

# Kvantifikacija koeficijenta žilavosti u elektroenergetskim sistemima

Darko Šošić, Mileta Žarković, Goran Dobrić  
Energetika/Katedra za elektroenergetske sisteme  
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet  
Beograd, Srbija  
[sosic@etf.rs](mailto:sosic@etf.rs), [zarkovic@etf.rs](mailto:zarkovic@etf.rs), [dobric@etf.rs](mailto:dobric@etf.rs)

Vladimir Antonijević, Zlatan Stojković, Zoran Stojanović  
Energetika/Katedra za elektroenergetske sisteme  
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet  
Beograd, Srbija  
[antonijevic@etf.rs](mailto:antonijevic@etf.rs), [zstojkovic@etf.rs](mailto:zstojkovic@etf.rs), [stojanovic@etf.rs](mailto:stojanovic@etf.rs)

*Sažetak*—U ovom radu je predložen postupak kvantifikacije žilavosti elektroenergetskog sistema, odnosno određivanje koeficijenta žilavosti. Pojam žilavosti EES se vezuje za maloverovatne i visokorizične pojave. U radu je razmotrena definicija pojma koja zavisi od složenog odnosa sigurnost-žilavost-pouzdanost. Na osnovu opisa žilavosti dat je predlog postupka za kvantifikaciju žilavosti u slučaju: harmonijskog proračuna tokova snaga, proračuna pouzdanosti i tehničkih kvarova, kao i napada na EES. Prva kvantifikacija žilavosti razmatra uticaj obnovljivih izvora energije i udela harmonika kod padova napona i totalne harmonijske distorzije. Druga uzima u obzir pouzdanost kod simulacije nasumičnih ispada elemenata u sistemu. Formiranje proračuna zarad dobijanja potrebnih rezultata je izvršeno Monte Karlo simulacijom. Treća kvantifikacija je definisana na bazi realnih podataka koji su snimljeni u eksperimentu sa scenarijima različitih kratkih spojeva i netehničkih kvarova sistema. Predstavljeni rezultati mogu poslužiti kao dobri orjentacioni podaci za poređenje robusnosti elektroenergetskih sistema na različite pojave.

*ključne riječi*—Žilavost; model; metrika; proračun pouzdanosti

## I. UVOD

Razvoj i širenje inteligentnih mreža, praćenje i predikcija cene energije u realnom vremenu, rastući trend distribuirane proizvodnje energije kao i sistema za skladištenje energije, zahtevaju konstantan razvoj u oblasti optimalne kontrole ovih složenih sistema. Optimalno dimenzionisanje i upravljanje sistemom je uglavnom vezano za normalne modove rada sistema. Međutim, nesigurnosti u radu sistema i nepredviđeni događaji mogu imati veliki uticaj na efikasnost rada sistema, što se naročito odražava na ekonomski aspekt, pogotovo kada je otpornost, odnosno žilavost sistema na ovakve poremećaje niska.

U literaturi je moguće naći radove koji se bave različitim uticajima na žilavost distributivnih sistema [1-9]. U [1] predložena je metoda za kreiranje mikro mreža u cilju restauracije kritične potrošnje kada distributivna mreža izgubi vezu sa prenosnim sistemom. U svakoj razmatranoj mikro mreži može da postoji samo jedan generator, a za kreiranje različitih konfiguracija odgovorni su daljinski upravljivi rasklopni uređaji. Sa druge strane, u [2] je razmatran slučaj

kada u jednoj mikro mreži može da postoji više generatora u cilju što veće fleksibilnosti rada formiranih ostrva i što manje neisporučene električne energije. Pored statističkih analiza prisutni su i radovi koji se bave dinamičkim procesom restauracije distributivne mreže uz pomoć mikro mreža [3].

U [4] je pokazano da se predimenzionirani konvertori, koji su prisutni u mikromrežama, mogu koristiti za davanje neophodne reaktivne energije u slučaju velikih poremećaja, pri čemu u mrežu takođe mogu da predaju i aktivnu snagu.

Do sada navedeni radovi nisu razmatrali frekvencijsku kontrolu u izolovanom radu. Da bi se povećala žilavost sistema pored odgovarajuće amplitude napona neophodno je zadovoljiti i frekvencijski opseg. U [5] razmatran je rad jedne takve mreže u kojoj se obnovljivi izvori tretiraju kao negativna potrošnja, super kondenzator služi za poravnavanje frekvencije, a gasna turbina je zadužena za regulaciju u ostrvskom režimu rada.

Pored uticaja velikih kvarova na žilavost distributivne mreže, koji su razmatrani u prethodnim radovima, u literaturi su prisutni i radovi koji razmatraju žilavost usled malo verovatnih poremećaja koji imaju katastrofalne posledice kao što su zemljotresi [6] i tajfuni [7-9]. U [7] je razmatrano ojačavanje određenih segmenata nadzemne mreže, vodovi i stubovi, da bi mogli da izdrže velike udare vetra. Dinamička rekonfiguracija i ostrvski rad sa opremom koja je u pogonu je razmatrana u [8] u cilju smanjivanja neisporučene električne energije kada dođe do velikih fizičkih oštećenja distributivne mreže.

U ovom radu su razmatrani uticaji različitih poremećaja na žilavost distributivne mreže. Prvo je razmatrana žilavost distributivnog sistema sa aspekta kvaliteta električne energije u prisustvu intermitentnih izvora koji su na distributivnu mrežu povezani preko uređaja energetske elektronike. Sami konvertori unose zaprljanje talasnog oblika napona i struje i razmatran je njihov uticaj na ukupnu harmonijsku distorziju.

Drugi deo se bavi proučavanjem žilavosti distributivnog sistema na kvarove u mreži i njihov uticaj na snabdevanje potrošača. U proračunu su razmatrane različite lokacije nastanka kvara, različite dužine popravke i pronalaženja kvara. Kao glavni pokazatelj žilavosti usvojena je neisporučena električna energija krajnjim potrošačima.



Slika 1. Aktuelna problematika pametnih hibridnih sistema u inteligentnim mrežama.

Fuzzy logika je našla široku primenu kod donošenja odluka u inteligentnim distributivnim mrežama [1-6]. Fuzzy ekspertski sistem je moguće koristiti za donošenje odluke o tome koji deo komplikovane i velike distributivne mreže je potrebno automatizovati [1]. U radovima [2, 3] fuzzy logika je primenjena za donošenje odluke o punjenju električnih vozila sa aspekta frekvencije distributivne mreže. Moguće je primeniti i fuzzy klasterovanje u cilju dobijanja odgovora za upravljanje potrošnjom na osnovu velikog broja prikupljenih podataka [4]. Optimizacija u kombinaciji sa fuzzy logikom u cilju upravljanja energijom u inteligentnoj mreži se javlja u radovima [5, 6].

Zbog nedovoljno tačno predvidive, varijabilne, potrošnje, proizvodnje i cene električne energije predlaže se korišćenje fuzzy logike. U radu je razvijen fuzzy ekspertski sistem na primeru pametne kuće koja poseduje proizvodnju iz solarnih panela, skladištenje energije i mogućnost odlaganja aktiviranja upravljive potrošnje. U radu nije uzet u obzir kapacitet baterija za odlaganje kao i veličina solarnih panela. Za formirani ekspertski sistem koji predstavlja fuzzy kontroler je prikazan postupak fazifikacije ulaznih promenljivih: snaga upravljive i neupravljive potrošnje, insolacija (proizvodnja iz obnovljivih izvora energije) i cena električne energije. Takođe predstavljene su i funkcije pripadnosti ulaznih i izlaznih promenljivih. Definisana su pravila koja čine bazu znanja fuzzy ekspertskog sistema. Rezultati ekepertskog sistema su predstavljani u vidu prenosnih funkcija za kombinacije ulaznih i izlaznih promenljivih. Prikazan je i rezultat ekspertskog sistema za konkretne ulazne podatke. Ekspertski sistem je testiran za realne usrednjene satne podatke za jedan dan, a rezultati o donošenju odluke su predstavljeni u zadnjem poglavlju ovog rada.

## II. HARMONIJSKI PRORAČUN TOKOVA SNAGE

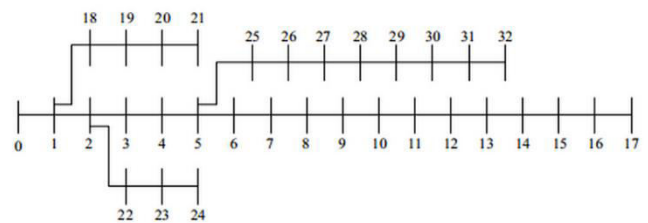
U cilju sagledavanja žilavosti elektroenergetskog sistema sa aspekta kvaliteta električne energije i uticaja distribuirane proizvodnje iz obnovljivih izvora energije primenjeni su rezultati proračuna predstavljenih u ([8,9]). Kod formiranja rezultata korišćen je matematički model harmonijskog proračuna tokova snage koji se sastoji od skupa nelinearnih algebarskih jednačina koje se tradicionalno rešavaju nekom iterativnom metodom. Cilj primene ovakvog modela jeste

sagledavanje promenljive potrošnje u sistemu i varijabilne distribuirane proizvodnje na žilavost sistema. Da bi se uzela u obzir stohastika proizvodnje i potrošnje u sistemu korišćena je Monte Karlo simulacija (MCS) za kreiranje različitih situacija u sistemu. Koristeći MCS formirana je baza podataka koja je neophodna za sagledavanje žilavosti i formiranje modela za kvantifikaciju žilavosti sistema. MCS metodologija je uspešno primenjena na IEEE-33 (Slika 2). U prethodnim radovima autori su sprovedli analize osetljivosti kod odabira čvora i nominalne snage distribuirane proizvodnje uzimajući u obzir kvalitet električne energije i smanjenje gubitaka. U radu su prvo pomoću koeficijenta naponske stabilnosti određeni pogodni čvorovi za distribuirane proizvodnje. Kako bi se sagledao maksimalni efekat harmonijskih izobličenja DP, postojeća harmonijska izobličenja u mreži su takođe uzeta u obzir. Ukupna harmonijska izobličenja napona ( $THD_V$ ) i vrednosti harmonika struja do 15. harmonika se izračunavaju koristeći klasični harmonijski proračun tokova snaga [8]. Ukupna aktivna i reaktivna snaga opterećenja u razmatranoj IEEE-33 mreži je 3715kW i 2300 kvar. Rezultati MCS u bazi podataka su: gubici aktivne snage, padovi napona, maksimumi padova napona i totalna harmonijska distorzija (THD). Ukupna harmonijska distorzija napona (THD<sub>V</sub>) je važan indeks koji se obično koristi za procenu kvaliteta električne energije u distributivnim i prenosnim sistemima. On uzima u obzir doprinos svake harmonijske komponente ukupnom signalu i može se izračunati prema [30] IEEE 519-1992 standardu:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_i^2}}{V_1} \quad (1)$$

Gubici aktivne snage se računaju kao:

$$P_L = \sum_{i=1}^{N_B} \sum_{j=1}^{N_B} \left[ \frac{R_{ij} \cos \delta_{ij}}{|V_i||V_j|} (P_i P_j + Q_i Q_j) + \frac{R_{ij} \sin \delta_{ij}}{|V_i||V_j|} (Q_i P_j - P_i Q_j) \right] \quad (2)$$



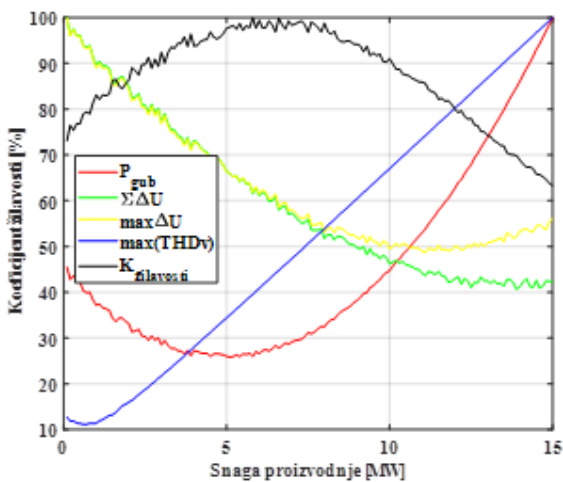
Slika 2. IEEE 33-test distributivna mreža.

Da bi se izvršila kvantifikacija žilavosti sistema u slučaju povećane intermitentnosti distribuirane proizvodnje i potrošnje, kao posledice ovih efekta posmatra se snaga

aktivnih gubitaka, suma padova napona i maksimalni pad napona. Sa aspekta kvaliteta električne energije posmatra se totalna harmonijska distorzija. MCS je primenjena u cilju formiranja velikog broja rezultata čije su minimalne i maksimalne vrednosti, kao i srednje vrednosti prikazane u Tabeli 1. Za svaki izlazni rezultat izvršena je normalizacija u odnosu na maksimalnu vrednost, a koeficijent žilavosti  $K_{RES}$  je izračunat kao:

$$K_{res} = \frac{4}{P_{L\_norm} + \sum \Delta U_{norm} + \Delta U_{max\_norm} + THD_{v\_norm}} \quad (3)$$

	$P_L$ [kW]	$\Sigma \Delta U$ [%]	$\Delta U_{MAX}$ [%]	max ( $THD_V$ ) [%]	$K_{RES}$ [%]
<i>min</i>	152.3054	136.3991	6.9639	0.3150	65,8
<i>mean</i>	190.5360	160.2911	8.1895	0.4274	81,1
<i>max</i>	236.7536	187.8983	9.6076	0.5837	100



Slika 3. Zavisnost koeficijenta žilavosti u funkciji snage distribuirane proizvodnje

Na slici 3 prikazana je zavisnost koeficijenta žilavosti i svih rezultata od snage distribuirane proizvodnje. Može se uočiti da koeficijent žilavosti zavisi od snage distribuirane proizvodnje u sistemu i da distribuirana proizvodnja do neke snage povećava koeficijent žilavosti sistema, dok prekomerna integracija distribuirane proizvodnje negativno utiče na žilavost sistema. U razmatranom slučaju se postiže najveća žilavost sistema pri snazi distribuirane proizvodnje od 8,9 MW.

### III. PRORAČUN POUZDNAOSTI

U ovom radu za određivanje neisporučene energije korišten je simulacioni metod. Na posmatranom vremenskom intervalu, koji najčešće iznosi jednu godinu ali može da bude i duži, generisani su poremećaji koji podležu odgovarajućoj verovatnoći. Pod ovim se podrazumeva da je vreme ispada proizvodljivo odabrano, kao i vreme isključenja kvara i vreme popravke. Za svaku granu mreže primenom eksponencijalne distribucije određuje se vremenski trenutak nastanka kvara na posmatranom elementu. Za ovu potrebu može se koristiti sledeći izraz:

$$T = -\frac{1}{\lambda} \ln r. \quad (4)$$

U jednačini (4) je  $r$  proizvoljan broj koji podleže normalnoj raspodeli, a  $\lambda$  predstavlja intenzitet otkaza posmatranog elementa. Vrednosti za intenzitet otkaza za razmatranu mrežu su preuzete iz [14].

Nakon toga je potrebno generisati dva broja koji podležu log-normalnoj (Galtonovoj) raspodeli. Prvi tako dobijen broj se koristi za određivanje vremena reagovanja rasklopne opreme, i za srednju vrednost je usvojeno vreme od 0,5 h. Drugi broj se koristi za određivanje vremena trajanja popravke kvara, a njegova srednja vrednost iznosi 4 h.

U trenutku nastanka kvara potrebno je detektovati sve grane koje su pogođene kvarom. Naime, kada se desi kvar samo nekoliko elemenata u mreži može da utiče na njegovo otklanjanje. Za razmatranu mrežu usvojena je pretpostavka da se prekidač nalazi na početku izvoda, a da je na svim ostalim granama postavljen rastavljač. Pošto rastavljači nisu u mogućnosti da prekinu struju kvara u ovom slučaju prilikom svakog kvara privremeno će svi potrošači ostati bez napajanja. Nakon otvaranja odgovarajuće rasklopne opreme bez napajanja ostaju samo potrošači koji se nalaze nizvodno od mesta kvara i to u vremenskom periodu koji odgovara zahtevanom vremenu popravke. Opisani postupak je potrebno ponoviti za sve komponente mreže.

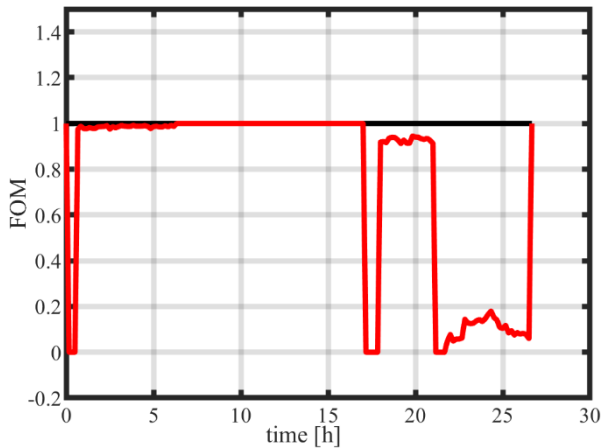
Da bi se odredila neisporučena energija potrebno je usvojiti neku potrošnju u svakom razmatranom vremenskom trenutku. Za ove potrebe korišćene su krive potrošnje i nedeljne promene koje su date u [15, 16]. Usvojena je pretpostavka da podaci u [14] predstavljaju maksimalne snage potrošnje po čvorovima mreže. Da bi se uvažila promena u potrošnji usvojeno je da potrošnja podleže log-normalnoj raspodeli, pri čemu se srednja vrednost određuje na osnovu vremenskog trenutka u toku godine koji se razmatra. Standardna devijacija za sve log-normalne raspodele je ista i iznosi 0,3.

Na osnovu ovih podataka ukupnu neisporučenu električnu energiju je moguće dobiti preklapanjem odgovarajućih tabela, odnosno tabela potrošnje i tabele uklopnog stanja odgovarajućih rasklopnih uređaja. Da bi se odredila žilavost sistema na kvarove za veličinu od interesa (Figure of Merit – FOM) usvojen je odnos isporučene i tražene električne energije. Za proračun koeficijenta žilavosti korišćen je sledeći izraz:

$$R = \int_{t_2}^{t_4} (FOM^* - FOM(t)) dt, \quad (5)$$

gde je sa  $t_2$  i  $t_4$  označen početak i kraj poremećaja. Na slici 4 prikazana je promena FOM u prisustvu kvarova. Prvi kvar je usamljen slučaj, ali ubrzo posle njega došlo je do dvostrukog kvara koji je prouzrokovao veće poremećaje u mreži kao što se može videti u desnom delu slike 4.

Na osnovu jednačine (5) i slike 4, može se jednostavno izračunati koeficijent žilavosti sistema na definisane poremećaje. Ova vrednost iznosi 6,93h.



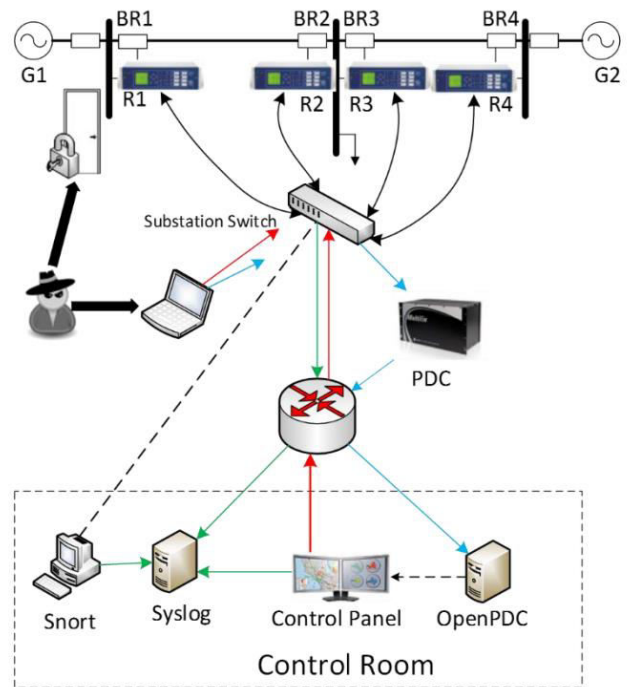
Slika 4. dijagram isporučenosti potrebne količine električne energije (FOM).

#### IV. ŽILAVOST SISTEMA PRILIKOM „CYBER“ NAPADA

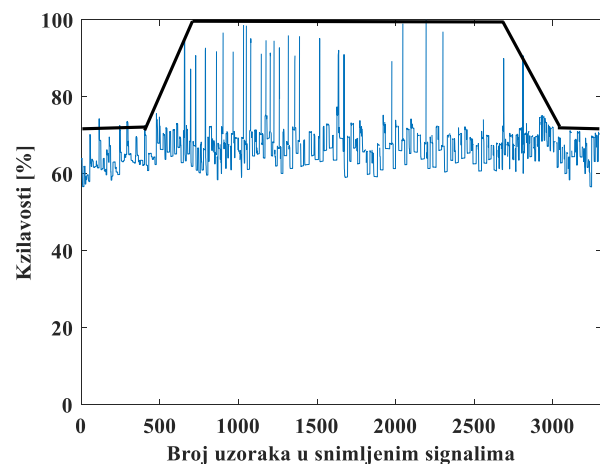
„Cyber Security“ je posebna problematika inteligentnih elektroenergetskih mreža, a odnosi se na obezbeđivanje sigurnosti velike količine podataka o elektroenergetskom sistemu, kako podataka o pojedinačnim potrošačima električne energije i njihovim energetske navikama, tako i o izmerenim veličinama u prenosnoj i distributivnoj mreži. Svi ovi podaci se koriste za analizu rada i upravljanje sistemom, pa svaka izmena ili nedostatak ovih podataka predstavlja potencijalnu opasnost po rad sistema. U slučaju „cyber“ napada uglavnom dolazi do nepotrebnog reagovanja relejne zaštite i rekonfiguracije mreže ili do nemogućnosti reagovanja relejne zaštite. U modernim sistemima je veoma bitno odrediti žilavost na ovakvu vrstu poremećaja, a može se sprovesti slična analiza kao i u slučaju pouzdanosti sistema. Analiza je izvršena na jednostavnom sistemu, prikazanom na slici 5. Za određivanje koeficijenta žilavosti analizirano je 5 različitih scenarija:

1. kratak spoj na vodu,
2. isključenje voda i blokiranje releja radi održavanja,
3. „cyber“ napad – slanje komande za otvaranje prekidača,
4. „cyber“ napad – promena podešenja releja,
5. „cyber“ napad – injektiranje lažnih podataka radi simuliranja kvara.

Za određivanje koeficijenta žilavosti u svim navedenim slučajevima potrebno je proračunati povećanje gubitaka u sistemu, povećanje padova napona, kao i neisporučenu električnu energiju. Na osnovu velikog broja proračuna primenom MCS, uvažavajući ograničenja sistema u smislu generisanja i prenosa, određena je neisporučena energija i rezultati su prikazani na slici 6 za nasumično pojavljivanje nekog od prethodnih 5 slučajeva.



Slika 5. Mikromreža za analizu žilavosti prilikom „cyber“ napada.



Slika 6. Neisporučena energija u analiziranim slučajevima.

## V. ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazan postupak određivanja žilavosti elektroenergetskog sistema u slučaju različitih poremećaja u sistemu. Analizirani poremećaji su vezani za promenu snage generisanja iz intermitentnih izvora energije, kvarova u sistemu koji prouzrokuju neisporučenu električnu energiju, kao i „cyber“ napade. Žilavost pokazuje nivo sposobnosti sistema da podnese ovakve poremećaje a da pri tome ostane u normalnom režimu rada. Do sada nije jasno definisan način na koji se vrši kvantifikacija žilavosti sistema, pa je u ovom radu prikazana primena nekih od analiziranih pristupa u pokušaju da se izvrši ova kvantifikacija.

## ZAHVALNICA

Autori zahvaljuju Ministarstvu za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije koje je omogućilo izradu ovog rada u okviru Projekata III 42009 Pametne mreže.

## LITERATURA

- [1] C. Chen, J. Wang, F. Qiu, D. Zhao, "Resilient Distribution System by Microgrids Formation After Natural Disasters", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 7, No. 2, pp. 958-966, 2016.
- [2] T.T.H. Pham, Y. Besanger, N. Hadjsaid, "New Challenges in Power System Restoration With Large Scale of Dispersed Generation Insertion", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 24, No. 1, pp. 398 – 406, 2009.
- [3] C.L. Moreira, F.O. Resende, J.A.P. Lopes, "Using Low Voltage MicroGrids for Service Restoration", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 1, pp. 395–403, 2007.
- [4] A. Castillo, "Microgrid Provision of Blackstart in Disaster Recovery for Power System Restoration", 2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Vancouver, Canada, 19 Dec. 2013.
- [5] P. Li, P. Degobert, B. Robyns, B. Francois, "Implementation of interactivity across a resilient microgrid for power supply and exchange with an active distribution network", *CIGRE Seminar 2008: SmartGrids for Distribution*, Frankfurt, Germany, 23–24 June 2008.
- [6] A. Navarro-Espinosa, R. Moreno, T. Lagos, F. Ordoñez, R. Sacaan, S. Espinoza, H. Rudnick, "Improving distribution network resilience against earthquakes", *IET International Conference on Resilience of Transmission and Distribution Networks (RTDN 2017)*, Birmingham, UK, 26-28 sept. 2017.
- [7] A.N. Tari, M.S. Sepasian, M.T. Kenari, "Resilience assessment and improvement of distribution networks against extreme weather events", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 125, 2021.
- [8] J. Xu, T. Zhang, Y. Du, W. Zhang, T. Yang, J. Qiu, "Islanding and dynamic reconfiguration for resilience enhancement of active distribution systems", *Electric Power Systems Research*, Vol. 189, 2020.
- [9] S. Ge, J. Li, H. Liu, Y. Cao, Z. Yang, J. Yan, "Assessing and Boosting the Resilience of a Distribution System under Extreme Weather" 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Atlanta, GA, USA, 4–8 aug. 2019.
- [10] M.N.Q. Macedo, J.J.M. Galo, L.A.L. Almeida, A.C.C. Lima, "Methodology for the calculation of the factor of priority for smart grid

implantation using fuzzy logic," *Electrical Power and Energy Systems* 78, pp. 563–568, 2016.

- [11] Žarković M., Šošić D., Dobrić G.: 'Fuzzy based prediction of wind distributed generation impact on distribution network: Case study— Banat region, Serbia', *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2014, 6, (1), pp. 1-7.
- [12] Šošić D., Žarković M., Dobrić G.: 'Fuzzy-based Monte Carlo simulation for harmonic load flow in distribution networks', *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2015, 9, (3), pp. 267-275
- [13] R. Billinton, R. N. Allan, "*Reliability Evaluation of Engineering Systems - Concepts and Techniques - 2nd ed.*", New York, Springer Science+Business Media, 1992.
- [14] J. E. Mendoza, M. E. Lopez, C. A. C. Coello, E. A. Lopez, "Microgenetic multiobjective reconfiguration algorithm considering power losses and reliability indices for medium voltage distribution network," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 3, pp. 825-840, April 2009.
- [15] CIGRE Task Force C6.04.02, "Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources," 2014.
- [16] Probability Subcommittee, "IEEE Reliability Test System," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, pp. 2047-2054, 1979.
- [17]

## ABSTRACT

In this paper, a procedure for quantification of the the power system resilience is proposed, i.e. determination of the resilience coefficient. The definition of power system resilience is associated with unlikely and high-risk phenomena. The paper discusses the definition of the term that depends on the complex relationship safety-resilience-reliability. Based on the description of resilience, a proposal of the procedure for its quantification in the case of: harmonic load flows, calculation of reliability and technical failures, as well as cyber attacks on the power system is given. The first quantification of resilience considers the influence of renewable energy sources and the share of harmonics in voltage drops and total harmonic distortion. The second takes into account the reliability in simulating random outages of elements in the system. The third quantification is defined on the basis of real data recorded in an experiment with scenarios of different short circuits and non-technical system failures. The presented results can serve as good orientation data for comparing the robustness of electric power systems to different phenomena.

## QUANTIFICATION OF POWER SYSTEM RESILIENCE

Darko Šošić, Mileta Žarković, Goran Dobrić, Vladimir Antonijević, Zlatan Stojković, Zoran Stojanović