

Mate Lasić
KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d., Zagreb
mate.lasic@koncar-institut.hr

Jandro Šimić
KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d., Zagreb
jandro.simic@koncar-institut.hr

Ana Tomasović
KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d., Zagreb
ana.tomasovic@koncar-institut.hr

Dražen Barukčić
KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d., Zagreb
drazen.barukcic@koncar-institut.hr

PRORAČUN VIŠIH HARMONIKA NAPONA ZA POGON NAPAJANJA ISPITNE STANICE

SAŽETAK

U sklopu lokacije Končar – Jankomir se nalazi tvornica za proizvodnju energetskih transformatora velikih snaga "Končar – Energetski transformatori d.o.o.". Završni proces izrade transformatora obuhvaća i ispitivanje novonastalih proizvoda (npr. pokusi kratkog spoja i praznog hoda transformatora itd.). Za takve vrste ispitivanja je potrebno imati poseban pogon napajanja sa mogućnošću regulacije iznosa napona, jer iznos napona iz okolne distribucijske elektroenergetske mreže nije prikladan za takva ispitivanja. Prije nekoliko godina tvornica je krenula u modernizaciju cjelokupne opreme. U sklopu modernizacije pogona tvornice obavit će se i dogradnja novog pogona napajanja ispitne stanice.

Lokacija Končar – Jankomir se napaja iz distribucijske mreže Elektre Zagreb. Mjesto priključka je 20 kV rasklopište oznake 2TS 2216, koje je 20 kV kabelom oznake KV 3040 (tip kabela XHPE 185 mm², duljine oko 3 km) spojeno izravno na 20 kV sabirnice u 110/20 kV transformatorskoj stanici 4TS 17 Podsused (standardno uklopno stanje). Novi pogon napajanja ispitne stanice tvornice "Končar – Energetski transformatori d.o.o." će također biti spojen na 20 kV naponsku razinu u rasklopištu 2TS 2216. Sastoje se od dvije grupe agregata (motor-generator): A4 (pogonski motor nazivne snage 5 MW) i A5 (pogonski motor nazivne snage 1,5 MW), koje će preko dva zasebna 12-pulsna energetska pretvarača i pripadnih transformatora (20/4, 16 kV) biti spojene na mrežu.

Energetski pretvarači imaju nelinearnu U-I karakteristiku pa svojim radom u mrežu injektiraju više harmonijske članove struje. Prema Mrežnim pravilima elektroenergetskog sustava (NN 36/06), prije priključka nelinearnih trošila većih nazivnih snaga (ukoliko vrijedi $S_K < 1000 \cdot S_P$, gdje je S_P priključna snaga, a S_K snaga kratkog spoja na mjestu priključka na elektroenergetsku mrežu), potrebno je provesti proračun viših harmonika napona. Proračunom je potrebno dokazati da razina povratnog djelovanja na mrežu neće uzrokovati prekoračenje planirane razine izobličenja valnog oblika napona. U okviru ovog rada bit će provedeni proračuni viših harmonika napona, koji će biti uzrokovani radom novog pogona napajanja ispitne stanice tvornice "Končar – Energetski transformatori d.o.o.". Proračunom dobiveni rezultati bit će uspoređeni s dozvoljenim granicama razinama prema Mrežnim pravilima elektroenergetskog sustava i preporukama prema tehničkom izvještaju IEC 61000-3-6:2008 Ed 2.0 "Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems".

Ključne riječi: ispitna stanica, energetski pretvarač, nelinearna U-I karakteristika, viši harmonici napona, proračun

CALCULATION OF VOLTAGE HARMONICS FOR POWER SUPPLY OF TESTING FACILITY

SUMMARY

Koncar - Power Transformers Ltd. is a power transformer production factory located in Koncar Jankomir complex. Final process in completion of production of power transformers includes testing of final products (short

circuit tests, empty load tests, ect.). For that kind of testing there is a need for a special kind of power facility with possibility of voltage level regulation, because voltage level from distribution power system that supplies location is not suitable for that kind of testing. Few years ago the factory was in process of modernization of entire equipment. As a part of modernization a new part of voltage supply in testing facility will be added on.

Power supply for Koncar Jankomir location is delivered by "Elektra Zagreb". Point of connection of Koncar – Jankomir to distribution power system is 20 kV switching facility 2TS 2216, that is with 20 kV cable KV 3040 (type: XHPE 185 mm², about 3 km long) connected directly to 20 kV bus in 110/20 kV substation 4TS 17 Podsused (usual operating condition). New power supply for testing facility for Koncar – Power Transformers Ltd. factory will also be connected to 20 kV voltage level in 2TS 2216. It will consist of two power units (engine + generator): A4 (engine with rated power of 5 MW) and A5 (engine with rated power of 1,5 MW), which will be connected to power system through two separate 12 – pulse power converters and corresponding transformers (20/4, 16 kV).

Power electronic devices inject harmonic currents in power system, as a result of their non-linear U-I characteristic. According to Mrežna pravila EES-a (NN 36/06), before connecting non-linear loads of larger rated power (if $S_k < 1000 \cdot S_p$, where S_p is rated power of connected load and S_k is the short circuit power at the point of connection to the power system), there is a need to perform voltage harmonic analysis. Voltage harmonic analysis has to prove that negative influence of non-linear load to voltage quality, will not exceed planning level of voltage waveform distortion. This paper will present voltage harmonic analysis, caused by a new part of voltage supply in testing facility of Koncar – Power Transformers Ltd factory. Calculation results will be compared with allowed limits according to Mrežna pravila EES-a (NN 36/06) and recommendation according to technical report IEC 61000-3-6:2008 Ed. 2.0 "Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems"

Key words: testing facility, power converter, non-linear U-I characteristic, voltage harmonics, calculation

1. UVOD

Za kvalitetu napona u nekoj točki mreže su odgovorni i operator sustava i korisnici mreže. Održavanje određene razine kvalitete napona (nužno zbog ispravnog rada opreme koja je priključena na EES) u nekoj točki mreže je obveza operatora sustava. Ovu zadaću operator sustava provodi ograničavanjem negativnog povratnog djelovanja opreme svih korisnika mreže. Svaki korisnik mreže (kupac, proizvođač ili trgovac električne energije) je dužan povratna djelovanja svoje opreme na kvalitetu napona (injektiranje viših harmonika, uzimanje jalove snage, emisija flikera i nesimetrije opterećenja) svesti na propisane (unaprijed dogovorene) granične vrijednosti (koje u načelu određuje operator sustava).

Viši naponski harmonici su sinusoidalni naponi frekvencije jednake cjelobrojnom višekratniku osnovne pogonske frekvencije. Viši harmonici su nepoželjni u sustavu, jer izobličuju osnovni sinusni val, što uzrokuje probleme u napajanju osjetljivih trošila, koja zahtijevaju čisti sinusni napon (npr. medicinska oprema). Više harmonike u mrežnom naponu (tj. harmonijsko izobličenje napona) najčešće proizvode viši harmonici struja nelinearnih trošila koji su priključeni na raznim razinama distribucijske mreže. Harmonijske struje istih frekvencija iz različitih izvora pritom se zbrajaju vektorski. Industrijska trošila kao što su uređaji energetske elektronike (npr. usmjerivači, konvertori, bilo da rade kao ispravljači ili kao izmjenjivači), motori promjenjive brzine, indukcijske elektropeći i lučne elektropeći, koja zbog svojih svojstava uzimaju izobličenu struju iz mreže, predstavljaju generatore viših harmonika.

2. IZOBLIČENJE VALNOG OBLIKA NAPONA PREMA IEC 61000-3-6:2008

U tablici I. dane su razine kompatibilnosti za harmonijske napone (u postotku osnovnog harmonika napona U_1) u NN i SN elektroenergetskim sustavima.

Tablica I. Razine kompatibilnosti za harmonijske napone (u postotku osnovnog harmonika napona) u NN i SN energetskim sustavima prema IEC 61000-3-6:2008

Neparni harmonici		Neparni harmonici		Parni harmonici	
Red harmonika	Harmonijski napon (%)	Red harmonika	Harmonijski napon (%)	Red harmonika	Harmonijski napon (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,4	6	0,5
13	3	21	0,3	8	0,5
17 ≤ h ≤ 49	2,27•(17/h)-0,27	21 ≤ h ≤ 45	0,2	10 ≤ h ≤ 50	0,25•(10/h)+0,25
THD : 8 %					

U tablici II. dane su indikativne vrijednosti planiranih razina za harmonijske napone (u postotku osnovnog harmonika napona U1) u SN, VN i VVN elektroenergetskim sustavima.

Tablica II. Planirane razine za harmonijske napone u SN i VN i VVN energetskim sustavima prema IEC 61000-3-6:2008

Neparni harmonici			Neparni harmonici			Parni harmonici		
Red harmonika	Harmonijski napon (%)		Red harmonika	Harmonijski napon (%)		Red harmonika	Harmonijski napon (%)	
	SN	VN-VVN		SN	VN-VVN		SN	VN-VVN
5	5	2	3	4	2	2	1,8	1,4
7	4	2	9	1,2	1	4	1	0,8
11	3	1,5	15	0,3	0,3	6	0,5	0,4
13	2,5	1,5	21	0,2	0,2	8	0,5	0,4
17 ≤ h ≤ 49	1,9• (17/h)- 0,2	1,2• (17/h)	21 ≤ h ≤ 45	0,2	0,2	10 ≤ h ≤ 50	0,25• (10/h)- +0,22	0,19• (10/h)- +0,16
THD : 6.5 % u SN sustavima ; 3 % u VN sustavima								

Procjena utjecaja postrojenja korisnika mreže koje ima nelinearne terete na kvalitetu napona ovisi o zakupljenoj snazi postrojenja, ukupnoj snazi nelinearnih tereta i karakteristikama mreže. Procjenu injektiranja viših harmonika treba napraviti za najgori mogući slučaj normalnog pogonskog stanja. U obzir treba uzeti i nesimetriju napona napajanja koja može dovesti do generiranja nekarakterističnih viših harmonika. Korisnici mreže na mjestu priključka (PCC) na određenim harmonijskim frekvencijama (ovisno o priključenoj opremi) injektiraju više harmonike struje koji stvaraju više harmonike napona. Ti naponski harmonici imaju iznos i fazni pomak u odnosu na postojeće naponske harmonike na mjestu priključka (utjecaj postojećih korisnika mreže i dr.). Zbog toga je prekonzervativno gledati doprinos novog korisnika mreže aritmetičkim zbrojem, već se harmonici zbrajaju geometrijski. Međudjelovanje elektroenergetskog sustava i korisnika mreže na mjestu priključka može u određenim slučajevima značiti povećanje, a u nekim slučajevima smanjenje iznosa harmonijskog izobličenja napona, kao i pojedinih naponskih harmonika (pojedini harmonici nisu uvijek u fazi).

Korisnik mreže je odgovoran za održavanje doprinosa ukupnom harmonijskom izobličenju napona (kao i pojedinačnih viših harmonika) ispod granica koje je definirao operator sustava, dok je operator sustava odgovoran za cjelokupnu koordinaciju planiranih razina na svim naponskim razinama, u svrhu održavanja razina kompatibilnosti na mjestima priključka opreme korisnika mreže. U tom slučaju bi oprema određenog korisnika mreže trebala zadovoljavajuće raditi. U svrhu procjene negativnog povratnog djelovanja novog korisnika mreže na kvalitetu napona, operator sustava je dužan osigurati podatke kao što je impedancija mreže na mjestu priključka (u ovisnosti o frekvenciji) ili podatke iz kojih se ona može izračunati, snagu kratkog spoja i postojeće stanje vezano za harmonijsko izobličenje napona (iznosi ukupnog harmonijskog izobličenja i pojedinačnih naponskih harmonika na mjestu priključka).

3. MREŽNA PRAVILA ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA (NN 36/2006)

Mrežna pravila su podzakonski akt kojim se uređuje pogon i način vođenja, razvoj i izgradnja priključaka na prijenosnu i distribucijsku mrežu u elektroenergetskom sustavu. Shodno tome njima se detaljnije propisuju:

- tehnički i drugi uvjeti za priključak korisnika na mrežu,
- tehnički i drugi uvjeti za siguran pogon elektroenergetskog sustava radi pouzdane opskrbe kvalitetnom električnom energijom.

U pogledu kvalitete napona i povratnog djelovanja (emisija viših harmonika) opreme korisnika mreže na kvalitetu napona Mrežna pravila u poglavlju 5.3. Priključenje na distribucijsku mrežu donose sljedeće odredbe:

5.3.2.3. Valni oblik napona

(1) Vrijednost faktora ukupnoga harmonijskog izobličenja (THD) napona uzrokovanog priključenjem proizvođača i/ili kupca na mjestu preuzimanja i/ili predaje može iznositi najviše:

- a) na razini napona 0,4 kV: 2,5%,
- b) na razini napona 10 i 20 kV: 2,0%,
- c) na razini napona 30 i 35 kV: 1,5%.

Navedene vrijednosti odnose se na 95% 10-minutnih prosjeka efektivnih vrijednosti napona za razdoblje od tjedan dana.

5.3.4. Povratno djelovanje na mrežu

(1) Instalacije i postrojenja korisnika mreže moraju se projektirati i graditi tako da pri pogonu njihovo povratno djelovanje na mrežu (flikeri, nesimetrija, viši harmonici i drugo) ne prelazi propisane razine.

(2) Instalacije i postrojenja korisnika mreže moraju se projektirati i graditi tako da je osigurana njihova otpornost prema smetnjama i utjecajima iz mreže.

(3) Prije prvog priključenja ili izmjene na instalacijama i postrojenjima korisnika, utvrđuje se moguće povratno djelovanje na mrežu.

(4) Bez detaljnijeg vrednovanja povratnog djelovanja na mrežu moguće je razmatrati priključenje na mrežu u slučaju manjih priključnih snaga ili ograničenog udjela nelinearnih trošila kod kupaca, ukoliko je ispunjen sljedeći uvjet:

- a) $S_K/S_P < 1000$ za srednji napon i
- b) $S_K/S_P < 150$ za niski napon,

pri čemu je S_K snaga kratkog spoja na mjestu priključenja, a S_P priključna snaga.

(5) Za veće priključne snage ili nazivne snage nelinearnih trošila mora se provesti računska analiza koja će pokazati da razina povratnog djelovanja na mrežu neće uzrokovati prekoračenje planirane razine izobličenja napona.

(6) Analiza povratnog djelovanja je obveza korisnika koji operatoru distribucijskog sustava mora u probnom pogonu mjerenjem dokazati da ne narušava dopuštene granice povratnog djelovanja.

4. PRORAČUN VIŠIH HARMONIKA NAPONA ZA POGON NAPAJANJA ISPITNE STANICE KONČAR – ENERGETSKI TRANSFORMATORI

4.1. Tehničke značajke pogona napajanja ispitne stanice Končar – Energetski transformatori

U sklopu modernizacije tvornice "Končar – Energetski transformatori d.o.o.", 2007. godine je dovršena izgradnja novog visokonaponskog ispitnog laboratorija. Navedeni laboratorij služi za rutinska, tipska i specijalna ispitivanja transformatora naponske razine do 525 kV, a smješten je u dograđenom dijelu proizvodne hale "A" s aneksom. Elektroenergetsko napajanje novog visokonaponskog laboratorija realizirano je iz istih strujnih i naponskih izvora kao i prije modernizacije.

Zbog velikog broja ispitivanja, ubrzo nakon modernizacije ispitne stanice i izgradnje novog visokonaponskog ispitnog laboratorija, te njegovog puštanja u pogon, ukazao se problem smanjenja pouzdanosti ispitnih agregata (generatora i pogonskih motora), koji su zbog starosti i specifičnosti svog rada, dovedeni do kraja svoje životne dobi. Ujedno je zbog povećanja proizvodnje i proširenja asortimana na veće proizvodne jedinice i na veće napone, neophodno za ispitivanje osigurati dovoljan broj naponsko-strujnih izvora odgovarajućeg naponskog nivoa i snage.

U novi pogon napajanja ispitne stanice planira se smjestiti dva ispitna agregata A4 i A5. Agregatne cjeline će činiti suhi transformatori za napajanje frekventnog pretvarača (20/4,16 kV), frekventni pretvarači, pogonski motori i ispitni generatori. Ispitni generator agregata A4 će biti pokretan motorom nazivnog napona 4,16 kV za koji se očekuje da će biti opterećen maksimalno do 2 MW (40% nazivnog tereta). Ovaj motor će pokretati specijalni ispitni generator instalirane snage 40 MVA s nazivnom frekvencijom 50/60Hz. Ispitni generator agregata A5 će biti pokretan motorom nazivnog napona 4,16 kV za koji se očekuje da će biti opterećen maksimalno do 1 MW (67% nazivnog tereta). Ovaj motor pokretat će specijalni ispitni generator

instalirane snage 5 MVA s nazivnom frekvencijom 200 Hz. Novi pogon za napajanje ispitne stanice će biti priključen na 20 kV sabirnica u 2TS 2216, a imat će instaliranu snagu od 8430 kVA. Zbog relativno niskog faktora istovremenosti očekuje se vršna snaga od 2000 kW. Ispitna stanica će biti trajno (0-24 h) priključena na mrežu, a ispitivanje i korištenje će biti prema potrebi. Očekuje se da se godišnja potrošnja električne energije neće bitno mijenjati u odnosu na sadašnju.

4.2. Varijante proračuna viših harmonika napona

Proračun viših harmonika napona bit će proveden za dva osnovna slučaja priključka na mrežu operatora distribucijskog sustava (Elektra Zagreb):

- 1) društvo Končar – Energetski transformatori sudjeluje kao dio ukupnog konzuma lokacije Končar Jankomir (sadašnje stanje)
- 2) društvo Končar – Energetski transformatori predstavlja samostalan konzum (eventualno buduće stanje).

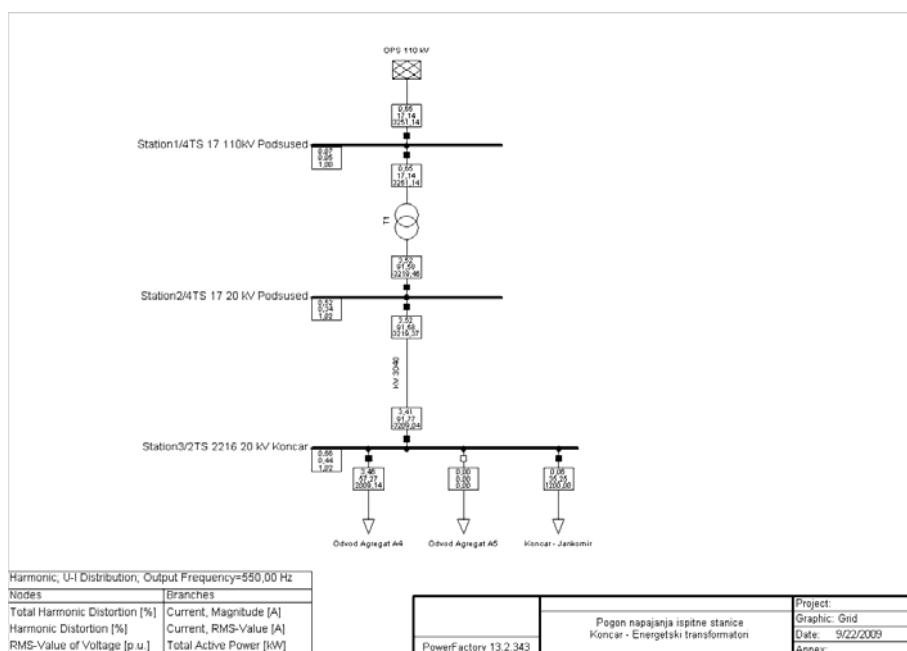
Za oba osnovna slučaja provest će se proračuni za dva dodatna slučaja u ovisnosti o uklopnom stanju novih agregatskih jedinica A4 i A5:

- a) agregat A4 radi maksimalnim predviđenim opterećenjem od 2 MW, agregat A5 ne radi
- b) agregat A5 radi maksimalnim predviđenim opterećenjem od 1 MW, agregat A4 ne radi.

Proračuni viših harmonika napona će biti izvršen u programskom paketu za analizu električnih mreža Digsilent Powerfactory 13.2.343.

4.3. Proračun viših harmonika napona

Na osnovu tehničkih podataka o kablskim dionicama, transformatorima, frekvencijskom spektru viših harmonika energetskih pretvarača novih agregata A4 i A5, te na temelju mjerenja kvalitete napona i tokova snaga za lokaciju Končar – Jankomir, izvršeni su proračuni viših harmonika napona za sve 4 gore navedene varijante. Na temelju analize mjerenja kvalitete napona i tokova snaga na lokaciji Končar – Jankomir može se zaključiti da se utjecaj nesimetričnosti napona na generiranje nekarakterističnih harmonika (npr. harmonika parnog reda), zbog malih iznosa (<0,4%), može zanemariti. Isto tako se može zaključiti da su trošila na lokaciji Končar – Jankomir takvih karakteristika da bitno ne pridonose generiranju neparnih harmonika reda 3n (harmonici nultog sustava kao npr. 3, 9, 15 itd.). Stoga su provedeni proračuni viših harmonika samo za neparne harmonike direktnog i inverznog sustava do reda h=40 (bitni za operatera distribucijskog sustava zbog zahtjeva norme HRN EN 50160:2008). Model elektroenergetske mreže za proračun viših harmonika napona u programskom paketu DigSilent Powerfactory je prikazan na slici 1.

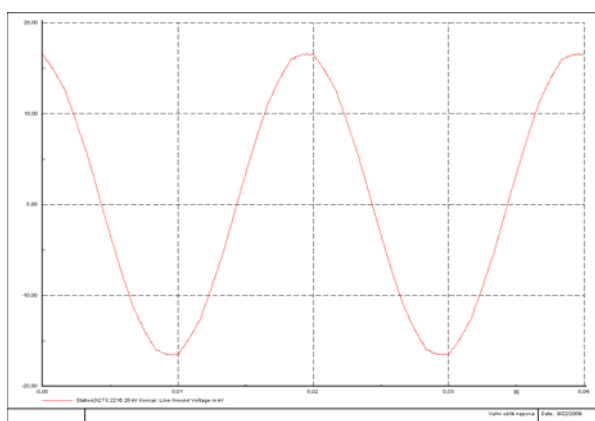


Slika 1. Model elektroenergetske mreže za proračun viših harmonika napona

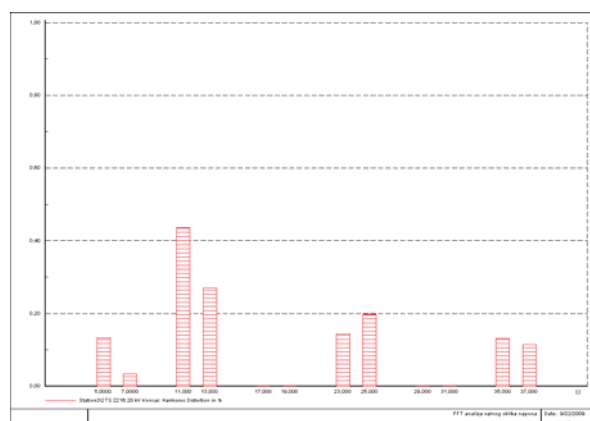
4.3.1. Rezultati proračuna viših harmonika napona za varijantu 1a

Varijanta 1a označava proračun viših harmonika napona za slučaj kada društvo Končar – Energetski transformatori (agregat A4 radi maksimalnim predviđenim opterećenjem od 2 MW, agregat A5 ne radi) sudjeluje kao dio ukupnog konzuma lokacije Končar - Jankomir (sadašnje stanje). Frekvencijski spektar viših harmonika struje energetskih pretvarača agregata A4 i A5 za razne iznose tereta je specificiran od strane proizvođača. Konzum ostalih trošila na lokaciji Jankomir je određen na temelju postojećih mjerenja kvalitete napona i tokova snaga za lokaciju Končar – Jankomir i iznosi oko 1200 kW (literatura 5 i 6). Na temelju istih mjerenja je određen i frekvencijski spektar viših harmonika tog konzuma ($I_{h5}=6,5\% I_{h1}$, $I_{h7}=1,2\% I_{h1}$, $I_{h11}=0,15\% I_{h1}$, svi ostali harmonici struje iznose 0). Pretpostavljena je snaga kratkog spoja od 3200 MVA na 110 kV sabirnicama u 4TS 17 Podsused, te snaga energetskog transformatora T1 od 40 MVA i napon kratkog spoja energetskog transformatora T1 $u_k=11\%$.

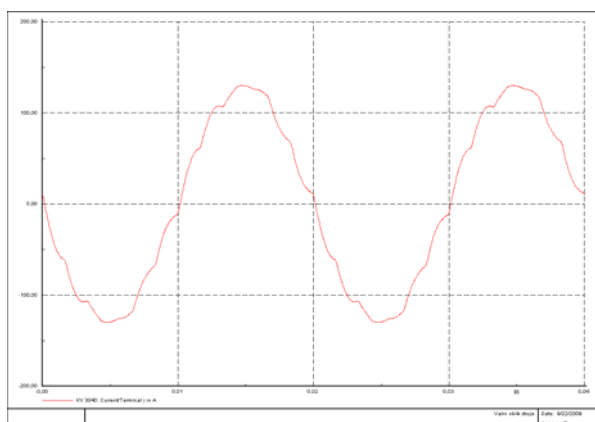
Na slikama 2 i 3 se nalaze rezultati proračuna viših harmonika napona za varijantu 1a. Slika 2 prikazuje valni oblik faznog napona na sabirnicama u TS 2216 za varijantu proračuna 1a, a Slika 3 prikazuje FFT analizu tog valnog oblika (frekvencijski spektar koji prikazuje iznose viših harmonika napona u postotku osnovnog harmonika napona). Iz navedenih slika je vidljivo blago izobličenje valnog oblika napona uslijed djelovanja nelinearnih trošila unutar industrijske mreže Končar – Jankomir. Najviše vrijednosti po apsolutnom iznosu dosežu 11. i 13. harmonik napona, koji su najvećim dijelom posljedica rada 12-pulsnog pretvarača agregata A4. Na slikama Slika 4 i Slika 5 su dani prikazi valnog oblika struje i FFT analiza valnog oblika struje (frekvencijski spektar koji prikazuje iznose viših harmonika struje u postotku osnovnog harmonika struje) na dolaznom kabelu koji napaja TS 2216 za varijantu 1a. Iz navedenih slika je vidljivo da najviše vrijednosti dosežu 11. harmonik struje (najvećim dijelom posljedica rada 12-pulsnog pretvarača agregata A4) i 5 harmonik struje (posljedica rada ostalih trošila na lokaciji Končar – Jankomir).



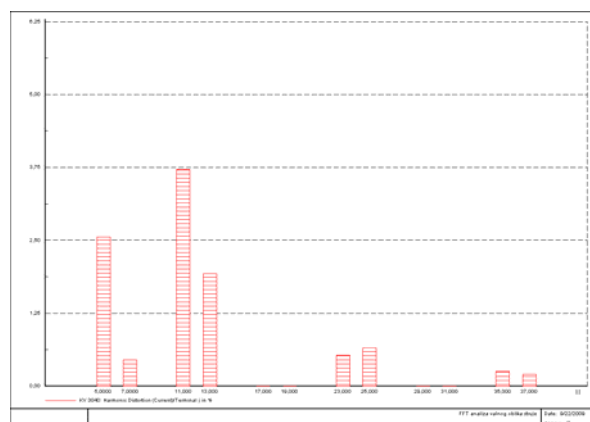
Slika 2. Valni oblik napona na sabirnicama u TS 2216 za varijantu 1a



Slika 3. FFT analiza valnog oblika napona na sabirnicama u TS 2216 za varijantu 1a



Slika 4. Valni oblik struje na dolaznom kabelu koji napaja TS 2216 za varijantu 1a

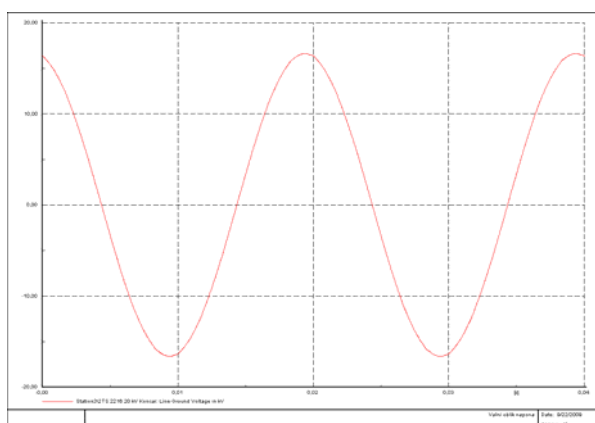


Slika 5. FFT analiza valnog oblika struje na dolaznom kabelu koji napaja TS 2216 za varijantu 1a

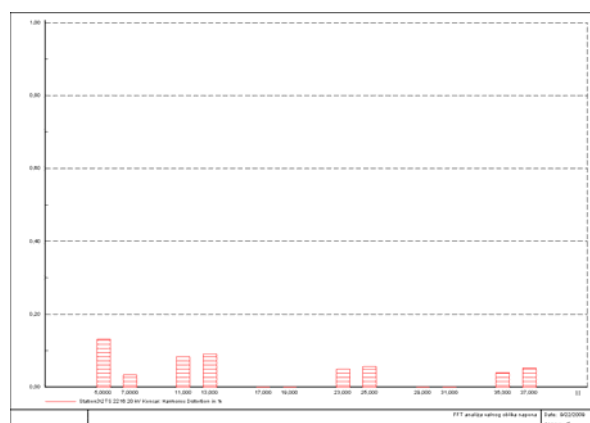
4.3.2. Rezultati proračuna viših harmonika napona za varijantu 1b

Varijanta 1b označava proračun viših harmonika napona za slučaj kada društvo Končar – Energetski transformatori (agregat A5 radi maksimalnim predviđenim opterećenjem od 1 MW, agregat A4 ne radi) sudjeluje kao dio ukupnog konzuma lokacije Končar - Jankomir (sadašnje stanje). Frekvencijski spektar viših harmonika struje energetskih pretvarača agregata A4 i A5 za razne iznose tereta je specificiran od strane proizvođača. Konzum ostalih trošila na lokaciji Jankomir je određen na temelju postojećih mjerenja kvalitete napona i tokova snaga za lokaciju Končar – Jankomir i iznosi oko 1200 kW (literatura 5 i 6). Na temelju istih mjerenja je određen i frekvencijski spektar viših harmonika tog konzuma ($I_{h5}=6,5 \% I_{h1}$, $I_{h7}=1,2 \% I_{h1}$, $I_{h11}=0,15 \% I_{h1}$, svi ostali harmonici struje iznose 0). Pretpostavljena je snaga kratkog spoja od 3200 MVA na 110 kV sabirnicama u 4TS 17 Podsused, te snaga energetskog transformatora T1 od 40 MVA i napon kratkog spoja energetskog transformatora T1 $u_k=11\%$.

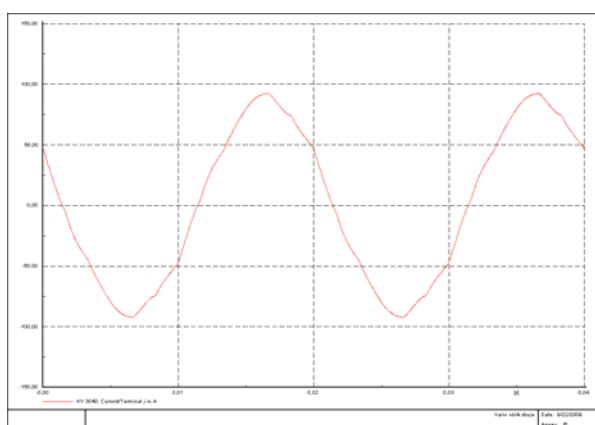
Na slikama 6 i 7 se nalaze rezultati proračuna viših harmonika napona za varijantu 1b. Slika 6 prikazuje valni oblik faznog napona na sabirnicama u TS 2216 za varijantu proračuna 1b, a slika 7 prikazuje FFT analizu tog valnog oblika (frekvencijski spektar koji prikazuje iznose viših harmonika napona u postotku osnovnog harmonika napona). Iz navedenih slika je vidljivo blago izobličenje valnog oblika napona uslijed djelovanja nelinearnih trošila unutar industrijske mreže Končar – Jankomir. Najviše vrijednosti po apsolutnom iznosu doseže 5. harmonik napona, koji je najvećim dijelom posljedica rada ostalih trošila na lokaciji Končar – Jankomir. Na slikama 8 i 9 su dani prikazi valnog oblika struje i FFT analiza valnog oblika struje (frekvencijski spektar koji prikazuje iznose viših harmonika struje u postotku osnovnog harmonika struje) na dolaznom kabelu koji napaja TS 2216 za varijantu 1b. Iz navedenih slika je vidljivo da najviše vrijednosti dosežu 5. harmonik struje (posljedica rada ostalih trošila na lokaciji Končar – Jankomir) i 11. harmonik struje (najvećim dijelom posljedica rada 12-pulsnog pretvarača agregata A5).



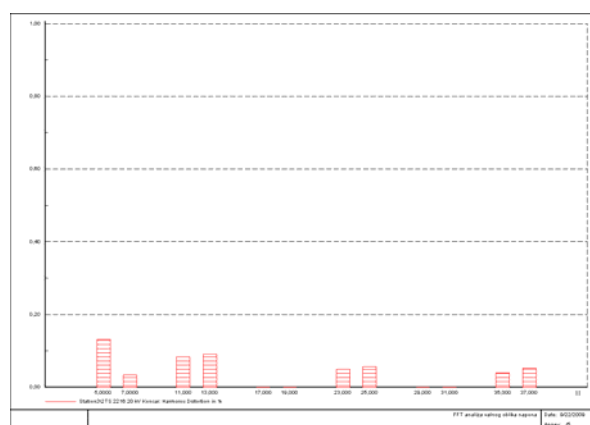
Slika 6. Valni oblik napona na sabirnicama u TS 2216 za varijantu 1b



Slika 7. FFT analiza valnog oblika napona na sabirnicama u TS 2216 za varijantu 1b



Slika 8. Valni oblik struje na dolaznom kabelu koji napaja TS 2216 za varijantu 1b

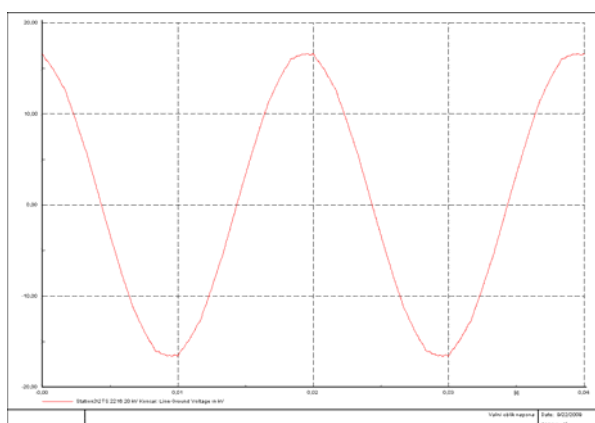


Slika 9. FFT analiza valnog oblika struje na dolaznom kabelu koji napaja TS 2216 za varijantu 1b

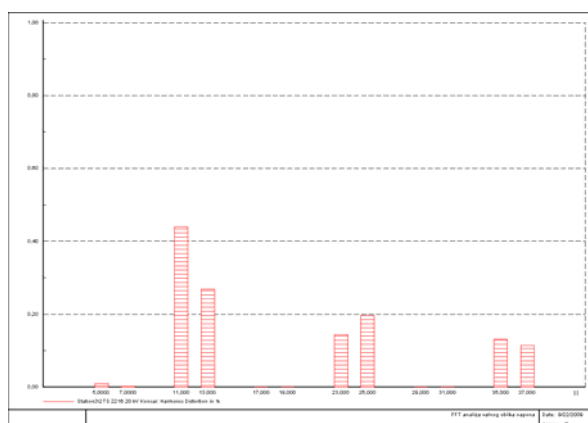
4.3.3. Rezultati proračuna viših harmonika napona za varijantu 2a

Varijanta 2a označava proračun viših harmonika napona za slučaj kada društvo Končar – Energetski transformatori (agregat A4 radi maksimalnim predviđenim opterećenjem od 2 MW, agregat A5 ne radi) predstavlja samostalan konzum (eventualno buduće stanje). Frekvencijski spektar viših harmonika struje energetskih pretvarača agregata A4 i A5 za razne iznose tereta je specificiran od strane proizvođača. Pretpostavljena je snaga kratkog spoja od 3200 MVA na 110 kV sabirnicama u 4TS 17 Podsused, te snaga energetskog transformatora T1 od 40 MVA i napon kratkog spoja energetskog transformatora T1 $u_k=11\%$.

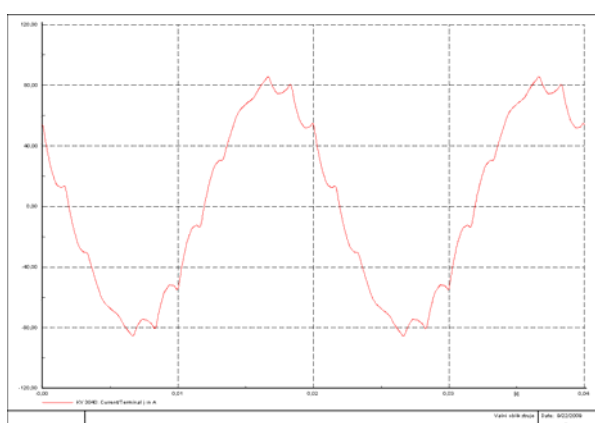
Na slikama 10 i 11 se nalaze rezultati proračuna viših harmonika napona za varijantu 2a. Slika 10 prikazuje valni oblik faznog napona na sabirnicama u TS 2216 za varijantu proračuna 2a, a slika 11 prikazuje FFT analizu tog valnog oblika (frekvencijski spektar koji prikazuje iznose viših harmonika napona u postotku osnovnog harmonika napona). Iz navedenih slika je vidljivo blago izobličenje valnog oblika napona. Najviše vrijednosti po apsolutnom iznosu dosežu 11. i 13. harmonik napona, koji su posljedica rada 12-pulsnog pretvarača agregata A4. Na slikama 12 i 13 su dani prikazi valnog oblika struje i FFT analiza valnog oblika struje (frekvencijski spektar koji prikazuje iznose viših harmonika struje u postotku osnovnog harmonika struje) na dolaznom kabelu koji napaja TS 2216 za varijantu 2a. Iz navedenih slika je vidljivo da najviše vrijednosti dosežu 11. i 13. harmonik struje (posljedica rada 12-pulsnog pretvarača agregata A4).



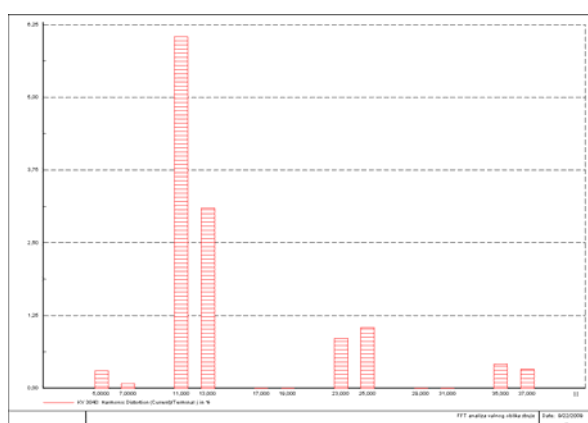
Slika 10. Valni oblik napona na sabirnicama u TS 2216 za varijantu 2a



Slika 11. FFT analiza valnog oblika napona na sabirnicama u TS 2216 za varijantu 2a



Slika 12. Valni oblik struje na dolaznom kabelu koji napaja TS 2216 za varijantu 2a

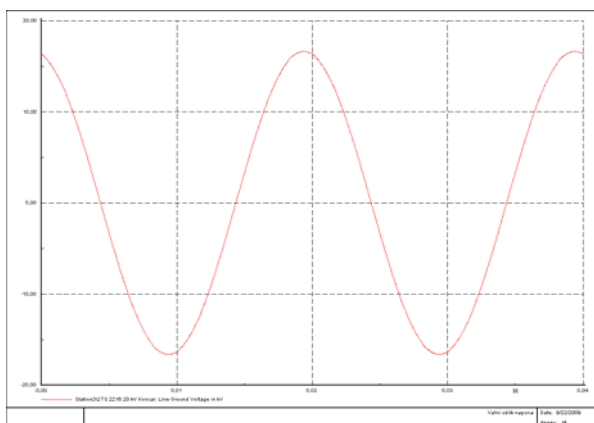


Slika 13. FFT analiza valnog oblika struje na dolaznom kabelu koji napaja TS 2216 za varijantu 2a

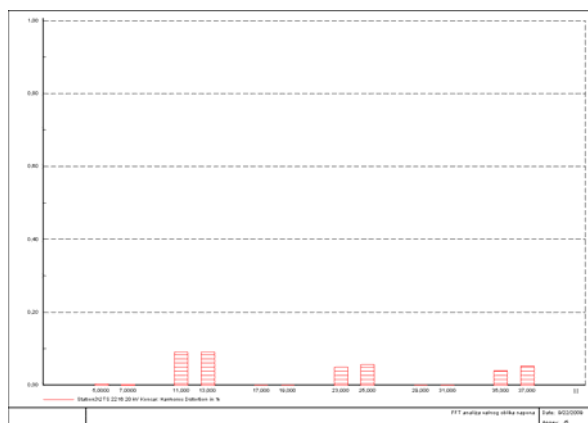
4.3.4. Rezultati proračuna viših harmonika napona za varijantu 2b

Varijanta 2b označava proračun viših harmonika napona za slučaj kada društvo Končar – Energetski transformatori (agregat A5 radi maksimalnim predviđenim opterećenjem od 1 MW, agregat A4 ne radi) predstavlja samostalan konzum (eventualno buduće stanje). Frekvencijski spektar viših harmonika struje energetskih pretvarača agregata A4 i A5 za razne iznose tereta je specificiran od strane proizvođača. Pretpostavljena je snaga kratkog spoja od 3200 MVA na 110 kV sabirnicama u 4TS 17 Podsused, te snaga energetskog transformatora T1 od 40 MVA i napon kratkog spoja energetskog transformatora T1 $u_k=11\%$.

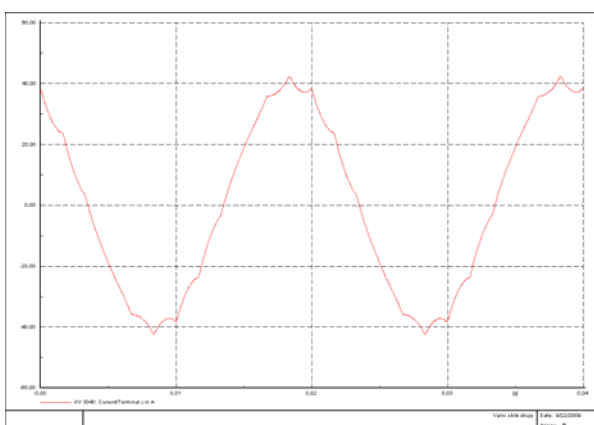
Na slikama 14 i 15 se nalaze rezultati proračuna viših harmonika napona za varijantu 2b. Slika 14 prikazuje valni oblik faznog napona na sabirnicama u TS 2216 za varijantu proračuna 2b, a slika 15 prikazuje FFT analizu tog valnog oblika (frekvencijski spektar koji prikazuje iznose viših harmonika napona u postotku osnovnog harmonika napona). Iz navedenih slika je vidljivo blago izobličenje valnog oblika napona. Najviše vrijednosti po apsolutnom iznosu dosežu 11. i 13. harmonik napona, koji su posljedica rada 12-pulsnog pretvarača agregata A5. Na slikama 16 i 17 su dani prikazi valnog oblika struje i FFT analiza valnog oblika struje (frekvencijski spektar koji prikazuje iznose viših harmonika struje u postotku osnovnog harmonika struje) na dolaznom kabelu koji napaja TS 2216 za varijantu 2b. Iz navedenih slika je vidljivo da najviše vrijednosti dosežu 11. i 13. harmonik struje (posljedica rada 12-pulsnog pretvarača agregata A5).



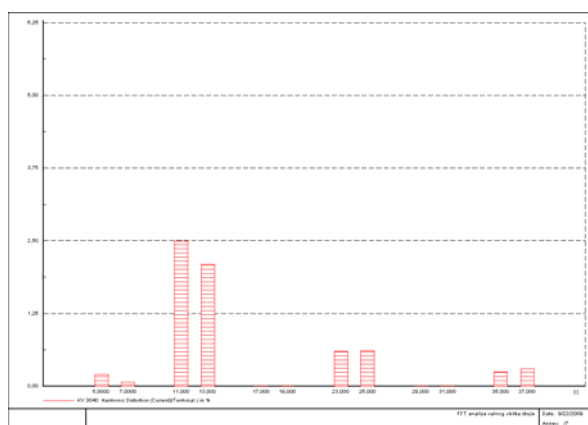
Slika 14. Valni oblik napona na sabirnicama u TS 2216 za varijantu 2b



Slika 15. FFT analiza valnog oblika napona na sabirnicama u TS 2216 za varijantu 2b



Slika 16. Valni oblik struje na dolaznom kabelu koji napaja TS 2216 za varijantu 2b



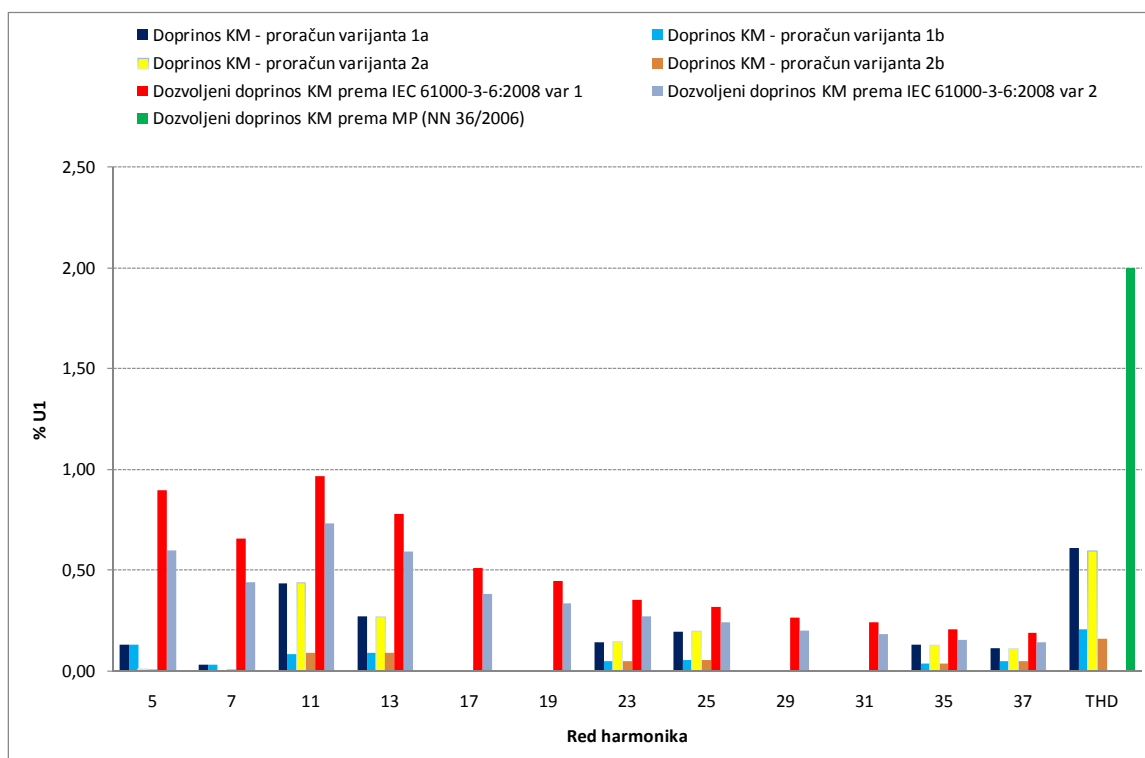
Slika 17. FFT analiza valnog oblika struje na dolaznom kabelu koji napaja TS 2216 za varijantu 2b

4.4. Analiza rezultata proračuna viših harmonika napona

Na osnovu podataka o snazi energetskih transformatora u TS 110/20 Podsused i predviđenim snagama iz elektroenergetskih suglasnosti, za dva osnovna slučaja priključka na mrežu, određeni su iznosi dozvoljenog doprinosa korisnika mreže za pojedini harmonik napona prema IEC 61000-3-6:2008 (formule 3 i 4), te se oni nalaze u tablici III. Osim toga u navedenoj tablici se nalaze i rezultati proračuna viših harmonika napona za sve 4 varijante. Usporedbom iznosa dozvoljenih doprinosa za pojedini harmonik napona i iznosa harmonika napona dobivenih proračunima može se zaključiti da bez obzira na varijantu proračuna, iznosi viših harmonika napona neće biti viši od dozvoljenih doprinosa. Također, usporedbom iznosa faktora ukupnog harmonijskog izobličenja napona dobivenih proračunima i dozvoljenog doprinosa prema Mrežnim pravilima (NN 36/2006) može se zaključiti da bez obzira na varijantu proračuna, iznosi faktora ukupnog harmonijskog izobličenja napona neće biti veći od dozvoljenih doprinosa. Usporedba rezultata proračuna viših harmonika napona s dozvoljenim doprinosom prema IEC 61000-3-6:2008 i MP (NN 36/2006) za sve varijante proračuna prikazan je i slikom 18.

Tablica III. Usporedba rezultata proračuna viših harmonika napona s dozvoljenim doprinosom prema IEC 61000-3-6:2008 i MP (NN 36/2006) za sve varijante proračuna

Harmonik napona	Zakupljena snaga = 4500 kW			Zakupljena snaga = 2573,26 kW		
	Dozvoljeni doprinos KM prema IEC 61000-3-6:2008 za varijante 1a i 1b (% U ₁)	Doprinos KM prema proračunu		Dozvoljeni doprinos KM prema IEC 61000-3-6:2008 za varijante 2a i 2b (% U ₁)	Doprinos KM prema proračunu	
		Varijanta 1a (% U ₁)	Varijanta 1b (% U ₁)		Varijanta 2a (% U ₁)	Varijanta 2b (% U ₁)
5	0,896	0,134	0,131	0,601	0,010	0,003
7	0,657	0,033	0,034	0,441	0,003	0,002
11	0,967	0,436	0,084	0,731	0,441	0,090
13	0,781	0,271	0,091	0,590	0,269	0,091
17	0,509	0,000	0,000	0,385	0,000	0,000
19	0,447	0,000	0,000	0,338	0,000	0,000
23	0,355	0,145	0,050	0,269	0,145	0,050
25	0,320	0,198	0,057	0,242	0,197	0,057
29	0,265	0,000	0,000	0,200	0,000	0,000
31	0,243	0,000	0,000	0,183	0,000	0,000
35	0,205	0,132	0,039	0,155	0,132	0,039
37	0,190	0,115	0,052	0,143	0,115	0,052
	Dozvoljeni doprinos KM prema MP (NN 36/2006) za varijante 1a i 1b	Doprinos KM prema proračunu		Dozvoljeni doprinos KM prema MP (NN 36/2006) za varijante 1a i 1b	Doprinos KM prema proračunu	
		Varijanta 1a	Varijanta 1b		Varijanta 2a	Varijanta 2b
Thd	2,000	0,611	0,209	2,000	0,598	0,162



Slika 18. Usporedba rezultata proračuna viših harmonika napona s dozvoljenim doprinosom prema IEC 61000-3-6:2008 i MP (NN 36/2006) za sve varijante proračuna

5. ZAKLJUČAK

U sklopu lokacije Končar – Jankomir (koja se napaja iz 20 kV distribucijske mreže DP "Elektra Zagreb") se nalazi tvornica za proizvodnju energetskih transformatora velikih snaga "Končar – Energetski transformatori d.o.o.". Prije nekoliko godina u sklopu modernizacije tvornice je dovršena izgradnja novog visokonaponskog ispitnog laboratorija. U sklopu modernizacije pogona tvornice obavit će se i dogradnja novog pogona napajanja ispitne stanice. Novi pogon napajanja ispitne stanice tvornice "Končar – Energetski transformatori d.o.o." će također biti spojen na 20 kV naponsku razinu u rasklopištu 2TS 2216 (sučelje javne distribucijske mreže i industrijske mreže). Sastojat će se od dvije grupe agregata (motor-generator) A4 (pogonski motor nazivne snage 5 MW) i A5 (pogonski motor nazivne snage 1,5 MW), koje će preko dva zasebna 12-pulsna energetska pretvarača i pripadnih transformatora (20/4,16 kV) biti spojene na mrežu.

Energetski pretvarači imaju nelinearnu U-I karakteristiku pa svojim radom u mrežu injektiraju više harmonijske članove struje. Prema Mrežnim pravilima (NN 36/06), prije priključka nelinearnih trošila većih nazivnih snaga (ukoliko vrijedi $S_K < 1000 \cdot S_P$, gdje je S_P priključna snaga, a S_K snaga kratkog spoja na mjestu priključka na elektroenergetsku mrežu), potrebno je provesti proračun viših harmonika napona. Proračunom je potrebno dokazati da razina povratnog djelovanja na mrežu neće uzrokovati prekoračenje planirane razine izobličenja valnog oblika napona.

U okviru ovog referata proveden je proračun viših harmonika napona za dva osnovna slučaja priključka na mrežu operatora distribucijskog sustava (DP Elektra Zagreb):

- 1) društvo Končar – Energetski transformatori sudjeluje kao dio ukupnog konzuma lokacije Končar - Jankomir (sadašnje stanje)
- 2) društvo Končar – Energetski transformatori predstavlja samostalan konzum (eventualno buduće stanje).

Za oba osnovna slučaja provedeni su proračuni za dva dodatna slučaja u ovisnosti o uklopnom stanju novih agregatskih jedinica A4 i A5:

- a) agregat A4 radi maksimalnim predviđenim opterećenjem od 2 MW, agregat A5 ne radi
- b) agregat A5 radi maksimalnim predviđenim opterećenjem od 1 MW, agregat A4 ne radi.

Proračuni viših harmonika napona su izvršeni u programskom paketu za analizu električnih mreža Digsilent Powerfactory 13.2.343.

Na osnovu usporedbe iznosa dozvoljenih doprinosa za pojedini harmonik napona prema IEC 61000-3-6:2008 i iznosa harmonika napona dobivenih proračunima može se zaključiti da bez obzira na varijantu proračuna, iznosi viših harmonika napona neće biti viši od dozvoljenih doprinosa. Također, usporedbom iznosa faktora ukupnog harmonijskog izobličenja napona dobivenih proračunima i dozvoljenog doprinosa prema Mrežnim pravilima (NN 36/2006) može se zaključiti da bez obzira na varijantu proračuna, iznosi faktora ukupnog harmonijskog izobličenja napona neće biti veći od dozvoljenih doprinosa.

Prema Mrežnim pravilima analiza povratnog djelovanja je obveza korisnika koji operatoru distribucijskog sustava mora u probnom pogonu mjerenjem dokazati da ne narušava dopuštene granice povratnog djelovanja. Stoga je potrebno, nakon izgradnje novog pogona napajanja ispitne stanice, obaviti mjerenja kvalitete napona te viših harmonika struja i napona istovremeno na obračunskom mjernom mjestu za cijelu lokaciju Jankomir, te na odvodima agregata A4 i A5, kojim će se moći dokazati da korisnik mreže ne narušava dopuštene granice povratnog djelovanja.

LITERATURA

- [1] Mrežna pravila elektroenergetskog sustava, "Narodne novine" broj 36/06, 2006.
- [2] IEC 61000-3-6 Ed 2.0 (2008) "Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3: Limits, Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems - Basic EMC publication"
- [3] HRN EN 50160:2008 "Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava"
- [4] Idejni projekt - Pogon napajanja ispitne stanice - Tehnički opis, ELING-52-08-0006, 2008., ELING-PROJEKT d.o.o.
- [5] Mjerenje tokova snaga, viših harmonika napona i struja i kvalitete električne energije na lokaciji Jankomir, Ispitni izvještaj br. 21580070604, 2004., Končar – Institut za elektrotehniku d.d.
- [6] Mjerenja kvalitete napona, te snimanje valnih oblika napona i struja na lokaciji KONČAR – TRANSFORMATORI, Ispitni izvještaj br. 21582KEE08004, 2008., Končar – Institut za elektrotehniku d.d.