

# Ublažavanje utjecaja viših harmonika u distribucijskoj mreži pomoću aktivnog filtera snage

---

**Felber, Matija**

**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:200:170496>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-27**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

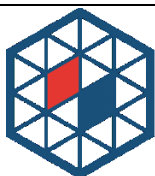
**Sveučilišni studij**

**UBLAŽAVANJE UTJECAJA VIŠIH HARMONIKA U  
DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI POMOĆU AKTIVNOG  
FILTERA SNAGE**

**Diplomski rad**

**Matija Felber**

**Osijek, 2022.**

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

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 09.09.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Matija Felber
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	D-1317, 12.10.2020.
<b>OIB studenta:</b>	10837908213
<b>Mentor:</b>	Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
<b>Sumentor:</b>	Mario Primorac, mag. ing. el.
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	Izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	Nemanja Mišljenović, mag. ing. el.
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Ublažavanje utjecaja viših harmonika u distribucijskoj mreži pomoću aktivnog filtera snage
<b>Znanstvena grana diplomskog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Definirati osnovne pojmove vezane uz kvalitetu električne energije, uz naglasak na više harmonike te metode za njihovo ublažavanje. Opisati pasivne i aktivne filtere snage za snižavanje iznosa viših harmonika te načine djelovanja. Kreirati model dijela elektrodistribucijskog sustava u programskom paketu DlgSILENT Power Factory, pomoću rezultata stvarnih mjerenja. Analizirati učinkovitosti aktivnog filtera snage na smanjenje viših harmonika u modelu dijela elektrodistribucijskog sustava.
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	09.09.2022.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

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

Osijek, 21.09.2022.

**Ime i prezime studenta:**

Matija Felber

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

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

D-1317, 12.10.2020.

**Turnitin podudaranje [%]:**

8

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Ublažavanje utjecaja viših harmonika u distribucijkoj mreži pomoću aktivnog filtera snage**

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

i sumentora Mario Primorac, mag. ing. el.

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**

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak diplomskog rada</b> .....	<b>1</b>
<b>2. PREGLED PODRUČJA TEME</b> .....	<b>2</b>
<b>3. HARMONICI KAO POKAZATELJ KVALITETE U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU</b> .....	<b>3</b>
<b>3.1. Teorijska osnova o harmonicima</b> .....	<b>6</b>
<b>3.2. Razlika između strujnih i naponskih harmonika</b> .....	<b>8</b>
<b>3.3. Fourierov niz i podjela harmonika</b> .....	<b>9</b>
<b>3.4. Pokazatelji harmonijskog izobličenja</b> .....	<b>13</b>
3.4.1. Ukupno harmonijsko izobličenje THD.....	13
3.4.2. Ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju TDD.....	14
<b>3.5. Izvori harmonika</b> .....	<b>15</b>
3.5.1. Transformatori .....	16
3.5.2. Električni strojevi .....	17
3.5.3. Pretvarači snage .....	17
3.5.4. Fluorescentne lampe .....	18
3.5.5. Elektrolučni uređaji .....	19
<b>3.6. Utjecaj harmonika na pojedine komponente u elektroenergetskom sustavu</b> .....	<b>19</b>
3.6.1. Transformator .....	21
3.6.2. Generator .....	21
3.6.3. Indukcijski motor.....	22
3.6.4. Kondenzatorske baterije .....	23
3.6.5. Rasvjeta .....	23
3.6.6. Kabeli i vodiči .....	24
3.6.7. Releji, prekidači i osigurač .....	24
3.6.8. Ostali negativni utjecaji .....	25
<b>4. METODE ZA UBLAŽAVANJE UTJECAJA VIŠIH HARMONIKA</b> .....	<b>27</b>
<b>4.1. Izolacijski transformatori</b> .....	<b>28</b>
<b>4.2. Cik-cak transformatori</b> .....	<b>28</b>
<b>4.3. Linijske prigušnice</b> .....	<b>29</b>
<b>4.4. Višeimpulsni sustav pretvarača</b> .....	<b>30</b>

---

---

4.4.1. 12-pulsni pretvarači .....	30
4.4.2. 18-pulsni pretvarači .....	31
<b>4.5. Pasivni filteri.....</b>	<b>31</b>
<b>4.6. Aktivni filteri .....</b>	<b>32</b>
4.6.1. Paralelni aktivni filter .....	33
4.6.2. Serijski aktivni filter .....	35
4.6.3. Hibridni aktivni filter.....	36
4.6.4. UPQC filter.....	37
<b>5. SNIŽAVANJE IZNOSA HARMONIKA U DIJELU DISTRIBUCIJSKE MREŽE POMOĆU AKTIVNOG FILTERA SNAGE .....</b>	<b>39</b>
<b>5.1. Početno stanje dijela distribucijske mreže.....</b>	<b>40</b>
<b>5.2. Priklučenje novog postrojenja na promatranu distribucijsku mrežu .....</b>	<b>42</b>
5.2.1. Slučaj 1: Harmonijska analiza novog industrijskog postrojenja.....	42
5.2.2. Slučaj 2: Harmonijska analiza postojećeg i novog industrijskog postrojenja .....	44
<b>5.3. Priklučenje aktivnog filtera snage.....</b>	<b>46</b>
5.3.1. Slučaj 1: Harmonijska analiza postojećeg industrijskog postrojenja i aktivnog filtera snage postojećeg postrojenja .....	46
5.3.2. Slučaj 2: Harmonijska analiza novog industrijskog postrojenja i aktivnog filtera snage novog postrojenja .....	47
5.3.3. Slučaj 3: Harmonijska analiza postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnog filtera snage postojećeg postrojenja .....	49
5.3.4. Slučaj 4: Harmonijska analiza postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnog filtera snage novog postrojenja .....	50
5.3.5. Slučaj 5: Harmonijska analiza postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnih filtera snage postojećeg i novog postrojenja .....	52
5.3.6. Slučaj 6: Harmonijska analiza postojećeg i novog industrijskog postrojenja i zajedničkog aktivnog filtera snage .....	53
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>56</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>57</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>59</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>60</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>61</b>

---

## 1. UVOD

Distribucijska mreža u elektroenergetskom sustavu bi, pri idealnim uvjetima, pokazivala savršeni sinusoidni napon u svakoj točki mreže. Međutim, u stvarnosti je to gotovo nemoguće ostvariti. Valni oblici napona i struje odstupaju od sinusoide, a ta se odstupanja opisuju upotrebom izobličenja valnog oblika i obično se nazivaju harmonijskim izobličenjem. Iako je harmonijsko izobličenje prilično stara tema, ona danas predstavlja jednu od glavnih briga za operatore distribucijskog sustava kao i njihove krajnje kupce. Već pri samim počecima energetike promatrao se utjecaj harmonijskog izobličenja na same električne strojeve. Međutim, može se reći kako tadašnji utjecaj harmonika nije imao isti značaj kao danas. Razvoj elektronike utjecao je na sam elektroenergetski sustav, trošila su postala osjetljivija na naponske promjene te svojim radom negativno utječu na mrežu. Može se reći kako su baš ta trošila (energetski pretvarači) jedni od glavnih krivaca za porast harmonijskog izobličenja u elektroenergetskom sustavu. Kako je harmonijsko izobličenje imalo sve veći utjecaj na postojeću energetska mrežu, razvijeno je niz metoda za smanjenje harmonijskog utjecaja te se i dan danas vrše analize i unapređuje njihov razvoj.

U ovom će se diplomskom radu opisati utjecaj harmonijskog izobličenja na pojedine elemente u elektroenergetskom sustavu. Također će se navesti svi elementi elektroenergetskog sustava koji se ponašaju kao izvor viših harmonika i na koji način mogu postati izvor harmonijskog izobličenja. Opisat će se metode pomoću kojih se ublažuje utjecaj viših harmonika u distribucijskom sustavu i na jednom će se primjeru pokazati smanjenje harmonijskog izobličenja pomoću aktivnog filtra snage. U završnom dijelu rada analizira se utjecaj viših harmonika na promatranu mrežu u distribucijskom sustavu. Provedena je analiza mreže distribucijskog sustava u programskom paketu DIGSILENT Power Factory na odabranom primjeru jedne industrijske zone.

### 1.1. Zadatak diplomskog rada

Definirati osnovne pojmove vezane uz kvalitetu električne energije, uz naglasak na više harmonike te metode za njihovo ublažavanje. Opisati pasivne i aktivne filtere snage za snižavanje iznosa viših harmonika te načine djelovanja. Kreirati model dijela elektrodistribucijskog sustava u programskom paketu DIGSILENT Power Factory, pomoću rezultata stvarnih mjerenja. Analizirati učinkovitosti aktivnog filtera snage na smanjenje viših harmonika u modelu dijela elektrodistribucijskog sustava.

## 2. PREGLED PODRUČJA TEME

Harmoničko izobličenje jedno je od najvažnijih problema s kojima se danas susreće elektroenergetski sustav zbog velike količine nelinearnih opterećenja. To je također tema mnogih rasprava u tehničkim radnim skupinama. Knjiga „Harmonics and power systems“ [1], opisuje osnove harmonijskog izobličenja i njihov utjecaj na kvalitetu električne energije, bavi se izvorima harmonika i efektima na distribucijski sustav te mjerenjima i tehnikama filtriranja harmonika. U poglavljima 5 i 6 knjige „Electrical power systems quality“ [2], koja se bavi kvalitetom električne energije, razrađuju se teorijske osnove harmoničkog izobličenja. Rad „Harmonics in power systems“ [3], bavi se generiranjem harmonika u sustav, njihovim efektima i metodama ublažavanja utjecaja harmonijskog izobličenja.

U literaturi [4], predstavljene su različite topologije aktivnih filtera, serijski APF, paralelni APF, hibridni APF i kombinacija paralelnog i serijskog APF-a koji je poznatiji kao UPQC filter. Rad [5], bavi se troškovima postavljanja i dimenzioniranja aktivnih filtera, uspoređujući ih s pasivnim i hibridnim filterima, što predstavlja jednu od važnijih tema u elektroenergetskog sustava. Članak [6], uspoređuje učinak paralelnog aktivnog i hibridnog filtera, a članak [7], predlaže paralelni aktivni filter za ublažavanje harmonika proizvedenih nelinearnim opterećenjem spojenim u trofazni distribucijski sustav.

Kako je sve češća integracija distribuirane proizvodnje, čije neke tehnologije mogu biti izvori viših harmonika, potrebno je prilikom njihove izgradnje instalirati i filter harmonika. Na primjer, u članku [8], prilikom instaliranja fotonaponske elektrane ugrađuje se UPQC filter koji uz kompenzaciju harmonijske struje opterećenja također izvlači maksimalnu snagu fotonaponske elektrane (tražeći točku maksimalne snage MPP). Upotreba UPQC filtera za kompenzaciju jalove snage u distribucijskoj mreži može se pronaći u člancima [9], [10], a dodatne upotrebe UPQC filtera opisane su u člancima [11], [12].



### 3. HARMONICI KAO POKAZATELJ KVALITETE U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU

Direktiva Europskog vijeća kvalificira električnu energiju kao proizvod, kao što svi proizvodi iziskuju odgovarajuće zahtjeve za kvalitetom tako i električna energija. Međutim, električna energija je specifični proizvod jer su mogućnosti pohrane ograničene te se proizvodi i troši u istom trenutku, što znači da napajanje električne energije mora biti neprekinuto (raspoloživo za bilo koji trenutak) i određene razine napona (interval napona koji mora biti osiguran u svakom trenutku), [13]. Elektroprivreda i krajnji korisnici električne energije su sve više zabrinuti oko kvalitete električne energije te iz tog razloga se inženjeri pokušavaju nositi s tim problemom koristeći se sistemskim pristupom umjesto bavljenja pojedinačnim problemom, [13]. Pokazatelji kvalitete su alati kojim se djelotvorno kvantificira poremećaj kvalitete, a dani su u važećim standardima ili preporukama. Prema [14], najčešće upotrebljivi standardi za klasifikaciju poremećaja kvalitete električne energije su:

- IEC (International Electrotechnical Commission's),
- IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) i
- CENELCE (European Committee for Electrotechnical Standardization)

Zemlje Europske unije koriste standard EN 50160 „Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks“ (EN 50160:2010), a RH je 2012. godine preuzela taj standard HRN EN 50160:2012 „Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža“. Norma EN 50160 propisuje sva obilježja opskrbnog napona na mjestima gdje se potrošači povezuju s mrežom distribucijskog sustava poznatije kao točka PCC (eng. *Point of common coupling*). Norme su bitne za isporučitelje i korisnike električne energije. Isporučitelji se štite od smetnji nastale od strane potrošača, a potrošači se štite od smetnji nastale od isporučitelja ili od strane drugih potrošača. Prema [14], svojstva opskrbnog napona propisana normom su:

- frekvencija
- veličina (amplituda)
- oblik krivulje (sinusoidan oblik) i
- simetrija.

U Tablici 3.1. su prikazani pokazatelji kvalitete napona, a granične vrijednosti viših harmonika u Tablici 3.2, [15].

**Tablica 3.1.** pokazatelji kvalitete napona i njihova ograničenja dana normom.

Parametar		Osnovna veličina	Vrijeme usrednjavanja	Promatrano razdoblje	Granične Vrijednosti
Frekvencija		Pojedinačna vrijednost	10 s	1 godina	± 1% 99,5% vremena
					+4% / -6% 100% vremena
Kolebanje napona	SN	Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	99% vrijednosti <+ 10%  99% vrijednosti >- 10%  100% vrijednosti ± 15%
	NN		10 min	1 tjedan	95% vrijednosti ± 10%  100% vrijednosti +10% / - 15% Un
Treperenje (Flicker)		Izračunata vrijednost	Plt – 120 min	1 tjedan	95% vrijednosti Plt < 1
Viši harmonici		Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	Tablica 3.2.
THD		Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	< 8%
Signalni napon		Efektivna vrijednost	3 s	1 dan	< 9% Un za 0 – 1 kHz <5% Un za 1 – 10 kHz
Nesimetrija		Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	< 2%

**Tablica 3.2.** dopuštene vrijednosti viših harmonika

Neparni harmonici				Parni harmonici	
Nisu višekratnici trećeg harmonika		Višekratnici trećeg harmonika			
Redni broj harmonika	Uh (%)	Redni broj harmonika	Uh (%)	Redni broj harmonika	Uh (%)
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	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Kolebanja napona su sustavne promjene envelope napona ili niz nasumičnih promjena napona, čija veličina obično ne prelazi naponske raspone specificirane u ANSI C84.1 od 0,9 do 1,1 pu. Brze promjene veličine struje opterećenja mogu uzrokovati varijacije napona koje se često nazivaju treperenja. Izraz treperenje proizlazi iz utjecaja naponskih kolebanja na rasvjetu tako da ljudsko oko percipira da trepere. Treperenje napona mjeri se s obzirom na osjetljivost ljudskog oka, ako 50% ljudi pod istim uvjetima primijeti promjenu intenziteta svjetlosti u tom slučaju treperenje ima intenzitet 1, [14].

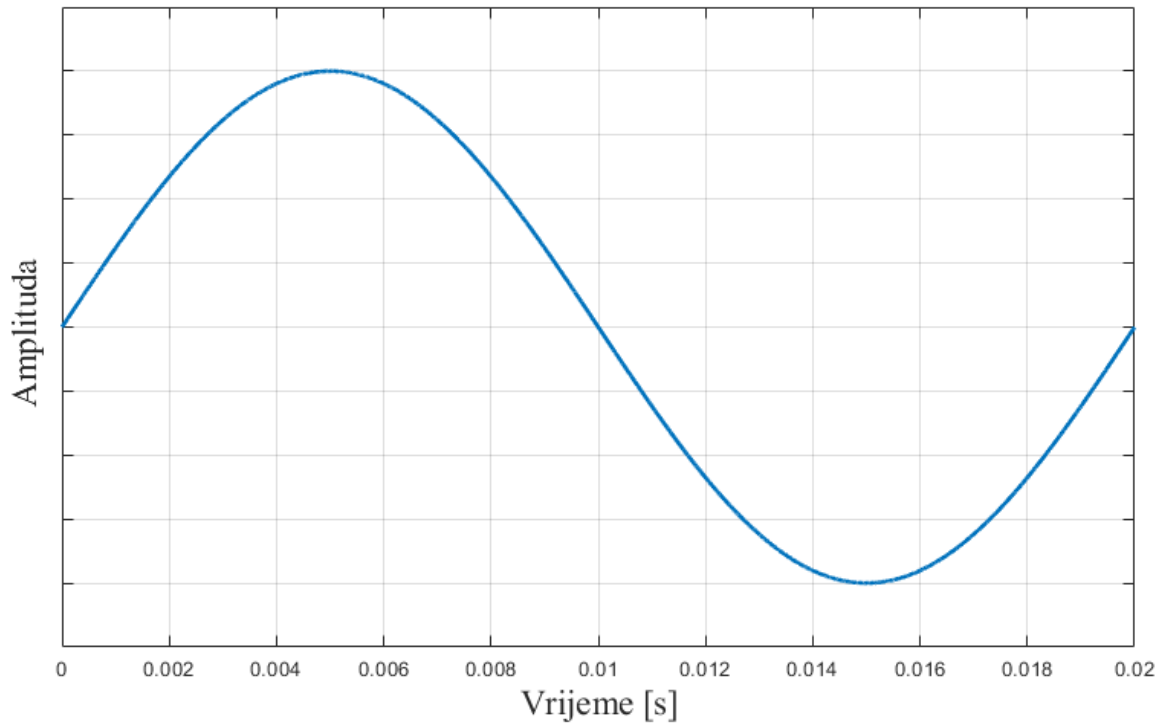
Naponska nesimetrija je odstupanje efektivne vrijednosti linijskog napona ili faznog kuta od slijednog linijskog napona. Nesimetrija se izražava kao omjer inverzne ili nulte komponente i direktne komponente. Ponekad se definira kao maksimalno odstupanje od prosjeka trofaznih napona ili struja, podijeljeno s prosjekom trofaznih napona ili struja, izraženo u postocima, [14].

Kao što i sama tema rada kaže naglasak je na harmonicima te će se nastavak rada bazirati isključivo o njima. Ostali se pokazatelji kvalitete napona u ovom radu neće obrađivati.

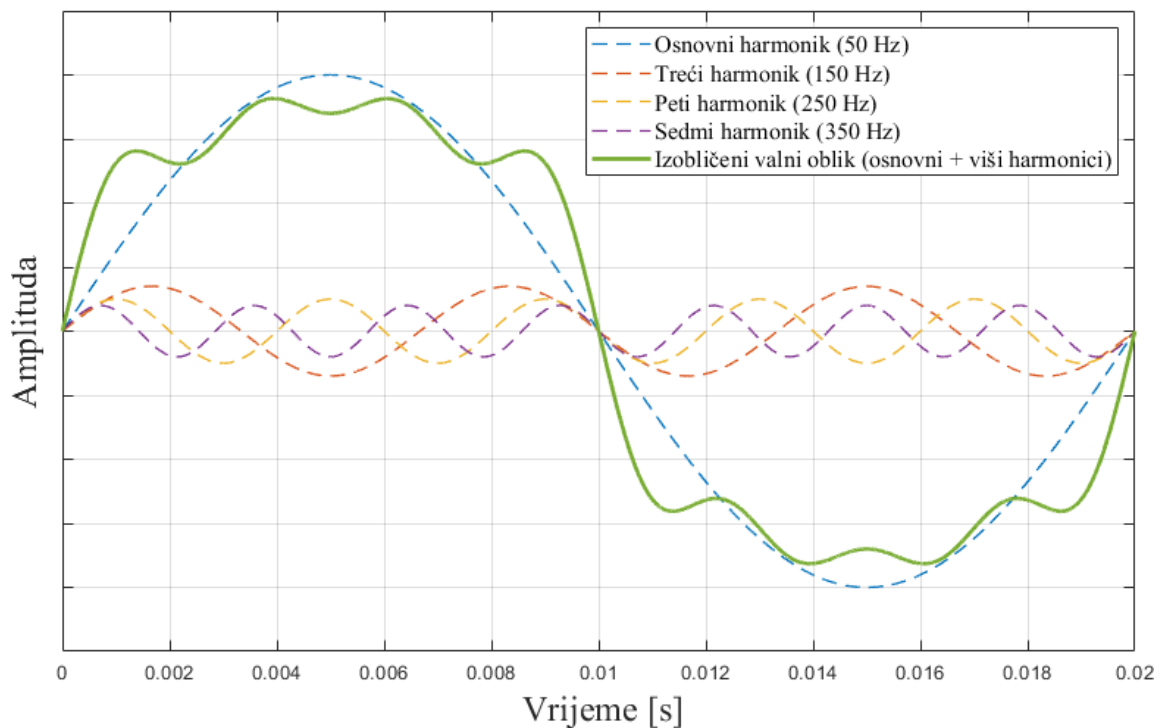
#### 3.1. Teorijska osnova o harmonicima

U idealnom slučaju, opskrba električna energija bi trebala biti savršeni sinusni signal napona na svim mjestima u distribucijom sustavu gdje se korisnici priključuju. Kako bi odziv snage imao idealan sinusni valni oblik, tada bi svi potrošači u promatranoj mreži bili djelatni. Linearna opterećenja povezana na elektroenergetski sustav definiraju se kao opterećenja koja crpe struju koja je proporcionalna naponu napajanja (npr., otpornici, žarulje sa žarnom niti, grijači itd.). Prikaz savršenog sinusnog naponskog signala nalazi se na Slici 3.1. Međutim, odstupanja valnih oblika napona i struje od idealnog sinusnog signala česta je pojava i prikazuje se kao harmonijsko izobličenje. Pojava harmonijskog izobličenja nije nova tema te predstavlja jednu od glavnih briga za inženjere i operatore distribucijskog sustava. Sve je veća upotreba nelinearnih opterećenja u zadnjih nekoliko desetljeća, došlo je do naglog porasta uporabe poluvodičkih uređaja za statičke pretvarače snage koji se koriste u industrijskim primjenama u industriji čelika, papira, tekstila itd, [1].

Sklopna napajanja zamjenjuju klasična napajanja s transformatorom i ispravljačem, puna su nelinearnih poluvodičkih elemenata koji utječu na izobličenje opskrbnog napona na svim naponskim razinama elektroenergetskog sustava. Opterećenje se smatra nelinearnim ako se njegova impedancija mijenja s naponom. Zbog ove promjene impedancije, struja koju nelinearno opterećenje crpi iz napajanja je također nelinearna, čak i kada je opterećenje spojeno na sinusni izvor napona. Struje nesinusoidne prirode stvaraju fazni pomak između napona te tako svojim utjecajem stvaraju harmonike u elektroenergetskom sustavu. Harmonijske struje u interakciji s impedancijom distribucijskog sustava stvaraju izobličenje napona koje utječe na opremu distribucijskog sustava i na opterećenja koja su na nju povezana, [3]. Prikaz nesinusoidnog valnog oblika napona nastao harmonijskim izobličenjem nalazi se na Slici 3.2.



Slika 3.1. Idealni sinusni valni oblik



Slika 3.2. Izobličeni sinusni valni oblik

Harmonička komponenta u sustavu napajanja izmjeničnom strujom definira se kao sinusoidna komponenta periodičnog valnog oblika čija je frekvencija jednaka cjelobrojnom višekratniku osnovne frekvencije sustava (npr. 50 Hz u Europi). Prema [1], sve periodičke funkcije osnovne frekvencije mogu se izraziti kao:

$$f_h = (h) \times (\text{osnovna frekvencija}) \quad (3-1)$$

gdje je  $h$  cjelobrojna vrijednost veća od 1, označava red harmonika.

Na primjer, treći harmonik bi dao harmonijsku komponentu:

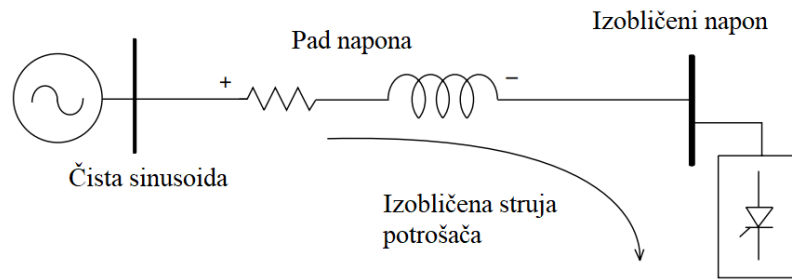
$$f_3 = (3) \times (50) = 150 \text{ Hz.} \quad (3-2)$$

### 3.2. Razlika između strujnih i naponskih harmonika

Često se može čuti kako oprema ne radi ispravno zbog harmonika i sama riječ harmonik često se spominje bez daljnjih kvalifikacija. Prema [13], odgovor na pitanje zašto uređaj ne radi ispravno zbog harmonika krije se u jednom od ova tri slučaja:

1. Harmonici napona su preveliki, odnosno napon je previše izobličen.
2. Harmonici struja su preveliki za neke uređaje u elektroenergetskom sustavu kao što je transformator, a stroj mora raditi na nižoj snazi od nazivne.
3. Harmonici napona su preveliki jer su harmonici struja koje proizvodi promatrani uređaj preveliki za dani sustav.

Može se primijetiti da u gore navedenim slučajevima postoje zasebni uzroci i posljedice za napone i struje, kao što i postoji međusobni odnos između te dvije veličine. Međutim, čini se da su nelinearna opterećenja izvori strujnih harmonika i zaslužni su za ubrizgavanje harmonijskih struja u elektroenergetski sustav. Za gotovo sve analize dovoljno je nelinearna opterećenja koja stvaraju harmonike tretirati kao izvor struje. Nelinearna opterećenja koja stvaraju izobličenu struju s linearnom impedancijom sustava će na sabirnici potrošača stvoriti izobličeni napon, a to je prikazano na Slici 3.3, [13].



Slika 3.3. Nastanak izobličenog napona [13]

Struja višeg harmonika koja prolazi kroz linearnu impedanciju sustava rezultirat će padom napona za svaki harmonik. Iako je napon izvora čista sinusoida, postoji nelinearno opterećenje koje vuče izobličenu struju. To rezultira pojavom napona viših harmonika na sabirnici potrošača. Linearna impedancija sustava i izobličena struja potrošača određuju iznos izobličenog napona. Iako je nastanak izobličenog napona rezultat struje potrošača, potrebno je napomenuti da opterećenje nema kontrolu nad iznosom izobličenog napona. Postavi li se isto opterećenje na dva različita mjesta u elektroenergetskom sustavu rezultirat će dva različita iznosa izobličenog napona na sabirnicama potrošača, [13].

Prilikom opisivanja harmonika potrebno je biti oprezan jer postoji jasna razlika između uzroka i učinka harmonijskih struja i napona. Iz toga razloga potrebno je kvalificirati korištenje izraza harmonici. U većini slučajeva kada se koristi termin harmonik za označavanje uređaja u elektroenergetskoj industriji, misli se na harmonijske struje. Kada se govori o distribucijskom sustavu tada se misli na harmonijske napone, [13].

### 3.3. Fourierov niz i podjela harmonika

Po definiciji periodička funkcija  $f(t)$  je ona gdje je  $f(t) = f(t + T)$ . Funkcija može biti predstavljena trigonometrijskim nizom elemenata, sastavljena od istosmjerne komponente i drugih elemenata s frekvencijom koja se sastoji od osnovne komponente i njezinih cjelobrojnih višekratnika. Nelinearni elementi sadrže komponente na neželjenim frekvencijama koji su harmonici (višekratnici) osnovne frekvencije. Prema [1], nesinusoidni valni oblici koji se ponavljaju s kutnom frekvencijom  $\omega$  mogu se prikazati pomoću:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega_0 t) + b_h \sin(h\omega_0 t)] \quad (3-3)$$

gdje je  $\omega_0 = 2\pi/T$ .

Jednadžba (3-3) se može dodatno pojednostaviti:

$$f(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \sin(h\omega_0 t + \Phi_h) \quad (3-4)$$

gdje su:

$$c_0 = \frac{a_0}{2}, c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \text{ i } \phi_h = \tan^{-1} \left( \frac{a_h}{b_h} \right) \quad (3-5)$$

Jednadžba (3-4) poznatija je kao Fourierov niz, opisuje periodičnu funkciju koja se sastoji od doprinosa sinusoidnih funkcija različitih frekvencija.

gdje je:

$c_0$  – veličina istosmjerne komponente

$h\omega_0$  – harmonik  $h$ -tog reda periodičke funkcije

$c_h$  i  $\phi_h$  – veličina i fazni kut  $h$ -te harmonijske komponente

Komponenta s  $h = 1$  naziva se temeljna (osnovna) komponenta. Veličina i fazni kut svakog harmonika određuje resultantni valni oblik  $f(t)$ . Frekvencije koje su od interesa za harmonijsku analizu, općenito se kreću do 40-tog harmonika. Kao što je i ranije navedeno, glavni izvori harmonika u elektroenergetskom sustavu su statički pretvarači snage. Prema [3], za idealne radne uvjete dominantni harmonici koji se proizvode u opremi poluvodičkih pretvarača u stacionarnom stanju za  $p$  impulsne pretvarače snage izražavaju se kao:

$$h = np \pm 1 \quad (3-6)$$

gdje su:



$h$  – red harmonika

$n$  – cijeli broj, 1, 2, 3...

$p$  – broj impulsa po ciklusu.

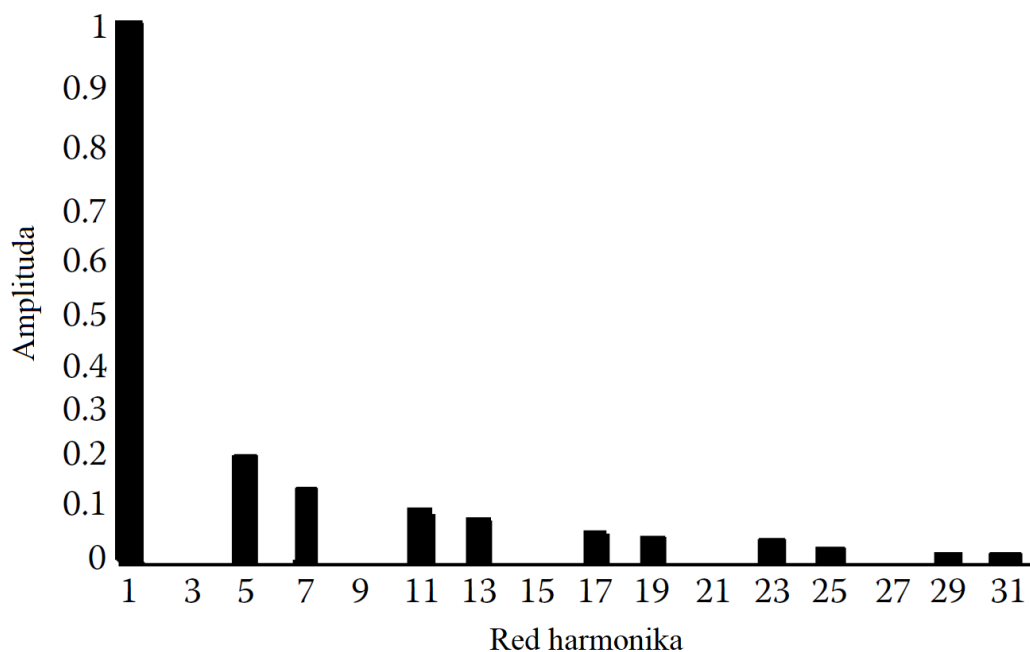
Za jednofazni mosni ispravljač broj impulsa  $p = 2$  za jedan ciklus, dominantni harmonici su:

$$h = n \times 2 \pm 1 = 1 \text{ (osnovni), } 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 \dots \quad (3-7)$$

Za trofazni mosni ispravljač broj impulsa  $p = 6$  za jedan ciklus, dominantni harmonici su:

$$h = n \times 6 \pm 1 = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25 \dots \quad (3-8)$$

Spektar harmonika generiranih u šestpulsnom pretvaraču prikazan je na Slici 3.4, [1].



Slika 3.4. Primjer harmonijskog spektra [1]

Navedeni karakteristični (dominantni) harmonici za dvopulsni i šestpulsni pretvarač snage vrijede za idealni stacionarni rad pretvarača i uz pretpostavku da je mreža napajanja izmjeničnom

strujom simetrična i čista sinusoidna (bez harmonika, samo osnovni harmonik) izmjenična struja. Svako odstupanje od gore navedenih hipoteza uvest će nekarakteristične harmonike, a eventualno i istosmjernu komponentu. Prema [1], nekarakteristični harmonici pojavljuju se :

- kada je ulazni napon neuravnotežen.
- kada reaktancija komutacije između faza nije jednaka.
- kada period između pokretačkih impulsa na pretvaraču nije jednak.

U praksi je to nešto drugačije, opskrba mreža ili spojena oprema nikada ne slijedi gore spomenuto idealno stanje i stoga stvarni izmjereni harmonici neće biti točni onima izračunatim iz jednadžbe (3-6). Ti harmonici se zbrajaju s karakterističnim komponentama i mogu proizvesti valne oblike s komponentama koje nisu cjelobrojni višekratnici osnovne frekvencije u elektroenergetskom sustavu, također poznatiji kao međuharmonici. Glavni izvori međuharmonika je AC u AC pretvarač, koji se također naziva ciklokonverter. Ciklokonverteri na ulazu imaju fiksnu frekvenciju i amplitudu, a na izlazu frekvencija i amplituda mogu biti promjenjive. Primjenjuju se za kontrolu brzine AC motora i druge aplikacije velikih snaga, općenito u MW rasponu, [3].

Drugi važni harmonici su oni koje proizvode električne peći, obično su niže frekvencije od frekvencije izmjeničnog sustava. Oni su poznati kao subharmonici i odgovorni su za fenomen treperenja napona koji se vizualno opaža u lučnim rasvjetnim uređajima i rasvjetnim uređajima sa žarnom niti, [3].

Harmonici nultog slijeda, poznati su kao harmonici 3. reda (eng. *Triplen*) (harmonik neparnog reda djeljiv s brojem 3: 3, 9, 15, 21...). U četverožičnom distribucijskom sustavu (trofazni i neutralni), struje tri faze vraćaju se preko neutralnog vodiča, u uravnoteženim uvjetima fazni pomak od  $120^\circ$  dovodi do poništavanja struja u neutralnom vodiču. Međutim, u realnim odnosima s nelinearnim trošilima struje faznih vodiča se ne poništavaju te u neutralnom vodiču teče struja kumulativnog zbroja sve tri faze, koja može nositi 173% fazne struje na frekvenciji od pretežito 150 Hz (3. harmonik). Harmonici 3. reda mogu se blokirati korištenjem neuzemljenih neutralnih ili trokutastih transformatora jer su to harmonici nultog slijeda. Zbog toga se trostruki harmonici često izostavljaju u harmoničkim studijama, [1], [3].

Harmonici se općenito mogu podijeliti na parne i neparne harmonike. Parni harmonici su harmonici 2, 4, 6, 8, 10 itd., parne harmonike sadrže asimetrični valni oblici (pozitivni i negativni dijelovi vala su različiti). Neparni harmonici su harmonici 3, 5, 7, 9, 11 itd., neparne harmonike sadrže simetrični valni oblici (pozitivni i negativni dijelovi vala su identični). U elektroenergetskom sustavu se najčešće susreću neparni harmonici jer je oprema projektirana da

radi s ovakvim harmonicima i većina potrošača ima valne oblike napona i struje simetrične u točki poluperiode na apscisi, [14].

### 3.4. Pokazatelji harmonijskog izobličenja

Najčešće korišteni pokazatelji za mjerenje harmonijskog sadržaja valnog oblika su ukupno harmonijsko izobličenje i ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju. Oba pokazatelja su mjere efektivne vrijednosti valnog oblika i mogu se primijeniti za napone i struje.

#### 3.4.1. Ukupno harmonijsko izobličenje THD

Ukupno harmonijsko izobličenje (engl. *Total Harmonic Distortion*) važan je pokazatelj koji se koristi za opisivanje problema s kvalitetom električne energije u prijenosnim i distribucijskim sustavima. Razmatra doprinos svake pojedinačne harmonijske komponente u valnom obliku napona ili struje, a definira se kao omjer srednjeg kvadrata harmonijskog sadržaja i srednje kvadratne vrijednosti temeljne veličine, izražen u postotku osnovne vrijednosti. Prema [3], Ukupno harmonijsko izobličenje napona na mjestu priključka na mrežu (engl. *Point of common coupling* ili PCC) može se izraziti kao:

$$\%THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (3-9)$$

gdje je:

$h$  – red harmonika

$V_h$  – efektivna vrijednost napona pojedinačnih harmonijskih komponenti

$V_1$  – efektivna vrijednost napona osnovnog harmonika.

Slično tome, ukupno harmonijsko izobličenje struje na mjestu priključka na mrežu (PCC) može se izraziti kao:

$$\%THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (3-10)$$

gdje je:

$I_h$  – efektivna vrijednost struje pojedinačnih harmonijskih komponenti

$I_1$  – efektivna vrijednost struje osnovnog harmonika.

Obično se harmonici do 40. reda koriste za izračun %THD, međutim, harmoničke komponente reda većeg od 40 mogu se uključiti kada je potrebno. Dozvoljene granice efektivnih vrijednosti napona pojedinih viših harmonika pri normalnim pogonskim uvjetima propisane su normom EN 50160 te vrijednosti ne smiju ni u jednom tjednom intervalu prelaziti vrijednosti iz Tablice 3.2. Također, ukupan sadržaj viših harmonika (THD) naponskog valnog oblika, izračunat tako da su uzeti u obzir svi viši harmonici do 40. reda, ne smije prelaziti preko 8% napona osnovnog harmonika, [15].

### 3.4.2. Ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju TDD

Trenutna vrijednost izobličenja može se okarakterizirati pomoću pokazatelja THD-a, ali to često može voditi do zabune prilikom mjerenja harmonika. Prilikom mjerenja, male struje mogu izazvati vrijednost THD-a iznad dozvoljenih granica, ali te struje ne predstavljaju značajnu prijetnju za sustav. Na primjer, većina pogona s podesivom brzinom pokazat će visoku vrijednost THD-a za ulaznu struju vrlo malih iznosa. To nije nužno značajan problem jer je veličina harmoničke struje mala, iako je njena strujna distorzija velika. Iz toga razloga uvodi se novi harmonijski pokazatelj koji određuje izobličenje valnog oblika struje u odnosu na struju pri maksimalnom opterećenju, a taj pokazatelj se naziva ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju (engl. *Total Demand Distortion*). Definira se kao omjer srednjeg kvadrata harmonijskog sadržaja (uzimajući u obzir harmonijske komponente do 40. reda) i srednjeg kvadrata struje najveće potražnje na mjestu priključka na mrežu (PCC), izražen u postotku maksimalne struje opterećenja. Prema [2], [3], Ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju može se izraziti kao:

$$\%TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_L} \times 100 \quad (3-11)$$

gdje je:

$I_h$  – efektivna vrijednost struje pojedinačnih harmonijskih komponenti

$I_L$  – vršna ili maksimalna struja opterećenja na komponenti osnovne frekvencije, predstavlja srednju vrijednost maksimalne struje opterećenja za period od 12 mjeseci.

#### 3.5. Izvori harmonika

Različita nelinearna opterećenja proizvode harmonike koji imaju prepoznatljivi harmonijski spektar. To pojednostavljuje proces pronalaska krivca za harmonijska izobličenja. Distribucijska poduzeća i korisnici električne energije se moraju upoznati s različitim izvorima harmonika kako bi se odabrala bolja metoda za njihovo ograničavanje te uklanjanje na mjestima gdje se proizvode, [1].

Nastanak harmonika više nije samo fenomen ograničen na industrijsku opremu i procese, gdje su se razvili prvi problemi kvalitete električne energije. U komercijalnim objektima kao što su bolnice, uredski kompleksi, robne kuće i internetski podatkovni centri dominira visokoučinkovita fluorescentna rasvjeta s elektroničkim prigušnicama ili LED rasvjeta, pogoni s podesivom brzinom za ventilaciju, grijanje i klimatizaciju (HVAC), pogoni dizala, neprekidna napajanja (UPS), osobna računala (PC) i ostala osjetljiva elektronička oprema opskrbljena jednofaznim sklopnim izvorima napajanja. Ove posebne vrste komercijalnih opterećenja karakterizira veliki broj malih opterećenja koji predstavljaju ogromne izvore harmonijskih struja i povećavaju se sa sve većom upotrebom osjetljive elektroničke opreme. Ovisno o tipu opterećenja, strujni harmonici mogu se u fazi zbrajati ili poništavati jedna drugu. Ukupno naponsko izobličenje ovisi o impedanciji kruga i ukupnoj izobličenoj struji. Neki karakteristični nelinearni komercijalni izvori harmonika detaljno su opisani u sljedećim odjeljcima, [1], [2].

Prije razvoja energetske elektronike glavni izvori harmonika bili su transformatori, električni strojevi, elektrolučni uređaji, kondenzatorske baterije itd. Uređaji koji sadrže magnetsku željeznu jezgru mogu doći u područje zasićenja, što ograničava linearno povećanje gustoće magnetskog toka i dolazi do nastanka harmonika. Također, ti uređaji mogu stvoriti velike udarne struje tijekom uključivanja u distribucijski sustav i razviti harmonijske struje. Elektrolučni uređaji su posebna vrsta izvora jer mogu uključivati frekvencije ispod osnovne frekvencije snage i frakcijske harmonike. Ti nekarakteristični harmonici su subharmonici i interharmonici. Međutim, ova industrijska opterećenja danas se smatraju kao jedni od brojnih izvora koji stvaraju izobličene harmonijske valne oblike. Pojavom energetske elektronike došlo je do velikog porasta opterećenja

koja zahtijevaju pretvarače snage, kao što su to ispravljači koji služe za regulaciju brzine istosmjernih motora i frekvencijski pretvarači (ciklokonverteri) koji upravljaju brzinom indukcijskih motora. Pretvarači snage sastoje se od nelinearnih poluvodičkih elemenata koji utječu na harmonijsko izobličenje, mogu biti malih nazivnih snaga (manje od 1 kVA) do nekoliko desetaka megavoltampera, [1], [2].

Kao jedan od mogućih izvora harmonika, a danas se sve češće koriste u distribucijskoj mreži, su distribuirani generatori (DG) koji sadrže elektroničke energetske pretvarače, a napajaju se iz obnovljivih izvora. Komunalna poduzeća i industrija ih koristi kako bi se smanjila vršna potrošnja. Sve veća prisutnost distribuiranih generatora u distribucijskoj mreži pridonosi ukupnom porastu harmonijskih izvora. Obnovljivi izvori energije su aktualna tema te se njihovi utjecaji na mrežu i dalje istražuju, [1].

#### 3.5.1. Transformatori

Uređaji koji imaju čeličnu jezgru, kao što su to transformatori, stvaraju harmonike zbog nelinearne karakteristike magnetiziranja željeza (petlja histereze) u području zasićenja. Prema [1], jezgra transformatora se može naći u uvjetima zasićenja u ova dva slučaja:

- u preopterećenom radu
- u podopterećenom radu.

Preopterećen rad transformatora može nastati prilikom vršne potrošnje što uzrokuje rad transformatora iznad nazivne snage, a podopterećen rad nastaje prilikom niske potrošnje tijekom ranih jutarnjih sati ili kada se kondenzatorske baterije ne odvoje u propisanom vremenu te tada transformator radi iznad njegovog nazivnog napona.

Transformator u području zasićenja pokazat će nelinearnu struju magnetizira, koja sadrži niz neparnih harmonika, s dominantnim harmonicima redova višekratnika broja 3. Ova spektralna komponenta može se ograničiti unutar transformatora korištenjem trokut spoja transformatora, čime bi se izbjegli utjecaji spomenutih harmonika. Međutim, komponente petog i sedmog harmonika proizvode znatna izobličenja (5 do 10%) i ne smiju se zanemariti, prvenstveno u distribucijskim sustavima koji imaju stotine transformatora. Distribucijski transformatori pod naponom razvijaju sve vrste harmonika nižeg reda uključujući parne harmonika (osobito drugi i četvrti) koji često ograničavaju rad diferencijalne zaštite, [1].

#### 3.5.2. Električni strojevi

Harmonijske struje u rotirajućim strojevima mogu nastati kao posljedica nesimetrije na utorima statora ili rotora ili blagih nepravilnosti u uzorcima namota stroja. Ovi harmonici induciraju elektromotornu silu na namotima statora na frekvenciji jednakoj omjeru brzina/valna duljina. Rezultirajuća raspodjela magnetomotorne sile u stroju proizvodi harmonike koji su funkcija brzine. Dodatne harmonijske struje nastaju prilikom zasićenja magnetske jezgre, međutim manjih proporcija od onih u transformatoru, [1].

#### 3.5.3. Pretvarači snage

Kao što je ranije navedeno, pretvarači snage su najrašireniji izvori harmonijskih struja u distribucijskom sustavu, a razlog tome je sve veća promjena parametara poput napona i frekvencije kako bi se zadovoljili specifični industrijski i komercijalni procesi. Pretvarači snage se koriste prilikom ispravljanja izmjenične struje u istosmjernu i kada treba koristiti izmjeničnu struju na drugoj frekvenciji od osnovne frekvencije, [2].

Prema [1], pretvarači se s obzirom na nazivnu snagu dijele na:

1. Velike energetske pretvarače poput onih u industriji topionica metala i u HVDC prijenosnim sustavima.
2. Pretvarače srednje veličine poput onih u industriji za kontrolu brzine motora.
3. Male ispravljače snage koji se koriste u kućnim uređajima kao što su to TV prijemnik, punjači baterija, osobna računala...

Da bi se dodatno ilustrirao pretvarač kao izvor harmonika potrebno je vratiti se na jednadžbu (3-6), gdje su se za šestpulsni pretvarač pomoću jednadžbe odredili karakteristični harmonici. Za pretvarač sa šest impulsa struja sadrži harmonike reda 5, 7, 11, 13, 17..., može se primijetiti kako nema prisutnost trostrukih harmonika. Za 12 – pulsni pretvarač, karakteristični harmonici će biti: 11, 13, 23, 25, 35, 37... Iz tog razloga proizlazi ideja korištenja pretvarača s većim brojem impulsa. Međutim, karakteristični harmonici izračunati pomoću jednadžbe (3-6) vrijede isključivo za idealan slučaj i postoji mogućnost nastanka ostalih harmonika zbog nesimetričnih napona, [1].

#### *Veliki pretvarači snage*

Koriste se za pretvorbu velike količine izmjenične energije u istosmjernu. Njihova nazivna snaga je u rasponu MVA i općenito imaju veći induktivitet na istosmjernoj nego na AC strani. Zbog veće induktivnosti na AC strani, istosmjerna struja je praktički konstantna i pretvarač djeluje

kao izvor harmonijskog napona na istosmjernoj strani, a na izmjeničnoj strani kao izvor harmonijske struje, [1].

#### *Srednji pretvarači snage*

Velicina ovih pretvarača kreće se do nekoliko kVA. Prve primjene ovakvih pretvarača srednjih nazivnih snaga bile su za regulaciju brzine istosmjernog motora koji još uvijek predstavlja glavno tržište za ovu vrstu pretvarača. Međutim, u zadnjem desetljeću uočava se trend porasta njihove primjene za regulaciju brzine indukcijskog motora. Slično pretvaračima velikih snaga, peti harmonici mogu doseći amplitude struje od jedne petine do jedne trećine osnovne nazivne struje. Tijekom pokretanja i ubrzanja, motori povlače maksimalnu struju gdje se tada u pretvaračkim mostovima proizvode najgore harmonijske komponente pri niskom faktoru snage, [1].

#### *Mali pretvarači snage*

Njihova nazivna snaga kreće se do 1 kVA i primjenjuju se u neprekidnim napajanjima (UPS), TV prijamnicima, radiju, stereo pojačalima, pisačima, računalima, punjačima... Uobičajeno je vidjeti da su poslovne i javne zgrade pune računala i drugih perifernih uređaja koji su uzrok velikih harmonijskih smetnji. Koristi li se UPS za rješavanje padova napona i prekida napajanja, dodatno se povećava količina harmonijskih struja. Stambene zgrade su još jedna od češćih mjesta gdje se primjenjuju pretvarači malih snaga te u određeno doba dana stvaraju nezanemarive harmonijske struje. Dominantni su harmonici nultog slijeda koji preopterećuju neutralni vodič trofaznog distribucijskog transformatora koji napaja jednofazno, niskonaponsko opterećenje. Za razliku od ostalih pretvarača, pretvarači malih snaga promatraju se kao jedna cjelina, odnosno njihovo ukupno opterećenje, [1].

#### **3.5.4. Fluorescentne lampe**

Rasvjeta općenito čini 40 do 60 posto ukupnog opterećenja komercijalne zgrade, od čega su od 77 posto rasvjetnih tijela fluorescentne cijevi. Fluorescentne cijevi su vrlo nelinearne i uzrokuju neparne harmonijske struje nezanemarivih iznosa. Za ispravan rad, fluorescentnim svjetlima potrebna je elektronska prigušnica ili prigušnica s magnetskom jezgrom (kako bi se ograničila struja prema cijevi) i kondenzator za povećanje faktora snage. Koristi li fluorescentna rasvjeta magnetsku prigušnicu, dominantni harmonici će biti treći, peti i sedmi harmonik, a za elektronsku prigušnicu će peti harmonik biti dominantan. Kako je fluorescentna rasvjeta značajan izvor harmonika u komercijalnim zgradama, preporučeno je njihovo opterećenje raspodijeliti po fazama



na gotovo uravnotežen način. Spajanjem opskrbnog transformatora u trokut poništavaju se trostruki harmonici fluorescentne rasvjete i rasterećuje se neutralni vodič, [2].

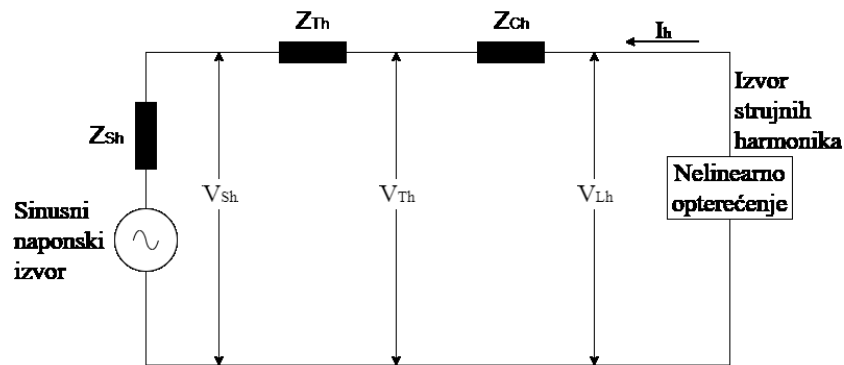
#### **3.5.5. Elektrolučni uređaji**

U ovu kategoriju uređaja spadaju lučne peći, lučni zavarivači te rasvjeta s magnetskim prigušnicama. Luk je u osnovi serijski spoj iskrišta, koji ima nelinearnu karakteristiku i reaktancija koja limitira struju na neku prihvatljivu vrijednost. S obzirom na to da je na iskrištu, nakon paljenja luka, vrlo mali pad napona, impedanciju čine prigušnica, kabeli peći i vodovi, što luku daje izgled negativnog otpora za vrijeme radnog ciklusa. Sam električni luk (iskrište) zapravo smatra se kao izvorom harmonika napona. Međutim, impedancija prigušnice, kabela peći i vodovi filtriraju valni oblik napona, tako da je napon samo umjereno izobličen. Iz tog razloga, lučna opterećenja mogu se karakterizirati kao stabilan izvor strujnih harmonika s dominantnim trećim, petim i sedmim harmonicima, [2].

#### **3.6. Utjecaj harmonika na pojedine komponente u elektroenergetskom sustavu**

Kao što je prikazano na Slici 3.3, nelinearno opterećenje izvlači iskrivljenu (nesinusoidnu) struju iz čistog sinusoidnog naponskog izvora. Ta nesinusoidna struja prolazeći kroz svu impedanciju između opterećenja i napajanja uzrokuje pad napona za svaku harmonijsku frekvenciju na temelju Ohmovog zakona prikazan u jednadžbi (3-12), [3].

Slika 3.5. detaljno prikazuje učinak pojedinih harmonijskih struja na impedanciju unutar elektroenergetskog sustava i pridružene padove napona za svaku od njih. Potrebno je znati da se povećanjem impedancije između izvora i nelinearnog opterećenja smanjuje ukupno harmonijsko izobličenje  $THD_v\%$ , [3].



Slika 3.5. Harmonijski pad napona na impedanciji sustava [3]

Ohmov zakon za svaku harmonijsku komponentu:

$$V_h = I_h \cdot Z_h \quad (3-12)$$

na opterećenju:

$$V_{Lh} = I_h \cdot (Z_{Ch} + Z_{Th} + Z_{Sh}) \quad (3-13)$$

na transformatoru:

$$V_{Th} = I_h \cdot (Z_{Th} + Z_{Sh}) \quad (3-14)$$

na izvoru:

$$V_{Sh} = I_h \cdot Z_{Sh} \quad (3-15)$$

gdje je:

$Z_h$  – impedancija harmonika h-tog reda

$V_h$  – napon harmonika h-tog reda

$I_h$  – struja harmonika h-tog reda.

#### 3.6.1. Transformator

Glavni utjecaji strujnih i naponskih harmonika su zagrijavanje transformatora zbog povećanih gubitaka u željezu i bakru. Strujni i naponski harmonici su direktno proporcionalni frekvenciji, a gubici se povećavaju s povećanjem harmonika. Gubici u željezu posljedica su gubitaka petlje histereze i vrtložnih struja. Gubici petlje histereze nastaju zbog nelinearne ovisnosti gustoće magnetskog toka i magnetskog polja transformatora, a vrijednost im raste s porastom frekvencije i kvadratom magnetskog toka. Vrtložne struje se povećavaju s kvadratom frekvencije i tako stvaraju dodatnu toplinu, time značajno smanjuju čvrstoću izolacije transformatora i njegov radni vijek. Iz tog razloga, distribucijski transformatori s pretežno nelinearnim opterećenjem često ne mogu raditi s nazivnom snagom, [3].

Osim gubitaka u željezu javljaju se i gubici u bakru. Strujni harmonici povećavaju ukupnu efektivnu vrijednost struje, a time i gubitke u bakru jer oni izravno ovise o kvadratu struje ( $I^2R$ ). To uzrokuje zagrijavanje transformatora i naprezanje izolacije namota posebno ako su prisutne brze promjene napona ( $dv/dt$ ), [3].

Kao što je ranije navedeno, transformatori se u području zasićenja ponašaju kao izvori strujnih harmonika s dominantnim harmonicima trećeg reda. Kako harmonici nultog slijeda ne bi pregrijavali neutralne vodiče, distribucijski transformatori se najčešće nalaze u DY spoju. Primarni D spoj transformatora hvata struje nultog slijeda, koje kruže unutar D spoja. Kružne struje povećavaju ukupnu efektivnu vrijednost struje i proizvode dodatnu toplinu. U slučaju linearnog opterećenja, trofazne struje se u neutralnom vodiču poništavaju, dok kod nelinearnih opterećenja, harmonici nultog slijeda (3. harmonik je uglavnom dominantan) se ne poništavaju, već se kumulativno zbrajaju u neutralnom vodiču, [1].

U transformatoru se osim utjecaja na zagrijavanje, nastalog višim harmonicima, javljaju male vibracije laminarne jezgre koje dodatno stvaraju zvučni šum unutar željezne jezgre, [3].

#### 3.6.2. Generator

Učinak struja harmonika na harmonijskim frekvencijama sličan je učinku kao kod transformatora. Viši harmonici povećavaju gubitke u željezu i bakru koji dodatno zagrijavaju generator. Obje veličine su direktno proporcionalne frekvenciji te se povećavaju s povećanjem harmonika. Gubici u željezu nastaju zbog petlje histereze i vrtložnih struja. Gubitke u bakru uzrokuje pojava skin efekta i povećanje vrijednosti efektivne struje ( $I^2R$ ). Međutim, za razliku od generatora koji rade u elektroenergetskom sustavu učinci harmonijskih napona i harmonijskih

struja znatno su izraženiji na generatorima koji rade u samostalnoj mreži (zbog njihove impedancije) i to tri do četiri puta više od pomoćnih transformatora, [3].

Generatori koji se koriste u elektroenergetskim sustavima dizajnirani su za napajanja linearnih opterećenja. Kako pretežno prevladavaju nelinearna opterećenja, proizvodni sustavi moraju ispuniti sve zahtjeve koji bi omogućili rad generatora u stabilnim uvjetima i bez izlaganja prekomjernom zagrijavanju. U tom slučaju, generatori koji opskrbljuju nelinearna opterećenja moraju smanjiti snagu generatora kako bi se smanjio utjecaj harmonijskog zagrijavanja, [1].

Prema [1], prisutnost viših harmonika, na sabirnicama generatora, uz toplinske gubitke nameće dodatne posljedice u radu generatora, a to su:

1. Proizvodnja negativnih strujnih doprinosa koji generiraju torzijski moment i vibracije na osovini generatora. To dovodi do prerane potrošnje ležajeva vratila zbog termodinamičkih sila stvorenih u rotoru.
2. Izobličeni valni oblik napona, u krugu napajanja uzbudnog sustava, može uzrokovati probleme s regulacijom napona.
3. Povećanje struje inverznog slijeda doprinosi nesimetriji napona.

#### **3.6.3. Indukcijski motor**

Utjecaj viših harmonika na gubitke asinkronih motora sličan je kao u transformatoru i uzrokuje povećano zagrijavanje, zbog dodatnih gubitaka bakra i željeza (gubici vrtložne struje i histereze) u namotima statora, krugu rotora i slojevima rotora. Rasipanje magnetskog polja uzrokovano harmonijskim strujama u krajnjim namotima statora i rotora dodatno stvara gubitke ovisne o vrtložnim strujama lutajuće frekvencije. Značajni gubitci željeza također mogu nastati u asinkronim motorima s kosim rotorskim stapovima zbog visokofrekventnih struja i brze promjene toka u rotoru i statoru, [2].

Toplinski gubitci mogu oštetiti podmazivanje ležaja što dovodi do kolapsa. Također, pregrijavanje motora značajno smanjuje njegov vijek trajanja. Porast temperature od 10°C iznad nazivne temperatura, može smanjiti vijek trajanja izolacije namota za čak 50%. To se ne odnosi na motore s kaveznom rotorom jer oni mogu izdržati višu razinu temperature, [2].

Viši harmonici također negativno utječu na induksijske motore. Komponente direktnog slijeda pripomažu u stvaranju zakretnog momenta, dok komponente inverznog slijeda djeluju u suprotnom smjeru što kao rezultat stvara pulsiranje momenta, a ono značajno utječe na probleme

torzijskih vibracija vratila. Trostruki harmonici (komponente nultog slijeda) ne utječu na zakretni moment (stacionarni su) već se svaka njihova harmonička energija raspršuje kao toplina, [3].

Prema [3], vibracije na osovini motora dodatno stvaraju probleme koji uključuju:

- Zamor opreme
- Neobjašnjiv rad mehaničkih osigurača (vijci koji povezuju kućište motora)
- Istrošenost ležaja.

#### **3.6.4. Kondenzatorske baterije**

Povećan napon loše utječe na kondenzatorske baterije, preopterećuje i smanjuje im vijek trajanja. Prisutnost harmonika utječe na porast napona, temperature i struje koji dovode do porasta gubitaka dielektrika i mogućnost njegovog proboja. Kondenzatorske baterije dizajnirane su za naponski porast do 110% nazivnog napona, odnosno porast snage do 135% nazivne snage. Harmoničko izobličenje napona, odnosno struje, jedan je od čimbenika koji mogu dovesti do prekoračenja ovih ograničenja, a samim time i prestanak rada kondenzatorskih baterija. Izlazna jalova snaga varira s kvadratom napona, [1].

Drugi utjecaj na kondenzatorske baterije je rezonancija. Reaktancija kondenzatorskih baterija, u nekim trenucima određene frekvencije, može biti jednaka induktivnoj reaktanciji distribucijskog sustava, koji ima suprotan polaritet. Ova dva elementa u kombinaciji mogu razviti dva tipa rezonancije, a to su serijska ili paralelna rezonancija. Za slučaj paralelne rezonancije, na rezonantnoj frekvenciji, impedancija kruga se značajno povećava (teži ka beskonačnosti). To uzrokuje veliko povećanje napona između paralelnih elemenata, čak i pri malim harmonijskim strujama. Za slučaj serijske rezonancije, na rezonantnoj frekvenciji, impedancija kruga svodi se isključivo na komponentu otpora kruga. Ukoliko je komponenta otpora kruga mala, razvit će se velika vrijednost struje. Harmoničke rezonancije predstavljaju opasnost za čvrstoću izolacije namota transformatora i kabela, mogu dovesti do uništenja kondenzatorskih baterija, a ponekad i štetu na ostaloj opremi, [1], [2].

#### **3.6.5. Rasvjeta**

Može se reći da je jedan od glavnih učinaka na rasvjetu fenomen „treperenja“ (ponovljene fluktuacije u intenzitetu svjetlosti). Frekvencijske komponente koje nisu cjelobrojni višekratnici osnovne frekvencije, nazivaju se još i interharmonici, sklone su pobuđivanju naponskih oscilacija, što uzrokuje treperenje svjetlosti. Treperenje svjetlosti jedan je od glavnih utjecaja interharmonika zbog modularnog stacionarnog interharmoničkog napona. Rasvjeta je vrlo osjetljiva na promjene

efektivnog napona, čak je i promjena od oko 25% uočljiva ljudskom oku kod nekih tipova svjetiljki. Potrebno je napomenuti da su žarulje sa žarnom niti osjetljivije na treperenje koje reagiraju na varijacije effektivnog napona, a fluorescentne žarulje osjetljivije na vršne fluktuacije napona, [1], [3].

#### 3.6.6. Kabeli i vodiči

Gubici kod kabela, koji se koriste u distribucijskim sustavima, javljaju se kao rasipna toplina. Znatno se povećavaju pri vođenju harmonijskih struja jer povećavaju ukupnu effektivnu struju, a time i gubitke koji ovise o kvadratu struje i otporu kabela ( $I^2R$ ). Otpor vodiča ovisi o frekvenciji koju prenosi, određen njegovom istosmjernom vrijednošću uz skin efekt i efekt blizine. Skin efekt je pojava u kojoj struja teče blizu površine vodiča gdje je impedancija najmanja. Efekt blizine nastaje zbog međusobne induktivnosti vodiča raspoređenih usko paralelno jedan s drugim. Oba ova učinka ovise o frekvenciji, otpornosti, veličini vodiča i propusnosti materijala vodiča. Skin efekt i efekt blizine su zanemarivi na osnovnim frekvencijama, barem za manje vodiče. Međutim, promjena otpora zbog ovih učinka značajno se povećava s frekvencijom, a tako i povezani gubici zbog porasta otpora, [3].

Energetski vodiči koji se koriste u distribucijskim sustavima moraju uz temeljnu struju prenijeti i harmonijske struje, bez razvoja pregrijavanja vodiča koje bi se pretvorilo u prekomjerne gubitke. Iz tog razloka, potrebno je odrediti odgovarajuću veličinu vodiča uzimajući u obzir trajno stabilno stanje, preko faktora struje od najmanje 125%. Distribucijske mreže koje rade u harmonijskim okruženjima, upotrebljavaju specijalizirane softvere kako bi odredili odgovarajući kapacitet vodiča za prisutne izobličene valne oblike u najgorim scenarijima, [1].

#### 3.6.7. Releji, prekidači i osigurač

Zaštitni releji se aktiviraju prilikom prekomjerne struje koje prelaze postavljene granice. Aktivaciju releja često uzrokuju frekvencijski pretvarači (VFD) koji se koriste u industrijskim aplikacijama gdje se zahtijeva nagli porast snage. Sami frekvencijski pretvarači predstavljaju velike izvore harmonijskih struja. Brze promjene harmonijskog izobličenja valnih oblika napona i struje utječu na porast vršnih ili effektivnih vrijednosti unaprijed postavljenih ograničenja, što uzrokuje prorađu relejne zaštite. Zato je važno procijeniti harmonijsko izobličenje, kako bi zaštitni releji ispravno reagirali, [1].

Većina niskonaponskih termo-magnetskih prekidača koristi bimetalni okidački mehanizam koji reagira na učinak zagrijavanja effektivne struje. Distribucijske mreže koje rade s pretežno nelinearnim opterećenjem, opterećene su s većim effektivnim strujama nego one mreže s pretežno

linearnim opterećenjem istih nazivnih snaga. Ukoliko se osigurači nisu podesili u skladu s odgovarajućim nelinearnim opterećenjem, doći će neočekivane prerane prorade zbog porasta efektivne struje, [3].

Osigurači rade na principu efekta zagrijavanja koji nastaje zbog prevelikih struja ili struja kratkog spoja, a djeluju prema odgovarajućoj  $I^2t$  karakteristici. Pod nelinearnim opterećenjima, efektivna struja će biti veća od linearnog opterećenja sličnog raspona, tako da će se možda trebati povećati nazivna struja osigurača kako bi se spriječila prerana prorada. Osim toga, osigurači na harmonijskim frekvencijama podložni su skin efektu i, što je još važnije, efektu blizine, što rezultira neravnomjernom raspodjelom struje po elementu osigurača, što dodatno opterećuje opremu, [3].

#### 3.6.8. Ostali negativni utjecaji

Kondenzatori za korekciju faktora snage mogu se ugraditi u industrijska postrojenja i poslovne zgrade. Fluorescentne svjetiljke koje se koriste u ovim instalacijama također često imaju unutarnje ugrađene kondenzatore za poboljšanje faktora vlastite snage pojedinih žarulja. Harmonične struje su u interakciji s ovim kapacitetima i indukcijama sustava i povremeno pobuđuju paralelne rezonancije koje mogu uzrokovati pregrijavanje i oštećenje postrojenja i opreme, [3].

Energetski kabele pod harmoničkim utjecajima uvode EMI (elektromagnetske smetnje) u susjedne signalne ili upravljačke kabele putem vođenih i izračenih emisija. Ova "EMI buka" može negativno utjecati na telefone, računala, televizore, upravljačke sustave i druge vrste opreme. Ispravni postupci uzemljenja moraju se primijeniti u unutarnjem i vanjskom sustavu ožičenja kako bi se EMI smanjio, [3].

Bilo koja zaštitna, telemetrijska ili druga oprema koja se oslanja na tradicionalne tehnike mjerenja ili na učinak zagrijavanja struje neće ispravno funkcionirati u prisutnosti nelinearnih opterećenja. Posljedice neispravnih mjerenja mogu biti teške. Preopterećeni kabele mogu ostati neotkriveni i postoji opasnost od požara. Sabirnice i kabele mogu prerano ostarjeti. Osigurači i prekidači ne pružaju očekivanu razinu zaštite. Važno je da se u elektroenergetskim sustavima kojima se opskrbljuju nelinearna opterećenja mogu koristiti samo instrumenti koji se temelje na uistinu učinkovitim tehnikama, [3].

U instalacijama u kojima se paralelno vode energetski vodiči (koji prenose nelinearne struje) i unutarnji telefonski signalni kabele, u telefonskim kabelima može doći do indukcije napona.

Konvencionalni mjerni uređaji su obično dizajnirani za očitavanje sinusoidnih valnih veličina. Nelinearni valni oblici napona i struje unose greške u mjerne krugove koje rezultiraju lažnim očitanjima, [3].



## 4. METODE ZA UBLAŽAVANJE UTJECAJA VIŠIH HARMONIKA

Čitajući prethodno poglavlje, može se uočiti razlog zašto je ublažavanje harmonika potrebno. Sigurno je to nužno ako standardi i propisi tjeraju na takvu radnju, ali također je jasno da su gubitci i ostali utjecaji uzrokovani harmonicima jedan od razloga koji potiču na razmišljanje o ublažavanju harmonika. Većina nelinearne opreme velikih snaga zahtijeva opremu za ublažavanje kako bi se harmonijske struje i naponska izobličenja prigušila unutar dozvoljenih granica. Ovisno o vrsti, ublažavanje može biti isporučeno kao sastavni dio nelinearne opreme (linijski filter harmonika za izmjenične PWM (eng. *Pulse Width Modulation*) pogone i izmjenične linijske prigušnice) ili kao zasebni uređaji za ublažavanje. Postoje mnoge tehnike ublažavanja harmonika elektroenergetskog sustava, a u nastavku je objašnjeno nekoliko metoda koje se danas koriste, [16].

Jednostavnim dodavanjem, premještanjem shunt kondenzatorskih baterija može se na učinkoviti način smanjiti nepovoljni utjecaji harmonijskih odziva na sustav i tako dovesti izobličenja u propisana ograničenja. Također, primjena prigušnice može obavljati istu funkciju i štititi sustav od rezonantnih utjecaja. Prije razmatranja složenijih uređaja, potrebno je istražiti učinkovitost takvih jednostavnih rješenja za kontrolu harmonijskog sadržaja. Ukoliko se harmonijski sadržaj pomoću jednostavnih metoda ne može dovesti unutar propisanih ograničenja, potrebno je koristiti opće klase harmonijskih filtera koje općenito dijelimo u dvije grupe, a to su pasivni i aktivni filteri, [2].

Bitna razlika između pasivnih i aktivnih filtera je to što se za pasivne filtere koriste pasivni elementi (otpornici, kondenzatori i induktiviteti), a za aktivne filtere komponente energetske elektronike. Pasivni filter pruža (pasivno) djelovanje unutar odabrane propusnosti, dok aktivni filter pruža (aktivno) djelovanje u stvarnom vremenu koje dovodi do poništenja harmonijskih struja u tom trenutku, [1].

Prilikom razmatranja metoda za ublažavanje smetnji nastali raznim harmonijskim utjecajima važan je i vremenski okvir. Prilikom izgradnje novih industrijskih postrojenja ili ugradnje nove opreme, pristup rješavanju harmonijskih problema potpuno je drugačiji nego u već postojećim postrojenjima. Prema [17], kako bi se na sabirnicama, gdje su spojena pretežno nelinearna opterećenja, smanjili harmonijski utjecaj do dozvoljenih granica, potrebno je poduzeti sljedeće mjere:

1. Odvajanje osjetljivih i ometajućih opterećenja pomoću zasebnih sabirnica.

2. Povećanje broja impulsa pretvarača. Ukoliko je riječ o većem broju izvora, mogući je spoj preko transformatora s različitim faznim pomacima tako da harmonijske vektorske struje prilikom zbrajanja ostvaruju povoljne smjerove.
3. Ugradnja filtera na sabirnice s nelinearnim opterećenjem

### 4.1. Izolacijski transformatori

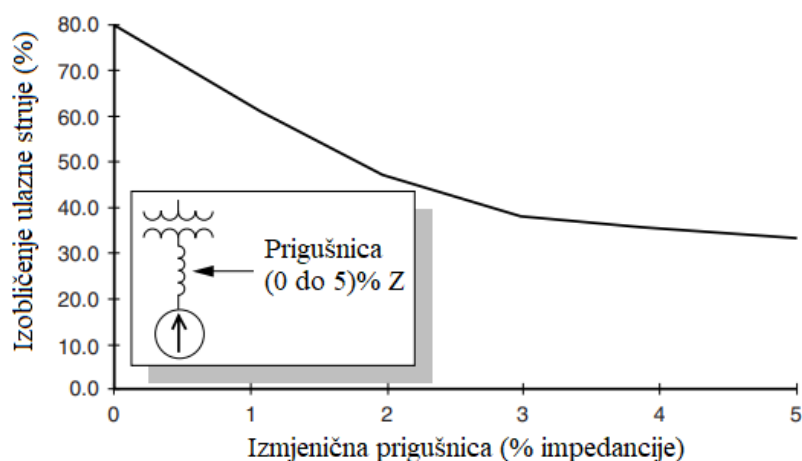
U mnogim slučajevima, izolacijski transformatori pružaju dobro rješenje za ublažavanje harmonika koji stvaraju nelinearna opterećenja. Prednost je mogućnost "usklađivanja napona" povećanjem ili smanjenjem napona sustava. Ovo je najbolje rješenje kada se koriste AC ili DC pogoni koji koriste SCR (eng. *Silicon Controlled Rectifiers*) kao mosne ispravljачe. Harmonična struja trećeg reda kruži u trokut spoju namotima transformatora. Iako je to problem za proizvođače transformatora zbog dodatnih gubitaka koje treba uzeti u obzir, to je korisno za distributere elektroenergetskog sustava jer izolira te harmonijske komponente od mreže. Samokompencija harmonijskih struja nastaje kada se višestruka nelinearna opterećenja napajaju transformatorima u različitim priključnim skupinama, zbog njihovih različitih faznih pomaka. Zbog njihovog vektorskog zbroja, smanjenje harmonika emitiranih iz različitih opterećenja vrlo je primjetno na niskim razinama napona, [3], [18].

### 4.2. Cik-cak transformatori

Iste se prednosti mogu postići s transformatorom s namotima u cik-cak spoju. Obično se koriste u komercijalnim objektima za kontrolu harmonijskih komponenti nultog slijeda. Cik-cak transformator djeluje kao filter struje nultog slijeda, osiguravajući put niske impedancije za neutralni vodič. Da bi bio učinkovit, transformator mora biti blizu opterećenja na strujnom krugu koji se štiti. Dva najvažnija problema u komercijalnim instalacijama su preopterećenje neutralnog vodiča i grijanje transformatora. Oba ova problema mogu se riješiti pravilnom ugradnjom cik-cak transformatora. Tipični rezultati za cik-cak transformator pokazuju da može odvojiti približno 50% struje trećeg harmonika od neutralnog vodiča glavnog kruga. Pod pretpostavkom da postoji prikladno mjesto za ugradnju transformatora između neutralnog kruga i stvarnog opterećenja, cik-cak transformator je dobar izbor za postojeće instalacije gdje postoji problem s pregrijavanjem neutralnog vodiča, [2].

### 4.3. Linijske prigušnice

Korištenje prigušnih svitaka jednostavan je i isplativ način za smanjenje harmonika koje stvaraju nelinearna opterećenja i bolje je rješenje za smanjenje harmonika od izolacijskih transformatora. Prigušnice se obično primjenjuju na jedno opterećenje, kao što je pogon s promjenjivom brzinom, i dostupne su u standardnim rasponima impedancije kao što su 2%, 3%, 5% i 7,5%. Tipična ulazna prigušnica od 3% može smanjiti harmonijsko izobličenje struje PWM tipa pogona s oko 80% na 40%. Ovo ograničenje harmonijske struje preko prigušnice prikazano je na Slici 4.1. Kada se veličina prigušnice poveća za više od 3%, dodatno smanjenje harmonika je vrlo ograničeno. Veličina prigušnice izračunava se iz snage pogona i postavlja se na ulaznu stranu pretvarača. Izmjenične prigušnice moraju biti spojene u seriju na ulazu tipičnog uređaja baziranog na pretvaraču (VFD) jer ubacuju serijsku induktivnu reaktanciju u krug. U električnim pogonima s promjenjivom brzinom i ostalim nelinearnim opterećenjima, prigušnice se često koriste zajedno s drugim metodama za ublažavanje harmonika, [2], [3].



Slika 4.1. Ublažavanje harmonijske struje pomoću prigušnice [2]

Kada se struja kroz prigušnicu mijenja, na njegovim se stezaljkama inducira napon u smjeru suprotnom od primijenjenog napona, koji je zauzvrat suprotan brzini promjene struje. Induktivnost prigušnice usporava punjenje kondenzatora na istosmjernoj sabirnici i tjera pogon da crpi struju tijekom dugog vremenskog razdoblja. Neto učinak je manja amplituda struje i manji sadržaj harmonika, dok i dalje isporučuje istu energiju. Ovo svojstvo prigušnice se može koristiti za ograničavanje harmonijskih struja koje stvaraju električni pogoni s promjenjivom brzinom i druga nelinearna opterećenja. Osim toga, AC linijske prigušnice smanjuju ukupno izobličenje harmonijskog napona (THDv) na njihovoj linijskoj strani u usporedbi s terminalima pogona ili

drugih nelinearnih opterećenja. Učinak usporavanja punjenja DC kondenzatora također čini prigušnicu vrlo učinkovitom u blokiranju nekih visokofrekventnih prijelaznih pojava. To pomaže u izbjegavanju neugodnog isključenja pogona tijekom rada s kondenzatorskim pogonima u komunalnim sustavima, [3], [16].

U velikim postrojenjima mogu se koristiti izmjenične i istosmjerne prigušnice, osobito kada je kapacitet kratkog spoja namjenskog napajanja relativno nizak u usporedbi s pogonskim kVA ili je napajanje osjetljivo na smetnje, [3].

### 4.4. Višeimpulsni sustav pretvarača

Povećanje broja impulsa u sustavu pretvarača najčešća je metoda za smanjenje faktora izobličenja struje pretvarača i time ublažavanje štetnih učinaka harmonika u elektroenergetskom sustavu. Ekvivalentni višeimpulsni način rada može se postići serijskim ili paralelnim povezivanjem pretvarača s manjim brojem impulsa i osiguravanjem odgovarajućeg faznog pomaka između napona koji napajaju mostove. Uzimajući u obzir odnos između određivanja reda karakterističnih harmonika (jednadžba (3-6)) i njegove amplitude, može se primijetiti da povećanje broja impulsa rezultira poništavanjem (zapravo smanjenjem veličine) harmonika nižeg reda. Zapravo, ulazna struja osim karakterističnih harmonika sadrži i nekarakteristične harmonike. To je zbog asimetričnog napona napajanja, neuravnotežene ekvivalentne impedancije opskrbe mreže, asimetričnog upravljanja mostom i niske istosmjerne struje, [18].

Troškovi i konstrukcija znatno su veći jer je potreban transformator s dvofaznim ili trofaznim izlaznim namotima da bi se postigao fazni pomak potreban za pravilan rad pretvarača. Sve ove činjenice treba uzeti u obzir i usporediti ih s filterskim rješenjima pri planiranju smanjenja harmonijskih učinaka, [16].

#### 4.4.1. 12-pulsni pretvarači

U ovoj konfiguraciji, prednji kraj mosnog ispravljačkog kruga koristi dvanaest dioda umjesto šest. Prednost je što se 5. i 7. harmonici svode na više redove, gdje 11. i 13. postaju dominantni harmonici. To će smanjiti veličinu tih harmonika, ali ih neće eliminirati. Nedostatak je veća cijena i posebna konstrukcija jer zahtijeva ili trokut - trokut i trokut - zvijezda transformator (cik - cak transformator) ili autotransformator za postizanje faznog pomaka od  $30^\circ$  potreban za normalan rad 12-pulsne konfiguracije. Ova konfiguracija također utječe na ukupnu ocjenu učinkovitosti

pogonskog sustava zbog pada napona povezanog s transformatorom/ima. Istosmjerne strane dvaju 6-pulsnih mostnih ispravljača spojene su paralelno za veću struju i serijski za veći napon, [3].

### 4.4.2. 18-pulсни pretvarači

Topologija 18-pulsnog pretvarača sastoji se ili od trofaznog u devetfazni izolacijski transformator ili patentiranog trofaznog u devetfazni autotransformator niže cijene (kako bi se stvorio fazni pomak od  $\pm 20^\circ$  neophodan za ispravan rad pretvarača) i devetfaznog diodnog ispravljača koji sadrži 18 dioda (dvije po nozi) za pretvaranje devetfazne izmjenične u istosmjernu struju. Slično konfiguraciji s 12 impulsa, 18-pulсни također ima nedostatke veće cijene i posebne konstrukcije. Devetfazni 18-pulсни pretvarač ne samo da ima nisko harmonijsko izobličenje na AC ulazu, već također pruža glatkiju, višu prosječnu izlaznu vrijednost istosmjerne struje. Budući da su karakteristični harmonici konfiguracije s 18 impulsa reda  $18n \pm 1$  (gdje je  $n$  cijeli broj od 1, 2, 3, ...), on učinkovito eliminira niže redove (5., 7., 11. i 13. ), [3].

## 4.5. Pasivni filteri

Pasivni harmonijski filteri predstavljaju ekonomično rješenje za prigušivanje harmonika pod opterećenjem u trofaznim energetske sustavima. Sve konfiguracije pasivnih harmonijskih filtera imaju kapacitivna svojstva jer se sastoje od induktivnih, kapacitivnih i otpornih elemenata konfiguriranih i podešenih za kontrolu harmonika. Cilj takvih podešenih filtera je osigurati put niske impedancije za harmonijske struje na određenim frekvencijama. Pasivni filteri induciraju protok harmonijskih struja na svojim rezonantnim frekvencijama. Zbog ove rezonancije, harmonijske struje se u elektroenergetskom sustavu prigušuju kroz krugove LC filtera koji su podešeni na red harmonika koji treba filtrirati. Izazov je pravilno dimenzionirati LC krug na temelju njegove pozicije u sustavu kako bi se postigla ista rezonancijska frekvencija harmonika koji se eliminira. Neželjeni harmonici se zatim preusmjeravaju na filter, sprječavajući ih da dođu do mreže. Kao rezultat, harmonijske struje se rasipaju kao toplina kroz pasivne harmonijske filtere, umjesto da se izvozi u distribucijski sustav i druge krajnje korisnike, [16].

U praksi, jedan pasivni filter nije dovoljan jer više od jednog harmonika treba prigušiti, stoga se koriste paralelne ili serijske pasivne filterske jedinice. Pasivne filterske jedinice obično su dizajnirane za uklanjanje nekoliko harmonika nižeg reda kao što su 5, 7 i 11. Tipično, pasivne filterske jedinice koriste tri (ili više za aplikacije velike snage kao što je HVDC) ugođena filtera, prva dva za najniže dominantne harmonike, nakon čega slijedi visokopropusni filter. U paralelnoj

pasivnoj filterskoj jedinici, dvije LC komponente (bez gubitaka) su spojene serijski na uvor harmonijske struje i sva tri (ili više) filtera su spojena paralelno. Međutim, u serijskoj pasivnoj filterskoj jedinici, dvije LC komponente (bez gubitaka) su spojene paralelno kako bi tvorile harmonijsku barijeru, a sva tri (ili više) filtera su povezana u seriju, [19].

Pasivni harmonijski filteri prikladni su za jedno opterećenje ili grupu opterećenja. Stoga se pasivni harmonijski filteri trebaju postaviti u blizini pojedinačnog opterećenja ili na mrežnu sabirnicu za skupinu opterećenja. Puna harmonijska struja nastavit će teći između pasivnih harmonijskih filtera i nelinearnih opterećenja. To znači da prednosti koje pruža filter imaju dijelovi elektroenergetskog sustava uzvodno od priključne točke filtera. Jedan nedostatak pasivnih harmonijskih filtera je da ne mogu apsorbirati druge harmonike osim onih za koje su dizajnirani. Ne prilagođavaju se automatskim promjenama u elektroenergetskom sustavima. Stoga su pasivni harmonijski filteri učinkovito i ekonomično rješenje ako postoji potreba za ublažavanjem specifičnih harmonijskih frekvencija koje tipično stvara određen dio oprema, [20].

#### 4.6. Aktivni filteri

Tijekom posljednjeg desetljeća intenzitet korištenja energetske elektroničke opreme prouzročio je dramatično povećanje harmonijskih poremećaja u elektroenergetskim sustavima. Osobito nasumično različite amplitude i harmonijski sadržaj snage izobličenja mogu učiniti da rješenje pasivnog harmonijskog filtera postane neučinkovito. Nadalje, uvjeti opterećenja i različite konfiguracije danas uzrokuju harmonike do 50. reda. Sofisticiraniji koncepti aktivnog filtriranja djeluju u tako širokim frekvencijskim rasponima, prilagođavajući svoj rad rezultirajućem harmonijskom spektru, [16].

Aktivni harmonijski filteri APF (eng. *Active Power Filters*) su uređaji kvalitete električne energije koji trajno prate nelinearno opterećenje i dinamički osiguravaju precizno kontroliranu struju. Ova struja ima istu amplitudu harmonijske struje, ali se ubrizgava u suprotnom faznom pomaku. Time se poništavaju harmonijske struje u električnom sustavu. Kao rezultat toga, struja izvora napajanja ostat će sinusoidna jer će se harmonici međusobno negirati, [16].

Danas se filteri aktivne snage mogu koristiti kao praktično rješenje za rješavanje problema uzrokovanih nedostatkom kvalitete električne energije. Nova tehnologija energetskih elektroničkih uređaja i novi razvoj digitalne obrade signala omogućili su njezinu praktičnu

primjenu. Aktivni filteri snage mogu u potpunosti kompenzirati nelinearna opterećenja elektroenergetskih sustava, [13].

Za razliku od pasivnih LC filtera, aktivni filteri ne predstavljaju potencijalnu rezonanciju u mreži i ne utječu na promjene impedancije izvora. Prema [16], općenito, aktivni harmonijski filteri mogu se instalirati u bilo kojem trenutku u niskonaponskoj mreži izmjenične struje i obično nude više funkcionalnosti od pasivnih filtera:

- Uklanjaju sve harmonijske struje iz nelinearnih opterećenja (od 1. do 50. reda)
- Kompenziraju jalovu snagu i ispravljaju faktor snage
- Kompenziraju treperenje (ako je uzrokovano jalovom snagom).
- Djeluju kao prigušni otpornik kako bi izbjegli harmonijsku rezonanciju.

Struktura aktivnog filtera može biti struktura serijske ili paralelne arhitekture. Odgovarajuća struktura za implementaciju ovisi o vrstama harmonijskih izvora u elektroenergetskom sustavu i učincima koje bi različita filterska rješenja izazvala na cjelokupni učinak sustava. Prema [21], klasifikacija aktivnog filtera na temelju topologije:

1. Serijski aktivni filter
2. Paralelni aktivni filter
3. Kombinacija aktivnih i pasivnih filtera poznatiji kao hibridni
4. Kombinacija serijskih i paralelnih aktivnih filtera poznatiji kao UPQC (eng. *Unified Power Quality Conditioner*).

Prema [13], parametri za definiranje aktivnog filtera su:

- konfiguracija kruga pretvarača snage (njegova shema, topologija pretvarača snage i korišteni elektronički uređaji)
- metoda upravljanja (PWM modulacija)
- upravljačka strategija (način dobivanja referentnog signala).

### 4.6.1. Paralelni aktivni filter

Najčešća APLC (eng. *Active Power Line Conditioner*) konfiguracija je paralelni APF. Trenutna harmonijska opterećenja mogu se kompenzirati ovom APLC konfiguracijom. Tipičan primjer opterećenja izvora struje je ispravljač s induktivnom granom na istosmjernoj strani. Princip rada paralelnog APF-a temelji se na ubrizgavanju struje suprotne faze, ali istog iznosa, od harmonijske struje koju troši opterećenje, tako da izvor struje predstavlja čisti sinusni valni oblik.

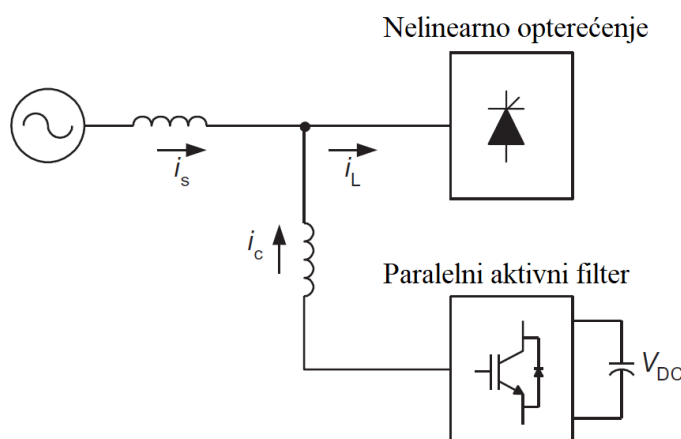
U principu, ova radnja omogućuje da struja izvora napajanja poprimi bilo koji valni oblik koji nas zanima, na primjer, struju bez neravnoteže i izobličenja, [13].

Paralelni aktivni filter je uređaj koji se temelji na energetskom elektroničkom pretvaraču spojenom paralelno s nelinearnim opterećenjem u zajedničkoj točki (PCC). Slika 4.2. prikazuje konfiguraciju paralelnog APF-a u mreži. Ovi filteri se široko koriste za poboljšanje kvalitete električne energije, smanjenje harmonijskih struja, poboljšanje faktora snage i kompenzaciju jalove snage. Prema [20], konfiguracija paralelnog APF-a varira na temelju:

1. vrste izvora pretvarača
2. tipa linijskog filtera
3. topologije pretvarača
4. broja faza
5. kontrolnog pristupa.

Prema [4], takve konfiguracije daju dobre karakteristike kompenzacije, iako njihova praktična primjena ima neke nedostatke:

- Teško je izgraditi PWM pretvarače velike snage s brzim odzivom i malim gubicima
- Aktivni filteri imaju visoku početnu cijenu u usporedbi s pasivnim filterima
- Struja ubrizgana u mrežu aktivnim filterom može teći kroz druge pasivne filtere i kondenzatore spojene na mrežu u sustav.



Slika 4.2. Osnovna shema aktivnog paralelnog filtera [21]

Slika prikazuje nelinearno neuravnoteženo opterećenje koje napaja uravnotežen sinusni izvor napona. Struja opterećenja  $I_L$  će predstavljati neke harmonike, faznu neravnotežu i faktor snage manji od 1. To jest, struja opterećenja svake faze uključuje harmonijske komponente, a temeljna



komponenta predstavlja unaprijed određenu faznu razliku u odnosu na napon. Paralelni APF u svojoj ulozi filtera daje kompenzacijsku struju  $I_C$ , koja mora zadovoljiti trenutni Kirchhoffov zakon u točki zajedničkog spajanja (PCC), [4].

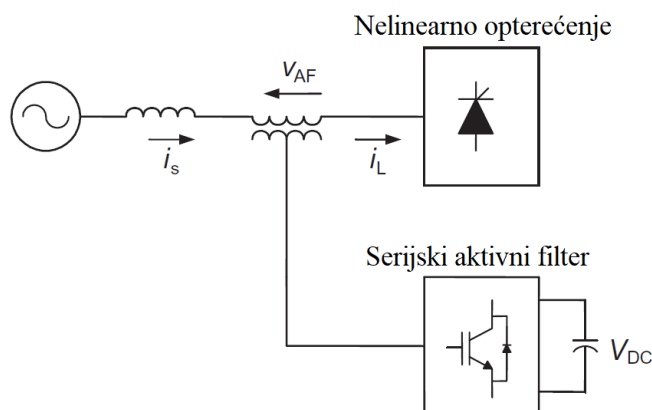
$$I_S = I_L - I_C \quad (4-1)$$

U ovom promatranom trenutku cilj filtriranja je izvorna struja u fazi s naponom, odnosno savršena sinusna struja.

#### 4.6.2. Serijski aktivni filter

Opterećenja kao što su diodni ispravljači s visokim kapacitetom na istosmjernoj strani smatraju se nelinearnim opterećenjima koja stvaraju harmonike u izvoru napona, koji se naziva harmonijski izvor napona HVS (eng. *Harmonic Voltage Source*). Dokazano je da kompenzacija opterećenja tipa HVS s paralelnim APF ne poništava u potpunosti harmonike struje opterećenja i često rezultira vrlo nepotpunom kompenzacijom. Iz tog razloga napravljena je konfiguracija serijskog aktivnog filtera. Iako su serijski aktivni filteri idealni za uklanjanje harmonika naponskog valnog oblika i balansiranje trofaznih napona, oni su još uvijek manje uobičajeni u industriji od paralelnih APF-ova, [4], [20].

Serijski aktivni filter spojen je u seriju s glavnim krugom, prije opterećenja kao što je prikazano na Slici 4.3. Serija APF može se spojiti na strujni krug izravno ili preko odgovarajućeg transformatora. Serijski aktivni filter osigurava nultu impedanciju za komponentu osnovnog harmonika, dok za više harmonike osigurava put visoke impedancije, [20].



Slika 4.3. Osnovna shema aktivnog serijskog filtera [21]

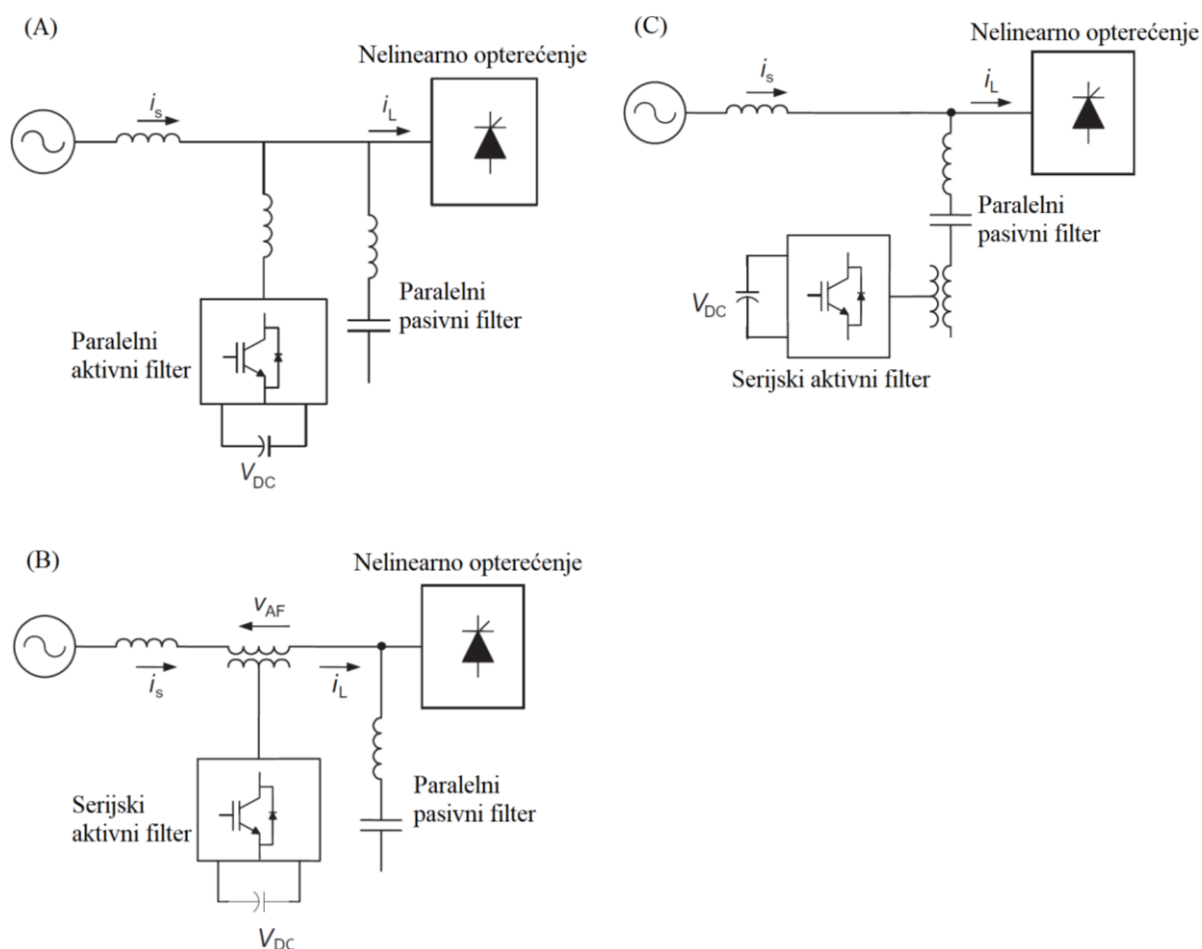
Serijski aktivni filter obično se koristi za kompenzacije povezane s naponom. Neke od primjena uključuju uklanjanje harmonika napona i propada, regulaciju i balansiranje napona na terminalu opterećenja, smanjenje napona inverznog slijeda i regulaciju napona na trofaznim sustavima, te prigušivanje širenja harmonika uzrokovanog rezonancijom s linijskim impedancijama i pasivnim paralelnim filterima. Kada je serijski aktivni filter dizajniran za kompenzaciju harmonika napona koje stvara opterećenje, on proizvodi odgovarajući valni oblik kako bi neutralizirao izobličenje napona uzrokovano opterećenjem tako da se ne prenosi na napon napajanja. To jest, da napon na terminalu opterećenja ima odgovarajući sinusoidan valni oblik, [4], [20].

### 4.6.3. Hibridni aktivni filter

Kako bi se iskoristile prednosti svake od metoda filtriranja u praksi se često povezuju aktivni i pasivni filteri. Cilj korištenja hibridne topologije je poboljšati performanse pasivnog filtera i smanjenje snage aktivnog filtera, čime se smanjuju troškovi kompenzacije. Pasivni filteri se koriste za poništavanje dominantnih harmonika opterećenja (najčešće 3. 5. i 7. red harmonika), a aktivni filter namijenjen je poboljšanju performansi pasivnih filtera ili poništavanju drugih nedominantnih harmonijskih komponenti. Kao rezultat toga, snaga aktivnog filtera je smanjena, a problemi s pasivnim filterom (npr. rezonancije s impedancijom izvora) su ublaženi. Ukupni trošak se smanjuje bez smanjenja učinkovitosti, [13].

Slika 4.4. prikazuje neke uobičajene hibridne topologije. Prema [20], tipično, postoje tri osnovne topologije za hibridne APF-ove u obliku kombinacije osnovnih aktivnih i pasivnih filtera:

1. Kombinacija serijskog aktivnog filtera i paralelnog pasivnog filtera
2. Kombinacija paralelnog aktivnog filtera i paralelnog pasivnog filtera
3. Serijski spoj serijskog aktivnog filtera i paralelnog pasivnog filtera.



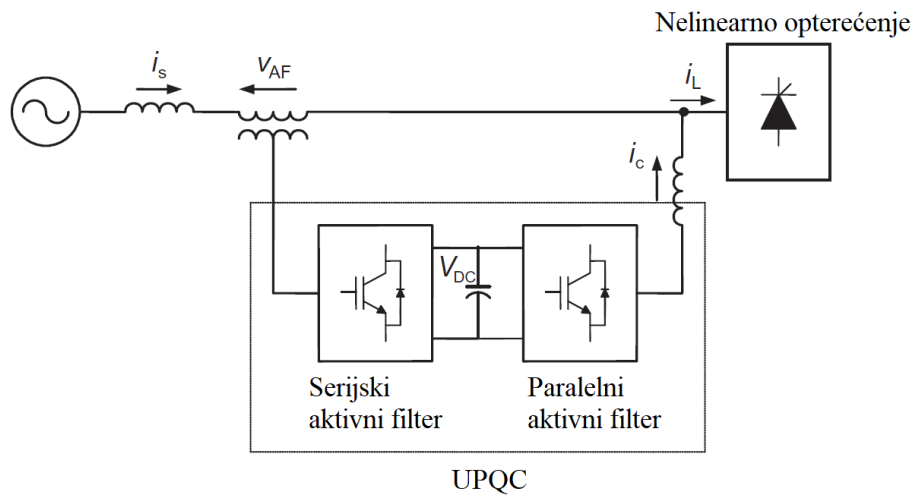
Slika 4.4. Topologija hibridnog filtera. (A) Paralelni aktivni filter i paralelni pasivni filter. (B) Serijski aktivni filter i paralelni pasivni filter. (C) Serijski spoj serijskog aktivnog filtera i paralelnog pasivnog filtera [21]

Strategija upravljanja aktivnim filterom temelji se na stvaranju napona proporcionalnog harmonicima struje izvora. Hibridni APF kao kombinacija pasivnog filtera i aktivnog filtera može imati različite strukture na temelju konfiguracije pretvarača aktivnog dijela i vrste pasivnog dijela. Aktivni filterski pretvarač može biti pretvarač izvora napona ili pretvarač izvora struje. Pasivni filter može biti LC filter, LCL filter, RLC filter, paralelni rezonancijski filter ili filter ubrizganog tipa. Konačno, hibridni APF može se konfigurirati kao dvožični, trožični ili četverožični sustav, [20].

#### 4.6.4. UPQC filter

UPQC (eng. *Unified Power-quality Conditioner*) je objedinjeni uređaj za poboljšanje parametara kvalitete električne energije. Koristi kombinirani dizajn serijskih i paralelnih aktivnih filtera. Osnovna shema UPQC-a prikazana je na Slici 4.5. Serijski aktivni filter povezan je serijskim putem kroz trofazni serijski transformator, njegova osnovna funkcija je izolirati harmonike napona između izvora i opterećenja, djeluje kao kontrolirani izvor napona i može kompenzirati sve probleme s naponom (reguliranje napona, kompenziranje treperenja i nesimetriju

napona itd.). Paralelni aktivni filter se obično povezuje kroz opterećenje kako bi kompenzirao sve probleme vezane uz struju, a njegova osnovna funkcija je kompenzacija harmonika struje opterećenja, jalove struje, strujne neravnoteže itd, [13].



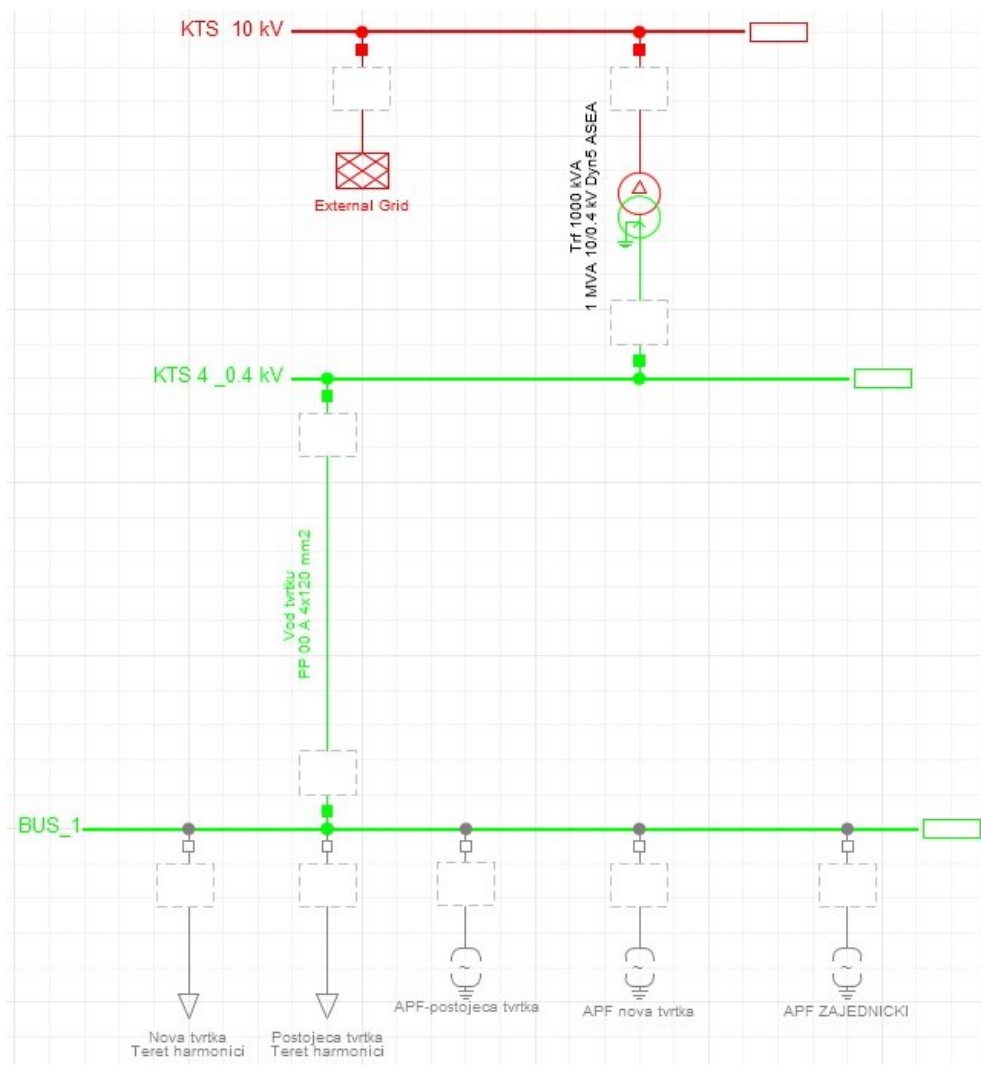
Slika 4.5. Osnovna shema UPQC filtera [21]

Funkcionalno, ova konfiguracija može djelovati na struju i napon dinamički, pa se naziva i univerzalni aktivni filter. Topologija ovog filtera omogućuje svakom pretvaraču da zasebno kontrolira ciljne varijable. Glavni nedostatak ovog filtera je njegova relativno visoka cijena. Međutim, UPQC je učinkovitiji od ostalih filtera. Može biti dobar izbor jer ima prednosti u odnosu na druge starije filtere, kao što su jaka regulacija, mala veličina, mali gubici i nema šuma i rezonancije koje se mogu pojaviti u serijskim ili paralelnim filterima, [4].

## **5. SNIŽAVANJE IZNOSA HARMONIKA U DIJELU DISTRIBUCIJSKE MREŽE POMOĆU AKTIVNOG FILTERA SNAGE**

U ovom dijelu rada analizirat će se utjecaji novog postrojenja priključenog na postojeću industrijsku zonu, te će se isti pokušati izbjeći pomoću aktivnog filtra snage. Mjerni podatci novog postrojenja promatrane industrijske zone dobiveni su pomoću uređaja A-Eberle PQ-box 200, klase točnosti A. Sva mjerenja obavljena su u skladu s normom HRN EN 50160. Za analizu sljedećih događaja uzeti su podatci maksimalnog opterećenja promatranog postrojenja tijekom sedmodnevnog mjerenja. Predmet promatranja ove analize su individualni harmonici i ukupno harmonijsko izobličenje pojedine faze promatrane industrijske zone, dobiveni u programskom paketu DIgSILENT Power Factory za gore navedeni događaj maksimalne snage.

Analiza promatrane industrijske zone u distribucijskoj mreži napravljena je u tri različita dijela. Prvi dio odnosi se na stanje mreže prije priključka novog postrojenja i aktivnih filtera snage. U drugom dijelu se na promatranu mrežu priključuje novo postrojenje te se vrše mjerenja i analizira njegov utjecaj na mrežu. U zadnjem dijelu analiziraju se scenariji priključaka različitih aktivnih filtera snage. Na Slici 5.1. prikaz je dio distribucijske mreže koji će biti predmet ove analize. Mreža se sastoji od transformatora, voda te sabirnice 1 na kojoj su priključeni aktivni filteri, postojeće industrijsko postrojenje i novo industrijsko postrojenje.

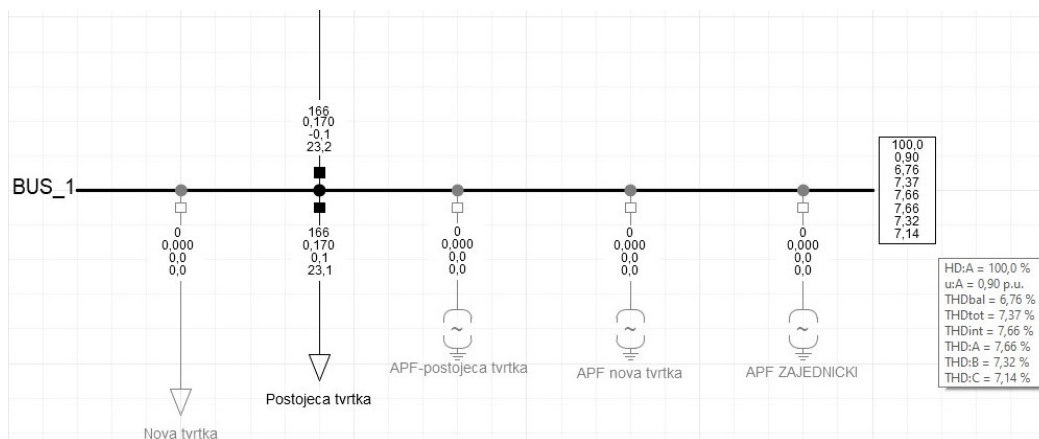


Slika 5.1. Shema industrijske zone

### 5.1. Početno stanje dijela distribucijske mreže

U programskom paketu DIGSILENT Power Factory simulirana je harmonijska analiza početnog stanja mreže. Podatci za simulaciju uzeti su iz realnih podataka sedmodnevnog mjerenja kvalitete električne energije, a vrijednosti pojedinih harmonika uzeti su za trenutak maksimalnog opterećenja. Slika 5.2. prikazuje harmonijsku analizu početnog stanja mreže gdje je priključeno samo postojeće industrijsko postrojenje. Analizom tokova snaga očitana je opterećenost voda koja iznosi 69,2%.

## 5. SNIŽAVANJE IZNOSA HARMONIKA U DIJELU DISTRIBUCIJSKE MREŽE POMOĆU AKTIVNOG FILTERA SNAGE



Slika 5.2. Harmonijska analiza početnog stanja

**Tablica 5.1.** Vrijednosti THD-a u početnom stanju mreže.

THDbal	THDtot	THDint	THD:A	THD:B	THD:C
6,76 %	7,37 %	7,66 %	7,66 %	7,32 %	7,14 %

Razlikuju se:

THDbal – ukupno harmonijsko izobličenje isključujući harmonike nultog slijeda.

THDtot – ukupno harmonijsko izobličenje uključujući harmonike nultog slijeda.

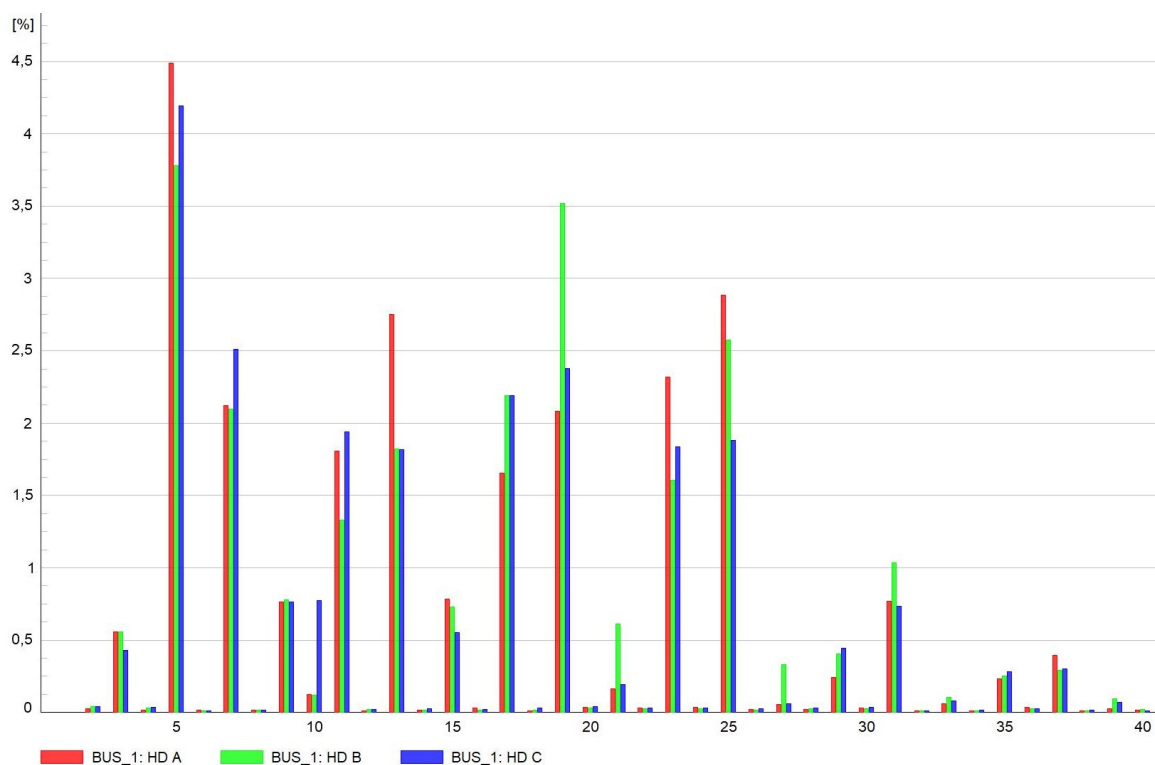
THDint – ukupno harmonijsko izobličenje cjelobrojnih harmonika.

THD:A – ukupno harmonijsko izobličenje faze A.

THD:B – ukupno harmonijsko izobličenje faze B.

THD:C – ukupno harmonijsko izobličenje faze C.

Harmonijsko izobličenje prvih četrdeset pojedinačnih harmonika svake faze prikazano je na Slici 5.3.



Slika 5.3. Harmonijski spektar prvih četrdeset harmonika početnog stanja

Iz dobivenih podataka prikazanih u Tablici 5.1. primjećuje se da su vrijednosti svih THD-a iznad preporučene granice koja iznosi 5%, iako norma HRN EN 50160 dozvoljava iznos ukupnog harmonijskog izobličenja do 8%. Iz harmonijskog spektra prvih četrdeset harmonika primjećuje se kako je peti harmonik sve tri faze najdominantniji. Također, harmonijsko izobličenje neparnih harmonika pojedine faze izraženiji su od parnih harmonika, pa u ovom radu parni harmonici nisu predmet promatranja.

## 5.2. Priklučenje novog postrojenja na promatranu distribucijsku mrežu

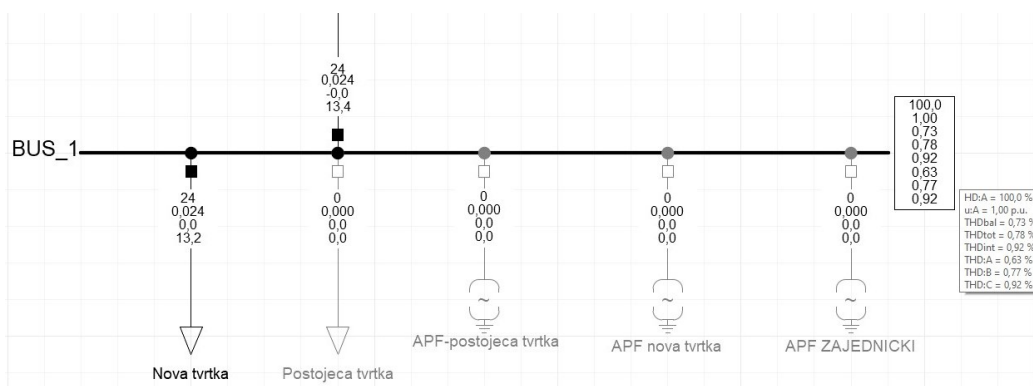
Na postojeće stanje mreže dodaje se novo industrijsko postrojenje na sabirnicu 1. Prvo će se promatrati harmonijska analiza novog industrijskog postrojenja, koje harmonike generira i koliko je harmonijsko izobličenje tog postrojenja. Zatim će se analizirati zajednički utjecaj novog postrojenja i već postojećeg postrojenja na promatranu distribucijsku mrežu.

### 5.2.1. Slučaj 1: Harmonijska analiza novog industrijskog postrojenja

Slika 5.4. prikazuje harmonijsku analizu novog industrijskog postrojenja spojenog na mrežu. Analizom tokova snaga očitana je opterećenost voda koja iznosi 10,3%.



## 5. SNIŽAVANJE IZNOSA HARMONIKA U DIJELU DISTRIBUCIJSKE MREŽE POMOĆU AKTIVNOG FILTERA SNAGE

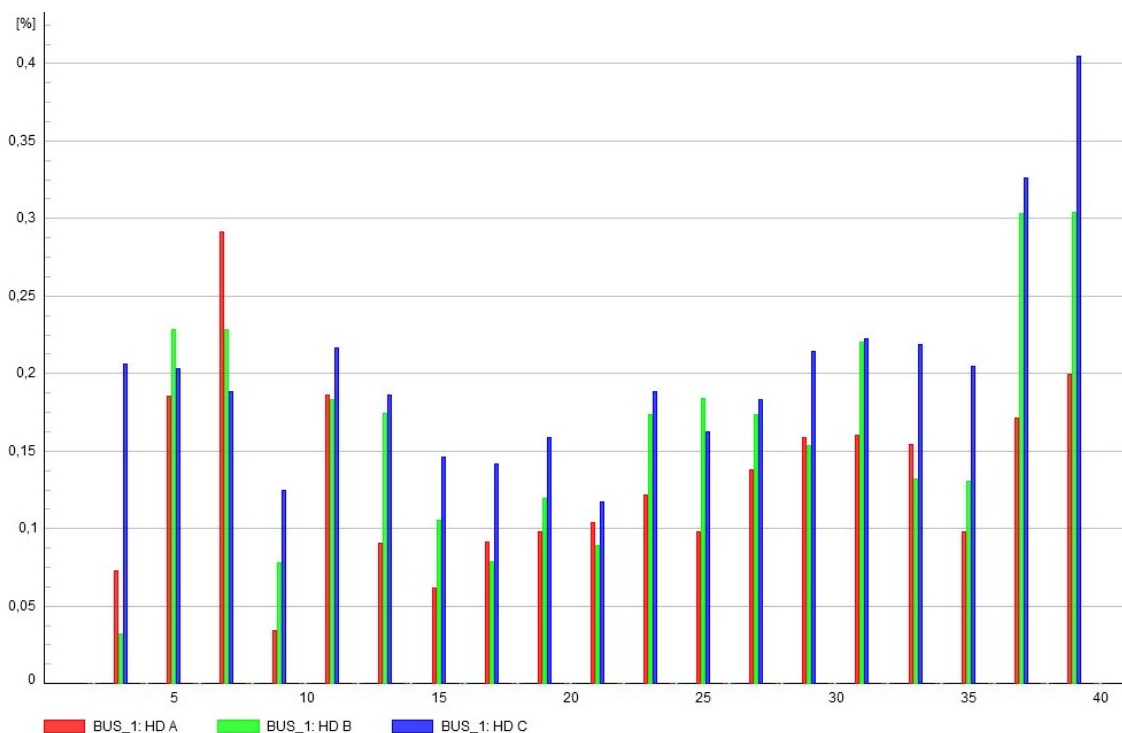


Slika 5.4. Harmonijska analiza novog industrijskog postrojenja

**Tablica 5.2.** Vrijednosti THD-a novog industrijskog postrojenja na mrežu.

THD <sub>bal</sub>	THD <sub>tot</sub>	THD <sub>int</sub>	THD:A	THD:B	THD:C
0,73 %	0,78 %	0,92 %	0,63 %	0,77 %	0,92 %

Harmonijsko izobličenje prvih četrdeset pojedinačnih harmonika svake faze koje stvara novo industrijsko postrojenje prikazano je na Slici 5.5.



Slika 5.5. Harmonijski spektar prvih četrdeset harmonika novog industrijskog postrojenja

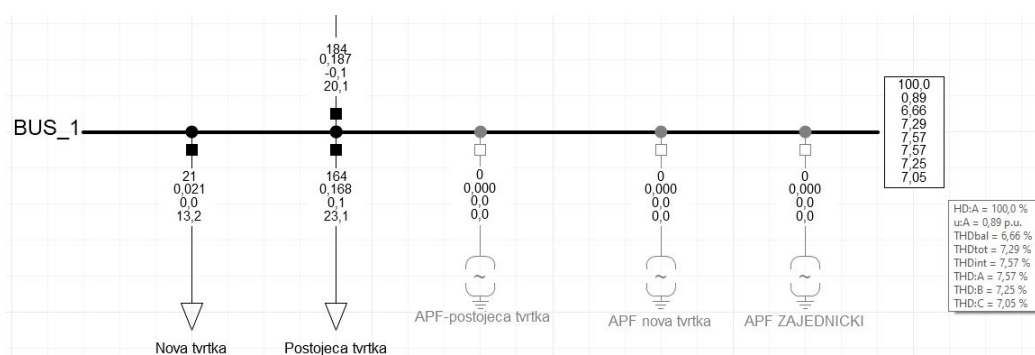
Iz dobivenih podataka prikazanih u Tablici 5.2. primjećuje se da su vrijednosti svih THD-a ispod 1% što znači da su unutar preporučene granice koja iznosi 5%. Iz harmonijskog spektra prvih dvadeset pet harmonika primjećuje se kako je peti harmonik faze A najdominantniji, a sveukupno

## 5. SNIŽAVANJE IZNOSA HARMONIKA U DIJELU DISTRIBUCIJSKE MREŽE POMOĆU AKTIVNOG FILTERA SNAGE

gledano od svih četrdeset harmonika najdominantniji je trideset deveti harmonik faze C. Ovdje se još može primijetiti kako su harmonici iznad dvadeset petog harmonika izraženi te bi mogli stvarati probleme u mreži. Također, harmonijsko izobličenje neparnih harmonika pojedine faze izraženiji su od parnih harmonika.

### 5.2.2. Slučaj 2: Harmonijska analiza postojećeg i novog industrijskog postrojenja

Slika 5.6. prikazuje harmonijsku analizu postojećeg i novog industrijskog postrojenja spojenog na mrežu. Analizom tokova snaga očitana je opterećenost voda koja iznosi 76,6%. Ukoliko usporedimo opterećenje voda s početnim slučajem primjećuje se blagi porast zbog priključka novog postrojenja.



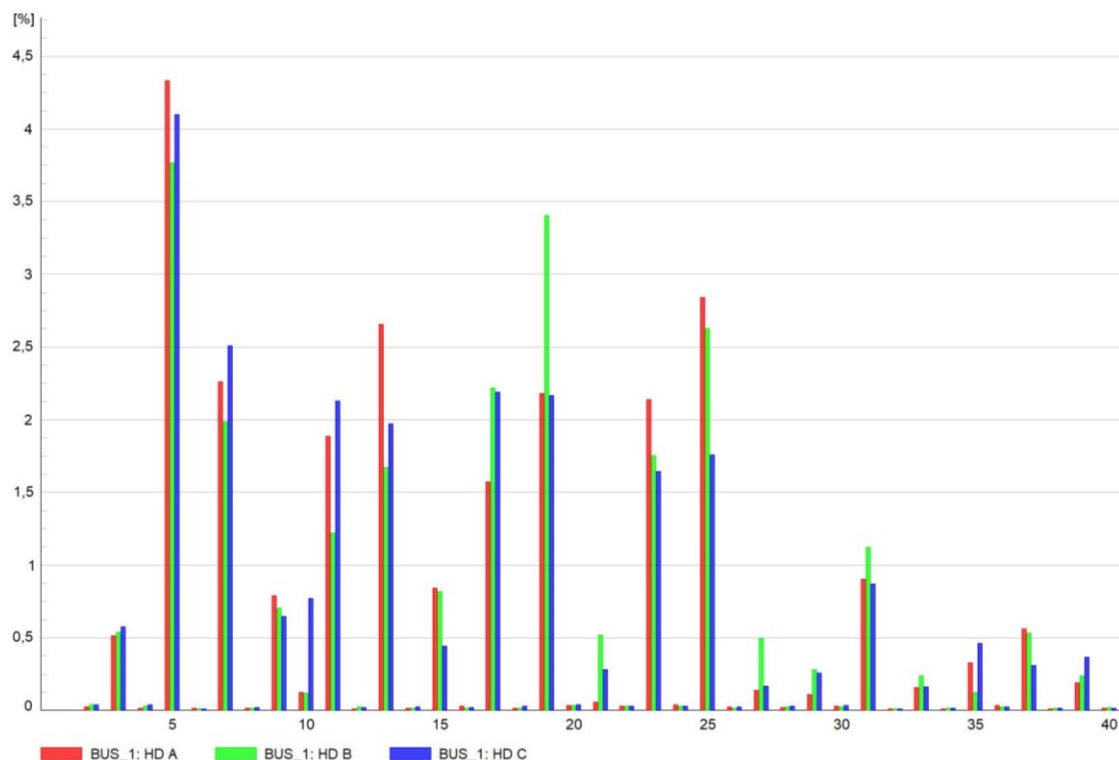
Slika 5.6. Harmonijska analiza postojećeg i novog industrijskog postrojenja

**Tablica 5.3.** Vrijednosti THD-a postojećeg i novog industrijskog postrojenja na mrežu.

THD <sub>bal</sub>	THD <sub>tot</sub>	THD <sub>int</sub>	THD:A	THD:B	THD:C
6,66 %	7,29 %	7,57 %	7,57 %	7,25 %	7,05 %

Harmonijsko izobličenje prvih četrdeset pojedinačnih harmonika svake faze koje stvarju postojeće i novo industrijsko postrojenje prikazano je na Slici 5.7.

## 5. SNIŽAVANJE IZNOSA HARMONIKA U DIJELU DISTRIBUCIJSKE MREŽE POMOĆU AKTIVNOG FILTERA SNAGE



Slika 5.7. Harmonijski spektar prvih četrdeset harmonika postojećeg i novog industrijskog postrojenja

Usporedbom podataka iz Tablica 5.1. i 5.3. primjećuje se da su se vrijednosti svih THD-a smanjile za mali iznos (približno 0.1%). Na smanjenje THD-a utjecalo je nova industrijsko postrojenje, razlog smanjenja se krije u zbrajanju harmonika. Harmonici se na istim frekvencijama fazorski zbrajaju, tj. bitan je i iznos i kut. Svako industrijsko postrojenje djeluje na svoj način i nekada se može popraviti THD. Međutim, kako je došlo do samo blagog pada harmonika i dalje su vrijednosti svih harmonika iznad preporučene vrijednosti od 5%. Iz harmonijskog spektra prvih četrdeset harmonika primjećuje se kako je peti harmonik svih faza najdominantniji, a nakon njega slijedi devetnaesti harmonik faze B. Ako usporedimo harmonijski spektar sa Slike 5.7. i 5.3. primjećuje se kako su neki iznosi pojedinačnih harmonika pali, odnosno porasli, upravo zbog zbrajanja harmonika istih frekvencija.

Zbog visokih vrijednosti THDbal i THDtot iz Tablice 5.3. potrebno je na sabirnicu 1 priključiti aktivan filter snage, koji će utjecati na smanjenje ukupnog harmonijskog izobličenja u promatranoj mreži.

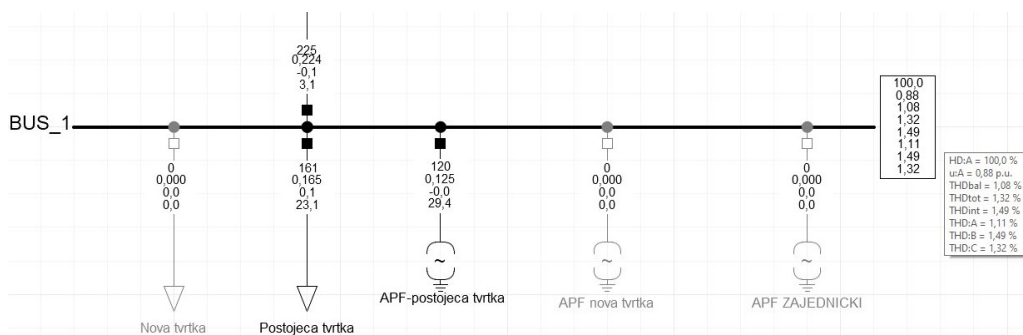
### 5.3. Priklučenje aktivnog filtera snage

U ovom dijelu analize razmatrat će se slučajevi rada pojedinih aktivnih filtera snage. Prvi slučaj sastoji se od priključenog postojećeg postrojenja i njegovog aktivnog filtera, drugi slučaj sastoji se od priključenog novog postrojenja i njegovog aktivnog filtera. Zatim u trećem slučaju priključeno je postojeće i novo postrojenje te aktivni filter postojećeg postrojenja, a u četvrtom slučaju aktivan filter novog postrojenja. U petom slučaju priključeno je postojeće i novo postrojenje te aktivni filteri postojećeg i novog postrojenja. U posljednjem slučaju priključeno je postojeće i novo postrojenje i jedan zajednički aktivni filter snage.

Cilj ove analize je utvrditi utjecaj aktivnih filtera na stanje u mreži i iznos ukupnog harmonijskog izobličenja.

#### 5.3.1. Slučaj 1: Harmonijska analiza postojećeg industrijskog postrojenja i aktivnog filtera snage postojećeg postrojenja

Slika 5.8. prikazuje harmonijsku analizu postojećeg industrijskog postrojenja i njegovog aktivnog filtera snage spojenih na mrežu. Analizom tokova snaga očitana je opterećenost voda koja iznosi 93,4%. Ukoliko usporedimo opterećenje voda s početnim slučajem, kada je na mrežu bilo spojeno samo postojeće postrojenje, došlo je do porasta opterećenja voda zbog aktivnog filtera snage. Nazivnu struju filtera ograničava upravo ova opterećenost voda.



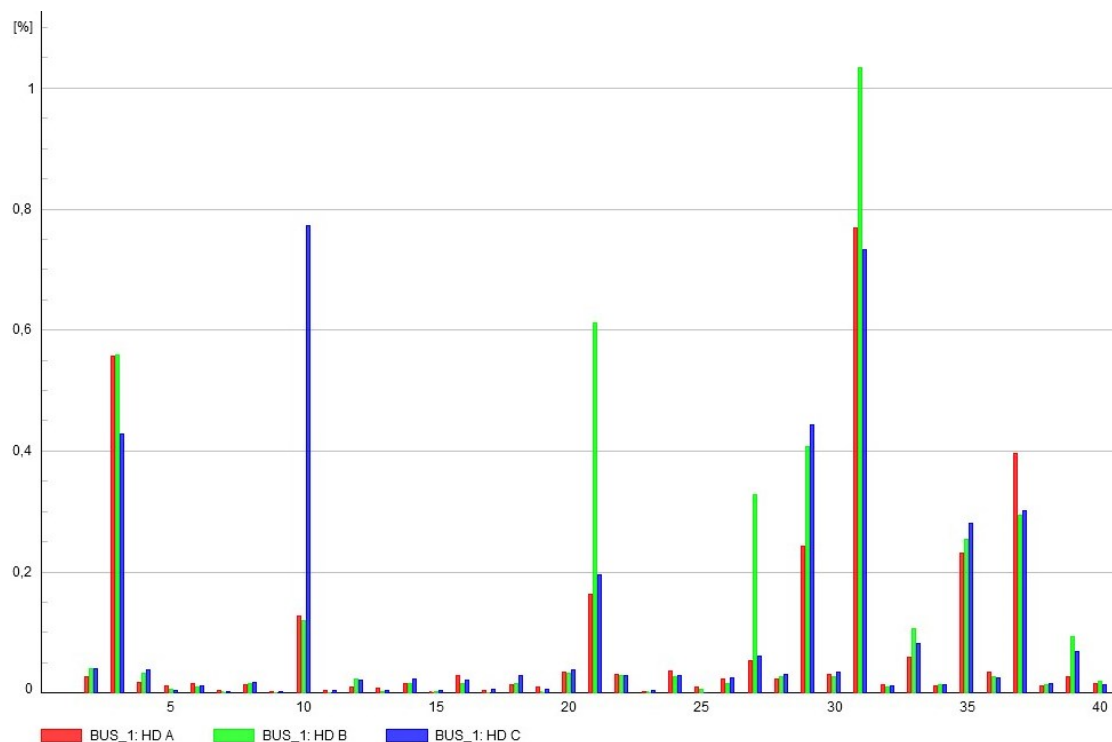
Slika 5.8. Harmonijska analiza postojećeg industrijskog postrojenja i aktivnog filtera postojećeg postrojenja

Tablica 5.4. Vrijednosti THD-a postojećeg industrijskog postrojenja i aktivnog filtera postojećeg postrojenja na mrežu.

THD:bal	THD:tot	THD:int	THD:A	THD:B	THD:C
1,08 %	1,32 %	1,49 %	1,11 %	1,49 %	1,32 %

## 5. SNIŽAVANJE IZNOSA HARMONIKA U DIJELU DISTRIBUCIJSKE MREŽE POMOĆU AKTIVNOG FILTERA SNAGE

Harmonijsko izobličenje prvih četrdeset pojedinačnih harmonika svake faze koje stvaraju postojeće industrijsko postrojenje i aktivni filter postojećeg postrojenja prikazano je na Slici 5.9.



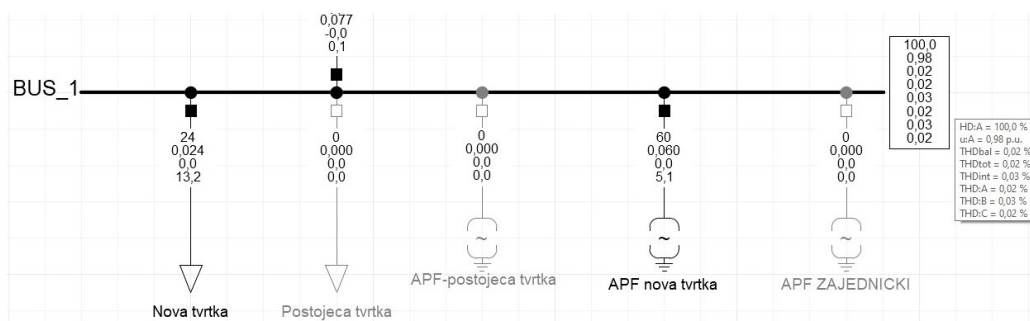
Slika 5.9. Harmonijski spektar prvih četrdeset harmonika postojećeg industrijskog postrojenja i aktivnog filtera postojećeg postrojenja

Usporedbom podataka iz Tablice 5.1. i 5.4. primjećuje se da su se vrijednosti svih THD-a smanjile za gotovo 6%. Što znači da su se primjenom aktivnog filtera snage postojećeg postrojenja poništili gotovo svi harmonici koje generira postojeće postrojenje, to se može primijetiti i usporedbom Slika 5.3. i 5.9.

### 5.3.2. Slučaj 2: Harmonijska analiza novog industrijskog postrojenja i aktivnog filtera snage novog postrojenja

Slika 5.10. prikazuje harmonijsku analizu novog industrijskog postrojenja i njezinog aktivnog filtera snage spojenih na mrežu. Analizom tokova snaga očitana je opterećenost voda koja iznosi 31,9%. Ukoliko usporedimo opterećenje voda sa slučajem kada je spojeno samo novo postrojenje uočava se porast opterećenja zbog priključenog aktivnog filtera snage novog postrojenja.

## 5. SNIŽAVANJE IZNOSA HARMONIKA U DIJELU DISTRIBUCIJSKE MREŽE POMOĆU AKTIVNOG FILTERA SNAGE

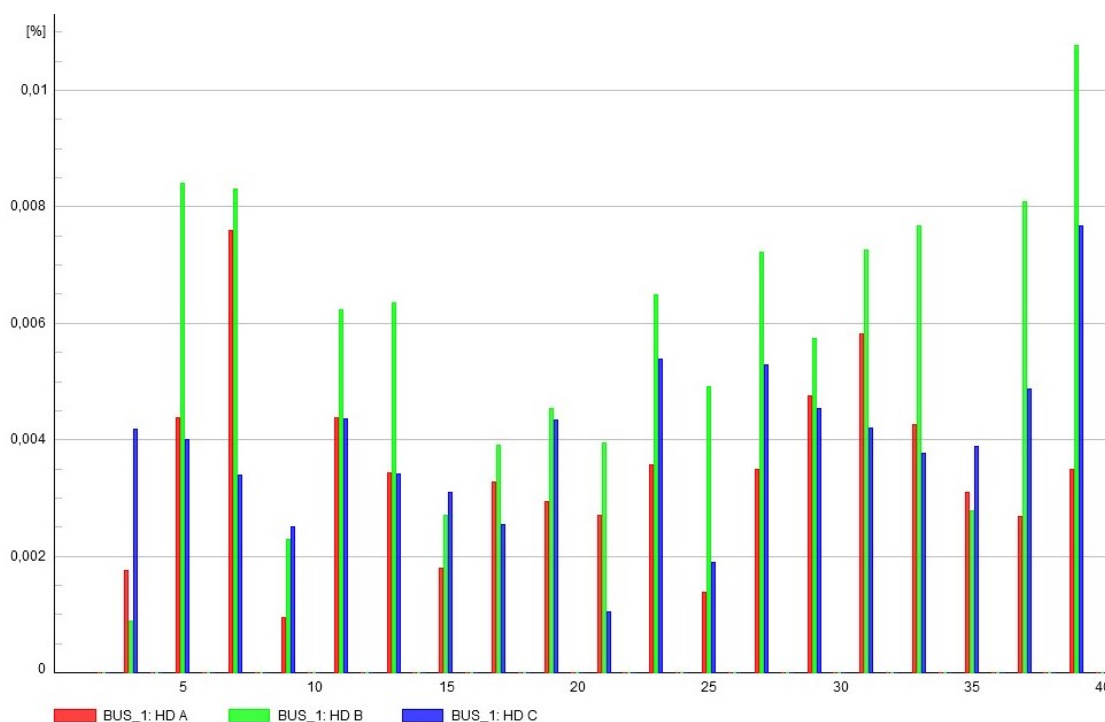


Slika 5.10. Harmonijska analiza novog industrijskog postrojenja i aktivnog filtera novog postrojenja

**Tablica 5.5.** Vrijednosti THD-a novog industrijskog postrojenja i aktivnog filtera novog postrojenja na mrežu.

THDbal	THDtot	THDint	THD:A	THD:B	THD:C
0,02 %	0,02 %	0,03 %	0,02 %	0,03 %	0,02 %

Harmonijsko izobličenje prvih četrdeset pojedinačnih harmonika svake faze koje stvaraju novo industrijsko postrojenje i aktivni filter novog postrojenja prikazano je na Slici 5.11.



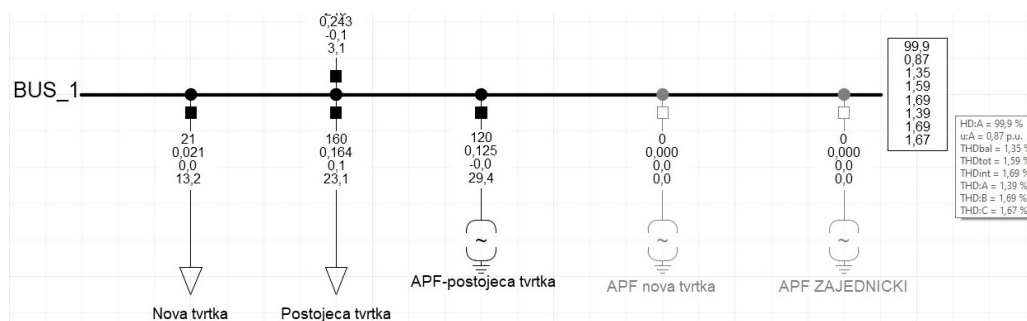
Slika 5.11. Harmonijski spektar prvih četrdeset harmonika novog industrijskog postrojenja i aktivnog filtera novog postrojenja

## 5. SNIŽAVANJE IZNOSA HARMONIKA U DIJELU DISTRIBUCIJSKE MREŽE POMOĆU AKTIVNOG FILTERA SNAGE

Usporedbom podataka iz Tablice 5.2. i 5.5. primjećuje se da su se vrijednosti svih THD-a smanjile na gotovo 0%. Što znači da su se primjenom aktivnog filtera snage novog postrojenja poništili svi harmonici koje generira novo postrojenje, to se može primijetiti i usporedbom Slika 5.5. i 5.11.

### 5.3.3. Slučaj 3: Harmonijska analiza postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnog filtera snage postojećeg postrojenja

Slika 5.12. prikazuje harmonijsku analizu postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnog filtera snage postojećeg postrojenja spojenih na mrežu. Analizom tokova snaga očitana je opterećenost voda koja iznosi 101,0%, stoga slijedi da ova kombinacija trošila i aktivnog filtera preopterećuje vod. Unatoč preopterećenosti voda provedena je harmonijska analize.



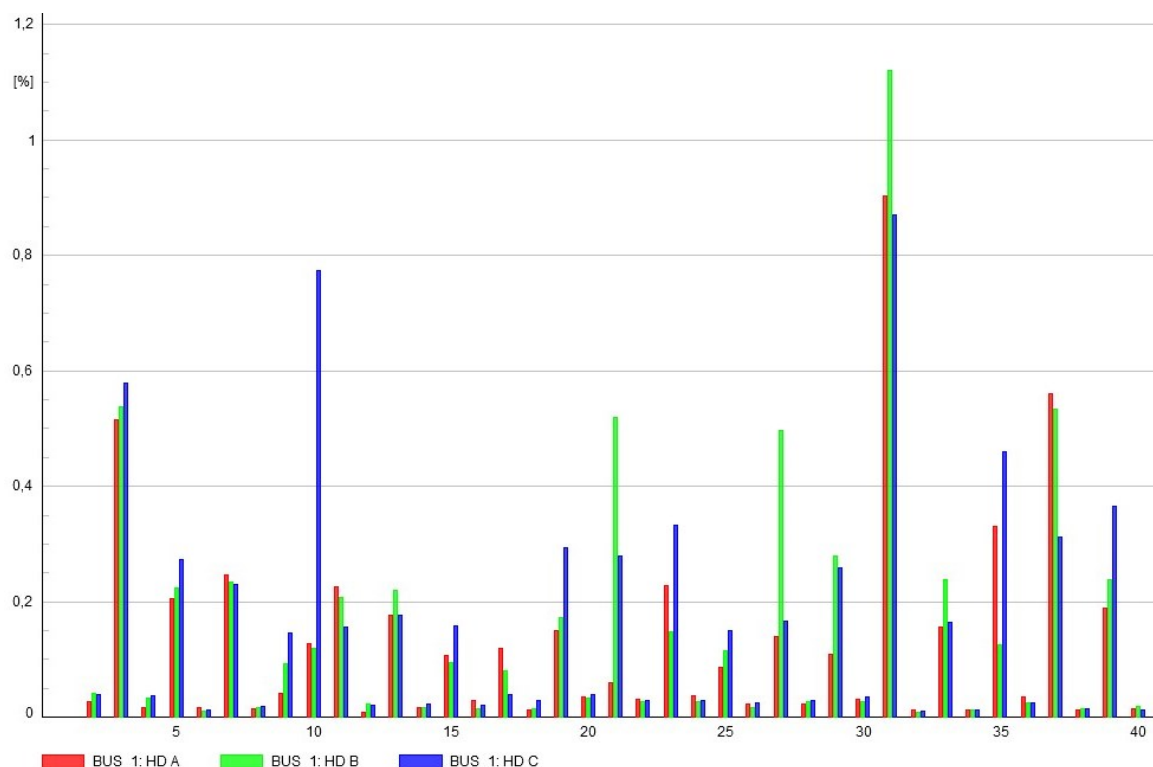
Slika 5.12. Harmonijska analiza postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnog filtera postojećeg postrojenja

**Tablica 5.6.** Vrijednosti THD-a postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnog filtera postojećeg postrojenja na mrežu.

THD <sub>bal</sub>	THD <sub>tot</sub>	THD <sub>int</sub>	THD:A	THD:B	THD:C
1,35 %	1,59 %	1,69 %	1,39 %	1,69 %	1,67 %

Harmonijsko izobličenje prvih četrdeset pojedinačnih harmonika svake faze koje stvaraju postojeće i novo industrijsko postrojenje i aktivni filter postojećeg postrojenja prikazano je na Slici 5.13.

## 5. SNIŽAVANJE IZNOSA HARMONIKA U DIJELU DISTRIBUCIJSKE MREŽE POMOĆU AKTIVNOG FILTERA SNAGE



Slika 5.13. Harmonijski spektar prvih četrdeset harmonika postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnog filtera postojećeg postrojenja

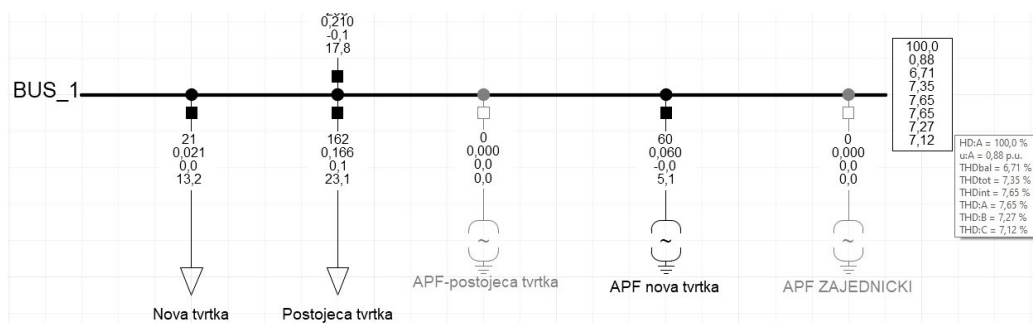
Iz dobivenih podataka prikazanih u Tablici 5.6. primjećuje se da su vrijednosti svih THD-a unutar preporučene granice koja iznosi 5%. Također, usporedbom Slika 5.7. i 5.13. primjećuje se pad svih iznosa harmonika. Međutim, rad aktivnog filtera snage postojećeg postrojenja preopterećuje vod iznad dozvoljenih granica te primjena ovog aktivnog filtera nije moguća.

### 5.3.4. Slučaj 4: Harmonijska analiza postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnog filtera snage novog postrojenja

Slika 5.14. prikazuje harmonijsku analizu postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnog filtera snage novog postrojenja spojenih na mrežu. Analizom tokova snaga očitana je opterećenost voda koja iznosi 86,3%.



## 5. SNIŽAVANJE IZNOSA HARMONIKA U DIJELU DISTRIBUCIJSKE MREŽE POMOĆU AKTIVNOG FILTERA SNAGE

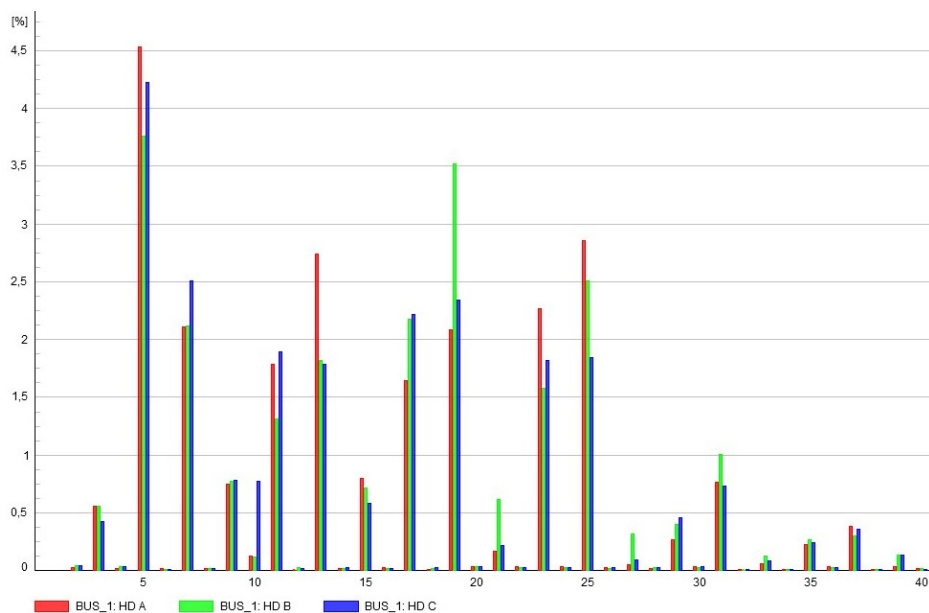


Slika 5.14. Harmonijska analiza postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnog filtera novog postrojenja

**Tablica 5.7.** Vrijednosti THD-a postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnog filtera novog postrojenja na mrežu.

<b>THDbal</b>	<b>THDtot</b>	<b>THDint</b>	<b>THD:A</b>	<b>THD:B</b>	<b>THD:C</b>
6,71 %	7,35 %	7,65 %	7,65 %	7,27 %	7,12 %

Harmonijsko izobličenje prvih četrdeset pojedinačnih harmonika svake faze koje stvaraju postojeće i novo industrijsko postrojenje i aktivni filter novog postrojenja prikazano je na Slici 5.15.



Slika 5.15. Harmonijski spektar prvih četrdeset harmonika postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnog filtera novog postrojenja

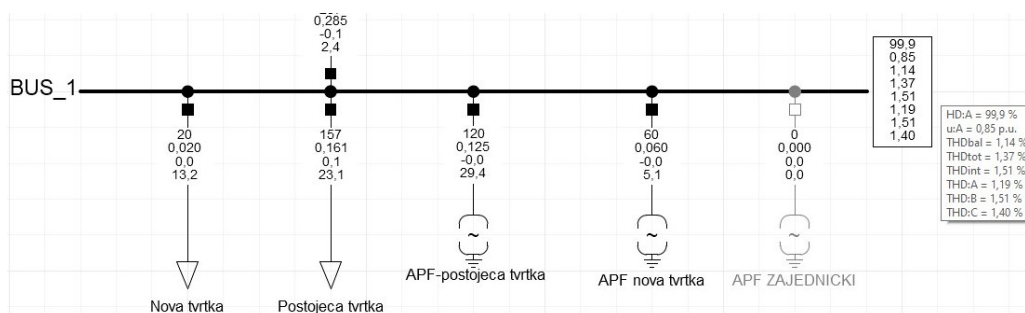
Usporedbom podataka iz Tablica 5.3. i 5.7. primjećuje se da su se vrijednosti svih THD-a povećali. Na povećanje THD-a utjecao je aktivni filter novog postrojenja, jer je aktivan filter poništio harmonike koje je generiralo novo postrojenje. Kao što je ranije navedeno, priključenje novog postrojenja je popravilo ukupno harmonijsko izobličenje promatrane mreže, slijedi da

## 5. SNIŽAVANJE IZNOSA HARMONIKA U DIJELU DISTRIBUCIJSKE MREŽE POMOĆU AKTIVNOG FILTERA SNAGE

aktivni filter novog postrojenja poništava takav učinak na promatranu mrežu. Isti zaključak se može donijeti usporedbom Slika 5.7. i 5.15. Vrijednosti THD-a su iznad preporučenih granica, slijeda da primjena ovog aktivnog filtera nije dobra opcija.

### 5.3.5. Slučaj 5: Harmonijska analiza postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnih filtera snage postojećeg i novog postrojenja

Slika 5.16. prikazuje harmonijsku analizu postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnih filtera snage postojećeg i novog postrojenja spojenih na mrežu. Analizom tokova snaga očitana je opterećenost voda koja iznosi 118,9%, stoga slijedi da ova kombinacija trošila i aktivnih filtera preopterećuje vod. Unatoč preopterećenosti voda provedena je harmonijska analize.



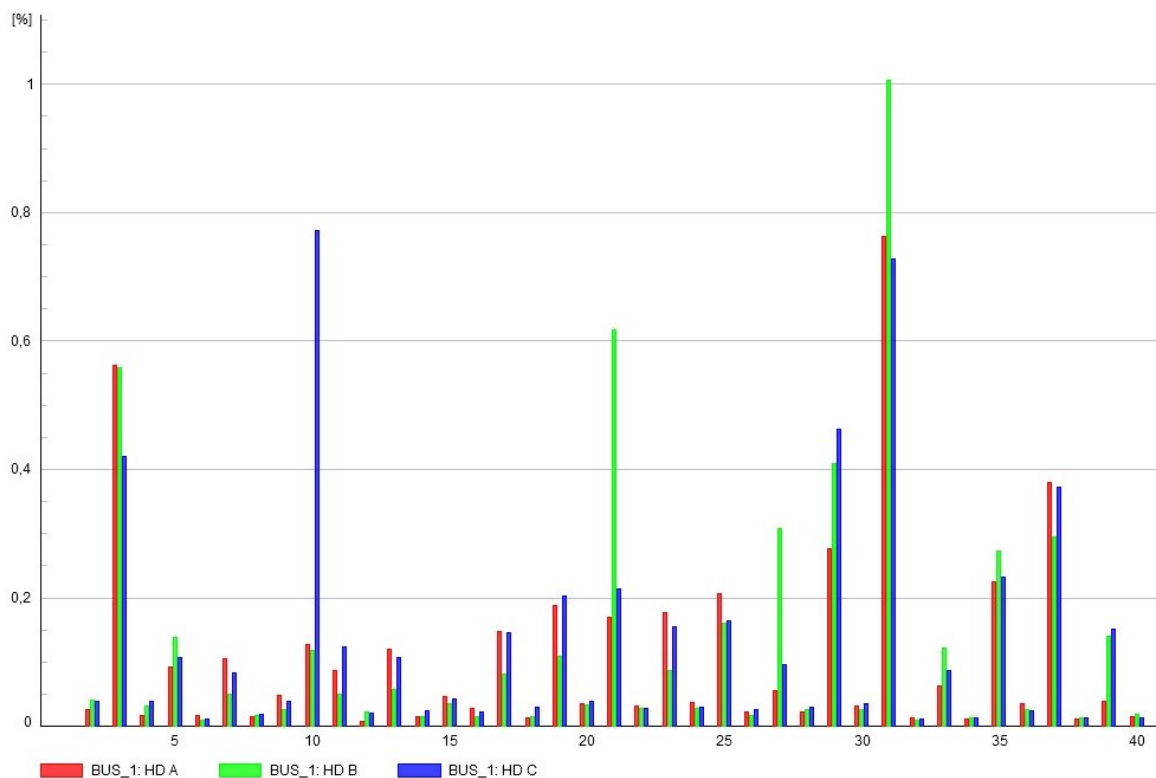
Slika 5.16. Harmonijska analiza postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnih filtera postojećeg i novog postrojenja

**Tablica 5.8.** Vrijednosti THD-a postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnih filtera postojećeg i novog postrojenja na mrežu.

THDbal	THDtot	THDint	THD:A	THD:B	THD:C
1,14 %	1,37 %	1,51 %	1,19 %	1,51 %	1,40 %

Harmonijsko izobličenje prvih četrdeset pojedinačnih harmonika svake faze koje stvaraju postojeće i novo industrijsko postrojenje i aktivni filteri postojećeg i novog postrojenja prikazano je na Slici 5.17.

## 5. SNIŽAVANJE IZNOSA HARMONIKA U DIJELU DISTRIBUCIJSKE MREŽE POMOĆU AKTIVNOG FILTERA SNAGE



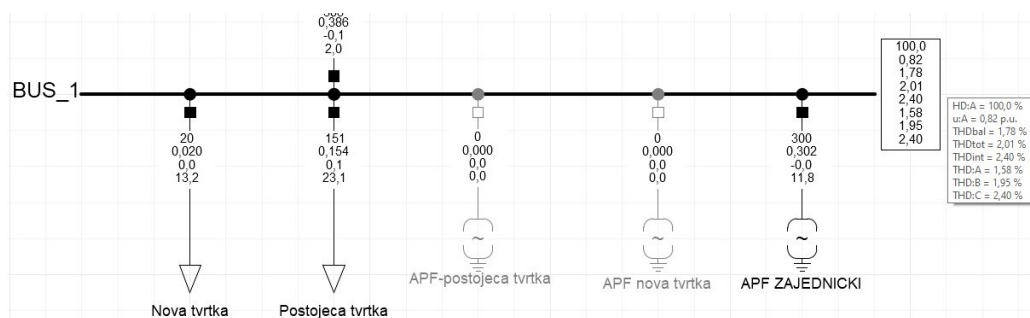
Slika 5.17. Harmonijski spektar prvih četrdeset harmonika postojećeg i novog industrijskog postrojenja i aktivnih filtera postojećeg i novog postrojenja

Iz dobivenih podataka prikazanih u Tablici 5.8. primjećuje se da su vrijednosti svih THD-a unutar preporučene granice. Također, usporedbom Slika 5.7. i 5.17. primjećuje se pad svih iznosa harmonika. Međutim, rad aktivnih filtera snage postojećeg i novog postrojenja preopterećuje vod iznad dozvoljenih granica te istovremena primjena ovih aktivnih filtera nije moguća.

### 5.3.6. Slučaj 6: Harmonijska analiza postojećeg i novog industrijskog postrojenja i zajedničkog aktivnog filtera snage

Slika 5.18. prikazuje harmonijsku analizu postojećeg i novog industrijskog postrojenja i zajedničkog aktivnog filtera snage spojenih na mrežu. Analizom tokova snaga očitana je opterećenost voda koja iznosi 95,7%.

## 5. SNIŽAVANJE IZNOSA HARMONIKA U DIJELU DISTRIBUCIJSKE MREŽE POMOĆU AKTIVNOG FILTERA SNAGE

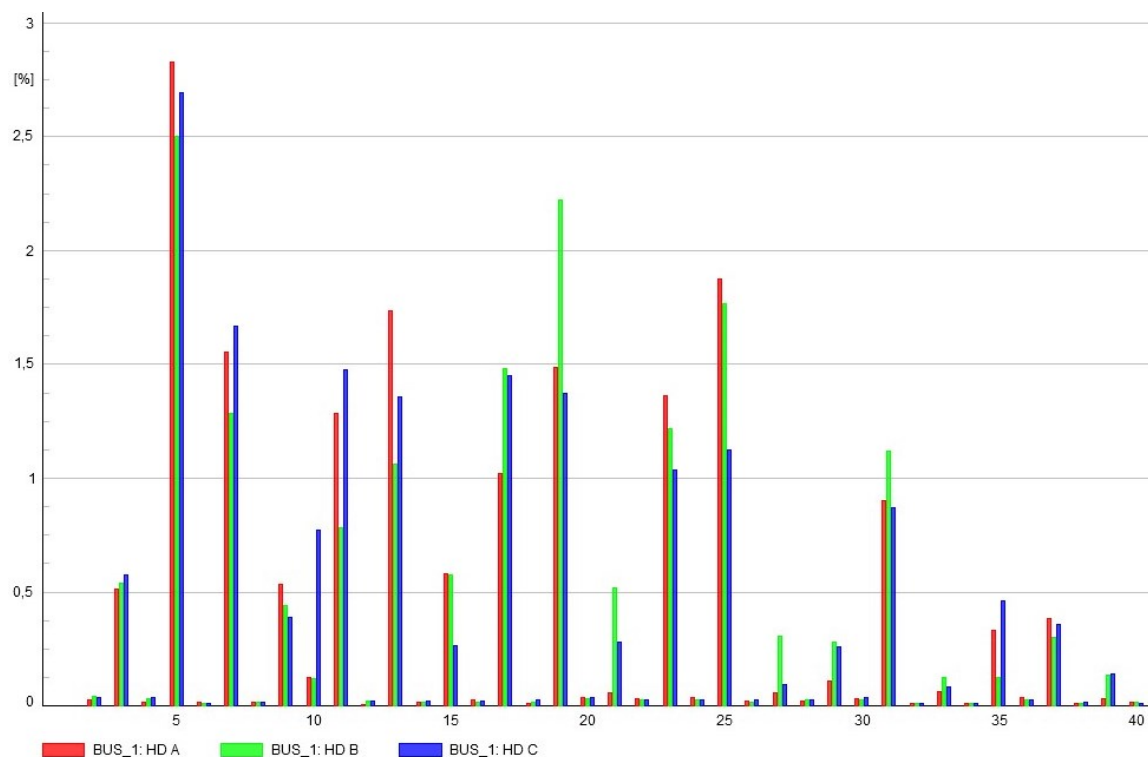


Slika 5.18. Harmonijska analiza postojećeg i novog industrijskog postrojenja i zajedničkog aktivnog filtera

**Tablica 5.9.** Vrijednosti THD-a postojećeg i novog industrijskog postrojenja i zajedničkog aktivnog filtera na mrežu.

THDbal	THDtot	THDint	THD:A	THD:B	THD:C
1,78 %	2,01 %	2,40 %	1,58 %	1,95 %	2,40 %

Harmonijsko izobličenje prvih četrdeset pojedinačnih harmonika svake faze koje stvaraju postojeće i novo industrijsko postrojenje i zajednički aktivni filter prikazano je na Slici 5.19.



Slika 5.19. Harmonijski spektar prvih četrdeset harmonika postojećeg i novog industrijskog postrojenja i zajedničkog aktivnog filtera

Usporedbom podataka iz Tablica 5.3. i 5.9. primjećuje se da su se vrijednosti svih THD-a smanjile ispod preporučenih granica. Prema tome slijedi da ovaj aktivan filter zadovoljava strujna

## 5. SNIŽAVANJE IZNOSA HARMONIKA U DIJELU DISTRIBUCIJSKE MREŽE POMOĆU AKTIVNOG FILTERA SNAGE

---

opterećenja voda i smanjuje TDH u dozvoljene granice. Analizom Slike 5.19. primjećuje se kako je iznos harmonijskog izobličenja većine harmonika ispod granica propisanih normom HRN EN 50160. Jedino u slučaju devetnaestog i dvadeset petog harmonika harmonijsko izobličenje pojedinih faza prelazi granicu od 1,5% harmonijskog izobličenja. Iako je ukupno harmonijsko izobličenje ispod dozvoljenih granica postoji mogućnost da ova dva harmonika stvaraju smetnje u promatranoj mreži.

S obzirom na izvedenu analizu, može se zaključiti da je posljednji scenarij, u kojem postojeće i dodano industrijsko postrojenje imaju zajednički aktivnog filtera snage, optimalno rješenje.

## 6. ZAKLJUČAK

Provedenom analizom u programskom paketu DIgSILENT Power Factory prikazan je utjecaj različitih trošila i aktivnih filtera na iznose harmonika u dijelu distribucijske mreže. Problem povišenog THD-a kojeg uzrokuju postojeće i novo industrijsko postrojenje pokušao se riješiti na način da se priključe zasebni aktivni filteri. Oni su podešeni tako da svaki filter injektiranjem struje poništava utjecaje koje generira odgovarajuće postrojenje. Međutim, u nekim slučajevima je došlo do preopterećenja voda, dok u jednom slučaju vrijednost ukupnog harmonijskog izobličenja nije smanjena u preporučene granice. Nakon toga, problem se pokušao riješiti pomoću jednog zajedničkog aktivnog filtera snage koji će injektiranjem struje poništiti ukupan utjecaj na harmonijsko izobličenje stvoreno zajedničkim radom postojećeg i novog industrijskog postrojenja. Takvim zajedničkim aktivnim filterom snage smanjeno je ukupno harmonijsko izobličenje koje je svojim radom proizvelo postojeće i novo industrijsko postrojenje. Iako je zajednički aktivan filter smanjio ukupno harmonijsko izobličenje, zbog strujnog opterećenja voda koje je iznosilo 95,7% nije bilo moguće daljnje povećanje struje aktivnog filtera. Iz tog razloga su vrijednosti harmonijskog izobličenja pojedinih harmonika iznad preporučenih granica zadanih normom HRN EN 50160. Harmonici devetnaestog i dvadeset petog reda prelaze harmonijsko izobličenje od 1,5% te postoji mogućnost da će ovi harmonici stvarati smetnje u promatranom dijelu distribucijske mreže. Promatranje ukupnog harmonijskog izobličenja nije dovoljna mjera u harmonijskoj analizi, također je potrebno promatrati individualne harmonike.

Ova analiza provedena je za trenutak maksimalne snage, što znači da je aktivan filter parametriran samo za taj trenutak. U realnom sustavu priključeni aktivni filter snage mora u svakom trenutku injektirati struju određenog iznosa i kuta kako bi održavao harmonijsko izobličenje kojeg stvara nelinearno trošilo u dozvoljenim granicama. Takav realan rad aktivnog filtera snage bi u ovom promatranom dijelu distribucijske mreže mogao stvoriti preopterećenja voda.

## LITERATURA

- [1] F. C. de La rosa, "HARMONICS AND POWER SYSTEMS, Distribution Control Systems," 2006.
- [2] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality, Second Edition," 2002.
- [3] SIEMENS, "Harmonics in power systems," 2013.
- [4] P. S. Revuelta, J. P. Thomas, S. P. Litrán, „Active Power Line Conditioners : Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality,“ 2015.
- [5] M. MacIazek, D. Grabowski, M. Pasko, "Genetic and combinatorial algorithms for optimal sizing and placement of active power filters," *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, vol. 25, no. 2, pp. 269–279, Jun. 2015, DOI: 10.1515/amcs-2015-0021.
- [6] G. Panda, S. K. Dash, Sahoo Nirjgarini, „Comparative Performance Analysis of Shunt Active Power Filter and Hybrid Active Power Filter using FPGA-Based Hysteresis Current Controller,“ 2012.
- [7] G. Panda, P. Kumar, P. S. Puan, S. K. Dash, "Novel schemes used for estimation of power system harmonics and their elimination in a three-phase distribution system," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 53, pp. 842–856, 2013, DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.05.037.
- [8] S. Devassy, B. Singh, „Design and Performance Analysis of Three-Phase Solar PV Integrated UPQC,“ 2016.
- [9] B. B. Ambati, V. Khadkikar, "Optimal sizing of UPQC considering VA loading and maximum utilization of power-electronic converters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 3, pp. 1490–1498, 2014, DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2295857.
- [10] S. Ganguly, "Unified power quality conditioner allocation for reactive power compensation of radial distribution networks," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 8, no. 8, pp. 1418–1429, Aug. 2014, DOI: 10.1049/iet-gtd.2013.0382.
- [11] M. Kesler, E. Ozdemir, "Synchronous-reference-frame-based control method for UPQC under unbalanced and distorted load conditions," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 9, pp. 3967–3975, Sep. 2011, DOI: 10.1109/TIE.2010.2100330.
- [12] K. Gaddala, P. S. Raju, "Merging Lion with Crow Search Algorithm for Optimal Location and Sizing of UPQC in Distribution Network," *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 31, no. 2, pp. 377–392, Apr. 2020, DOI: 10.1007/s40313-020-00564-1.
- [13] A. Moreno-Muñoz, "Power Quality, Mitigation Technologies in a Distribution Environment," 2007.
- [14] Z. Klaić, "INTEGRACIJA OIE I NAPREDNE MREŽE 3. Kvaliteta električne energije," Prezentacija s predavanja, 2021.
- [15] Narodne novine, "Mrežna pravila distribucijskog sustava," 2020. [Online]. Dostupno: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020\\_04\\_52\\_1053.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_04_52_1053.html) (pristup 07.05.2022).

- [16] A. Kamenka, "Six tough topics about harmonic distortion and Power Quality indices in electric power systems," 2014. [Online]. Dostupno: <http://www.schaffner.com> (pristup 15.05.2022).
- [17] Y. Wang, "HARMONIC ANALYSIS IN POWER DISTRIBUTION NETWORKS," *Department of Electrical and Electronic Engineering School of Engineering*, 2020.
- [18] A. Baggini, "Handbook of Power Quality," *University of Bergamo, Italy*, 2008.
- [19] M. Masoum, E. Fuchs, "POWER QUALITY IN POWER SYSTEMS AND ELECTRICAL MACHINES," 2008.
- [20] A. F. Zobaa, S. H. E Abdel Aleem, "Power Quality in Future Electrical Power Systems," 2017.
- [21] S. Jain, S. Dwivedi, K. K. Gupta, P. Chaturvedi, "Modeling and Control of Power Electronics Converter System for Power Quality Improvements," in *Modeling and Control of Power Electronics Converter System for Power Quality Improvements*, Elsevier, 2018, pp. 31–84. DOI: 10.1016/B978-0-12-814568-5.00002-8.



## SAŽETAK

Uvodni dio rada sadrži pregled područja teme i zadatak diplomskog rada. U trećem poglavlju opisana je teorijska osnova o harmonicima. U tom poglavlju navedeni su pokazatelji harmonijskog izobličenja i opisani su utjecaji harmonijskog izobličenja na pojedine elemente u distribucijskoj mreži. Zatim se opisuju elementi u distribucijskom sustavu koji se ponašaju kao izvor viših harmonika. Četvrto poglavlje navodi metode pomoću kojih se ublažuje utjecaj viših harmonika u distribucijskom sustavu. Peto poglavlje analizira primjenu aktivnog filtera snage za snižavanje iznosa harmonika u dijelu distribucijske mreže. Analiza je provedena u programskom paketu DIgSILENT Power Factory. U zadnjem poglavlju sažeti su glavni rezultati primjene aktivnog filtera snage.

**Ključne riječi:** aktivni filter snage, distribucijska mreža, nelinearno opterećenje, ukupno harmonijsko izobličenje, viši harmonici

**ABSTRACT****Mitigation of the influence of harmonics in the distribution network using an active power filter**

The introductory part of the paper contains an overview of the subject area and the task of the thesis. The third chapter describes the theoretical basics of harmonics. In that chapter, indicators of harmonic distortion are listed and the effects of harmonic distortion on individual elements in the distribution network are described. Then the elements in the distribution system that act as a source of harmonics are described. The fourth chapter lists the methods used to mitigate the influence of harmonics in the distribution system. The fifth chapter analyzes the application of an active power filter to reduce the amount of harmonics in a part of the distribution network. The analysis was performed in the DIgSILENT Power Factory software package. The last chapter summarizes the main results of the application of the active power filter.

**Key words:** active power filter, distribution network, nonlinear load, total harmonic distortion, harmonics

## ŽIVOTOPIS

Matija Felber rođen je 13. ožujka 1999. godine u Virovitici, s prebivalištem u Borovi. Osnovnu školu Suhopolje završava 2013. i upisuje smjer Elektrotehničar u Tehničkoj školi Virovitica. Po završetku srednje škole 2017. godine upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku smjer Elektrotehnika. Nakon završetka preddiplomskog studija 2020. godine upisuje Diplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika, izborni blok Održiva elektroenergetika. Aktivno se koristi njemačkim i engleskim jezikom. Tijekom studija naučio se koristiti programskim paketima MATLAB Simulink, DIgSILENT Power Factory, Easy Power, Eplan, XGSLab i drugi programi.

---

Potpis autora