

Aktivni filteri viših harmonika u niskonaponskoj mreži

Grahovac, Ena

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:713096>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**

Repository / Repozitorij:

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



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

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

**AKTIVNI FILTRI VIŠIH HARMONIKA U
NISKONAPONSKOJ MREŽI**

Diplomski rad

Ena Grahovac

Osijek, 2021.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak diplomskog rada.....	1
2. HARMONICI	2
2.1. Linearna opterećenja.....	3
2.2. Nelinearna opterećenja	4
2.3. Fourierov red	6
2.4. Ukupno harmonijsko izobličenje valnih oblika.....	8
2.4.1. Ukupno harmonijsko izobličenje	8
2.4.2. Ukupno izobličenje s obzirom na potražnju	9
2.5. Izvori harmonika.....	9
2.6. Utjecaj harmonika na opremu.....	12
2.7. IEEE Standard 519-1992	16
2.8. Postupci za smanjivanje utjecaja harmonika	17
3. FILTRI	21
3.1. Pasivni filtri	21
3.2. Aktivni filtri.....	22
4. ANALIZA VIŠIH HARMONIKA U NISKONAPONSKOJ MREŽI	23
4.1. Početno stanje: realno stanje izvoda.....	24
4.2. Filter na početku izvoda.....	27
4.3. Filter na sredini izvoda	30
4.4. Filter na kraju izvoda.....	32
4.5. Početno stanje s kompenzacijom jalove snage	34
4.6. Kompenzacija jalove snage i uključen aktivan filter na početku izvoda.....	36
4.7. Kompenzacija jalove snage i uključen aktivan filter na sredini izvoda.....	38
4.8. Kompenzacija jalove snage i uključen aktivan filter na kraju izvoda	40

ZAKLJUČAK	42
SAŽETAK.....	43
SUMMARY	43
LITERATURA.....	44
ŽIVOTOPIS	46

1. UVOD

Harmonici su neželjene više frekvencije koje se preklapaju s temeljnim valnim oblikom stvarajući iskrivljeni valni oblik, [1]. Još od 1893. godine inženjeri su se borili s problemom zagrijavanja motora u Hartfordu, Connecticutu. Da bi otklonili problem, morali su provesti harmonijske analize različitih električnih valnih oblika u cijelom elektroenergetskom sustavu na koji je motor bio spojen. Pošto je tada sustav izmjenične struje bio nov izum morali su nastali problem riješiti uz harmonijsku analizu kao alat. Inženjeri su zaključili da je izvor pregrijavanja motora bio praćen rezonancijom dalekovoda. Također, tri godine prije električari su u Portlandu, Oregonu imali drugačiji problem na dalekovodu, ali se pretpostavlja da se dogodilo zbog harmonijskih komponenti linijske frekvencije, [2].

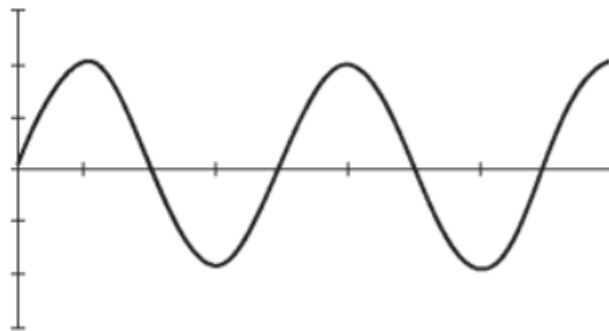
U ovom radu bit će opisano međudjelovanje harmonika i opreme u distributivnoj mreži te sama kontrola harmonika u svrhu otklanjanja štete i zastoja u mreži. Pojasnit će se koji uređaji u mreži mogu proizvesti harmonike i definirati na koji način utječu na niskonaponsku mrežu. Također, bit će pojašnjene metode kojima se mogu smanjiti utjecaji harmonika na mrežu te će se prikazati analiza harmonika na primjeru jednog dijela niskonaponske distribucijske mreže.

1.1. Zadatak diplomskog rada

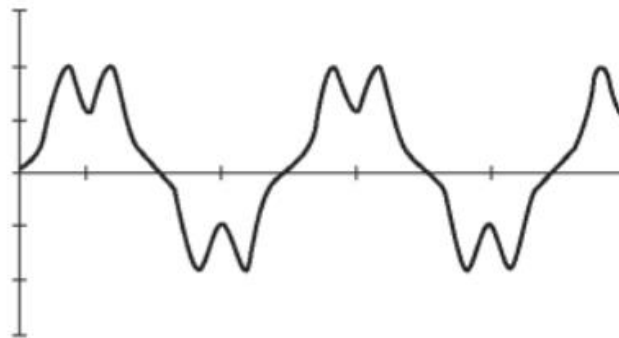
Cilj je bio pojasniti rad i djelovanje harmonika u mreži te proučiti na koje načine može ih se kontrolirati. U programu Digsilent Powerfactory potrebno je bilo analizirati kako harmonici i nelinearni potrošači utječu na niskonaponsku distribucijsku mrežu.

2. HARMONICI

Pojam „harmonik“ nastao je u području akustike, pri čemu se odnosi na vibraciju strune ili zračnog stupa na frekvenciji koja je višekratnik osnovne frekvencije. Koristeći se različitim elektroničkim uređajima pojavljuju se izobličenja valnih oblika napona i struje koja se prikazuju kao harmonici. Promatrajući harmonike u valnim oblicima napona ili struje, moguće ih je zamisliti kao savršene sinusoidne. U izmjeničnom sustavu napajanja, komponenta harmonika prikazana je kao komponenta sinusoidne periodičnog valnog oblika koja ima frekvenciju jednaku cjelobrojnom višekratniku osnovne frekvencije, [3].



Slika 2.1. Sinusoidan valni oblik [4]



Slika 2.2. Iskrivljeni sinusoidan valni oblik [4]

U sljedećim odjeljcima opisana su različita opterećenja koja crpe struju iz sinusoidnog izvora izmjeničnog napona te opterećenja s promjenjivom impedancijom, [3].

2.1. Linearna opterećenja

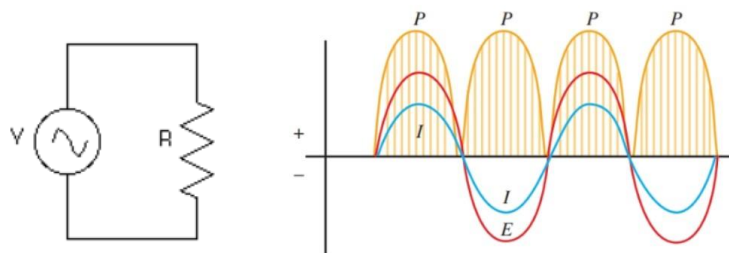
Predstavljaju opterećenja pri kojima se naponski i strujni signali vrlo blisko prate te impedancija ostaje konstantna tijekom cijelog perioda, [3]. Odnos napona i struje poznat je kao Ohmov zakon te objašnjava da je struja kroz otpor napajan promjenjivim izvorom napona jednak odnosu između napona i otpora, a prikazan je na sljedeći način:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} \quad (2-1)$$

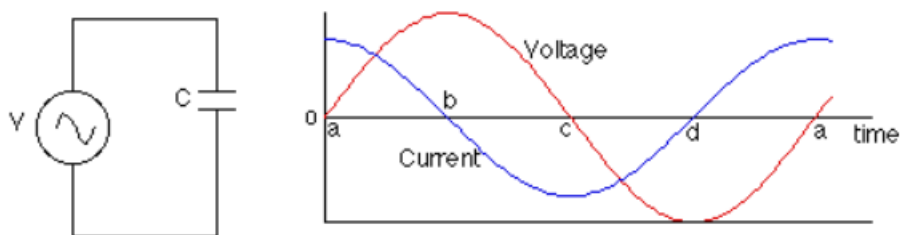
Električni krugovi s linearnim opterećenjima imat će jednake naponske i strujne valne oblike te neće pokazivati harmonijska izobličenja. Stoga, korištenjem idealnog naponskog izvora u otvorenom krugu trenutni valni oblik izgledat će identično. Iz tog razloga električni krugovi s linearnim opterećenjima omogućavaju jednostavnije izračunavanje valnih oblika napona i struje. Količine topline proizvedene otpornim linearnim opterećenjima lakše se određuju jer su proporcionalne kvadratu struju, kao primjerice grijaći elementi ili žarulje sa žarnom niti. Također se korištena snaga može dobiti kao umnožak dviju veličina, odnosno napona i struje, [3].

Na slici 2.3. prikazan je odnos napona i struje u linearnom krugu koji je sastavljen od izvora izmjenične struje koja napaja čisto otporni strujni krug. Na istoj slici može se primijetiti da se trenutna snaga nikad ne nalazi u negativnom području i nema negativnu vrijednosti, a prikazana je formulom $P = V * I$, odnosno umnoškom trenutnih vrijednosti napona i struje. Trenutna snaga nikad nije negativna zbog toga što su oba valna oblika u fazi te će njihov rezultat biti pozitivan. Također, isti rezultat za snagu se može dobiti ako se uzme umnožak otpora s kvadratom struje, [3].

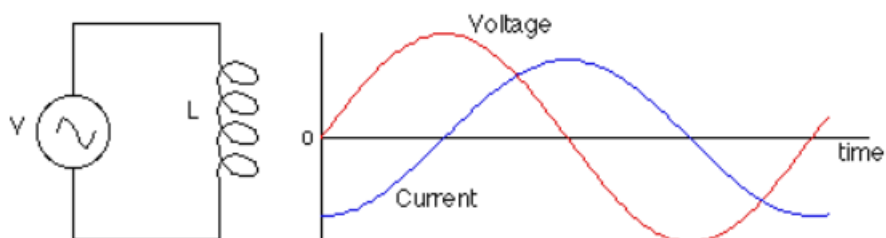
Slika 2.4. prikazuje odnos napona i struje u slučaju kada struja prethodi naponu što odgovara kapacitivnom opterećenju, dok na slici 2.5. je prikazan slučaj kada struja zaostaje za naponom te to odgovara induktivnom opterećenju, [3].



Slika 2.3. Odnos struje, napona i snage u linearnom krugu [5]



Slika 2.4. Odnos struje i napona u kapacitivnom krugu [5]



Slika 2.5. Odnos struje i napona u induktivnom krugu [5]

Linearna opterećenja mogu biti podijeljena na otporna, kapacitivna, induktivna i kombinacije nekih od navedenih. Također, postoje linearna opterećenja kod kojih se ne koriste uređaji za pretvorbu snage ili neki drugi oblik ispravljanja struje pa će se pojaviti gubici magnetske jezgre koji ovise o svojstvima željeza i bakra. Harmonijska izobličenja mogu nastati ako oprema feromagnetske jezgre radi u području zasićenja, odnosno ako oprema radi iznad predviđenih vrijednosti za optimalan rad, [3] [6].

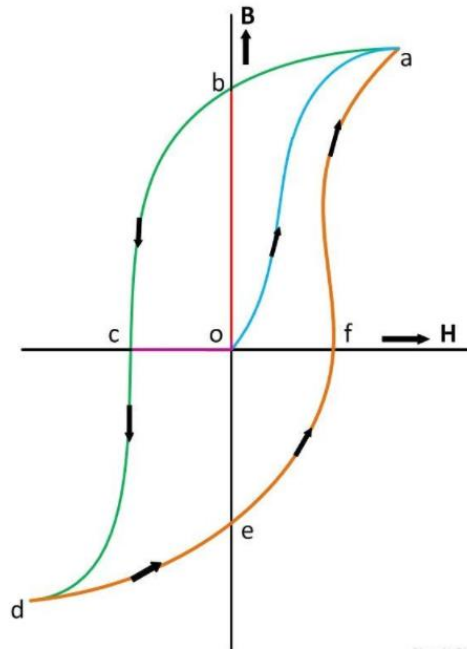
2.2. Nelinearna opterećenja

U slučajevima kada se impedancija mijenja s primijenjenim naponom, tada se radi o nelinearnom opterećenju. Primjerice, prilikom uporabe elektroničkih prekidača koji provode struju. To opterećenje nema konstantni odnos struje i napona tijekom izmjeničnog perioda, stoga Ohmov zakon ne može opisati odnos između napona i struje. Najčešća nelinearna opterećenja u elektroenergetskim sustavima su vrste ispravljačkih uređaja koje se nalaze u pretvaračima snage, izvorima napajanja, jedinicama napajanja te u električnim pećima i fluorescentnim svjetiljkama. Nelinearna opterećenja mogu proizvesti razne smetnje poput

izobličenja valnog oblika napona, pregrijavanja u transformatorima i raznim uređajima za napajanje, prekomjerne struje na priključcima neutralnih priključaka opreme, telefonskih smetnji i problema s mikroprocesorskim upravljanjem, [3] [7].

Linearno opterećenje energetskih transformatora može postati nelinearno u području zasićenja. Gustoća magnetskog polja B u transformatoru sporije raste ili prestaje rasti s porastom intenziteta magnetskog toka H . Navedeni proces događa se izvan zasićenja koljena krivulje magnetiziranja transformatora, [3].

Slika 2.6. prikazuje petlju histereze, odnosno ponašanje transformatora pri promjeni pozitivnih i negativnih perioda vrijednosti intenziteta magnetskog toka. Krivulja magnetiziranja transformatora traje od 0 do a , gdje započinje s točkom 0 i povećava intenzitet magnetskog polja H te time dostiže točku a na vrhu. Iznad te točke magnetski tok ima ravno kretanje, odnosno primjećuje se mali porast gustoća magnetskog polja B pri velikom porastu intenziteta magnetskog polja H . Nakon toga B - H karakteristika dobiva drugačiji put jer struja se počinje iskrivljavati te pokazivati komponente harmonika na valnom obliku napona. Od točke a do točke b intenzitet magnetskog polja H smanjuje se na nulu, ali i dalje u jezgri transformatora ostaje zaostali remanentni magnetizam. Nakon što se zaostali remanentni magnetizam ukloni intenzitet električnog polja se preokrene te dođe do prisilne sile H_c . U točki d je prikazan maksimalni negativni period intenziteta magnetskog polja. U trenutku kada intenzitet magnetskog polja dostiže nulu, tada B - H karakteristika završava u točki e . Cijeli krug petlje histereze bi bio konačan kada intenzitet magnetskog polja dođe do pozitivne maksimalne vrijednosti da bi došao do točke a . Površina unutar krivulje histereze jednaka je gubicima u jezgri transformatora. Kada energetski transformator radi iznad nazivne snage ili nominalnog napona, tada radi u zasićenju i to je čest slučaj. Normalan rad energetskog transformatora trebao bi biti ispod područja zasićenja, [3].



Slika 2.6. Petlja histereze [8]

2.3. Fourierov red

Predstavlja periodičnu funkciju $f(t)$, gdje je ona definirana kao $f(t) = f(t + T)$. Sastavljena je od trigonometrijskog niza elemenata koji se sastoje od istosmjerne komponente i ostalih elemenata s frekvencijama koji imaju temeljnu komponentu i njezine cijele višestruke frekvencije, [3]. Periodična funkcija vrijedi jedino ako su ispunjeni Dirichletovi uvjeti:

1. Diskontinuirana funkcija ima konačan broj diskontinuiteta tijekom razdoblja T
2. Diskontinuirana funkcija ima konačnu srednju vrijednost tijekom razdoblja T
3. Diskontinuirana funkcija ima konačan broj pozitivnih i negativnih maksimalnih vrijednosti

Izraz za trigonometrijski red je:

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

gdje je $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$.

Prethodnu jednadžbu može se još pojednostaviti čime se dobiva:

$$f(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \sin(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (2-3)$$

gdje je

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

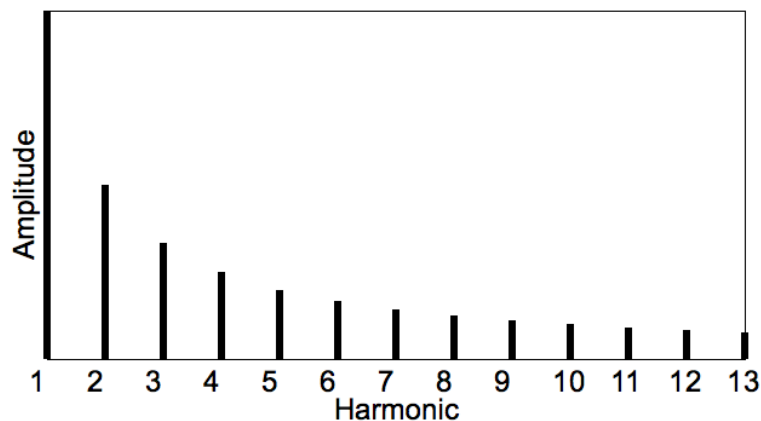
Pod izrazom 2-3 prikazana je jednadžba Fourierovog niza te se sastoji od sinusnih funkcija različitih frekvencija. U jednadžbi komponenta $h = 1$ predstavlja temeljnu komponentu, [3].

Harmonici u normalnim uvjetima rada stvoreni su impulsnim pretvaračem snage te ih se može opisati na sljedeći način:

$$I_h = \frac{I_1}{h}, \quad h = pn \pm 1 \quad (2-4)$$

pri čemu h je poredak harmonika, n je cijeli broj 1,2,3,..., a p predstavlja broj impulsa u periodu, [3].

Harmonijski spektar je grafikon amplituda harmonika nastalih u pretvaraču, [4]. Na slici 2.7. prikazan je primjer harmonijskog spektra sastavljenog od niza harmonika.



Slika 2.7. Primjer harmonijskog spektra [9]

Vrlo važna vrsta harmonika su međuharmonici koji se dodavaju zajedno s karakterističnim komponentama te stvaraju valne oblike s komponentama koje nisu cjelobrojni višekratnici osnovne frekvencije. Te spektralne komponente nalaze se u ciklokonverterima, gdje pretvaraju jedan izmjenični valni oblik u drugi AC valni oblik. Poznati su po tome što imaju nepromjenjivu amplitudu i frekvenciju na ulazu, dok na izlazu se amplituda i frekvencija

mogu promijeniti. Korišteni su pri promjenama brzine izmjeničnog motora, visokog napona i snage te kod niskofrekvencijskih aplikacija, [3].

Također potrebno je spomenuti i subharmonike. Oni nastaju u električnim pećima gdje su frekvencija niže od frekvencije izmjeničnog sustava (60 ili 50 Hz). Subharmonici su razlog pojave treperenja svjetlosti koju se može primijetiti u žarnim nitima i lučnim uređajima. Skloni su uzrokovati smanjenje vijeka trajanja motora izmjenične struje jer prilikom zasićenja jezgre dolazi do značajnog gubitka snage u namotu statora i energetskih transformatora, [3].

U ravnotežnim sustavima neparni višekratnici trostrukih harmonika često budu spriječeni s neutralnim transformatorima, odnosno harmonicima nultog niza. Iz tog razloga se trostruki harmonik vrlo često zanemari u slučaju proučavanja harmonika, [3].

2.4. Ukupno harmonijsko izobličenje valnih oblika

2.4.1. Ukupno harmonijsko izobličenje

Ukupno harmonijsko izobličenje (*engl. Total harmonic distortion - THD*) je važan indeks koji služi za opisivanje problema kvalitete električne energije u prijenosnim i distribucijskim sustavima. Detaljno proučava svaku harmonijsku komponentu na signalu te izračunava količinu izobličenja u valnom obliku napona i struje. Definira se kao omjer srednje vrijednosti kvadrata harmonijskih elemenata i srednje kvadratne vrijednosti osnovne veličine, [3].

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (2-5)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2-6)$$

Jednadžba 2-5 prikazuje ukupno harmonijsko izobličenje za naponski signal, dok jednadžba 2-6 predstavlja ukupno harmonijsko izobličenje za strujni signal. Najčešće pri izračunu ukupnog harmonijskog izobličenja koriste se harmonici do 50. reda, ali ako je to potrebno mogu se uključiti i harmonijske komponente većeg reda od 50, [3].

2.4.2. Ukupno izobličenje s obzirom na potražnju

Indeks koji mjeri ukupan utjecaj izobličenja u trenutnom valnom obliku na mjestu zajedničkog spajanja (*engl. The point of common coupling - PCC*) naziva se ukupno izobličenje potražnje. Izražava se kao postotak maksimalne struje potražnje na mjestu zajedničkog spajanja (PCC). Prikazuje se kao omjer srednjeg kvadrata harmonijskog sadržaja i srednjeg kvadrata maksimalne struje opterećenja na mjestu zajedničkog spajanja (PCC). Izvori koji su slabiji, ali s velikim strujama potražnje će dati veće izobličenje valnog oblika, dok u slučaju krutih izvora sa malim strujama potražnje pokazat će manje izobličenje valnog oblika, [3].

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (2-7)$$

gdje I_L predstavlja trenutnu potražnju struje, I_h veličinu pojedinih harmonijskih komponenata, dok h prikazuje poredak harmonika.

2.5. Izvori harmonika

Izobličenje valnog oblika harmonika ometa sustave i uređaje koji se njemu nalaze. Na pojavu harmonika utječe veća uporaba energetske elektronike s energetskim prekidačima. Nelinearna trošila imaju promjenjive vrijednosti valnih oblika napona i struje, ali prepoznatljive harmonijske spektre za njihovo prepoznavanje i uklanjanje s mjesta gdje se proizvode. Na taj način će se smanjiti njihov utjecaj u sustavu te ometanje instalacije i opreme. Izvori harmonika mogu biti različiti, a mogu nastati u industrija te u kućanstvu, [3].

Transformatori u području zasićenja mogu utjecati na opremu u sustavu, pa tako i na električnu energiju koja se transformira i distribuira putem dalekovoda. Može doći u područje zasićenja ovisno radi li iznad nazivne snage ili iznad nazivnog napona. U tim slučajevima pokazat će nelinearnu struju magnetiziranja koja će imati niz različitih i neobičnih harmonika s dominacijom 3.harmonika. Transformator se može naći iznad nazivne snage tijekom razdoblja najveće potražnje, dok iznad nazivnog napona može otići za vrijeme slabijih opterećenja. Zasićenje transformatora uslijed pada napona dolazi zbog toga što promjena napona stvara istosmjernu komponente u magnetizirajućem toku, [3] [7] [10].



Slika 2.8. Transformator 10/110 kV i vodno polje



Slika 2.9. Trafo polje 35 kV

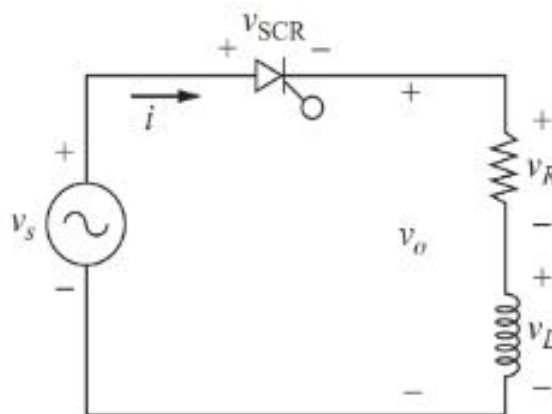
Još jedan primjer izvora harmonika može se pronaći u rotacijskim strojevima. Stvaraju harmonijske struje zbog male asimetrije na utorima statora ili rotora te zbog mogućih nepravilnosti pri namotavanju trofaznog namota. Harmonici u stroju induciraju elektromotornu silu na namotima statora na frekvenciji koja je jednaka omjeru brzine ili valne duljine te ta sila

tvori harmonike. Harmonijske struje nastale u stroju su manje od struja dobivenih u stroju kada se napaja promjenjivom frekvencijom, [3].



Slika 2.10. Električni motor kao primjer rotacijskog stroja [11]

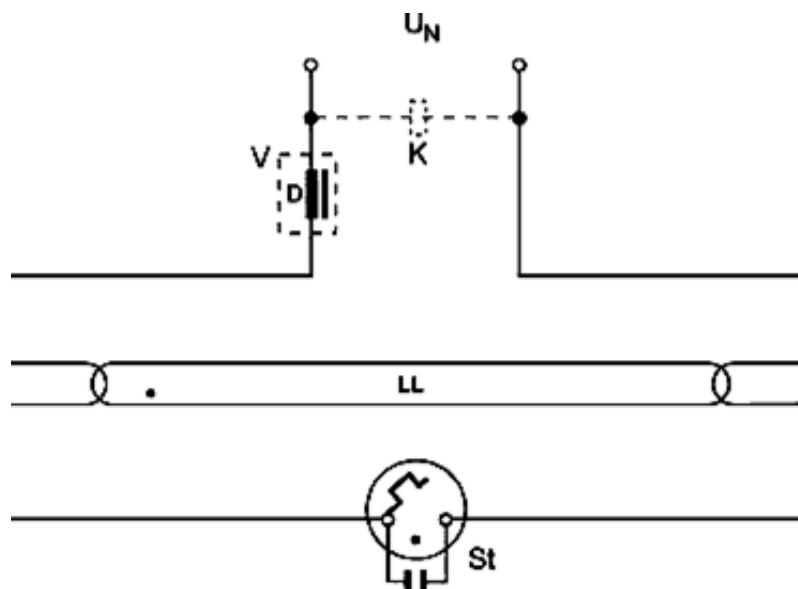
Također među izvorima harmonika nalaze se i pretvarači snage koji su najrašireniji u distribucijskim sustavima. Pretvarač snage je električni krug koji mijenja električnu energiju iz jednog oblika u konačni oblik potreban za pogon pri opterećenju. Može obavljati jednu ili više funkcija te dati izlaz koji se razlikuje od ulaza. Najčešće se koristi pri povećavanju ili smanjivanju veličine ulaznog napona, invertiranje polariteta ili stvaranje nekoliko izlaznih napona istog polariteta s ulazom, različitog polariteta ili mješovitih polariteta. Njihovo korištenje u različitim elektroničkim sustavima stvara izobličenje u mreži izravnim unošenjem harmonijskih struja u mrežu, [12].



Slika 2.11. Ekvivalentni krug pretvarača snage [13]

Fluorescentne cijevi pokazuju svoja nelinearna svojstva u svom radu stvarajući harmonijske struje većeg iznosa. Trošila su u kojima se koriste elektroničke prigušnice koje rade na višim frekvencijama za korištenje kondenzatora. Pri višim frekvencijama mogu stvoriti više svjetla za jednaki unos snage te je potrebno za smanjenje ulazne snage, [3].

Na slici 2.8. prikazan je električni krug fluorescentne lampe zajedno s prigušnicom označenom slovom D, paralelno spojenim kondenzatorom označenim slovom C, sklopkom te izvorom napajanja od 230 V.



Slika 2.12. Električni krug fluorescentne cijevi [14]

Neizbježno je navesti da i električne peći stvaraju harmonijska izobličenja u velikim količinama prilikom topljenja. Stvaranje izobličenja dolazi zbog kašnjenja u paljenju električnog luka u kombinaciji s nelinearnim naponsko-strujnim karakterom, [3].

2.6. Utjecaj harmonika na opremu

Harmonici u elektroenergetskom sustavu mogu značajno utjecati na opremu te remetiti njihov rad. Ometanje se javlja pojavom nelinearnog opterećenja koje stvara nesinusnu struju koja prolazi kroz svu impedanciju u strujnom krugu. Harmonijske struje uzrokuju pad napona na temelju Ohmovog zakona. Zbrajanjem svih padova napona u krugu dobiva se ukupno harmonijsko izobličenje napona, koje se smanjuje na izvoru jer se uvodi veća impedancija između nelinearnog opterećenja i izvora. Djelovanje harmonika može se promatrati na

različitim opremama i mjestima u elektroenergetskom postrojenju, a objasniti se može preko sljedećih uređaja, [3] [7] [10].

Generatori su korišteni za napajanje u uvjetima linearnog opterećenja u elektroenergetskoj industriji, dok pri pojavi nelinearnog opterećenja često dolazi do prekida povezanosti opreme zbog jakog toplinskog napreznja. Uz toplinsko napreznje pojavljuju se i vibracije torzijskog okretnog momenta pri čemu generatori u postrojenju mogu prijeći dopuštene granice. Posljedice koje nelinearno opterećenje ostavlja na stezaljkama generatora su: pojava pozitivnih i negativnih utjecaja struje koje proizvode torzijske momente i vibraciju, izobličenje valnog oblika napona u uzbudnom krugu i stvaranje problema u regulaciji napona te prevelike struje negativnog dijela. U radu generatora dolazi do povećavanja topline zbog utjecaja harmonika napona i struje. Stvaranje topline događa se zbog povećavanja gubitaka u željezu i bakru jer ovisni su o frekvenciji i višim harmonicima. Harmonijsko zagrijavanje može se spriječiti na način da se smanji opskrba generatorima koji se napajaju nelinearnim trošilima, [3].



Slika 2.13. Električni generator [15]

Harmonijske struje koje se dostavljaju transformatorima u sve većem broju utječu na industrijske mreže preko različitim nelinearnih opterećenja poput električnih peći, pogona s promjenjivom brzinom ili fluorescentnom rasvjetom. Kod transformatora kao i kod generatora, u mreži dolazi do toplinskog napreznja, što rezultira povećavanjem vrtložnih struja i gubitaka u jezgri, odnosno gubitaka u željezu u transformatoru. Stvaranje dodatne topline u

transformatoru i rad u nelinearnom opterećenju uz konstantnu upotrebu pri ili iznad nazivne snage mogu skratiti vijek trajanja samog uređaja, [7] [10].

Utjecaj se može uočiti i na indukcijskim motorima gdje se također povećavaju gubici u željezu i bakru uslijed harmonijskih izobličenja i povećavanja topline. To zagrijavanje utječe na loše podmazivanje ležaje motora te može dovesti do propadanja ležajeva. Čest je slučaj korištenja izoliranog ležaja s ciljem smanjenja trošenja ležaja u motorima izmjenične frekvencije. Vijek asinkronog motora može se smanjiti za 50% pri povećavanju temperature iznad nazivne temperature. Bitan utjecaj na indukcijske motore imaju i komponente harmonijskog niza. Komponente pozitivnog niza će pomoći u stvaranju okretnog momenta, dok komponente negativnog niza će utjecati protiv smjera rotacije te će doći do pulsiranja momenta, [7] [10].



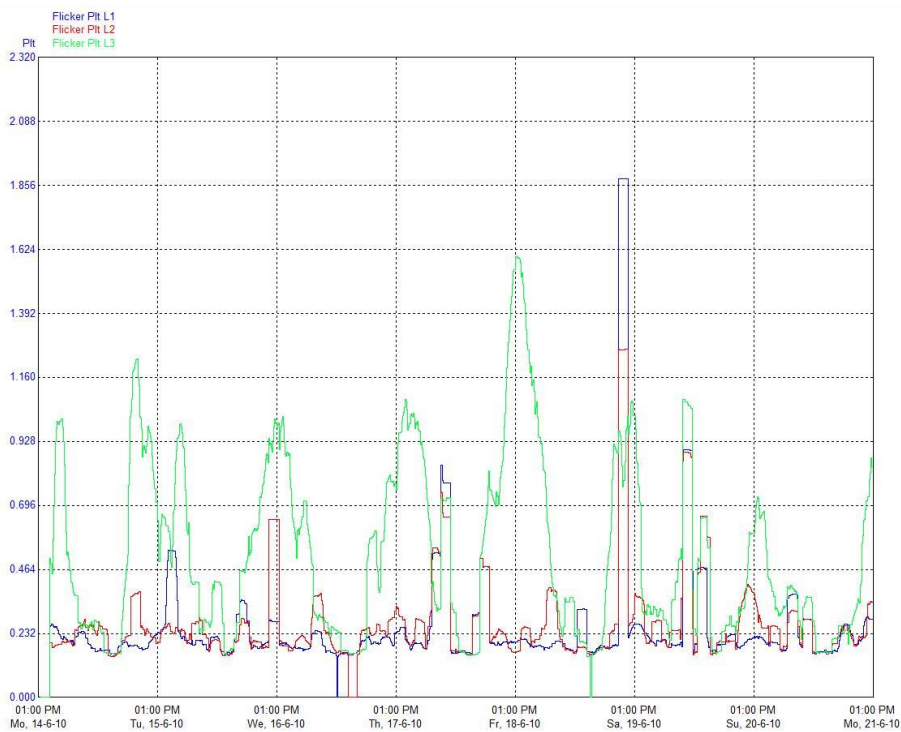
Slika 2.14. Indukcijski motor s prikazom statora i rotora [16]

Gubici kabela predstavljaju jedan od utjecaja harmonika jer se povećavaju pri porastu harmonijske struje uz otpor kabela R . Ključan je i skin effect jer je pojava pri kojoj struja prolazi u blizini površine kabla gdje je impedancija najmanja, dok pojava učinka blizine je nastala zbog međusobne induktivnosti vodiča koji se nalaze paralelno jedan s drugim. Te pojave ovise o veličini kabla, frekvenciji, otporu te propusnosti materijala, ali zbog njihove povezanosti s otporom, značajno mogu dodavati gubitke u kablu, [7].

Veliki dio prekidača koristi dvometalne mehanizme okidanja koji reagiraju na efekt zagrijavanja efektivne struje. U trenutku doticaja s nelinearnim opterećenjem, efektivna

vrijednost struje poraste više nego efektivna vrijednost struje kod linearnih opterećenja istih snaga. Prekidači imaju svrhu prekidanja struje u trenutku prolaska kroz nulu pri čemu se kontakti otvaraju. Kod osigurača je važno da je što veća efektivna struja jer time je i veći efekt zagrijavanja struje u osiguraču, [7] [10].

Flikeri ili treperenje je fenomen vezan za rasvjetu kojim se uzrokuju fluktuacije jakosti svjetlosti pri rasvjeti. Promjene efektivne vrijednosti napona mogu utjecati na rasvjetu i dovesti do treperenja svjetlosti. Uzrok treperenja su naponi međuharmonika u ulaznom naponu te mogu biti uočljive ljudskom oku pri malom odstupanju, [10].



Slika 2.15. Dijagram izmjerenih flikera tijekom razdoblja od 7 dana

2.7. IEEE Standard 519-1992

Standard je u elektrotehnici koji se koristi za ograničavanje harmonika u distribucijskoj mreži. Uspostavlja zajedničko sudjelovanje kupca i elektroprivrede pri održavanju razina harmonijskih izobličenja unutar dozvoljenih granica, gdje će se omogućiti distribucijskim sustavima rad unutar granica izobličenja napona, [3] [17].

Tablica 2.1. Ograničenja naponskog izobličenja

Napon sabirnice na PCC	Pojedinačni napon izobličenja (%)	Ukupno harmonijsko izobličenje THD (%)
< 69 kV	3.0	5.0
$69 \text{ kV} \leq U \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
> 161 kV	1.0	1.5

Tablica 2.2. Ograničenja strujnog izobličenja

I_{SL}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Gdje I_{SL} označava maksimalnu struju kratkog spoja na PCC, I_L je maksimalna struja opterećenja, TDD predstavlja ukupno izobličenje s obzirom na potražnju i PCC označava mjesto zajedničkog spajanja, [17].

2.8. Postupci za smanjivanje utjecaja harmonika

U elektroenergetskom postrojenju pojavom harmonijskih problema vrši se sustavna procjena harmonika. Taj postupak radi se pri proširivanju postrojenja i njegovih nelinearnih opterećenja, dodavanjem generatora u postrojenje sa svrhom zamjenskog izvora snage ili pri dodavanju kondenzatora s korekcijom faktora snage i harmonijskih filtara. Nelinearnim trošilima velikih snaga, najčešće trofaznima, potrebno je u ubaciti opremu za smanjivanje harmonika da bi ublažili harmonijske struje i izobličene valne oblike napona da budu u dozvoljenim granicama. Osim dodavanja pomoćne opreme u sustav moguće je i dizajnirati pogon s promjenjivom frekvencijom da bi se smanjio utjecaj harmonika. Uređaji se mogu postaviti da budu sastavni dio opreme ili kao posebni dio u sustavu, [7].

Transformatorima se mogu onemogućiti određeni harmonici opterećenja. Njihov rad omogućava prepoznavanje harmonika te daje lakši pristup za ublažavanje harmonika. Harmonijske struje prisutne u transformatoru mogu znatno naštetiti njegov životni vijek pa je potrebno smanjivati maksimalnu prividnu snagu. Za procjenu koliko harmonijske struje se koristi u strujnom krugu te za određivanje utjecaja zagrijavanja transformatora potrebno je definirati faktor opterećenja κ . Definira u kojoj mjeri transformator podnosi dodatno zagrijavanje, odnosno povećavanje gubitaka. Transformatori s oznakom faktora opterećenja povećavaju veličinu jezgre i veličinu neutralnog vodiča te koriste se tehnike namota za smanjivanje gubitaka vrtložnih struja i skin effect, [7] [10].



Slika 2.16. Distribucijski transformator 35/10 kV

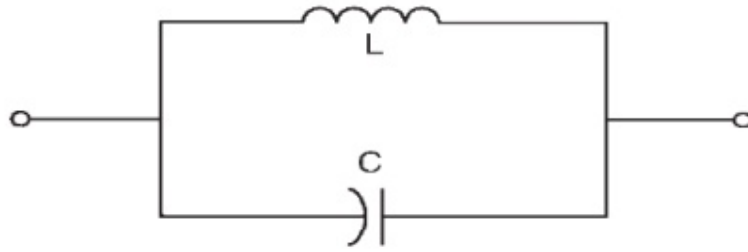
Jednostavnija metoda za smanjivanje harmonika nastalih nelinearnim opterećenjima bila bi upotreba prigušnica. Najčešće se primjenjuju na pojedinačna opterećenja kao primjerice pogoni s promjenjivom brzinom. U trenutku promjene struje kroz prigušnicu, na stezaljkama inducira se napon suprotnog smjera od primijenjenog napona, pa se time suprotstavlja i brzini promjene struje, [7] [10].

$$e = L \frac{di}{dt} \quad (2-8)$$

Jednadžbom 2-8 opisuje se inducirani napon na stezaljkama prigušnice, pri čemu e označava inducirani napon, L je induktivnost reaktora [H], a di/dt prikazuje promjenu struje u vremenu [A/t].

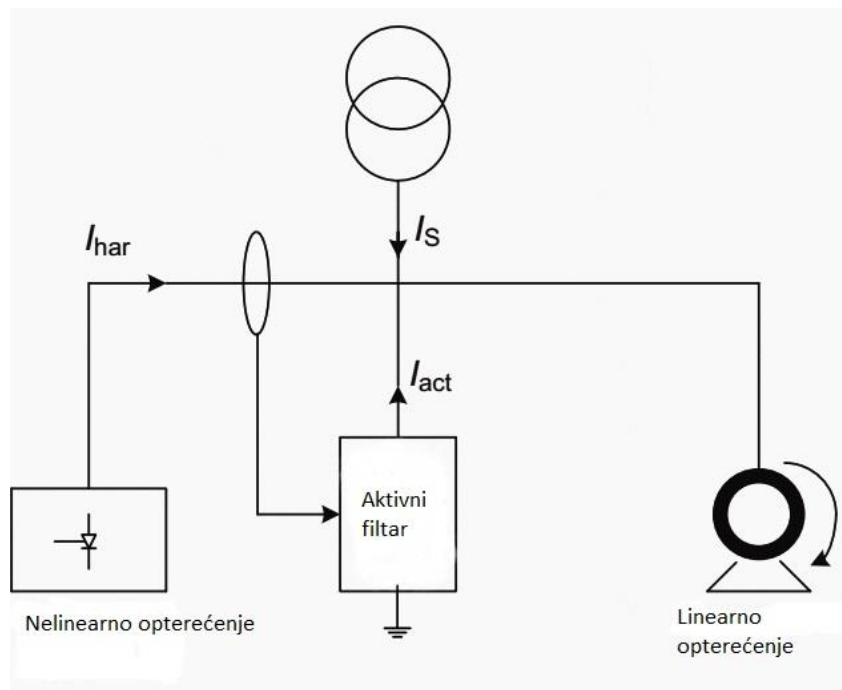
U svrhu ograničavanja harmonijske struje u prigušnici ovo obilježje ima veliki značaj jer sprječava struje nastale radom električnih pogona s promjenjivom brzinom i ostalih nelinearnih opterećenja u postrojenju. Kod izmjeničnih pogona moguće je koristiti prigušnicu na tri načina: na strani izmjenične struje (odnosno linijska prigušnica na izmjeničnoj mreži), u krugu istosmjerne struje (nazvani istosmjerna veza ili prigušnica sa istosmjernom sabirnicom) i oboje pri čemu ovisi o vrsti izvedbe pogona ili potrebnim izvedbama opskrbe. Linijska prigušnica na izmjeničnoj mreži smanjuje ukupno harmonijsko izobličenje napona (THD_v) na svojoj linijskoj strani. Koristi se češće u pogonu od prigušnica sa istosmjernom sabirnicom jer uz smanjivanje harmonika omogućava i potiskivanje prenapona za ulazni ispravljač pogona. Jedini nedostatak ovakve metode smanjivanja harmonika je zbog pada napona na stezaljkama pogona te činjenica da su projektirani za određenu radnu točku tj. predaleko je postavljena od koje minimiziranje THD_i nije dovoljno učinkovito, [7] [10].

Pasivni ili linijski harmonijski filtri koriste se za uklanjanje ili kontrolu dominantnih harmonika nižeg reda, posebno 5., 7., 11. i 13. harmoniku. Sastoje se od rezonantnih filtera sastavljenih od prigušnice L i kondenzatora C , a ponekad i prigušnih otpornika R . Rad im se oslanja na „rezonantni fenomen“ koji se pojavljuje zbog promjena frekvencije u prigušnicama i kondenzatorima. Malo više o njima bit će objašnjeno u sljedećem poglavlju, [7] [10].



Slika 2.17. Serijski pasivni LC filter [18]

Aktivni filtri su najčešća metoda ublažavanja harmonika u mreži jer za razliku od pasivnih LC filtara mogu kompenzirati nekoliko harmonika istovremeno, ispraviti harmonike visokog reda, omogućiti veću fleksibilnost sustava te kompenzirati jalovu snagu. O njima će se više govoriti u sljedećem poglavlju, [7] [10].



Slika 2.18. Aktivni filter u mreži [19]



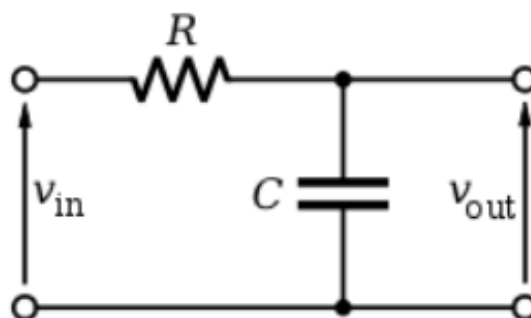
Slika 2.19. Antivibracijska prigušnica

3. FILTRI

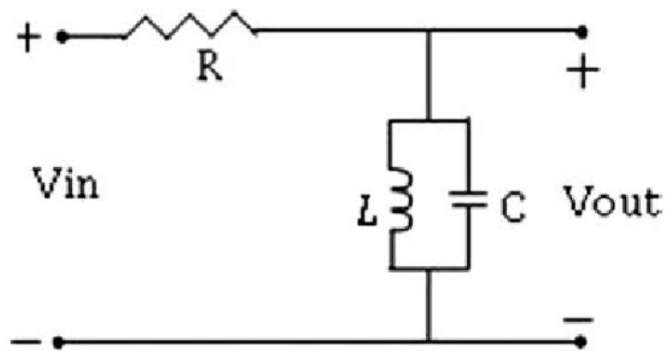
Harmonijski filteri koriste se za prebacivanje ili blokiranje harmonijskih struja. Nakon što odbiju neželjene harmonike šalju ih u tlo. Oni smanjuju izobličenja harmonijskog napona u mreži na način da smanjuju harmonijske struje koje iz napajanja ulaze u sustav. Sprječavaju da velike količine harmonika oštete opremu, naprave zastoje u radu sustava i stvore dodatne troškove. Harmonijski filteri mogu se podijeliti na pasivne i aktivne filtre. Aktivni filteri sadrže uređaje za pojačavanje signala, dok ih pasivni filteri ne sadrže pa njihov izlazni signal ima manju amplitudu od ulaznog signala. Paralelno spojeni filteri su bolji od serijskih filtera jer serijske komponente imaju veće veličine komponenti pa samim time i veće troškove, što čini paralelne filtre ekonomičnijima, [20].

3.1. Pasivni filteri

Pasivni filteri su kombinacija pasivnih elektroničkih komponenti: otpornika, kondenzatora i prigušnice. Pri radu u mreži niske frekvencije (do 100 kHz) dovoljno je koristiti samo otpornike i kondenzatore pa se ti filtre nazivaju RC filteri. Prigušnice češće se koriste u visokofrekvencijskim mrežama (iznad 100 kHz) pa ti filteri koji koriste sva tri elementa nazivaju se RLC filteri. Pasivni filteri su obično jeftiniji u usporedbi s ostalim elementima za smanjivanje harmonika, jer može doći do štetnih međudjelovanja između elektroenergetskog sustava i filtra. Također, mogući su problemi u sustavu s pasivnim filterima ako nisu pravilno odabrani. To rezultira rezonantnim krugovima paralelno spojenim s izvorom napajanja pa dovodi do lošije kvalitete energije. Pasivni filter može se postaviti na dominantni harmonik struje opterećenja i projektirati ga da ispravi faktor struje opterećenja, [20] [21].



Slika 3.1. Pasivni RC filter [22]



Slika 3.2. Pasivni RLC filter [23]

3.2. Aktivni filtri

Filteri koji koriste energetska elektronička da bi smanjili strujno izobličenje, izbjegli preopterećenja, pregrijavanja i kvarove sustava nazivaju se aktivni filtri. Spajaju se serijski ili paralelno s nelinearnim opterećenjem u elektroenergetski sustav, ali najčešće se postavljaju paralelno. Aktivni filtri puštaju struju u suprotnom smjeru od tereta da pri tome linijska struja ostane sinusnog oblika. Time poboljšava sve do sinusnog oblika struje i napona. U praksi većina aktivnih filtera je digitalna, odnosno harmonijski spektar određen je količinom i faznim mjestom prema trenutnom mjerenju pa se generira odgovarajući spektar protufazne struje. I kada nema značajnijih problema s kvalitetom energije, aktivni filtri mogu poslužiti kao preventivno rješenje. Njihova prisutnost u novijim instalacijama umanjit će troškove održavanja te minimizirati prekide u napajanju koji mogu uzrokovati zastoje, [7] [10] [24].

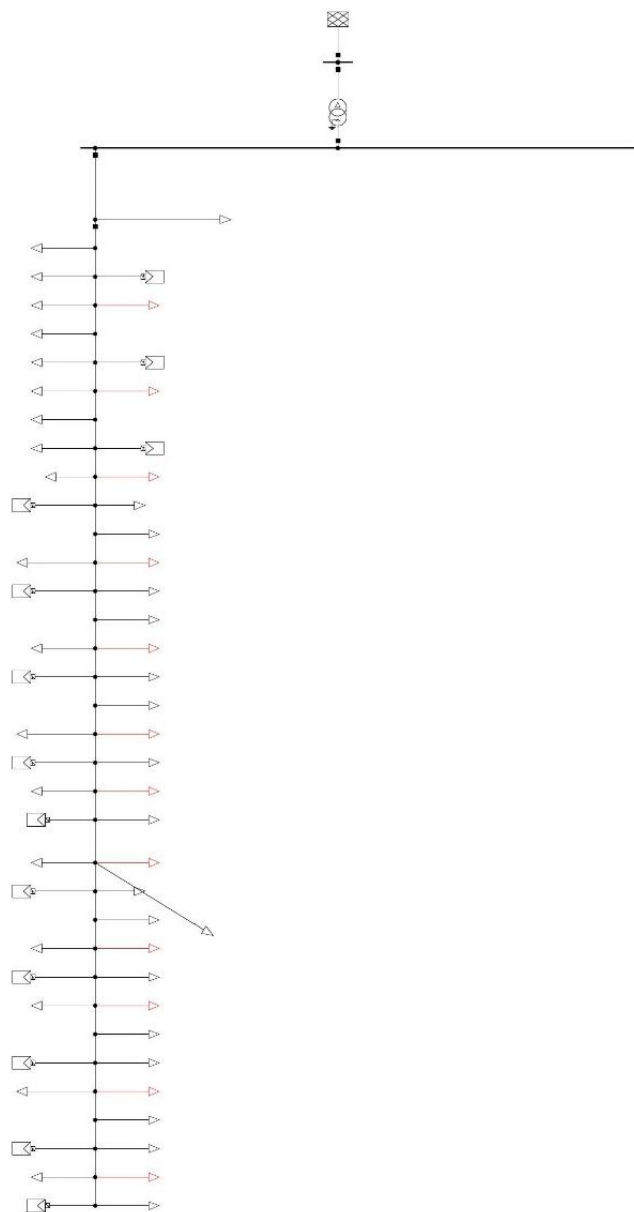


Slika 3.3. Ispravljanje nesinusnih valnih oblika pomoću aktivnih filtera [25]

4. ANALIZA VIŠIH HARMONIKA U NISKONAPONSKOJ MREŽI

Izvođenje simulacija potrebno je radi analize svih stanja i pojava koje se mogu promatrati u zadanom izvodu. Simulacije su izvršene u programskom paketu Digsilent Power Factory. Programski paket je proizvod njemačke tvrtke Digsilent za analizu elektroenergetskog sustava te modeliranje proizvodnje, prijenosa, distribucije i industrijskih mreža. Navedeni programski paket omogućava različite značajke od jednostavnih do složenijih, među kojima su simulacija u stvarnom vremenu. Električne mreže te njihovi procesi postaju sve složeniji pa se povećava potražnja za računalnim i pouzdanim alatima u pogledu kvalitete mreže, [26] [27].

Projektни zadatak zahtjeva promatranje položaja filtra i kompenzacije jalove snage na tri različita mjesta na vodu. Izvod sa pripadajućim potrošačima i proizvodnjom nalazi se u urbanom dijelu grada. Shema navedenog izvoda prikazana je na slici 4.1. i sastoji se od transformatora, sabirnice, voda, dvije fotonaponske elektrane te potrošača spojenih na vod. Projektни zadatak zahtjeva promatranje pojavu neparnih harmonika koji se javljaju u mreži, odnosno na urbanom izvodu. Projektни zadatak zahtjeva promatranje samo su harmonika od 1. do 15.



Slika 4.1. Shema urbanog dijela grada

4.1. Početno stanje: realno stanje izvoda

Analiza viših harmonika započinje promatranjem početnog stanja u mreži, odnosno trenutno realno stanje pri srednjem dnevnom opterećenju. Mjereno je prema normi EN 50160 i kako je već navedeno promatrani su samo prvih 15. harmonika i ukupni THD_1 na tri različita mjesta (na početku izvoda, na sredini i na kraju izvoda). Na izvodu osim potrošača nalaze se i dvije fotonaponske elektrane ukupne instalirane snage 10 kWp. Opterećenje glavnog napojnog voda pod nazivom *Odlaz u KO16* iznosi 39,5 %.

Tablica 4.1. Vrijednosti THD_I u sve tri faze i neutralnom vodiču na početku, sredini i kraju izvoda u početnom stanju

Pozicija APF-a	THD_I			
	L1 (%)	L2 (%)	L3 (%)	N (%)
Početak izvoda	13,1	12,1	13,2	54,5
Sredina izvoda	13,2	12,2	13,0	55,5
Kraj izvoda	13,4	13,2	11,7	59,8

Tablica 4.2. Efektivne vrijednosti struja u sve tri faze i neutralnom vodiču na početku, sredini i kraju izvoda u početnom stanju

Pozicija APF-a	Efektivne vrijednosti struja po fazama i u neutralnom vodiču			
	I_{L1} (A)	I_{L2} (A)	I_{L3} (A)	I_{Ln} (A)
Početak izvoda	84,3	46,2	43,9	37,2
Sredina izvoda	46,0	25,0	24,3	20,0
Kraj izvoda	10,1	5,1	6,0	4,1

Tablica 4.3. Kutovi struja u sve tri faze i neutralnom vodiču na početku, sredini i kraju izvoda u početnom stanju

Pozicija APF-a	Kutovi struja po fazama i u neutralnom vodiču			
	L1 (°)	L2 (°)	L2 (°)	N (°)
Početak izvoda	-150,2	89,9	-30,1	-156,7
Sredina izvoda	-150,2	89,8	-30,0	-155,8
Kraj izvoda	-150,2	89,7	-30,0	-154,2



Slika 4.2. Prvih 15 harmonika u sve tri faze u početnom stanju

Na slici 4.2. uočava se da su neparni harmonici izraženiji od parnih, posebno na srednjem i krajnjem izvodu. Također, iz tablice 4.1. vidljivo je da se vrijednost THD_I povećava od početka do kraja izvoda. Opterećenje kroz vod se smanjuje pa su se i efektivne vrijednosti struje kroz sve tri faze i u neutralnom vodiču postepeno smanjivale od početka do kraja izvoda, što je vidljivo u tablici 4.2. Pošto se radi o trofaznom sustavu, vrijednosti kutova struja po fazama i u neutralnom vodiču ostale su jednake i prikazane su u tablici 4.3. Uočilo se da su vrijednosti THD_I i efektivne vrijednosti struje po fazama i u neutralnom vodiču obrnuto proporcionalne.

Tablica 4.4. Vrijednosti THD_I u sve tri faze i neutralnom vodiču na početku, sredini i kraju izvoda dok je filter na početku izvoda

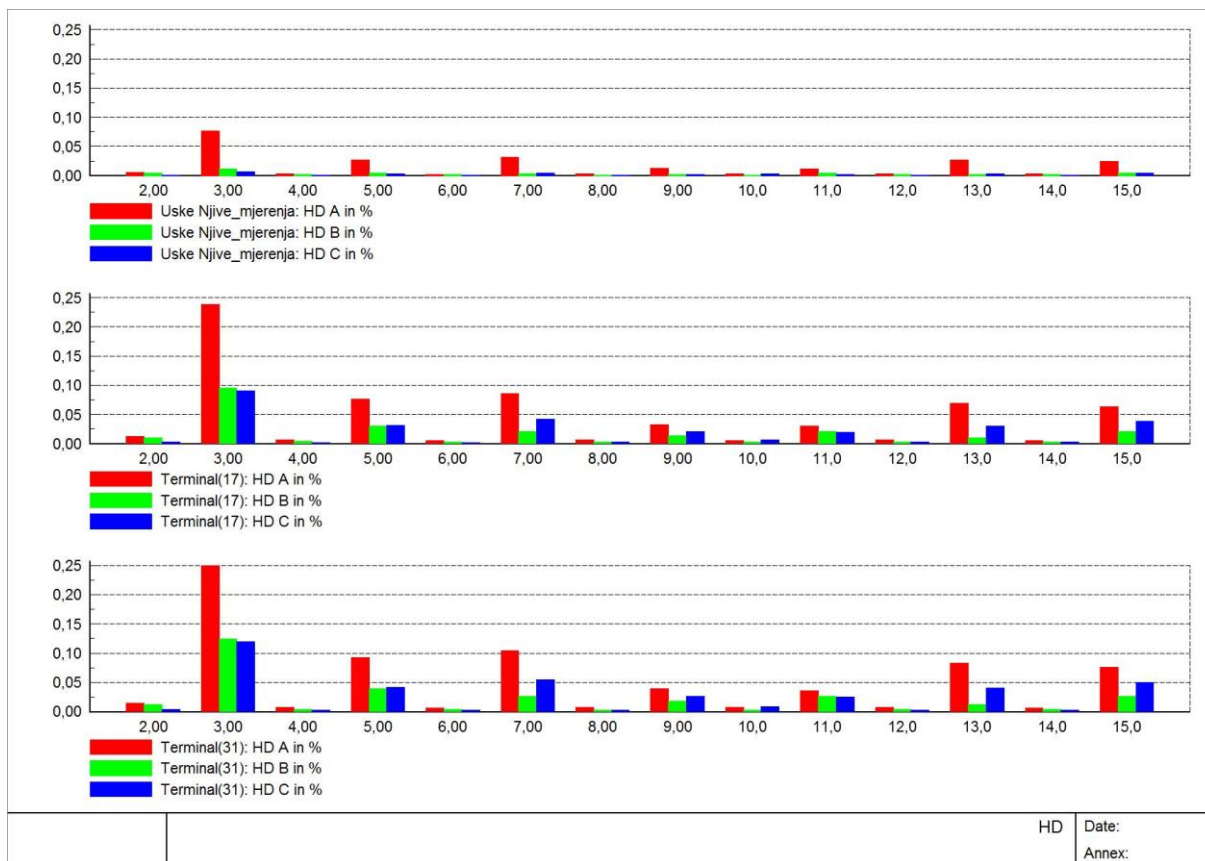
Pozicija APF-a	THD_I			
	L1 (%)	L2 (%)	L3 (%)	N (%)
Početak izvoda	5,8	1,6	1,4	54,5
Sredina izvoda	13,2	12,3	13,0	55,5
Kraj izvoda	13,4	13,3	11,7	59,7

Tablica 4.5. Efektivne vrijednosti struja u sve tri faze i neutralnom vodiču na početku, sredini i kraju izvoda dok je filter na početku izvoda

Pozicija APF-a	Efektivne vrijednosti struja po fazama i u neutralnom vodiču			
	I_{L1} (A)	I_{L2} (A)	I_{L3} (A)	I_{Ln} (A)
Početak izvoda	103,1	68,3	64,8	37,3
Sredina izvoda	46,1	25,0	24,4	20,0
Kraj izvoda	10,1	5,2	6,0	4,1

Tablica 4.6. Kutovi struja u sve tri faze i neutralnom vodiču na početku, sredini i kraju izvoda dok je filter na početku izvoda

Pozicija APF-a	Kutovi struja po fazama i u neutralnom vodiču			
	L1 (°)	L2 (°)	L2 (°)	N (°)
Početak izvoda	-150,1	89,8	-30,1	-156,6
Sredina izvoda	-150,1	89,8	-30,0	-155,8
Kraj izvoda	-150,1	89,8	-29,9	-154,2



Slika 4.4. Prvih 15 harmonika u sve tri faze kod filtera na početku izvoda

Postavljanjem filtra na početak izvoda smanjila se vrijednost THD_I , dok se efektivna vrijednost struje za sve tri faze povećala samo na početku izvoda, dok su na sredini i na kraju izvoda ostale nepromijenjene u odnosu na početno stanje. Vrijednosti na ordinatama su izražene u postocima. Vrijednost neutralnog vodiča također je ostala jednaka kao u početnom stanju, jer filter ne djeluje na nulti vodič. Njegova vrijednost je relativno malog iznosa, što se može vidjeti usporedbom tablica 4.1. i 4.2. s tablicama 4.4. i 4.5. Primijećeno je da vrijednost THD_I opada samo do točke spoja APF-a. Na slici 4.3. prikazane su vrijednosti THD_I , efektivne vrijednosti struja i kutova struja po fazama. Nakon dodavanja aktivnog filtera uočava se da vrijednosti THD_I značajno opadaju sve do točke gdje je spojen filter jer on djeluje na harmonike iz mreže.

4.3. Filter na sredini izvoda

Koristi se isti filter koji se pomiče po mreži te se za zadani srednji izvod on nalazi na terminalu 17. Opterećenje voda *Odlaz u KO16* iznosi 48,1 %, a nazivna struja filtra iznosi 39,3 A.

Tablica 4.7. Vrijednosti THD_I u sve tri faze i neutralnom vodiču na početku, sredini i kraju izvoda dok je filter na sredini izvoda

Pozicija APF-a	THD _I			
	L1 (%)	L2 (%)	L3 (%)	N (%)
Početak izvoda	5,9	1,7	1,4	54,5
Sredina izvoda	1,7	3,2	4,2	55,5
Kraj izvoda	13,5	13,3	11,7	59,7

Tablica 4.8. Efektivne vrijednosti struja u sve tri faze i neutralnom vodiču na početku, sredini i kraju izvoda dok je filter na sredini izvoda

Pozicija APF-a	Efektivne vrijednosti struja po fazama i u neutralnom vodiču			
	I _{L1} (A)	I _{L2} (A)	I _{L3} (A)	I _{Ln} (A)
Početak izvoda	103,2	68,4	64,9	37,3
Sredina izvoda	68,7	52,2	50,5	20,0
Kraj izvoda	10,1	5,2	6,0	4,1

Tablica 4.9. Kutovi struja u sve tri faze i neutralnom vodiču na početku, sredini i kraju izvoda dok je filter na sredini izvoda

Pozicija APF-a	Kutovi struja po fazama i u neutralnom vodiču			
	L1 (°)	L2 (°)	L2 (°)	N (°)
Početak izvoda	-150,1	89,9	-30,1	-156,4
Sredina izvoda	-149,8	90,1	-29,6	-155,5
Kraj izvoda	-149,8	90,1	-29,6	-153,9



Slika 4.5. Prvih 15 harmonika u sve tri faze kod filtera na sredini izvoda

Kada se filter nalazi na sredini izvoda smanjuju se vrijednosti THD_I , a efektivne vrijednosti struje po fazama na početku i sredini voda se povećavaju. Time se vrijednosti THD_I smanjuju do mjesta na kojem se nalazi filter. Primjećuje se da su vrijednosti na kraju voda ostale nepromijenjene u odnosu na prethodne slučajeve jer filter nije djelovao na njih. Vrijednost neutralnog vodiča također je jednaka i na njega nema nikakvog utjecaja. Promjene tih vrijednosti su prikazane u tablicama 4.7. i 4.8 te na slici 4.5.

4.4. Filter na kraju izvoda

U ovom slučaju isti filter pomiče se po mreži i postavlja se na kraju izvoda odnosno na terminalu 31. Opterećenje voda *Odlaz u KO16* iznosi 48,1 %, a nazivna struja filtera iznosi 39,3 A.

Tablica 4.10. Vrijednosti THD_I u sve tri faze i neutralnom vodiču na početku, sredini i kraju izvoda dok je filter na kraju izvoda

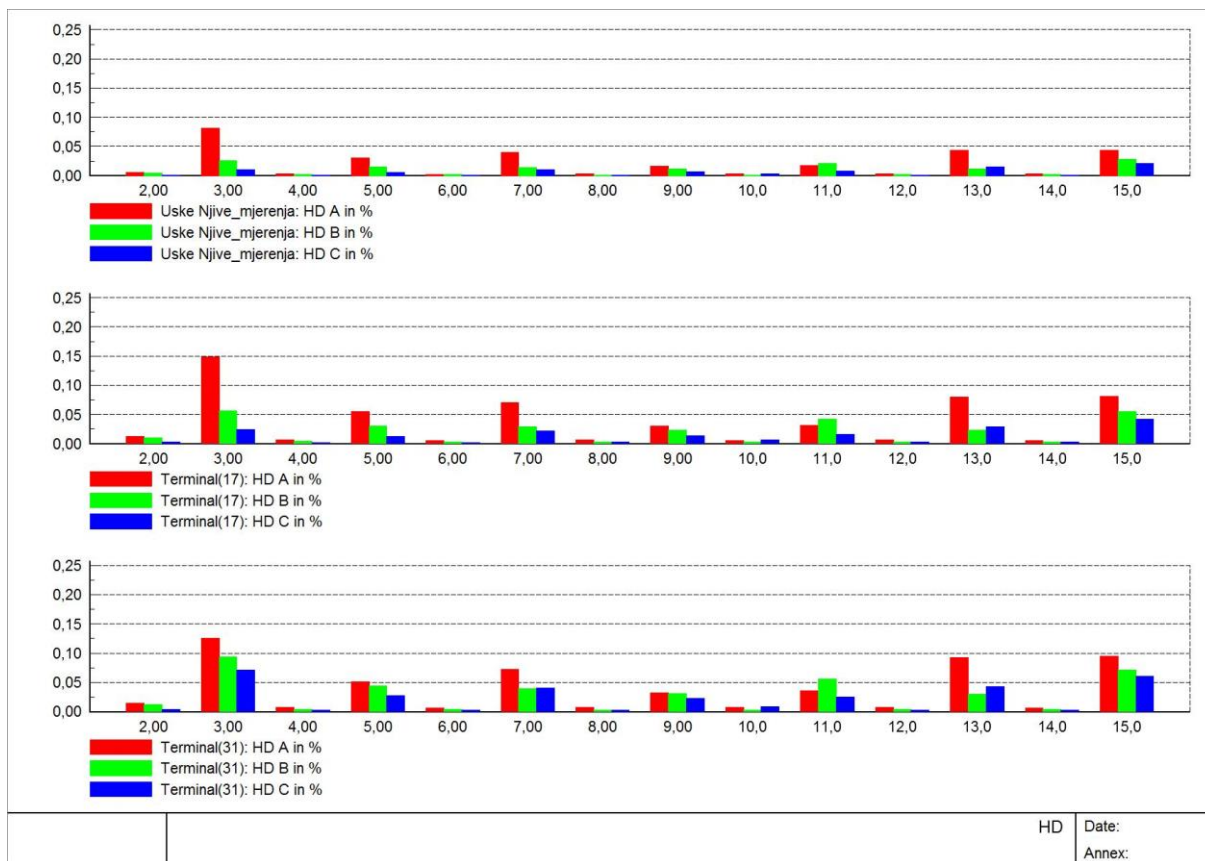
Pozicija APF-a	THD _I			
	L1 (%)	L2 (%)	L3 (%)	N (%)
Početak izvoda	6,2	3,2	1,8	54,5
Sredina izvoda	2,8	4,2	4,4	55,5
Kraj izvoda	9,1	9,8	11,1	59,7

Tablica 4.11. Efektivne vrijednosti struja u sve tri faze i neutralnom vodiču na početku, sredini i kraju izvoda dok je filter na kraju izvoda

Pozicija APF-a	Efektivne vrijednosti struja po fazama i u neutralnom vodiču			
	I _{L1} (A)	I _{L2} (A)	I _{L3} (A)	I _{Ln} (A)
Početak izvoda	103,4	68,5	65,0	37,3
Sredina izvoda	68,8	52,3	50,6	20,1
Kraj izvoda	42,8	41,5	41,2	4,1

Tablica 4.12. Kutovi struja u sve tri faze i neutralnom vodiču na početku, sredini i kraju izvoda dok je filter na kraju izvoda

Pozicija APF-a	Kutovi struja po fazama i u neutralnom vodiču			
	L1 (°)	L2 (°)	L2 (°)	N (°)
Početak izvoda	-150,1	89,9	-30,1	-156,3
Sredina izvoda	-149,8	90,1	-29,6	-155,4
Kraj izvoda	-149,5	90,4	-29,3	-153,8

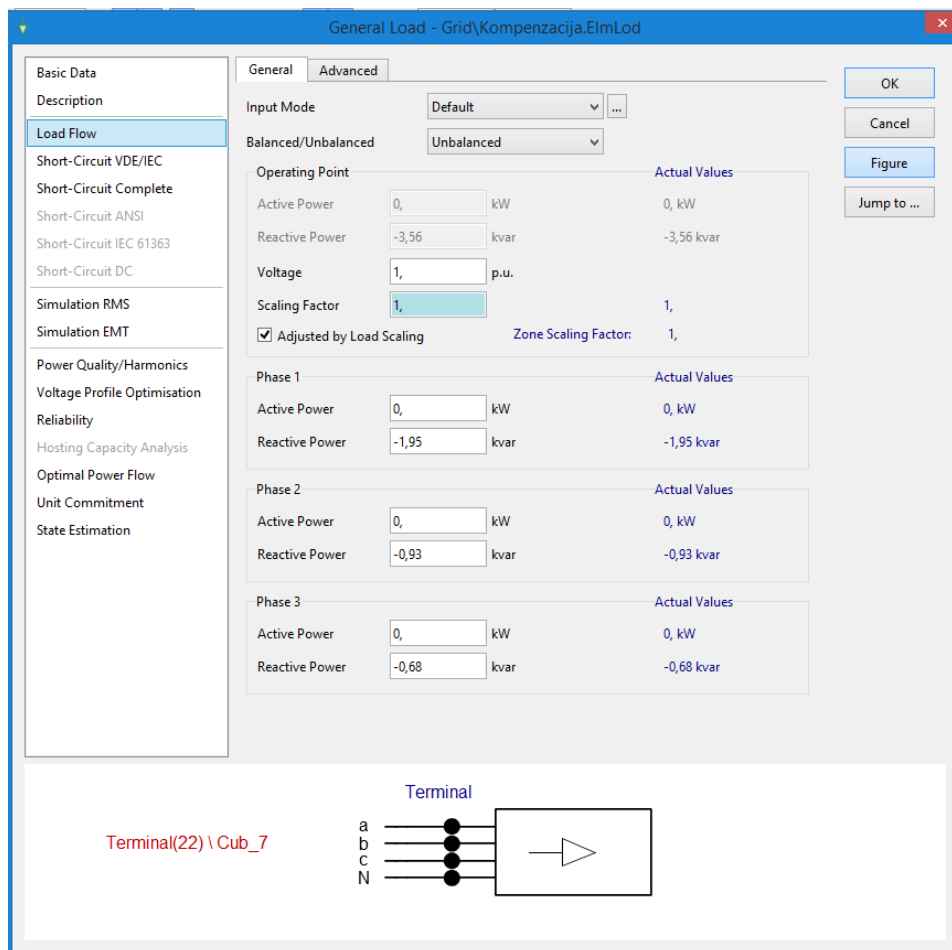


Slika 4.6. Prvih 15 harmonika u sve tri faze kod filtera na kraju izvoda

Promatranjem tablica 4.10. i 4.11. i uspoređivanjem s vrijednostima iz prethodnog slučaja uočeno je da su se smanjile vrijednosti THD_I , dok su se efektivne vrijednosti struje po fazama povećale su se na sva tri izvoda (na početku, na sredini i na kraju izvoda). Došlo je do promjene na cijelom izvodu. Vrijednost neutralnog vodiča je ostala nepromijenjena. Smanjene vrijednosti izvoda vidljive su na slici 4.6. Opterećenje voda *Odlaz u KO16* približno je jednak na sva tri mjesta izvoda na koja se pomicao u mreži.

4.5. Početno stanje s kompenzacijom jalove snage

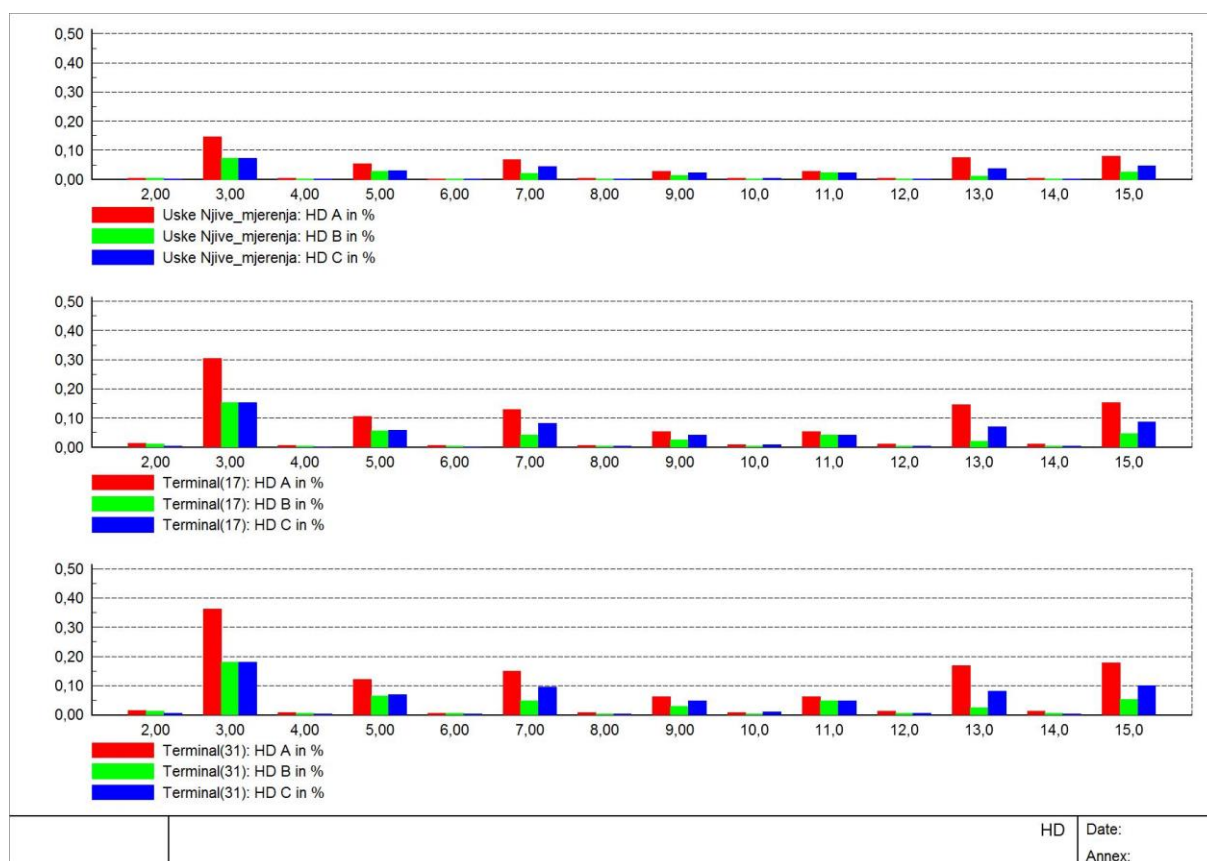
U nastavku radila se kompenzacija jalove snage u realnim uvjetima, a podaci za kompenzaciju prikazani su na slici 4.7. Prilagođava se reaktivna snaga da bi se omogućila što bolja kompenzacija po fazama. Time se dodaje reaktivna snaga u prvoj fazi koja iznosi -1,95 kvar, u drugoj fazi je -0,93 kvar dok u trećoj fazi je bila -0,68 kvar. Kompenzacija jalove snage spojena je na terminalu 22 koji se nalazi iza sredine izvoda te neposredno prije kraja izvoda. Opterećenje voda *Odlaz u KO16* za početno stanje s kompenzacijom jalove snage iznosi 37,8 %.



Slika 4.7. Kompenzacija jalove snage

Tablica 4.10. Vrijednosti THD_I u sve tri faze i neutralnom vodiču na početku, sredini i kraju izvoda za početno stanje s kompenzacijom jalove snage

	THD_I			
	L1 (%)	L2 (%)	L3 (%)	N (%)
Početak izvoda	14,5	13,2	14,7	59,0
Sredina izvoda	15,6	14,7	16,9	60,1
Kraj izvoda	13,7	12,6	11,7	73,4



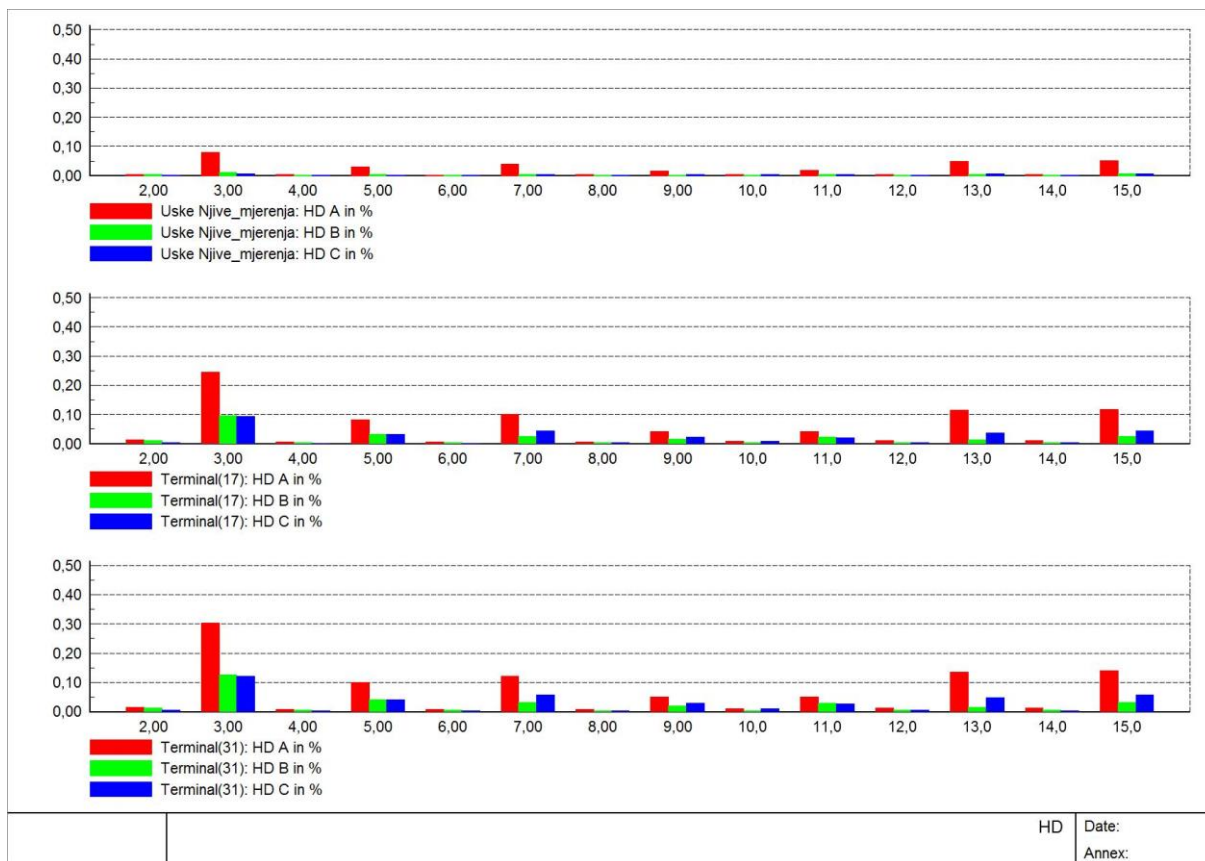
Slika 4.8. Prvih 15 harmonika u sve tri faze u početnom stanju s kompenzacijom jalove snage

4.6. Kompenzacija jalove snage i uključen aktivan filter na početku izvoda

U ovom dijelu objašnjeno je stanje pri kojem se dodala kompenzacija jalove snage i uključen aktivan filter na početku izvoda, a prije kompenzacije. Opterećenje voda *Odlaz u KO16* iznosi 43,7 %, a nazivna struja filtera iznosi 39,3 A. Koristimo iste filtere kao i u prethodnim slučajevima te uzimamo kutove koje smo uzimali bez kompenzacije.

Tablica 4.11. Vrijednosti THD_I u sve tri faze i neutralnom vodiču na početku, sredini i kraju izvoda uz kompenzaciju i aktivan filter na početku izvoda

Pozicija APF-a	THD _I			
	L1 (%)	L2 (%)	L3 (%)	N (%)
Početak izvoda	7,3	3,2	4,4	58,8
Sredina izvoda	15,5	14,7	16,8	59,7
Kraj izvoda	13,7	12,6	11,7	73,3



Slika 4.9. Prvih 15 harmonika u sve tri faze uz kompenzaciju i aktivan filter na početku izvoda

U tablici 4.11. vidljivo je da su se smanjile vrijednost THD_I na početku izvoda u odnosu na vrijednosti iz tablice 4.10. u početnom stanju s kompenzacijom jalove snage. Vrijednost neutralnog vodiča ostane nepromijenjena dodavanjem kompenzacije i priključivanjem aktivnog filtra na početak izvoda, a prvih petnaest harmonika u svim fazama prikazani su na slici 4.9.

4.7. Kompenzacija jalove snage i uključen aktivan filter na sredini izvoda

U ovom slučaju također se dodala kompenzacija jalove snage i uključen aktivan filter, ali se pomaknuo u mreži na sredinu izvoda, a prije kompenzacije. Pri tom stanju opterećenje voda *Odlaz u KO16* iznosi 43,6 %, a nazivna struja filtera iznosi 39,3 A.

Tablica 4.12. Vrijednosti THD_I u sve tri faze i neutralnom vodiču na početku, sredini i kraju izvoda uz kompenzaciju i aktivan filter na sredini izvoda

Pozicija APF-a	THD _I			
	L1 (%)	L2 (%)	L3 (%)	N (%)
Početak izvoda	7,2	3,3	4,4	58,6
Sredina izvoda	5,0	5,3	7,1	59,3
Kraj izvoda	13,8	12,7	11,7	73,3



Slika 4.10. Prvih 15 harmonika u sve tri faze uz kompenzaciju i aktivan filter na sredini izvoda

Slika 4.10. prikazuje prvih petnaest promatranih harmonika u ovom radu. Uočava se da pri dodavanju kompenzacije i uključivanja aktivnog filtra na sredinu voda smanji vrijednost THD_I u odnosu na prethodni slučaj kada je bilo na početku izvoda, dok na vrijednost neutralnog vodiča ne utječe, što je vidljivo u tablici 4.12.

4.8. Kompenzacija jalove snage i uključen aktivan filter na kraju izvoda

Navedeni slučaj prikazuje stanje kada su dodani kompenzacija jalove snage i uključen aktivan filter na kraju izvoda, ali prije kompenzacije. Opterećenje voda *Odlaz. u KO16* iznosi 43,5 %, a nazivna struja filtera ostaje ista kao u prethodnim slučajevima te iznosi 39,3 A.

Tablica 4.13. Vrijednosti THD_I u sve tri faze i neutralnom vodiču na početku, sredini i kraju izvoda uz kompenzaciju i aktivan filter na kraju izvoda

Pozicija APF-a	THD _I			
	L1 (%)	L2 (%)	L3 (%)	N (%)
Početak izvoda	7,7	4,5	4,7	58,6
Sredina izvoda	6,1	6,2	7,3	59,2
Kraj izvoda	9,1	9,8	11,2	73,3



Slika 4.11. Prvih 15 harmonika u sve tri faze uz kompenzaciju i aktivan filter na kraju izvoda

Slučaj za prvih petnaest harmonika prikazan je na slici 4.11. nakon dodavanja kompenzacije i priključivanja aktivnog filtra na kraju izvoda. Primjećuje se da se vrijednost THD₁ smanjila na kraju izvoda te su vrijednosti THD₁ na početku i sredini izvoda isto umanjene jer filter djeluje na cijeli izvod do mjesta gdje je postavljen. Vrijednost neutralnog vodiča je ostala nepromijenjena. Gledajući dodavanje kompenzacije i aktivnog filtra, opterećenje voda *Odlaz u KO16* približno je jednako na sva tri mjesta izvoda (na početku, sredini i kraju izvoda).

ZAKLJUČAK

Na osnovu analize viših harmonika u distribucijskoj mreži uočava se da dodavanje filtra na određeno mjesto na izvodu snižava vrijednost THD_I , dok se vrijednost efektivne struje po fazama povećava. Također, primjećuje se da filter poništava sve harmonike i smanjuje vrijednost THD_I na dijelu izvoda do mjesta na kojem se nalazi filter. Vrijednost neutralnog vodiča niti u jednom slučaju se nije promijenila jer filter ne može djelovati na nulti vodič. Vrijednosti harmonika neutralnog vodiča su relativno niskog iznosa. Pri promatranju stanja kada se dodaje kompenzacija i priključuje aktivni filter također se uvidjelo da filter umanjuje neparne harmonike smanjujući vrijednost THD_I . Može se zaključiti da se optimalna vrijednost THD_I dobije dodavanjem kompenzacije jalove snage i priključivanjem aktivnog filtra na kraj izvoda jer se time snižavaju neparni harmonici, a time i THD_I na cijeloj dužini promatranog elektrodistribucijskog izvoda.

SAŽETAK

Harmonici u niskonaponskoj mreži ometaju uređaje u sustavu te mogu oštetiti opremu, napraviti zastoje u radu ili napraviti veliki trošak. Sve većom uporabom uređaja s energetske elektroničkom i nelinearnih potrošača dolazi do većeg stvaranja harmonika u mreži. Iz tog razloga potrebno je bilo osmisliti načine koji će ublažiti utjecaje harmonika i poboljšati rad opreme. Transformatori, reaktori, pasivni i aktivni filtri su neke od mogućnosti za smanjivanje tih neželjenih pojava. Filtri su češće primijenjeni u niskonaponskoj mreži jer su jeftinije i jednostavnije rješenje od ostalih. Aktivni filtri su efikasniji od pasivnih zbog posjedovanja uređaja za pojačavanje signala pa njihov izlazni signal ima manju amplitudu od ulaznog signala.

Ključne riječi: harmonici, mreža, uređaji, oprema, filter, transformator, opterećenje

SUMMARY

Harmonics in a low-voltage network interfere with devices in the system and can damage equipment, cause downtime, or make high costs. With the increasing use of devices with power electronics and nonlinear consumers, there is a greater creation of harmonics in the network. For this reason, it was necessary to think out ways to moderate the effects of harmonics and improve the operation of the equipment. Transformers, reactors, passive and active filters are some of the options to reduce these side effects. Filters are more commonly applied in a low-voltage network because they are a cheaper and simpler solution than others. Active filters are more efficient than passive ones due to the presence of a signal amplifier, so their output signal has a smaller amplitude than the input signal.

Keywords: harmonics, network, devices, equipment, filter, transformer, load

LITERATURA

- [1] ElectronicsTutorials, Osnovni vodiči i revizija elektronike, URL: [Harmonics and Harmonic Frequency in AC Circuits \(electronics-tutorials.ws\)](https://www.electronicstutorials.com/harmonics-and-harmonic-frequency-in-ac-circuits/) [16.9.2021.]
- [2] E. L. Owen, *A history of Harmonics in Power Systems*, IEEE Industry Applications Magazine, January/February 1998.
- [3] F. C. De La Rosa, *HARMONICS AND POWER SYSTEMS*, Taylor and Francis Group, USA 2006.
- [4] E. Prestini, "Introduction to harmonic analysis," *Appl. Numer. Harmon. Anal.*, no. 9781489979872, pp. 25–52, 2016.
- [5] Izmjenični strujni krugovi, URL: [AC Circuits \(bu.edu\)](https://www.bu.edu/ac-circuits/) [10.7.2021.]
- [6] ElectricalEasy, Vrste električnih opterećenja, URL: [Types of Electrical Loads | electricaleasy.com](https://www.electrical-easy.com/types-of-electrical-loads/) [10.7.2021.]
- [7] R. Barnes, "*Harmonics in power systems*", Power Eng. J., USA, 1989.
- [8] Super User, Kako iscrtati petlju histereze pomoću programa Excel?, URL: [How to plot hysteresis loop using excel? - Super User](https://www.superuser.com/threads/how-to-plot-hysteresis-loop-using-excel?u=superuser) [10.7.2021.]
- [9] Wikimedia Commons, Teorijski harmonijski spektri, URL: [File:Harmonic spectra theoretical x y.png - Wikimedia Commons](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Harmonic_spectra_theoretical_x_y.png) [11.7.2021.]
- [10] Pinyol Ramon, "Harmonics : Causes , Effects and Minimization," *Salicru White Pap.*, no. August, pp. 1–32, 2015.
- [11] BSM Transmissions, Asinkroni motor, URL: [Moteur asynchrone - moteur électrique et variateur de fréquence \(moteur-electrique-pro.fr\)](https://www.moteur-electrique-pro.fr/moteur-asynchrone/) [16.9.2021.]
- [12] Sunpower electronics, Pretvarači snage, URL: [What is a Power Converter? - Sunpower UK \(sunpower-uk.com\)](https://www.sunpower-uk.com/what-is-a-power-converter/) [15.9.2021.]
- [13] Jednofazni poluvalni pretvarač s RL opterećenjem, URL: [2 Single-phase Half-wave Controlled Converter A way | Chegg.com](https://www.chegg.com/answers/2-single-phase-half-wave-controlled-converter-a-way) [16.9.2021.]

- [14] ExpertUNION lighting design, URL: [Подключение люминесцентных ламп - > > Освещение, лампы, светильники. Светотехника-Светодизайн-сообщество \(expertunion.ru\)](#) [15.9.2021.]
- [15] Dreamstime, Električni generator, URL: [Electric Motor Generator 3d Render On A White Background Stock Illustration - Illustration of industry, large: 74232019 \(dreamstime.com\)](#) [16.9.2021.]
- [16] InfoBloom, Indukcijski motor, URL: [What is an Induction Motor? \(with picture\) \(infobloom.com\)](#) [16.9.2021.]
- [17] IEEE Standard 519-1992 Harmonijska ograničenja, URL: [Microsoft PowerPoint - IEEE 519 Application Issues - Eaton - Atlanta IAS.ppt](#) [16.9.2021.]
- [18] BrainKart.com, Uređaji za kontrolu harmonijskih izobličenja, URL: [Devices for Controlling Harmonic Distortion \(brainkart.com\)](#) [16.9.2021.]
- [19] ZDDQ, Aktivni filter, URL: [Active Harmonic Filter \(zddqelectric.com\)](#) [15.9.2021.]
- [20] ScienceDirect, Harmonijski filter, URL: [Harmonic Filter - an overview | ScienceDirect Topics](#) [16.9.2021.]
- [21] PS CAD, Pasivni filter, URL: [Passive Filter Design \(pscad.com\)](#) [16.9.2021.]
- [22] Engineering360, Pasivni filteri, URL: [Passive Filters Selection Guide: Types, Features, Applications | Engineering360 \(globalspec.com\)](#) [15.9.2021.]
- [23] ResearchGate, RLC filter, URL: [Band pass filter using a basic RLC circuit. | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#) [16.9.2021.]
- [24] Peninsula technical sales, Harmonijski filtri, URL: [Understanding Harmonic Filters and Their Role in Power Factor Correction \(pentech.com\)](#) [16.9.2021.]
- [25] QualityEnergy, Aktivni filter, URL: [What Is An Active Harmonic Filter? | Quality Energy](#) [16.9.2021.]
- [26] DIgSILENT, URL: [PowerFactory - DIgSILENT](#) [16.9.2021.]
- [27] Downloadly.ir, URL: [DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 x86 – Downloadly](#) [16.9.2021.]

ŽIVOTOPIS

Ena Grahovac rođena je u Osijeku 17. rujna 1996.godine. Živi u Osijeku gdje je i pohađala osnovnu školu. Nakon završene osnovne škole upisuje Jezičnu gimnaziju u Osijeku.

Polaganjem mature 2015. godine i završetkom srednje škole, upisuje preddiplomski sveučilišni studija Elektrotehnike na nekadašnjem Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, sada Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku na Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera. Prije upisa u drugu godinu preddiplomskog studija Elektrotehnike odabire smjer Elektroenergetika. Nakon završenog preddiplomskog studija Elektrotehnike upisuje diplomski sveučilišni studij Elektrotehnike na istom fakultetu, smjer Elektroenergetika, izborni blok Industrijska elektroenergetika.

Potpis autora