

Metode za ublažavanje viših harmonika u niskonaponskoj mreži

Primorac, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:088821>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-20**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA U OSIJEKU**

Sveučilišni studij

**METODE UBLAŽAVANJA VIŠIH HARMONIKA U
NISKONAPONSKOJ MREŽI**

Diplomski rad

Tomislav Primorac

Osijek, 2021.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

Osijek, 19.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Ime i prezime studenta:	Tomislav Primorac
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-1196, 09.10.2018.
OIB studenta:	95712401702
Mentor:	Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
Sumentor:	Mario Primorac
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Član Povjerenstva 1:	Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
Član Povjerenstva 2:	Ružica Kljajić
Naslov diplomskog rada:	Metode za ublažavanje viših harmonika u niskonaponskoj mreži
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	Opisati pojam viši harmonici kao pokazatelja kvalitete električne energije. Objasniti tehnike modeliranja i simuliranja viših harmonika. Predstaviti aktualne metode za ublažavanje viših harmonika. Izvesti simulaciju ubalažavanja viših harmonika u dijelu elektrodistribucijske mreže, pomoću suvremenog programa DIgSILENT Power Factory.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	19.09.2021.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 12.10.2021.

Ime i prezime studenta:

Tomislav Primorac

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-1196, 09.10.2018.

Turnitin podudaranje [%]:

4

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Metode za ublažavanje viših harmonika u niskonaponskoj mreži**

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

i sumentora Mario Primorac

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak diplomskoga rada	1
2. HARMONICI	2
2.1. Osnove o harmonicima	2
2.2. Podjela harmonika.....	3
2.3. Harmonijska distorzija	4
2.4. Pokazatelji harmonijskoga izobličenja.....	4
2.6. Učinci harmonika.....	6
2.7. Serijska i paralelna rezonancija	7
3. TEHNIKE MODELIRANJA VIŠIH HARMONIKA I POSTOJEĆE NORME	8
3.1. Modeliranje harmonika	8
3.2. Simulacija vremenske domene.....	8
3.3. Simulacija harmonijske domene	9
3.4. Iterativne simulacijske tehnike.....	9
3.5. Modeliranje harmonijskih izvora.....	10
3.6. Norme i standardi za harmonijske članove	11
3.7. Standard EN50160.....	11
3.8. Standard IEEE 519.....	12
3.9. Standard IEC 61000-3-2 za niskonaponsku opremu s nazivnom strujom manjom ili jednakom 16 A.....	13
4. METODE ZA UBLAŽAVANJE VIŠIH HARMONIKA	14
4.1. Promjena rezonantne frekvencije sustava	14
4.2. Smanjenje intenziteta harmonijskih struja	14
4.3. Ugradnja filtera.....	15
4.4. Električni filteri	15
4.5. Klasifikacija filtera korištenih u elektroenergetskom sustavu.....	16
4.6. Modeliranje nelinearnih opterećenja	18
5. SIMULACIJA U PROGRAMSKOM PAKETU DIGSILENT	22
5.1. Analiza niskonaponskih izvoda pomoću programskoga paketa DigSILENT PowerFactory, ruralno područje pored Osijeka	22
5.1.1. Scenariji A: Stvarno stanje ruralnoga izvoda	24
5.1.2. Scenariji B: Aktivni filter snage (APF) priključen na početku izvoda	26
5.1.3. Scenariji C: Aktivni filter snage na sredini izvoda	29

5.1.4.Scenariji D: Aktivni filter snage na kraju izvoda	30
6. ZAKLJUČAK.....	33
LITERATURA.....	34
SAŽETAK.....	35
ABSTRACT	36
ŽIVOTOPIS.....	37

1. UVOD

U današnje vrijeme, razvojem tehnologije elektroenergetskoga sustava, napajanja većine uređaja zahtijevaju veću osjetljivost na promjene kvalitete električne energije. Kao jedan od glavnih čimbenika kvalitete električne energije u elektroenergetskom sustavu su problemi povezani s višim harmonicima. Povećanje tih problema rezultat je priključenja sve većega broja elektroenergetskih pretvarača koji imaju negativan povratni utjecaj na mrežu te tako uzrokuju odstupanja valnoga oblika napona od idealnoga sinusnog valnog oblika. Takvi „iskrivljeni“ valni oblici napona utječu na druga opterećenja koja dijele isti transformator te tako utječu na gubitke snage u distribucijskim transformatorima i vodovima, uzrokuju zagrijavanje u rotacijskim strojevima, ometaju rad upravljačkih sustava, oštećuju osjetljivu elektroničku opremu itd. Međutim, iznimno je teško modelirati većinu ovih učinaka jer se ovi događaji pojavljuju nepredvidivo i sklone su stalnim promjenama. Ipak, postoje metode koje mogu umanjiti utjecaj viših harmonika na elektroenergetsku mrežu i njezine značajke.

U sklopu praktičnoga dijela rada napravljene su četiri simulacije u DigSilent PowerFactory programskom paketu. Podatci korišteni za unos u programski paket dobiveni su mjerenjem kvalitete električne energije prema normi HRN EN 50160:2012. Unutar simulacija proučavani su čimbenici koji prikazuju utjecaje viših harmonika na mrežu i njezine značajke te je korišten aktivni filter snage za poništavanje viših harmonika koji je premještan na različite dijelove mreže kako bi se utvrdio najpovoljniji položaj takvoga filtera.

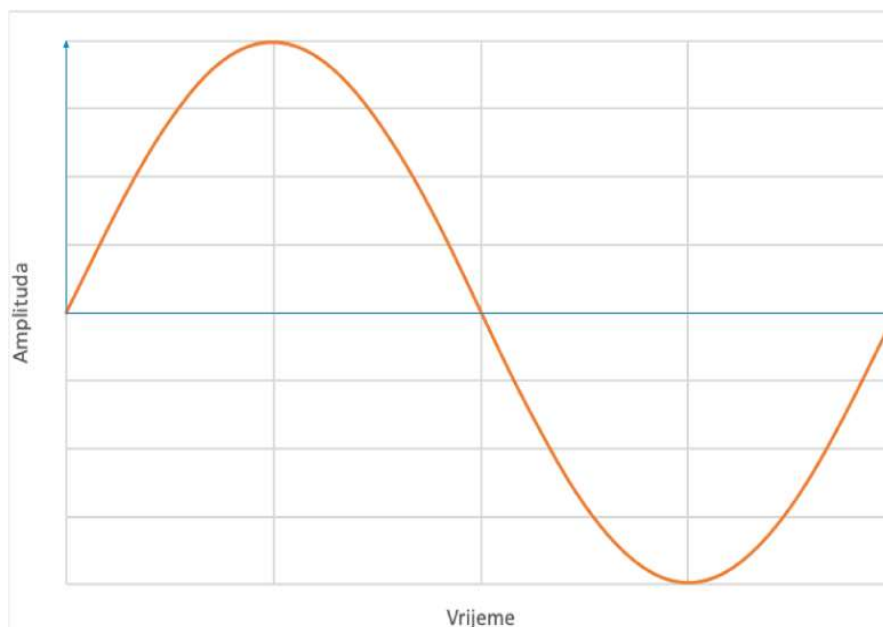
1.1. Zadatak diplomskoga rada

Opisati pojam viši harmonici kao pokazatelja kvalitete električne energije. Objasniti tehnike modeliranja i simuliranja viših harmonika. Predstaviti aktualne metode za ublažavanje viših harmonika. Izvesti simulaciju ublažavanja viših harmonika u dijelu elektrodistribucijske mreže, pomoću suvremenoga programa DIGSILENT Power Factory.

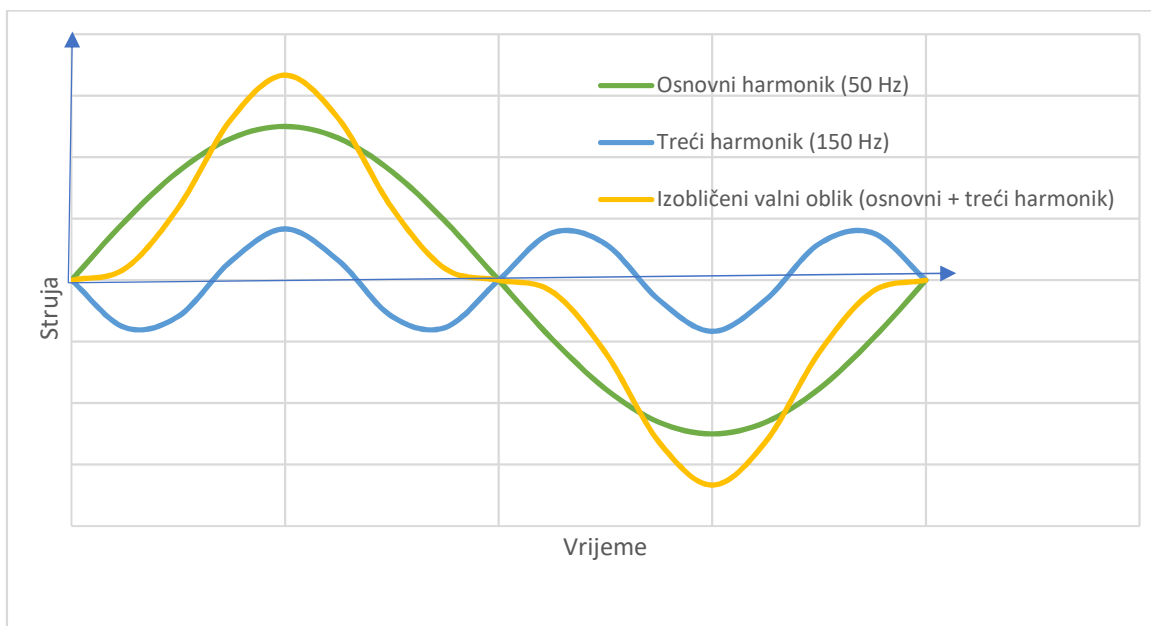
2. HARMONICI

2.1. Osnove o harmonicima

Harmonici kao neželjene pojave u elektroenergetskom sustavu uzrokuju odstupanja valnoga oblika od idealnoga sinusnog valnog oblika struje ili napona. Umnožak valnih oblika struje i napona karakterizira valni oblik snage u sustavu. Idealni sinusni valni oblik koji ima matematičku funkciju $\sin\omega t$ prikazan je na Slici 2.1. Ukoliko odziv snage ima idealni sinusni valni oblik tada bi svi potrošači u toj mreži bili definirani kao djelatni potrošači. Odnosno, fazni pomak između struje i napona iznosio bi 0° . Nelinearni potrošači, čija je implementacija posljednjih godina u stalnom porastu, svojim djelovanjem injektiraju strujne ili naponske harmonike u distributivnu mrežu. Takvi nelinearni potrošači, osim djelatnih otpora sadrže kondenzatore i zavojnice te uzrokuju fazni pomak između napona i struje što dovodi do pojave harmonika u sustavu. Posljednjih godina u distributivnim mrežama prevladavaju nelinearni potrošači te se razvojem tehnologije očekuje stalni porast broja nelinearnih potrošača što će dodatno stvarati nepovoljan utjecaj na kvalitetu napajanja. Primjer valnoga oblika napona i valni oblik 3. harmonika, prikazan je na Slici 2.2. Slika također prikazuje i resultantni valni oblik napona kada na osnovni sinusni oblik utječe treći harmonik. Današnji potrošači zahtijevaju kvalitetnije valne oblike napona i struje za svoj rad, a istovremeno unose svojom nelinearnošću više harmonike u mrežu i na taj način narušavaju kvalitetu električne energije u mreži. [1, 2]



Slika 2.1. Idealni sinusni valni oblik



Slika 2.2. Izobličeni sinusni valni oblik

2.2. Podjela harmonika

Pojam harmonika odnosi se na signale napona ili struja čija se frekvencija razlikuje od nazivne frekvencije (obično su to višekratnici osnovne frekvencije). Harmonike općenito možemo klasificirati na: parne, neparne i harmonike koji su višekratnici broja 3 (*engl.* Triplen), [3]. Većina harmonika kategorizirana je u neparne harmonike te harmonike koji su višekratnici broja 3 (višekratnici osnovne frekvencije: treći harmonik je frekvencije 150 Hz ako je nazivna frekvencija 50Hz, zatim slijede 250 Hz, 350 Hz itd.). Parni harmonici (drugi harmonik je 100 Hz ako je nazivna frekvencija 50Hz, zatim slijede 200Hz, 300 Hz, 400 Hz i tako dalje) rjeđe se javljaju u EES. Većinski udio harmonika u elektroenergetskom sustavu su neparni harmonici zato što većina potrošača ima valne oblike struje i napona simetrične na točku poluperiode na apscisi te je električna oprema općenito projektirana da radi s ovim harmonicima. Postoje i druge podjele harmonika, tj. „supharmonici“ i „međuharmonici“. Supharmonici su oni čija je frekvencija u rasponu od 2 kHz do 150 kHz, [4]. Ako frekvencijske komponente periodičkih veličina nisu cjelobrojni umnožak nazivne frekvencije, nazivaju se interharmonicima. Razlika između harmonika i međuharmonika je u tome što su cjelobrojni harmonici periodični na nazivnoj frekvenciji, a međuharmonici nisu. Nastaju zbog slučajnih promjena snage te su

generirani od uređaja kao što su: lučne peći, frekvencijski pretvarači i uređaji za zavarivanje. [3, 5]

2.3. Harmonijska distorzija

Harmonsko izobličenje opisuje pojave harmonika u elektroenergetskim sustavima koje uzrokuju nelinearni uređaji u distribucijskom sustavu. Nelinearni uređaj definiran je kao onaj kod kojeg struja nije proporcionalna padu napona na tom uređaju. Nadalje, opterećenje je nelinearno ako se njegova impedancija promjeni s promjenom napona. Harmonijska izobličenja mogu se izraziti kao Fourierov niz zbog njegovih karakteristika periodičnoga izobličenja, a prikazano je sljedećom formulom [3]:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2-1)$$

gdje je a_0 je istosmjerna komponenta, a_n i b_n su koeficijenti niza, n je harmonijski poredak, $\omega = 2\pi f$, a f je osnovna frekvencija.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \omega t \, d\omega t \quad (2-2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \omega t \cos(n\omega t) \, d\omega t \quad (2-3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \omega t \sin(n\omega t) \, d\omega t \quad (2-4)$$

Fourierov niz ima neparne harmonike samo ako negativne i pozitivne poluperiode valnog oblika imaju identične oblike. Ovaj je zaključak pojednostavio većinu istraživanja o harmonicima elektroenergetskoga sustava jer su oba polariteta većine nelinearnih uređaja jednaka [3].

2.4. Pokazatelji harmonijskoga izobličenja

a) Ukupno harmonijsko izobličenje (THD)

Najčešći kvantifikator za mjerenje kvalitete električne energije je ukupno harmonijsko izobličenje (*engl.* Total harmonic distortion). Za čimbenik izobličenja napona, ukupno harmonijsko izobličenje može se izraziti kao [3]:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} [\%] \quad (2-5)$$

gdje h označava harmonijski poredak ($h=1$ je osnovni harmonik), V_h je efektivna vrijednost harmonijskoga napona pri h -tom članu harmonijskoga niza, V_1 je efektivna vrijednost nazivnog napona pri nazivnoj frekvenciji.

Isto tako, za ukupno harmonijsko izobličenje kod strujnih prilika, ukupno harmonijsko izobličenje može se izraziti kao [3]:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_1} [\%] \quad (2-6)$$

gdje je I_h - efektivna vrijednost harmonijske struje pri h -tom članu harmonijskog niza, I_1 je efektivna vrijednost nazivne struje pri nazivnoj frekvenciji [3].

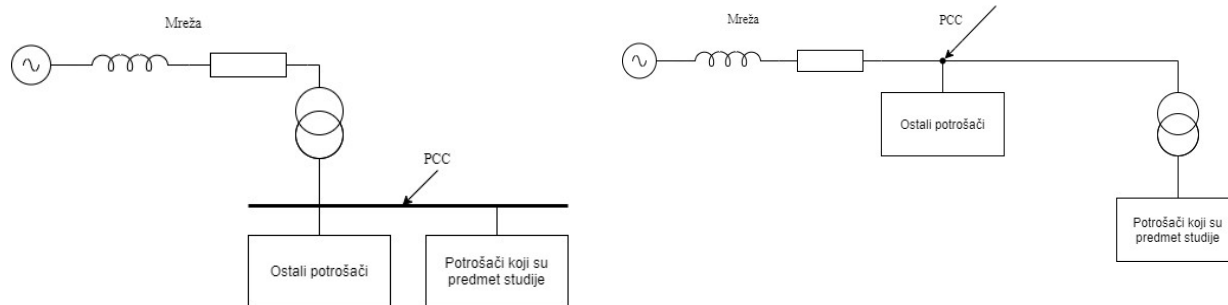
b) Harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju

U pogledu nelinearnog odnosa između harmonijskih komponenata i postotka strujnog THD-a, definicija trenutnog THD može izazvati zabunu prilikom ispitivanja harmonika. Na primjer, mala struja može imati visoku vrijednost THD, ali ne mora predstavljati ozbiljan problem za sustav. Stoga postoji još jedan harmonijski indeks popularniji za analizu harmoničkih struja, a zove se ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju (*engl.* Total Demand Distortion ili TDD). Definira se kao [3]:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_L} [\%] \quad (2-7)$$

gdje je I_L vršna struja opterećenja na osnovnoj frekvenciji na mjestu priključka na mrežu (*engl.* point of common coupling ili PCC), a n ukupni broj harmonika, [3].

Mjesto priključka na mrežu (PCC) je mjesto na kojem se iz sustava, osim promatranoga potrošača mogu opsluživati i drugi potrošači. Slika 2.3. prikazuje koncept mjesta priključka na mrežu (PCC).



a) mjesto priključka na mrežu na sabirnici

b) mjesto priključka na mrežu u čvorištu

Slika 2.3. Odabir mjesta priključka na mrežu (PCC)

2.6. Učinci harmonika

Harmonici elektroenergetskoga sustava pridobili su pozornost u posljednjih nekoliko desetljeća zbog činjenice da pogoršavaju razinu kvalitete napajanja te štetno utječu na gotovo svaku komponentu elektroenergetskih sustava. Učinci harmonika na elektroenergetske sustave navedeni su kako slijedi [3]:

1. Rad upravljačkih sustava je neodgovarajući
2. Pregrijavanje u rotacijskim strojevima
3. Preopterećenje kod transformatora, kondenzatora, rasklopne opreme i kabela
4. Prekomjerne struje u neutralnom vodiču
5. Oštećivanje osjetljive elektroničke opreme

Kao jedan od glavnih čimbenika kvalitete električne energije, harmonici te problemi koji su s njima povezani posljednjih godina stalno se povećavaju. Široka upotreba pretvarača kao uređaja za napajanje, nelinearnost opterećenja te ostali navedeni problemi stvaraju sve veću zabrinutosti kod krajnjih korisnika zbog problema s napajanjem. Kada takvi harmonijski članovi prođu kroz impedancije, na sabirnici tereta generira se harmonijski napon. Izobličeni napon utječe na druga opterećenja koje dijele isti transformator ili isti strujni krug s izvornim opterećenjem koje generira harmonike. Sve to dovodi do gubitaka snage u distribucijskim transformatorima, spojnim vodičima te nekim konvencionalnim opterećenjima poput motora. Također, harmonici uzrokuju smetnje u komunikacijskim krugovima, rezonanciju sustava te abnormalan broj procesa zaštite i iznimno veliki broj komponenata kontrolne opreme.

Međutim, većinu ovih učinaka teško je modelirati zbog neizvjesnosti kod krajnjih korisnika i mrežnih gubitaka koji su uzrokovani harmonicima. Analiza harmonika još uvijek je ograničena u današnjim mrežama za distribuciju električne energije [3].

2.7. Serijska i paralelna rezonancija

Serijska rezonancija dovodi do smanjenja ekvivalentne impedancije sustava i tako dolazi do iznimno velike struje u električnoj mreži. Ako harmoničke komponente struje prouzrokovane nelinearnim potrošačima imaju frekvenciju oko rezonantne frekvencije sustava, tada može doći do jakih distorzija strujnoga ili naponskog valnog oblika [6].

Paralelna rezonancija uzrokuje povećanje ekvivalentne impedancije sustava odnosno do velike vrijednosti napona u električnoj mreži. Posljedica paralelne rezonancije su velike naponske distorzije u mreži, a uzrokovane su harmoničkim komponentama struje koje injektiraju nelinearni potrošači, a frekvencija im je vrlo blizu rezonantne frekvencije strujnoga kruga [6].

3. TEHNIKE MODELIRANJA VIŠIH HARMONIKA I POSTOJEĆE NORME

3.1. Modeliranje harmonika

Za simulaciju i modeliranje elektroenergetskih sustava, dinamički rad odnosi se na dobro definirana kvazi-stacionarna područja. Diferencijalne jednačbe koje predstavljaju dinamiku sustava u svakoj regiji transformiraju se u algebarske relacije, a krug se rješava na osnovnoj frekvenciji pomoću fazora napona i struje.

Suvremeni elektroenergetski sustavi imaju mnogo nelinearnih komponenata i opterećenja koji proizvode harmonike napona i struje. Po definiciji, harmonici proizlaze iz periodičnih stabilnih stanja pa bi njihova simulacija također trebala biti formulirana u smislu harmonijskih fazora. S obzirom na složenu prirodu mnogih nelinearnih opterećenja (izvora) i njihovih spojnica s tokovima snaga, za preciznu simulaciju potrebne su sofisticirane tehnike modeliranja. Za harmonijsku analizu elektroenergetskih sustava u prisutnosti nelinearnih opterećenja i-/ili komponenata obično se koriste tri tehnike, a to su: simulacija vremenske domene, modeliranje frekvencijske (harmonijske) domene i iterativni postupci. Noviji pristupi mogu koristiti vremensku domenu, frekvencijsku domenu ili neku kombinaciju tehnika vremenske i frekvencijske domene kako bi se postiglo točnije rješenje (glavna struktura mnogih harmoničkih algoritama tokova snage temelji se na frekvencijskoj domeni dok se nelinearna opterećenja modeliraju u vremenskoj domeni) [7].

3.2. Simulacija vremenske domene

Dinamičke karakteristike elektroenergetskih sustava predstavljene su u skupu nelinearnih diferencijalnih jednačbi koje se obično rješavaju numeričkom integracijom. Dvije su najčešće korištene tehnike vremenske domene [7]:

- *pristup varijable stanja* koji se opsežno koristi za simulaciju elektroničkih krugova
- *analiza čvorova* koja se obično koristi za elektromagnetsku prijelaznu simulaciju elektroenergetskoga sustava

Dva su glavna ograničenja vezana uz metode vremenskoga područja za proučavanje harmonika [7]:

- Obično im je potrebno značajno vrijeme računanja (čak i za male sustave) za izračunavanje harmonijskih informacija. To uključuje rješavanje stabilnoga stanja i zatim primjenu brze Fourierove transformacije.
- Postoje neke poteškoće u modeliranju vremenskih područja komponenata elektroenergetskoga sustava s distribuiranim ili frekvencijski ovisnim parametrima.

3.3. Simulacija harmonijske domene

Najčešće korišteni model u frekvencijskoj domeni pretpostavlja uravnoteženi trofazni sustav (na osnovnoj frekvenciji) i koristi jednofaznu analizu, jedan izvor harmonika i izravno rješenje. Injektirane harmonijske struje nelinearnih izvora energije modelirane su kao konstantni izvori struje kako bi se omogućilo izravno rješenje. U nedostatku drugih nelinearnih opterećenja, učinak određenoga izvora harmonika često se procjenjuje uz pomoć ekvivalentnih harmonijskih impedancija. Koncept s jednim izvorom i dalje se koristi za dizajn ekvivalentnoga harmonijskog filtera. Sustavi napajanja obično su asimetrični. To opravdava potrebu za višefaznim harmonijskim modelima i protokom snage koji bitno kompliciraju simulacijske postupke [7].

Za realnije slučajeve, ako je u elektroenergetskom sustavu prisutno više od jednog harmonijskog izvora, koncept s jednim izvorom i dalje se može koristiti, pod uvjetom da se interakcija između njih može zanemariti. U tim se slučajevima oslanja na princip superpozicije kako bi se izračunalo ukupno harmonijsko izobličenje u mreži.

3.4. Iterativne simulacijske tehnike

U mnogim modernim mrežama, zbog povećanih udjela snage nelinearnih elemenata (istosmjerni veleprijenos, FACTS uređaji, obnovljivi izvori energije i stambena nelinearna opterećenja) u usporedbi sa snagom kratkoga spoja sustava, primjena superpozicije (kako se primjenjuje tehnikama harmonijske domene) nije opravdana i pružit će netočne rezultate. Uz to, zbog širenja harmonijskih napona i struja, injektirani harmonici svakoga nelinearnog opterećenja funkcija su onih drugih izvora. Za takve sustave mogu se dobiti točni rezultati iterativnim rješavanjem nelinearnih jednadžbi koje opisuju stanja stabilnoga sustava. U svakoj

se iteraciji mogu primijeniti tehnike simulacije harmonijske domene, uključujući sve nelinearne interakcije. Dva su važna čimbenika iterativnih tehnika simulacije harmonijske domene [7]:

- *Izvođenje sistemskih nelinearnih jednadžbi.* Sustav je podijeljen na linearna područja i nelinearne uređaje (opisane izoliranim jednadžbama). Rješenje sustava tada se uglavnom sastoji od rješenja za zadane granične uvjete primijenjene na svaki nelinearni uređaj. Mnoge tehnike predložene su za modeliranje uređaja, uključujući simulaciju vremenske domene, analizu stacionarnog stanja, izrazi vremenske domene, uzorkovanje valnog oblika i analitički izrazi Fourierove transformacije.
- *Rješenje nelinearnih jednadžbi.* Rane metode koristile su postupak ponavljanja Gauss-Seidela sa stalnom točkom. Neke tehnike zamjenjuju nelinearne uređaje u svakoj iteraciji linearnim Nortonovim ekvivalentom (koji se može ažurirati na sljedećoj iteraciji). Najnovije metode koriste se Newtonovim rješenjima i potpuno razdvajaju modeliranje uređaja i rješenje sustava. Koriste razne tehnike poboljšanja numeričke analize kako bi ubrzali postupak rješavanja.

3.5. Modeliranje harmonijskih izvora

Iterativni harmonijski algoritam tokova snaga koristi se za simulaciju elektroenergetskog sustava s nelinearnim elementima. U svakoj iteraciji trebaju biti precizno uključeni izvori harmonika i njihov model treba se ažurirati na sljedećoj iteraciji. Za većinu studija harmoničnih tokova snage prikladno je harmoničke izvore promatrati kao (promjenjive) harmoničke struje. Pri svakoj iteraciji algoritma tokova snage, veličina i fazni kutovi ovih harmoničkih struja trebaju se ažurirati. To se izvodi na temelju harmonskih sprega nelinearnoga opterećenja. Predložene su različite tehnike za izračunavanje i ažuriranje vrijednosti injektiranih harmonijskih struja uključujući:

- ❖ Theveninov i Nortonov ekvivalentni harmonijski krug
- ❖ jednostavni razdvojeni harmonijski modeli za procjenu nelinearnih opterećenja
- ❖ približno modeliranje nelinearnih opterećenja (npr. pomoću nevezanih izvora konstantnog napona ili struje harmonika) na temelju izmjerenih karakteristika napona i struje

- ❖ iterativni nelinearni (vremenski i/-ili frekvencijski temeljeni) modeli za detaljnu i preciznu simulaciju opterećenja koja stvaraju harmonike

3.6. Norme i standardi za harmonijske članove

Razlog uspostavljanja harmonijskih standarda i ograničenja lako je uočiti. Injektiranje harmonijskih članova u mrežu treba biti ograničeno kako bi se osigurala kvaliteta napona s prihvatljivim razinama izobličenja. Injektiranje strujnih harmonika svakoga pojedinog kupca treba biti ograničeno kako ne bi došlo do izobličenja napona sustava. Harmonijske emisije podliježu različitim standardima i propisima [8]:

- ❖ norme emisije koje se primjenjuju na opremu koja uzrokuje harmonike
- ❖ standardi kompatibilnosti za distribucijske mreže
- ❖ preporuke koje je izdao operator mreže i primjenjive na instalacije

3.7. Standard EN50160

Glavni dokument koji se bavi kvalitetom distribucije u Europi i nekim drugim dijelovima svijeta je standard EN 50160:2012. Karakterizira naponske parametre električne energije u javnim distribucijskim sustavima i daje glavne naponske parametre i njihova dopuštena odstupanja u korisnikovoj točki zajedničkoga priključka (PCC) u javnoj distribucijskoj mreži niskoga napona (LV), srednjeg napona (MV) i visokog napona (HV), u uobičajenim radnim uvjetima. Time se definira takozvana minimalna kvaliteta snage dostupne opremi korisnika u točki zajedničkoga priključka (PCC). Ova minimalna kvaliteta potrebna je da bi se omogućilo da instalirana oprema pravilno radi. Ograničenja navedena u normi EN 50160 treba zajamčiti dobavljač. Međutim, za mnoge potrošače čak i ispunjavanje zahtjeva danih u EN 50160 ne znači automatski zadovoljavajuću razinu kvalitete napona bez ikakvih problema. Karakteristike napona u ovom standardu definirane su u smislu frekvencije, veličine, oblika vala i simetrije i uključuju definicije, a u nekim slučajevima i metode mjerenja i razine usklađenosti za 10 karakteristika opskrbnoga napona [8]:

- frekvencija napajanja
- varijacije napona napajanja
- brze promjene napona i treperenje

- padovi napona napajanja
- kratki prekidi
- dugi prekidi
- privremeni i tranzijentni prenaponi
- neravnoteža napona napajanja
- harmonijski napon
- napon mrežne signalizacije

Zahtjevi za harmonijskim naponom u običajnim radnim uvjetima definirani su za razdoblje od 7 dana i 95 % srednjih efektivnih vrijednosti od 10 minuta svakoga pojedinog harmonskog napona. To navedeno razdoblje i iznosi trebaju biti manji ili jednaki vrijednostima danim u tablici 3.1 [8]. Rezonancije mogu uzrokovati veće napone za pojedini harmonik, međutim, THD napona napajanja (uključujući sve harmonike do reda 40) treba biti manji od ili jednak 8 %. [8]

Tablica 3.1. Vrijednosti pojedinih harmonijskih napona na priključcima napajanja dane u postotcima nazivnoga napona

Neparni harmonici				Parni harmonici	
koji nisu višekratnici broja 3		Višekratnici broja 3			
Redosljed harmonika	Relativna U_h amplituda	Redosljed harmonika	Relativna U_h amplituda	Redosljed harmonika	Relativna U_h amplituda
5	6.0%	3	5.0%	2	2.0%
7	5.0%	9	1.5%	4	1.0%
11	3.5%	15	0.5%	6..24	0.5%
13	3.0%	19	0.5%		
17	2.0%				
19	1.5%				
23	1.5%				
25	1.5%				

3.8. Standard IEEE 519

IEEE 519 predstavlja zajednički pristup mrežnih operatora i korisnika kako bi se ograničio utjecaj nelinearnih opterećenja. Ova preporučena praksa želi uspostaviti ciljeve za projektiranje električnih sustava koji uključuju linearna i nelinearna opterećenja. Opisani su valni oblici napona i struje koji mogu postojati u cijelom sustavu i utvrđeni su ciljevi izobličenja valnoga oblika za operatora sustava. Sučelje između izvora i opterećenja opisano je kao točka

zajedničkoga priključka, a poštivanje ciljeva dizajna umanjit će smetnje između električne opreme. Ova preporučena praksa bavi se ograničenjima u stabilnom stanju. Mogu se pojaviti privremeni uvjeti koji prelaze ova ograničenja. Ovaj dokument postavlja kvalitetu napajanja koja se treba pružiti na mjestu zajedničkoga spoja.

Filozofija razvijanja harmonijskih granica u IEEE 519 je [8]:

- ograničiti harmonijsko injektiranje pojedinih kupaca tako da oni ne izazivaju neprihvatljive razine izobličenja napona za uobičajene karakteristike sustava
- ograničiti harmonijsko izobličenje sustava koji isporučuje elektroenergetska mreža

Tablica 3.2. [8] navodi osnovu za ograničenja harmonijskih struja, omjer I_{sc}/I_L omjer je kratkog spoja dostupan u točki zajedničkoga priključka (PCC) i najveće struje osnovnoga opterećenja.

Tablica 3.2. Ograničenja strujnih izobličenja za opće distribucijske sustave (120V do 69000V)

I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4.0	2.0	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

3.9. Standard IEC 61000-3-2 za niskonaponsku opremu s nazivnom strujom manjom ili jednakom 16 A

Standard IEC 61000-3-2 obuhvaća preporuke za ograničenja harmonijskih struja koje u sustav javne opskrbe injektira bilo koji uređaj s nazivnom strujom ispod ili jednakom 16 A po fazi i namijenjen povezivanju s javnim niskonaponskim distribucijskim sustavima. Standardom se utvrđuju ograničenja harmonijskih komponenata ulazne struje koje može proizvesti oprema testirana pod određenim uvjetima. Cilj ovog standarda je postaviti ograničenja za harmonijske emisije opreme iz svog opsega tako da uz uvažavanje emisija iz druge opreme uz poštovanje ograničenja osigurava da razine harmonijskih poremećaja ne prelaze razine kompatibilnosti [8].

4. METODE ZA UBLAŽAVANJE VIŠIH HARMONIKA

Postoje razne metode za ublažavanje viših harmonika u niskonaponskoj mreži. Različiti pristupi ublažavanja viših harmonika imaju različite prednosti i mane, a dijele se u tri skupine [9]:

1. Promjena rezonantne frekvencije sustava
2. Smanjenje intenziteta harmonijskih struja
3. Ugradnja filtera

Viši harmonici struja i napona stvaraju probleme i ometaju uobičajen rad električne i elektroničke opreme. Tri su osnovna slučaja ometanja rada električne i elektroničke opreme [6]:

- a) izvor viših harmoničkih komponenti veći je od dopuštenoga
- b) harmonijske struje koje prolaze kroz mrežu su toliko velike da mogu prouzrokovati distorzije napona u sustavu
- c) odziv sustava je takav da za posljedice ima povišenje vrijednosti napona i struja, odnosno pojavu rezonancije

4.1. Promjena rezonantne frekvencije sustava

Primjena ove metode koristi se na sustave ili kod korisnika koji posjeduju kondenzatorske baterije za kompenzaciju reaktivne snage. Problem je u tome što je često rezonantna frekvencija kondenzatorskih baterija blizu frekvencije viših harmonika te može doći do neželjenih negativnih pojava. Problemi ovoga tipa često se rješavaju dodavanjem serijske impedancije, promjenom dimenzija kondenzatorskih baterija, spajanjem kondenzatorskih baterija na drugu sabirnicu ili potpunim uklanjanjem kondenzatorskih baterija [9].

4.2. Smanjenje intenziteta harmonijskih struja

Metoda smanjenja intenziteta harmonijskih struja zahtijeva mijenjanje načina rada uređaja koji generiraju harmonike, a samim time se topologija mreže treba izmijeniti. Vrlo je zahtjevno praktično izvesti ovu metodu jer može u cijelosti utjecati na proizvodni proces. Prilikom projektiranja mogu se provesti mjerenja u računalnim programima te tako modelirati rješenje problema s višim harmonicima. Sljedeći način smanjenja intenziteta harmonijskih struja je spoj namota transformatora u trokut čiji je rezultat blokada svih harmonika koji su

višekratnici broja tri uključujući i treći harmonik. Ako želimo eliminirati peti i sedmi harmonik tada ćemo unijeti fazni pomak od 30° te spojiti sekundar transformatora u zvijezdu i trokut [9].

4.3. Ugradnja filtera

Ugradnja filtera ima jednostavnu primjenu. Naime, osigurava se niska impedancija filtera te tako harmonijske struje koje bi išle u mrežu prolaze kroz filter. Tako je spriječeno širenje harmonijskih struja u ostatak mreže. Rezonantna frekvencija filtera treba biti manja od nazivne frekvencije dominantnoga harmonika.

Filteri se dijele na: pasivne i aktivne. *Pasivni filteri* često su u paralelnom spoju s izvorom harmonika. Nedostatak ove metode je što kondenzatori i induktiviteti posjeduju svoje induktivnosti i kapacitivnosti te mogu smanjiti rezonantnu frekvenciju filtera te tako pogoršati situaciju s rezonancijom. Nadalje, efekt starenja dielektrika nepovoljno utječe na rezonanciju sustava tako što je kapacitet kondenzatora smanjen, a rezultat je povećanje rezonantne frekvencije. *Aktivni filteri* elektroenergetski su pretvarači čija je svrha smanjenje viših harmonika. Oni prate izlazne struje uređaja koje su nesinusne (harmonijske) i na osnovi tih struja generiraju struju koja superponirana s tim strujama daje sinusnu struju na izlazu [9].

4.4. Električni filteri

Osnovna zadaća električnih filtera osiguranje je niske impedancije kroz koju će poteći odabrane više harmoničke struje. Tako se spriječava širenje viših harmonika u sustav. Električni filteri ugrađuju se paralelno na nelinearna trošila koja su izvor viših harmonika. Tvore se od jednoga ili više kondenzatora s prigušnicom. Serijski spoj prigušnice i kondenzatora zapravo predstavljaju kratak spoj pri određenoj frekvenciji te tako harmonijska struja na toj frekvenciji protječe kroz taj spoj. Iz harmonijskoga spektra zadanog nelinearnog potrošača određuje se dominantan strujni harmonik te se proračuna rezonantna frekvencija električnoga filtera takva da se podudara s frekvencijom dominantnoga harmonika. Tada će ugrađeni paralelni filter predstavljati kratak spoj za tu određenu komponentu harmonijske struje. Na ovaj način mogu se dodatno ugraditi električni filteri koji propuštaju ostale dominantne harmonijske komponente struje nelinearnoga potrošača. Što je više takvih elektroničkih filtera paralelno spojenih na nelinearnoga potrošača koji generira više harmonike, to će struja sustava biti bliža idealnom

sinusnom obliku, ali svaki dodatni filter zahtijeva dodatna financijska sredstva. Serijski spoj kondenzatora i prigušnice su filteri koji se nazivaju pasivni električni filteri [6].

Aktivni elektronički filteri sadržavaju energetske pretvarače koji se ugrađuju u stvarnom vremenu tako da vrše potpunu kompenzaciju viših harmonika. Spajaju se paralelno na izvor harmonika te mjere nelinearne struje izvora harmonika. Na osnovi te struje generiraju izobličenu struju filtera koja superpozicijom s nelinearnom strujom izvora u mrežu šalje idealnu sinusoidalnu struju. S ovim filterima može se postići gotovo idealna sinusoidalna struja s vrlo visokim faktorom snage. Gledajući sa strane mreže ovakvi filteri, u kombinaciji s nelinearnim trošilom, predstavljaju gotovo linearni radni otpor.

Prednosti aktivnih filtera u odnosu na pasivne su [6]:

- ne dolazi do pregrijavanja
- mogu služiti istovremeno kao uređaji za poboljšanje faktora snage te za filtriranje harmonika
- neovisni su o rezonanciji u sustavu
- mogu biti ugrađeni u sustave za neprekinuto napajanje (UPS)

Postoji jedna mana aktivnih filtera u odnosu na pasivne, a to je da su mnogo skuplji.

4.5. Klasifikacija filtera korištenih u elektroenergetskom sustavu

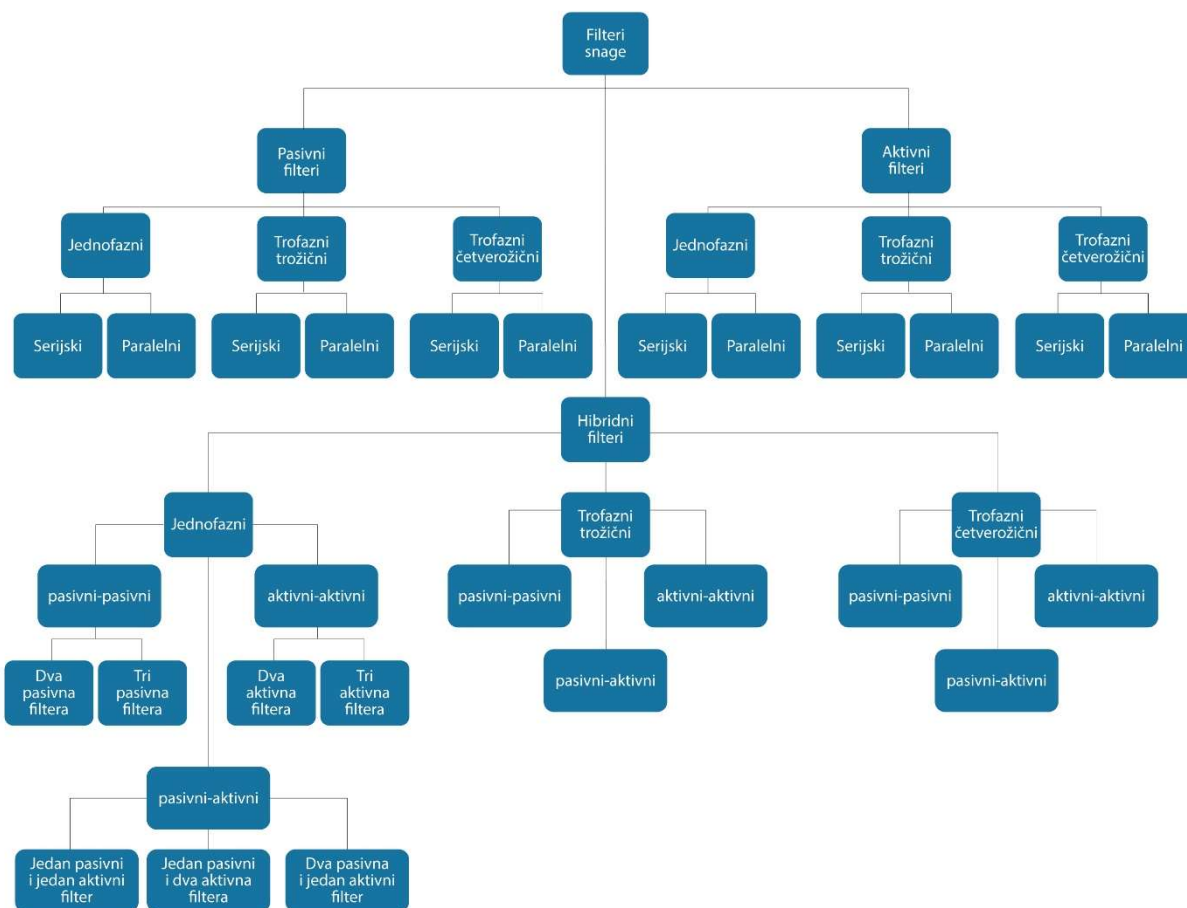
Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća broj i vrste nelinearnih opterećenja izrazito su se povećali. To je motiviralo operatore mreže i potrošače električne energije da implementiraju različite harmoničke filtere. Filteri su sposobni kompenzirati harmonike nelinearnih opterećenja kompenzacijom na temelju struje. Oni mogu poboljšati kvalitetu izmjeničnoga napajanja, na primjer, kompenzacijom harmonika napona, naponskih propada, špiceve napona, treperenja, prenapona i neravnoteže tehnikama temeljenim na naponu. Filteri se obično instaliraju u blizini ili blizu točaka izobličenja, na primjer, paralelno s nelinearnih opterećenja kako bi se osiguralo da harmoničke struje ne ulaze u elektroenergetski sustav. Filteri mogu biti dizajnirani za smanjenje harmoničkih struja i usmjeravanje prema uzemljenju pomoću kondenzatora, zavojnica i otpornika. Zbog niže impedancije filterskog elementa (pri određenoj frekvenciji) u usporedbi s impedancijom izvora izmjenične struje, harmoničke struje će cirkulirati između opterećenja i filtera i neće utjecati na sustav. Filter može sadržavati nekoliko

ovih filterskih elemenata, svaki dizajniran kako bi kompenzirao određenu harmoničnu frekvenciju ili niz frekvencija. Filteri su često najčešći pristupi rješenjima koji se koriste za ublažavanje harmonika u elektroenergetskim sustavima. Za razliku od ostalih rješenja, filteri nude jednostavnu i jeftinu mogućnost s iznimnim prednostima [7].

Klasifikacija filtera može se izvršiti na temelju različitih kriterija uključujući sljedeće [7]:

- broj i vrsta elemenata (npr. jedan, dva ili više pasivnih i/-ili aktivnih filtera)
- topologija (npr. paralelno povezan, serijski povezan ili njihova kombinacija)
- sustav napajanja (npr. jednofazni, trofazni trožični i trofazni četverožični)
- vrsta nelinearnoga opterećenja kao što su opterećenja izvora struje i/-ili napona
- nazivna snaga (npr. mala, srednja i velika snaga)
- kompenzirana varijabla (npr. harmonička struja, harmonijski napon, reaktivna snaga i uravnoteženje faze te višestruka kompenzacija)
- tip pretvarača
- tehnika upravljanja (npr. otvorena petlja, stalni napon kondenzatora, konstantna struja prigušnice, linearna regulacija napona ili optimalna regulacija)
- referentna tehnika procjene (npr. vremenska i/-ili frekvencijska procjena struje-/napona)

Različite topologije kao što su: pasivni filter (PF), aktivni filter (AF) i hibridni filter (HF), pretvarač, serija i pretvarač/serija za jednofazne, trofazne trožične i trofazne četverožične sustave instalirani su pomoću pretvarača izvora struje i pretvarača napona za ugradnju upravljačkih filtera. Slika 4.1. prikazuje klasifikaciju filtera koji se koriste u elektroenergetskim sustavima na temelju sustava napajanja s topologijom kao potklasifikacija. Daljnja klasifikacija provodi se na temelju broja i vrsta elemenata koji se koriste u različitim topologijama. Prema Slici 4.1. postoji 156 valjanih konfiguracija pasivnih, aktivnih i hibridnih filtera. Svaka klasa filtera nudi jedinstveno rješenje za poboljšanje kvalitete električne energije. Izbor filtera ovisi o prirodi problema kvalitete električne energije, potrebnoj razini i brzini kompenzacije kao i ekonomskim troškovima povezanim s njegovom provedbom [7].

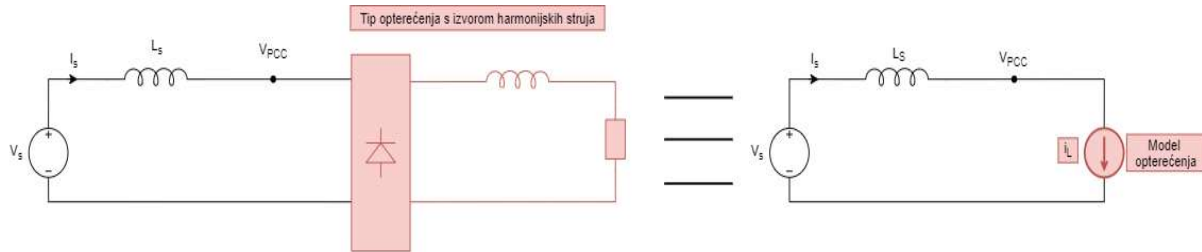


Slika 4.1. Klasifikacija filtera u elektroenergetskim sustavima [7]

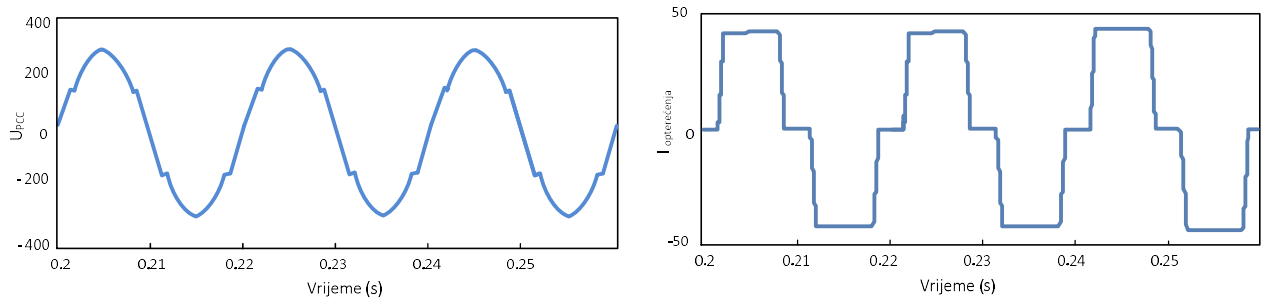
4.6. Modeliranje nelinearnih opterećenja

Harmonijska analiza elektroenergetskoga sustava poznaje tehnike koje se mogu primijeniti na linearne krugove u ustaljenom stanju. Te se tehnike razlikuju ovisno o potrebnim podatcima, složenosti modela, formulaciji problema i računalnim algoritmima koji se koriste. Nelinearna opterećenja smatraju se izvorima koji injektiraju harmonike u linearnu mrežu. Ovisno o vrsti harmonika i njihovom ponašanju u sustavu, nelinearna opterećenja mogu se smatrati opterećenjima izvora struje ili napona. Među vrstama nelinearnih opterećenja naći će se tip opterećenja čija je ulazna struja gotovo nepromjenjiva prema promjenama impedancije izvora tako da se može smatrati nelinearnim opterećenjem koje generira harmonijske članove koji su izvor struje. Harmonijsko izobličenje napona na mjestu priključka na mrežu (PCC) koja stvara ovu vrstu opterećenja obično je relativno nisko, obično manje od 5%. Slika 4.2. [10]

prikazuje model za ovu vrstu opterećenja koji se sastoji od idealnoga izvora struje te predstavlja harmonike injektirane od opterećenja. Slika 4.3. [10] prikazuje napon i struju za opterećenje ovog tipa. Slika 4.3. prikazuje kako je harmonijsko izobličenje struje mnogo veće od izobličenja napona na opterećenju.



Slika 4.2. Model nelinearnog opterećenja - izvor harmonijskih struja

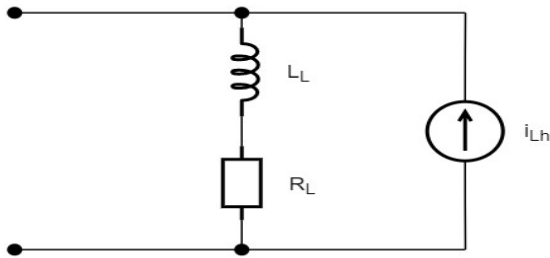


Slika 4.3. Valni oblici napona i struje nelinearnog opterećenja

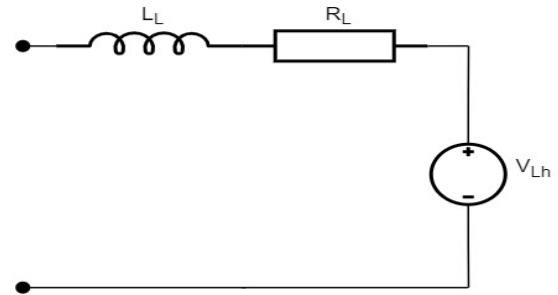
Za analizu ustaljenoga stanja ovaj je jednostavni model obično dovoljan za većinu primjena. Međutim, u određenim situacijama ovaj model nije primjeren pa je potrebno učiniti frekvencijsku analizu ili analizu prijelaznog stanja. U takvim se slučajevima može koristiti model u kojem je nelinearno opterećenje prikazano Nortonovim ili Thevenin ekvivalentom, odnosno stvarnim izvorom struje ili stvarnim izvorom napona. Nadalje, vrijednost ekvivalentne impedancije treba odrediti pomoću terenskih mjerenja ili detaljnih simulacijskih modela nelinearnoga opterećenja. Vrijednosti parametara elemenata koji čine spomenute modele mogu se odrediti mjerenjem harmonika napona i struje tereta u dva različita radna uvjeta. Tako se u krugu na Slici 4.6. [10] može vidjeti da spajanje ili odvajanje prekidača k_1 dovodi do različitih vrijednosti napona opterećenja V_h , harmoničke struje I_h i struje I_{zn} . Vrijednosti struje $I_{h,1}$, i napona $V_{h,1}$, prije zatvaranja k_1 , zajedno s vrijednostima napona i struje, $I_{h,2}$, $V_{h,2}$, nakon zatvaranja sklopke omogućuju nam rješavanje jednadžbi:

$$Z_{N,h} = \frac{V_{h,1} - V_{h,2}}{I_{h,1} - I_{h,2}} [\Omega] \quad (4-1)$$

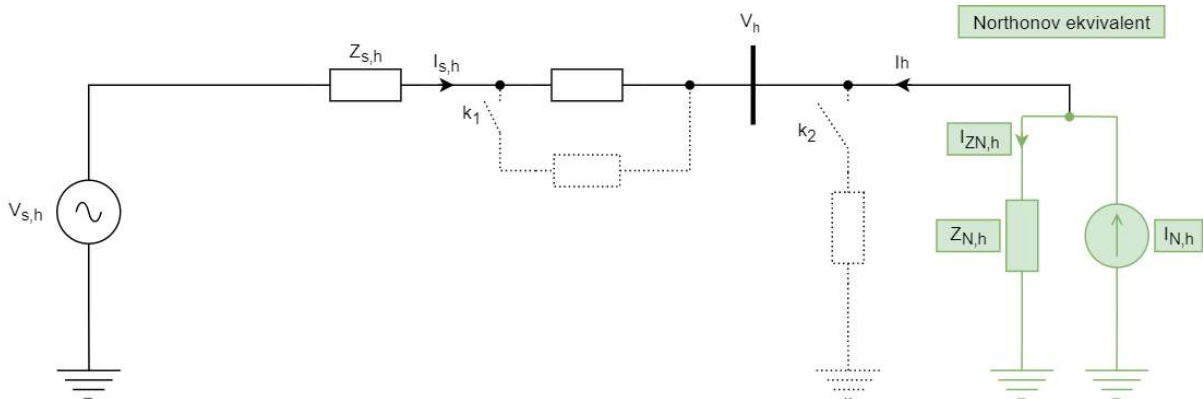
$$I_{N,h} = I_{h,1} + \frac{V_{h,1}}{Z_{N,h}} [A] \quad (4-2)$$



Slika 4.4. Northonov model nelinearnoga opterećenja



Slika 4.5. Theveninov model nelinearnoga opterećenja



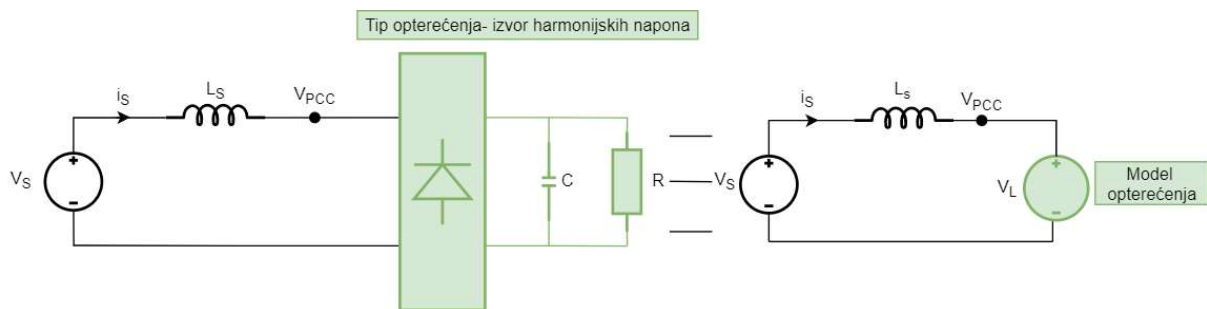
Slika 4.6. Određivanje Nortonova ekvivalenta nelinearnoga opterećenja

Te se jednadžbe mogu koristiti za izračunavanje Nortonova izvora struje i ekvivalentne impedancije za svaki harmonik. Trebamo brinuti da su jednadžbe (4-1) i (4-2) složene tako da su potrebne ne samo mjere efektivnih vrijednosti napona i struje već i mjerenja faznih kutova. Također, važno je da se mjerenja provedena za dva skupa radnih uvjeta trebaju odnositi na fazni kut zajedničke varijable koji se ne mijenja sa stanjem sustava. Na Slici 4.6. ova referenca je napon $V_{s,h}$.

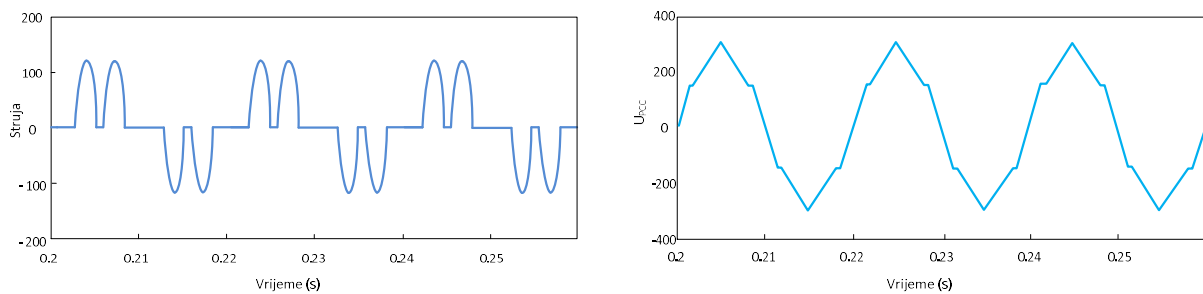
Slične se jednadžbe mogu koristiti pri razmatranju spajanja i odvajanja sklopke k_2 u krugu sa Slike 4.6. Ovaj model opterećenja omogućuje bolju točnost u širem rasponu radnih uvjeta od idealnog modela s trenutnim izvorom. Sljedeća važna značajka predložene metode za dobivanje

ekvivalentnih parametara Nortona i Thevenina jest da nije potrebno sustav poznavati u potpunosti.

Postoje i druge vrste opterećenja kod kojih na struju koja teče utječe vrijednost impedancije izvora. Međutim, napon na PCC ostaje nepromijenjen uz razumne promjene impedancije dovodne strane te se može smatrati da se ovo opterećenje ponaša poput izvora harmonijskoga napona (H_{VS}) spojenoga na mrežu, Slika 4.7.



Slika 4.7. Model nelinearnoga opterećenja - izvor naponskih harmonika



Slika 4.8. Valni oblici struje i napona - izvor naponskih harmonika

Tipičan primjer H_{VS} opterećenja je ispravljač s velikim kondenzatorom za uklanjanje vala i postizanje bitno konstantnoga napona na istosmjernoj strani. Na Slici 4.8. prikazani su valni oblici struje i napona na PCC za ovo opterećenje tipa ispravljača. Varijacije impedancije izvora održavaju napon na PCC u osnovi konstantnim pa bi se u ovom slučaju mogao koristiti idealan model izvora napona na Slici 4.7. [10]

5. SIMULACIJA U PROGRAMSKOM PAKETU DIGSILENT

Mjerenje kvalitete električne energije obavljena su u ruralnom prigradskom naselju koje se nalazi u blizini Osijeka. Mjerenja kvalitete električne energije na navedenom izvodu obavljena su prema normi HRN EN 50160 uređajem A klase točnosti, A-Eberle PQ box 200. Dobiveni mjerni podatci uneseni u softver DIgSILENT PowerFactory te je obavljena analiza istih.

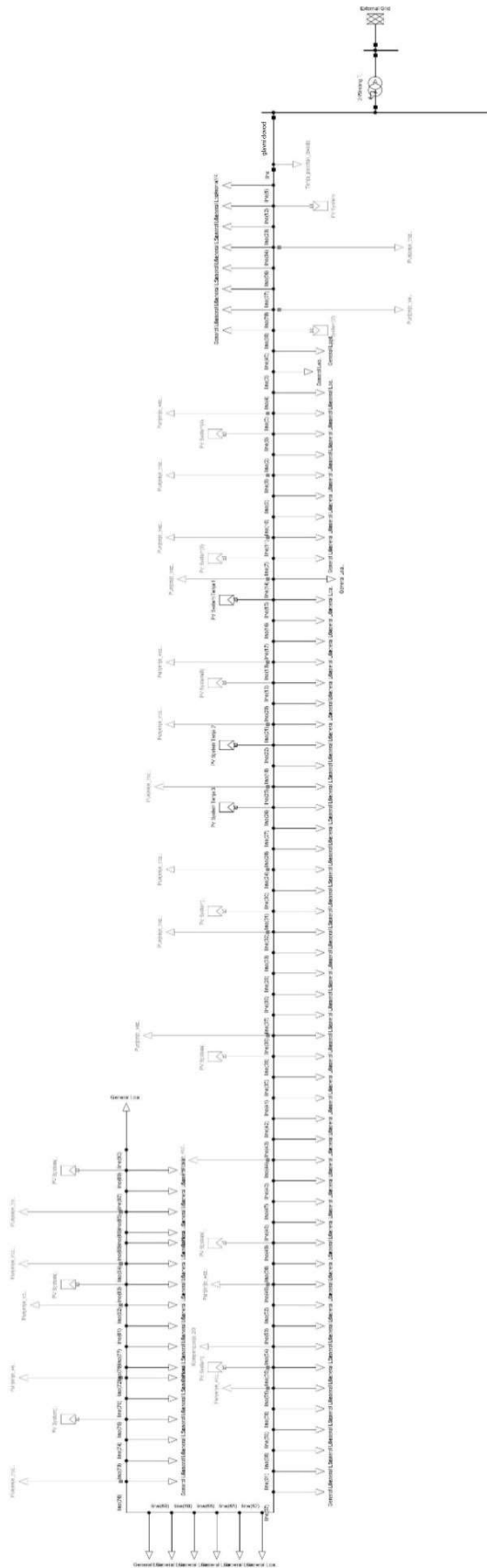
5.1. Analiza niskonaponskih izvoda pomoću programskoga paketa DIgSILENT PowerFactory, ruralno područje pored Osijeka

Tijekom sedmodnevnoga mjerenja dobiveni mjerni podatci obrađeni su te se kao referentna vrijednost odabrao lokalni maksimum opterećenja. Odabrana vrijednost upotrebljavana je u svim daljnim analizama i scenarijima.

Scenariji obuhvaćaju mjerenje harmonijskoga spektra struja, efektivne vrijednosti struje za svaku fazu i u neutralnom vodiču uz odgovarajuće kuteve te ukupni čimbenik harmonijskoga izobličenja struje na tri mjerna mjesta (na početku izvoda, na sredini izvoda i na kraju izvoda). Analize pogonskih stanja započinju sa simuliranim stanjem promatranoga izvoda za trenutak obuhvaćen sedmodnevnim mjerenjem kvalitete električne energije kada su izmjereni najveći relativni udjeli viših harmonika uz najveće razlike opterećenja faznih vodiča te najnižega faktora snage. Na promatranom izvodu nalaze se tri fotonaponske elektrane, a svaka elektrana ima instaliranu snagu od 10 kWp.

Opterećenje promatranoga izvoda je nesimetrično i iznosi da je opterećenja faze „L1“ približno 50 % više od opterećenja faze „L2“ te približno 90% veće od opterećenja faze „L3“. Analiza mjerenog izvoda obuhvaća četiri različita scenarija. Prvi scenarij, tj. scenarij „A“ je postojeće stanje mreže u kojem se promatraju izmjerene vrijednosti. Na postojećem izvodu iz scenarija „A“ priključuje se aktivni filter snage koji se spaja paralelno u topologiju sa Slike 5.1. te se premješta u scenariju B - na početak izvoda, u scenarij C - na sredinu izvoda i u scenarij D - na kraj izvoda.

U programskom paketu DigSilent PowerFactory priključenjem aktivnoga filtera snage (APF) u zadanu topologiju mogući su utjecaji na više harmonike u fazama L1, L2 i L3, ali utjecaj na više harmonike u neutralnom vodiču nije moguć.



Slika 5.1. Topologija mreže u programskom paketu DigSilent PowerFactory

5.1.1. Scenariji A: Stvarno stanje ruralnoga izvoda

Kod analize dobivenih mjerenja promatra se opterećenje glavnoga voda kojim se spajaju potrošači od transformatorske stanice. Kroz navedeni vodič teče ukupna struja izvoda i njegovo opterećenje ograničava maksimalnu struju aktivnoga filtera snage koji će se dodavati u mrežu. Osim opterećenja glavnoga voda, promatra se ukupno harmonijsko izobličenje THD te se promatraju pojedinačno neparni harmonici od 1. do 15. harmonika.

Opterećenje voda: glavni dovod iznosi 58,2 %

Tablica 5.1. Ukupno harmonijsko strujno izobličenje po fazama

	L1 (%)	L2 (%)	L3 (%)	N(%)
Početak izvoda	8,752	7,479	10,253	29,156
Sredina izvoda	8,769	7,494	10,523	28,980
Kraj izvoda	8,831	7,529	10,576	28,922

Tablica 5.1. prikazuje ukupno harmonijsko izobličenje struja za svaku od tri faze te neutralni vodič na tri mjerna mjesta. Uočljivo je da je THD_I približno jednak po fazama i u nul - vodiču za sva tri mjerna mjesta.

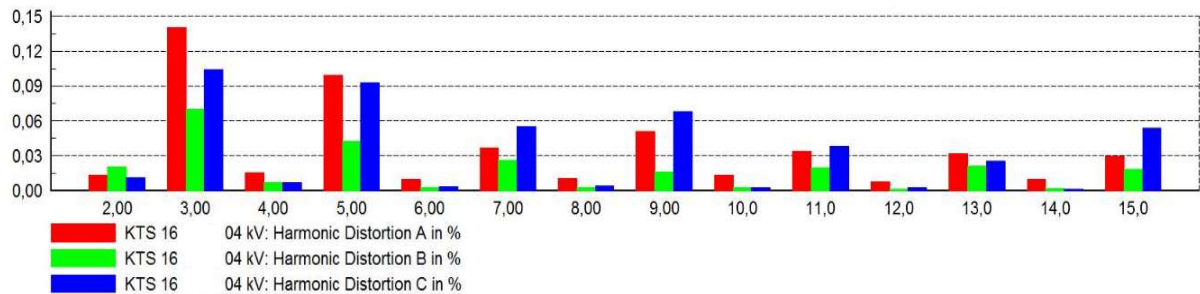
Tablica 5.2. Efektivne vrijednosti struja po fazama i u neutralnom vodiču

	I_{L1} (A)	I_{L2} (A)	I_{L3} (A)	I_{Ln} (A)
Početak izvoda	150,158	89,236	99,986	76,864
Sredina izvoda	79,054	45,840	49,693	38,906
Kraj izvoda	25,979	14,971	16,252	12,797

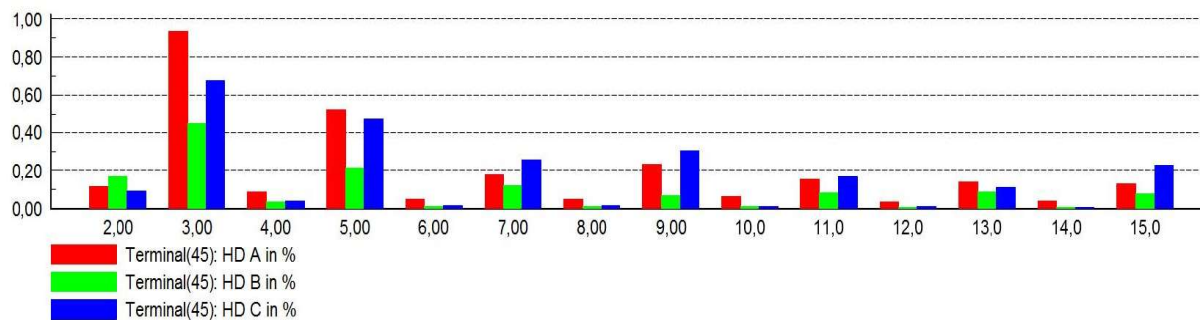
Tablica 5.3. Kutevi struja po fazama i u neutralnom vodiču

	L1 (°)	L2 (°)	L3 (°)	N(°)
Početak izvoda	-150,374	89,801	-30,192	-121,628
Sredina izvoda	-151,552	89,229	-28,198	-128,001
Kraj izvoda	-151,849	89,038	-27,552	-128,556

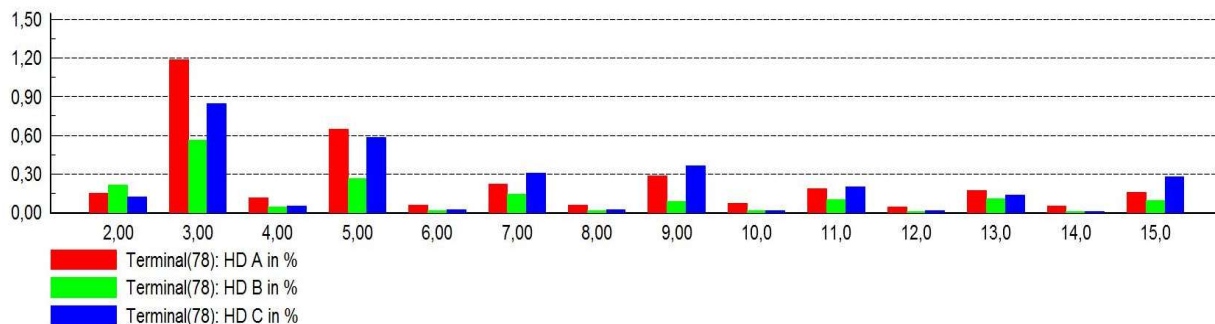
Smanjenje vrijednosti struja koje su vidljive u Tablici 5.2. prikazuje da se efektivne vrijednosti struja smanjuju od početka izvoda prema kraju izvoda, odnosno da obnovljivi izvori energije svoju energiju troše lokalno, a pozicija fotonaponskih elektrana to omogućava.



Slika 5.2. Harmonijski spektar struja na početku izvoda



Slika 5.3. Harmonijski spektar struja na sredini izvoda



Slika 5.4. Harmonijski spektar struja na kraju izvoda

Grafovi 5.2., 5.3. i 5.4. prikazuju harmonijski spektar struja prvih petnaest harmonika. Treći harmonik u sve tri faze ima najveću vrijednost te je on dominantni harmonik. Slijedi peti harmonik te harmonici koji su višekratnici broja tri. Parni harmonici vrlo su mali u usporedbi s dominantnim harmoikom. Apsolutne vrijednosti prvih petnaest harmonika povećavaju se od početka izvoda prema kraju izvoda te su najveće na mjernom mjestu - kraju izvoda.

5.1.2. Scenariji B: Aktivni filter snage (APF) priključen na početku izvoda

Scenariji „B“ obuhvaća postavljanje aktivnoga filtera snage (APF) u točku pod čije je naslov „Diplomski_mjerenja“ koja se nalazi na samom početku izvoda. Scenarij obuhvaća već navedena mjerenja THD-a, mjerenja viših harmonika od 1 do 15 te opterećenje voda „glavni dovod“ koje kod ovoga scenarija iznosi 76,1 %.

Ako mjerne rezultate usporedimo s početnim Scenarijem „A“ može se primijetiti porast opterećenja voda „glavni dovod“ za nešto manje od 20 %. Razlog povećanja opterećenja je priključenje aktivnoga filtera snage. Nazivna struja filtera odabrana je prema najvećoj nazivnoj struji u pojedinoj fazi na mjestu predviđenom za priključak APF-a kada se pokrenu nesimetrični tokovi snaga i ona iznosi $I = 106 \text{ A}$.

Tablica 5.4. Ukupno harmonijsko strujno izobličenje po fazama

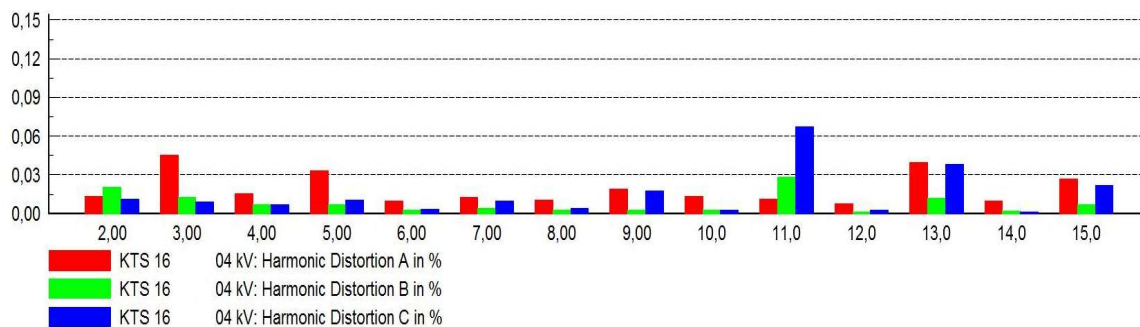
	L1 (%)	L2 (%)	L3 (%)	N(%)
Početak izvoda	2,461	1,871	1,337	29,162
Sredina izvoda	8,781	7,514	10,535	28,927
Kraj izvoda	8,842	7,550	10,588	28,870

Tablica 5.5. Efektivne vrijednosti struja po fazama i u neutralnom vodiču

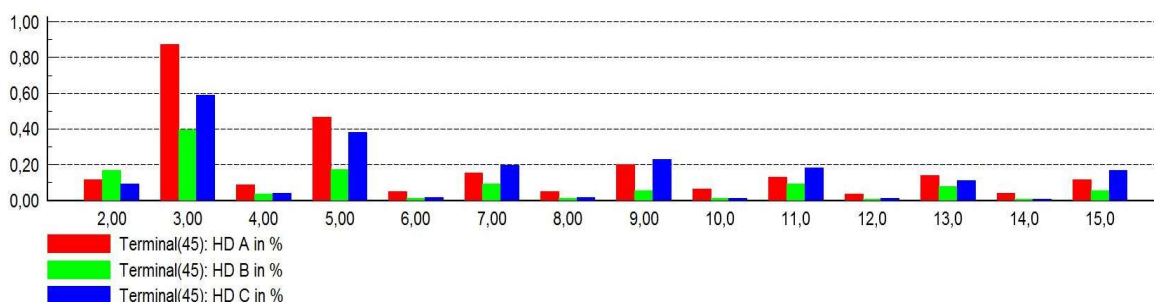
	I_{L1} (A)	I_{L2} (A)	I_{L3} (A)	I_{Ln} (A)
Početak izvoda	150,817	89,624	100,426	77,190
Sredina izvoda	77,575	44,975	48,765	38,177
Kraj izvoda	26,087	15,036	16,324	12,849

Tablica 5.6. Kutovi struja po fazama i u neutralnom vodiču

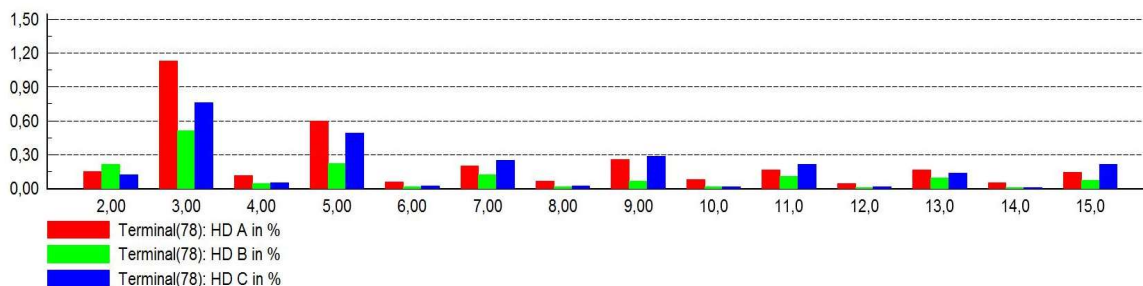
	L1 (°)	L2 (°)	L3 (°)	N(°)
Početak izvoda	-150,275	89,902	-30,092	-121,530
Sredina izvoda	-151,464	89,324	-28,078	-127,904
Kraj izvoda	-151,764	89,132	-27,424	-128,460



Slika 5.5. Harmonijski spektar struja na početku izvoda (APF na početku izvoda)

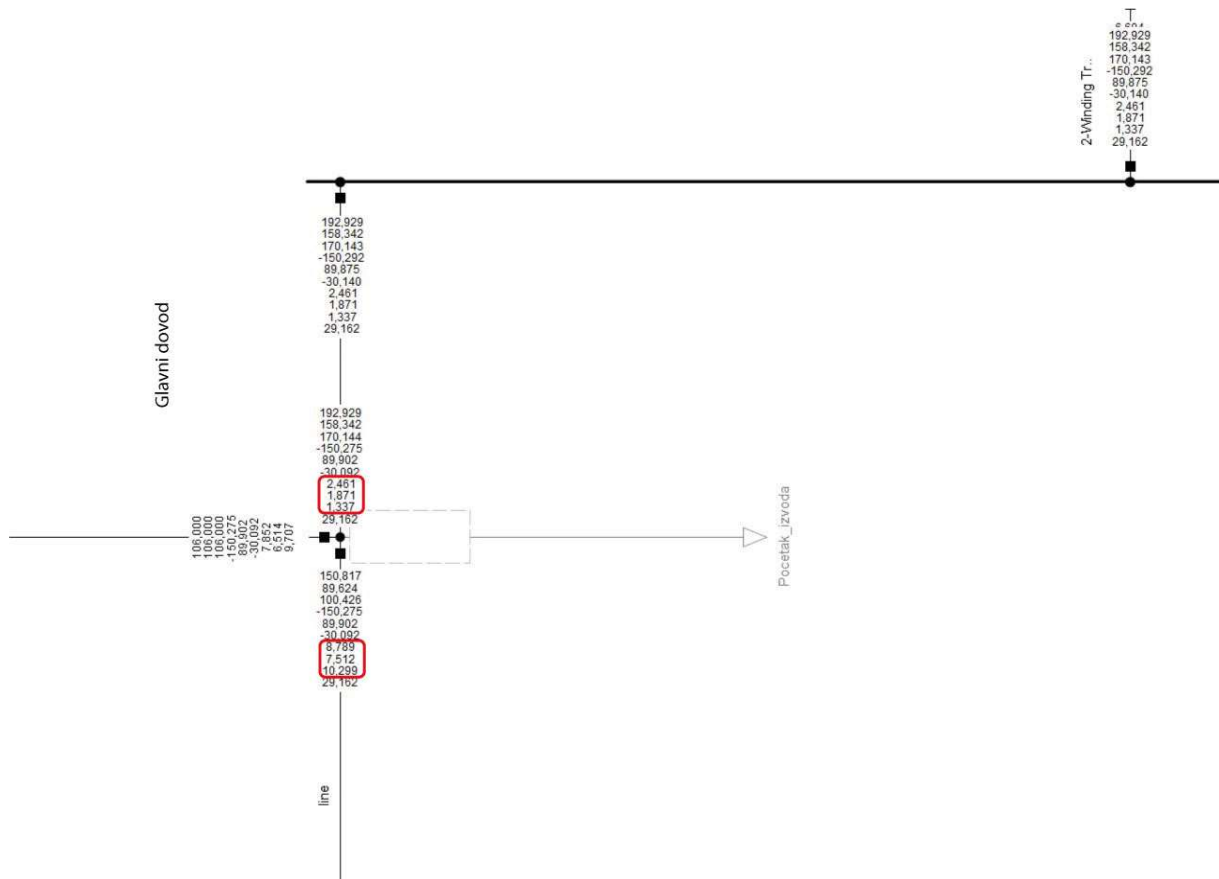


Slika 5.6. Harmonijski spektar struja na sredini izvoda (APF na početku izvoda)



Slika 5.7. Harmonijski spektar struja na kraju izvoda (APF na početku izvoda)

Usporedba harmonijskog spektra struja sa Slika 5.2. i 5.5. uočava se značajno smanjenje većine harmonika u sve tri faze nakon priključenja aktivnoga filtera snage. Takvo smanjenje pojedinih harmonika rezultat je značajnoga smanjenja ukupnoga harmonijskog izobličenja na početku izvoda u sve tri faze što je vidljivo u Tablici 5.4. Ukupno harmonijsko izobličenje i harmonijski spektar struja na sredini izvoda i na kraju izvoda ostaju približno jednaki kao i u scenariju A.



Slika 5.8. Točka spajanja APF-a

Analiza slike 5.8. prikazuje da se vrijednost THD_I vraća na vrijednost koja je bila u scenariju A nakon mjesta gdje je spojen APF. Nakon mjesta u kojem je spojen aktivni filter snage dolazi i do povećanja harmonijskih struja u sve tri faze, a time i do povećanja ukupnoga harmonijskog izobličenja struje.

5.1.3. Scenariji C: Aktivni filter snage na sredini izvoda

Scenarij C ne povećava značajno opterećenja napojnoga voda s obzirom na scenarij B, ali nije zanemarivo s obzirom na početno stanje. Kod Scenarija C opterećenje voda „glavni dovod“ iznosi 83,4 %.

Tablica 5.7. Ukupno harmonijsko strujno izobličenje po fazama

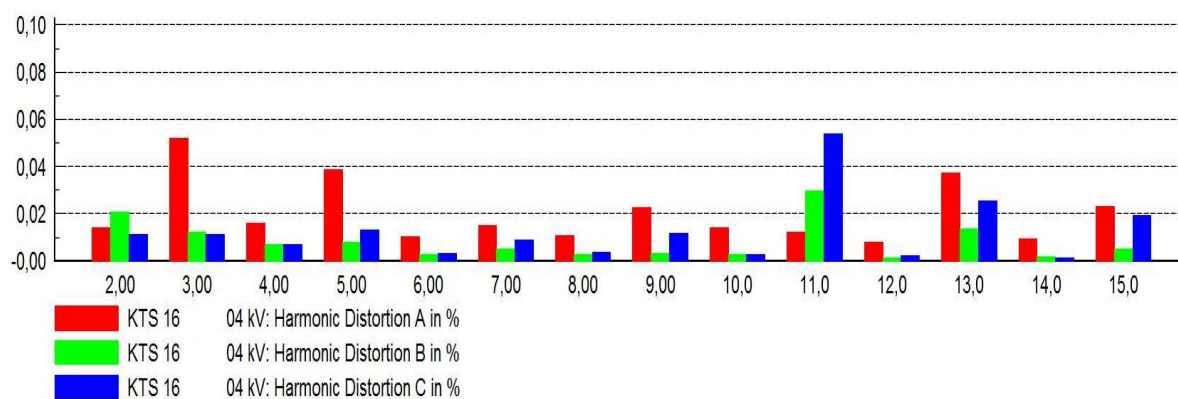
	L1 (%)	L2 (%)	L3 (%)	N(%)
Početak izvoda	2,511	1,694	1,301	28,512
Sredina izvoda	1,445	3,132	4,025	28,287
Kraj izvoda	7,999	7,050	9,855	28,130

Tablica 5.8. Efektivne vrijednosti struja po fazama i u neutralnom vodiču

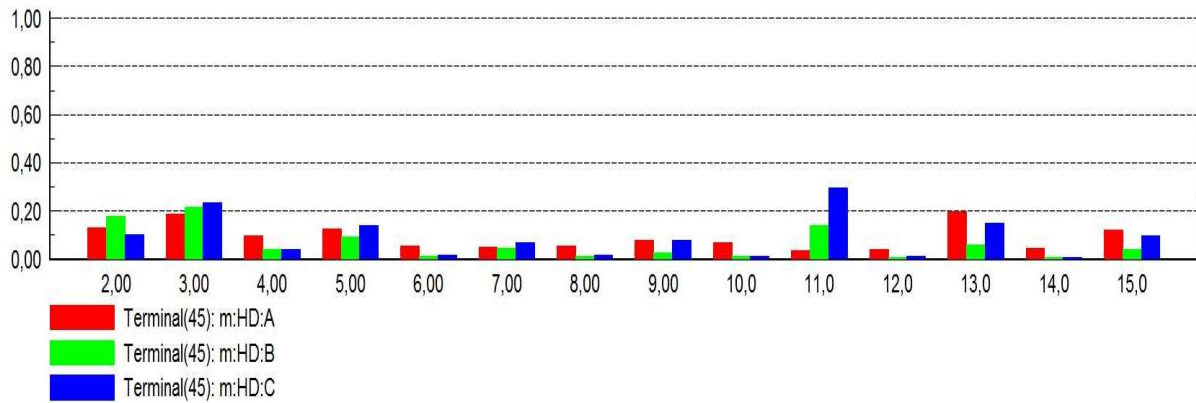
	I _{L1} (A)	I _{L2} (A)	I _{L3} (A)	I _{Ln} (A)
Početak izvoda	200,657	161,358	173,444	81,517
Sredina izvoda	145,082	127,526	133,830	43,151
Kraj izvoda	23,931	13,255	14,441	11,992

Tablica 5.9. Kutovi struja po fazama i u neutralnom vodiču

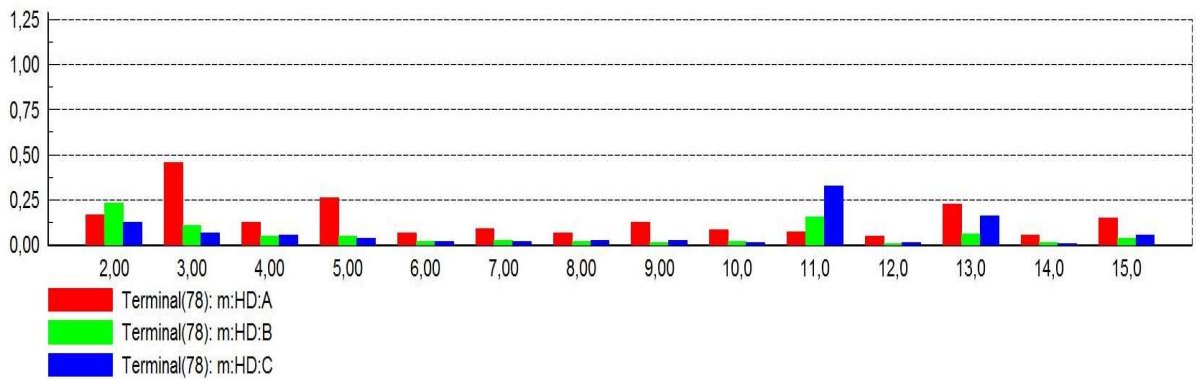
	L1 (°)	L2 (°)	L3 (°)	N(°)
Početak izvoda	-150,326	89,868	-30,132	-119,129
Sredina izvoda	-146,967	93,776	-23,516	-125,005
Kraj izvoda	-147,067	93,743	-22,490	-125,616



Slika 5.9. Harmonijski spektar struja na početku izvoda (APF na sredini izvoda)



Slika 5.10. Harmonijski spektar struja na sredini izvoda (APF na sredini izvoda)



Slika 5.11. Harmonijski spektar struja na kraju izvoda (APF na sredini izvoda)

Premještanjem aktivnoga filtera snage na sredinu izvoda dodatno se smanjuje negativan harmonijski utjecaj na mrežu svim komponentama koje se nalaze prije aktivnoga filtera snage. Apsolutne vrijednosti prvih petnaest harmonika značajno su manje nego u scenariju B. Efektivne vrijednosti struja u sve tri faze na početku i na sredini izvoda povećale su svoju vrijednost zbog toga što je aktivni filter snage premješten na sredinu izvoda i tako dodatno strujno opteretio vodove prije samoga filtera.

5.1.4. Scenariji D: Aktivni filter snage na kraju izvoda

Scenarij D predviđa postavljanje aktivnoga filtera snage na kraj izvoda. Kod ovoga scenarija zbog opterećenja napojnog voda „glavni dovod“ nije moguće postaviti APF iste snage kao i u prethodna dva slučaja, nego nazivna struja filtera treba biti manja. Ako se postavi da je nazivna struja filtera jednaka kao u scenarijima B i C, opterećenje voda raste iznad dopuštene granice. Nazivna struja APF-a u ovom scenariju određena je fazorskim zbrojem struja u sve tri

faze na početku izvoda i dobivena vrijednost iznosi 56 A. Kod nazivne struje filtera od 56 A opterećenje voda „glavni dovod“ iznosi 85, 1%.

Tablica 5.10. Ukupno harmonijsko strujno izobličenje po fazama

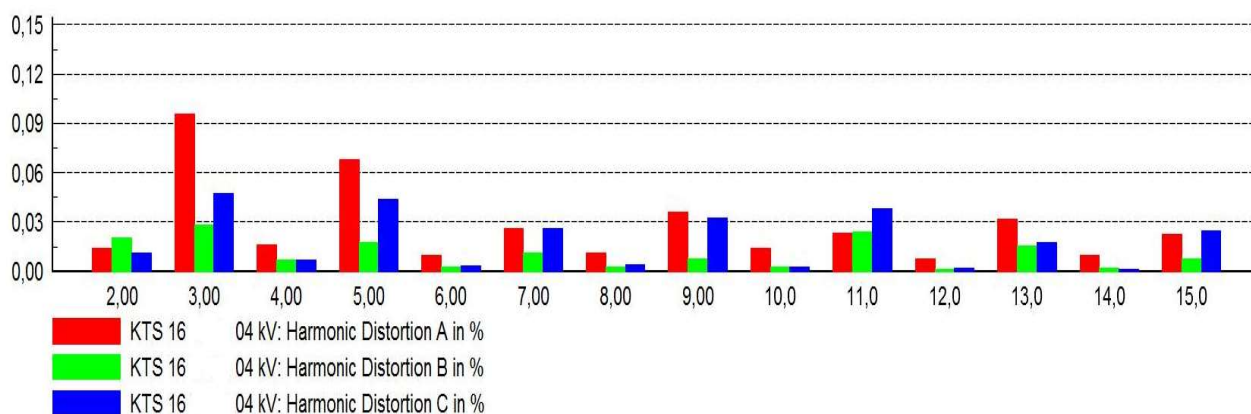
	L1 (%)	L2 (%)	L3 (%)	N(%)
Početak izvoda	4,916	2,833	3,515	28,574
Sredina izvoda	2,472	1,713	1,295	28,293
Kraj izvoda	3,485	4,342	6,048	28,129

Tablica 5.11. Efektivne vrijednosti struja po fazama i u neutralnom vodiču

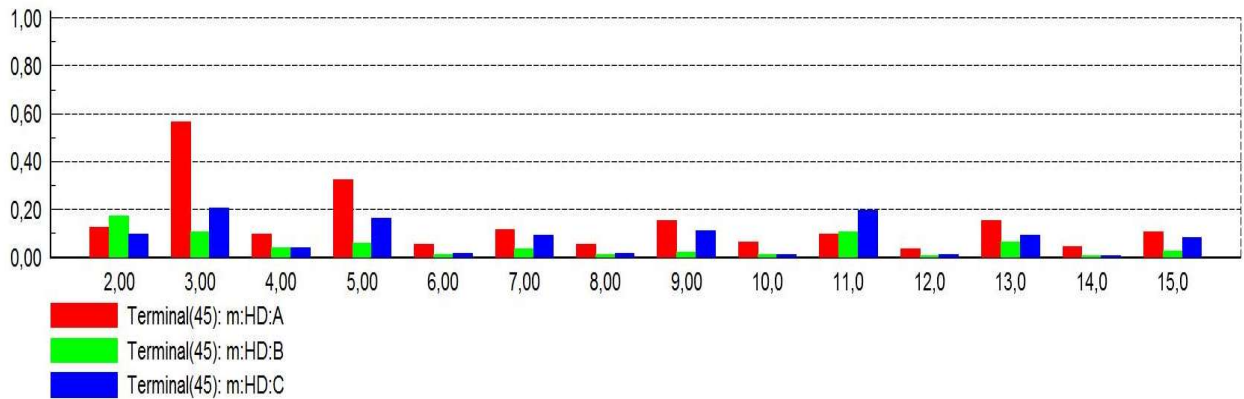
	I _{L1} (A)	I _{L2} (A)	I _{L3} (A)	I _{Ln} (A)
Početak izvoda	172,817	121,759	134,321	80,617
Sredina izvoda	108,545	83,124	89,300	42,661
Kraj izvoda	65,624	61,866	63,776	13,862

Tablica 5.12. Kutovi struja po fazama i u neutralnom vodiču

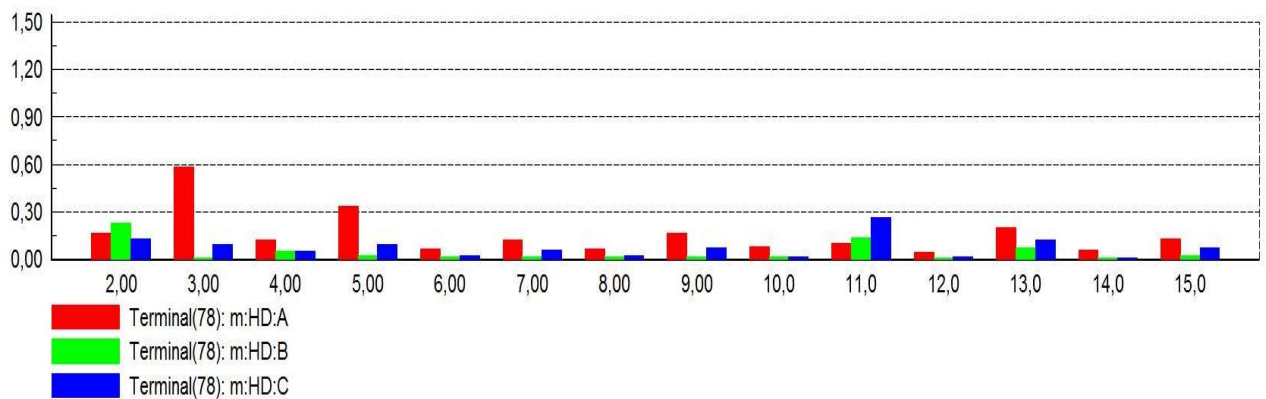
	L1 (°)	L2 (°)	L2 (°)	N(°)
Početak izvoda	-150,354	89,836	-30,163	-120,257
Sredina izvoda	-149,240	91,573	-25,800	-126,254
Kraj izvoda	-147,568	93,151	-23,157	-126,743



Slika 5.12. Harmonijski spektar struja na početku izvoda (APF na kraju izvoda)



Slika 5.13. Harmonijski spektar struja na sredini izvoda (APF na kraju izvoda)



Slika 5.14. Harmonijski spektar struja na kraju izvoda (APF na kraju izvoda)

Analiza izvoda kada je aktivni filter spojen na kraju izvoda dovodi do zaključka da THD_I na mjernom mjestu - početak izvoda povećao se u sve tri faze zbog udaljšavanja aktivnoga filtera snage od mjernoga mjesta. THD_I na mjernom mjestu - sredina izvoda povećao se u fazi L1 za 1 %, ali se dodatno smanjio u fazama L2 i L3. THD_I na mjernom mjestu - kraj izvoda, snizila se vrijednost u sve tri faze zbog premještanja aktivnoga filtera snage na kraj izvoda. Strujno opterećenje vodova povećalo je svoju vrijednost na mjernom mjestu - kraj izvoda zbog premještanja aktivnog filtera snage na kraj izvoda vidljivo iz Tablice 5.11., a efektivne vrijednosti struja na mjernim mjestima - početak izvoda i sredina izvoda imaju niže vrijednosti nego u scenariju C. Razlog tomu je što je struja filtera snižena s vrijednosti 106 A (scenarij C) na vrijednost 56 A (scenarij D). Apsolutne vrijednosti prvih petnaest harmonika prikazanih na Slikama 5.12., 5.13. i 5.14. imaju nešto više iznose u odnosu na scenarij C.

6. ZAKLJUČAK

Analizom rezultata dobivenim iz programskog paketa DIgSilent PowerFactory može se zaključiti kako je najpovoljniji utjecaj na ukupno harmonijsko izobličenje na sva tri mjerna mjesta dobiveno priključenjem aktivnog filtera snage na kraj izvoda. Apsolutne vrijednosti svih harmonika manje su od 1 % što znači da je filter injektirao struje koje vrlo dobro poništavaju negativan harmonijski utjecaj svih nelinearnih uređaja i potrošača koji injektiraju harmonike u mrežu. Problemi koji se javljaju kada je aktivni filter snage priključen na kraj izvoda je mnogo veće strujno opterećenje vodova prije filtera, Joulovi gubitci izravno su proporcionalni kvadratu struje koja prolazi kroz vodove što je dodatni nepovoljan utjecaj kada priključimo aktivni filter snage u mrežu. Vrijednosti prvih petnaest harmonika najniže su kada je aktivni filter snage priključen na sredinu što zaključujemo iz slika harmonijskoga spektra struje.

Gledano s ekonomske strane, ovakvi filteri vrlo su skupi. Scenariji D prikazuje umanjenu nazivnu struju filtera koja je glavni čimbenik za određivanje cijene aktivnoga filtera snage. Iz Slika 5.12., 5.13. i 5.14. uočljivo je povećanje svih petnaest harmonika u odnosu na scenariji C što je rezultat smanjenja nazivne struje filtera. Prilikom kupnje ovakvog filtera koji bi se priključio na mrežu bitno je utvrditi granice čimbenika ukupnoga harmonijskog izobličenja i pojedinih harmonika koje filter treba postići. Kada smo utvrdili te granice, treba izabrati aktivni filter snage koji će uz najmanja financijska ulaganja postići dopuštene granice.

Elektroenergetski sustav je dinamičan što podrazumijeva promjenu fizikalnih veličina (struja, napon, frekvencije itd.), u vremenu, koje izravno utječu na aktivni filter snage te filter treba prilagođavati injektirane struje (po iznosu i kutu, za zadane frekvencije). Ovo je vrlo teška zadaća zbog toga što filter treba u stvarnom vremenu mijenjati injektirane struje i prilagođavati ih potrebama mreže.

LITERATURA

- [1] Internetska stranica tvrtke Avalon, link na opis valnih oblika harmonika, <http://avalon.rs/blog/kvalitet-elektricne-energije/visi-harmonici/>, [01.06.2021.]
- [2] Internetska stranica tvrtke ERG, link na nastajanje viših harmonika, http://erg.hr/slike/06_Kompenzacija_u_mrezama_s_prisustvom_visih_harmonika.pdf, [01.06.2021.]
- [3] Yuge Wang: „Harmonic Analysis in Power Distribution Networks“, Departmen of Electrical and Electronic Engineering, School of Engineering, 2020.
- [4] Oktoviano Gandhia , Dhivya Sampath Kumarb, Carlos D. Rodríguez-Gallegosa, Dipti Srinivasanb: „Review of power system impacts at high PV penetration Part I: Factors limiting PV penetration“, Solar Energy, Vol No. 210, Pages 181-201, 2020.
- [5] Internetska stranica tvrtke ECCOS, link na međuharmonike i supraharmonike, [Elektroinženjering - ECCOS inženjering](#), [05.06.2021.]
- [6] Amir Tokić, Viktor Milardić, „Kvalitet električne energije“, „PrintCom“ Tuzla, 2015.
- [7] Mohammad A.S. Masoum, Ewald F. Fuchs: „Power Quality in Power Systems and Electrical Machines Second Edition“, Elsevier, 125 London Wall, London, EC2Y 5AS, UK 525 B Street, Suite 1800, San Diego, CA 92101-4495, USA 225 Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK, 2015.
- [8] Alexander Kamenka: „Six tough topics about harmonic distortion and Power Quality indices in electric power systems“ A white paper of the Schaffner Group, Nordstrasse 11, 4542 Luterbach/Switzerland, 2014.
- [9] Midhat Umihanić: analiza viših harmonika šestopulsnog ispravljača sprega transformatora
- [10] Patricio Salmerón Revuelta, Salvador Pérez Litrán, Jaime Prieto Thomas: „Active power line conditioners, Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality“, Elsevier, 125, London Wall, EC2Y 5AS, UK 525 B Street, Suite 1800, San Diego, CA 92101-4495, USA 225 Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK, 2016.

SAŽETAK

Rad definira pojam viših harmonika te objašnjava negativne utjecaje viših harmonika na sve uređaje i čimbenike u elektroenergetskom sustavu. Također, prikazani su i pokazatelji kojima se može kvantificirati određeni harmonik te njegov utjecaj u mreži. Objašnjeno je koji uređaji generiraju više harmonike, prikazane su tehnike modeliranja viših harmonika te je pojašnjeno pri kojim uvjetima vrijede različiti modeli. Nadalje, prikazani su načini modeliranja nelinearnih opterećenja te topologije takvih uređaja. Predstavljene su metode za ublažavanje viših harmonika. Norme koje obuhvaćaju kvalitetu električne energije kojima pripadaju ograničenja pojedinih harmonika također su sadržane u ovom radu. Praktični dio rada sadržava simulaciju u programskom paketu DigSilent PowerFactory s podacima koji su dobiveni mjerenjem kvalitete električne energije prema normi HRN EN 50160:2012 na dva mjerna mjesta u ruralnom području u blizini Osijeka. Simulacija se sastoji od četiri različita scenarija te su uspoređene fizikalne veličine (generirane programskim paketom) koje nam prikazuju utjecaj viših harmonika na elektroenergetsku mrežu. Dobiveni rezultati simulacija ukazuju da su najbolji rezultati dobiveni kada je aktivni filter snage spojen na kraj izvoda jer su tada najmanje vrijednosti viših harmonika te ukupnog harmonijskog izobličenja. U radu je objašnjeno zašto se ne priključuje više takvih filtera u mrežu ovakve topologije.

Ključne riječi: viši harmonici, elektroenergetski sustav, nelinearna opterećenja, HRN EN 50160:2012, aktivni filter snage, ukupno harmonijsko izobličenje

ABSTRACT

Methods for harmonics mitigation in low-voltage network

This thesis describes the concept of harmonics and explains the negative effects of harmonics on all devices and components in the power system, presents indicators that can quantify a particular harmonic and its impact in the network. It is explained which devices generate harmonics, the techniques of modeling harmonics are presented, and the conditions under which different models are valid are explained. Furthermore, the ways of modeling nonlinear loads and the topology of such devices are presented. Methods for mitigating harmonics are presented. Standards that include the quality of electrical energy, which includes the limitations of individual harmonics, are also contained in this thesis. The practical part of this thesis contains a simulation in the software package DigSilent PowerFactory with data obtained by measuring the quality of electrical energy according to HRN EN 50160: 2012 at two measuring points in a rural area near the city of Osijek. The simulation consists of four different scenarios and compares the physical quantities (generated by software) that show the impact of harmonics on the power grid. It was concluded that the best results were obtained when the active power filter was connected to the end of the lead because then the values of harmonics and total harmonic distortion were the lowest and it was explained why no more such filters are connected to the network of this topology.

Key words: harmonics, power system, nonlinear loads, HRN EN 50160:2012, active power filter, total harmonic distortion

ŽIVOTOPIS

Tomislav Primorac rođen je 5. siječnja 1996. u Osijeku. Završio je Osnovnu školu Frana Krste Frankopana u Osijeku. Nakon završene osnovne škole opredjeljuje se za Elektrotehničku i prometnu školu Osijek, smjer elektrotehničar. Srednju školu završava 2014. godine vrlo dobrim uspjehom te iste godine upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Preddiplomski studij završava 2018. godine kada upisuje i diplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika, modul održiva energetika.