

mr.sc.Dragan Mlakić,dipl.ing.el.  
JP Elektroprivreda HZ HB d.d. Mostar, DP Centar Novi Travnik  
[dragan.mlagic@ephzhh.ba](mailto:dragan.mlagic@ephzhh.ba)

Ilija Grgić,dipl.ing.el.  
JP Elektroprivreda HZ HB d.d. Mostar, DP Centar Novi Travnik  
[ilija.grgic@ephzhh.ba](mailto:ilija.grgic@ephzhh.ba)

Dragan Gudelj,dipl.ing.el.  
JP Elektroprivreda HZ HB d.d. Mostar, DP Centar Novi Travnik  
[dragan.gudelj@ephzhh.ba](mailto:dragan.gudelj@ephzhh.ba)

mr.sc.Bojan Jozipović,dipl.ing.el.  
JP Elektroprivreda HZ HB d.d. Mostar, DP Centar Novi Travnik  
[bojan.jozipovic@ephzhh.ba](mailto:bojan.jozipovic@ephzhh.ba)

## ANALIZA UTJECAJA FREKVENTNIH MODULATORA NA KVALITETU NAPONA U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI

### SAŽETAK

Kako potražnja za boljom energetsom učinkovitošću energije Elektro distribucijske mreže od strane potrošača, postaje sve veća, tako tehnička rješenja za to postaju sve više dostupnija. Shodno tome zadnjih nekoliko godina postali su dostupni razni frekventni modulatori, soft starteri, koji poboljšavaju iskorištenje distribucijske mreže, produžuju vijek trajanja eksploatirane opreme, smanjuju troškove održavanja što je na određeni vremenski period ekonomski isplativo, itd. Gledano iz perspektive elektro distributera, korisnosti tih uređaja u NN mreži mogu se također nabrojati. Dali je to slučaj i sa kvalitetom napona?

Referat se bavi utjecajem spomenutih uređaja na kvalitetu napona u distribucijskoj mreži sa naglaskom na mjerenje kvalitete el.en. po normi EN 50160. Također obrađuje analizu dobivenih mjerenja, aproksimacija utjecaja na el.distr. mrežu na vremenski period.

**Ključne riječi:** frekventni modulator, soft starter, kvaliteta napona, mjerenja, energetska učinkovitost.

## IMPACT ANALYSIS OF FREQUENCY MODULATOR ON THE VOLTAGE QUALITY IN DISTRIBUTION NETWORK

As demand for better energy efficiency in electric distribution network, by consumers, is becoming greater, so technical solutions become more accessible. Consequently the last few years are available various frequency modulators, soft starters, which improve the utilization of the distribution network, extend the life of the exploited equipment, reduce maintenance costs to a certain period of time, and so on. From the perspective of the company for distribution of electric energy, the usefulness of these devices in LV network can also be counted. Is that the case with the voltage quality?

The paper deals with the impact of these devices on the voltage quality in the distribution network with a focus on measuring the quality of electric energy. It also deals with the analysis of the measurements obtained, an approximation of the impact on el.distr. network over time.

**Key words:** frequency modulator, soft starter, voltage quality, metering, energy efficiency.

## 1. UVOD

Kvaliteta napona je veoma važna tema u Distribuciji električne energije pogotovo jer se na kvaliteti isporučenog proizvoda zasniva ugled na tržištu a samim time i cijena isporučenog proizvoda. Time kvaliteta napona dolazi u sami fokus pažnje distributera električne energije i kupca koji tu robu plaća. S obzirom na tu stavku, distribucija je donijela svoje standarde koji su vezani za europsku normu EN 50160 i time se uklopila u okvir standarda propisanih od strane Europskog komiteta za standarde u elektrotehnici (CENELEC). Električni potrošači koji najviše pridonose povećanju produktivnosti, po pravilu imaju najveći udio u pogoršanju kvalitete električne energije. Kako se tehnološka rješenja koja se koriste u raznim tehnološkim procesima, mijenjaju na sve sofisticiranije i preciznije uređaje za nadzor i upravljanje, tako njihov povratni utjecaj na izvore napajanja el. en. se također mijenja. U ovom referatu će biti prikazan utjecaj nekoliko takvih uređaja koji su prvenstveno napravljeni radi smanjenja angažirane snage, smanjenju habanja trofaznog motora, reguliranju negativnog utjecaja startanja motora na el.en. mrežu.

## 2. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Električna energija je komercijalni proizvod posebne vrste, koji zbog svoga značaja u životu suvremenog svijeta podliježe nekim normama, propisima, standardima, ili preporukama u pogledu kvaliteta, za čije poštovanje je zainteresirana i šira društvena zajednica [1] [2].

U tim propisima, standardima i aktima u pogledu kvaliteta el.en. se kvantitativno specificiraju pojedini pokazatelji kvaliteta i dozvoljeni opsezi njihove promjene.

Pojam "kvaliteta električne energije" ima više aspekata, kao što su:

- *Kvaliteta učestalosti*, koji je vezan za održavanje učestalosti na propisanoj vrijednosti. Kvaliteta učestalosti je mjera performansi elektroenergetskog sistema u odnosu na potrošače.
- *Kvaliteta napona*, čija je mjera odstupanje veličine napona i oblika naponskog talasa od idealnih referenci. On je, kao i kvaliteta učestalosti, mjera performansi elektroenergetskog sistema u odnosu na potrošače.
- *Kvaliteta struje*, koji je komplementaran pojmu kvaliteta napona i odnosi se na odstupanje talasa struje od idealne reference (koja je, kao i naponska referenca sinusoidna, konstantne amplitude i učestalosti i u fazi sa naponom). Kvaliteta struje karakterizira performanse potrošača u odnosu na sistem.
- *Kvaliteta snage (ili energije)*, koji je kombinacija kvaliteta napona i struje i karakterizira interakciju između sistema i potrošača (razlikovati tehničke pojmove "sistem", ili "proizvođač" – "potrošač", od komercijalnih "isporučilac", odnosno "prodavač" – "kupac").
- *Kvaliteta isporučioća* obuhvata sve tehničke i komercijalne aspekte kvaliteta učestalosti i napona, koji su od uticanja na kupca.
- *Kvaliteta potrošača*, koji obuhvata sve tehničke i komercijalne aspekte kvaliteta napona, struje i energije, od uticanja na isporučioća.

Pokazatelji kvaliteta isporuke električne energije potrošačima, koji su predmet normiranja i standardizacije, obično su vezani za dvije najvažnije promjenljive koje utječu na karakter rada svakog elektroenergetskog sustava, a to su učestalost i napon. Poželjno je da se te dvije varijable održavaju na konstantnim (nazivnim ili nominalnim) vrijednostima, koje osiguravaju zahtijevanu sigurnost i ekonomiju u eksploataciji. Međutim, mogu se pojaviti poremećaji tih varijabli u okolini njihovih referentnih vrijednosti, tako da permanentno i striktno održavanje tih varijabli na željenim konstantnim vrijednostima nije moguće, a nije ni neophodno. Zbog toga se kao blaži zahtjev u eksploataciji elektroenergetskih sistema postavlja uvjet da se one održavaju u nekim dozvoljenim granicama odstupanja oko te nominalne vrijednosti. Ovaj referat se bazira isključivo na povratnom utjecaju potrošača na distribucijsku mrežu. Znači da kvaliteta struje, kvaliteta snage i kvaliteta isporučioća neće biti direktno razmatrani. Razlog tome jeste da radi fokusiranja referata na sami frekventni modulator i njegov utjecaj na kvalitetu napona u distribucijskoj mreži nije potrebno razmatrati sve aspekte kvalitete el.en. U svrhu što jasnije analize referat je baziran na europskom standardu za kvalitetu električne energije EN 50160 [2].

## 2.1. Europska norma EN 50160

Europsku normu EN 50160 značajke napona u javnim distributivnim električnim mrežama izradio je CENELEC BTTF 60-6, fizikalne karakteristike električne energije Europskog odbora za normiranje u elektrotehnici (CLC) ju je ratificirao 5. srpnja 1994. kao EN 50160 [2].

Ova norma sadrži opis bitnih karakteristika opskrbnog napona na mjestu predaje potrošaču u javnim niskonaponskim i srednje naponskim električnim mrežama pri normalnim pogonskim uvjetima. Međutim, te karakteristike nisu predviđene za uporabu kao vrijednosti elektromagnetske kompatibilnosti ili kao granične vrijednosti koje se iz postrojenja po vodovima prenose u javne razdjelne mreže. Dakle, norma EN 50160 ima za cilj dati karakter značajkama napona napajanja u odnosu na valni oblik, visinu, frekvenciju i simetriju kod trofazne mreže na mjestu predaje potrošaču [3]. Cilj je postavljanje graničnih vrijednosti kod normalnih radnih uvjeta. U električnim niskonaponskim mrežama kvarovi postrojenja mogu dovesti do velikih smetnji. No kompletni ispad mreže ne može se smisleno opisati preko graničnih vrijednosti. Zbog toga nema smisla zadavati stvarne granične vrijednosti.

Norma postavlja fiksno one vrijednosti kao granične, koje ne smiju biti premašene 95% vremena monitoringa. Mjeri se, zavisno od mjerne veličine, 10 sek. ili 10 min. srednja vrijednost mjerene veličine. Dužina mjerenja obuhvaća jedan tjedan. Iz registriranih podataka se nakon završetka mjerenja određuje vjerojatnost pojavljivanja, i podaci se prikazuju u odgovarajućoj formi [4].

Međutim, norma ne vrijedi u izvanrednim situacijama kao što su nesvakidašnje vremenske prilike ili prirodne katastrofe, koje onemogućavaju utjecaj isporučitelju energije. Također, norma ne vrijedi u slučajevima, gdje postrojenje potrošača ne odgovara zadanim normama.

Temeljni parametri EN 50160 su: kolebanje napona, treperenje (Flicker): kratkoročno (Pst) i dugoročno (Plt), napon viših harmonika i međuharmonika, signalni napon, frekvencija opskrbnog napona, Nesimetričnost (asimetričnost) napona, naponski padovi i/ili udarna prijelazna stanja, prenaponi, prekidi u opskrbi el.en [1] [3] [4].

Tabela 1. Granične vrijednosti parametara napona prema normi EN 50160

Parametri	Vrijeme usrednjavanja	Granične vrijednosti tijekom 95% tjedna (160 sati)	Granične vrijednosti tijekom cijelog tjedna (100%= 168 sati)
Kolebanja napona	10 min	+/- 10%	
Treperenje (Flicker)	Pst – 10 min Plt – 120 min	Plt < 1	
Harmonici	10 min	Tabela do 40. harmonika	
THD	10 min	< 8%	
Signalni napon	3 s	< 5% od Un (1–10 kHz) u 99% od 24 sata (1 dan)	
Frekvencija	10 s	+/- 1%	+4% / -6%
Nesimetričnost	10 min	< 2%	
Naponski propad	10 ms	Definirano opisno	
Prekidi	10 ms	Definirano opisno	

Detaljnije objašnjenje EN 50160 nije detaljnije opisivano jer je mnogo puta u detalje objašnjeno u mnogobrojnim referatima ove tematike.

## 3. FREKVENTNI PRETVARAČI

Statički frekventni pretvarači su elektronski uređaji koji omogućavaju upravljanje brzinom trofaznih motora pretvarajući mrežni napon i frekvenciju, koji su fiksirane vrijednosti, u promjenljive veličine. Dok su principi ostajali isti, mnogo toga se promijenilo od pojave prvog frekventnog pretvarača, koji je sadržavao u sebi tiristore, do pojave današnjeg mikroprocesorski upravljanog pretvarača [5].

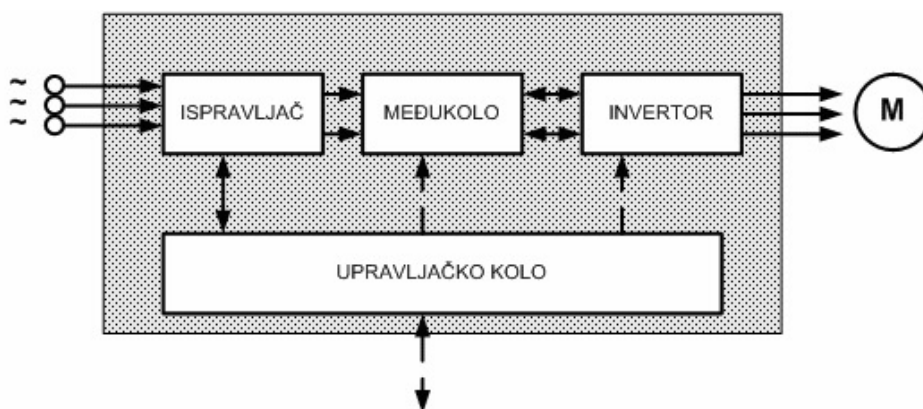
Zbog sve većeg učešća automatike u industriji, postoji konstantna potreba za automatskim upravljanjem, a neprekidno povećanje brzine proizvodnje i bolje metode za poboljšanje stepena korisnosti pogona se stalno razvijaju i unapređuju. Elektromotori su danas važan standardan industrijski proizvod. Sve dok se nisu pojavili frekventni regulatori nije bilo moguće u potpunosti upravljati brzinom trofaznog AC motora [5].

Elektromotori su danas važan standardan industrijski proizvod. Ovi motori su projektirani da rade sa konstantnom brzinom i tokom prošlih godina radilo se na optimizaciji kontrole njihove brzine. Sve dok se nisu pojavili frekventni pretvarači nije bilo moguće u potpunosti upravljati brzinom trofaznog AC motora. Većina statičkih frekventnih pretvarača koji se danas koriste u industriji za regulaciju ili upravljanje brzinom trofaznih motora su pravljeni na osnovu dva principa [5]:

1. frekventni pretvarači bez međukola (poznati kao direktni pretvarači),
2. frekventni pretvarači sa promenljivim ili konstantnim međukolom.

Frekventni pretvarači sa međukolom imaju ili strujno međukolo, ili naponsko međukolo i oni se nazivaju strujni invertori i naponski invertori. Shema takvog pretvarača je prikazana na slici 1. Invertori sa međukolom imaju određene prednosti u odnosu na direktne invertore, kao što su: bolje upravljanje strujom, redukciju viših harmonika, neograničenu izlaznu frekvenciju (ali ograničenje postoji u upravljanju korišćenju samih elektronskih komponenti. Frekventni pretvarači za visoke izlazne frekvencije su u najvećem broju slučajeva izvedeni sa međukolom). Direktni invertori su nešto jeftiniji od invertora sa međukolom, ali imaju tu manu da poseduju lošiju redukciju viših harmonika. Kako većina frekventnih pretvarača koristi jednosmerno (DC) naponsko međukolo.

Postoji mnoštvo naziva za ove uređaje u engleskoj terminologiji, kao što su Adjustable Speed Drives, Variable Frequency Drives (VFD), Inverter itd. Pored osnovne funkcije upravljanja brzinom AC motora, frekventni regulatori integiraju i brojne druge funkcionalnosti kao što su: zaštita motora, alarmiranje, procesno upravljanje u zatvorenoj petlji (na primjer održavanje konstantnog pritiska u cijevi), mogućnosti podešavanja brzine i kontrola rada putem raznih interfejsa (ručno preko tastera na samom regulatoru ili daljinski povezivanjem na komunikacione interfejse kao što su RS485 MODBUS, PROFIBUS, itd.).



Slika 1. Interna struktura frekventnog regulatora [5].

Ispravljač pretvara mrežni AC napon u pulsirajući DC napon. Međukolo stabilizira ovaj DC napon i stavlja ga na raspolaganje invertoru. Invertor generiše frekvenciju napona na motoru (DC napon ponovo pretvara u kontrolirani AC napon). Upravljačko kolo prima i šalje signale iz ispravljača, međukola i invertora. To je mikroprocesorski sistem koji na osnovu svojih algoritama upravljanja definira pobudu za motor kako bi se dobio željeni odziv [5].

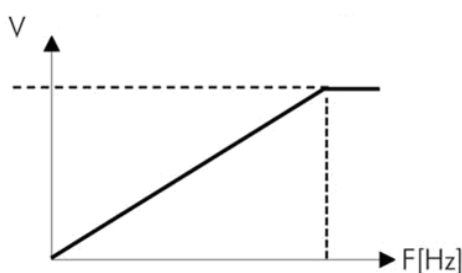
Pored pune kontrole brzine AC motora, korišćenje frekventnog regulatora nudi i brojne druge prednosti:

- Ušteda energije je pogotovo u današnje vreme jedan od prioriternih zahtjeva. Ovo se prije svega odnosi na pogone sa pumpama i ventilatorima, gdje je utrošak energije razmjeran trećem stupnju brzine. Na primjer, pogon koji radi sa polovinom brzine troši samo 12.5% nominalne snage.

- Podešavanje brzine u procesu proizvodnje pruža brojne prednosti u pogledu povećanja produktivnosti, smanjenja troškova održavanja, itd.
- Broj startanja i zaustavljanja mašine može se punom kontrolom brzine drastično smanjiti. Korištenjem laganog ubrzavanja i usporavanja, izbjegavaju se naprezanja i nagli udari u mašinskim sklopovima.
- Uz smanjenje troškova održavanja, poboljšava se radno okruženje.

Detaljnije objašnjenje korisnosti korištenja frekventnih regulatora nije navedeno.

Frekventni regulator kontrolira zajedno izlaznu frekvenciju i napon prema Slici 2, održavajući konstantan odnos napon/frekvencija (volt/hertz). Moment koji se stvara je direktno razmjernan ovom odnosu, što znači da je na svim brzinama (do nominalne brzine) moment konstantan i jednak je nominalnom momentu. Ovo znači da motor na svim brzinama može da isporuči pun moment. Regulator može da napaja motor i sa frekvencijama iznad nominalne (50 ili 60Hz), ali u tom slučaju nije moguće dalje povećavanje napona. U tom slučaju se moment smanjuje, pa postoji mogućnost da motor na većim brzinama ne može da isporuči dovoljan moment za pokretanje danog opterećenja [5].



Slika 2. Frekventni regulator kontrolira napon i frekvenciju zajedno.

Kako se može primijetiti iz navedenih specifikacija frekventnog regulatora, njegov doprinos prema potrošaču el.en. je ogroman. Zbog osobine modulacije frekvencije njegovo tehničko rješenje uključuje ispravljače i izmjenjivače sa upravljačkim elementima. Tim elementima se direktno utječe na kvalitetu napona na potrošaču. Samim time se nameće pitanje dali frekventni modulatori utječu povratno na izvor električnog napona? Dali je taj utjecaj pozitivan ili negativan, po pitanju kvalitete napona?

## 4. Mjerenje

Mjerenje kvalitete električne energije je urađeno prema standardima IEC 61000-4-30:2015 u skladu sa normom EN 50160. Praktično mjerenje je urađeno u dva (2) navrata na istom mjestu u TS 10/0,4 Plješevac, Kiseljak, Bosna i Hercegovina. TS Plješevac je napojena preko DV 10 kV Lepenica koji se veže za 110/35/10 kV Kiseljak. Mjerenje je izvršeno na NN, odmah iza obračunskog mjernog mjesta gdje je zajednička sabirnica svih trošila u postrojenju, kao što je prikazano na Slici 3 i Slici 4. Prvo mjerenje je izvršeno 20.03.2014.g. kada je postrojenje bilo u pogonu bez frekventnih modulatora na trofaznom motorima snage od 150 do 200 kW i trajalo je 6 dana, 23 sata i 11 minuta. Drugo mjerenje je izvršeno 10.06.2015.g. na istom mjernom mjestu nakon što su ugrađeni frekventni modulatori i trajalo je 7 dana, 7 sati i 15 minuta. Iako je period mjerenja manji u prvom terminu od drugog, podaci koji su prikupljeni dovoljni su da se provede analiza. Iako EN 50160 nalaže da se koristi 10 minuta kao uzorak za većinu veličina i 10 s kao uzorak za frekvenciju, uzeto je da je uzorak za ovo mjerenje 1 m. Uzorak od 1 minute je dovoljan da se detaljno može vidjeti promjena većine veličina kroz vrijeme, dok se frekvencija mjeri svakih 10 s sa agregacijom na mjerni interval koji je zadan. U slučaju potrebe za 10 minutnim srednjim mjerenjima iskoristi će se 1 minutna mjerenja za usrednjavanje na uzorak od 10 min.



Frekventni modulator koji je postavljen na trofazni motor snage 132 kW jeste Allen-Bradley SMC-Flex, sa kontrolorom čvrste veze (solid state controller), 480 A, 400 Hp. Sama pozicija modulatora u ormaru koji je ~20 m od NN razvodnog ormara i prije njega su postavljeni: SIEMENS VL 400 ručni prekidač i SIEMENS Sirius 3RT automatski prekidač sa pomoćnim kontaktima. Instalacija prikazana na slici 5. Iza modulatora je priključen trofazni, na udaljenosti ~10 m, motor snage 132 kW koji pokreće drobilicu kamena.



Slika 5. Konfiguracija instalacije Allen-Bradley modulatora i SIEMENS-ovih prekidača.

Tehničko postrojenje je sastavljeno od još 7 komada identičnih frekventnih modulatora ukupne snage oko 578 kW dok je ukupna snaga cijelog postrojenja oko 755 kW. Trošila koja su spojena preko modulatora su: mlin, mlin, drobilica, 2xvibro dodavač, 2xvibro dodavač, vibrirajući selektor i kasetni dodavač. Ostatak postrojenja koje nije napojeno preko frekventnih modulatora su: napajanje za komandnu sobu, 12 komada trakastih transportera, 4 komada sekundarnih sita, primarno sito, hidraulični agregat i 4 pomoćna ormara rasvjete. Dakle, 177 kW je napojeno bez frekventnih modulatora. Od termina prvog mjerenja do termina drugog mjerenja nije bilo dodavanje niti oduzimanja nekog od uređaja koji su spomenuti. Remonta i opravke jeste bilo ali to spada pod redovno održavanje tako da se ne može uzeti utjecaj održavanja opreme na analizu.

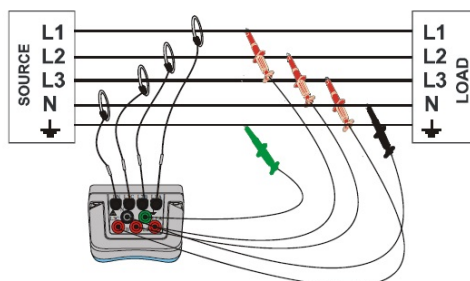
#### 4.1. Instrument za mjerenje

Za mjerenje kvalitete el.en. je korišten mrežni analizator METREL MI2592 PowerQ (slika 6)., te za analizu snimljenih podataka software METREL Power VieW 2.0. Mrežni analizator je univerzalan alat za analizu kvalitete električne energije, traženje električnih smetnji i optimizaciju električne mreže u niskonaponskim i srednje naponskim mrežama [6].



Slika 6. Mrežni analizator METREL MI2592.

Uređaj je postavljen da mjeri u sustavu 3-phase 4-wire što znači trofazni sustav napajanja sa 4 žičanim sustavom struja, tj. mjeri struju nultog vodiča, prikazanom na slici 7 [6].



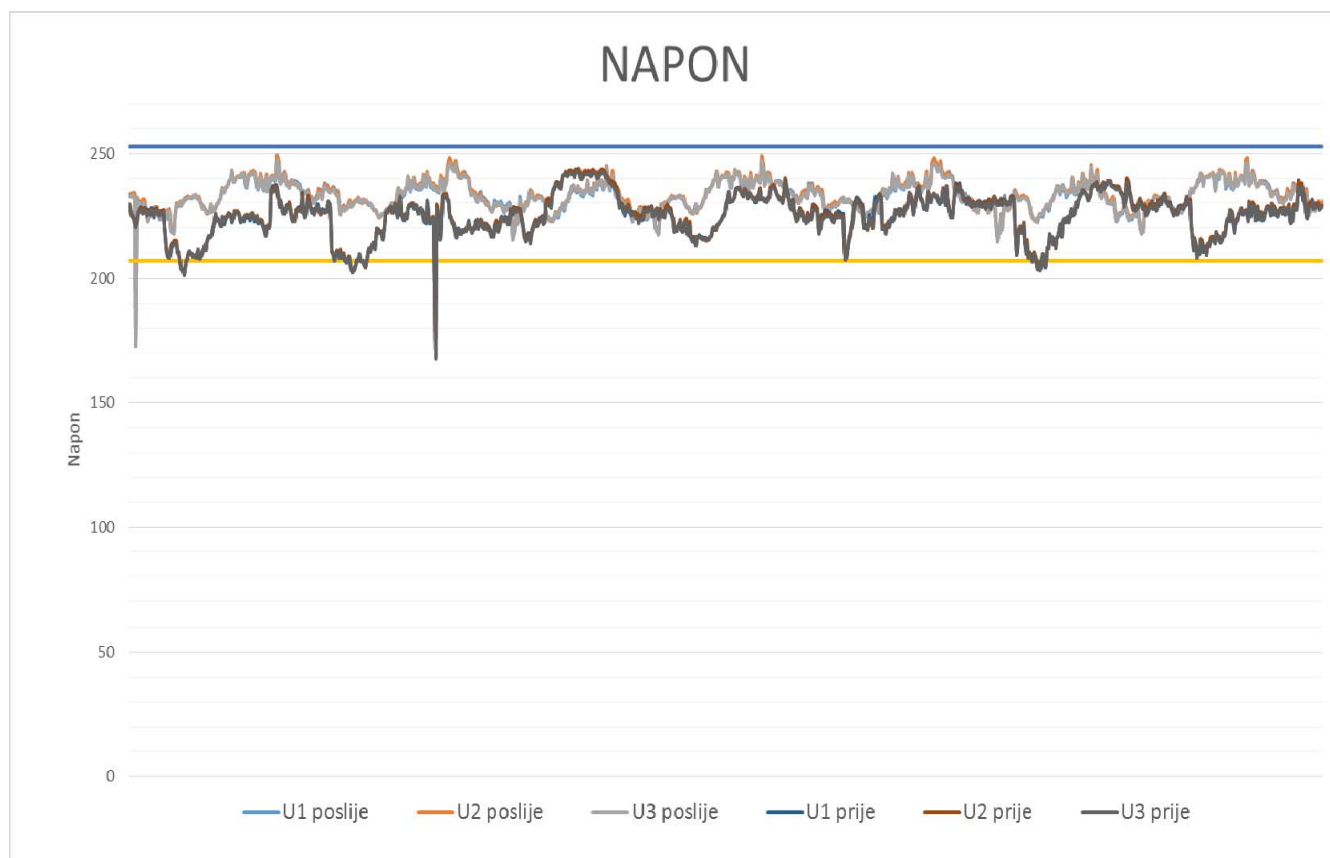
Slika 7. Shema spajanja MI2592 na trofaznu mrežu sa mjerenjem struje nultog vodiča (3-phase 4-wire).



## 5. ANALIZA IZMJERENIH PODATAKA

Analiza izmjerenih podataka je obavljena u skladu sa normom EN 50160 za svaku razmatranu naponsku veličinu.

### 5.1. Varijacije napona (kolebanja napona)



Slika 8. Kolebanje napona.

Tabela 2. Analiza napona u mjernom periodu.

	Poslije			Prije		
min	173V	173V	173V	168V	169V	168V
avg	233V	233V	233V	225V	225V	225V
max	249V	249V	248V	244V	244V	243V
veće od Un+10%	0%	ZADOVOLJAVA		0%	NE ZADOVOLJAVA	
manje od Un-10%	1%			26,07%		

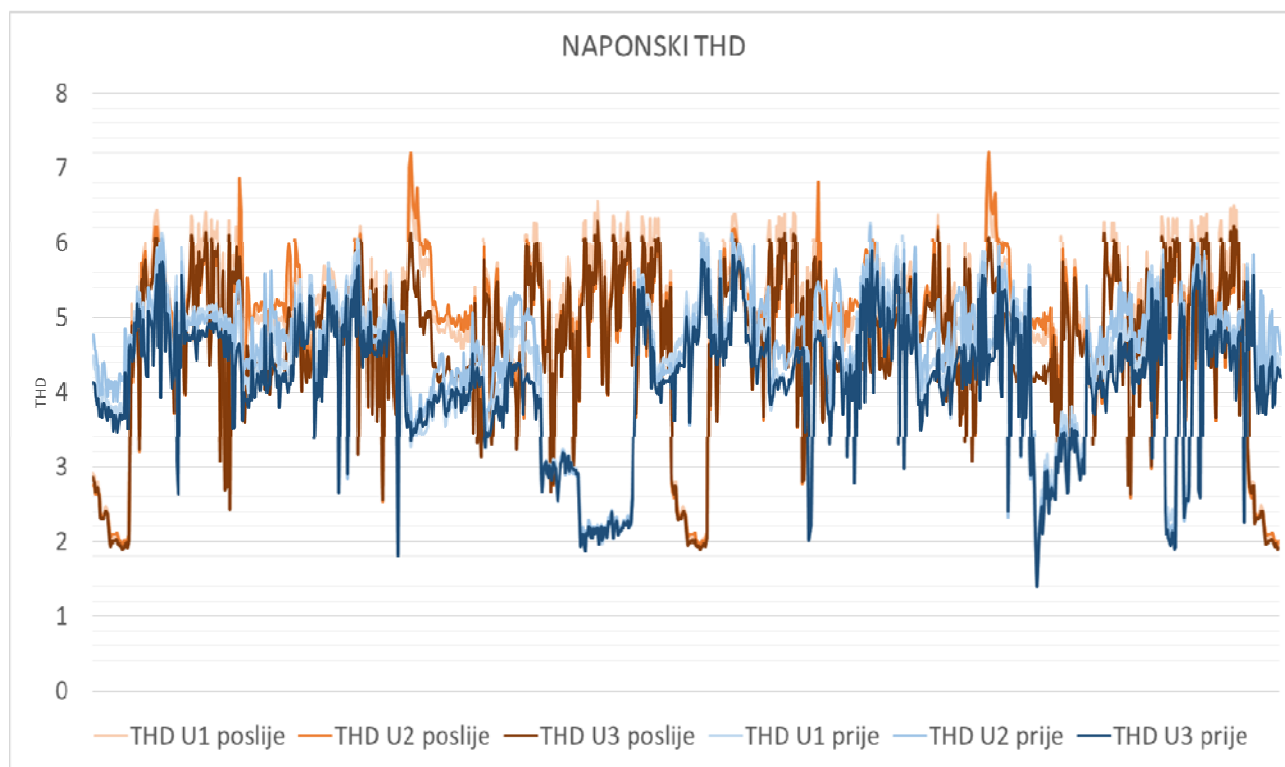
Slika 8 prikazuje efektivne vrijednosti napona usrednjene na 10-min segmentu.

Žuta linija pokazuje donju ( $U_n-10\%$ ) i plava linija pokazuje ( $U_n+10\%$ ) graničnu vrijednost napona po standardu BAS EN 50160. Norma zahtijeva da 95% efektivnih vrijednosti, koje su usrednjene na 10

minutnom intervalu vremena, ostanu u granicama  $U_n \pm 10\%$ , a da svih 100% usrednjenih efektivnih vrijednosti napona ostanu u granicama  $U_n - 15\%$  do  $U_n + 10\%$ .

Sa slike vidimo da prekoračenja prije i poslije nema tako da je taj aspekt kolebanja napona zadovoljen. To se ne može reći za pod napon prije ugradnje modulatora jer je prosjek za pod napon 26,07 % što je veće od propisanih 5%. Kako nije bilo dodatnih promjena u strukturi tehnološkog postrojenja onda je uzrok poboljšanja negdje u promjeni ponašanja postrojenja. Daljnjim istraživanjem se zaključilo da je poboljšanje samo napon na transformatoru dizanjem naponske štupe, time je podignut cijeli napon za 5 V. uzimajući ovu tezu u obzir može se reći da je modulator neutralan po pitanju kolebanja napona.

## 5.2. Faktor harmonijskog izobličenja napona (THD)



Slika 9. Naponski THD po fazama i usporedo prije i poslije modulatora.

Tabela 3. Analiza THD po fazama prije i poslije.

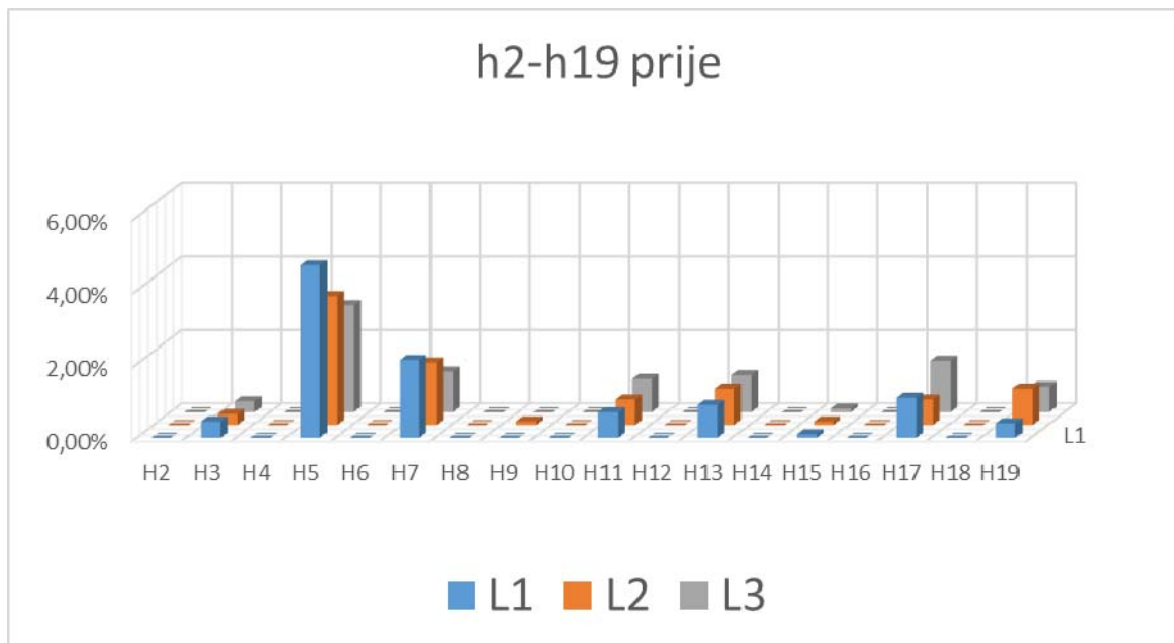
	Poslije			Prije		
	U1	U2	U3	U1	U2	U3
min	1,92%	1,95%	1,89%	1,51%	1,43%	1,40%
avg	4,90%	4,81%	4,61%	4,36%	4,44%	4,15%
max	6,88%	7,21%	6,28%	6,26%	6,22%	5,90%
	ZADOVOLJAVA			ZADOVOLJAVA		

Slika 9 prikazuje vrijednosti THD-a napona tokom mjernog perioda. Pri izračunu THD-a napona u obzir su uzeti svi harmonici, zaključno sa 19-tim. Vrijednosti su svedene na procenete od  $U_n$  (u skladu sa EN 50160).

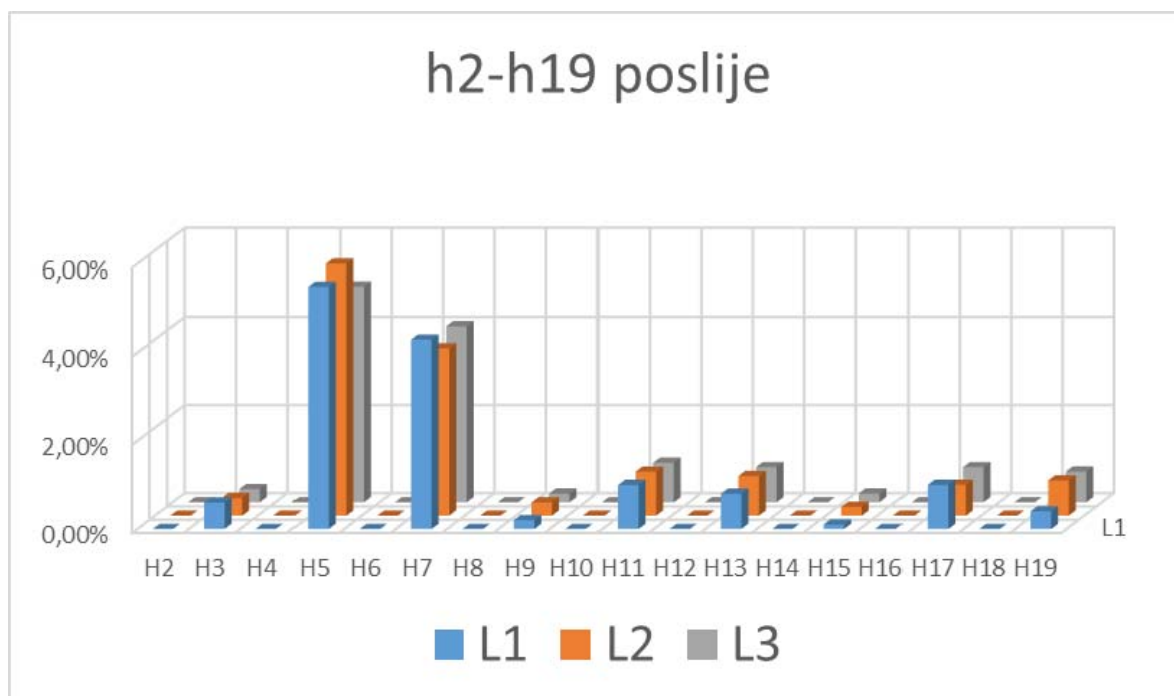
Sa slike se vidi da vrijednosti THD-a tokom prvog mjernog perioda imaju raznolike vrijednosti. Vrijednosti THD-a se kreću u opsegu od 1,40% do 7,21%, odnosno nikad ne prekoračuju graničnu vrijednost od 8%, čime ostaju unutar graničnih vrijednosti BAS EN 50160.

Kako se vidi iz tabele 3 i slike 9, ukupno harmonijsko izobličenje je promijenjeno nakon ugradnje frekventnog modulatora. Uzimajući činjenicu da tehnološko postrojenje nepromijenjeno između dva mjerenja, može se reći da je frekventni modulator imao utjecaja na pogoršanje stanja što se tiče THD-a.

#### 5.2.1. Učešće viših harmonika



Slika 10. Učešće viših naponskih harmonika po fazama prije ugradnje modulatora.



Slika 11. Učešće viših harmonika po fazama poslije ugradnje modulatora.

Tabela 4. Analiza udjela viših naponskih harmonika prije i poslije.

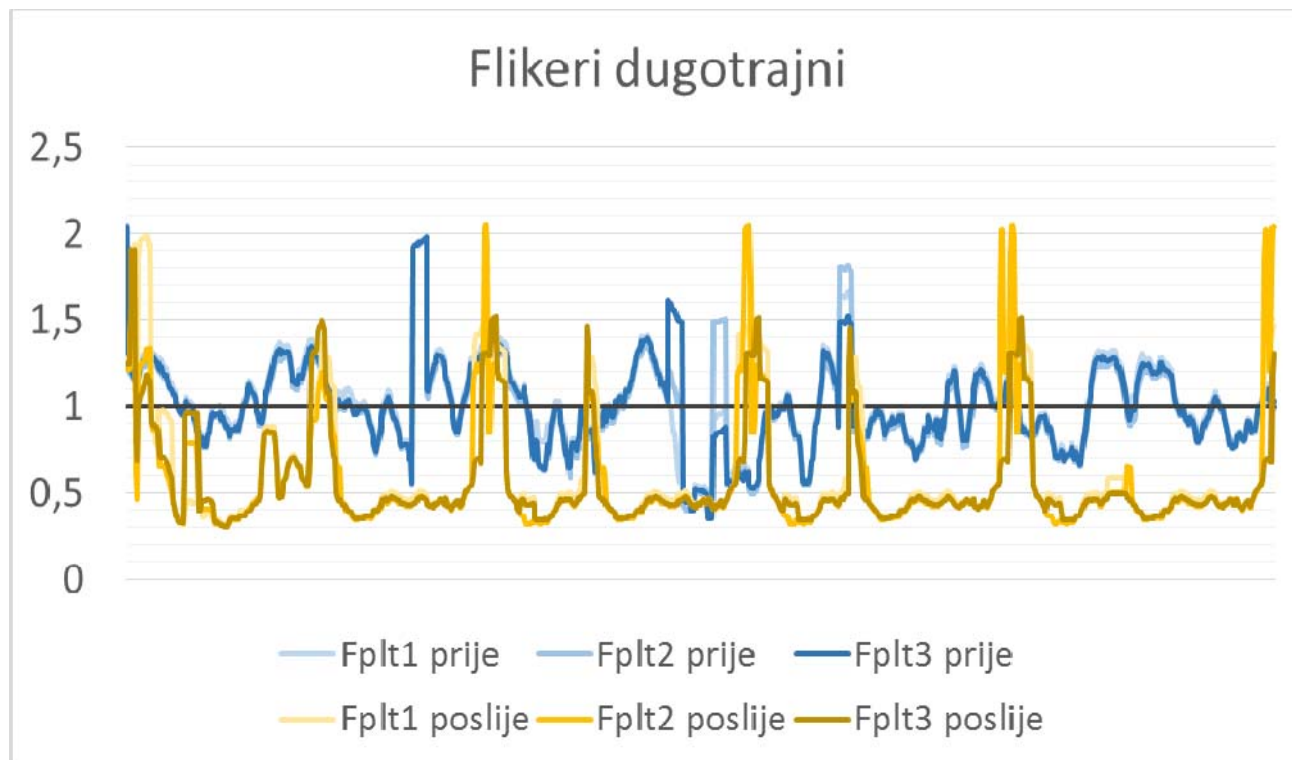
Neparni viši harmonici										Parni viši harmonici					
koji nisu djeljivi sa tri					koji su djeljivi sa tri										
R.br.h.	Uh (%)		Zadovoljen		R.br.h.	Uh (%)		Zadovoljen		R.br.h.	Uh (%)		Zadovoljen		
	prije	poslije	standard			prije	poslije	standard			prije	poslije	standard		
5	3,70	5,37	<6,0	DA	3	0,35	0,43	<5,0	DA	2	0,00	0,00	<2,0	DA	
7	1,64	4,03	<5,0	DA	9	0,03	0,23	<1,5	DA	4	0,00	0,00	<1,0	DA	
11	0,77	0,97	<3,5	DA	15	0,10	0,17	<0,5	DA	6	0,00	0,00	<0,5	DA	
13	0,97	0,83	<3,0	DA						8	0,00	0,00	<0,5	DA	
17	1,07	0,83	<2,0	DA						10	0,00	0,00	<0,5	DA	
19	0,70	0,63	<1,5	DA						12	0,00	0,00	<0,5	DA	
										14	0,00	0,00	<0,5	DA	
										16	0,00	0,00	<0,5	DA	
										18	0,00	0,00	<0,5	DA	

Slika 10. i slika 11. prikazuje vrijednosti harmonika napona svedene na procenat osnovnog harmonika napona (sukladno EN 50160). Sa slike su vidi izraženo prisustvo neparnih harmonika, što u ukupnom zbiru čini 4,32% od osnovnog u prvom mjerenju a 4,77% u drugom mjerenju, a ukupan zbir svih parnih harmonika iznosi 0,00% od osnovnog, čime je ukupan THD 0,00% osnovnog harmonika. Iz tabele 4 se vidi da je uvjet za svaki harmonik zadovoljen.

Isti zaključak se odnosi na ovu analizu kao za THD: harmonijski modulator utječe na intenzivnije pojavljivanje pojedinih harmonika, neparnih u ovom slučaju.

### 5.3. Treperenje (fliker)

#### 5.3.1. Dugotrajni



Slika 12. Poređenje treperenja napona po fazama prije i poslije ugradnje modulatora.

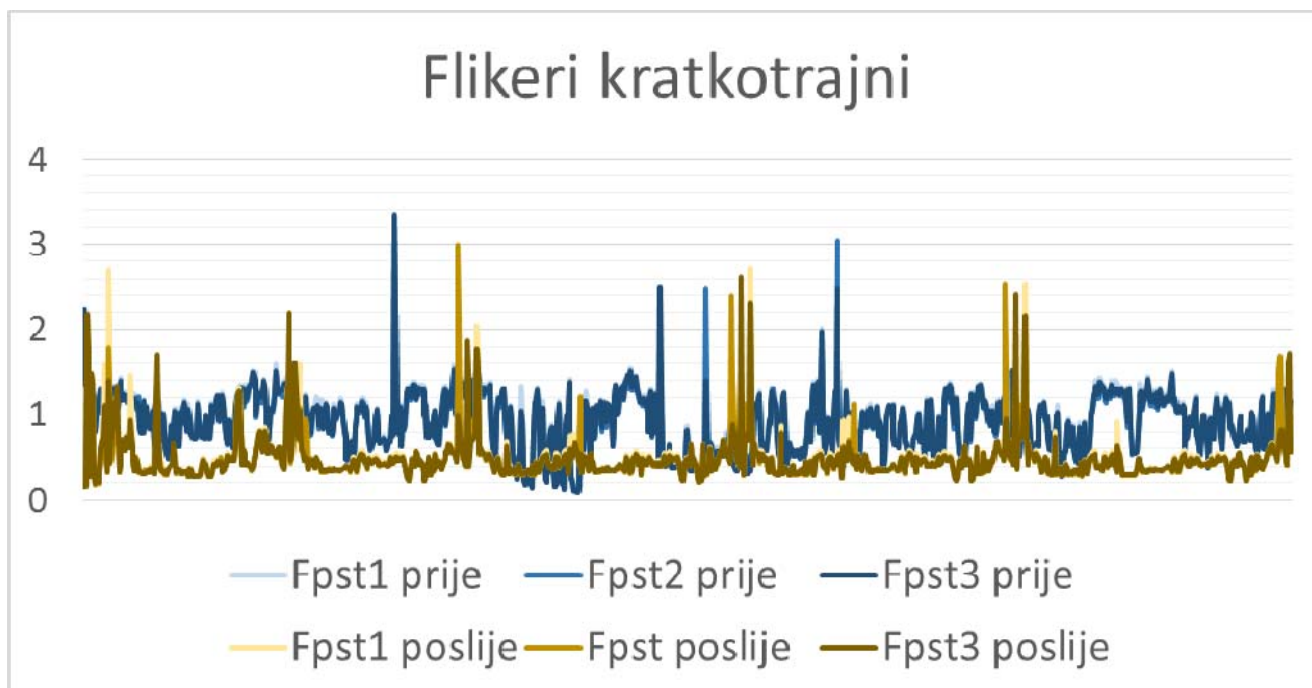
Tabela 5. Analiza udjela flikera u mjernom periodu.

	Prije	Poslije
veće od 1 u mjernom periodu	513	141
udio u mjernom periodu	51,45%	14,14%

Sa slike 12 se vidi da dolazi do prekoračenja granične vrijednosti dugotrajnog flikera Plt prema EN 50160. Dolazi do pojava dugotrajnih flikera čija je vrijednost preko 1 u sve tri faze u oba mjerna navrata.

Standard BAS EN 50160 nalaže da 95% vrijednosti dugotrajnih flikera ne prelaze vrijednost 1. Budući da se dugotrajni fliker računa na intervalu od 2 sata, u jednoj sedmici imamo 84 vrijednosti flikera. Dakle, da bi standard bio zadovoljen potrebno je da broj prekoračenja granične vrijednosti ne prelazi broj pet. Slike 12 i Tabele 5 se zaključuje da norma EN 50160 nije zadovoljena. Iako norma nije zadovoljena ipak je primjetno poboljšanje prisustva treperenja nakon ugradnje frekventnog modulatora.

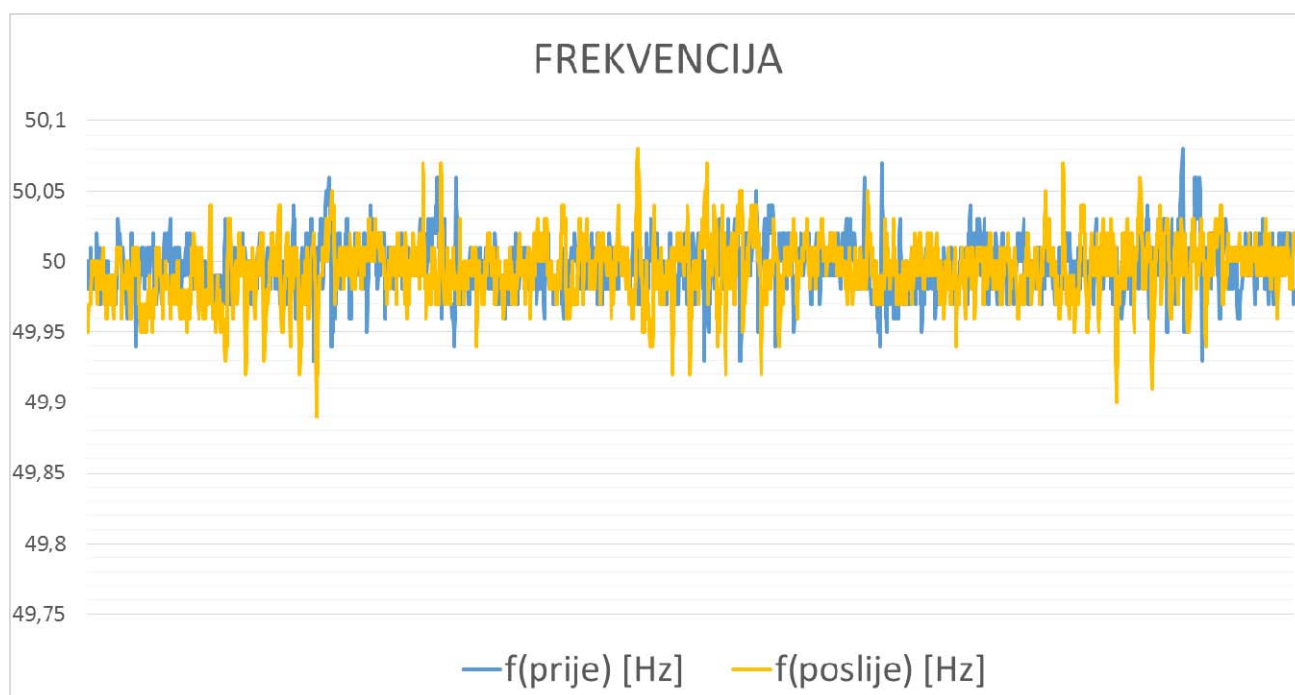
### 5.3.2. Kratkotrajni



Slika 13. Treperenje napona na sve tri faze prije i poslije modulatora.

Standardi koji vrijede za kratkotrajno treperenje nisu navedena osim da se mjeri unutar uzorka od 10 minuta. Kako možemo vidjeti sa slike 13 velika je prisutnost kratkotrajnog treperenja što nije dobar pokazatelj za predviđanje dugotrajnog treperenja. Iako ova veličina nije obuhvaćena sa EN 50160 ipak se primjeti sa slike 13 da je pojava kratkotrajnih flikera mnogo izraženija prije nego nakon ugradnje frekventog modulatora.

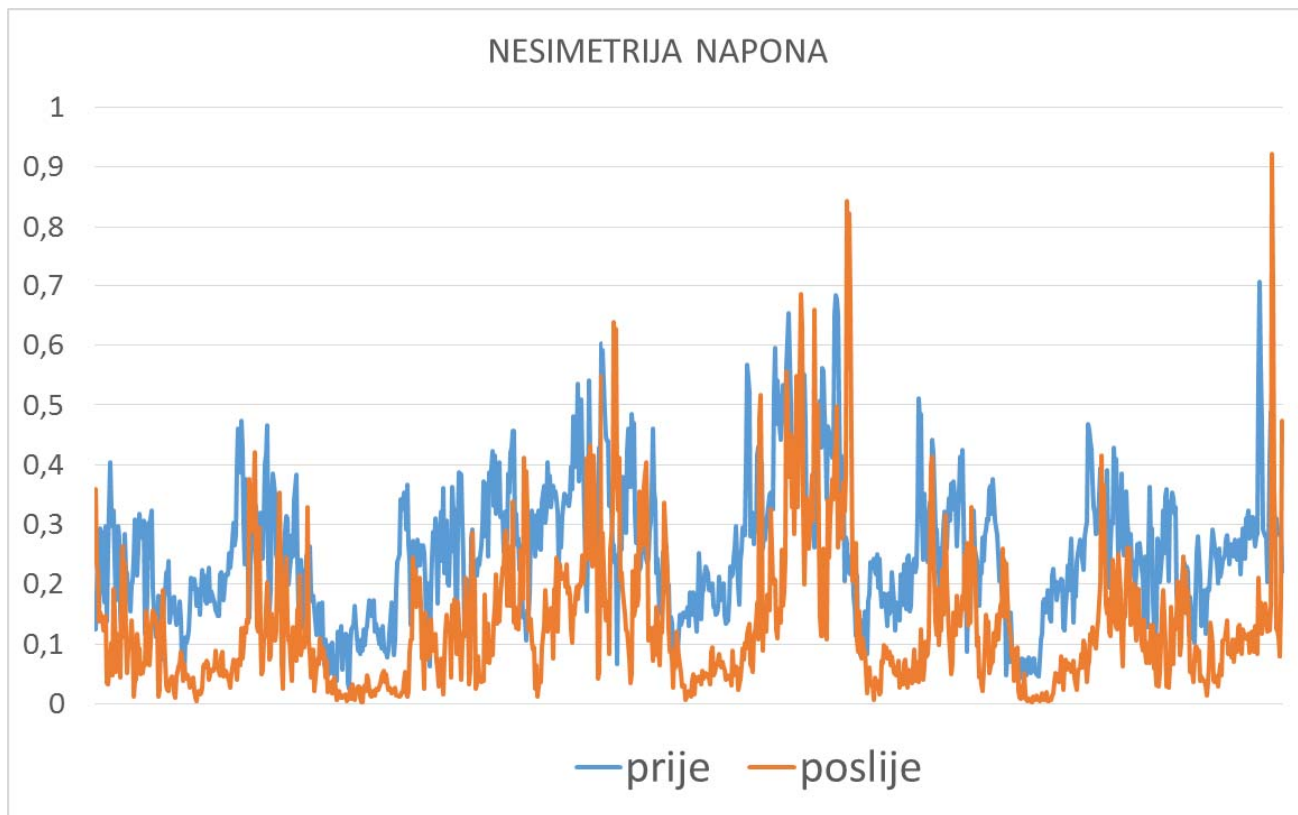
#### 5.4. Frekvencija napojnog napona



Slika 14. Frekvencija prije i poslije modulatora.

Sa slike 14 se vidi da sve 10-sekundne usrednjene vrijednosti ostaju unutar granica 50 Hz  $\pm$  1%, tj. u granicama 49,5 Hz do 50,5 Hz.

### 5.5. Nesimetričnost napona napajanja



Slika 15. Nesimetrija napojnog napona prije i poslije modulatora.

Kao što se vidi nigdje na slici 15 vrijednost nesimetrije ne prelazi vrijednost od 2%  $U_n$ . Primjetno je da je nesimetrija osjetno manje prisutna nakon ugradnje frekventnog modulatora iako ga se ne može dovesti direktno u vezu sa tom veličinom kvalitete napona. Frekventni modulatori imaju ugrađenu zaštitu od nesimetrije napojnog napona pa ako ne ispravljaju nesimetriju onda je ne uzrokuju jer čim bi se pojavila iznad 25%  $U_n$  ,Allen-Bradley SMC-Flex bi automatski isključio motor sa mreže.



## 5.6. Naponski propadi, prenaponi i prekidi napajanja

Prema najnovijoj verziji standarda EN 50160:2011, treće izdanje od travnja 2011. godine u niskonaponskim mrežama naponski propadi (dips) i prilivi (swells) se klasificiraju prema sljedećoj kvalifikacionoj tabeli.

Na osnovu podataka dobivenih mjerenjem, tabela ima sljedeći izgled:

Tabela 6. Klasifikacija naponskih propada prema iznosu preostalog napona i trajanju.

Propadi (%)	Trajanje t (ms)				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1000$	$1000 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60000$
$90 > u \geq 80$	20	9	13	31	60
$80 > u \geq 70$	10	3	1	17	10
$70 > u \geq 60$	0	0	0	0	0
$60 > u \geq 50$	0	0	0	0	0
$50 > u$	0	0	0	0	0

Tabela 7. Klasifikacija naponskih priliva prema iznosu preostalog napona i trajanju.

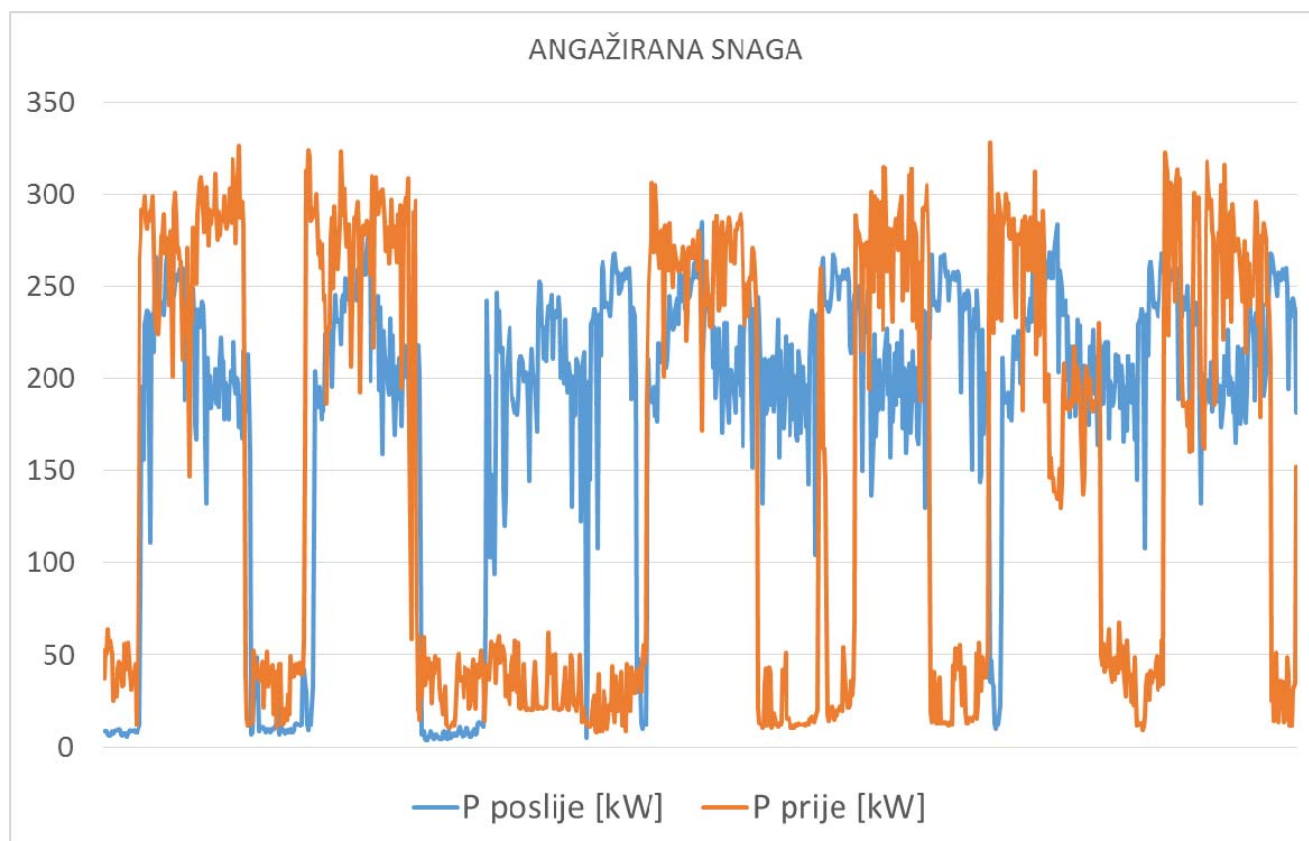
Prilivi (%)	Trajanje t (ms)				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1000$	$1000 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60000$
$110 < u < 120$	0	0	0	0	0
$120 < u < 130$	0	0	0	0	0
$130 < u < 140$	0	0	0	0	0
$140 < u < 150$	0	0	0	0	0
$150 < u$	0	0	0	0	0

Standardom BAS EN 50160 nije određen granični broj propada napona tokom određenog perioda. To je predmet dogovora (ugovora) između kupca i isporučioća električne energije. Tokom mjerenja nisu zabilježeni prenaponi u smislu, kako ih definira standard BAS EN 50160. Tokom mjerenja nisu zabilježeni prekidi napajanja u smislu, kako ih definira standard BAS EN 50160. Na ovaj atribut kvalitete napojnog napona frekventni modulator ne može direktno utjecati osim ako nije u kvaru pa ga zaštita u razvodnom ormaru izbacuje svaki put kada se uključi na napon sa kvarom. U ovom slučaju te situacije nije bilo.

## 5.7. Naponski tranzijenti

Standard EN 50160 preporučuje da se broj tranzijenata daje informativno. Tokom mjernog perioda bez priključenog modulatora je registriran 441 naponskih tranzijent. Sa frekventnim modulatorom je zabilježeno 301 naponski tranzijent. Jasno se primjeti da je udar na mrežu nakon ugradnje frekventnog modulatora mnogo manji u smislu promjene uklopnog stanja NN mreže tehnološkog postrojenja. Sama funkcija modulatora jeste da „pegla“ tranzijentne pojave i time smanji maksimalnu angažiranu snagu motora. Ovom svojom funkcijom modulator direktno utječe na naponske tranzijente koji su uzrok prelaska iz jednog stanja mreže u drugo. Na konto većeg vremena potrebnog za promjenu sklopnog stanja štedi angažiranu snagu i shodno time promjenu napona.

## 5.8. Angažirana snaga



Slika 16. Angažirana snaga prije i poslije modulatora.

Tabela 8. Analiza angažirane snage.

	Poslije	Prije
min	3,45 kW	7,56 kW
avg	184,86 kW	150,90 kW
max	284,64 kW	328,26 kW

Na slici 16 i tabeli 8 se vidi da je situacija nakon ugradnje frekventnog modulatora mnogo povoljnija za potrošača gledano sa ekonomskog aspekta. Ako uzmemo u obzir da je ugradnja modulatora snizila angažiranu snagu motora za 43,62 kW. Iako je prosječna angažirana snaga veća nakon ugradnje modulatora za 33,96 kW. Ako se izračuna po aktualnim cijenama angažirane snage i cijenama ugrošene energije vodi se da je ušteda na snazi valjan razlog investicije u frekventni modulator.

## 6. ZAKLJUČAK

U referatu se navodi utjecaj uređaja za promjenu/prilagodbu frekvencije napojnog napona prema potrošaču. Glavna uloga modulatora jeste da ublaži udar starta na motor, angažirane snage na izvor napona. Ne ulazeći u detaljniju analizu iz navedenog se vide višestruke koristi. Analizom mjerenih rezultata se zaključuje da frekventni modulator ima utjecaja na kvalitetu napona na NN mreži sa koje se napaja. Taj utjecaj je ograničen na frekventne tipove kvalitete napona: harmonike. U konkretnom slučaju utjecaj na povišenje harmonika nije kritično da bi se prekoračio maksimum propisan EN 50160, ali činjenica da ima utjecaja ostavlja na razmatranje kvantifikacije udjela snage frekventnog modulatora na povišenje naponskih harmonika. Ostale analizirane veličine zabilježile su poboljšanje kvalitete poslije u odnosu na prije ugradnje modulatora. Iako se neke od njih ne mogu dovesti direktno u vezu sa djelovanjem modulatora tu se također ostavlja prostora za daljnje istraživanje.

## 7. LITERATURA

- [1] Zvonimir Klaić, dipl. ing., prof. dr. sc. Srete Nikolovski, dipl. ing. Elektrotehnički fakultet, Osijek, „KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE – MJERENJA PREMA NORMI EN 50160“, ŠESTO SAVJETOVANJE CAVTAT, 09. - 13. studenoga 2003.
- [2] Henryk Markiewicz & Antoni Klajn, Wroclaw University of Technology, „Voltage Disturbances Standard EN 50160 - Voltage Characteristics in Public Distribution Systems“, July 2004.
- [3] Sjef Cobben, University of Technology, Eindhoven, Netherlands, Power Quality Monitoring and Classification“, April 211.
- [4] Goran Šagovac, dipl. ing., HEP-ODS d.o.o. Elektra Zagreb, „KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE KAO KARAKTERISTIKA DISTRIBUCIJSKE MREŽE“, HO CIREN, 1. savjetovanje Šibenik, 18. - 21. svibnja 2008
- [5] Skripta „Automatika u energetici“ sa katedre „Katedre za automatiku i upravljanje procesima“, Fakultet Tehničkih Nauka u Novom Sadu, 2009.g.
- [6] „PowerQ4 MI 2592 Instruction manual Version 1.2“, METREL d.d. Ljubljanska cesta 77 1354 Horjul, Slovenia.