



**POKAZATELJI POUZDANOSTI DISTRIBUTIVNIH MREŽA
- uporedni pregled-**

**ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORKS RELIABILITY INDICES
-comparative overview-**

Vladica MIJAILOVIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Čačak
Aleksandar RANKOVIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Čačak

KRATAK SADRŽAJ:

U radu je dat uporedni pregled pokazatelja pouzdanosti koji su ostvareni u državama-članicama Evropske unije, Japanu, SAD i Srbiji. Takođe, analiziran je i uticaj distribuiranih generatora na stabilnost distributivne mreže. Uočena je korelacija između broja kvarova i stepena korišćenja energetskih kablova. Za pojedine države navedene su obaveze isporučioaca energije prema potrošačima u slučaju da prekid napajanja traje duže od propisanog. Na kraju navedene su mere čijom primenom se može poboljšati pouzdanost isporuke električne energije.

Ključne reči: pouzdanost- distributivna mreža- potrošači- distribuirani generatori- automatizacija.

ABSTRACT

The paper gives a comparative overview of reliability indices of electrical distribution networks in the member states of the European Union, Japan, the USA and Serbia. Also, influence of connected distributed generators on the stability of electrical distribution network is analyzed. A correlation between the failure frequency and the degree of power cables application is observed. For some countries, obligations between the energy supplier and the customers are noticed in the case when the power outage lasts longer than it is prescribed. Finally, measures whose application can improve the reliability of electricity supply are listed.

Key words: reliability- electrical distribution network- consumers- distributed generators- automation.

1. UVOD

Analiza pouzdanosti distributivnog sistema se suštinski razlikuje od analiza proizvodnog i prenosnog dela u sledećem: pri analizi distributivne mreže akcenat je na pokazateljima pouzdanosti potrošačkih tačaka, dok se u druga dva dela EES-a analizira posmatrani sistem kao celina, uz obuhvatanje raspoloživih proizvodnih i prenosnih kapaciteta. Takođe, analize pouzdanosti proizvodnje i pouzdanosti prenosa kao rezultat daju verovatnoću gubitka opterećenja za dati instalisani proizvodno-prenosni kapacitet, dok analiza pouzdanosti distributivnog sistema zahteva sagledavanje svih inženjerskih aspekata: projektovanja sistema, planiranja i eksploatacije (konfiguracija mreže, radijalno napajanje, mogućnost dvostranog napajanja, postojanje distribuiranih generatora (DG) na mreži, stepen automatizacije i dr.).

Distributivna mreža je deo EES-a u kome se događa najveći broj kvarova. Mada su efekti ovih kvarova, najčešće, lokalnog karaktera, za razliku od kvarova u prenosnom podsystemu, imajući u vidu njihov broj, posledice su znatne, zbog čega se pouzdanosti distribucije električne energije posvećuje velika pažnja, i zbog isporučilaca i zbog potrošača.

Sve mere koje se sprovode radi poboljšanja i/ili održavanja željenog nivoa pouzdanosti su usmerene u pravcu obezbeđenja neprekidnosti napajanja električnom energijom propisanog kvaliteta (napon, učestanost i sinusoidalnost napona). U tom kontekstu se sprovode mere i postupci kojima će se smanjiti broj kvarova i njihovo trajanje kada do njih dođe, broj pogođenih potrošača u slučaju nastanka kvara i obezbediti održavanje napona u propisanim granicama za dati naponski nivo.

„Više DG-a priključenih na mrežu znači manje stabilnu mrežu“ - kritičari malih elektrana često ponavljaju ovu rečenicu. Postavlja se pitanje: Kako se, u stvari, meri stabilnost distributivne mreže?

To se može uraditi preko parametra *SAIDI*. On se računa na osnovu trajanja prekida, broja pogođenih potrošača i uzroka prekida isporuke električne energije, a izražava se u minutima po potrošaču:

$$SAIDI = \frac{\sum_i f_i \cdot r_i \cdot N_i}{N_T} \approx \frac{\sum_i \lambda_i \cdot r_i \cdot N_i}{N_T}, \left(\frac{min}{god} \right) \quad (1)$$

gde su:

f_i , λ_i - učestanost i intenzitet prekida i , respektivno. U praktičnim proračunima se obično umesto f_i koristi podatak za λ_i , jer se vrednosti ova dva pokazatelja neznatno razlikuju;

N_i - broj potrošača koji su ostali bez napajanja prilikom prekida i ,

N_T - ukupan broj potrošača na analiziranom području,

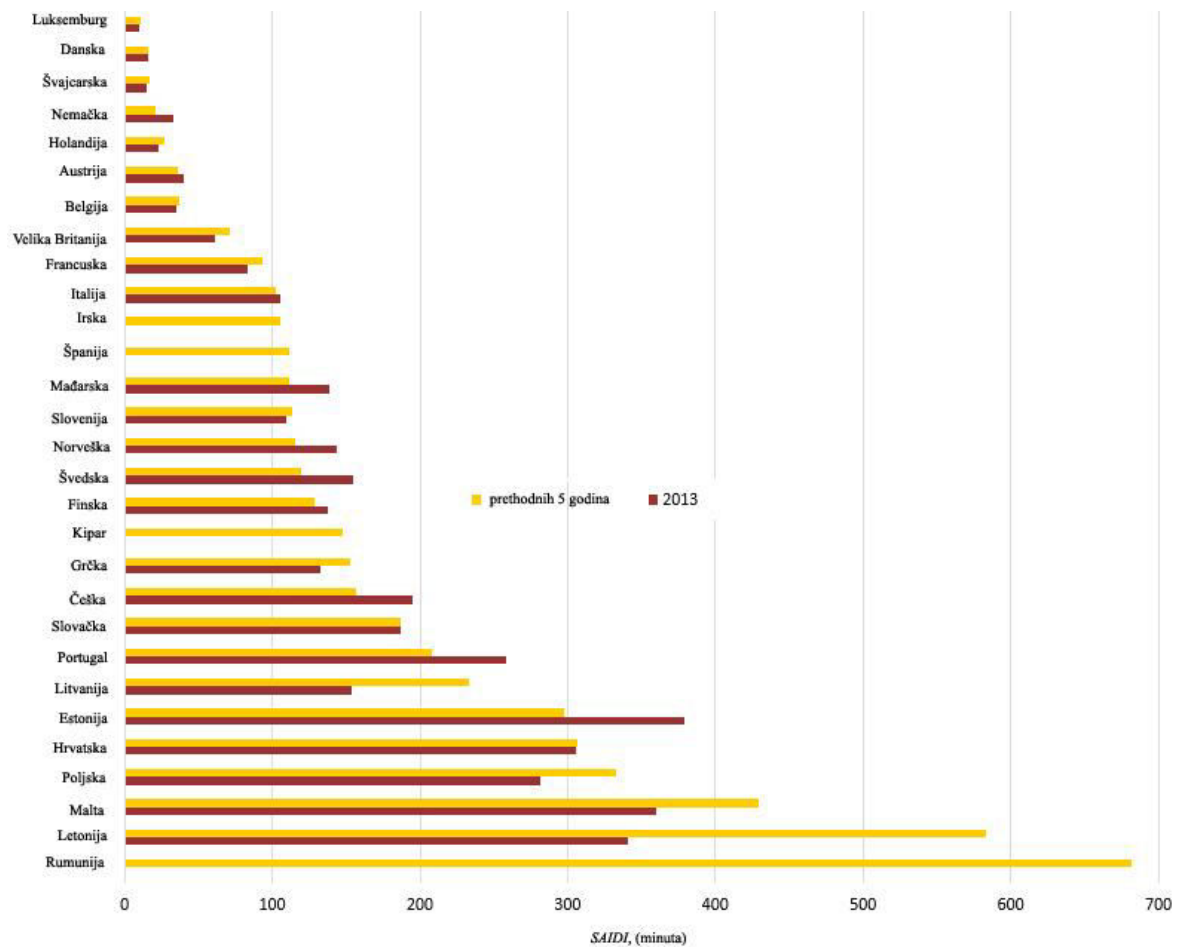
r_i - trajanje prekida napajanja tokom događaja i izraženo u minutima.

Indeksom i obuhvataju se svi prekidi koji su se dogodili tokom jedne godine.

2. PREGLED REZULTATA SPROVEDENIH ISTRAŽIVANJA

Sprovedene ankete ukazuju da broj i instalisana snaga malih elektrana nemaju negativan uticaj na stabilnost distributivne mreže.

Evropski savet energetske regulatornih tela (*CEER*) je izneo podatke o vrednostima parametra *SAIDI* za 2013. godinu i proseku za prethodnih 5 godina, sl.1.

Sl.1 Vrednosti pokazatelja *SAIDI* u državama-članicama EU

Zatim je izvršeno upoređenje parametra *SAIDI* prema procentualnom učešću DG-a u ukupnoj proizvodnji, sl.2. Sada ćemo, kao primer, analizirati situaciju u Nemačkoj, koja se na sl. 2 nalazi na sredini po vrednosti parametra *SAIDI*. Udeo obnovljivih izvora neprestano raste, a trajanje prekida opada iz godine u godinu, sl.3. Očito je da povećanje udela malih elektrana nema negativan uticaj na stabilnost mreže.

Generalno, vrednost parametra *SAIDI* je u snažnoj korelaciji sa dužinom kablovskog dela mreže (veći udeo kablova-bolja (niža) vrednost parametra *SAIDI*). Na primer, od $1,8 \cdot 10^6$ km mreže u Nemačkoj oko 80% su kablovi. U SAD je ovaj udeo oko 40%, u Australiji i ostalim državama EU još niži.

Procentualno učešće kablova u dužini SN- i NN-mreže u pojedinim zemljama EU je dato na sl.4.

Pokazatelji pouzdanosti za Japan

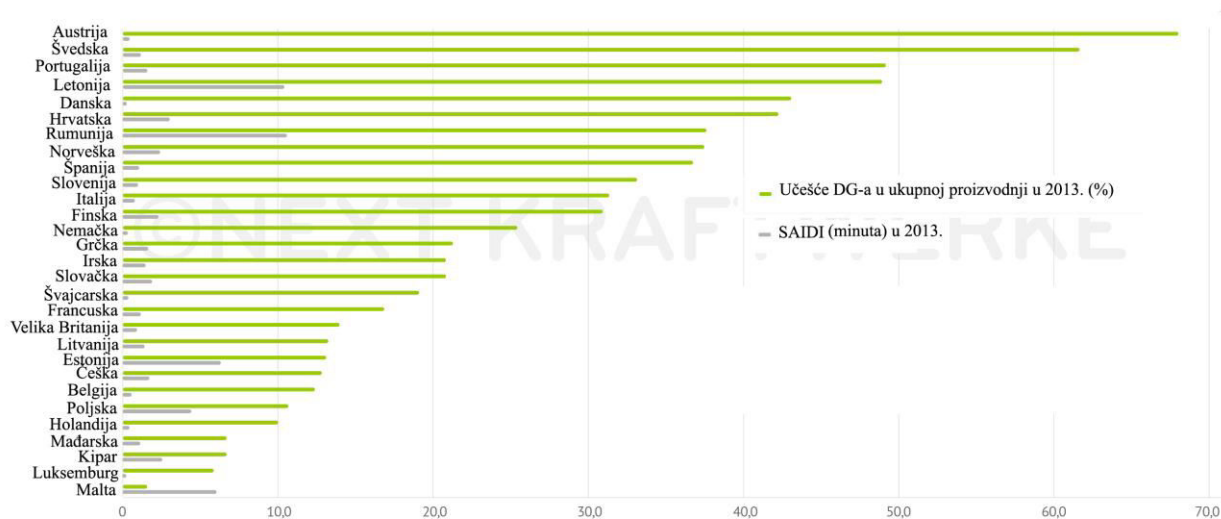
Nacionalni prosek za *SAIFI* i *SAIDI* je loš zbog čestih zemljotresa.

U područjima gde nema zemljotresa:

- *SAIDI* je u opsegu $[8 \div 48] \text{min/god}$, šestogodišnji prosek je $14,5 \text{min/god}$;

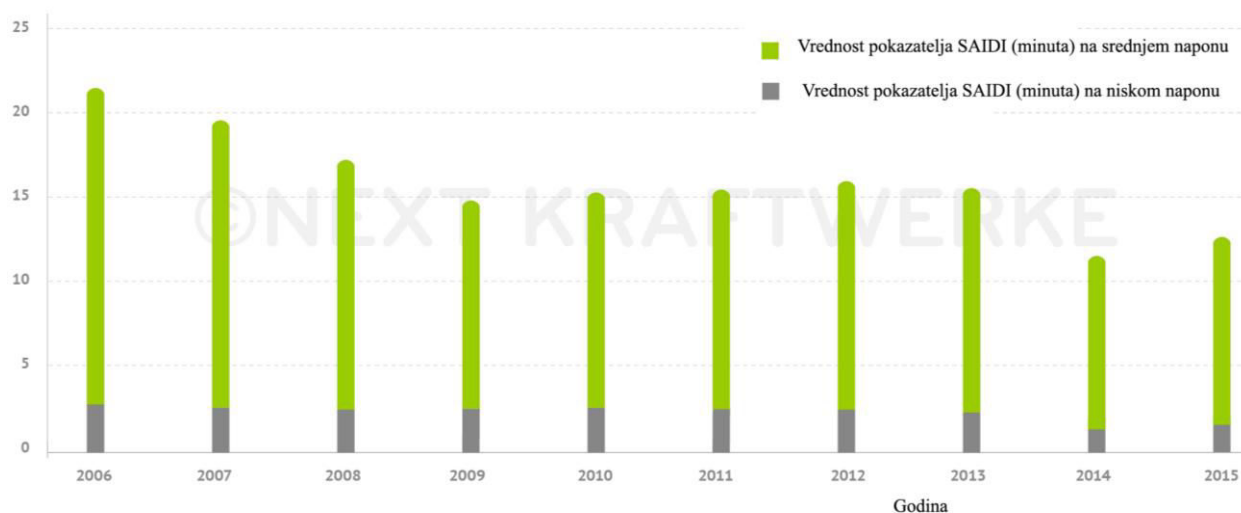
- *SAIFI* je u opsegu $[0,1 \div 0,18] \text{prekid/god}$, šestogodišnji prosek je $0,14 \text{prekid/god}$.

Uporedni pregled vrednosti pokazatelja SAIDI i procentualnog učešća distribuiranih izvora u ukupnoj potrošnji električne energije



Sl.2 Vrednosti pokazatelja SAIDI u zavisnosti od procentualnog učešća DG-a u ukupnoj proizvodnji

Vrednost pokazatelja SAIDI za distributivnu mrežu u Nemačkoj u periodu 2006.-2015. godina

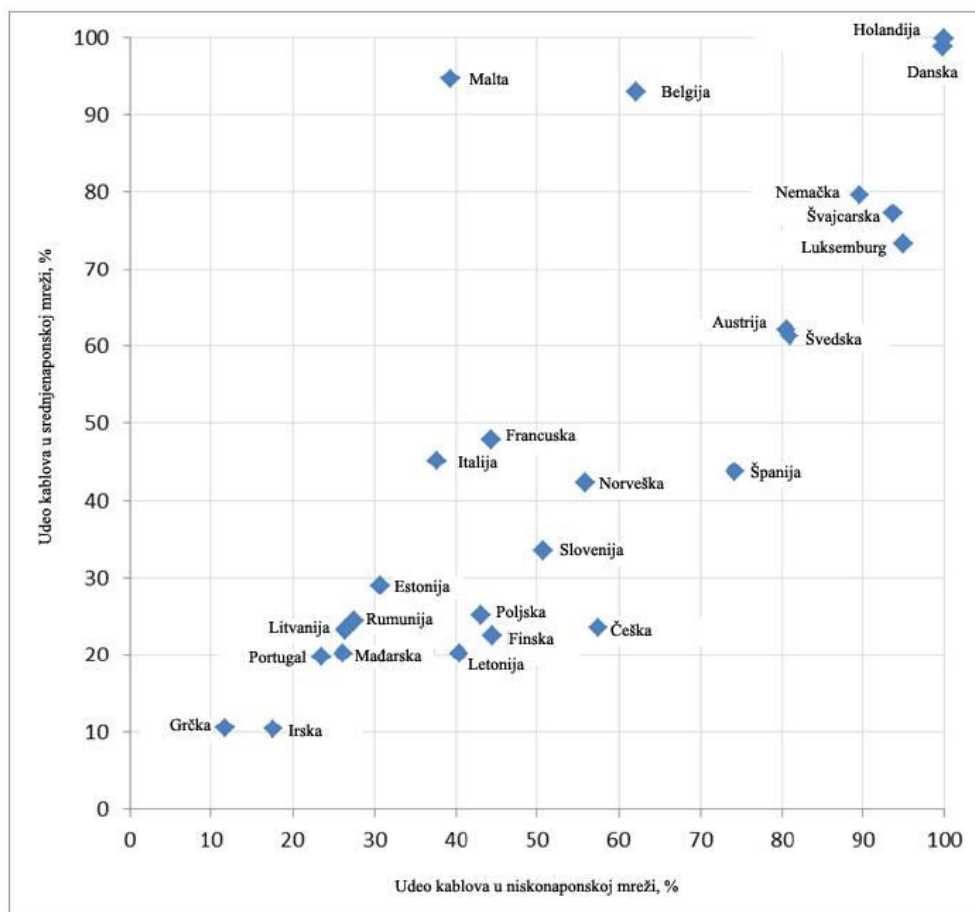


Sl.3 Vrednosti pokazatelja SAIDI u Nemačkoj u periodu 2006.-2015.

Odgovarajući pokazatelji pouzdanosti za Srbiju su navedeni u Tabeli 1.

Tabela 1 Pokazatelji pouzdanosti za 2017. godinu (uzeti u obzir i planirani i neplanirani prekidi)

| Distributivno područje | SAIDI ($\frac{min}{potr}$) | SAIFI ($\frac{pr}{potr}$) | CAIDI ($\frac{min}{pr}$) |
|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 1. Novi Sad | 650 | 5,62 | 116 |
| 2. Beograd | 261 | 4,10 | 64 |
| 3. Kraljevo | 1534 | 12,52 | 123 |
| 4. Niš | 1285 | 10,89 | 118 |
| 5. Kragujevac | 926 | 11,18 | 83 |



Sl.4 Procentualno učešće kablova u dužini SN- i NN-mreže u pojedinim zemljama EU

3. OBAVEZE ISPORUČIOCA PREMA POTROŠAČIMA- PRAKSA POJEDINIH EVROPSKIH DRŽAVA

3.1 Velika Britanija

U Velikoj Britaniji postoji 14 nezavisnih distributivnih sistema. Napajaju potrošače koji su u izrazito urbanim područjima (gustina $68 \frac{potr.}{km^2}$) do izrazito ruralnih ($15 \frac{potr.}{km^2}$).

Trenutno su na snazi tri podsticajna dokumenta (propisa) kojima se isporučioци stimulišu da poboljšaju pouzdanost napajanja potrošača, naročito u slabo naseljenim područjima.

Sušтина sva tri dokumenta je sledeća:

- Isporučilac ima pravo na podsticajna sredstva („bonus“) ako su pokazatelji pouzdanosti bili bolji od predviđenih.
- Isporučilac ima obavezu da potrošačima nadoknadi štetu koja je nastupila zbog nepredviđenog prekida u napajanju električnom energijom.
- Takođe, isporučilac deo iznosa za investicije u mrežu naplaćuje od potrošača.

Za sva tri slučaja visina iznosa se preispituje svakih 5 godina.

Potrošačima se mnogo više „dopada“ da dobiju odštetu ako je kvalitet napajanja lošiji od predviđenog nego da plate da bi se kvalitet poboljšao.

Na primer, radi smanjenja broja prekida napajanja:

- potrošači van Londona su spremni da godišnje plate 4£ ,
- potrošači u Londonu su spremni da plate 13£ godišnje.

Maksimalno vreme za koje isporučilac mora da otkloni kvar u NN-mreži je 3h tokom radnog dana, odnosno 4h ostalim danima. Ako propisani rokovi budu prekoračeni potrošačima iz kategorije "domaćinstva" se isplaćuje nadoknada od 22£ , a ostalima- 20£ .

Ako dođe do prekida napajanja zbog kvara u SN- ili VN-mreži potrošačima se mora obezbediti napajanje u roku od 18h . Na ime kompenzacije potrošačima iz kategorije "domaćinstva" se isplaćuje nadoknada od 54£ , a ostalima- 109£ . U slučaju prekoračenja propisanog roka naknada se uvećava za 27£ za svakih sledećih 12h . Potrošači smatraju da je period od 18h za uspostavljanje napajanje predugačak, ali nisu spremni da dodatno plate za njegovo skraćenje.

Takođe, propisane su nadoknade koje se isplaćuju potrošaču ako se utvrdi da napon nije u propisanim granicama i koliko potrošač mora da plati ako zahteva promene u napojnoj instalaciji a koje izlaze iz standardnih okvira. Isporučilac mora da obavesti potrošače od planiranom prekidu napajanja najmanje 48h ranije. U suprotnom, potrošačima iz kategorije "domaćinstva" se isplaćuje nadoknada od 22£ , a ostalima- 40£ .

Isporučiocu su stimulisani da poboljšaju pouzdanost napajanja potrošača u ruralnim i slabo naseljenim područjima. U tom smislu je ustanovljena definicija „najlošije napajnog potrošača“. To je potrošač koji je tokom tri uzastopne godine ostao bez napajanja bar pet puta.

Prosečna vrednost kompenzacije koja se isplaćuje isporučiocima je 0,57£ za svaki minut skraćanja prekida napajanja godišnje po obuhvaćenom potrošaču. Dugim prekidima se smatraju prekidi duži od 3 minuta godišnje. Godišnje, isporučiocu isplate potrošačima oko 10⁶£ po osnovu neplaniranih prekida (po automatizmu) i oko milion funti na osnovu predavki potrošača.

Isporučilac je oslobođen plaćanja nadoknade u slučaju događaja na koje nema uticaja (elementarne nepogode, zemljotresi i sl.). Takođe, isporučilac ne mora da plati naknadu potrošaču ako je sprečen da pristupi brojilu (instalaciji) ili ako dobije netačne informacije od potrošača ili ako potrošač ne plaća redovno račune za pružene usluge.

3.2 Italija

U Italiji *SAIDI* se računa za prekide u opsegu od 3 minuta do 8 sati, a *SAIFI* za sve prekide kraće od 8 sati. Granične vrednosti pokazatelja pouzdanosti se definišu posebno za ruralna, prigradska i urbana potrošačka područja. Maksimalno dozvoljene vrednosti su:

| | <i>SAIDI</i> | <i>SAIFI</i> |
|---------------------|--------------|--------------|
| Ruralno područje | 60 min | 4 prekida |
| Prigradsko područje | 40 min | 2 prekida |
| Urbano područje | 25 min | 1 prekid |

Slično su određene i nadoknade koje isporučilac plaća potrošačima za slučaj da se propisane vrednosti trajanja prekida premaše. Nadoknade su veće za gradske sredine nego za prigradske i seoske.

3.3 Holandija

Pouzdanost napajanja je veoma visoka, jer je sistem relativno mali i bez ruralnih potrošačkih područja. NN- i SN-mreža su skoro u potpunosti kablovske, dok je u VN-mreži 40% kablovskih vodova i 60% nadzemnih. Isporučilac je dužan da 72 h unapred obavesti potrošače o planiranom prekidu napajanja. Mreža je projektovana za eksploataciju u zatvorenoj petlji, ali uglavnom radi kao radialno napajana.

4. MERE ZA POBOLJŠANJE POUZDANOSTI ISPORUKE ELEKTRIČNE ENERGIJE

4.1 Mere primenjene u SAD

Radi poboljšanja pouzdanosti u SAD-u su:

- ugradili SCADA sisteme,
- omogućili rezervno napajanje potrošača, po principu otvorenog prstena,
- ugradnja kablovskih umesto nadzemnih vodova,
- izvršili automatizaciju mreže.

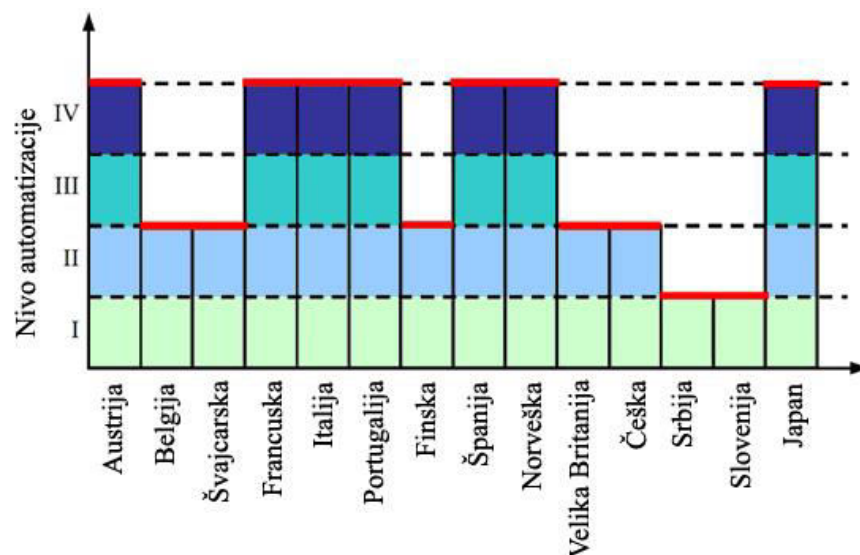
Rezultat: tokom perioda od 10 godina vrednost pokazatelja *SAIDI* je smanjena za 75% (sa $94 \frac{\text{min}}{\text{god}}$ na $24 \frac{\text{min}}{\text{god}}$).

4.2 Automatizacija distributivne mreže

Termin *automatizacija mreže* podrazumeva primenu uređaja i sistema koji omogućavaju operateru da daljinskim putem u realnom vremenu prati, koordinira i upravlja distributivnom mrežom. Automatizacija mreže obuhvata: automatizaciju postrojenja, automatizaciju izvoda i automatizaciju potrošača.

Kada se izvrši sekcionisanje izvoda rasklopnim elementima dobijaju se *zone*.

Nivoi automatizacije u pojedinim državama su prikazani na dijagramu, sl.5.



Sl.5 Nivoi automatizacije u pojedinim državama

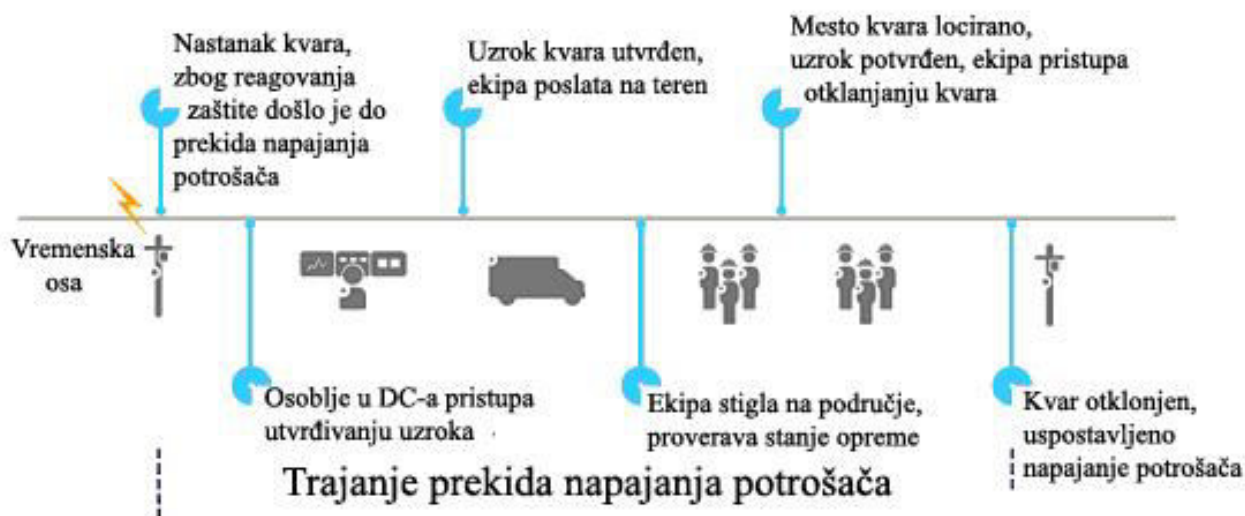
- Nivo I: ugrađeni indikatori kvarova sa lokalnim ili daljinskim javljanjem,
- Nivo II: ugrađeni su daljinska kontrola postrojenja, daljinsko javljanje i daljinsko merenje.
- Nivo III: primenjena lokalna automatika (rekloseri, sekcionalizatori i uređaji za automatsko prebacivanje na rezervno napajanje)
- Nivo IV: primenjena kombinacija daljinske kontrole i lokalne automatike.

Na primer, u SN-mreži u Finskoj:

- U postrojenju je prekidač ili rekloser;
 - Na izvodima su, uglavnom, ručne, a u strateškim tačkama daljinski kontrolisane rastavne sklopke. Tipično, rastojanje između dve susedne sklopke je $(0,7 \div 1) \text{ km}$;
 - Za zaštitu transformatora na kablovskim izvodima se koriste osigurači.
- Efikasnost napred pomenutih mera se može znatno poboljšati primenom komunikacionih sistema i uređaja za kontinualni nadzor stanja pojedinih elemenata.

4.3 Kvantifikacija uticaja komunikacione mreže na vrednost parametra CAIDI

Na sl. 6 je prikazan vremenski raspored koraka u okviru reagovanja distributivne kompanije kada dođe do kvara.



Sl.6 Vremenski raspored aktivnosti u okviru otklanjanja kvara

Komunikaciona mreža ima važnu ulogu u skraćanju trajanja pojedinih koraka prikazanih na sl. 6. Neka od ovih skraćanja se mogu pripisati automatizovanom izveštavanju o statusu mreže od strane inteligentnih elektronskih uređaja. (Mnoga preduzeća se i dalje oslanjaju na primedbe potrošača, koje su prikupljaju u *call*-centrima, o prekidima ili smetnjama u napajanju, što je spor i neefikasan postupak).

Dodatna skraćanja su rezultat povećane efikasnosti pri otklanjanju kvarova, a zbog brže lokalizacije mesta kvara i zbog preciznih informacija o stanju mreže (primena sistema za kontinualni nadzor).

Sekcionisanje izvoda smanjuje vrednost parametra *CAIDI* tako što se smanjuje broj potrošača koji će pretrpeti prekid u napajanju zbog nastanka kvara.

Prema iskustvenim podacima, primenom sistema komunikacije vrednost parametra *CAIDI* se može sniziti za oko 30%.

4.4 Kvantifikacija uticaja komunikacione mreže na vrednost parametra SAIFI

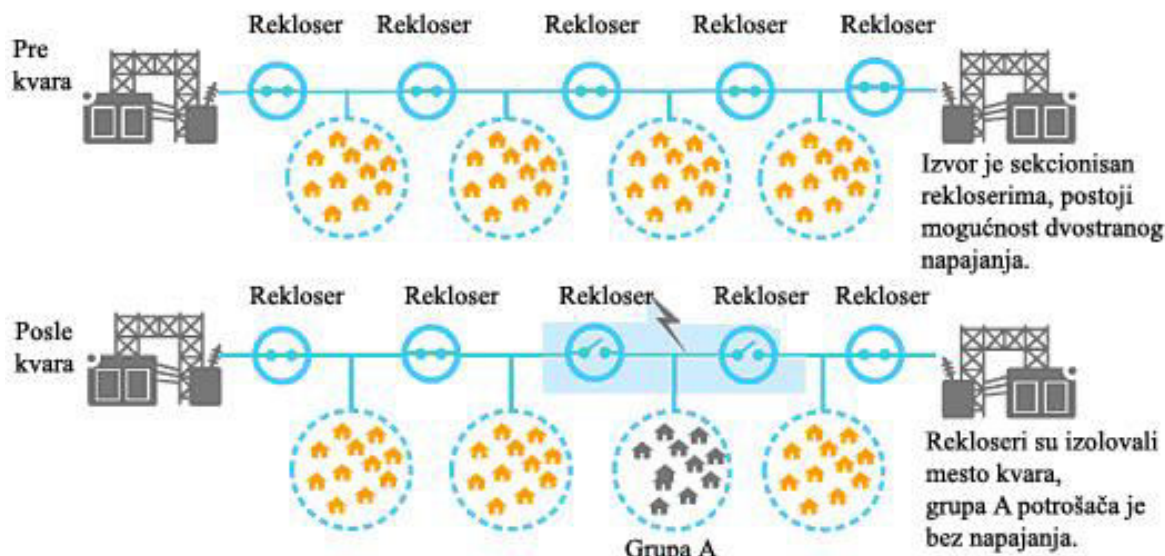
Na vrednost parametra *SAIFI* najveći uticaj imaju:

- događaji koji dovode do isključenja automatskih rasklopnih uređaja (učestanost kvarova) i
- sposobnost mreže da izoluje mesto kvara i ponovo uspostavi napajanje isključenih potrošača.

Događaji koji dovode do isključenja automatskih rasklopnih uređaja su meteorološke nepogode, kontakt rastinja i delova mreže, dejstva ljudi i životinja i kvarovi opreme. Postojanje komunikacione mreže nema nikakvog uticaja na prekide koji su posledica vremenskih nepogoda ili neposećenog rastinja ili sletanja ptica na provodnike voda ili obaranje stubova zbog saobraćajnih nezgoda. Međutim, komunikacioni sistem može znatno da doprinese poboljšanju efikasnosti preventivnog održavanja i praćenju stanja opreme, što omogućava da se intervencija obavi pre nego što se kvar dogodi.

Ako se usvoji krajnje pesimistička pretpostavka da u ukupnom broju prekida napajanja kvarovi na opremi učestvuju sa svega 20% i ako se 80% tih kvarova može detektovati dolazimo do zaključka da se ugradnjom sistema za praćenje stanja mreže broj ispada zbog kvarova može smanjiti za oko 16%, odnosno za toliko se može sniziti vrednost parametra *SAIFI*.

Da bi se ponovo uspostavilo napajanje isključenih potrošača neophodna je podela izvoda na deonice (sekcionalizacija) i mogućnost napajanja iz rezervnog pravca, sl.7:



Sl.7 Sekcionalizacija izvoda

Zaključak: Ako se CAIDI smanji za 30% a SAIFI za 15% SAIDI će se smanjiti za oko 40%:

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} \Rightarrow SAIDI = CAIDI \cdot SAIFI = 0,7 \cdot CAIDI \cdot 0,85 \cdot SAIFI = 0,595 \cdot CAIDI \cdot SAIFI$$

Šeme monitoringa se primenjuju u većini elektroprivrednih kompanija u Evropi, ali na različitim nivoima. Tipično;

- uglavnom se prate dugi prekidi;
- broj veličina koje se prate se razlikuje po naponskim nivoima;
- prate se različiti parametri pouzdanosti, mada u većini slučajeva SAIFI, SAIDI i ENS (u prenosnoj mreži);
- statistička analiza ne obuhvata sve događaje, naročito one u NN-mreži.

LITERATURA

- [1] G.V.K Murthy et al, "Voltage Stability Analysis of Radial Distribution Networks with Distributed Generation", International Journal on Electrical Engineering and Informatics - Volume 6, Number 1, March 2014.
- [2] *The Distribution System Security and Planning Standards*, ESB Networks Ltd., 2015.
- [3] "Control and automation systems for electricity distribution networks (EDN) of the future", CIGRE/CIRED JOINT WORKING GROUP C6/B5.25/CIRED, 2017.
- [4] S. Babu, "Reliability Evaluation of Distribution Systems", ENERGIFORSK December 2017.
- [5] *Energetski podaci*, EPS distribucija 2017.
- [6] V. Terrier, "North European Power Systems Reliability", KTH, Sweden, 2017.
- [7] G. Strbac et al, "Reliability Standards for the Operation and Planning of Future Electricity Networks", Foundations and Trends in Electric Energy Systems: Vol. 1, No. 3, pp 143–219, 2016.
- [8] Sinan Küfeoğlu, "Economic Impacts of Electric Power Outages and Evaluation of Customer Interruption Costs", Aalto University, doctoral dissertations 131/2015
- [9] Reliability report 2016, Electricity Transmission Grid Operator, France
- [10] *Energetski podaci*, EPS distribucija 2016.
- [11] *Review of distribution network security standards*, Imperial College, London, 2015.
- [12] *Improving distribution grid reliability- Leveraging communication networks to reduce CAIDI, SAIFI and SAIDI*, Alcatel, 2015.
- [13] T. Baricevic et al, *South East European Distribution System Operators Benchmarking Study*, Energy

Technology and Governance Program, USAID, 2015.

- [14] *Report on the quality of electricity supply*, OCCTO, Japan 2016.
- [15] *Report on the German power system*, Agora Energiewende, 2015.
- [16] D. Laffaille, „Integration of renewable energies into distribution grids: Innovation and comparative views France – Germany”, French energy regulator, Paris, 2014.
- [17] “Analysis of System Stability in Developing and Emerging Countries- Impact of Variable Renewable Energies on Power System Reliability and System Security”, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2013.
- [18] *Smart Grids in Germany- Fields of action for distribution system operators on the way to Smart Grids*, BDEW Berlin, ZVEI Frankfurt am Main, 2012.
- [19] H. Lågland, “Comparison of Different Reliability Improving Investment Strategies of Finnish Medium-Voltage Distribution Systems”, Universitas Wasaensis 2012.
- [20] *Power Distribution in Europe- Facts & Figures*, EURELECTRIC, 2018.
- [21] French Power System Reliability Report 2008.
- [22] J. Nahman, V. Mijailović, Pouzdanost sistema za distribuciju električne energije, Akademska misao, Beograd, 2009.

Zahvalnica

Istraživanja prezentovana u ovom radu su delimično finansirana sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja RS, ugovor br.451-03-68/2022-14/200132 čiji je realizator Fakultet tehničkih nauka u Čačku - Univerziteta u Kragujevcu.

Acknowledgement

This study was supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia, and these results are parts of the GrantNo. 451-03-68/2022-14/200132 with University of Kragujevac - Faculty of Technical Sciences Čačak.