

**ANALIZA REZULTATA MERENJA PROPADA NAPONA U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA****ANALYSIS OF THE MEASUREMENTS RESULTS FOR VOLTAGE SAGS IN DISTRIBUTION GRIDS**Ivana Radivojkov, Vladimir Katić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – Energetika, elektronika i telekomunikacije**

**Kratak sadržaj** – Predmet rada jeste analiza merenja propada napona u savremenim distributivnim mrežama. Signali napona mereni su u realnoj evropskoj distributivnoj mreži na različitim mestima na dva naponska nivoa – 630 V i 1000 V. Obradena je svojevrsna klasifikacija ovih signala, a zatim je data kvantitativna analiza dubine i trajanja propada napona, kao i maksimalne vrednosti i trajanja Harmonijskog otiska. Zatim je data statistička obrada rezultata do kojih se došlo kvantitativnom analizom.

**Ključne reči:** Kvarovi, Propadi napona, Distributivna mreža, Statistička analiza, Harmonici

**Abstract** – The subject of this paper is to analysis of the measurements results for voltage sags in modern distribution grids. Voltage signals were measured in a real European distribution grid at different locations at two voltage levels - 630 V and 1000 V. A sort of classification of these signals was performed, followed by a quantitative analysis of the depth and duration of the voltage sag, as well as the maximum value and duration of the Harmonic footprint. The results of the quantitative analysis were then statistically analyzed.

**Keywords:** Faults, Power quality, Voltage sags, Distribution grid, Statistical analysis, Harmonics

**1. UVOD**

Elektroenergetski sistem (EES) čine četiri osnovna podsistema: proizvodnja, prenos, distribucija i potrošnja. U ovom radu predmet istraživanja su kvarovi koji se dešavaju isključivo u pojedinim delovima distributivnog podsistema, tj. distributivne mreže. Elektrodistributivne mreže predstavljaju deo elektroenergetskih sistema čija je funkcija da vrše raspodelu, odnosno distribuciju električne energije od napojnih čvorova koji se nalaze u transformatorskim stanicama visoki napon (VN)/srednji napon (SN) (koje se napajaju iz prenosnih ili subprenosnih mreža) do krajnjih potrošača električne energije. Tradicionalne distributivne mreže su se sastojale isključivo od pasivnih elemenata: potrošača, nadzemnih vodova, kablova, transformatora, kondenzatorskih baterija itd. Električna energija tradicionalno se nije proizvodila u distributivnim mrežama.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Vladimir Katić, red. prof.

Zbog navedenih uslova, tokovi snaga u distributivnim mrežama bili su usmereni isključivo od napojnih čvorova prema potrošačima električne energije. Međutim, tokom poslednjih nekoliko decenija opisani koncept distributivnih mreža značajno se menja. Naime, savremene distributivne mreže prolaze kroz niz transformacija i unapređenja [1]. Pre svega, ove promene obuhvataju:

- Uvođenje distribuiranih energetskih resursa (distribuiranih i obnovljivih izvora el. energije i distribuiranih skladišta el. energije);
- Povećanje stepena upravljive potrošnje;
- Povećanje stepena automatizacije distributivnih mreža putem uvođenja daljinski kontrolisanih prekidača i drugih uređaja lokalne automatike.

Kao posledica navedenih promena, pogon savremenih distributivnih mreža postaje znatno dinamičniji u odnosu na tradicionalne distributivne mreže i samim tim podložan brojnim pogonskim izazovima, kao što su: dvosmerni tokovi snaga, problemi sa stabilnošću u prelaznim režimima, višestruki izvori u režimima sa kvarom itd.

Cilj svakog EES-a je da električnu energiju proizvedenu u nekoj vrsti elektrane putem prenosne i distributivne mreže isporuči do krajnjih potrošača. Pritom je potrebno da potrošač besprekidno bude napajan i dobija električnu energiju određenog kvaliteta. Kvalitet električne energije utiče na kvalitet rada (proizvodnje materijalnih i nematerijalnih dobara) i kvalitet života. Pojam kvaliteta električne energije je složen jer pored korisničkog, ekološkog, i komercijalnog kvaliteta podrazumeva tehnički kvalitet kao sinonim za kvalitet električne energije koji obuhvata probleme pouzdanosti i sigurnosti napajanja, ukupne stabilnosti rada sistema, brojne poremećaje kao i uzajamni odnos elektroenergetski sistem – potrošač i obrnuto.

Međutim, nije uvek moguće obezbediti besprekidno napajanje i to kvalitetnom električnom energijom, jer na pojedinim delovima elektroenergetskog sistema dolazi do kvarova koji su relativno česta pojava. Kvar je bilo koje stanje koje se ne može definisati kao normalno ili stacionarno stanje u mreži. Može se reći još i da je električni kvar odstupanje napona i struje od nominalnih vrednosti ili stanja. Kada dođe do kvara, to prouzrokuje preveliku struju, što oštećuje opremu i uređaje. Električni kvarovi u trofaznom elektroenergetskom sistemu uglavnom su klasifikovani u dve vrste - prekid i kratak spoj. Pored ovoga, mogu postojati i kombinacije (simultanih) kvarova, kao i kvarovi namotaja opreme.

Prekid nastaje kada se dogodi kvar na putu provođenja električne energije, odnosno kada dođe do fizičkog prekida provodnika. Kratak spoj je u IEC 60 909 standardu definisan kao nastanak (slučajno ili namerno) provodne veze relativno male otpornosti ili impedanse između dve ili više tačaka električnog kola koje su u normalnom stanju na različitim potencijalima. Kvarovi nastaju usled različitih uzroka kada dolazi do električnih i/ili mehaničkih oštećenja.

Najčešći uzroci kvarova u EES-u su: vremenske prilike, kvarovi opreme i slabljenje izolacije, ljudski faktor, ptice, druge životinje, preopterećenje provodnika, itd. Svaka komponenta sistema može da se ošteti ili pokvari usled električnih i/ili mehaničkih naprezanja. Otkrivanje i analiza kvarova neophodna je za odabir ili projektovanje odgovarajuće opreme rasklopnih uređaja, elektromehaničkih releja, prekidača i drugih zaštitnih uređaja.

## 2. KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE

Za potrošače u elektrodistributivnim mrežama od izuzetne važnosti je kontantno snabdevanje, dovoljna raspoloživa snaga i stabilni parametri napona na priključnim sabirnicama, odnosno konstantna isporuka i kvalitet isporučene električne energije. Ovi parametri čine osnovne postavke stabilno rada neke mreže i potpadaju pod pojam kvaliteta električne energije [7].

Za istraživanja u ovom radu razmatrane su dve bitne karakteristike kvaliteta električne energije: viši harmonici i propadi napona.

### 2.1. Viši harmonici

Viši harmonici se definišu kao neželjene spektralne komponente izobličeneog signala čija je frekvencija jednaka celobrojnom umnošku osnovne frekvencije. Na primer, u sistemu gde je frekvencija 50 Hz, drugi harmonik će se pojavljivati na  $2 \times 50 \text{ Hz} = 100 \text{ Hz}$ , treći na  $3 \times 50 \text{ Hz} = 150 \text{ Hz}$ , itd. Termin „harmonik“ prvi put spominju 1894. godine, Houston i Kennelly [2]. Harmonicima su se, najpre, bavili matematičari, među njima najpoznatiji je Furije (Fureov razvoj u red, Furijeova transformacija).

Ukupna harmonijska distorzija (THD, Total harmonic distortion) definiše se kao odnos sume zbir kvadrata svih harmonijskih komponenti (viših harmonika) u odnosu na osnovni (prvi) harmonik [4]:

$$\text{THD}_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

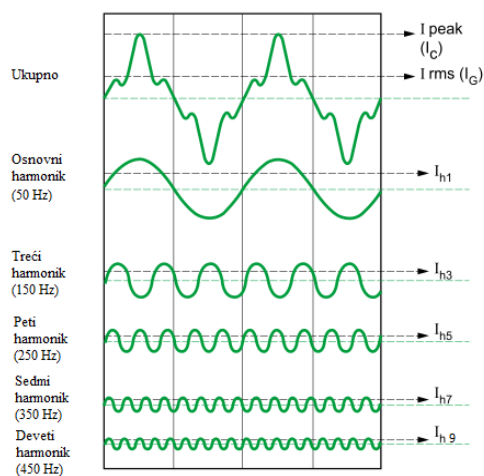
Kako bi se ispitao udeo pojedinog harmonika u talasnom obliku napona, definiše se harmonijska distorzija napona (Harmonic distortion – HD) za harmonik h-tog reda kao:

$$\text{HD}_{U,h} = \frac{U_h}{U_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

Na slici 1 prikazani su izobličeni talasni oblik struje i njegova raspodela na osnovni, 3-ći, 5-ti, 7-mi i 9-ti harmonik.

Viši harmonici izazivaju raznovrsne neželjene efekte. To su smetnje u radu računara, greške u radu zaštitne opreme, greške u merenju, prenaponi, interferencija sa komunikacionim i signalnim uređajima, povećanje gubitaka u generatoru, pregrevanje neutralnog

provodnika, dodatno grejanje transformatora, probleme sa kondenzatorskim baterijama, probleme sa radom releja, neispravan rad merne opreme i dodatne gubitke prilikom transporta i distribucije el. energije, itd. [5].



Slika 1. Izgled osnovnog, trećeg, petog, sedmog, devetog harmonika i ukupnog talasnog oblika struje [3]

### 2.2 Propadi napona

Kao posledica kratkih spojeva, ali i drugih poremećaja u mreži, dolazi do pojave propada napona. Prema IEEE standardu 1159-2009 propadi napona su definisani kao redukcija napona u rasponu od 0.1-0.9 r.j. nominalne vrednosti napona, kada je frekvencija sistema nominalna, i kada je trajanje poremećaja u rasponu od pola periode do jednog minuta [6].

Propad napona je dvodimenzioni poremećaj, čiji nivo je određen kako dubinom propada napona (u odnosu na referentni ili nominalni napon), tako i njegovim trajanjem (vremenom). Na slici 2 predstavljen je izgled jednog propada napona i njegovi ključni parametri.

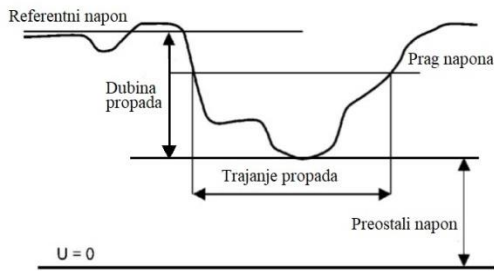
Referentni napon  $U_{ref}$  je vrednost napona navedena kao bazna vrednost u odnosu na koju se druge veličine, koje karakterišu poremećaj, izražavaju u relativnim jedinicama. U normalnom slučaju ovaj napon je jednak nazivnom naponu mreže  $U_n$ . Dubina propada definisana je kao razlika između najmanje efektivne vrednosti napona za vreme propada (preostalog napona) i referentnog napona  $U_{ref}$ . Prag napona je granična vrednost napona koja je dopuštena u mreži (obično  $\pm 10\% U_n$ ), odnosno 90% referentnog napona  $U_{ref}$ . [7].

Trajanje propada napona je vreme između trenutka u kojem napon u određenoj tački na sistemu napajanja padne ispod praga napona i trenutka u kojem poraste iznad praga napona.

Preostali napon je najmanja efektivna vrednost na koju opadne napon za vreme propada napona.

Kada se desi propad napona, izvori energije koji pod normalnim uslovima isporučuju energiju opremi ne obavljaju svoju funkciju ili je vrše samo u ograničenom rasponu. To dovodi do pogoršanja performansi opreme ili do potpunog prestanka rada. Posebno su primećeni problemi u radu računara, kompjuterske opreme u industriji, digitalnih industrijskih elektromotornih pogona i sličnih uređaja. Zaštitni sistemi se implementiraju u

svrhu isključenja napajanja kada napon padne ispod zadatog nivoa.



**Slika 2.** Karakteristične veličine u propadu napona

Međutim, tokom postojanja struje kvara, odnosno pojave propada napona u distributivnoj mreži, u talasnom obliku napona na sabirnici gde se pojavljuje ovaj propad, naglo porastu vrednosti viših harmonika, posebno 2-gog, 3-ćeg, 5-tog i 7-mog. To predstavlja svojevrsnu indikaciju da je došlo do ovakvog poremećaja.

U literaturi [8] ova pojava je predstavljena sa posebnog aspekta, odnosno posmatrana je ukupna vrednost seta ovih harmonika, koja se dobija kada se u izrazu (1) izračuna vrednost distorzije za  $h=2,3,5,7$  (HDU2357). Pokazano je da ovakav parameter, nazvan Harmonijski otisak ima specifičan oblik čijom analizom se mogu dobiti informacije o nekim osobinama propada napona, odnosno samog kvara. Iz tog razloga izvršena je detaljna analiza raspoloživog skupa mernih rezultata.

### 3. MERENI PODACI

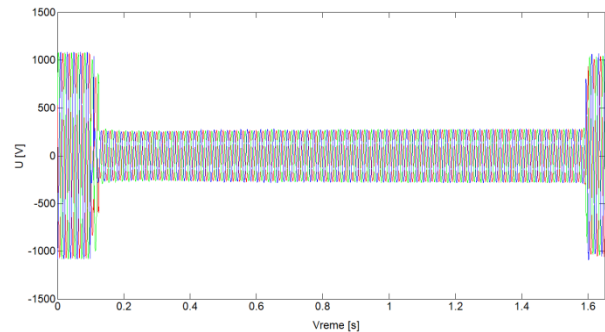
Predmet istraživanja ovog master rada su signali napona mereni u jednoj realnoj evropskoj distributivnoj mreži na različitim mestima na dva naponska nivoa – 630V i 1000V (industrijski naponski nivoi). Analizirano je 106 merenih naponskih signala nakon neke vrste poremećaja u distributivnoj mreži. Na slici 3 predstavljen je primer jednog rezultata merenja. Mereno je na frekvenciji od 50 Hz, koja je standardna frekvencija u evropskim EES-ima. Rezolucija merenja je 12 bita. Broj odbiraka ili eng. „sample rate“ govori koliko brzo su odbirci uzimani i on je 96 kod svih merenih signala, što znači da je za svaki signal izmereno 96 tačaka u toku jedne periode.

Pošto su u ovom radu od interesa isključivo signali propada napona, a ne analiza kvarova, bez obzira koji se kvar u distributivnoj mreži dogodio, napravljena je sledeća klasifikacija merenih signala: grupa 1 – propadi napona u jednoj fazi (9.43%), grupa 2 – propadi napona u dve faze (27.36%), grupa 3 – propadi napona u tri faze (23.58%), grupa 4 – višestruki propadi napona (22.64%), grupa 5 – prekidi napajanja (11.32%), grupa 6 – magnećenje transformatora (1.89%), grupa 7 – tranzijenti (3.77%).

Kvantitativno su opisani mereni naponski signali, što podrazumeva analizu, pre svega, dubine propada i trajanja propada napona, koji predstavljaju glavne karakteristike bilo kog propada napona, a zatim su u istim signalima analizirani harmonici, odnosno formiran je Harmonijski otisak.

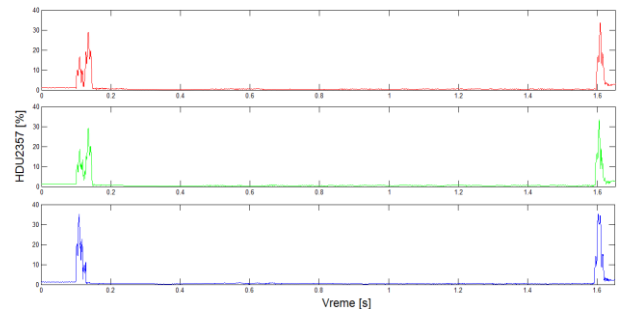
Harmonijski otisak predstavlja set od drugog, trećeg, petog i sedmog harmonika (HDU2357). Razlog zašto je

izabran da se drugom i trećem harmoniku dodaju i peti i sedmi je da bi se dobila veća opštost i da bi svi kvarovi koji mogu da izazovu propade i poremećaje napona bili uspešno detektovani i prepoznati. Harmonici nultog reda, kao što je treći harmonik, se ne prenose kroz većinu distributivnih transformatora.



**Slika 3.** Primer mernog naponskog signala – propad napona u tri faze

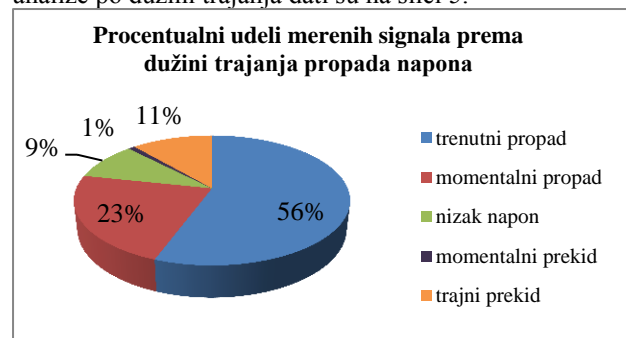
Na slici 4 prikazan je primer izgleda Harmonijskog otiska za trofazni propad. Dalja analiza obuhvatila je određivanje parametara Harmonijskog otiska, visina prvog i drugog pika.



**Slika 4.** HDU2357 u sve tri faze mernog naponskog signala sa slike 3.1

### 4. STATISTIČKA ANALIZA

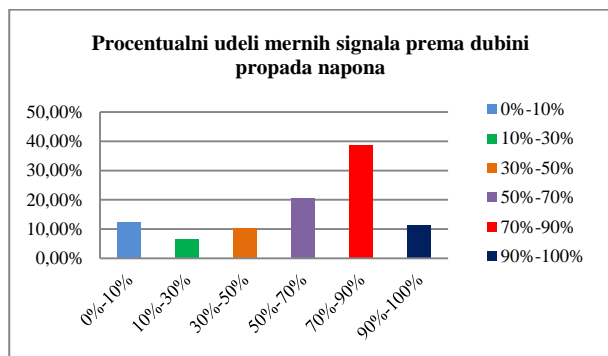
Propadi napona mogu se klasifikovati na nekoliko načina, a jedan od njih je prema trajanju, koja je data standardom IEEE 1159 o naponskim poremećajima. Ako je napon opao na vrednost između 10% i 90% nazivnog napona, to je propad napona, dok ukoliko je opao na vrednost nižu od 10%, to se tretira kao jedna od vrsta prekida. Rezultati analize po dužini trajanja dati su na slici 5.



**Slika 5.** Procentualni udeli obrađenih mernih signala prema trajanju propada napona

Analizom rezultata trajanja propada napona došlo se do sledećih brojevanih, odnosno procentualnih podataka: trenutni propadi (0.01s – 0.6 s) – 55.66%, momentalni

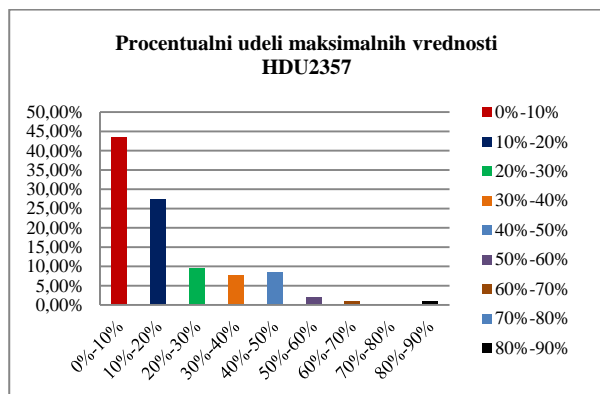
propadi (0.6 s – 3 s) – 22.64%, privremeni propad (3 s – 60 s) – 0%, nizak napon (60 s – ) – 9.43%, momentalni prekid (0.01 s -3 s) – 0.94%, privremeni prekid (3 s – 60 s) – 0 %, trajan prekid (60 s – ) – 11.32 %.



Slika 6. Procentualni udeli obrađenih mernih signala prema dubini propada napona

Tabela 1 Prosečna, minimalna i maksimalna vrednost dubine i dužine propada napona

	Prosečna vrednost	Minimalna vrednost	Maksimalna vrednost
Dubina propada napona	61.03%	95.10% (89.76%)	6.35% (17.23%)
Trajanje propada napona	0.45 s	0.02 s	1.56 s



Slika 7 Udeo maksimalnih vrednosti Harmonijskog otiska

Tabela 2 Karakteristike Harmonijskog otiska

	Prosečna vrednost	Minimalna vrednost	Maksimalna vrednost
Maks. vr. Harm. otiska	17.815%	2.45%	87.88%
Trajanje Harm. otiska	0.0345 s	0.0146 s	0.1442 s
Visina prvog pika	12.89%	2.05%	65.41%
Visina drugog pika	12.93%	1.95%	86.65%

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljena je detaljna analiza opsežnog merenja različitih poremećaja u mreži. Takođe, urađena je i klasifikacija poremećaja, kao i proračun harmonika niskog spektra koji mogu biti upotrebljeni za detekciju, urađena njihova detaljna analiza i izračunavanje

najbitnijih parametara kvara, kao i najbitnijih parametara Harmonijskog otiska.

Svi izračunati podaci su statistički obrađeni i izdvojeni u odgovarajuće kategorije, a zatim analizirani. Na osnovu dobijenih podataka može se zaključiti da je najveći broj poremećaja napona na niskom naponu uzrok kratkotrajnih propada napona, ukupno 79% procenata. Ovi poremećaji su dalje klasifikovani u dve podkategorije kao trenutni (56%) i momentalni propadi (23%). Trajnih kvarova je u ukupnom setu podataka svega 20%, i u velikom broju slučajeva se mogu klasifikovati kao trajni prekid (11%), dok "nizak napon" čini preostalih 9%. Kod prolaznih propada, izračunato je da je srednja vrednost trajanja 0.45s, dok je najkarci propad trajao svega 0.02s a najduži 1.56s. Za visinu Harmonijskog otiska, koja se može koristiti u savremenim metodama detekcije poremećaja iz izvedenog proračuna vidi se da je prosečna vrednost Harmonijskog otiska 17.815%, dok je prosečno trajanje ove pojave 0.0345s. Čak oko 71 % obrađenih uzoraka ima maksimalnu vrednost Harmonijskog otiska u opsegu od 0% do 20% vrednosti osnovnog harmonika, dok 25.48% uzoraka ima maksimalnu vrednost u opsegu od 20% do 50%, što znači da manje od 4% ima ovu vrednost koja je veća od 50% osnovnog harmonika

## 6. LITERATURA

- [1] N. Kovački, Doktorska disertacija "Operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža primenom višekriterijumske optimizacije", 2017.
- [2] G.K. Singh, "Power system harmonics research: a survey" 2007.
- [3] <http://www.aspap.org>.
- [4] A. P. Technologies, "Total Harmonic Distortion and Effects in Electrical Power System."
- [5] V. Šinik, "Uticao nelinearnih potrošača male snage na kvalitet električne energije", 2017.
- [6] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. IEEE. 1995.
- [7] Ž. Novinc "Kvalitet električne energije", Elektrotehnički fakultet Osijek, 2006.
- [8] V.A. Katic, A. Stanisavljevic, "Smart Detection of Voltage Dips Using Voltage Harmonics Footprint", *IEEE Trans. on Industry Application*, Vol.54, No.5, Sep./Oct. 2018, pp.5331-5342

## Kratka biografija:



**Ivana Radivojkov** rođena je u Novom Sadu 1995. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi odbranila je 2019.god. kontakt: radivojkov.i@gmail.com



**prof. dr Vladimir Katić** rođen je u Novom Sadu 1954. god. Doktorirao je na Fakultetu tehničkih nauka 1991. god., a od 2002. je zvanju redovni profesor. Oblast interesovanja su energetska elektronika, električna vozila, obnovljivi izvori i kvalitet električne energije.