

VIŠI HARMONICI U ELEKTRIČNOJ MREŽI FTN-a: MERENJA I ANALIZE UTICAJA RADA RAČUNARSKOG CENTRA

V. Katić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija
Z. Čorba, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija
S. Mujović, Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, Podgorica, Crna Gora
I. Dimitrijević, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija
M. Denić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

UVOD

Krajem osamdesetih godina prošlog veka došlo je do brzog širenja personalni računara (PC), kada su oni po ceni postali pristupačni za veliki broj korisnika. Danas ovi, ali i lap-top računari, tablet računari i drugi prateći uređaji (štampači, skeneri i sl.) su postali deo svakodnevnog života i nalaze se u velikom broju u upotrebi. Ovi i drugi elektronski uređaji malih snaga ($I_n < 16A$), se najčešće priključuju na mrežu preko napajачke jedinice, koja je realizovana ili kao linearni ili kao prekidački napajач. Na slici 1 je predstavljena uprošćena verzija ovog sklopa primenjenog za napajanje PC-a. U oba slučaja mrežni napon se prvo ispravlja pomoću monofaznog ispravljača u mosnom (Gretzovom) spoju (AC/DC), a zatim filtrira elektrolitskim kondenzatorom veće ili manje kapacitivnosti. Ovakav sklop se od strane mreže vidi kao nelinearni potrošač. Kao posledica toga, ulazna (mrežna) struja je impulsnog karaktera (zbog periodičnog „punjenja“ kondenzatora), odnosno bogata je višim harmonicima.

Rad ovih, ali velikog broja drugih, naročito industrijskih nelinearnih potrošača, te njihov uticaj na pojavu i prostiranje viših harmonika u distributivnom, pa i prenosnom elektroenergetskom sistemu (EES), doprineo je da se interesovanje istraživača i stručnjaka okrene ka kvalitativnim problemima rada EES-a, koji su poznati pod jedinstvenim imenom – kvalitet električne energije [1]. Viši harmonici su samo jedan aspekt kvaliteta, ali onaj koji ima značajne negativne efekte, pa se već niz godina konstantno izučava i prati.

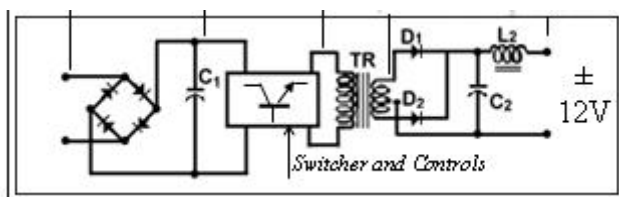
Velika koncentracija računara i računarske opreme u okviru kampusa Univerziteta u Novom Sadu postavila je pitanje njihovog, eventualno, nepovoljnog uticaja na mrežu i ostale potrošače. Ovo pitanje je naročito došlo do izražaja na Fakultetu tehničkih nauka (FTN), gde je u sklopu razvoja Računarskog centra (RC) već od početka devedesetih godina instaliran veliki broj PC-a. Tokom rada ovog centra uočene su pojave pregorevanja osigurača i visokog zagrijavanja provodnika i kablovskih krajeva u glavnom razvodnom ormanu FTN-a. To je iniciralo da se preduzmu preventivne mere u smislu rekonstrukcije instalacije, ali i da se krene u opsežna istraživanja bazirana na merenju nivoa viših harmonika i formiranju adekvatnih simulacionih modela malih potrošača [2, 3, 4].

Računarski centar FTN-a se sastoji od 7 računarskih laboratorija, prostorije za administratore i hola izdvojenog u tri segmenta. Na slici 2 je data opisna šema sa prikazanim brojem računara u svakoj laboratoriji. Svi računari se napajaju iz posebnog ormara (PCC), koji je kabelom PP-Y 5x4mm² vezan na glavni razvodni orman (MDP), a zatim dalje kabelom PP-YAS 4x150 mm² na izvod u distributivnoj

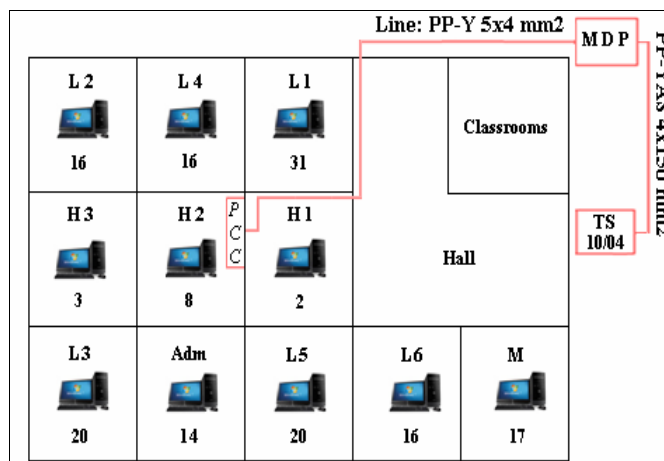
TS „ZKI“ 10/0,4 kV. Nakon uočavanja pomenutih problema sa instalacijom, veza PCC – MDP je rekonstruisana, tj. postavljen je snažniji kabel PP-Y 5x25 mm².

Merenja su rađena u više navrata u dugom vremenskom intervalu od 1993. do 2009. god. na različitim mestima u sistemu (PCC ili MDP ili TS). Tokom tih mernih sesija ukupan broj operativnih računara je porastao sa 109 (2003. god.) na 120 (2004. god.), te na 167 (2009. god.). Merenja su uključivala i uticaje drugih malih potrošača u centru (osvetljenje i klima uređaje). Neki rezultati ovih merenja su ranije objavljivani na domaćim i međunarodnim konferencijama i časopisima [2-12]. Rezultati mjerenja su pokazali značajno prisustvo viših harmonika u faznim strujama, ali i izraženu pojavu struje u neutralnom vodu, dok uticaj na širu distributivnu mrežu nije ozbiljan. Postavljen je i pojednostavljen model, koji je potvrdio uočen problem i ukazao na potrebu poboljšanja instalacije. Zaključeno je i da bi dalji porast broja instalisanih računara doveo do nedopustivo visokog nivoa harmonika i još izraženijih negativnih efekata.

Cilj ovog rada je da prikaže pregled ključnih rezultata ranijih i da predstavi karakteristične rezultate poslednjih (2009.god.) istraživanja, te da kroz komparaciju dođe do zaključaka o stepenu uticaja ovog tipa nelinearnih uređaja na nivo viših harmonika u mreži.



Slika 1. Napajčka jedinica PC računara ili sličnog elektronskog uređaja

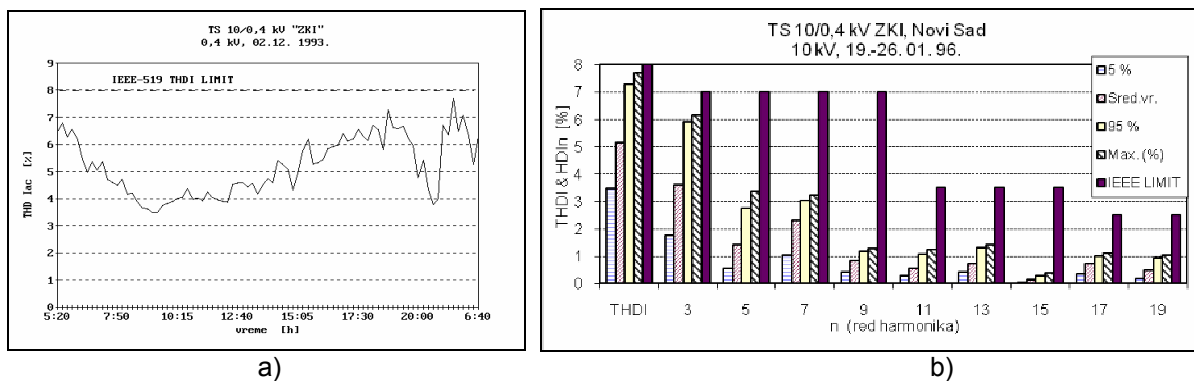


Slika 2. Raspored i broj računara u RC sa načinom povezivanja centra na distributivnu mrežu

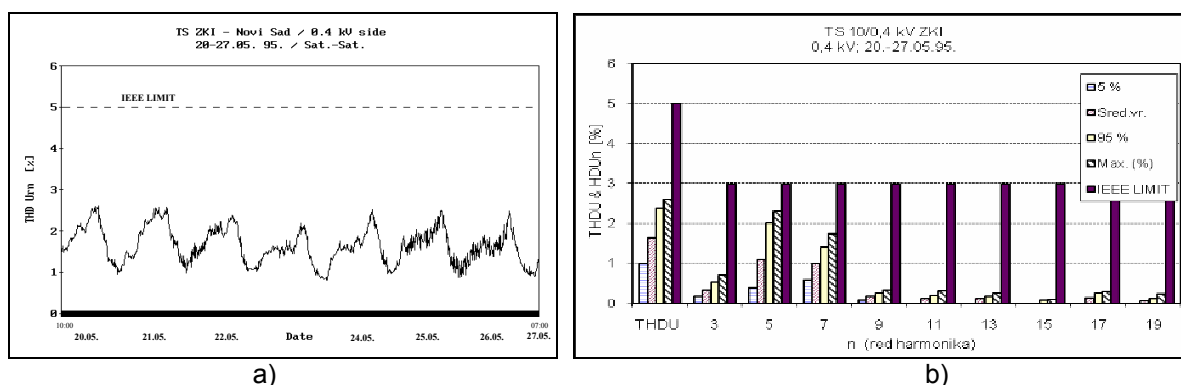
REZULTATI MERENJA HARMONIKA 1993 i 1995/96. GOD.

Prva merenja viših harmonika u univerzitetskom kampusu nisu se direktno odnosila na uticaj Računarskog centra. Merene su vrednosti harmonijskih faktora napona i struje (Ukupne harmonijske distorzije – THDU i THDI i pojedinačnog harmonijskog izobličenja – HDIn i HDUn) na izvodima distributivne transformatorske stanice TS ZKI, 10/0,4 kV, 2 x 630 kVA, koja se nalazi u delu grada Liman 1 i napaja potrošače u univerzitetskom kompleksu. TS ima 11 NN izvoda i snabdeva električnom energijom 4 objekta fakulteta, 2 objekta studentska doma, poslovni objekat sa više firmi i velikim računskim centrom i javnu rasvetu. Aparati su delom omskog karaktera (osvetljenje, grejalice, mali bojleri i slično), a delom induktivnog karaktera (fakultetski laboratorijski aparati, fluorescentne sijalice, živine sijalice javne rasvete i slično). Od elektronskih aparata sa pretvaračima i izvorima viših harmonika je značajan izvor računski centar, veliki broj personalnih računara, razni laboratorijski aparati, televizori, muzički uređaji i sl.

Rezultati merenja, prezentovani u [2,3], pokazali su da su u univerzitetskom kampusu, tj. na sabirnicama TS ZKI, zabeležene značajne vrednosti ukupne harmonijske distorzije struje, a posebno 3., 5. i 7. harmonika, ali te vrednosti nisu premašile dozvoljene limite (slika 3). Slično se može zaključiti i za harmonike napona, koji su značajno ispod limita (manji od 50% dozvoljenog), osim 5-tog harmonika koji je oko 70% limita (slika 4). Za limite su korišćene vrednosti iz američkog standarda IEEE 519 [1].



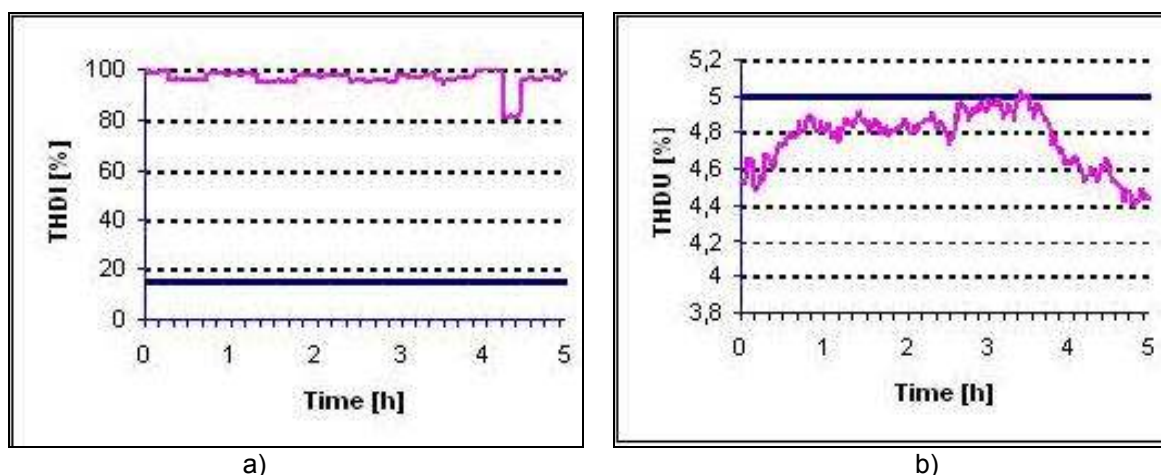
Slika 3. Rezultati merenja harmonica struje (THDI i HDI) na TS "ZKI": a) Tokom jednog dana (02.12.1993.) i b) Staistička obrada 7-dnevnih merenja (19-26. 01. 1996)



Slika 4. Rezultati merenja harmonica napona (THDU i HDU) na TS "ZKI": a) Tokom jednog dana (02.12.1993.) i b) Staistička obrada 7-dnevnih merenja (19-26. 01. 1996)

REZULTATI MERENJA HARMONIKA 2003/04. GOD.

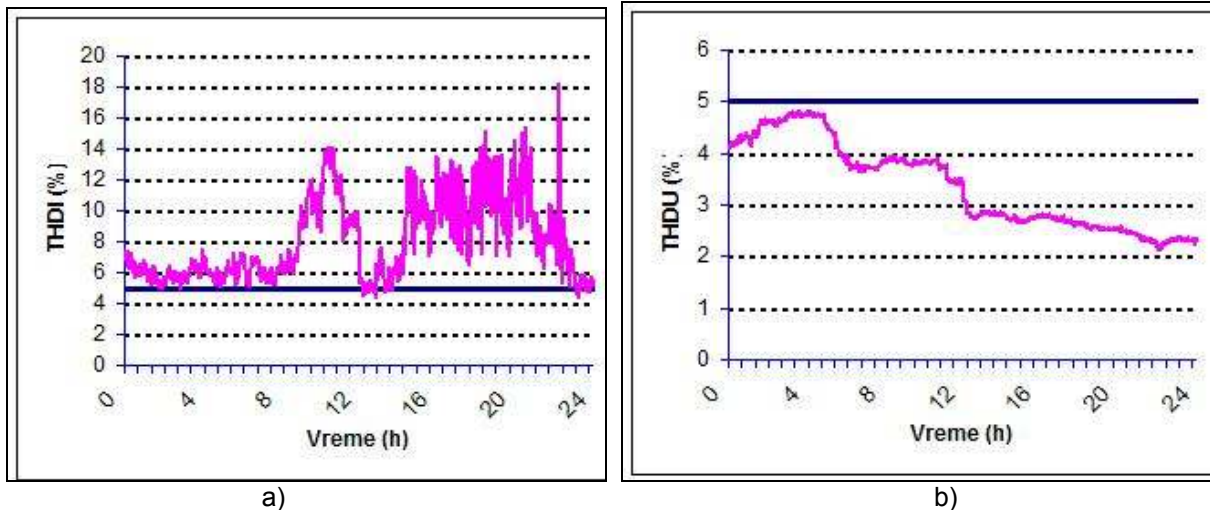
U računarskom centru se nalazilo prvo 109 (2003. god.), a zatim je taj broj povećan na 120 računara (2004. god.). Osim računara, fluorescentnog osvetljenja i par klima uređaja, nije bilo nikakvih drugih potrošača. Merenja su vršena na mestu priključenja samih računara (PCC na slici 2), ali nije praćeno koliko je računara radilo u svakom trenutku [5, 6, 7, 8]. Rezultati, prikazani na slici 5, pokazuju visoke vrednosti THDI, kao i znatne za THDU. Opet je za poređenje poslužio standard IEEE 519. Analiza je pokazala da je treći harmonik dominantan i da je znatno iznad limita u sve tri faze. Međutim, kod napona je to slučaj sa 5-tim harmonikom.



Slika 5. Satne promene na sabirnici PCC: a) THDI, b) THDU; (puna, tamna linija-IEEE 519 limit)

Za poređenje sa prethodnim rezultatima pogodniji su rezultati merenja na glavnom razvodnom ormanu (na slici 2 – MDP). Ovi rezultai prikazani su na slici 6. Uočava se različiti nivo THDI tokom

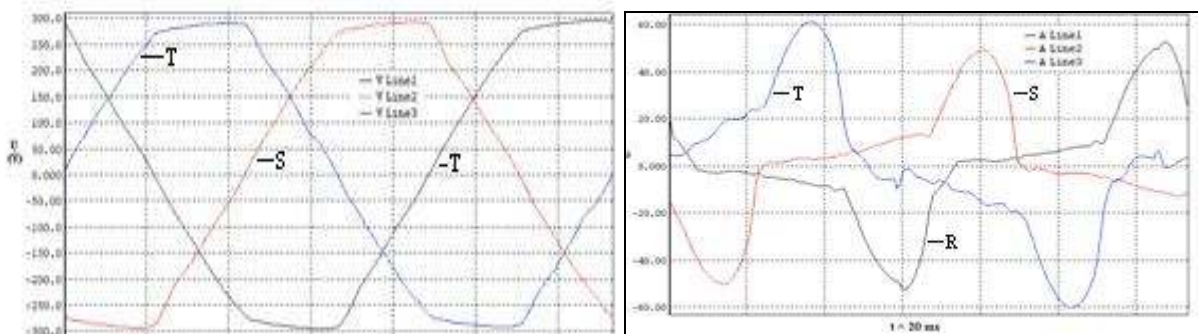
noćnih i dnevnih sati, odnosno varijacija THDI između 6% i 14%. Ako se ovi rezultati uporede sa onim sa slike 3, vidi se da je nivo harmonika struje znatno viši (duplo), što je delimično posledica različitog mesta merenja (slabljenje na kabeu PP-YAS utiče da je na smanjenje nivoa harmonika na sabirnicama TS ZKI), ali i povećanog opterećenja. Slično se može zaključiti i za harmonike napona, s tim što su sada oni na granici ili veoma blizu graničnim vrednostima prema standardu IEEE 519 (THDU=2 - 4,8%). Ipak, u ovom slučaju se ne može izdvojiti uticaj samo PC-ja, jer su prilikom merenja bili priključeni i drugi potrošači, tako da su za kvalitetno zaključivanje bila potrebna dalja istraživanja.



Slika 6. Dnevne promene na sabirnici MDP: a) THDI b) THDU; (puna, tamna linija-IEEE 519 limit)

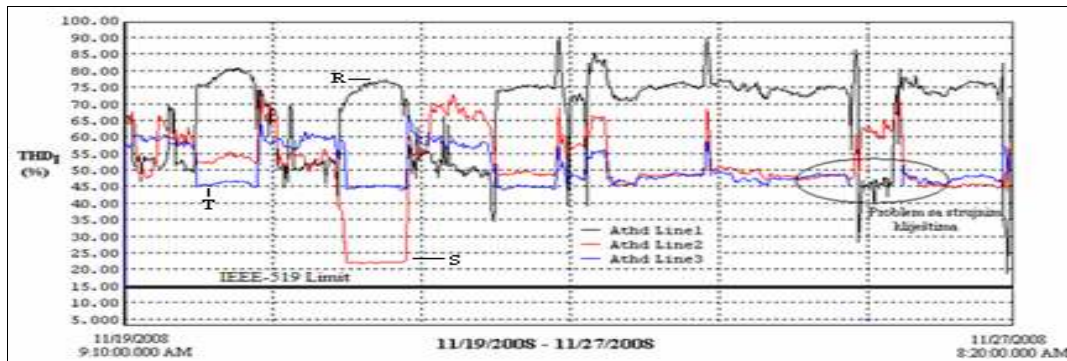
REZULTATI MERENJA HARMONIKA 2008. GOD.

Merenja sprovedena tokom jeseni 2008. godine bila su do tada najbolje pripremljena. Imala su za cilj da razdvoje uticaj PC-a, fluorescentnog osvetljenja i klima uređaja u Računarskom centru na nivo viših harmonika i da ih konkretno izmere [10]. Rezultat toga bio je da je uočen interesantan fenomen: sa povećavanjem broja PC-a talasni oblici napona sve više poprimaju trapezoidni oblik (zaravnjenje na vrhu sinusoide se širi), dok nasuprot tome talasni oblici struje gube impulsni karakter, tj. impulsi se šire i polako približavaju sinusoidnom talasnom obliku. Na slici 7 su prikazani talasni oblici napona i struje u sve tri faze za slučaj kada je priključeno 163 računara.

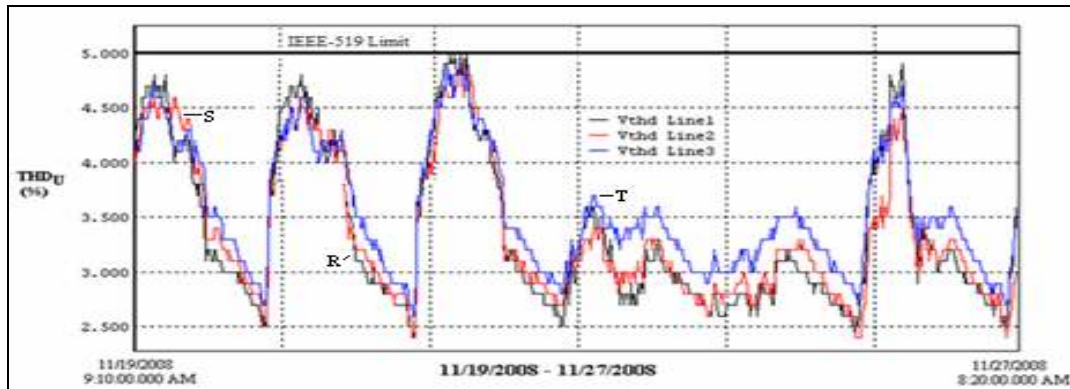


Slika 7. Vremenski oblici napona (levo) i struja (desno) na sabirnici PCC.

Harmonijskom analizom ovih talasnih oblika i merenjem u intervalu od 8 dana dobijene su promene faktora THDI i THDU tokom mernog perioda. Ovi rezultati prikazani su na slikama 8 i 9. Vidi se da je sada ukupna harmonijska distorzija struje između THDI=45% i THDI=80%, dok je izobličenje napona u granicama od 5% (THDU=2,5 – 5%). U odnosu na prethodna merenja, rezultati ukazuju na smanjenje THDI i blago povećanje THDU. Dok se ovaj drugi zaključak i mogao očekivati, prvi predstavlja iznenađenje i zahteva dalje analize. Odgovarajuća numerička i matematička analiza je pokazala da su gornji rezultati opravdani, a detaljnija objašnjenja postupka analize data su u [10, 11, 12].



Slika 8. Promene THDI tokom mernog perioda 19-27. 11. 2008. na sabirnici PCC.



Slika 9. Promene THDU tokom mernog perioda 19-27. 11. 2008. na sabirnici PCC.

REZULTATI MERENJA HARMONIKA 2009. GOD.

Veoma značajan zaključak prethodnih merenja da se sa povećanjem broja PC-a u grupi ukupno harmonijsko izobličenje struje smanjuje i da je u funkciji broja računara, bio je motiv da se merenja ponove, da bi se ova tvrdnja proverila.

Novo merenje viših harmonika Računarskog centra sprovedeno je na sabirnicama unutrašnjih instalacija (PCC). Izvršeno je u periodu od 11.-18. 12. 2009. god., a uzorci (odbirci) su uzimani u intervalima od 10 minuta, u skladu sa IEC Standardom 61000-4-7. Posmatrane su i memorisane efektivne vrednosti 3 napona i 3 struje, kao i vrednost struje nultog voda. Merni uređaji su vršili on-line izračunavanja vrednosti viših harmonika, kao i aktivne i reaktivne snage. Pored toga, izračunavani su harmonijski indikatori (THD_U , THD_I , HD_U , HD_I) i njihovo poređenje sa postojećom regulativom (harmonijskim standardima i preporukama). Time je dobijena slika o stepenu izobličenja napona i struje, odnosno o nivou kvaliteta električne energije.

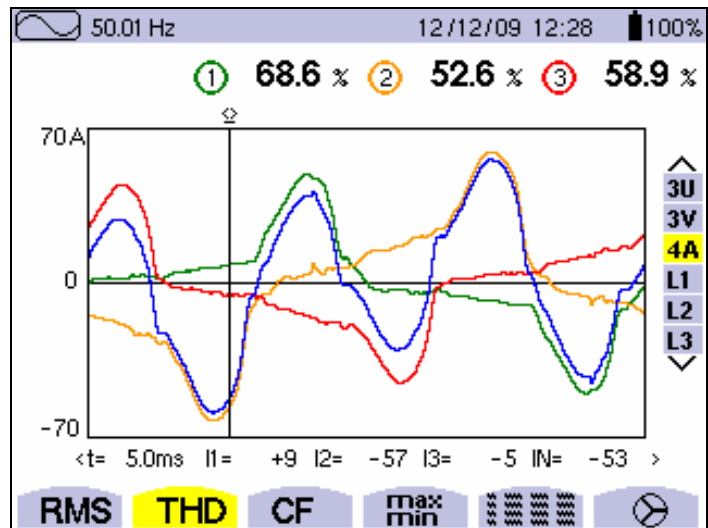
Situacija u kojoj je urađeno novo merenje je bila sledeća: razvodni orman RORC1 (PCC na slici 2), koji je uzet u razmatranje kako bi se utvrdio uticaj računara i pripadajuće računarske opreme na parametre kvaliteta električne energije, nalazi se na trećem spratu Nastavnog bloka Fakulteta tehničkih nauka, u hodniku Računskog centra. Napaja se iz glavnog razvodnog ormara GRO (MDP na slici 2) vodom PP-Y 5x25 mm², sa osigurača od 63 A. Iz ovog ormara se napajaju devet razvodnih tabli smeštenih u laboratorijama računskog centra: L1, L2, L3, L4, L5, L6, sala za administratore, hodnik računskog centra, kao i sala M koja se nalazi izvan računskog centra i pripada Institutu za matematiku i fiziku. Veza između ormara RORC1 i pomenutih razvodnih tabli se ostvaruje napojnim vodovima PP-Y 5x4 mm². Glavno opterećenje ovih razvodnih tabli su računari i računarska oprema, kao i osvetljenje u laboratoriji L6 i sali M. Dispozicija opreme ovog ormara data je na slici 10.

Iz razvodnog ormara RORC1 se napaja ukupno 177 računara i to 146 računara u računarskom centru, 16 računara u sali M, koja se nalazi izvan računskog centra i 15 računara servera. Najveća sala ovog centra je sala L1, sa 32 personalna računara, potom sala L3 sa 21 personalnim računarom, dok su ostale sale približno iste veličine i istog broja priključenih računara. U administratorskoj sali su prisutni računari serveri (15 računara ovog tipa), koji su neprekidno u funkciji i koji su opremljeni adekvatnim UPS uređajima. Uglavnom su zastupljeni najsavremeniji tipovi računara sa procesorima "Pentium IV" i TFT monitorima. Izuzetak je hodnik (mini-sala), gde se nalaze računari sa procesorima "Pentium II" i TFT monitorima.

Rezultati merenja su uglavnom potvrdili ranije pomenute zaključke. Na slici 11 prikazan je talasni oblik struje sve tri faze, kao i struje neutrala (plava linija). Uočava se sličnost u talasnom obliku sa rezultatima datim na slici 7, kao i u nivou THDI.

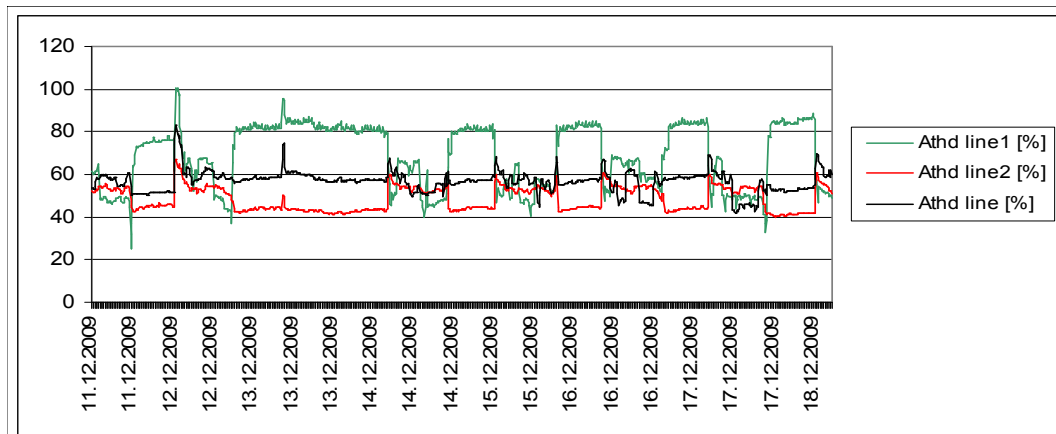


Slika 10. Dispozicija opreme u glavnom razvodnom ormanu

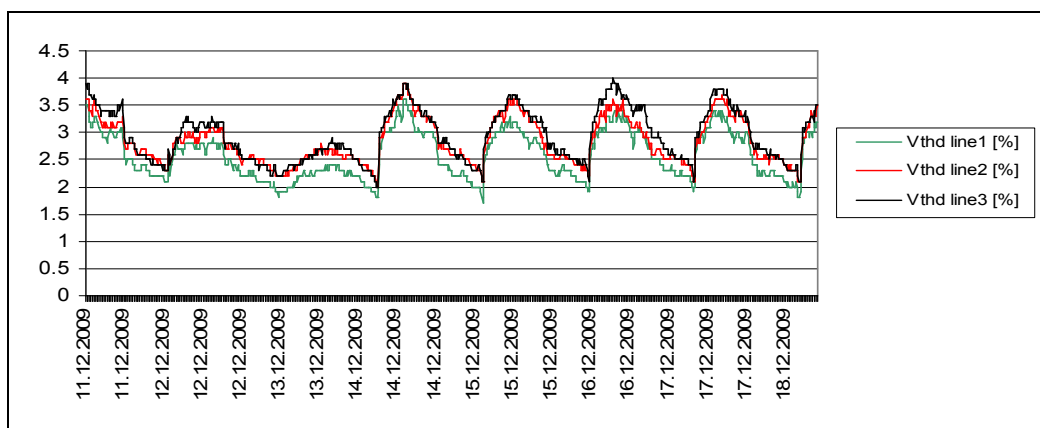


Slika 11. Vremenski oblici struja tokom razmatranog mernog perioda na sabirnici PCC.

Nivo ukupne harmonijske distorzije struje i napona date je na slikama 12 i 13. Može se uočiti da je zabeležena ukupna harmonijska distorzija struje između THDI=45-80%, sa povremenim pikovima i do THDI=100%, dok je izobličenje napona u granicama od 5% (THDU=2 – 4%).



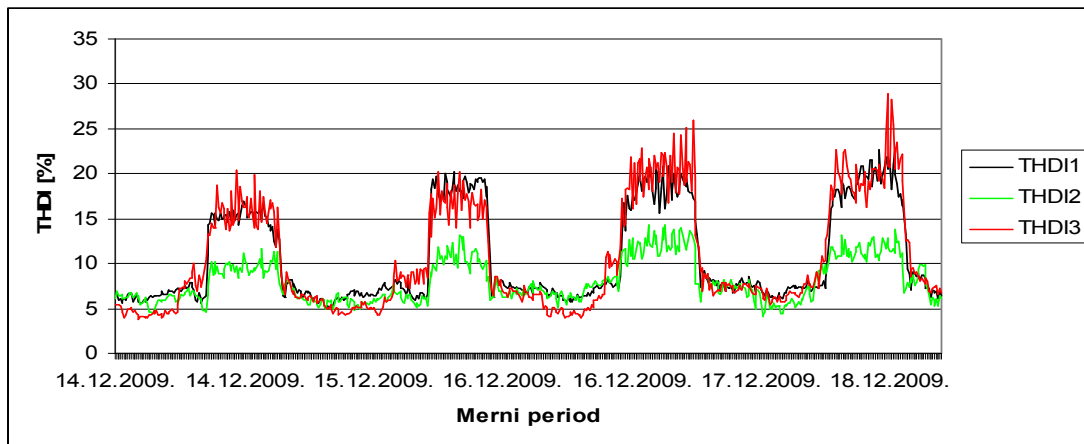
Slika 12. Promene THDI tokom mernog perioda 11-18. 12. 2009. na sabirnici PCC.



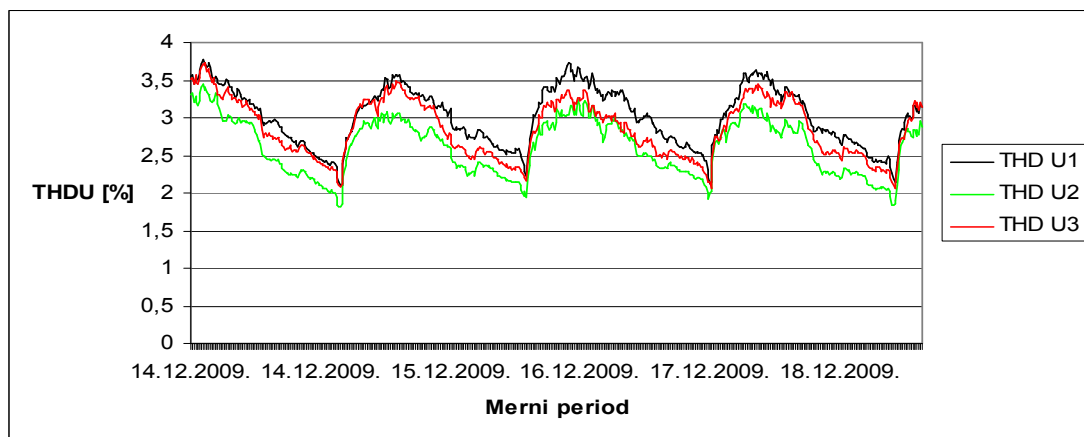
Slika 13. Promene THDU tokom mernog perioda 11-18. 12. 2009. na sabirnici PCC.

Poređenjem dobijenih rezultata možemo zaključiti da se vrednosti individualne harmonijske distorzije nisu značajno promenile dok je vrednost ukupne harmonijske distorzije nešto manja od vrednosti zabeležene 2008 godine. Tokom posmatranog mernog intervala vrednosti faktora THDI faznih struja konstantno i višestruko prevazilaze limit (15%) definisan standardom IEEE 519. Dakle, dobijeni rezultati se više-manje poklapaju sa prethodnim, a zaključak o smanjivanju THDI sa povećanjem broja PC-a je potvrđen.

Za prostiranje viših harmonika u distributivnu mrežu značajni su i rezultati merenja u glavnom razvodnom ormanu (MDP na slici 2), tim više što takvi ili slični postoje i sa prethodnih merenja. Zbog tehničkih ograničenja, nije bilo moguće jednovremeno merenje i na sabirnicama PPC i MDP, tako da su merenja na ovoj drugoj lokaciji obavljena u periodu 14-18. 12. 2009. Rezultati merenja viših harmonika struje, odnosno promene faktora ukupne harmonijske distorzije faznih struja tokom mernog perioda, dati su na slici 14, dok sličan dijagram, ali za napon na slici 15.



Slika 14. Ukupno harmonijsko izobličenje faznih struja na sabirnici MDP.



Slika 15. Ukupno harmonijsko izobličenje faznih napona na sabirnici MDP.

Prema standardu IEEE 519, maksimalna dozvoljena vrednost THDI iznosi 15%, pa se može zaključiti da se faza S nalazi unutar dozvoljenih vrednosti, dok se faze R i T nalaze na granici dozvoljene vrednosti, a u nekim trenucima i premašuju tu vrednost. Za razliku od toga, THDU je sve vreme ispod limita od 5%.

Poređenjem sa rezultatima prethodnih merenja može se uočiti blago povećanje THDI, čak i povremeno premašivanje graničnih vrednosti za karakteristike ove mreže ($THDI_{LIM}=15\%$). S druge strane, vrednosti THDU su ostale unutar limita.

ZAKLJUČAK

Višegodišnje praćenje nivoa viših harmonika u mreži FTN-a, a naročito harmonika Računarskog centra, čiji rezultati iz 2009. god. su prvi put prikazani u ovom radu, pokazalo je da grupisanje velikog broja računara može dovesti do značajnog harmonijskog izobličenja struje i

napona. Ovaj zaključak se ne odnosi samo na sabirnicu gde su direktno povezani ovi računari, već prvenstveno na glavni razvodni orman, gde su vezani i ostali potrošači na FTN-u.

Ako se kao reper koristi američki standard IEEE 519, rezultati pokazuju da su kritičnija strujna izobličenja (zabeleženi su iznosi $THDI=5-25\%$), koja su često bila iznad dozvoljenih graničnih vrednosti ($THDI_{LIM}=15\%$). Izmerena naponska izobličenja bila su uglavnom unutar limita ($THDU_{LIM}=5\%$). S druge strane, srpski standard SRB EN50160, koji je isti sa evropskim EN50160, ne daje limite za THDI, već samo za THDU. Ova vrednost je $THDU_{LIM}=8\%$. Za sve izmerene vrednosti u dosadašnjim merenjima ona je iznosila ispod 5%, tj. duboko unutar dozvoljenog opsega.

Negativni efekti, koji su se u prvom periodu razvoja centra ogledali u izbujanju osigurača i pregrevanju instalacije, smanjeni su rekonstrukcijom, tj. povećanjem poprečnog preseka napojnog kabela. Merenja nakon toga su ukazala na blago smanjenje daljeg povećanja izobličenja napona na sabirnicama u glavnom razvodnom ormanu FTN-a, iako je broj računara u centru stalno rastao.

Drugi značajan efekat istraživanja je da je uočena zakonitost u vezi smanjivanja THDI sa povećanjem broja računara u grupi. Ovaj rezultat posebno je elaboriran u drugim radovima autora [11, 12] i potvrđen je ponovnim merenjima 2009. god. On ima značaja ne smo prilikom grupisanja računara, nego i bilo kojih potrošača malih snaga, koji koriste napojne jedinice slične konstrukcije.

LITERATURA

1. Katić, V., 2002, „Kvalitet električne energije–viši harmonici“, Monografija, Fakultet tehničkih nauka, Edicija: Tehničke nauke – Monografije, br. 6, Novi Sad.
2. Katić, V., Katić N., 1995, "Merenje viših harmonika u distributivnoj nisko-naponskoj mreži", XXII Savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije JUKO-CIGRE, Vrnjačka Banja, R31-23.
3. Katić, V., 2001, „Istraživanje viših harmonika u distributivnoj mreži – kratak pregled i iskustva“, *Elektroprivreda*, God.54, Broj 3, pp.72-79
4. Katić, V., Dumnić, B., Mujović, S., Radović, J., 2004, "Effects of Low Power Electronics & Computer Equipment on Power Quality at Distribution Grid–Measurements and Forecast", IEEE - International Conference on Industrial Technology–ICIT'04, Hammamet (Tunis), Vol. 2, pp. 585-589.
5. Dumnić, B., Ostojić, D., Katić, V., 2005, "Power Quality in Case of a Large Number of Nonlinear Devices - Measurements and Forecast", International PCIM Conference 2005-Power Electronics, Intelligent Motion, Power Quality, Nuremberg (Germany), pp.336-341, Proceedings on CD ROM.
6. Dumnić, B., Katić, V., Dujić, D., 2004, "Influence of personal computers on the power quality, a case study", 1st Regional Conference on Electricity Distribution i IV Jugoslovensko savetovanje o elektrodistributivnim mrežama, JUKO CIRED, Herceg Novi, R.2-12, CD-ROM.
7. Ivanović, Z., Katić, V., Vekić, M., Dumnić, B., 2006, "Effects of harmonics in University of Novi Sad supply network – a case study of Faculty of Technical Sciences", 2nd Regional Conference on Electricity Distribution i V Jugoslovensko savetovanje o elektrodistributivnim mrežama, JUKO CIRED, Zlatibor, R.2.10, CD-ROM.
8. Vekić, M., Katić, V., Ivanović, Z., 2006, "Effects of computer center operation on harmonics in distribution network", 2nd Regional Conference on Electricity Distribution i V Jugoslovensko savetovanje o elektrodistributivnim mrežama, JUKO CIRED, Zlatibor, R.2.9, CD-ROM.
9. Radović, J., Katić, V., Mujović, S., Radulović, V., 2009, "Uticaj malih nelinearnih potrošača na kvalitet napona u distributivnim mrežama", I Savetovanje Crnogorskog komiteta CIGRE, CG-KO CIGRE, Pržno, Grupa C4, Rad br. R-C4-08, CD ROM.
10. Mujović, S., Katić, V., Čorba, Z., Radović, J., 2009, „Mjerenje i analiza uticaja rada računarskog centra na nivo viših harmonika u mreži“, *Elektroprivreda*, God.62, Broj 4, pp.67-82.
11. Katić, V., Mujović, S., 2010, „Uticaj grupisanih malih potrošača na kvalitet električne energije“, *Tehnika-Elektrotehnika*, God. LXV, Broj 3, pp.63-70.
12. Katić, V., Mujović, S., Radović, J., 2010, „Effects of PC Clusters on Network Harmonics Distortion“, 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment - OPTIM 2010, "Cheile Gradistei" Complex, Moieciu, Brasov County, Romania, pp.226-231.