

ANALIZA MERENIH PARAMETARA KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE SA AKCENTOM NA HARMONIKE I POREĐENJE SA RELEVANTNIM STANDARDIMA

ANALYSIS OF MEASURED POWER QUALITY PARAMETERS WITH EMPHASIS ON HARMONICS AND COMPARISON WITH RELEVANT STANDARDS

Aleksandra PETROVIĆ, Energoprojekt Entel a.d., Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Nekoliko godina unazad postoji opravdana briga o uticaju nelinearnih potrošača na elektroenergetsku mrežu. Harmonici utiču negativno na gotovo svaku komponentu u sistemu prouzrokujući dodatna termička, mehanička i dielektrična naprezanja. Upravo zato je neophodno raditi periodična merenja u sistemu i kontrolu kvaliteta električne energije.

Ovaj referat obrađuje jedno takvo ispitivanje koje se zasniva na rezultatima merenja strujnih i naponskih prilika u kompleksu bolnica lociranih u Dohi (Katar). Merenja su rađena na 40 različitih lokacija u periodu od tri meseca, na naponskom nivou 0.415 kV. Izvršeno je poređenje izmerenih indikatora kvaliteta električne energije (individualni strujni i naponski harmonici do 25. reda, THD) sa vrednostima definisanim u relevantnim lokalnim i internacionalnim standardima:

- IEC 61000-2-2 – Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems (published in 2002.)
- IEEE 519-2014 – IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
- Interni standard distributera električne energije – KAHRAMAA Distribution Planning Manual.

Urađeno je poređenje ovih standarda i uzete su najstrožije vrednosti kao merodavne kako bi tumačenje rezultata bilo na strani sigurnosti.

Tumačenjem rezultata merenja došlo se do zaključka da je nivo harmonika u definisanim granicama, ali su i pored toga predložene mere predostrožnosti u vidu periodičnih merenja uzimajući u obzir da su medicinska oprema i aparati zapravo nelinearni potrošači električne energije.

Ključne reči: harmonici, kvalitet električne energije, distributivna mreža.

ABSTRACT

In the last few years there has been reasonable concern about the influence of nonlinear loads on electrical power system. Harmonics adversely affect virtually every component in the power system, creating additional thermal, mechanical and dielectric stresses. Therefore it is necessary to make periodic measurements in the system and control the quality of electrical energy.

This paper addresses one such assessment based on the results of current and voltage measurements at the hospital complex located in Doha (Qatar). Measurements were made at 40 different locations over a three-month period, at a voltage level of 0.415 kV. Measured power quality indicators (individual current and voltage harmonics up to 25th order, THD) have been compared with the values defined in the relevant local and international standards:

- IEC 61000-2-2 – Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems (published in 2002.)
- IEEE 519-2014 – IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
- Internal standard of distribution system operator – KAHRAMAA Distribution Planning Manual.

A comparison of these standards was made and the most stringent values were taken as applicable in order to have the interpretation of the results on the safe side.

Analysis of measurements led to the conclusion that the harmonic level is within the defined limits, but nonetheless certain measures, such as periodic measurements, should be taken considering that medical equipment and appliances are non-linear loads.

Key words: harmonics, power quality, distribution power system.

Kontakt informacije: e-mail: agovic8@gmail.com, mob: +381 64 047 6984

UVOD

Ovaj referat obrađuje ispitivanje koje se zasniva na rezultatima merenja strujnih i naponskih prilika u kompleksu bolnica lociranih u Dohi (Katar). Merenja su urađena kako bi se ispitalo postojanje potencijalnih problema u distributivnoj mreži kao što su harmonici i njihov udeo u napojnoj mreži.

Bolnice se sa energetskeg aspekta mogu posmatrati kao vrlo specifičan potrošač. Medicinska oprema i uređaji sadrže veliki broj elektronskih komponenti te spadaju u kategoriju nelinearnih uređaja. Takođe, bolnice u Dohi opremljene su velikim brojem rashadnih jedinica (čileri, klima uređaji) od kojih većina radi u kombinaciji sa uređajima za startovanje motora, koji takođe predstavljaju nelinearne potrošače. Bolnice kao objekti moraju da rade neprekidno a sigurnost napajanja i kvalitet električne energije su jedan od glavnih preduslova za to. Da bi se ispitalo stanje mreže urađena su merenja parametara kvaliteta električne energije.

U periodu od tri meseca merenja su urađena u dve etape na 40 različitih lokacija:

1. Prva etapa obuhvata dvodnevna merenja (48 h) sprovedena na dovodu glavnih razvodnih tabli koje se napajaju direktno sa distributivnog transformatora 11/0.4 kV (period odabiranja: 1 min, ukupno 17 merenja),
2. Druga etapa obuhvata kratkotrajna merenja od 15 min na dovodima podrazvoda (period odabiranja: 3 s, ukupno 23 merenja).

Standard IEEE 519 – 2014 definiše da se efektivna vrednost signala harmonika (strujni ili naponski) računa u toku 10 perioda što predstavlja 200 ms. Uređaj koji je korišćen za potrebe ovih merenja računa efektivnu vrednost signala svakih 200 ms kao što je definisano standardom. To znači da ako je definisan period odabiranja od npr. 3 s da je uređaj izračunao ukupno $3s/0.2s=15$ efektivnih vrednosti i da je na kraju ovog perioda memorisao minimalnu, maksimalnu i srednju vrednost od ovh 15 izračunatih. Period odabiranja od 3 s ustvari predstavlja period memorisanja merenih vrednosti. Merni uređaj je kalibrisan pre početka merenja.

Za potrebe analize, mereni su sledeći parametri kvaliteta električne energije:

- Fazni naponi,
- Fazne struje,
- Struja neutralnog provodnika,
- Snaga (aktivna, reaktivna i prividna) po fazi i ukupna,
- Faktor snage,
- Individualni naponski harmonici do 25. reda,
- Individualni strujni harmonici do 25. reda,
- Naponski THD,
- Strujni THD.

Rezultati su sumirani i izvršeno je poređenje izmerenih indikatora kvaliteta električne energije sa vrednostima definisanim u relevantnim lokalnim i internacionalnim standardima, sa posebnim osvrtom na harmonike. Harmonici su prisutni u sistemu najvećim delom zbog učešća novih pretvaračkih tehnologija koje se mogu naći u gotovo svakom elektronskom uređaju (kompjuteri, serveri, štampači, telekomunikaciona oprema, medicinski uređaji, itd.) i utiču negativno na gotovo svaku komponentu u sistemu prouzrokujući dodatna termička, mehanička i dielektrična naprezanja.

Cilj ovog referata jeste analiza merenih rezultata i, u skladu sa zaključcima, predlog korektivnih i preventivnih mera koje je potrebno usvojiti radi poboljšanja stanja u mreži.

HARMONICI

Nekoliko godina unazad postoji opravdana briga o uticaju nelinearnih potrošača na elektroenergetsku mrežu. Harmonici utiču negativno na gotovo svaku komponentu u sistemu prouzrokujući dodatna termička, mehanička i dielektrična naprezanja. Struje viših harmonika u distributivnoj mreži rezultiraju padovima napona koji se kategorišu kao naponske distorzije. Velike vrednosti naponskih distorzija se dobijaju kada su u sistemu izjednačene vrednosti induktivne i kapacitivne impedanse (paralelna rezonansa) na nekom specifičnom umnošku osnovnog harmonika (najčešće 5, 7, 11 ili 13 harmonik).

Čak i bez rezonanse, struje harmonika uzrokuju gubitke u svim komponentama napojne mreže. Dodatni toplotni gubici, pored termičkih $I_n^2 R$, mogu se stvoriti usled skin efekta ili efekta blizine.

Harmonici takođe izazivaju pregrevavanje neutralnog provodnika u trofaznim sistemima sa četiri provodnika koji napajaju nelinearne potrošače. Posebno je izražen uticaj trostrukih umnožaka osnovnog harmonika (tzv. tripli harmonici: treći, deveti, petnaesti, itd.) koji se u neutralnom provodniku sabiraju i imaju trostruku vrednost.

U transformatorima struje harmonika izazivaju dodatno zagrevanje, prvenstveno povećavajući gubitke usled vihornih struja.

Nelinearni potrošači imaju veliki uticaj na pojavu harmonijskih struja u napojnoj mreži. Potrošač se definiše kao nelinearan ako se njegova impedansa menja sa primenjenim naponom. Nelinearno opterećenje utiče na napojnu struju koja će biti i sama nelinearna, tj. nesinusoidalna. Ovi nesinusoidalni talasi mogu se matematički predstaviti kao zbir više sinusnih talasa različite frekvencije i amplitude. Upravo se ovi razloženi sinusni talasi nazivaju harmonicima i prisutni su kada postoji distorzija talasa. Harmonici predstavljaju način da se matematički opiše distorzija i devijacija sinusnog talasa. Termin „harmonik“ odnosi se na komponentu talasa čija je frekvencija celobrojni umnožak osnovne frekvencije. Opšteprihvaćena veličina koja se koristi za definisanje uticaja harmonika je THD (eng. *Total Harmonic Distortion*). THD se može koristiti kao kriterijum za izobličenje strujnog ili naponskog signala i izračunava se na sledeći način:

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \cdot 100\%$$

V_n – efektivna vrednost n-tog naponskog harmonika, $n=1$ je osnovni harmonik.

U formuli iznad prikazano je izračunavanje THD za naponski signal. Rezultat je odnos korena zbira kvadrata viših harmonika i osnovnog izražen u procentima. Veća vrednost procenta ukazuje na veće izobličenje osnovnog signala.

Slično, strujni THD se može izračunati na sledeći način:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \cdot 100\%$$

I_n – efektivna vrednost n-tog strujnog harmonika, $n=1$ je osnovni harmonik.

Veličina koja bolje opisuje devijaciju strujnog talasa usled prisustva harmonika jeste TDD (eng. *Total Demand Distortion*). TDD predstavlja odnos korena zbira kvadrata viših harmonika i maksimalne vrednosti struje potrošnje:

$$TDD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_L} \cdot 100\%$$

I_L – maksimalna vrednost struje potrošnje.

U principu, proizvođači harmonijskih izobličenja u mreži, iliti nelinearni potrošači, mogu se naći u sledećim elementima mreže:

- Frekventni regulatori (VFD) ili uređaji za startovanje motora,
- sistemi besprekidnog napajanja,
- uređaji energetske elektronike (pretvarači, ispravljači, itd.),
- elektrolučne peći,
- bilo koji tip potrošača koji u sebi sadrži inverter ili neki drugi tip prekidačkog kola, a koji se može naći u gotovo svakom elektronskom uređaju (kompjuteri, serveri, monitori, štampači, fotokopir mašine, telekomunikacioni sistemi i uređaji, medicinska oprema, bankomati, i sl.). Ovo takođe uključuje upravljačke panele, mrežne kompjutere, itd.

POREĐENJE RELEVANTNIH STANDARDA KOJI OBRADUJU HARMONIKE

Postoji veliki broj standarda i preporuka koji se bave harmonicima i njihovim uticajem na mrežu i elemente mreže, ali su za potrebe obrade rezultata merenja koja su predmet ovog rada korišćeni sledeći:

TABELA 1 – SPISAK STANDARDA

1.	IEEE Standard 519 - 2014	IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
2.	IEC 61000-2-2	Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems (published in 2002.)
3.	Kahramaa Distribution Planning Manual Recommendation G5-4	Planning Levels for Harmonic Voltage Distortion and the Connection of Nonlinear Equipment to Transmission System and Distribution Networks in the United Kingdom

Izvor harmonika u napojnoj mreži jesu nelinearna opterećenja. Usled ekonomskih ograničenja i efikasnosti primenjenih mera za smanjenje uticaja harmonika, nije uvek moguće kontrolisati harmonike tako da efekat uzrokovan postojanjem nelinearnih potrošača apsolutno bude eliminisan u svakoj tački u celom sistemu. Može se zaključiti da je uticaj harmonika u mreži neizbežan ali je potrebno ograničiti ga u meri u kojoj je to moguće i opravdano postavljanjem granica za vrednosti određenih harmonijskih indikatora (naponskih i strujnih).

Najčešće korišćen standard za proučavanje harmoijskih izobličenja jeste IEEE 519 (1). Prema (1), filozofija primenjena prilikom definisanja određenih granica za harmonike je sledeća:

- 1) Ograničiti injektiranje struje harmonika koje potiču od individualnih potrošača tako da ne izazovu neprihvatljiva naponska izobličenja u toku normalnog rada sistema;
- 2) Ograničiti ukupna harmonijska izobličenja naponskog signala u tački napajanja od strane distributera.

Naponska izobličenja jesu funkcija ukupne injektirane struje harmonika i impedanse sistema za svaku od frekvencija harmonika. Zato treba ograničiti struje harmonika za svaki potrošač individualno uzimajući u obzir njegovo opterećenje, tj. veći potrošači imaju strožije granice pošto čine veći udeo potrošnje sistema. Cilj ograničavanja strujnih harmonika je da se naponska izobličenja zadrže u prihvatljivim granicama.

Imajući u vidu gore navedene principe, može se zaključiti da se vrednost strujnog THD(I) najčešće koristi za identifikaciju nelinearnog potrošača, a da se vrednost naponskog THD(U) koristi za definisanje nivoa „harmonijskog zagađenja“ u sistemu/mreži.

Praktična primena (1) sastoji se u sledećem:

- 1) Vrednost naponskog THD(U) u tački povezivanja sa distributivnom mrežom (glavne razvodne table) koristiće se za poređenje sa vrednostima definisanim u standardima;
- 2) U slučaju merenih visokih vrednosti THD(U) u tački povezivanja sa distributivnom mrežom, vrednosti strujnog THD(I) koristiće se da se identifikuju nelinearni potrošači.

U tekstu koji sledi date su granične vrednosti za strujne i naponske harmonike prema relevantnim standardima nabrojanim u Tabeli 1.

Da bi se definisala ograničenja strujnih harmonika, standard IEEE 519 koristi odnos struje kratkog spoja i maksimalne struje opterećenja da bi se odredila veličina potrošača i njegov potencijalni uticaj na naponska izobličenja u mreži. Odnos ove dve struje računa se u tački priključenja objekta na distributivni sistem (eng. „*point of common coupling – PCC*“). Manja vrednost odnosa dve struje ili mreže sa većom impedansom imaju manje granične vrednosti za strujne harmonike kako bi se naponska izobličenja zadržala u dozvoljenim granicama. U okviru (1), date su tri različite tabele za različite naponske nivoe. Imajući u vidu da su sva merenja rađena za nominalni napon od 415 V, u tabeli ispod nalaze se definisane granične vrednosti preuzete iz (1):

TABELA 2 – GRANIČNE VREDNOSTI STRUJNIH HARMONIKA ZA NOMINALNI NAPONSKI NIVO OD 120 V DO 69 kV DATE U PROCENTIMA OD I_L

Individualni strujni harmonici (neparni umnošci)^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h \leq 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
<20^c	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1	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

^aParni harmonici ograničeni su na 25 % od definisanih vrednosti za neparne harmonike

^bDistorzija signala struje koja uzrokuje pojavu jednosmerne komponente, npr. polutalasnih ispravljači, nisu dozvoljeni.

^cSva oprema za proizvodnju električne energije ograničena je na gore definisane vrednosti distorzije strujnog signala bez obzira na stvarni odnos I_{sc}/I_L gde je

I_{sc} =maksimalna vrednost struje kratkog spoja u tački priključenja (PCC)

I_L =maksimalna vrednost struje opterećenja (osnovni harmonik) u tački priključenja (PCC) pri normalnim radnim uslovima

Granične vrednosti iz Tabele 2 određene su pod pretpostavkom da postoji raznolikost u strujnim harmonicima injektiranim od strane više različitih potrošača. Raznolikost se ogleda u postojanju različitih strujnih harmonika kao i u načinu injektiranja (različit vremenski profil talasa). Uvažavajući raznolikost, granice za individualne strujne harmonike su usvojene tako da naponski harmonici ne prelaze vrednosti definisane u Tabeli 3 ispod. Tabela 3 preuzeta je iz (1).

TABELA 3 – GRANIČNE VREDNOSTI DISTORZIJE NAPONSKIH TALASA

Nominalni napon V u tački priključenja (PCC)	Individualni naponski harmonici (%)	Ukupna harmonijska izobličenja THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1.0 \text{ kV} \leq V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} \leq V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 ^a

^aVisokonaponska mreža može imati vrednost THD od 2 % gde je uzrok ove vrednosti visokonaponski priključak jednosmerne struje čiji će se efekat redukovati u tačkama u mreži gde će se povezivati budući korisnici.

Standard IEEE 519 definiše maksimalnu dozvoljenu vrednost naponskog THD za niskonaponske mreže ($V \leq 1.0 \text{ kV}$) od **8 %**.

Standard IEC 61000-2-2 (objavljen 2002.) takođe definiše preporučene granične vrednosti naponskih harmonika. U niskonaponskim mrežama te granice su definisane kao u tabeli ispod. Tabela 4 preuzeta je iz (2).

TABELA 4 – GRANIČNE VREDNOSTI INDIVIDUALNIH NAPONSKIH HARMONIKA

Neparni harmonici Nedeljivi sa 3		Neparni harmonici Deljivi sa 3		Parni harmonici	
Individualni harmonici h	Granične vrednosti [%]	Individualni harmonici h	Granične vrednosti [%]	Individualni harmonici h	Granične vrednosti [%]
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
$17 \leq h \leq 49$	$2.27 \times (17/h) - 0.27$	$21 < h \leq 45$	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25 \times (10/h) + 0.25$

NAPOMENA: Vrednosti date za neparne harmonike koji su deljivi sa 3 primenjuju se i na harmonike nulte komponente struje. Takođe, u trofaznim sistemima bez neutralnog provodnika ili bez prisustva monofaznih potrošača, vrednosti trećeg i devetog harmonika mogu biti dosta manje od definisanih graničnih vrednosti, zavisno od neuravnoteženosti opterećenja sistema.

Prema internom standardu distributera električne energije u Kataru „Kahramaa Distribution Planning Manual Recommendation G5-4“, koji je ustvari preuzet britanski standard za planiranje nivoa harmonika u distributivnoj i prenosnoj mreži i preporuke za priključenje nelinearnih potrošača, definisana je maksimalna dozvoljena vrednost naponskog THD za niskonaponske sisteme (0.4 kV) i iznosi **5 %**. U tabeli ispod dat je pregled graničnih vrednosti, preuzeta iz (3).

TABELA 5 – GRANIČNE VREDNOSTI DISTORZIJE NAPONSKIH TALASA

Nominalni napon u tački priključenja (PCC)	Ukupna harmonijska izobličenja (THD)
400V	5%
6.6, 11 and 20kV	4%
22kV to 400kV	3%

Poređenjem standarda IEEE 519 i IEC 61000-2-2, maksimalne dozvoljene vrednosti za najčešće najdominantniji peti harmonik napona strožije su definisane standardom IEEE 519. Upravo zato se usvaja kao granična vrednost za peti harmonik napona vrednost definisana IEEE 519 standardom, dok se za ostale više naponske harmonike usvaja vrednosti iz standarda IEC 61000-2-2 (tabela 4).

Vrednost naponskog THD je prema internom standardu distributera električne energije 5 %, dok je prema IEEE 519 8 %. Usvoja se kao granična vrednost za naponski THD 5% u svim takama merenja (ne samo u tačkama priključenja) te je primenjeni kriterijum na strani sigurnosti.

S obzirom na to da nisu poznate vrednosti struje kratkih spojeva u tačkama priključenja, primeniće se samo kriterijum na naponske harmonike u svim tačkama merenja. U slučaju da izmereni parametri prevazilaze dozvoljene granice, pristupiće se analizi individualnih strujnih harmonika i faktora TDD.

REZULTATI MERENJA

Merenja su rađena u periodu od tri meseca, u dve etape, na 40 različitih lokacija:

1. Prva etapa obuhvata dvodnevna merenja (48 h) sprovedena na dovodu glavnih razvodnih tabli koje se napajaju direktno sa distributivnog transformatora 11/0.4 kV (period odabiranja: 1 min, ukupno 17 merenja),

2. Druga etapa obuhvata kratkotrajna merenja od 15 min na dovodima podrazvoda (period odabiranja: 3 s, ukupno 23 merenja).

Lokacije merenja u prvoj fazi predstavljaju zapravo mesto priključenja objekata potrošača na distributivnu mrežu. Za potrebe analize, mereni su sledeći parametri kvaliteta električne energije:

- Fazni naponi,
- Fazne struje,
- Struja neutralnog provodnika,
- Snaga (aktivna, reaktivna i prividna) po fazi i ukupna,
- Faktor snage,
- Individualni naponski harmonici do 25. reda,
- Individualni strujni harmonici do 25. reda,
- Naponski THD,
- Strujni THD.

Merenja su rađena u letnjem periodu kada objekti potrošača imaju najveću potrošnju električne energije (zbog velikog broja rashladnih jedinica), te su zabeleženi rezultati dobar indikator realnog stanja u mreži. U tabeli ispod date su prosečne vrednosti merenih parametara: aktivna snaga, faktor snage, naponski THD i struja u neutralnom provodniku. U tabeli 6 je takođe data i maksimalna zabeležena vrednost merenog naponskog THD kako bi se proverilo da li je manja od najveće dozvoljene vrednosti od 5 %.

TABELA 6 – REZULTATI MERENJA

MERENJE BR.	ETAPA	OZNAKA PANELA	P[KW]	PF	THD _v [%] (avg)	THD _v [%] (max)	I _N [A]
1.	I	SS/1 – Tx1	343.3	0.81	0.38	0.76	31.4
2.	I	SS/1 – Tx2	644.2	0.87	0.44	0.64	3.45
3.	I	SS/2 – Tx1	471.8	0.89	1.11	2.03	4.36
4.	I	SS/2 – Tx2	596.6	0.86	1.02	1.55	23.6
5.	I	SS/3 – Tx1	591.2	0.85	0.81	1.17	45.5
6.	I	SS/4 – Tx1	413.9	0.96	1.51	2.00	132.4
7.	I	SS/4 – Tx2	581.1	0.97	1.13	1.44	102.6
8.	I	SS/5 – Tx1	755.5	0.94	1.29	1.56	122.9
9.	I	SS/6 – Tx1	353.1	0.85	0.85	1.23	57.7
10.	I	SS/7 – Tx1	73.03	0.66	0.69	0.89	13.7
11.	I	SS/8 – Tx1	385.3	0.81	0.58	0.71	50.1
12.	I	SS/8 – Tx2	401.1	0.86	0.71	1.45	71.7
13.	I	SS CSSD – Tx1	268.2	0.77	0.75	0.88	43.9
14.	I	Engineering SS – Tx1	143.9	0.79	0.80	1.17	51.8
15.	I	SS Car Park – Tx1	296.6	0.86	0.75	1.05	84.0
16.	I	SS Blood Donor Unit – Tx1	73.2	0.82	0.87	1.35	23.0
17.	I	SS Training Center – Tx1	225.1	0.83	0.90	1.13	56.7
18.	II	SS/5 – GSB LEVEL 1 (IV) N	114.7	0.84	1.50	2.08	20.7
19.	II	SS/5 – GSB LEVEL 1 (VIII) N	72.03	0.94	1.72	2.14	25.4
20.	II	SS/5 – GSB LEVEL 1 (II) E	82.31	0.92	1.40	1.91	20.8
21.	II	SS/5 – GSB LEVEL 1 (V) N	50.76	-0.99	1.51	1.88	36.7

MERENJE BR.	ETAPA	OZNAKA PANELA	P[KW]	PF	THD _V [%] (avg)	THD _V [%] (max)	I _N [A]
22.	II	SS/5 – GSB TS (V) E1	133.7	0.97	1.74	2.17	50.6
23.	II	SS/5 – GSB TS (V) E2	163.1	0.95	1.58	1.89	21.1
24.	II	SS/5 – SB1 XRN	10.51	0.99	1.62	2.35	6.62
25.	II	SS/5 – GSB TOWER D1N	67.27	0.98	1.73	1.98	28.9
26.	II	SS/5 – GSB TOWER D3N	33.73	0.99	1.73	2.11	18.0
27.	II	SS/4 – GSB TS (IV) 1E	155.4	0.90	2.40	3.22	49.0
28.	II	SS/4 – GSB TS (IV) 2E	155.4	0.94	1.73	3.05	58.7
29.	II	SS/4 – GSB LEVEL 1 (I) N	81.00	0.94	2.31	3.02	37.1
30.	II	SS/4 – GSB LEVEL 1 (X) N	62.63	0.84	2.31	2.95	27.0
31.	II	SS/4 – GSB LEVEL 1 (VI) N	44.16	0.97	1.60	2.62	47.2
32.	II	SS/4 – GSB TOWER B1N	67.41	0.98	2.48	3.19	34.3
33.	II	SS/4 – GSB TOWER B3N	73.83	0.99	2.33	3.03	26.4
34.	II	SS/4 – GSB 28	27.49	0.75	2.10	2.66	10.5
35.	II	SS/8 – SMB-OP-GE1	38.27	1.00	0.67	1.29	12.6
36.	II	SS/8 – SMB-OP-FE	14.34	-0.98	1.29	1.38	13.9
37.	II	SS/8 – SMB-OP-TE	10.09	-0.99	1.25	2.04	10.8
38.	II	SS/8 – SMB RAD	18.49	0.83	0.81	1.92	1.51
39.	II	SS/6 – ESMDB-5427-001	17.87	-0.98	0.98	1.05	17.1
40.	II	SS/6 – SMDB-5427-001	28.33	0.99	0.88	0.99	35.7

Na osnovu izmerenih parametara može se zaključiti da su sve vrednosti naponskog THD u dozvoljenim granicama i da sa aspekta harmonika objekti potrošača zadovoljavaju kriterijume. U tabeli ispod date su kao primer izmerene vrednosti individualnih harmonika za glavni razvod u transformatorskoj stanici SS/4 (merenje br. 6 iz Tabele 6).

TABELA 7 – REZULTATI MERENJA INDIVIDUALNIH NAPONSKIH HARMONIKA (MERENJE BR: 6)

Individualni harmonici h	Izmerene vrednosti [%]	Harmonic order h	Harmonic voltage [%]	Harmonic order h	Harmonic voltage [%]
2	0.04	10	0.03	18	0.01
3	0.99	11	0.37	19	0.07
4	0.03	12	0.01	20	0.01
5	0.44	13	0.29	21	0.08
6	0.02	14	0.01	22	0.01
7	0.43	15	0.07	23	0.05
8	0.03	16	0.01	24	0
9	0.75	17	0.06	25	0.06

Na osnovu izmerenih vrednosti u Tabeli 7 može se zaključiti da su sve vrednosti individualnih naponskih harmonika u dozvoljenim granicama. Na isti način provereni su rezultati preostalih 39 merenja.

ZAKLJUČAK

Na osnovu urađenih merenja i prikazanih rezultata zaključuje se da objekti potrošača i napojna mreža nisu ugroženi sa aspekta harmonika. Međutim, neophodno je voditi računa u budućnosti prilikom priključenja novih potrošača ili proširenja napojnih kapaciteta. U slučaju da se priključuju novi nelinearni potrošači neophodno je blagovremeno ponoviti merenja na tim razvodima kako bi se ispitala i proverila vrednost naponskog THD.

Mere predostrožnosti koje je neophodno preduzeti:

- Periodična inspekcija opreme i kontrola kvaliteta električne energije su neophodni da bi se osigurao efikasan rad cele mreže. Posebno je potrebno primeniti ove korake prilikom povezivanja novih potrošača ili kada su izmerene vrednosti parametara blizu dozvoljenih granica.
- Sistemi besprektnog napajanja (UPS) i frekventni regulatori (VFD) se najčešće nude na tržištu sa ugrađenim filterima kao opcija. Kako bi se izbegao negativan efekat ovih uređaja na sistem u celini, preporučeno je da se oni kupuju sa filterima. Takođe, može se uzeti u razmatranje kupovina ovih uređaja sa inverterima nove generacije (18 ili 24-pulsni).
- Napajanje osetljive medicinske opreme preporučeno je da bude sa sistema besprektnog napajanja (sa ulaznim filterom). Takođe je poželjno da se obezbede posebni izvodi za svaki uređaj medicinske opreme kako se strujna kola ne bi mešala sa ostalim potrošačima.

LITERATURA

1. IEEE, 2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 519
2. IEC, 2002, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems, 61000-2-2
3. Kahramaa, 2014, Distribution Planning Manual Recommendation G5-4
4. IEC, 2002, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, 61000-4-7
5. Radakovic Z. i Jovanovic M., 2008: "Specijalne električne instalacije", Akademska misao
6. Department of Health / Estates and Facility Division UK, 2007, Health Technical Memorandum 06-01, Part A: „Electrical services supply and distribution“