

# ANALIZA VIŠIH HARMONIKA ŠESTOPULSNOG ISPRAVLJAČA SPREGA TRANSFORMATORA YgY

## ANALYZE OF HIGHER HARMONIC SIX PULSE RECTIFIER TRANSFORMER CONNECTION YgY

*Midhat Umihanić*

Stručni članak

**Sažetak:** Nelinearni potrošači injektiraju više harmonijske komponente struje u sistem koje, protjecanjem kroz sistem, uzrokuje distorziju napona napajanja. Elementi energetske elektronike, zbog svojih nelinearnih karakteristika, narušavaju sinusni valni oblik napona i struje. Cilj rada je analiza uzroka i posljedice nastanka viših harmonijskih komponenti kao i način njihovog eliminiranja. U radu je izvršena analiza viših harmonika šestopulsnog ispravljača, koji se napaja preko transformatora sprega YgY. Analiza je izvedena na osnovu simulacije u programskom paketu MATLAB/PSB. Snimljeni su valni oblici struja i napona na primarnoj i sekundarnoj strani transformatora kao i harmonijski sadržaji struja na primarnoj i sekundarnoj strani transformatora s proračunom indikatora distorzije valnog oblika struje-THDI.

**Ključne riječi:** Više harmonijske komponente, nelinearni potrošač, THDI.

Professional paper

**Abstract:** Nonlinear appliances inject higher harmonic components of the current into the system, which by the flow through the system have distortion of the voltage while power feeding. The elements of the power electronics due to its nonlinear characteristics disturb the sinus wave shape of the voltage and the current. The aim of this work is the analysis of the samples and the consequences of the appearance of higher harmonic components as well as the methods of their elimination. The analysis of the higher harmonic six pulse rectifier, which gets its power through connection of the transformer YgY, is also conducted. The analysis is derived on the basis of simulation in programme package MATLAB/PSB. Wave shape of the current and voltage are recorded on the primary and secondary side of the transformer and their harmonic content of the current on the primary and secondary side of the transformer including the results of the distortion indicator of the current wave shape-THDI.

**Keywords:** higher harmonic components, nonlinear consumers, THDI

### 1. UVOD

Krajem pedesetih i tokom šezdesetih godina došlo je do naglog razvoja snažnih poluvodičkih komponenti (tiristori i snažni bipolarni tranzistori). Pojavljuju se poluvodički energetske elektronski pretvarači, koji u potpunosti potiskuju one s vakuumskim elementima. Većinu energetskih elektronskih pretvarača čine oni koji se vezuju na naizmjeničnu mrežu (ispravljači, mrežom komutirani izmjenjivači, regulatori naizmjeničnog napona, ciklopretvarač). Zbog svoje prekidačke prirode rada oni predstavljaju nelinearne potrošače za mrežu i izazivaju pojavu izobličenja valnog oblika struje i napona [1].

Pokazuje se da se matematičkom analizom izobličenih valnih oblika, korištenjem Fourierovih redova, mogu ovi izobličeni oblici predstaviti nizom sinusnih funkcija različitih frekvencija. Ove frekvencije su cjelobrojni umnožak osnovne (dominantne)

frekvencije analiziranog signala i nazivaju se viši harmonici [2].

U ovom radu stavlja se akcent na pojavu viših harmonijskih komponenti u elektroenergetskoj mreži uslijed nelinearnosti potrošača. Najčešći nelinearni potrošači su energetske elektronski pretvarači (ispravljači, izmjenjivači...). Ispravljači, kao najčešće korišteni energetske elektronski pretvarači, jedan su od glavnih izvora viših harmonika.

Upravo zbog velike prisutnosti nelinearnih potrošača u mreži, analiza kvalitete električne energije, odnosno analiza viših harmonika dobiva sve više na značaju iz ekonomskih razloga.

Proizvođači, odnosno distributeri električne energije, suočeni su s dva dijametralno suprotna zahtjeva. S jedne strane elektronička oprema zahtijeva kvalitetan (sinusni) napon, dok s druge strane ista ta oprema ubacuje u mrežu više harmonijske komponente, odnosno nesinusnu struju koja tako narušava kvalitetu električne energije.

## 2. POSLJEDICE VIŠIH HARMONIKA U MREŽI

Sve komponente energetskog sistema, kao i potrošači koji se priključuju na sistem, podrazumijevaju sinusne oblike napona i struje, pa svaka pojava viših harmonika ima negativne efekte [3]. Negativni efekti koji se javljaju kao posljedica viših harmonika su:

1. Pojava rezonancije u mreži,
2. Utjecaj na kondenzatorske baterije,
3. Utjecaj na elemente za zaštitu,
4. Utjecaj na točnost pokazivanja standardnih mjernih instrumenata,
5. Dodatni gubici u električnim strojevima,
6. Utjecaj na telekomunikacijske signale,

### 2.1. Pojava rezonancije u mreži

Prisutnost kapacitivnosti u mreži može uzrokovati pojavu lokalne rezonancije [1]. To izaziva pojavu prevelikih struja i povećanje napona. Takvo stanje dovodi do kvarova najčešće na samim kondenzatorima, a i na drugim komponentama sistema. Postoji serijska i paralelna rezonancija.

Serijska rezonancija javlja se kada je na potrošaču paralelno vezana kondenzatorska baterija. Odlikuje se malom impedancijom i velikim naponima.

Paralelna rezonancija javlja se u više slučajeva, a najčešće ako je kondenzator na istoj sabirnici kao i harmonijski izvor. Odlikuje se velikom impedancijom i velikim naponima. Pojava rezonancije u mreži utječe na kondenzatorske baterije, na rad zaštitnih uređaja (releji,...) itd.

### 2.2. Utjecaj na kondenzatorske baterije

Kondenzatori, koji čine kondenzatorske baterije za popravku faktora snage ili su u sastavu filtera ili se pojavljuju u nekom drugom sklopu, ugroženi su pojavama prenapona ili velikim vrijednostima struja. Prisutnost harmonika u naponu izaziva dodatne gubitke

$$P_g = \sum_{n=1}^{\infty} Ctg \delta \omega_n U_n^2 \quad (1)$$

s tim da je  $C$  kapacitivnost kondenzatora,  $tg \delta = R\omega C$ ,  $\omega_n = 2\pi n f$ ,  $U_n$  - efektivna vrijednost  $n$ -tog harmonika napona.

Serijska i paralelna rezonancija između kondenzatora i ostatka mreže izaziva prenapone i visoke vrijednosti struja, što povećava gubitke i pregrijavanje kondenzatora dovodi do smanjivanja životnog vijeka ili proboja dielektrika. Stoga se kondenzatori izgrađuju prema različitim standardima koji definiraju različite nivoe strujnog napreznja.

### 2.3. Utjecaj na elemente za zaštitu

Prisutnost harmonika u mreži česti je uzrok smetnji za upravljačke signale koji upravljaju elementima zaštite ili se upotrebljavaju za daljinsku kontrolu i upravljanje.

Negativni efekti manifestiraju se u nepravilnom radu prijemnika, kao i mogućim kvarovima na opremi.

### 2.4. Utjecaj na točnost pokazivanja standardnih mjernih instrumenata

Pojava mjernih veličina bogatih harmonicima izaziva grešku koja izlazi iz okvira klase instrumenta. Njeno određivanje predstavlja značajan podatak, naročito kod pogonskih istraživačkih mjerenja, obračuna utrošene električne energije i sl. Zbog različite konstrukcije mjernih uređaja, utjecaj harmonika na instrumente za mjerenje napona, struje i snage, odnosno na instrumente za mjerenje utrošene električne energije, razlikuje se. Stoga je važno znati koji je postotni iznos harmonika i koliko oni utječu na točnost mjerenja.

Posljednjih godina traži se izlaz od sve većeg utjecaja nelinearnih potrošača na mjerenje i obračun električne energije u digitalnim brojlilima [3]. Najvažnija komponenta u ovim brojlilima su A/D pretvarači (jedan za struju i jedan za napon), koji se pomoću sinkronizirajućih krugova priključuju simultano na po jednu fazu. Točnost ovakvog brojila zavisi direktno od A/D pretvarača.

### 2.5. Dodatni gubici u električnim strojevima

Kod transformatora prisutnost harmonika napona povećava histereze i gubitke uslijed vrtložnih struja, kao i napreznja izolacije. Protok harmonika struje povećava gubitke u bakru tj. Joulove gubitke. Posebno su izraženi gubici u namotima spregnutim u trokut, zbog cirkuliranja harmonika struje koji su višekratnik od 3, pa se oni moraju predvidjeti kod projektiranja (naročito ako se radi o ispravljačkom transformatoru). Utjecaj viših harmonika izražava se Field-ovim faktorom, kojim se povećava (množi) izraz za aktivnu snagu gubitaka. Za viši harmonik reda  $h$  izraz za aktivnu snagu gubitaka postaje:

$$P_{dod(h)} = k_{F(h)} \cdot R_{dc} \cdot i_{(h)}^2, \quad k_{F(h)} \geq 1 \quad (2)$$

gdje je  $k_{F(h)}$  Field-ov faktor,  $R_{dc}$  omski otpor jednosmjerne struje, a  $i_{(h)}$  vrijednost struje  $h$ -tog harmonika.

Kod rotacijskih električnih strojeva javljaju se dva efekta: povećani gubici i parazitni momenti. Gubici uslijed prisutnosti viših harmonika se javljaju i u rotorskom i u statorskom kolu, kao i u feromagnetima. U rotorskim i statorskim provodnicima mogu biti veći od gubitaka uslijed otpornosti, zbog vrtložnih struja i skin efekta. U feromagnetiku doprinose povećanju gubitaka u željezu.

### 2.6. Utjecaj na telekomunikacijske signale

Harmonici se u telekomunikacijskom sistemu generiraju, tj. prenose elektromagnetnom interferencijom i to naročito u slučajevima kada su energetski i telekomunikacijski kablovi postavljeni blizu, u istom kanalu ili po podu, jedan pored drugog. Glavni izvor harmonika su energetski elektronski pretvarači, a

najveći problemi se javljaju u poštam (na telefonskim signalima) i u poslovnim zgradama s velikim brojem računala ili terminala (na računarskim komunikacijama).

### 3. METODE ZA UBLAŽAVANJE ILI ELIMINIRANJE VIŠIH HARMONIKA

Viši harmonici su stalno prisutni u mreži u većem ili manjem postotku. Međutim, u određenom trenutku oni mogu postati problem. To se dešava ako je izvor harmonika suviše velik, ako je putanja harmonika struje preduga, odnosno ako je reaktancija kruga velika, ili ako je odziv sistema takav da dovodi do pojačanja harmonika (rezonancija). Da bi se harmonijski problem smanjio ili eliminirao postoji nekoliko osnovnih metoda:

1. Smanjenje intenziteta harmonijskih struja,
2. Ugradnje filtara,
3. Promjena rezonantne frekvencije sistema.

#### 3.1. Smanjenje intenziteta harmonijskih struja

Metode smanjenja intenziteta harmonijskih struja podrazumijevaju mijenjanje načina rada pogona koji generiraju harmonike. Tu se zapravo radi o promjeni topologije mreže. To je teško praktično izvesti, jer može utjecati na kompletan proizvodni proces. Rješenje problema moguće je izvesti prilikom projektiranja.

Drugi način smanjenja intenziteta harmonijske struje je sprega namota transformatora u trokut, što dovodi do blokiranja daljeg toka svih harmonika koji djeljivih sa 3.

Unošenjem faznog pomaka od 30 stupnjeva, sprežanjem sekundara transformatora u zvijezdu i trokut dobiva se efekt 12-pulsnog ispravljača, odnosno eliminiraju se 5-ti i 7-mi harmonik.

#### 3.2. Ugradnja filtara

Cilj postavljanja filtara je da se osigura niska impedancija za harmonike struje i na taj način spriječi njihovo širenje u mrežu. Zbog toga se filtri najčešće postavljaju paralelno potrošaču i sastoje se od kondenzatora s dodanom prigušnicom. Rezonantna frekvencija filtra proračunava se uvijek da bude nešto ispod frekvencije dominantnog harmonika.

Postoje aktivni i pasivni filtri. Pasivni se uglavnom ugrađuju paralelno na izvor harmonika. Nedostatak ove vrste filtra je što posjeduju vlastiti kapacitet i induktivitet i time mogu smanjiti rezonantnu frekvenciju i pogoršati uvjete za rezonanciju. Također je izražen i efekt starenja dielektrika koji ima za posljedicu smanjenje kapaciteta kondenzatora, odnosno povećanje rezonantne frekvencije. Detaljnije o vrstama i metodama projektiranja filtra može se naći u [4].

Aktivni filtri su elektronski pretvarači koji su programirani za vršenje kompenzacije viših harmonika. Oni prate injekciju nesinusne struje i na osnovu toga generiraju takvu koja, kada se superponira s harmonijskom strujom, daje "čistu" sinusoidu. Složenije

konfiguracije omogućuju potpuno otklanjanje svih poremećaja koji utječu na kvalitetu električne energije [5].

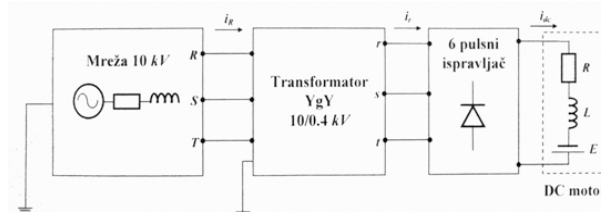
### 3.3. Promjena rezonantne frekvencije sistema

Ova metoda se najčešće koristi kada su u sistemu ili kod potrošača prisutne kondenzatorske baterije za kompenzaciju reaktivne energije. Njihova rezonantna frekvencija je često blizu frekvencije karakterističnih harmonika, pa dolazi do neželjenih negativnih pojava. Problem se obično rješava mijenjanjem veličine kondenzatora, dodavanjem serijske impedancije, pomicanjem kondenzatora na drugu sabirnicu ili pak potpunim uklanjanjem kondenzatora iz mreže.

## 4. ANALIZA VIŠIH HARMONIKA PRIMJENOM SIMULACIJE

U svrhu detekcije problema nelinearnog opterećenja analizirat će se dio trofazne električne mreže gdje se preko transformatora sprega YgY napaja istosmjerni motor preko šestopulsnog nosnog neupravljivog ispravljača. Simulacija je realizirana pomoću programskog paketa MATLAB/PSB.

Na slici 1 prikazan je model analiziranog dijela trofazne električne mreže.



Slika 1. Analizirani dio mreže

Parametri modela su:

Mreža:

Naponski nivo:  $U_n = 10 \text{ kV}$  (linijski napon)

Fazni kut prve faze  $\varphi = 0$

Parametri mreže:  $R_s = 2.75 \Omega$ ;  $L_s = 0.035 \text{ H}$

Transformator (linearni model):

Nazivna snaga  $S_n = 50 \text{ kVA}$

Prijenosni odnos transformatora:  $10/0,4 \text{ kV}$

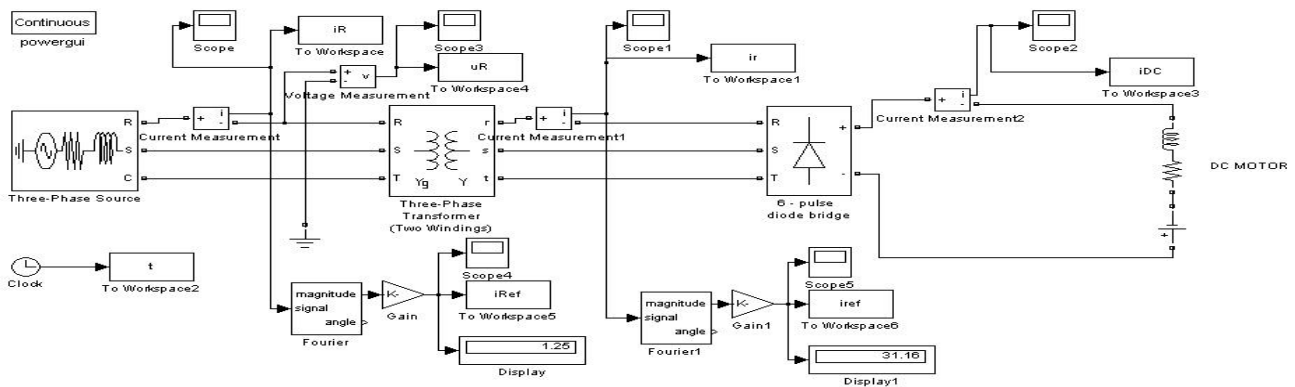
Radni otpor i reaktancija primarnog i sekundarnog

namotaja:  $R_p = R_s = 0.0025 \text{ p.u.}$ ;  $X_p = X_s = 0.06 \text{ p.u.}$

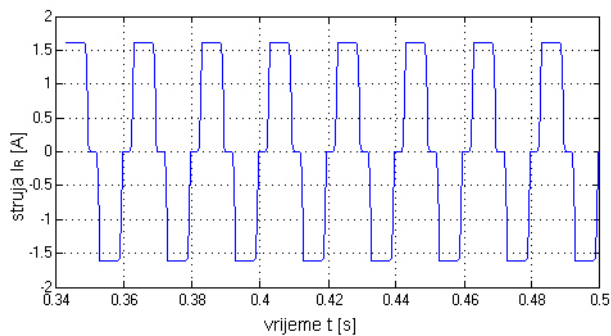
Parametri grane magnetiziranja:  $R_m = 500 \text{ p.u.}$ ;  $X_m = 500 \text{ p.u.}$

Parametri DC motora:  $R = 9.22 \Omega$ ;  $L = 0.5 \text{ H}$ ;  $E = -150 \text{ V}$

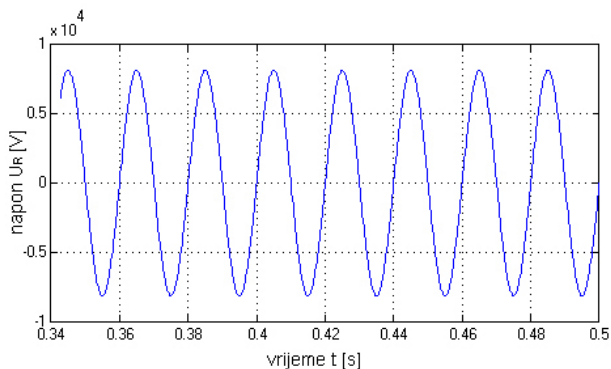
Simulacijski model date električne mreže u MATLAB-u prikazan je na slici 2. Simulacijom navedenog modela će se utvrditi valni oblik struje faze R na 10 kV naponskom nivou. Nakon izvršene simulacije valni oblik struje faze R na primarnoj strani transformatora prikazan je na slici 3. Valni oblik napona faze R i nultog provodnika prikazan je na slici 4.



Slika 2. Simulacijski model analiziranog dijela mreže

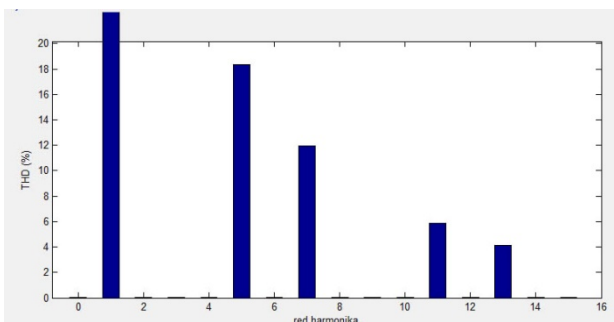


Slika 3. Valni oblik struje  $i_R$  na primarnoj strani transformatora



Slika 4. Valni oblik napona faze R i nultog vodiča na primarnoj strani transformatora

Harmonijski sadržaj struje  $i_R$  na primarnoj strani transformatora, prikazan je na slici 5.

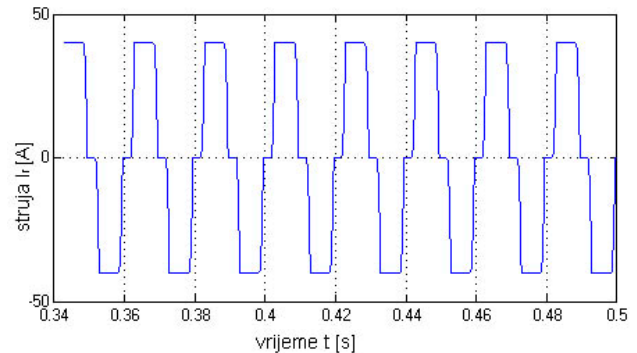


Slika 5. Harmonijski sadržaj struje  $i_R$  na primarnoj strani transformatora

Na osnovu vrijednosti dobivenih simulacijom izveden je proračun indikatora harmonijske distorzije struje na sljedeći način:

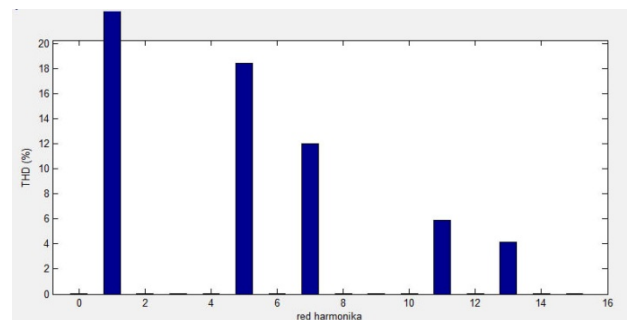
$$THDI_R = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \cdot 100\% = 23,25\% \quad (3)$$

Valni oblik struje faze r na sekundarnoj strani transformatora je prikazan sa slici 6.



Slika 6. Valni oblik struje  $i_r$  na sekundarnoj strani transformatora

Harmonijski sadržaj struje  $i_r$  na sekundarnoj strani transformatora, do 15-og harmonika, prikazan je na slici 7.

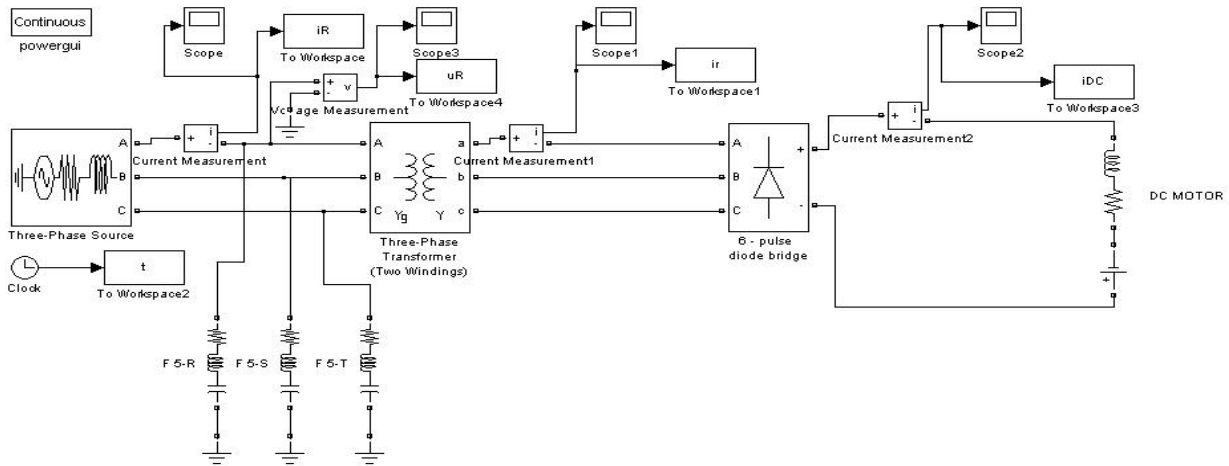


Slika 7. Harmonijski sadržaj struje  $i_r$  na sekundarnoj strani transformatora

### 4.2. Simulacijski model s jednim filtrom

Kako bi se pokazao efekt ublažavanja ili eliminiranja viših harmonika ugradnjom filtera, na istom simulacijskom modelu dimenzionirati će se jedan trofazni filter. Simulacijski model sa jednim filtrom prikazan je na slici 8.

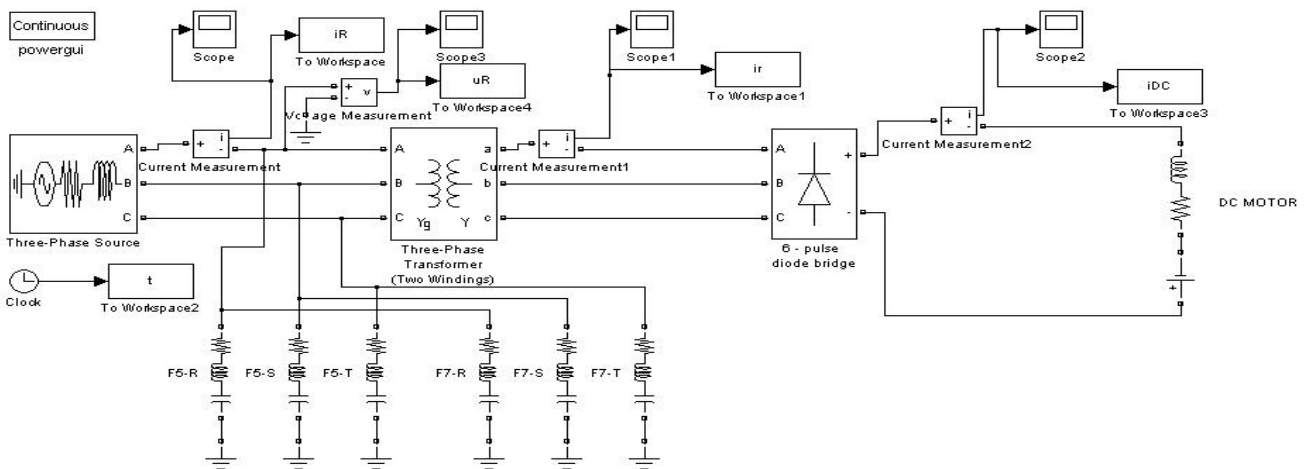
Harmonijski sadržaj struje faze R na primarnoj strani transformatora sa jednim filtrom, prikazan je na slici 11. Može se zaključiti da se sa ugradnjom jednog filtra postiglo eliminiranje petog, ali i sedmog harmonika struje  $i_R$ . Proračun TDHI u tom slučaju se izvodi na sljedeći način:



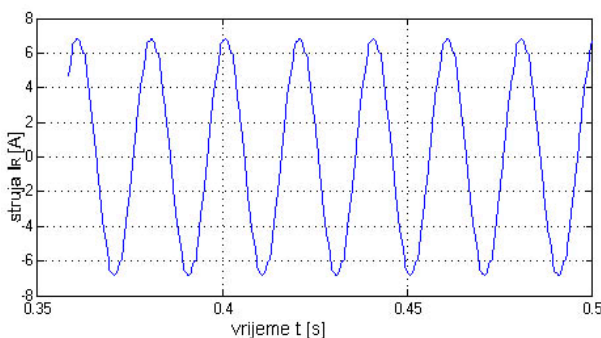
Slika 8. Simulacijski model analiziranog dijela mreže sa jednim trofaznim filtrom

Ugrađeni trofazni filter dimenzioniran je za eliminiranje maksimalne harmonijske komponentne struje faze R na 10 kV strani transformatora. Snimljeni valni oblik struje  $i_R$  na primarnoj strani transformatora, kada je ugrađen jedan trofazni filter, prikazan je na slici 10.

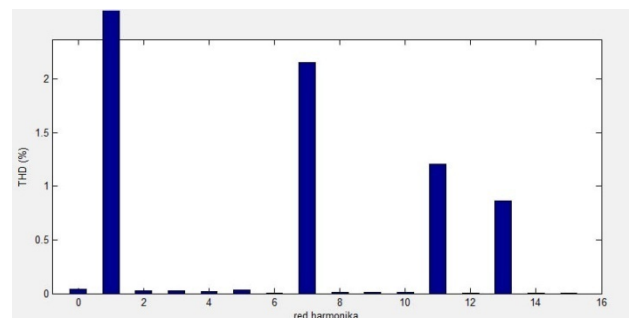
$$THDI_R = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \cdot 100\% = 2,70\% \quad (4)$$



Slika 9. Simulacijski model analiziranog dijela mreže sa dva trofazna filtera



Slika 10. Valni oblik struje  $i_R$  na primarnoj strani transformatora sa jednim trofaznim filtrom



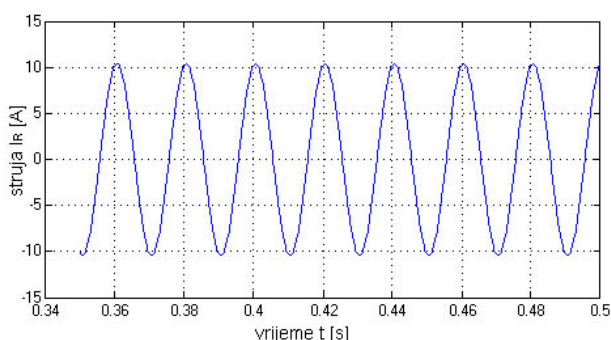
Slika 11. Harmonijski sadržaj struje  $i_R$  na primarnoj strani transformatora s jednim trofaznim filtrom

Rezultat THDI pokazuje da je harmonijska distorzija u velikom mjeri ublažena, odnosno skoro je eliminirana.

### 4.3. Simulacijski model s dva filtra

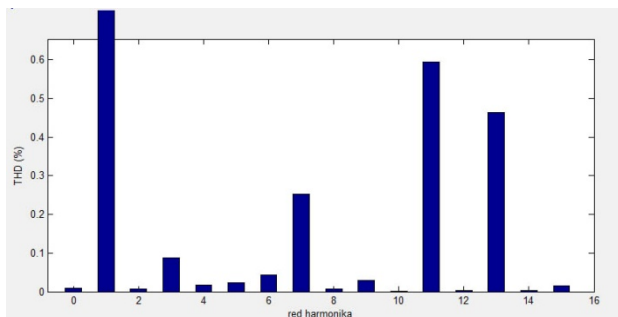
Dodatne mjere koje se mogu predložiti s ciljem reduciranja ukupne harmonijske distorzije, je dodavanje još jednog dodatnog trofaznog filtra. Dodatni trofazni filter veže se paralelno s prvim trofaznim filtrom i s njim se djeluje na sljedeći najveći harmonik struje faze R na primarnoj strani transformatora, što u ovom slučaju predstavlja djelovanje na sedmi harmonik. Simulacijski model s dva trofazna filtra prikazan je na slici 9.

Snimljeni valni oblik struje  $i_R$  na primarnoj strani transformatora, kada su ugrađena dva trofazna filtra, prikazan je na slici 12.



**Slika 12.** Valni oblik struje  $i_R$  na primarnoj strani transformatora sa dva trofazna filtra

Harmonijski sadržaj struje faze R na primarnoj strani transformatora s dva trofazna filtra, prikazan je na slici 13.



**Slika 13.** Harmonijski sadržaj struje  $i_R$  na primarnoj strani transformatora s dva trofazna filtra

U slučaju kada su ugrađena dva trofazna filtra proračunati THDI iznosi:

$$THDI_R = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \cdot 100\% = 0.88\% \quad (5)$$

Rezultat (5) pokazuje da je u ovom slučaju harmonijska distorzija još manja i gotovo eliminirana.

## 5. ZAKLJUČAK

Na osnovu izvršenih proračuna THDI struje  $i_R$  pri topologiji mreže bez filtra, s jednim filtrom kao i sa dva filtra, lako se vrši usporedba indikatora harmonijske distorzije:

- THDI  $i_R$  bez filtra iznosi 23,25 %
- THDI  $i_R$  sa jednim filtrom iznosi 2,70 %
- THDI  $i_R$  sa dva filtra iznosi 0.88 %

Može se zaključiti da se ugradnjom filtra THDI smanjuje, tj. s vrijednosti 23,23% smanjila se na 2,69% eliminacijom petog harmonika. Ugradnjom još jednog filtra THDI se još više popravio i smanjio se na 0.71% i vidi se da je u ovom slučaju harmonijska distorzija gotovo eliminirana.

Za ukupnu dužinu trajanja simulacije uzeto je vrijeme 0.5 sec. Harmonijske komponente struja su računane do 15-og harmonika i to u toku dvadesetpetog ciklusa.

## 6. LITERATURA

- [1] Katić, V.: "Kvalitet električne energije – viši harmonici", Monografija, Univerzitet u Novom Sadu - Fakultet tehničkih nauka, Edicija Tehničke nauke - Monografije, Br. 6, Novi Sad, 2002.
- [2] Ramirez, R.: "The FFT-Fundamentals and Concepts", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.
- [3] Katić, V.; Tokić, A.; Konjić, T.: Kvalitet električne energije, Novi Sad 2007
- [4] J.Arrillaga, D.Bradley, P.Bodger: "Power System Harmonics", John Wiley & Sons, Chichester, 1985.
- [5] Graovac, D.; Katić, V.; Rufer, A.: "Power Quality Compensation Using Universal Power Quality Conditioning System", IEEE Power Engineering Review, USA, Vol.20, No.12, Dec.2000, pp.58-60

Kontakt autora:

**mr. Midhat Umihanić, dipl.ing.el.**  
midhatu@live.com