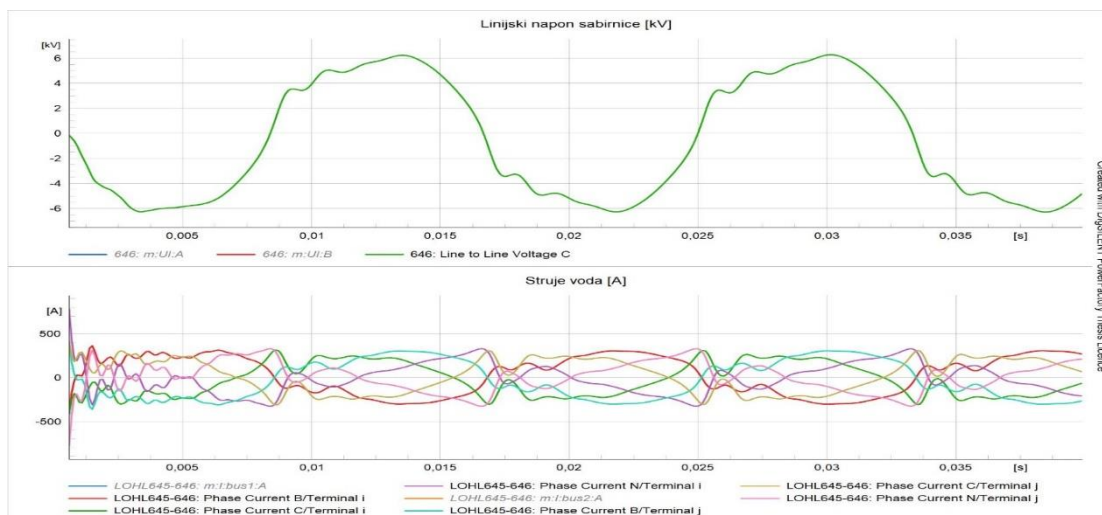


*Slika 6.95 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 634 i struja na ulazu i izlazu transformatora XFM-1 poslije integracije punionica*

Integracijom punionica za javno punjenje se postiglo smanjenje izobličenja valnog oblika linijskog napona sabirnice 633 i struja na izlazu i ulazu voda LOHL632-633. Integracijom punionica za javno punjenje se postiglo smanjenje izobličenja valnog oblika linijskog napona sabirnice 634 i struja na izlazu i ulazu transformatora XFM-1, ali su i dalje prisutna izobličenja zbog nelinearnost i viših harmonika. Valni oblici napona i struja prikazani su na slikama 6.94 i 6.95.



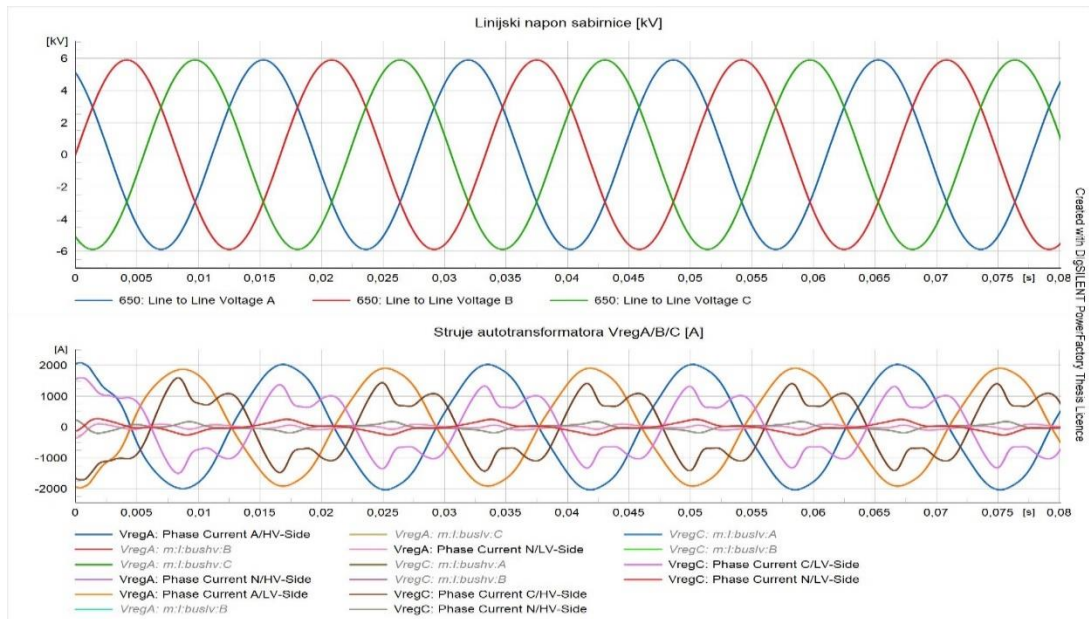
**Slika 6.96** Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 645 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL632-645 poslije integracije punionica



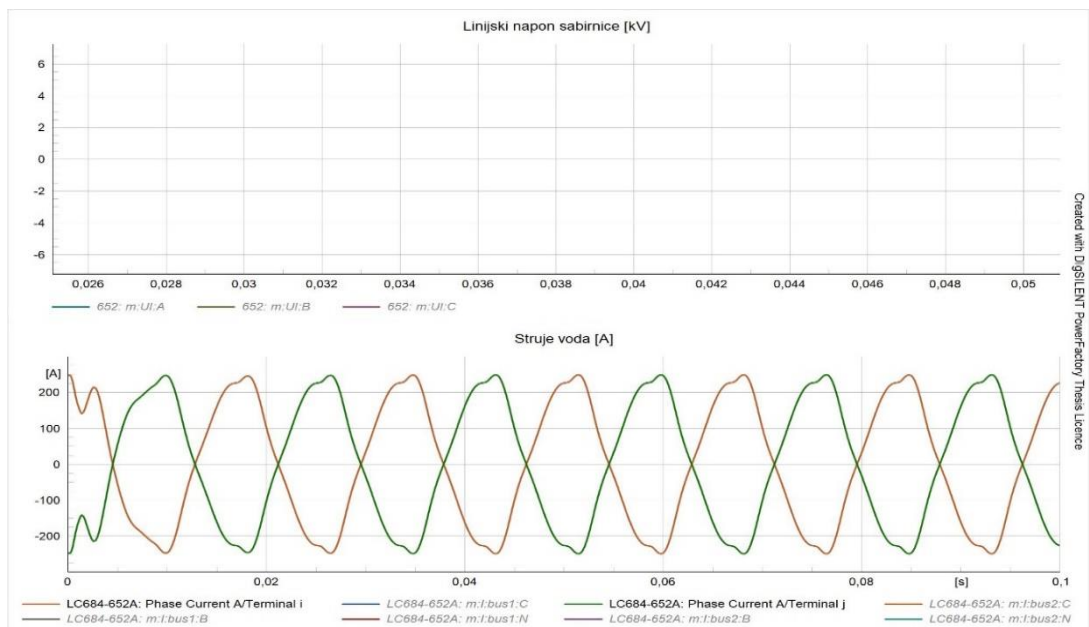
**Slika 6.97** Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 646 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL645-646 poslije integracije punionica

Na slikama 6.96 i 6.97 su prikazani valni oblici linijskih napona na sabirnicama 645 i 646 i struje na ulazu i izlazu vodova LOHL632-645 i LOHL645-646 poslije priključenja punionica za javno punjenje snage 50 kW. Integracijom punionica se postiglo smanjenje izobličenja valnog oblika linijskog napona sabirnice 645 i struja na izlazu i ulazu voda LOHL632-645, ali su i dalje prisutna izobličenja zbog nelinearnost i viših harmonika. Isto vrijedi i za valni oblik linijskog napona sabirnice 646 i struja na izlazu i ulazu voda LOHL645-646. Na osnovu prikazanih valih oblika nema titranja napona.





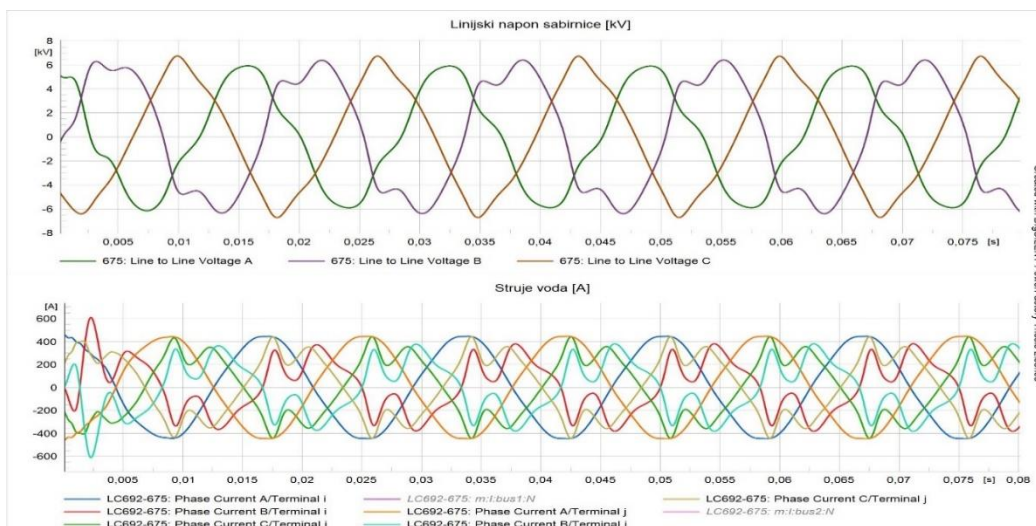
*Slika 6.98 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 650 i struja na ulazu i izlazu autotransformatora VregA/B/C poslije integracije punionica*



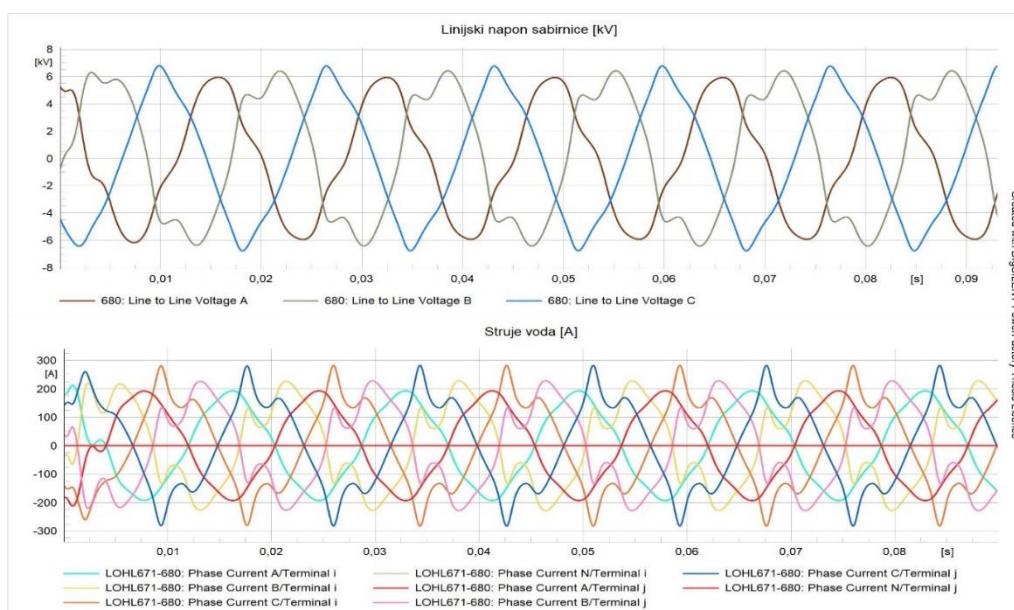
*Slika 6.99 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 652 i struja na ulazu i izlazu voda LC684-652A poslije integracije punionica*

Valni oblik linijskog napona na sabirnici 650 je ostao netaknut kao što je prikazano na slici 6.98, a valni oblici struja na ulazu i izlazu autotrasformatora VregA/B/C su smanjila svoja izobličenja i dodatne oscilacije prilikom integracije punionica. Iznos linijskog napona na sabirnici 652 je nula. Slika 6.99 prikazuje vidljivo je smanjenje izobličenja valnih oblika struja na ulazi i izlazu voda LC684-652A zbog kapacitivnog karaktera punionica.



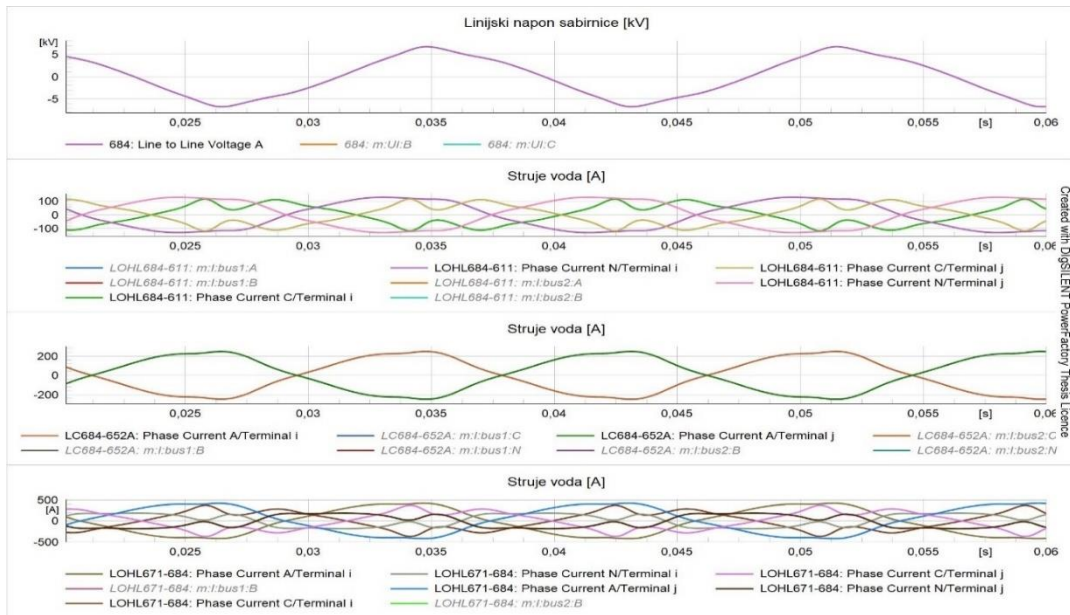


*Slika 6.100 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 675 i struja na ulazu i izlazu voda LC692-675 poslije integracije punionica*

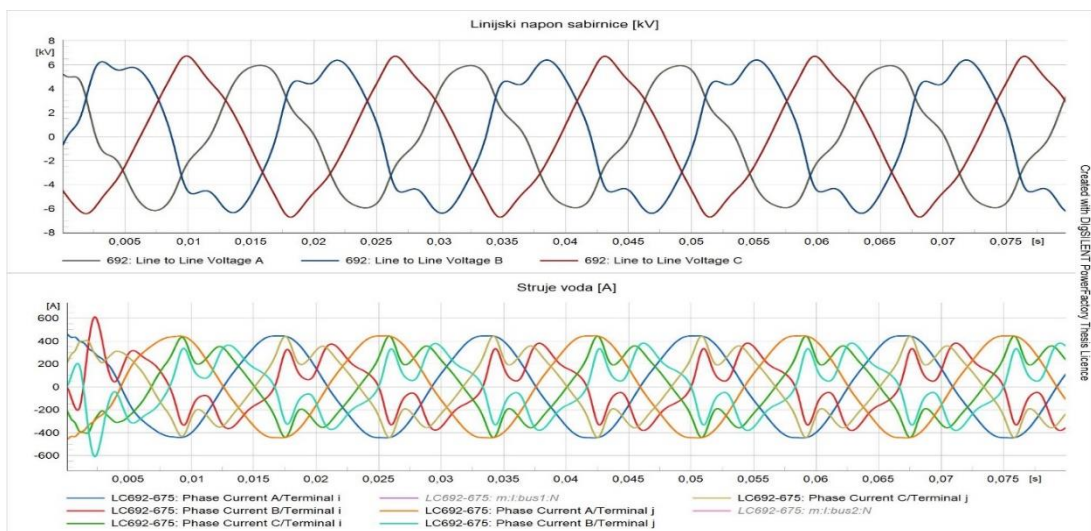


*Slika 6.101 Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 680 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL671-680 poslije integracije punionica*

Integracijom punionica za javno punjenje se postiglo smanjenje izobličenja valnog oblika linijskog napona sabirnice 675 i struja na izlazu i ulazu voda LC692-675 kao što je vidljivo na slici 6.100, ali su i dalje prisutna izobličenja zbog nelinearnost i viših harmonika. Prikazan je i porast amplituda struja voda zbog priključenja punionica. Priključenjem punionica za javno punjenje se postiglo smanjenje izobličenja valnog oblika linijskog napona sabirnice 680 i struja na izlazu i ulazu voda LOHL671-680 kao što je prikazano na slici 6.101, ali su i dalje prisutna izobličenja viših harmonika.



**Slika 6.102** Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 684 i struja na ulazu i izlazu voda LOHL671-684, LOHL684-611, LC684-652A poslije integracije punionica



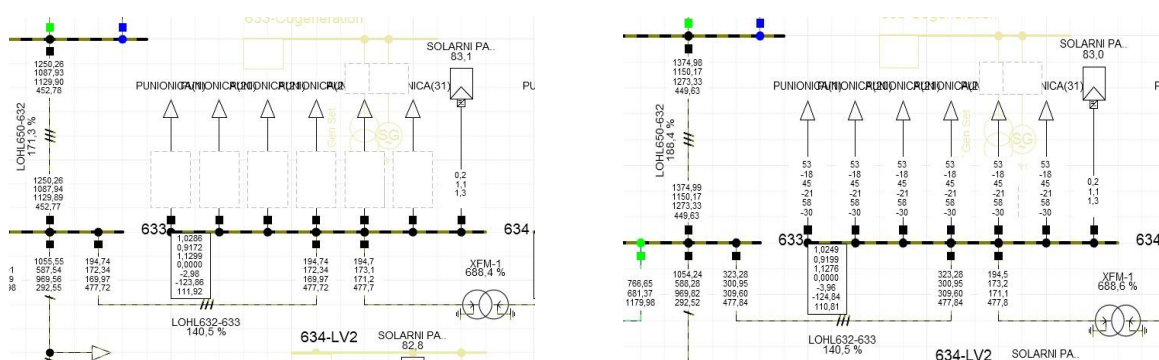
**Slika 6.103** Prikaz valnog oblika linijskog napona na sabirnici 692 i struja na ulazu i izlazu voda LC692-675 poslije integracije punionica

Nakon integracije punionica na slici 6.102 je prikazan valni oblik linijskog napona na sabirnici 680 je postao pilast, dok se struje na ulazu i izlazu vodova LOHL671-684, LOHL684-611, LC684-652A smanjila svoja izobličenja. Kao i u prethodnom slučaju na slici 6.103 je prikazan utjecaj javnog punjenja na smanjenje izobličenja valnog oblika linijskog napona sabirnice 692 i struja na izlazu i ulazu voda LC692-675, ali su i dalje prisutna izobličenja zbog nelinearnost i viših harmonika. Vidljiv je i porast amplituda struja voda zbog priključenja punionica. Kapacitivni karakter trošila smanjuje izobličenja valnih oblika napona i struja.

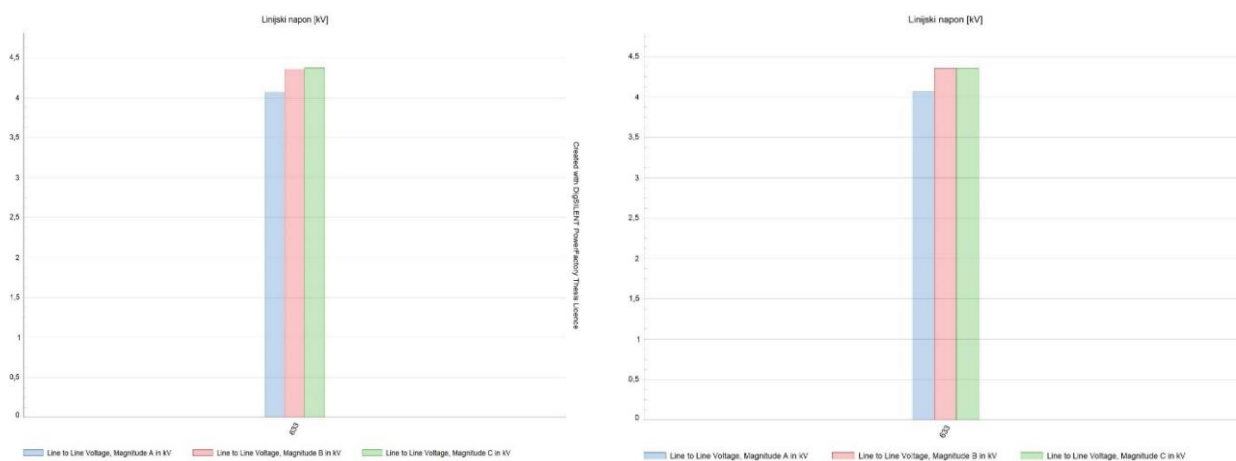
## 6.5 Simulacija uključenja punionica za električna vozila

Za priključenje punionice odabrana je sabirnica 633 na kojoj će se vršiti analiza tokova snaga, harmonijska analiza i EMT simulacija. Promatrat će se strujno naponske prilike voda koji je priključena na sabirnicu 633 kao i valne oblike napona na sabirnici, a rezultati su prikazani stupčastim dijagramima napona i snaga na sabirnici. Kako bi se uvidjela razlika simulacija se vrši prije i poslije uključenja punionica snage 50 kW. Vrijeme uključenja je 0,02s, a period promatranja je 0,1s. Na sabirnicu se spaja šest punionica, te je za svaku punionicu potrebno napraviti događaj uključenja.

### Tokovi snaga

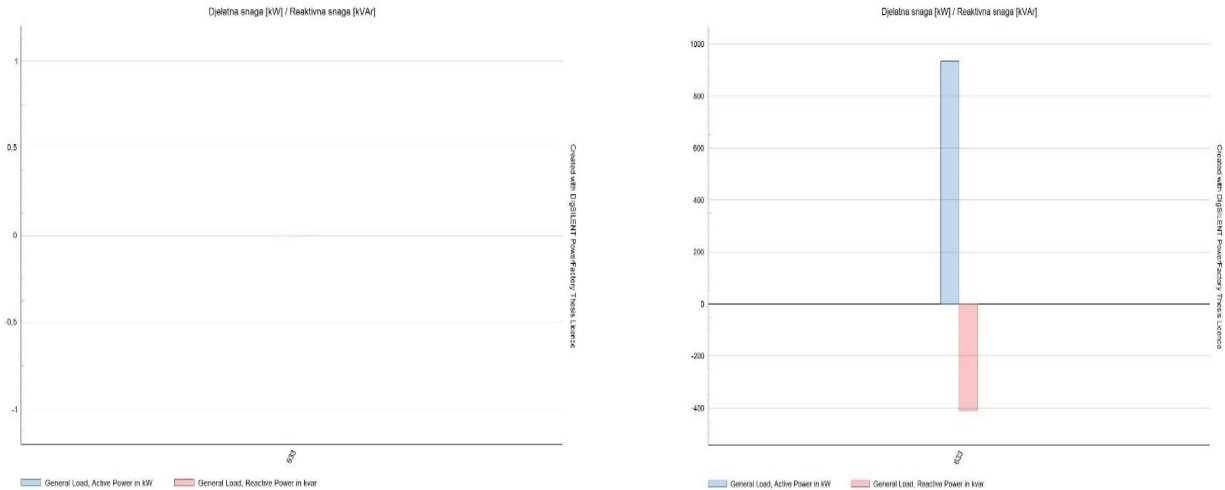


Slika 6.104 Prikaz prije (lijevo) i poslije (desno) uključenja punionica



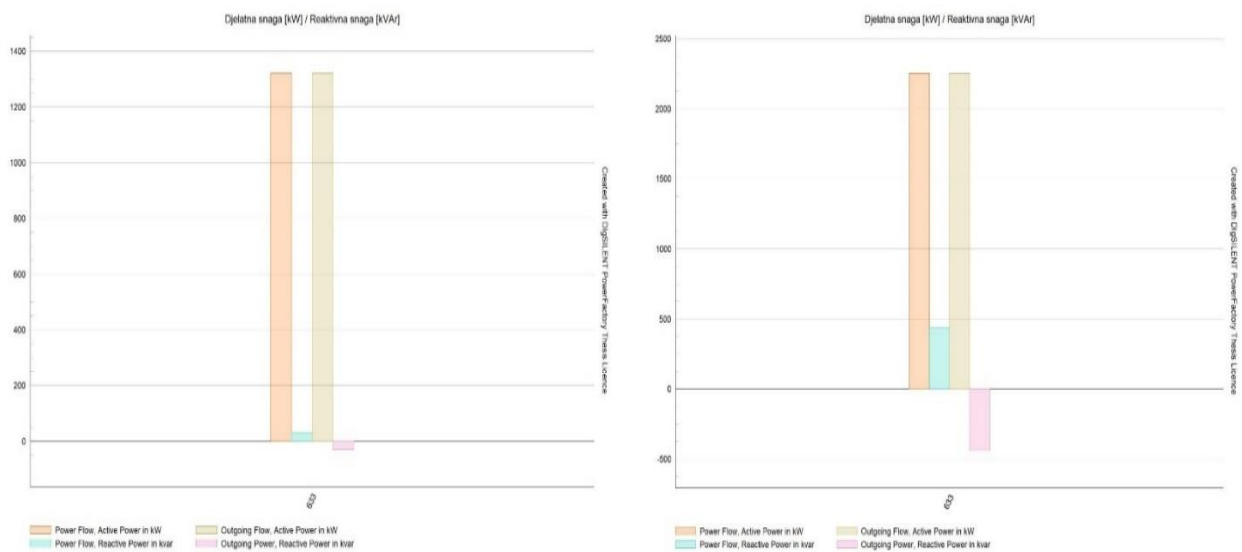
Slika 6.105 Prikaz iznosa linijskog napona na promatranoj sabirnici 633 prije (lijevo) i poslije (desno) priključenja punionica

Na slici 6.105 je prikazan iznos linijskog napona po fazama za slučaj prije i poslije uključenja punionica snage 50 kW na sabirnicu 633. Najniži napon je na faze A koji iznosi 4,07 kV, a najveći napon faze C i B koji iznosi 4,36 kV .



**Slika 6.106** Prikaz opterećenja prije (lijevo) i poslije (desno) nakon priključenja punionica

Nakon priključenja punionica kao što je vidljivo na slici 6.106 raste teret sabirnice djelatne i reaktivne snage. Za ovaj slučaj iznos radne snage je oko 950 kW, a reaktivne -400 kVar.



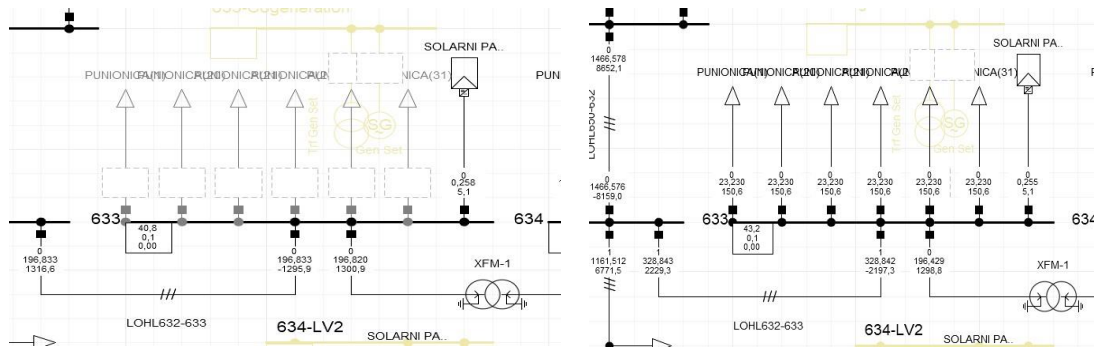
**Slika 6.107** Prikaz ulazne i izlazne djelatne i reaktivne snage kroz sabirnicu 633

Na slici 6.107 je vidljivo povećanje ulazne i izlazne radne snage, kao i povećanje induktivne i kapacitivne reaktivne snage. Ulazna i izlazna djelatna snaga sabirnice se nakon priključenja punionica povećala na iznos oko 2300 kW, induktivna jalova snaga na oko 480 kVar i kapacitivna jalova snaga na iznos oko 460 kVar. Gubitci djelatne i jalove snage su ostali isti prije i poslije integracije punionica na sabirnicu 633, a iznosili su 37 kW i 68 kVar.

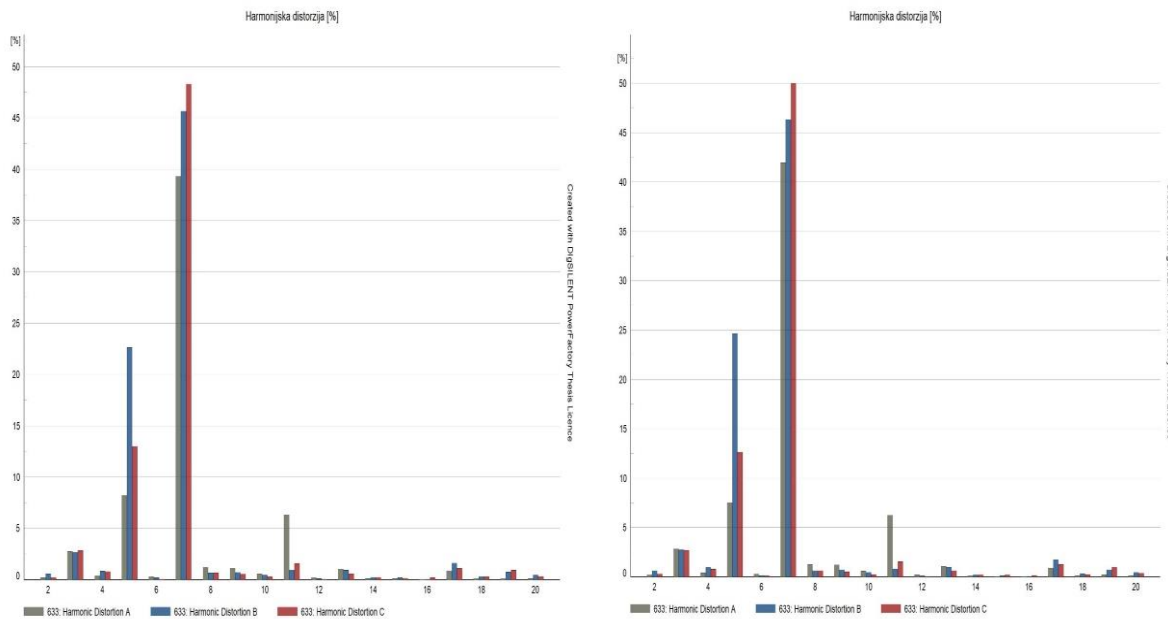


## Harmonijska analiza

Osim stupčastog prikaza harmonijske distorzije, prikazati će se i dijagram napona sabirnice i struje voda kako bi se uvidjelo koji harmonik ima najviše udjela.

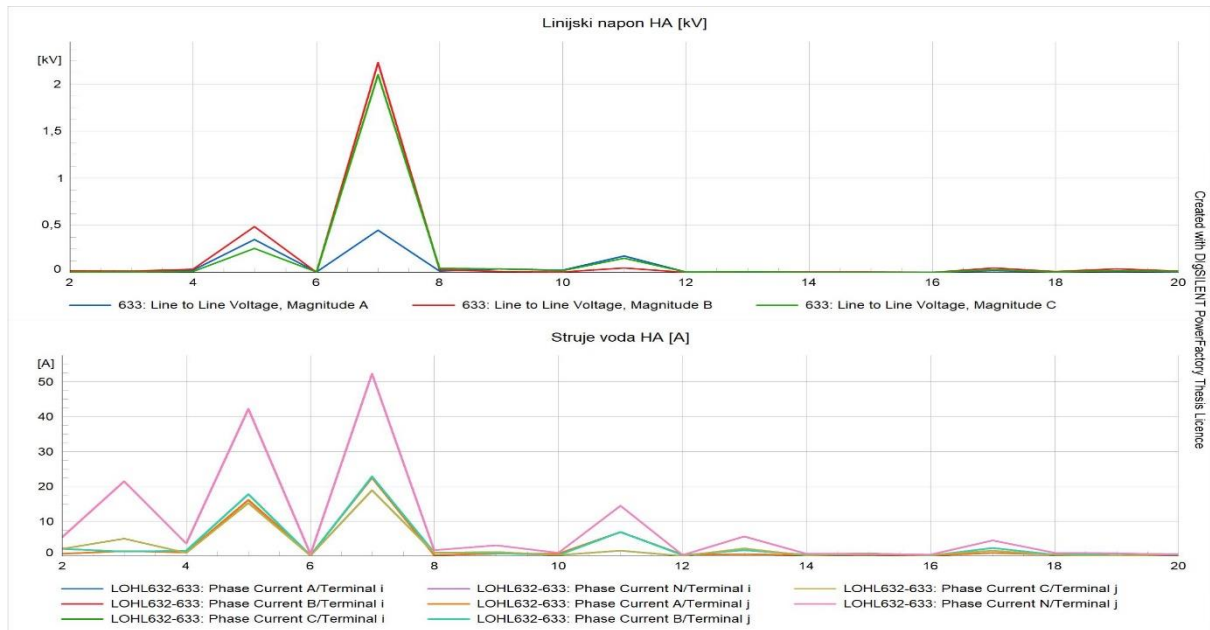


**Slika 6.109** Prikaz prije (lijevo) i poslije (desno) pokretanja harmonijske analize promatrane sabirnice 633

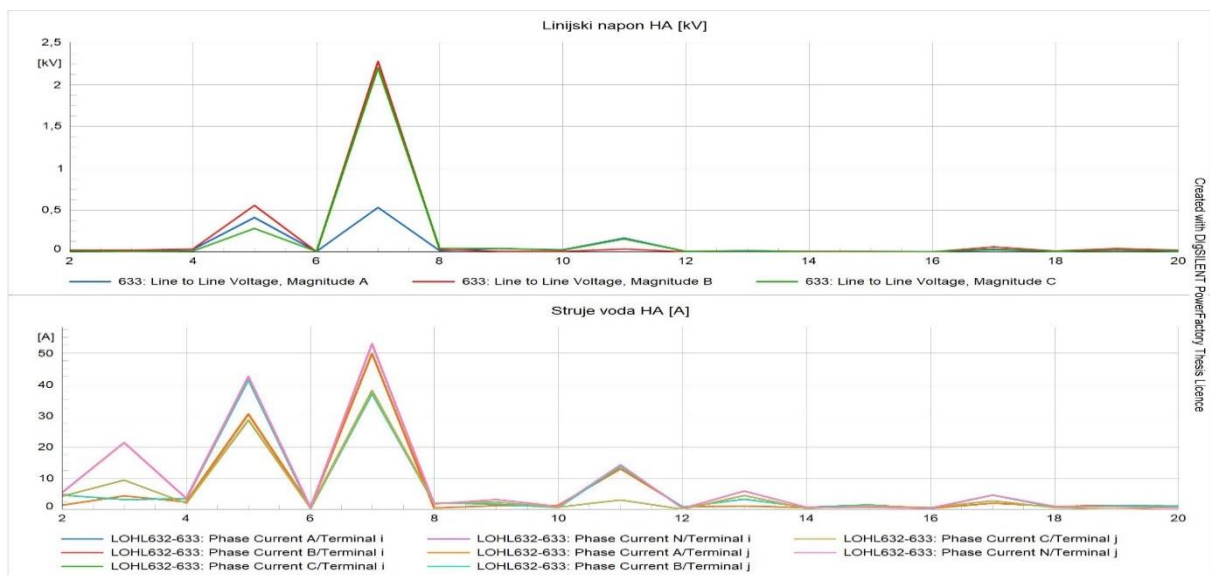


**Slika 6.110** Prikaz harmonijske distorzije prije (desno) i poslije (lijevo) priključenja punionica

Na slici 6.110 je vidljiva dominacija sedmog harmonika te njegovo povećanje nakon priključenja punionica na 50 % udjela u fazi C. Pored sedmog vidljiv je i porast udjela petog harmonika na 25 % faze B. Kao i u ostalim slučajevima najzastupljeniji su neparni harmonici. Oba harmonika prelaze dopuštenu vrijednost IEC 50610 norme iznosa 5 % za sedmi i 6 % za peti harmonik.



**Slika 6.111** Prikaz linijskog napona sabirnice i struja na ulazu i izlazu voda LOHL632-633 pri harmonijskoj analizi prije priključenja punionica

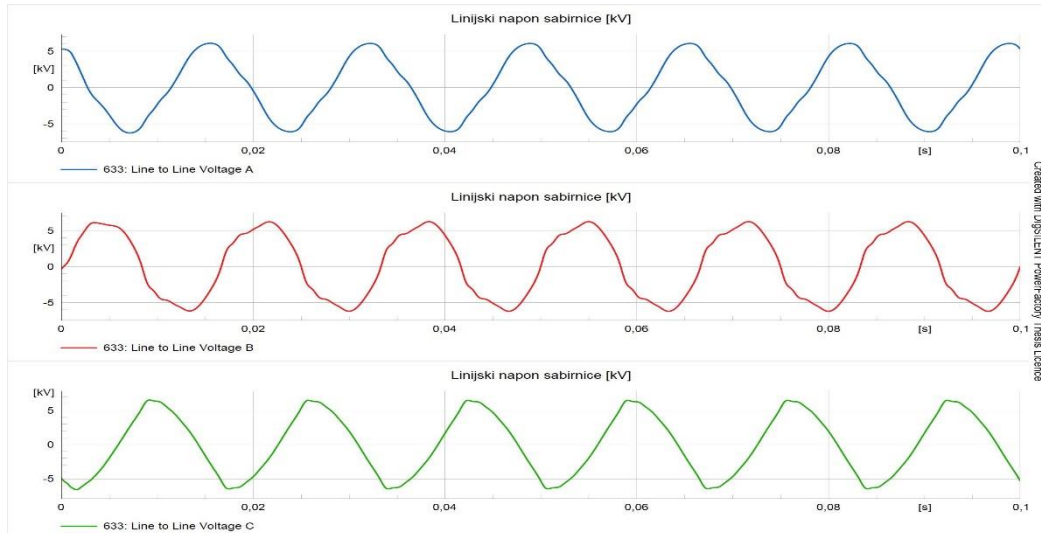


**Slika 6.112** Prikaz linijskog napona sabirnice i struja na ulazu i izlazu voda LOHL632-633 pri harmonijskoj analizi poslije priključenja punionica

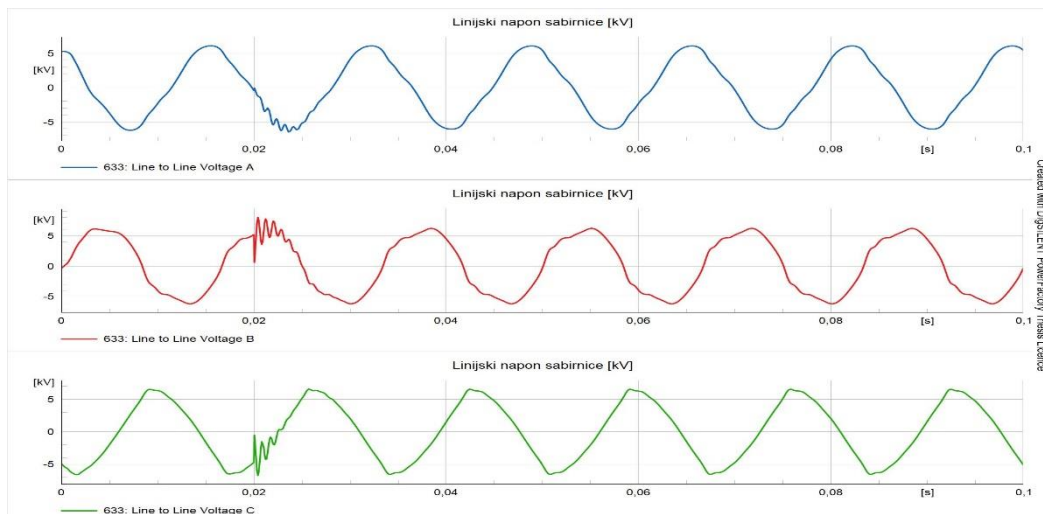
U harmonijskoj distorziji dominantan je sedmi harmonik, što je vidljivo na slikama 6.111 i 6.112 i na grafikonu linijskog napona i struja na ulazu i izlazu voda pri harmonijskoj analizi. Ovim se predstavlja utjecaj viših harmonika na napone i struje. Promatrani su linijski napon na sabirnici 633 i struje na ulazu i izlazu voda LOHL623-633.

## EMT simulacija

Ovom simulacijom je provedeno uključenje punionica snage 50 kW kako bi se uvidio utjecaj na valne oblike napona sabirnice i struja na početku i na kraju voda.



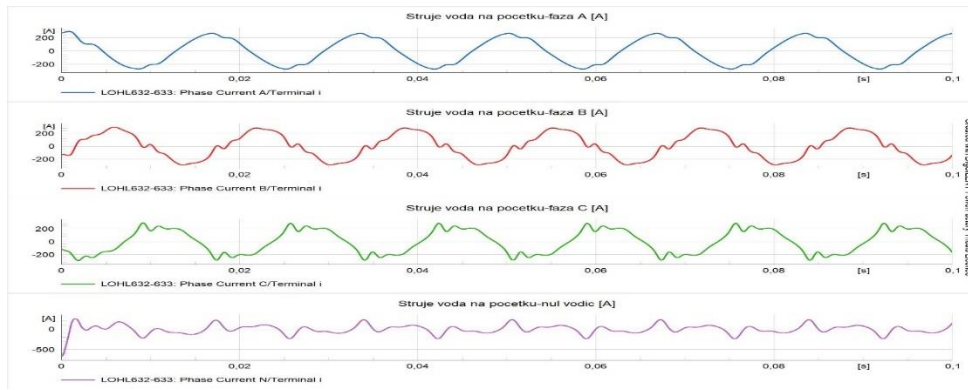
*Slika 6.113 Prikaz linijskog napona sabirnice 633 prije uključnja punionica*



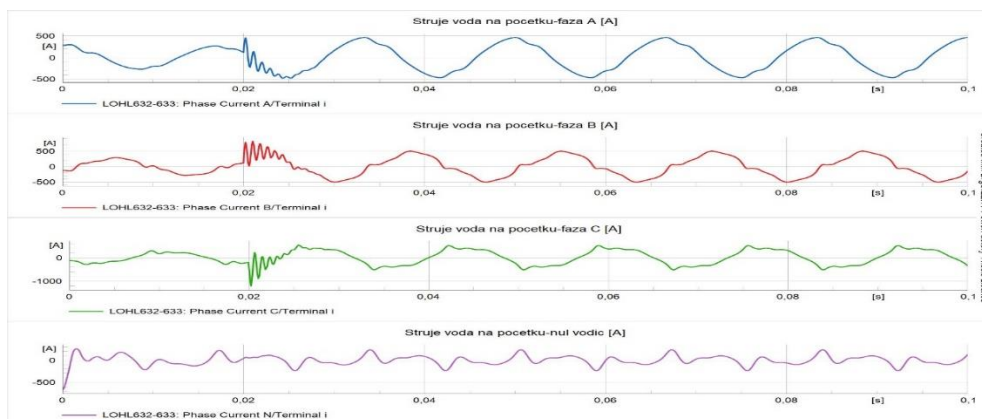
*Slika 6.114 Prikaz linijskog napona sabirnice 633 nakon uključnja punionica*

EMT simulacijom je utvrđeno ponašanje valnih oblika napona i struja kao što je prikazano na slikama 6.113 i 6.114 u trenutku priključenja punionica za električna vozila. Promatran je valni oblik linijskog napona na sabirnici 633 za svaku fazu. Vrijeme uključnja je postavljeno na 0,02s a promatrani period je 0,1s. Vidljivo je da u trenutku uključnja dolazi do izobličenja valnog oblika i nastupanja prijelazne pojave dok se napon ne ustali. Razlozi izobličenja valnog oblika je pojava viših harmonika i nelinearnost priključenog tereta.



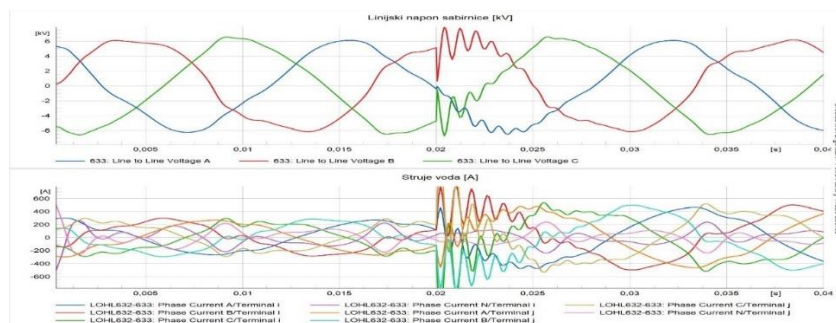


*Slika 6.115 Prikaz struja na početku voda LOHL632-633 prije uključenja punionica*



*Slika 6.116 Prikaz struja na početku voda LOHL632-633 poslije uključenja punionica*

Isto kao i kod napona promatra se vrijeme uključenja punionica na sabirnicu kao što je prikazano na slikama 6.115 i 6.116, ali se naglasak stavlja na vod koji je spojen na sabirnicu 633. Promatrane su struje na početku i kraju voda prije i poslije uključenja. Vidljivo je valno izobličenje struja zbog priključenja zbog nelinearnosti i viših harmonika. Može se reći da spajanje punionica rezultira smanjenjem izobličenja valnog oblika zbog svoga kapacitivnog karaktera.



*Slika 6.198 Prikaz linijskih napona sabirnice 633 i struja voda LOHL632-633 prije i poslije uključenja punionica*

## 7. ZAKLJUČAK

Elektroenergetski sustav je složen i dinamičan sustav koji je podložan stalnim promjenama. Težnja za stalnom dostupnošću energije rezultira porastom potrošnje i novim trendovima kako bi se smanjila ovisnost o fosilnim gorivima i zagađenje okoliša. Distribuirani izvori energije, koji se smatraju pogodnijim rješenjem po pitanju opskrbe električnom energijom, postaju sve zastupljeniji u elektroenergetskoj mreži čineći mikromreže. Kao posljedica integracije mijenjaju se tokovi snaga u mreži jer snaga u sustavu više ne ide samo u jednom smjeru. Nove tehnologije također utječu na razne aspekte života te tako sve više potrošača zamjenjuje obične automobile, s unutarnjim izgaranjem, sa električnim automobilima. Na primjeru IEEE 13 sabirničkog sustava analiziran je utjecaj punionica električnih vozila na strujno-naponske prilike u mreži. Punionice su obično integrirane na mjestima gdje već postoji distribuirani izvor energije.

Integracija OIE u IEEE 13 sabirnički sustav je izazvala blagi porast napona na sabirnicama. Može se pretpostaviti da je mreža dovoljno velike snage odnosno ima konstantnu frekvenciju i napon. Promjene su jasno vidljive na tokovima snaga u mreži jer OIE predaju snagu. Na čvorištu mreže, točnije na sabirnici 632 došlo je do povećanje djelatnih i reaktivnih gubitaka. Pojava viših harmonika u mreži je rezultat integracije OIE, a najzastupljeniji harmonici su neparni s dominantnim sedmim harmonikom. Kada je riječ o valnim oblicima linijskih napona na sabirnicama i struja na ulazu i izlazu vodova vidljivo je izobličenje sinusnog oblika zbog utjecaja viših harmonika koji uzrokuju dodatne oscilacije. Valni oblik linijskog napona sabirnice 650 na koju je spojena vjetroelektrana je ostao sinusnog oblika.

Drugi dio simulacije je baziran na integraciji kućnog punjenja električnih vozila. Kako bi se lakše uvidjela razlika korišteni su grafikoni iz prethodne simulacije vezano uz integraciju OIE. Na sabirnice su stavljane po tri punionice snage 1,8 kW koje predstavljaju punjenje električnog automobila kod kuće. Punionice se promatraju tako da su uključene sve odjednom. Naponi na promatranim sabirnicama su ostali nepromijenjeni kao i tokovi snage u mreži. Razlog tomu je relativno mala snaga punionica. Kod harmonijske analize dominantni su neparni harmonici, a najdominantniji je sedmi harmonik. Integracija punionica je izazvala izobličenja valnih oblika linijskih napona sabirnica i struja na ulazu i izlazu vodova. Harmonici punionica su izazvali dodatne oscilacije i izobličenja valnih oblika.

Integracija punionica za javno punjenje se izvršila na način da se na promatrane sabirnice priključivalo po šest punionica snage 50 kW. Pošto su javne punionice malo veće snage, a na sabirnice su spojene u malo većem broju, vidljivo je blago smanjenje napona na sabirnici 684 dok su naponi na ostalim sabirnicama ostali identični, što je dokaz da je mreža kruta. Zbog kapacitivnog karaktera punionica za vozila došlo je do promjene tokova snaga u mreži. Na sabirnicama u sustavu je porasla djelatna snaga opterećenja, a također se povećala kapacitivna jalova snaga zbog punionica. Spajanjem punionica na mrežu se postiglo povećanje djelatne snage i smanjenje jalove snage na sabirnici 650 na koju su spojeni kruta mreža i vjetroelektrana. Sabirnici 632 kao čvorište mreže su porasli radni i jalovi gubitci. Kada se promatraju ulazne i izlazne snage na sabirnicama može se uočiti porast djelatne snage i smanjenje jalove snage. Integracijom punionica se izazvala kompenzacija jalove snage što je ujedno i njihova prednost. Harmonijskom analizom se pokazalo da i dalje su dominantni neparni harmonici, a najdominantniji je i dalje sedmi harmonik. Došlo je do porasta udjela viših harmonika po pojedinoj fazi za razliku do prethodnih slučajeva. Valni oblici linijski napona na promatranim sabirnicama i struja na ulazu i izlazu vodova su manje izobličeni nakon integracije punionica. Kapacitivni karakter punionica je uzrokovao ispravljanje valnih oblika kao i smanjenje oscilacija. Cilj je postići što bolji sinusni valni oblik.

Kako bi se uvidjelo ponašanje napona, struje i snaga napravljena je simulacije odgode uključivanja sabirnice 633 s vremenom uključivanja 0,02s, a period promatranje je iznosio 0,1s. U EMT simulaciji su definirani događaji za svih šest sabirnica. Nakon priključenja punionica došlo je do povećanje linijskog napona jedne faze sabirnice 633 kao i povećanje djelatnog i kapacitivnog jalovog opterećenja. Djelatna snaga i jalova snaga na izlazu sabirnice su se povećale za razliku od ulaza na sabirnicu. Sedmi harmonik je i dalje najdominantniji, dok je s priključenjem porastao njegov udjel kod napona na sabirnici kao i kod struje voda koji je spojen na sabirnicu. Uključenje punionica u trenutku 0,02s je rezultiralo prijelaznom pojavom i stvaranjem dodatnih izobličenja valnih oblika napona i struja. Nakon prestanka prijelazne pojave dolazi do smanjenja izobličenja valnih oblika.

Integracija OIE i punionica u distribucijsku mrežu ima svojih prednosti i mana. Jedan od nedostataka je pojava viših harmonika i promjena tokova snaga u mreži kao i da potrošač, pored toga što uzima snagu iz mreže, daje snagu u mrežu. Prednost ovakve integracije je smanjenje jalove snage u mreži kao i smanjenje izobličenja valnih oblika napona i struje. Naponi na sabirnicama u sustavu su u većini slučajeva bili gotovo nepromijenjeni iz razloga što je mreža kruta i ima stalan iznos napona i frekvencije.

**LITERATURA**

- [1] A. H. M. H. E. Alghsoon, »Power quality and stability impacts of Vehicle to grid (V2G) connection,« u *2017 8th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Amman, 2017.
- [2] P. G. R. T. M. O. O. Olagbemi, »Transient Analysis of Vehicle-to-Grid Systems Incorporating Plug-in Electric Vehicles,« u *International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Middlesbrough, 2021.
- [3] S. G. S. P. K. M. Gupta, »Impact of Vehicle-to-Grid on Voltage Stability - Indian Scenario,« u *2018 National Power Engineering Conference (NPEC)*, Madurai, 2018.
- [4] O. P. M. F. Mohammed Shakeel, »Vehicle-To-Grid Technology in a Micro-grid Using DC Fast Charging Architecture,« u *2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Edmonton, 2019.
- [5] A. Z. T. Lehtola, »Vehicle to grid system in frequency regulation for securing electricity network stability,« u *2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Brisbane, 2015.
- [6] A. Mehrizi-Sani, *Control Strategies for the Next Generation Microgrids*, Toronto, 2011.
- [7] H. A. R. I. C. M. N. Hatziargyriou, »Microgrids,« *IEEE Power and Energy Magazine*, svez. 5, br. 4, p. 78.94, 2007.
- [8] R. H. Lasseter, »MicroGrids,« u *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings*, New York, 2002.
- [9] M. Čavlović, »Izazovi optimiranja utjecaja obnovljivih izvora na distribucijsku mrežu,« 22. travanj 2015. [Mrežno]. Available: [http://www.ieee.hr/\\_download/repository/Cavlovic\\_Izazovi\\_optimiranja\\_utjecaja\\_obnovljivih\\_izvora\\_na\\_distribucijsku\\_mrezu.pdf](http://www.ieee.hr/_download/repository/Cavlovic_Izazovi_optimiranja_utjecaja_obnovljivih_izvora_na_distribucijsku_mrezu.pdf). [Pokušaj pristupa 17 5 2022].

- 
- [10] N. Hatziargyriou, *Microgrids: Architectures and Control*, IEEE, 2014.
- [11] Y. C. K. Y. K. M. A. Ahmed, »Communication Network Architectures for Smart-House with Renewable Energy Resources,« *Energies*, svez. 8, br. 8, pp. 8716-8735, 2015..
- [12] K. H. Yang, »Stepping Through Finite Element Analysis,« u *Basic Finite Element Method as Applied to Injury Biomechanics*, Elsevier Inc., 2018, pp. 281-308..
- [13] M. S. S. R. Vadimgadu, »A Review of Optimal DG Allocation in Distribution System for Loss Minimization,« *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, pp. 15-22, 2016.
- [14] R. Potočki, *Fotonaponski sustav na zgradi FERIT-a*, Osijek: Slikano pomoću uređaja Samsung Galaxy S20+, 2022.
- [15] D. Š. B. K. M. Živić Đurović, »Primjenjivost mikromreža u distribucijskoj mreži HEP ODS-a,« u *2. savjetovanje Hrvatskog ogranka Međunarodne elektrodistribucijske konferencije (HO CIRED)*, Umag, 2010.
- [16] R. Potočki, *Prikaz baterijskog spremnika u zgradi FERIT-a*, Osijek: Slikano pomoću uređaja Samsung Galaxy S20+, 2022.
- [17] R. M. P. Sivachandran, »An overview of microgrid system,« *International Journal of Applied Engineering Research*, svez. 9, pp. 12353-12376., 2014.
- [18] »IEEE\_13\_Node\_Feeder,« PDFCoffee, [Mrežno]. Available: <https://pdfcoffee.com/ieee13nodefeederpdf-pdf-free.html>. [Pokušaj pristupa 4 lipanj 2022].
- [19] D. Š. B. K. M. Živić Đurović, »Primjenjivost mikromreža u distribucijskoj mreži HEP ODS-a,« u *Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije 2. (8.) savjetovanje*, Umag, 2010.
- [20] A. S. M. C. P. Wlodarczyk, »Voltage Control of Distribution Grids with Multi-Microgrids Using Reactive Power Management,« *Advances in Electrical and Computer Engineering*, svez. 15, br. 1, pp. 83-88, 2015.
- [21] J. J. M. K. D. Radosavljević, »Optimalna raspodela snaga i regulacija napona i frekvencije

- u mikromrežama,« u *IX Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem (CIRED Srbija)*, Vrnjačka Banja, 2014.
- [22] I. Kuzle, *Mikromreže i fleksibilna trošila*, Zagreb: Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2015.
- [23] C. Chan, »An overview of electric vehicle technology,« *IEEE Xplore*, svez. 81, br. 9, pp. 1202-1213, 1993.
- [24] X. Z. B. Z. T. Mao, »Modeling and Solving Method for Supporting ‘Vehicle-to-Anything’ EV Charging Mode.,« *Applied science*, svez. 8, br. 48, pp. 1-16., 2018.
- [25] D. G. D. P. H. G. K. H. N. M. M. Stojkov, »Electric Car - history and components,« u *12. skup o prirodnom plinu, toplini i vodi*, 2014.
- [26] M. Rimac, »Rimac Nevera Takes the Hypercar Market by Storm,« Rimac Automobili, 2018.. [Mrežno]. Available: <https://www.rimacautomobili.com/media/press-releases/rimac-nevera-takes-the-hypercar-market-bystorm/> . [Pokušaj pristupa 16. lipanj 2022].
- [27] D. S. I. S. B. M. D. M. C. Falvo, »EV charging stations and modes: International standards,« u *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2014.
- [28] A. R. J. G. A. P. A. D. Gimenez, »Optimal Location of Battery Electric Vehicle Charging Stations in Urban Areas: A New Approach,« *International Journal of Sustainable Transportation*, prosinac 2014.
- [29] A. ELECTRICAL, *SAE J1772 EV Charging*. Dostupno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/SAE\\_J1772](https://en.wikipedia.org/wiki/SAE_J1772)
- [30] D. Corporation, *CHAdeMO EV Quick Charger Connector*. <https://www.evchargeking.com/en/t3-charging-cables-for-france>
- [31] B. Gaton, *What is CCS charging?*, The Driven, 2018. <https://thedriven.io/2018/12/10/what-is-ccs-charging/>



- 
- [32] B. Schmidt, *Tesla Supercharger prices jump sharply, as network expansion plan hits delays*, The Driven, 2022. [https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla\\_Supercharger](https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Supercharger)
- [33] Moon, *MOON Wallbox Community*. <https://moon-power.hr/privatni-korisnici/moon-wallbox-community/>
- [34] Puni Hr. <http://puni.hr/staticAdminMgr.php?action=read&menu=faq>
- [35] Puni Hr. Dostupno na :  
[http://puni.hr/staticAdminMgr.php?action=read&menu=howtouseinfrastructure&SGLSES\\_SID=j79qd8f433njdspauufcfi6ou0](http://puni.hr/staticAdminMgr.php?action=read&menu=howtouseinfrastructure&SGLSES_SID=j79qd8f433njdspauufcfi6ou0)
- [36] *E - mobilnost, Punionice za električna vozila*, T-com.  
<https://www.hrvatskitelekom.hr/poslovni/ict/e-mobilnos>
- [37] S. R. I. R. P. I. Ž. Tomšić, »Role of Electric Vehicles in Transition to Low Carbon Power System—Case Study Croatia,« *Energies*, 16 studeni 2020.
- [38] L. O. T. B. J. Quiros-Tortos, »How Electric Vehicles and the Grid Work Together: Lessons Learned from One of the Largest Electric Vehicle Trials in the World,« *IEEE Power and Energy Magazine*, svez. 16, br. 6, pp. 64-76, 2018.
- [39] W. Kersting, »Radial distribution test feeders,« u *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings*, 2001.

## SAŽETAK

U ovom radu će se opisati mikromreža u kojoj se nalaze distribucijski izvori električne energije, te podjela i načini povezivanja mikromreže sa elektroenergetskim sustavom. Kroz rad se predstavljaju punionice električnih vozila, počevši od vrsta i načina punjenja te opisa pojedinih tipova električnih vozila. Na kraju rada predstavljena je analiza koja se provodi u programskom paketu *DIgSILENT Power Factory 2022*. Pored navedenog u analizi će se nalaziti grafikoni kako bi se stekla šira slika primjene punionica za električna vozila u sklopu mikromreža.

## SUMMARY

This paper will describe the microgrid in which the distribution sources of electricity are located, as well as the division and methods of connecting the microgrid to the power system. The paper presents charging stations for electric vehicles, starting with the types and methods of charging and descriptions of individual types of electric vehicles. At the end of the paper, an analysis is presented, which is carried out in the program package *DIgSILENT Power Factory 2022*. In addition to the above, the analysis will include graphs in order to obtain a broader picture of the application of charging stations for electric vehicles as part of microgrids.

Key words: microgrid, power system, electric vehicles, *DIgSILENT*

## ŽIVOTOPIS

Rudolf Potočki, rođen je 27.12.1997 u Zagrebu. Osnovnu školu Antun Gustav Matoš je pohađao u Vinkovcima. Poslije stečenog osnovnoškolskog obrazovanja upisuje Tehničku školu Ruđera Boškovića u Vinkovcima a završava ju 2016. godine. Nakon srednjoškolskog obrazovanja upisuje Fakultet, elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, smjer elektroenergetika. Poslije završene tri godine preddiplomskog studija, steče zvanje Sveučilišnog prvostupnika, inženjer elektrotehnike. Iste godine nastavlja diplomski studiji, izbornog bloka Elektroenergetski sustavi. Tijekom fakultetskog razdoblja bio je član IEEE zajednice Osijek. Stručnu praksu uspješno je obavio u HOPS - Osijek.