

ANALIZA IZVORA VIŠIH HARMONIKA U DISTRIBUTIVNIM MREZAMA

J.Vuletić, Fakultet za elektrotehniku i informacione tehnologije. Skopje. Makedonija
R.Ackovski, Fakultet za elektrotehniku i informacione tehnologije. Skopje. Makedonija
M.Todorovski, Fakultet za elektrotehniku i informacione tehnologije. Skopje. Makedonija

1. UVOD

Problemi sa kvalitetom električne energije se intenzivno proučavaju već duže vremena. Oblast kvaliteta električne energije proučava, između ostalog, deformacije sinusne krive napona i struja u mrežama radi prisustva viših harmonika.

Problem sa prisustvom viših harmonika u elektroenergetskim mrežama postoji odavno. U početku se istraživao uticaj nesinusoidnosti napona i struja na rad električnih mašina, na pojavu smetnji kod telefonskih instalacija kao i problemi u radu kondenzatorskih baterija namenjeni za kompenzaciju reaktivne snage. Danas, sa sve većim prisustvom uređaja i potrošača u električnim mrežama čiji je rad baziran na primeni energetske elektronike kao i masovni prodor disperzirane proizvodnje, problemi sa harmonicima u postojećim distributivnim mrežama postaju sve veći i komplikovaniji za rešavanje.

Prisustvo harmonika u električnim mrežama izaziva brojne probleme. Među značajnijim problemima spadaju sledeće: preopterećenje elemenata mreže što uslovljava njihovu denominaciju, povećane gubitke snage i energije u mreži, mogućnost pojave rezonanse u sistemu, mogućnost ispada ili trajnog oštećenja kondenzatorskih baterija, pogrešno registrovanje električnih veličina u sistemu i dr.

Sa gledišta potrošača, prisustvo viših harmonika uzrokuje nepravilan rad, prevremeno / zakašnjeno uključivanje glavnih energetskih elemenata kod energetskih konvertora vodjeni iz mreže, resetovanje / restartiranje određenih proizvodnih procesa, smanjen eksploatacioni vek opreme itd. Iz ovih razloga potrošači su danas naročito zainteresovani za kvalitet isporučene električne energije.

U radu je prikazan postupak za procenu širenja viših harmonika generisanih u distributivnim mrežama putem proračuna razvijen u okviru rada [1]. Najpre su prikazani modeli izvora viših harmonika pomoću strujnih generatora odgovarajućih amplituda i faznih pomaka, za svaki harmonik prisutan u spektru razmatranog izvora. Modelovani su tipski izvori harmonika generisani suvremenim uređajima u industriji. Ovi se modeli koriste kao "ulaz" kod proračuna režima rada mreže pomoću kompjuterskog programa izradjenog specijalno za tu namenu. Kao ulaz u programu se mogu koristiti i izvori harmonika dobijeni na bazi snimanja talasnog oblika struja nekim uređajem i uneti u program kako skup mernih tačaka (data samples), da bi se zatim, pomoću Furijeve analize, izračunali potrebni parametri za određivanje njihovih karakteristika.

Prikazani su modeli elemenata distributivnih mreža koji se koriste pri rešavanju mreže u složeno-periodičnom režimu. Koristi se princip superpozicije za rešavanje mreže za svaki harmonik posebno. Mreža se pomoću programa, izradjen u Matlab, rešava za svaki harmonik posebno u prostoperiodičnom režimu, koristeći pritom metodu nezavisnih napona i pogodnosti pri radu sa retkim matricama. Na kraju se pojedinačna rešenja, dobijena za svaki harmonik zasebno, kombinuju u jedno jedinstveno rešenje u vremenskom domenu, pri čemu se dobijaju vremenski oblici napona i struja za svaki

elemenat mreže kao i ukupna harmoniska distorzija gore pomenutih veličina. Na osnovu ovih podataka, možemo proceniti uticaj harmoniskih izvora na oblik napona i struja u mreži.

Opisani postupak je korišćen za rešavanje konkretnih distributivnih mreža u različitim režimima rada pri različitim uklopnim stanjima. Razmatrani su slučajevi sa različitim stepenom opterećenja u mreži kao i sa različitim lokacijama izvora harmonika u mreži i njihovog načina rada. Prikazani su rezultati koji su potrebni za ocenu kvaliteta isporučene električne energije u pogledu viših harmonika, prema evropskoj normi EN 50160. Na osnovu dobijenih rezultata predložene su i mere sa kojima se kvalitet isporučene električne energije dovodi na prihvatljivi nivo putem najmanjih intervencija u mreži.

2. IZVORI VIŠIH HARMONIKA I NJIHOVO MODELIRANJE

Generisanje viših harmonika u mrežama je posledica rada dva različita tipa potrošača. Prvi je tip linearnih potrošača, dok u drugi tip spadaju svi nelinearni potrošači. Linearni potrošači u mrežama generišu više harmonike iz konstruktivnih razloga (to su, na primer, uređaji koji sadrže magnetno jezgro) i kad rade u neki specifičan radni režim.

Nelinearni potrošači se karakterišu time da kroz njih ne teče sinusna struja čak ni onda kada su priključeni na napon čisto sinusnog oblika. Pored toga njihova se impedansa ne odlikuje konstantnom vrednošću već je ona promenljiva. Kao direktna posledica nelinearnosti ovi uređaji u mrežama unose harmonisko izobličenje koje se može grupisati na sledeći način:

- Izobličenje sinusne krive napona koja, razložena u Furijev red, sadrži osnovnu komponentu (harmonik sa frekvencijom jednako onoj energetskog sistema) i ostale komponente sa frekvencijom jednaku ceobrojnih multipla osnovne frekvencije sistema. Ovaj je slučaj najčešći i najkarakterističniji;
- Izobličenje sinusne krive napona koja, razložena u Furijev red, sadrži osnovnu komponentu i ostale komponente sa frekvencijom jednaku submultipla osnovne frekvencije sistema;
- Aperiodično izobličenje sinusne krive napona. Za ovaj tip izobličenja možda postoji razvoj u Furijev red. Karakteristični predstavnici ovog tipa izobličenja u mrežama su uređaji koji koriste princip rada lučnog pražnjenja (elektrolučne peći, fluorescentne cevi, živine i natrijumove sijalice i sl.). Kod ovih potrošača se može postići periodično izobličenje ako se radni uslovi održavaju konstantni.

Transformatori u električnim mrežama su uređaji koji mogu da generišu više harmonike pod određenim radnim uslovima kao sto su: režim preopterećenja i režim kada su naponi u mreži veći od nominalnih. Razlog postojanja izobličenja kod ovih elementa mreže je magnetno jezgro i njegova nelinearna kriva magnetiziranja. Na zasićenje jezgra, osim gorepomenutih radnih uslova, utiču i neki drugi faktori kao što je, na primer, geomagnetno inducirane struje.

Električne mašine takodje generišu više harmonike, ali u mnogo manjim razmerama u poredjenju sa transformatorima zbog postojanja vazdušnog razmaka. Razlog generisanja harmonika kod njih je nesavršena izvedba i male neregularnosti statorskih i/ili rotorskih kanala kao i neravnomerna raspodela statorskog namotaja. Rad mašine u uslovima zasićenja jezgre takodje doprinosi u generaciji viših harmonika.

Elektrolučne peći su kategorija specijalnih potrošača jer oni, zbog principa njihovog rada, predstavljaju ozbiljan izvor harmonika u mreži. Generacija viših harmonika kod njih zavisi od radnog režima, izvedbe same peći kao i od tačke priključenja u mreži. Predstava njihovog harmoniskog spektra preko diskretnih vrednosti je samo tehnička aproksimacija koja se koristi u praksi. U realnosti, talasni oblici napona i struja ovih potrošača su stohastičke veličine i aperiodične funkcije vremena. Kontinuirani spektar medju dominantnim harmonicima elektrolučne peći ima prirodu Bel-šuma.

Kod električne rasvete sa fluorescentnim cevima efikasnost rasvete se povećava kada sijalice rade sa povećanom frekvencijom što podrazumeva upotrebu elektronskih pretvarača koji poboljšavaju efikasnost dok neke izvedbe vrše i kompenzaciju reaktivne snage. Upotreba ovih pretvarača uzrokuje generaciju viših harmonika u mrežama (zbog principa rada pretvarača, struja je bogata sa harmonicima deljivim sa 3 kao i sa ostalim neparnim harmonicima koji su ceobrojni multipli osnovne frekvencije sistema). Pojedinačna kompenzacija sijalica se retko primenjuje jer su strujna kola rasvete relativno većih dužina pa se kao posledica formira kompleksno LC kolo za koje postoji verovatnoća da ispuni uslove rezonanse u blizini trećeg harmonika ([12]).

Elektronski energetski pretvarači se smatraju za primarni izvori viših harmonika. U normalnim radnim režimima oni generišu više harmonike koji su ceobrojni multipli osnovne frekvencije sistema. Pri nekarakterističnim radnim režimima kao što su procesi komutacije, parcijalno opterećenje, naponska nesimetrija, neuniformna raspodela upravljačkih impulsa i slično, oni generišu nekarakteristične harmonike u mreži (harmonicima sa frekvencijom koja je neceobrojni multipl osnovne frekvencije sistema). Kod ovih uređaja harmoniski spektar zavisi od principa rada, radnog režima, simetričnosti izvedbe i sl.

Kod nekih od pretvarača kod kojih izvedba to dozvoljava, spektar harmonika se može oblikovati pomoću upravljačkog algoritma.

Treba istaći da ovo nisu jedini izvori harmonika u električnim mrežama. Sve veća implementacija disperzirane generacije električne energije još više će pogoršavati situaciju sa višim harmonicima, jer se skoro svaki obnovljiv izvor električne energije u mreži priključuje preko energetskog pretvarača koji, zavisno od principa rada, u mrežu injektira različite harmonike. Niskonaponske distributivne mreže, koje su bar dosad uživali tretman mreža sa linearnim potrošačima, sad već postaju uporedljivi (sa aspekta harmoniskih izvora) sa distributivnim mrežama koje napajaju potrošače koji su izvori harmonika. Već sada, a još više u budućnosti, izazov za inženjere će biti prilagodjavanje postojećih i projektiranje novih distributivnih mreža za potrebe linearnih, a osobito nelineranih potrošača.

2.1. Modelovanje izvora viših harmonika

Postoje više načina modelovanja izvora viših harmonika. Svaki od njih je različit po složenosti i nameni analize. Uobičajen (i ujedno jedan od najjednostavnijih) način modelovanja izvora viših harmonika je njihova predstava kao strujne generatore. Ovaj način modelovanja je dosta prihvaćen i primenjivan, jer obuhvata najveći deo mogućih radnih režima jednog potrošača-izvora viših harmonika. Model strujnog generatora vodi računa o amplitudama i faznim pomacima svakog harmonika, izražene kao funkciju od faznog pomaka napona u čvoru priključenja. Fazni se pomaci ne moraju uzimati u obzir kod proračuna ako u mreži postoji samo jedan dominantan izvor harmonika.

Model strujnog generatora se formira tako da amplituda h -og harmonika iznosi $1/h$ od amplitude osnovnog, dok fazni pomak h -og harmonika iznosi $\theta_h = h\theta_1$, gde je θ_1 fazni pomak napona u čvoru u kome je priključen izvor harmonika. Ako se model generatora formira na osnovu skupa snimljenih tačaka, onda se amplitude i fazni pomaci pojedinih harmonika automatski dobijaju pomoću Furijeve analize unutar programa.

Ovim se načinom modelovanja mogu vršiti analize u mrežama gde postoje i po nekoliko izvora viših harmonika. Nedostatak ovog modela je što ne obuhvata interakciju mreže i potrošača-izvora viših harmonika pri nekarakterističnim režimima rada, prilikom procesa komutacije i prilikom parcijalnog opterećenja. U nekim se slučajima model može primeniti za analizu mreže u režimu parcijalnih opterećenja. Pri tome se strujne injekcije pojedinih harmonika i njihovih faznih pomaka u modelu trebaju prilagoditi kako bi odgovarale datom opterećenju, a samu analizu nakon toga treba sprovesti više puta. Model postaje neupotrebljiv u slučajevima sa izrazitom naponskom nesimetrijom i izrazitog harmoniskog izobličenja napona u mreži.

Ostali modeli koji se koriste pri modeliranju izvora viših harmonika su:

- model izvora viših harmonika predstavljen kao Nortonovo ekvivalentno kolo u vremenskom ili frekventnom domenu;
- matični model izvora viših harmonika (preko ABCD parametara);
- model izvora viših harmonika predstavljen u frekventnom domenu i postavljen u mreži koja se rešava u vremenskom domenu;
- model izvora viših harmonika predstavljen u vremenskom domenu.

Načini modelovanja su nabrojani po složenosti pri čemu je ovaj zadnji način modelovanja jedan od najsloženijih i najzahtevnijih sa aspekta poznavanja problematike i metodologije modelovanja. Ceo se sistem zajedno sa izvorima harmonika predstavljaju pomoću sistema diferencijalnih jednačina i ne vrši se nikakva transformacija u bilo kakvom domenu. Model se može primenjivati u svaku harmonisku analizu bez ograničenja sa aspekta simetrije/nesimetrije, jednofaznog/trofaznog modela itd.

Izradjeni program sadrži ukupno devet tipskih izvora harmonika. Svaki od ovih izvora je predstavljen svojim karakterističnim harmoniskim spektrom (tabela 1). Zbog preglednosti, u tabeli 1 su za svaki tipski izvor harmonika prikazane amplitude (izražene u relativnim jedinicama od amplitude osnovnog harmonika struje) do 20-og harmonika. Program inače može da operira sa proizvoljnim brojem harmonika. Fazni pomaci svakog harmonika se automatski određuju u samom programu. Tipiski izvori koji se koriste u programu su:

- Šestopulsni trofazni ispravljač;
- Šestopulsni trofazni ispravljač sa velikim vrednostima upravljačkih uglova;
- Dvanajstopulsni trofazni ispravljač;
- PWM pretvarač sa velikim induktivitetom u jednosmernom stepenu;
- Indukciona peć napajana preko elektronskog pretvarača;
- Elektrolučna peć na jednosmerni napon;
- Aparat za zavarivanje;
- Uredjaji koji koriste SMPS (switch mode power supply) pretvarače za napajanje;
- Električna rasveta koja koristi visokofrekventne pretvarače;

Tabela 1 – Harmoniski spektri tipskih izvora harmonika u programi

Tip izvora	Red harmonika h								
	3	5	7	9	11	13	15	17	19
1	/	0.200	0.143	/	0.091	0.077	/	0.059	0.053
2	/	0.371	0.011	/	0.086	0.025	/	0.025	0.047
3	/	/	/	/	0.091	0.077	/	/	/
4	/	0.250	0.110	/	0.075	0.050	/	0.044	0.032
5	/	0.209	0.127	/	0.078	0.072	/	0.043	0.049
6	/	0.189	0.103	/	0.054	0.039	/	0.018	0.013
7	0.296	0.088	0.020	0.023	0.023	0.011	0.004	0.009	/
8	0.750	0.473	0.229	0.090	0.033	0.030	0.021	0.019	/
9	0.123	0.138	0.030	0.011	0.007	0.005	/	/	/

2.2. Modeli elemenata elektroenergetskog sistema i ostalih potrošača

Vodovi i energetska kablovi se u programu modeliraju pomoću odgovarajućih π -zamenskih šema. Pritom se njihova aktivna otpornost naknadno koriguje zbog uvaživanja skin efekta. Ostali se parametri proračunavaju na već dobro poznati način (na primer prema [11]). Formule za korekciju vrednosti liniskog otpora su preuzeti od [7] i glase:

$$R = R_{50\text{Hz}} \cdot \left(1 + \frac{0,646 \cdot h^2}{192 + 0,518 \cdot h^2} \right) \text{ kod nadzemnih vodova,} \quad (2.1)$$

$$R = R_{50\text{Hz}} \cdot (0,187 + 0,532 \cdot h^2) \text{ kod energetskih kablova,} \quad (2.2)$$

gde je h red harmonika. Transformatori se modeluju pomoću njihove I-zamenske šeme. Paraziti kapaciteti kod transformatora se ne uzimaju kod proračuna jer je dosadašnje iskustvo pokazalo da oni počinju imati značajniji uticaj tek kod frekvencija iznad 10 kHz. Parametri ekvivalentne šeme se proračunavaju prema [11]. Ekvivalentna otpornost u zamenskoj šemi modela se koriguje opet zbog uvaživanja skin efekta. Formula za korekciju vrednosti otpora je preuzeta od [7] i glasi:

$$R = R_{50\text{Hz}} \cdot h^{1,15}, \quad (2.3)$$

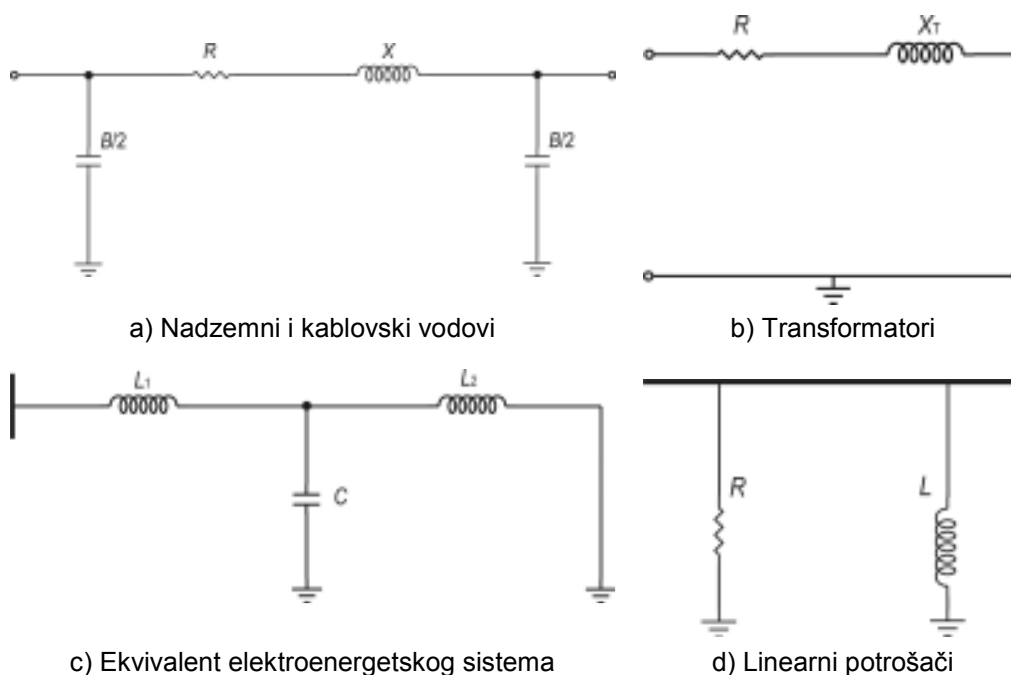
gde je h opet red harmonika. Ostali se potrošači u mreži modeliraju pomoću paralelnog RL kola. Ovim se ekvivalentom obuhvataju potrošači koji predstavljaju kombinaciju linearnih potrošača sa električnim motorima. Parametri ekvivalentnog kola se proračunavaju na osnovu podataka za aktivnu i reaktivnu snagu svakog od potrošača. Na osnovu toga određuju se parametri modela koristeći formule (2.4), preuzete od [7] koje glase:

$$R = \frac{U^2}{k \cdot P}, \quad L = \frac{U^2}{2\pi f \cdot k \cdot Q}, \quad k = 0,1 \cdot h + 0,9, \quad (2.4)$$

gde su P i Q aktivna i reaktivna snaga ekvivalentnog potrošača, U je napon u tački priključenja, dok je k je korekcionni faktor kojim se obuhvata uticaj električnih motora u potrošač. Ekvivalentni se otpor zatim dopunski koriguje radi uvaživanja skin efekta. Neki izvori literature (npr. [7]) predlažu korekciju u srazmernosti sa $h^{1/2}$ dok drugi, korekciju u srazmernosti sa $0,6h^{1/2}$. Pri svemu tome treba imati na umu da je modeliranje potrošača jos uvek aktivna tema istraživanja i da su ekvivalentni modeli samo aproksimacija kojom se jedan potrošač može dovoljno uspešno modelovati. To je tako jer se nikad ne zna procentualno učešće svakog pojedinog potrošača u grupi predstavljene preko ekvivalenta, dok se stepen opterećenja cele grupe može samo pretpostaviti, itd.

Elektroenergetski sistem se predstavlja svojim Tevenenovim ekvivalentom, t.j. pomoću svoje impedanse trofaznog kratkog spoja iza napona mreže. Za većinu harmoniskih analiza ova predstava ostatka elektroenergetskog sistema je sasvim dovoljna. U slučajima gde to nije tako, ostatak sistema se modelira pomoću T-ekvivalenta čiji se parametri određuju na osnovu podataka za serijsku i paralelnu rezonansu u tački gde se on postavlja.

Na slici 1 su predstavljeni ekvivalentni modeli svih elemenata sistema. To su modeli koji se koriste u programu za proračun harmoniskog izobličenja u mreži. Sam elektroenergetski sistem je u programu predstavljen svojim Tevenenovim ekvivalentom.



Slika 1 – Modeli elementa u sistemu i potrošača

3. METOD STRUJNIH IZVORA

Ovo je jedan od najpopularnijih metoda za harmonisku analizu električnih mreža. Zasniva se na linearnosti problema i primeni principa superpozicije pojedinih rešenja za svaki harmonik posebno. Za to je potrebno formiranje matrice admitansi sistema za svaki harmonik posebno (jer su admitanse frekventno zavisne), a zatim proračunavanje matrice relacije $\underline{Y} \times \underline{U} = \underline{I}$, za svaki harmonik koji je prisutan u mreži. Izvori viših harmonika se zapisuju u vektor struja za svaki harmonik za koji se mreža rešava. Sama se mreža rešava onoliko puta koliko ima harmonika. Nakon toga se parcijalna rešenja kombinuju u jedno jedinstveno rešenje. Svaki se proračun odnosi na jedan režim rada sistema u datom trenutku (snapshot scenario).

Metod je neiterativan tako da ima veoma male zahteve u računarskim resursima. Sasvim je uspešan kada se radi o slučajevima sa manjim brojem izvora visih harmonika. Kada se vrše proračuni u mrežama sa više od desetak izvora harmonika postavljenih na različitim lokacijama u mreži i kada postoje velika harmoniska izobličenja napona i struja mreži metod postaje nepouzdan. Sa malim modifikacijama izradjeni kompjuterski program se može prilagoditi da vrši proračune za više različitih režima.

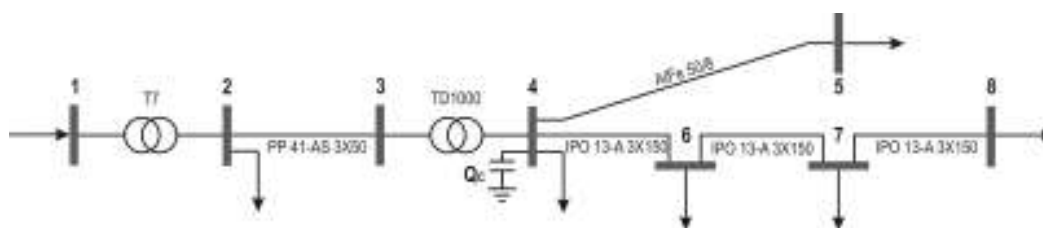
3.1. Primer

Prikazan je jedan primer distributivne mreže sa slike 2. Podaci o elementima mreže su dati u tabelama 2, 3 i 4. Kondenzatorska baterija, snage 100 kvar, je priključena u čvoru 4.

Podaci o transformatorima u mreži su sledeći:

T7: $U_{1n}/U_{2n} = 115/10,5$ kV/kV; $u_{k\%} = 11\%$; $\Delta P_{cun} = 100$ kW; $S_n = 20$ MVA,

TD1000: $U_{1n}/U_{2n} = 10/0,4$ kV/kV; $u_{k\%} = 6\%$; $\Delta P_{cun} = 13,5$ kW; $S_n = 1$ MVA.



Slika 2 – Prikaz distributivne mreže

Tabela 2 – Podaci o elementima mreže

Početni čvor	Krajnji čvor	Element	Dužina [km]
1	2	T7	/
2	3	PP 41-AS 3x50	1,5
3	4	TD1000	/
4	5	AlFe 50/8	0,15
4	6	IPO 13-A 3x150	0,10
6	7	IPO 13-A 3x150	0,15
7	8	IPO 13-A 3x150	0,10

Tabela 3 – Snage potrošača

Čvor	Aktivna snaga P [MW]	Reaktivna snaga Q [Mvar]
2	6.000	3.000
4	0.500	0.300
5	0.150	0.030
6	0.050	0.015
7	0.050	0.015
8	0.050	0.015

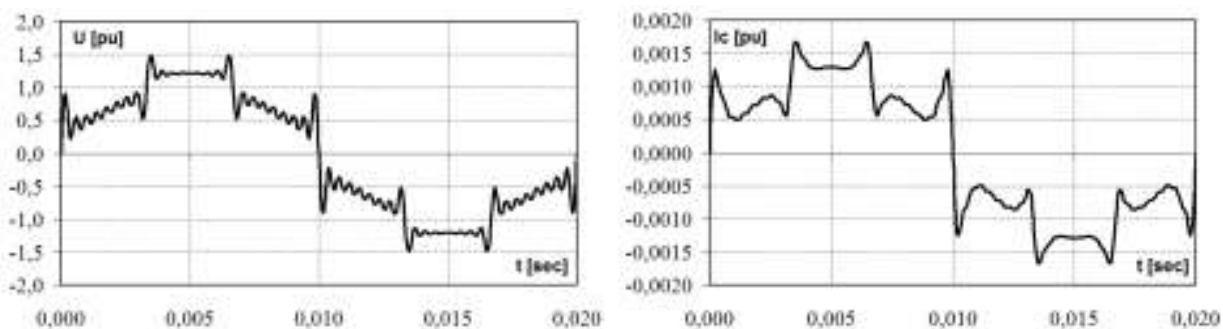
Tabela 4 – Izvori harmonika

Čvor	Tip harmoniskog izvora	Procentualni udel
5	1	100
6	1,8 i 9	50,30 i 10
7	1,8 i 9	50,30 i 10
8	1,8 i 9	50,30 i 10

Harmonisko izobličenje u napona i struja, makar i minimalno, u distributivnim mrežama je uvek prisutno. Da bi se uzeo u obzir uticaj harmonika u mreži primenjuju se četiri glavna postupka:

1. Elementi sistema se izrađuju tako da su predviđeni za rad u nesinusoidalnim uslovima. U protivnom primenjuje se postupak denominacije postojećih elementa mreže.
2. Primenjuju se pasivni filtri koji se postavljaju na odgovarajuće lokacije u mreži. U tu svrhu, kada je to izvodljivo, postojeće kondenzatorske baterije se mogu prilagodjivati u pasivne filtre.
3. Primenjuju se aktivni filtri, obično postavljeni uz samu opremu - izvor viših harmonika. Ponekad se aktivni filtri mogu kombinovati sa pasivnim filterima formirajući takozvane hibridne konfiguracije.
4. Primenjuju se alternativne metode kao na primer: rekonfiguracija mreže, multiplikacija faza, pojačanje mreže, reaktori, simetrisiranje i grupiranje potrošača u mreži, zamena postojećih pretvarača sa drugim koji odgovaraju istoj nameni ali generišu manji broj harmonika.

Harmoniska analiza mreže sa slike 2 je sprovedena pomoću prethodno opisanog programa za postojeće stanje i za nekoliko različitih scenarija: izvršeno je pojačanje mreže, zamena postojećeg pretvarača u čvoru 5 sa drugim, više pulsним pretvaračem i na kraju, postavljeni su pasivni filtri u određenim čvorovima mreže. Prikazani su oblici napona u čvoru 5 i struja kroz kondenzatorsku bateriju za razradjena scenarija kao i ukupno harmonisko izobličenje napona u čvorovima mreže i struje kroz kondenzatorsku bateriju. Radi preglednosti i prostornih ograničenja, prikazani su samo rezultati za osnovni scenario (kada nisu vršene nikakve intervencije u mreži sa aspekta harmoniske eliminacije) i za krajnji scenario kod kojeg su izvršeni svi neophodni zahvati kako bi nivo harmoniskog izobličenja u svim čvorovima mreže dovelo u granicama predviđenim evropskiom normom EN 50160.



a) Napon u čvoru 5

b) Struja kroz kondenzatorsku bateriju

Slika 3 – Oblik napona i struja u osnovnom scenariju

Čvor	Efektivna vrednost	Ukupno harmonisko izobličenje
	U_{eff} [kV]	THD $_{U\%}$ [%]
1	109.6186	0.05
2	9.7463	0.34
3	9.6717	0.50
4	0.3768	4.20
5	0.3558	26.28
6	0.3693	5.89
7	0.3621	8.11
8	0.3598	8.92

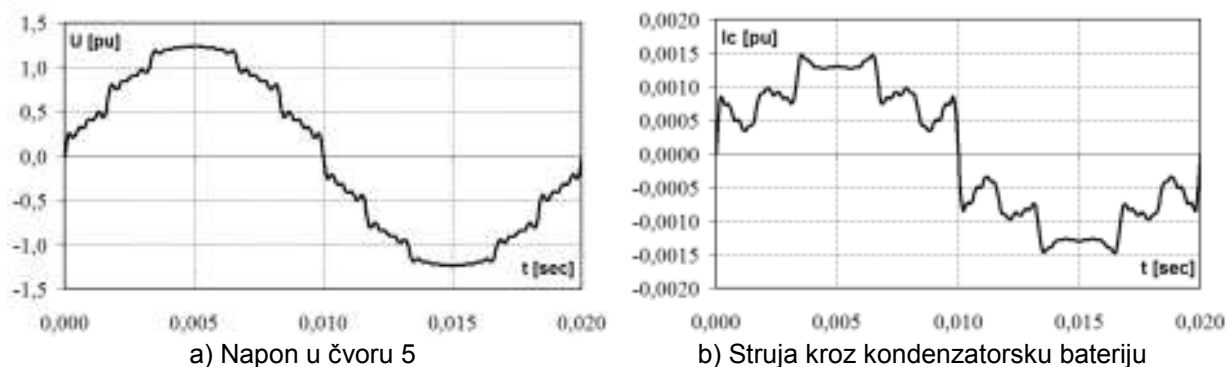
Čvor	Efektivna vrednost struje kroz kondenzatorsku bateriju	Ukupno harmonisko izobličenje struje kroz kondenzatorsku bateriju
	I_{effKB} [A]	THD $_{IKB\%}$ [%]
4	145.02	37.33

Tabela 5 – Naponi u mreži u osnovnom scenariju

Tabela 6 – Struja kroz kondenzatorsku bateriju

Na slici 3 su dati talasni oblici napona u čvoru 5, kao i struja kroz kondenzatorsku bateriju, dobijeni putem proračuna. U tabeli 5 i 6 su dati naponi u mreži i njihovo ukupno harmonisko izobličenje, kao i vrednost struje kondenzatorske baterije i njeno ukupno harmonisko izobličenje. Struja kondenzatorske baterije je namerno izabrana za prikazivanje jer je baterija, kao element u sistemu, najviše izložena negativnim uticajima harmonika. Sada, nakon analize, kada je situacija u mreži poznata sa aspekta postojanja viših harmonika, može se preći na primenu neke od mitigacijskih metoda. Pomoću izradjenog programa, kao što je i gore pomenuto, razradjene su varijante u kojima su primenjena rešenja i sa poboljšanim rezultatima, zavisno od primenjenog metoda za eliminaciju harmonika. Treba istaći da rešenje problema sa postojanjem viših harmonika u datoj mreži, nije jednoznačno. U većem broju slučajeva postoje više rešenja za dati problem. Koje će se njih primeniti, zavisi od tehno-ekonomske analize opravdanosti tih rešenja. U konkretnom slučaju, rešenje koje je proglašeno za konačno sadrži se u sledećim modifikacija: izvršiti pojačanje grane 4-5 sa energetskim kablom PP 41-AS 3×70 umesto postojnog vazdušnog voda sa AlFe 50/8 (u nekim se aplikacijama preporučuje udvostručivanje preseka napojnog voda kako bi se smanjili uticaji od viših harmonika) i zameniti postojeći šest-pulsni energetski pretvarač koji napaja potrošač u čvoru 5 sa odgovarajućim dvanaest-pulsnim. Ovo se rešenje pokazalo kao najadekvatnije za dovođenje vrednosti ukupnog harmoniskog izobličenja svih napona u mreži na nivo ispod 8% (u saglasnosti sa normom EN 50160).

Na slici 4 su dati oblici napona u čvoru 5 i struja kroz kondenzatorsku bateriju nakon navedenih modifikacija. U tabelama 7 i 8 su dati naponi i njihovo ukupno harmonisko izobličenje kao i vrednost struje kroz kondenzatorsku bateriju i njeno ukupno harmonisko izobličenje.



Slika 4 – Oblik napona i struja u konačnom scenariju

4. ZAKLJUČAK

U radu je dat sažeti pregled glavnih izvora harmonika u distributivnim mrežama. Prikazan je postupak za proračun i propagaciju viših harmonika u distributivnim mrežama pomoću računara. Opisani su modeli elemenata sistema, potrošača i izvora viših harmonika. Prikazan je ukratko i metod strujnih generatora koji se u proračunima koristi za određivanje napona u čvorovima mreže, za svaki harmonik posebno. Primenom principa superpozicije se rešenje kombinuje u jedinstveno i na taj način se dobija kompletno rešenje sa svim postojećim harmonicima.

Dat je kratak osvrt na najčešće korišćenim metodama za mitigaciju uticaja harmonika u mreži. Rad je ilustrovan analizom na konkretnom primeru distributivne mreže u kojoj postoji više izvora harmonika. Prikazani su i rezultati proračuna za jedno predpostavljeno scenarijo rada razmatrane distributivne mreže. Nakon toga se prikazani i rezultati koji se postižu nakon preduzimanja jednu od mera za smanjenje uticaja viših harmonika u mreži. Ta se mera dobija kombinacijom dva posebna načina smanjenja i eliminacije nekih od harmonika, opisane u krajnjem scenariju ublažavanja uticaja viših harmonika u mreži.

Čvor	Efektivna vrednost	Ukupno harmonisko izobličenje
	U_{eff} [kV]	THDU% [%]
1	109.6188	0.03
2	9.7464	0.22
3	9.6714	0.33
4	0.3767	2.80
5	0.3543	7.24
6	0.3691	4.56
7	0.3618	6.89
8	0.3595	7.72

Tabela 7 – Naponi u mreži u konačnom scenariju

Čvor	Efektivna vrednost struje kroz kondenzatorsku bateriju	Ukupno harmonisko izobličenje struje kroz kondenzatorsku bateriju
	I_{effKB} [A]	THDIKB% [%]
4	140.6421	26.73

Tabela 8 – Struja kroz kondenzatorsku bateriju

5. LITERATURA

- [1] J. Vuletić, 2010. "Analiza izvora viših harmonika i njihova raspodela u distributivnim mrežama". Magistarski rad (na makedonskom). ETF - Skopje.
- [2] J.Arillaga, N.R.Watson. 2003, *Power System Harmonics, Second Edition*, JohnWiley & Sons.
- [3] J.Arillaga, B.C.Smith, N.R.Watson, A.R.Wood. 1997, *Power System Harmonic Analysis*, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, John Wiley & Sons.
- [4] A.Baggini. 2008, *Handbook of Power Quality*, University of Bergamo, Italy, John Wiley & Sons.
- [5] J.C.Das. 2002, *Power System Analysis, Short-circuit Load Flow and Harmonics*, Amec Inc. Atlanta Georgia, Marcel Dekker Inc.
- [6] M.H.Rashid. 2001, *Power Electronics Handbook*, Academic Press.
- [7] IEEE Power Engineering Society, 1998, *Tutorial on Harmonics Modeling and Simulation*.
- [8] T.Hiyama, M.S.A.A.Hammam, T.H.Ortmeyer. April 1989, "Distribution System Modeling with Distributed Harmonic Sources", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, No.2, pp.1297-1304.
- [9] P.Ачковски. 2005, „Квалитет на електричната енергија” – интерна скрипта. Предавања на втор циклус студии на ФЕИТ, Скопје.
- [10] М. Тодоровски. 2009, „Упатство за Матлаб”, учебно помагало, ФЕИТ – Скопје.
- [11] Р. Ачковски. М. Тодоровски, 2005, „Преносни и дистрибутивни системи” – збирка решени задачи за прв циклус студии на ФЕИТ, Скопје.
- [12] Francisco C.De La Rosa. 2006, "Harmonics and Power Systems", Distribution Control Systems Inc. Hazelwood, Missouri, U.S.A., Taylor & Francis Group.

Kontakt informacije autora

Jovica Vuletić, dipl. el. inž.
 Fakultet za elektrotehniku i informacioni tehnologiji.
 Karpoš II b.b. Skopje, Makedonija.
 Tel: +389 2 3099 125
 Tel/Faks: +389 2 3064 262
 e-mail: jovicav@feit.ukim.edu.mk