

**UTICAJ NEIZVESNOSTI PROIZVODNJE I POTROŠNJE NA NAPONSKE PRILIKE****INFLUENCE OF PRODUCTION AND CONSUMPTION UNCERTAINTY ON VOLTAGE CONDITIONS**

Marko Z. OBRENIĆ, Schneider Electric LLC Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

Predrag M. VIDOVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

**KRATAK SADRŽAJ**

Elektrodistributivni sistemi su dizajnirani da imaju određen nivo fleksibilnosti da bi mogli u svakom trenutku da zadovolje potražnju za električnom energijom. Savremene elektrodistributivne sisteme karakterišu promenljivost i neizvesnost zbog nemogućnosti procene potrošnje i proizvodnje, posebno u prisustvu obnovljivih izvora električne energije i prozjumer. Promenljivost i neizvesnost mogu da naruše željeni bilans snaga i željene naponske prilike u mreži. Zbog toga je neophodno da savremeni elektrodistributivni sistemi imaju više fleksibilnosti u pogledu potrošnje i proizvodnje. U prisustvu neizvesnosti nije jednostavno odrediti fleksibilnost, kako proizvodnje i potrošnje tako i režimskih veličina. U ovom radu je predstavljen način određivanja naponske fleksibilnosti u prisustvu neizvesnosti proizvodnje i potrošnje. Prikazana su dva načina određivanja naponske fleksibilnosti: analitički i korišćenjem proračuna tokova snaga. U oba načina su primenjeni deterministički pristup i pristup sa uvaženim neizvesnostima. Neizvesnosti su uvažene korišćenjem intervalne aritmetike i Monte Karlo simulacija. Na osnovu dobijenih rezultata pokazano je da neizvesnosti značajno utiču na naponsku fleksibilnost elektrodistributivnih sistema. Takođe, potvrđeno je da se predloženi pristup za određivanje naponske fleksibilnosti može primeniti na realnoj distributivnoj mreži. U slučajevima visokih ili niskih napona u mreži, promenom snage proizvodnje iz obnovljivih izvora utiče se na smanjenje ili povećanje tih napona. Na osnovu dobijenih rezultata potvrđeno je da je neophodno uvažiti neizvesnosti da bi se dobile realistične vrednosti za napone i da su se ti naponi sigurno smanjili ispod ili povećali iznad dozvoljenih granica.

**ključne reči:** fleksibilnost, neizvesnost, distributivna mreža, intervali, Monte Karlo

**ABSTRACT**

Power distribution systems are designed to have a certain level of flexibility to be able to meet the power demand at any time. Modern power distribution systems are characterized by variability and uncertainty due to the impossibility of estimating consumption and production, especially in the presence of renewable energy resources and prosumers. Variability and uncertainty can disrupt the desired power balance and the desired voltage conditions in the network. Therefore, it is necessary that modern power distribution systems have more flexibility in terms of consumption and production. In the presence of uncertainty, it is not easy to determine the flexibility of both production and consumption and regime values. This paper presents a way to determine voltage flexibility in the presence of production and consumption uncertainties. Two ways of determining voltage flexibility are presented: analytical and using load flow calculation. In both ways, a deterministic approach and an uncertainty-based approach are applied. Uncertainties are taken into account using interval arithmetic and Monte Carlo simulations. The paper shows that uncertainties significantly affect the voltage flexibility of power distribution systems. Based on the obtained results, it is confirmed that the proposed approach can be applied on a real distribution network. In the case of high or low voltages in the network, changing the production from renewable sources affects the reduction or increase of these voltages. Based on the obtained results, it is confirmed that it is necessary to take into account the uncertainties in order to obtain realistic voltages and thus to claim that the voltages are certainly within the allowed limits.

**Key words:** flexibility, uncertainty, distribution network, interval, Monte Carlo

## 1. UVOD

Tradicionalni način proizvodnje električne energije iz fosilnih goriva predstavlja veliki problem današnjice. Svedoci smo prisutnosti zagađenja životne sredine i trenda porasta zagađenja usled korišćenja fosilnih goriva za dobijanje električne energije [1,2]. Evidentno je da rešenje velikog dela problema leži u korišćenju obnovljivih izvora energije [3]. Najviše korišćeni obnovljivi izvori su vetar i sunčevo zračenje. Oni imaju mnogo manji CO<sub>2</sub> ekvivalent od CO<sub>2</sub> ekvivalenta fosilnih goriva [2]. Zbog toga se uvode mnoge stimulatívne regulative za prelazak na korišćenje energije iz obnovljivih izvora, a pored toga mnoge kompanije se obavezuju da će u narednim godinama težiti da smanje emisiju CO<sub>2</sub> da bi postigli održiv rad u pogledu korišćenja električne energije [4].

Pojam održivosti obuhvata sa jedne strane proizvodnju na ekološki prihvatljiv način, a sa druge strane zadovoljenje sve većih potreba za električnom energijom. Da bi proizvodnja električne energije u elektroenergetskom sistemu zadovoljila rast potrebe za električnom energijom, a da pri tome budu uvažena sva ekološka ograničenja, potrebno je da se elektroenergetski sistem transformiše. Prvi korak u toj transformaciji predstavlja pojava velikih distribuiranih energetske resursa koja je donela niz problema kao što su: nedostatak rezerve, pojava viška snage, vraćanje snage iz distributívne u prenosnu mrežu, nagle promene proizvodnje koje utiču na stabilnost rada sistema [5,6] itd. Uzrok tim problemima leži u neupravljivosti proizvodnje iz obnovljivih izvora i u neizvesnosti, koje se uglavnom odnose na dostupnost energije iz obnovljivih izvora. Drugi korak u transformaciji elektroenergetskog sistema je pojava malih distribuiranih energetske resursa u elektrodistributivnim sistemima na mestima gde se nalaze potrošači, pojava skladišta električne energije kao i električnih vozila, koja mogu da se posmatraju i kao potrošači i kao skladišta električne energije. U današnjim, savremenim elektrodistributivnim sistemima, postoji element prozjumer, koji predstavlja ujedno i kupca i proizvođača električne energije iz obnovljivih izvora. Zbog neupravljivosti i neizvesnosti distribuiranih energetske resursa i prozjumer, sa porastom broja tih elemenata navedeni problemi eksploatacije elektroenergetskih sistema postaju veći i otežavaju upravljanje sistemima.

U cilju optimalnog vođenja rada elektrodistributivnog sistema, regulator i operator sistema treba da unapred predvide promene u proizvodnji i potrošnji i spram toga naprave kratkoročnu i dugoročnu prognozu rada sistema [6]. Zbog prisutne neizvesnosti proizvodnje i potrošnje električne energije, njihova kratkoročna prognoza postaje neprecizna i otežava planiranje [1]. Ono što je potrebno prognozirati, a što ujedno sadrži i najveću neizvesnost, jeste neto opterećenje [6], koje predstavlja potrošnju koja se mora zadovoljiti kada se uvaži proizvodnja iz obnovljivih izvora i granične vrednosti neizvesnosti te proizvodnje. Osim neprecizne prognoze operator sistema ima problem i sa obezbeđivanjem rezerve kojom bi raspolagao sistem. Rezerva se može posmatrati kao skladištena energija, mogućnost odsecanja potrošnje i mogućnost povećanja ili smanjenja proizvodnje. Postojanje veće rezerve operatoru daje veću fleksibilnost u vođenju rada sistema. U Međunarodnoj zajednici za energiju fleksibilnost se definiše u svetlu tehno-ekonomske analize kao sposobnost da sistem bude pouzdan i da u svim vremenskim okvirima omogući ekonomično upravljanje u prisustvu promenljivosti i neizvesnosti potrošnje i proizvodnje [6]. Da bi sistem bio fleksibilan neophodno je da postoji dovoljno rezerve u trenucima prolaznih i velikih neravnoteža. Savremeni elektrodistributivni sistemi zahtevaju sve veću fleksibilnost koja je najneophodnija za rešavanje problema pojave kratkih pikova, rampi i propada opterećenja na dijagramima neto opterećenja [6,7]. Nedostatak fleksibilnosti utiče na velike fluktuacije cena električne energije i pojavu vrlo visokih cena na tržištu [6].

Potrošači zahtevaju ugovorenu kvalitetnu isporuku i kvalitet isporučene električne energije. Te zahteve zadovoljava operator sistema kroz upravljanje različitim elementima čija je fleksibilnost rada dostupna [5,7]. Upravljivi elementi, čija je fleksibilnost na raspolaganju operatoru sistema, mogu se svrstati u dve grupe [7,8]:

- Direktno upravljivi resursi, čiji je odziv brz i u koje najčešće spadaju: tradicionalni generatori koji se brzo uključuju, upravljivi varijabilni generatori, skladišta energije, “demand response” programi, interkonekcije;
- Posredno upravljivi resursi čiji je odziv spor i u koje najčešće spadaju: prenosne mreže, skladišta goriva, promena cena na tržištu električne energije, planiranje angažovanja jedinica koje se sporo uključuju.

Sa stanovišta kvaliteta isporučene električne energije, fleksibilnost promene proizvodnje i potrošnje može da se posmatra kao fleksibilnost promene parametara koji odlikuju kvalitet električne energije [9]. Tu se pre svega misli na kvalitet napona: da vrednost bude u tehnički prihvatljivim granicama i da prisustvo viših harmonika napona bude minimizovano. Fleksibilnost napona se može posmatrati kao mogućnost promene napona promenom proizvodnje i potrošnje. U tu svrhu je potrebno napraviti matematičke modele koji povezuju te dve fleksibilnosti. Ti modeli mogu da budu jednostavni i da ne zahtevaju veliku procesorsku moć za obradu kada se

primenjuju na velike sisteme, ali zbog jednostavnosti su najčešće nedovoljno precizni [9]. Detaljni nelinearni modeli, koji uključuju detaljne naponske jednačine, teško su primenjivi na velike elektrodistributivne sisteme i zahtevaju veliku procesorsku moć za primenu na tako velikim sistemima [9,10].

Neizvesnost dostupnosti energije iz obnovljivih izvora predstavlja veliki problem operatoru sistema da potrošačima obezbedi napon čija je vrednost u tehnički prihvatljivim granicama. Neizvesnost proizvodnje je najviše izražena kod vetrogeneratora, dok je promenljivost proizvodnje najviše izražena kod solarnih generatora [1]. Neizvesnosti tih proizvodnji je neophodno uvažiti prilikom planiranja rada sistema, u analizama rada i prilikom donošenja odluka u realnom vremenu sa ograničenjem da naponi budu u tehnički prihvatljivim granicama [11]. Da bi se neizvesnost proizvodnje solarnih i vetrogeneratora uvažila u analizama potrebno ju je modelovati tako da rezultati analiza dovoljno dobro uvažavaju efekte neizvesnosti a da se ne naruši kompleksnost modela i zahtevana procesorska moć za rešavanje modela [11]. U analizama se definišu robusnost i fleksibilnost kao dva parametra na osnovu kojih se određuje efikasnost uvažavanja neizvesnosti [11]. Robusnost predstavlja jednostavnu kvantifikaciju uticaja neizvesnosti na predmet analize, a fleksibilnost predstavlja meru koliko predmet analize može da se prilagodi neizvesnosti [12]. Da bi se u analizama efikasno uvažio uticaj neizvesnosti proizvodnje i potrošnje na napone potrebno je imati robusan matematički model i potrebno je poznavati naponsku fleksibilnost u prisustvu neizvesnosti.

U ovom radu je predstavljen problem analize uticaja neizvesnosti proizvodnje i potrošnje na naponske prilike. U drugoj glavi je opisan način na koji se može odrediti fleksibilnost napona u zavisnosti od fleksibilnosti proizvodnje distribuiranih energetskih resursa i prozjumeru i potrošnje potrošača i prozjumeru. Predstavljena su dva pristupa: jednostavan analitički pristup i kompleksniji pristup korišćenjem proračuna tokova snaga. U trećoj glavi je predstavljen način modelovanja neizvesnosti proizvodnje i potrošnje za potrebe analize uticaja neizvesnosti na naponsku fleksibilnost. Prikazani matematički modeli neizvesnosti su takvi da se jednostavno i efikasno mogu koristiti u proračunima naponske fleksibilnosti. U četvrtoj glavi je predstavljen proračun naponske fleksibilnosti sa uvaženim neizvesnostima proizvodnje i potrošnje. U tim proračunima naponska fleksibilnost je predstavljena kao fleksibilnost sa uvaženim neizvesnostima. U petoj glavi dati su rezultati proračuna naponske fleksibilnosti analitičkim pristupom i korišćenjem proračuna tokova snaga. Takođe, prikazani su rezultati proračuna naponske fleksibilnosti primenom Metode Karlo simulacija. Rezultati sva tri proračuna su dati na primeru IEEE mreže sa 13 čvorova. U šestoj glavi su dati zaključci izvedeni na osnovu dobijenih rezultata, a u sedmoj glavi je dat spisak korišćene literature.

## 2. NAPONSKA FLEKSIBILNOST

Naponska fleksibilnost predstavlja mogućnost promene napona promenom snage upravljivih elemenata u cilju održavanja napona u tehnički prihvatljivim granicama, kao i granicama ugovorenim sa potrošačima i proizvođačima električne energije. Da bi se odredila naponska fleksibilnost potrebno je poznavati fleksibilnost proizvodnje i potrošnje. Fleksibilnost proizvodnje i potrošnje predstavlja mogući opseg promene njihove (aktivne i reaktivne) snage. Naponska fleksibilnost se može kvantifikovati kao opseg promene napona čvorova u mreži u zavisnosti od fleksibilnosti proizvodnje i potrošnje. U ovoj glavi su predstavljena dva načina određivanja naponske fleksibilnosti: analitičkim pristupom i korišćenjem proračuna tokova snaga.

### 2.1 Analitički pristup

U ovom delu predstavljen je analitički pristup u određivanju uticaja fleksibilnosti proizvodnje i potrošnje na naponsku fleksibilnost koristeći spektralnu teoriju operatora i matrica [13,14]. U tom pristupu se koristi matematički model mreže napisan saglasno sa metodom nezavisnih napona koji je zasnovan na matrici admitansi  $\hat{\mathbf{Y}}$  [15,16]. Neka je vektor napona čvorova mreže sa  $n$  čvorova označen sa  $\hat{\mathbf{U}}$  i neka je vektor injektiranih struja iste mreže označen sa  $\hat{\mathbf{I}}$ . Primenom metoda nezavisnih napona matematički model mreže se može napisati u obliku:

$$\hat{\mathbf{Y}} \hat{\mathbf{U}} = \hat{\mathbf{I}}. \quad (2.1.1)$$

Da bi se odredila zavisnost promene napona čvorova  $\Delta \hat{\mathbf{U}}$  od promene injektiranih struja u čvorovima  $\Delta \hat{\mathbf{I}}$  potrebno je izvršiti inverziju matrice admitansi:

$$\Delta \hat{\mathbf{U}} = \hat{\mathbf{Y}}^{-1} \Delta \hat{\mathbf{I}}. \quad (2.1.2)$$

Primenom spektralne teorije operatora i matrica, matrica admitansi se može predstaviti pomoću jedne matrice i jednog vektora:

$$\hat{\mathbf{Y}} = \hat{\mathbf{P}} \text{diag}(\hat{\boldsymbol{\lambda}}) \hat{\mathbf{P}}^{-1}, \quad (2.1.3)$$

gde su:

$\hat{\boldsymbol{\lambda}}$  – vektor sopstvenih vrednosti matrice  $\hat{\mathbf{Y}}$ ,

$\hat{\mathbf{P}} = (\hat{\mathbf{P}}_1, \hat{\mathbf{P}}_2, \dots, \hat{\mathbf{P}}_j, \dots, \hat{\mathbf{P}}_n)$  – transformaciona matrica čije kolone predstavljaju sopstvene vektore matrice  $\hat{\mathbf{Y}}$ , tako da sopstveni vektor  $\hat{\mathbf{P}}_j$  u koloni  $j$  odgovara sopstvenoj vrednosti  $\hat{\lambda}_j$  vektora  $\hat{\lambda}$ .

Uvažavajući osobinu transformacione matrice  $\hat{\mathbf{P}} = \hat{\mathbf{P}}^{-1}$  [15,16], relacija (2.1.2) se može napisati na sledeći način:

$$\Delta \hat{\mathbf{U}} = (\hat{\mathbf{P}} \text{diag}(\hat{\lambda}) \hat{\mathbf{P}}^{-1})^{-1} \Delta \hat{\mathbf{I}} = \hat{\mathbf{P}} \text{diag}(\hat{\lambda}^{-1}) \hat{\mathbf{P}}^{-1} \Delta \hat{\mathbf{I}}. \quad (2.1.4)$$

Ako se uvaži da su sopstvene vrednosti matrice admitansi međusobno različite i da su različite od nule [16,17], proizvod  $\hat{\mathbf{P}} \text{diag}(\hat{\lambda}^{-1}) \hat{\mathbf{P}}^{-1}$  se može napisati na sledeći način:

$$\hat{\mathbf{P}} \text{diag}(\hat{\lambda}^{-1}) \hat{\mathbf{P}}^{-1} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{\lambda}_i} \hat{\mathbf{P}}_i \hat{\Gamma}_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{\lambda}_i} \hat{\mathbf{S}}_i^T, \quad (2.1.5)$$

gde su:

$\hat{\Gamma}_i$  – transponovana matrica sopstvenih vektora matrice  $\hat{\mathbf{Y}}$  koja odgovara sopstvenoj vrednosti  $\hat{\lambda}_i$ ,

$\hat{\mathbf{S}}_i$  – matrica osetljivosti koja odgovara sopstvenoj vrednosti  $\hat{\lambda}_i$ . Ona predstavlja matricu izvoda sopstvene vrednosti  $\hat{\lambda}_i$  po svim elementima matrice  $\hat{\mathbf{Y}}$ .

Neka je najmanja sopstvena vrednost matrice  $\hat{\mathbf{Y}}$  označena sa  $\hat{\lambda}_k$ . Tada skalarni faktor  $\frac{1}{\hat{\lambda}_k}$  ima najveću vrednost i relacija (2.1.5) se može aproksimirati sledećom relacijom [16,17]:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{\lambda}_i} \hat{\mathbf{P}}_i \hat{\Gamma}_i \approx \frac{1}{\hat{\lambda}_k} \hat{\mathbf{P}}_k \hat{\Gamma}_k = \frac{1}{\hat{\lambda}_k} \hat{\mathbf{S}}_k^T. \quad (2.1.6)$$

Sada se relacija (2.1.4), uvažavajući relacije (2.1.5) i (2.1.6), može napisati na sledeći način:

$$\Delta \hat{\mathbf{U}} \approx \frac{1}{\hat{\lambda}_k} \hat{\mathbf{S}}_k^T \Delta \hat{\mathbf{I}}. \quad (2.1.7)$$

Ako se uzme druga norma ove relacije dobija se [16]:

$$\|\Delta \hat{\mathbf{U}}\| = \|\hat{\mathbf{Y}}^{-1} \Delta \hat{\mathbf{I}}\| \approx \left\| \frac{1}{\hat{\lambda}_k} \hat{\mathbf{S}}_k^T \Delta \hat{\mathbf{I}} \right\| \approx \frac{1}{|\hat{\lambda}_k|} \left| \sum_{i=1}^n \hat{\Gamma}_{ki} \Delta \hat{I}_i \right|. \quad (2.1.8)$$

Ovom relacijom se pokazuje da se na osnovu  $k$ -te sopstvene vrednosti i  $k$ -tog sopstvenog vektora može dovoljno dobro proceniti uticaj fleksibilnosti proizvodnje i potrošnje na naponsku fleksibilnost [16,17]. Da bi se odredilo koji čvorovi najviše utiču na naponsku fleksibilnost potrebno je izračunati  $k$ -tu matricu osetljivosti  $\hat{\mathbf{S}}_k$  i odrediti pozicije dijagonalnih elemenata te matrice sa najvećim vrednostima. Te pozicije su korespondentne čvorovima mreže u kojima promena injektiviranja najviše utiče na naponske prilike u mreži. S obzirom na to da u elektrodistributivnim mrežama postoji veliki broj generatora čija je snaga proizvodnje mala u odnosu na ukupnu snagu potrošnje, ovakav pristup određivanja uticaja fleksibilnosti proizvodnje i potrošnje na naponsku fleksibilnost je opravdan [16].

Za dobijanje približno tačnih vrednosti uticaja fleksibilnosti proizvodnje i potrošnje na naponsku fleksibilnost može se koristiti relacija (2.1.7), što je opravdano kada se posmatra proizvodnja i potrošnja na jednom izvodu koja ima sličan uticaj na naponsku fleksibilnost čvorova na istom tom izvodu [16]. Detaljan analitički pristup, kojim bi se dobile tačne vrednosti uticaja promene proizvodnje i potrošnje u izabranom čvoru na promene napona izabranog čvora, zahteva kreiranje nelinearnog matematičkog modela i formiranje matrice Jakobijana [10]. Takav pristup je vrlo kompleksan i računarski zahtevan, posebno kada se primenjuje na mreže velikih dimenzija kakve su realne elektrodistributivne mreže. Jednostavniji, a detaljniji pristup od opisanog analitičkog je pristup korišćenjem proračuna tokova snaga, koji je opisan u nastavku.

## 2.2 Proračun naponske fleksibilnosti korišćenjem proračuna tokova snaga

Proračun tokova snaga predstavlja proračun režima u kome je postignut bilans snaga proizvodnje i potrošnje zajedno sa gubicima. Postoji više algoritama za proračun tokova snaga elektrodistributivnih mreža [18]: postupak čišćenja unapred/unazad za simetrične i nesimetrične režime radialnih mreža, proračun u slaboupetljivim distributivnim mrežama primenom postupka čišćenja zajedno sa kompenzacionom procedurom, postupak injektiviranih struja, varijante Newton Raphson postupka, postupak zasnovan na metodi konturnih struja itd. U svim tim postupcima zajedničko je to da je ulaz u proračun topologija mreže, poznati električni parametri sekcija i transformatora kao i ostalih elemenata mreže, poznat napon napojnog čvora, poznate vrednosti potrošnje i poznate strategije upravljanja generatorima, što u većini slučajeva podrazumeva poznavanje proizvodnje generatora. Izlaz iz proračuna predstavlja izračunat režim, odnosno izračunate sve režimske veličine. U zavisnosti od tipa mreže koriste se odgovarajući postupci iz skupa navedenih postupaka. U ovom radu je za proračun tokova snaga korišćen deo postupka čišćenja unapred/unazad (postupak korekcije napona [19]) i deo postupka koji je zasnovan na metodi konturnih struja (postupak sumiranja struja [20]). Ova dva postupka su

iskorišćena za proračun simetričnih tokova snaga. Oni su izabrani jer se mogu iskoristiti za uvažavanje neizvesnosti proizvodnje i potrošnje, o čemu će u narednim glavama biti reči.

Da bi se odredila naponska fleksibilnost korišćenjem proračuna tokova snaga prvo je potrebno izvršiti jedan proračun tokova snaga za izabrane vrednosti proizvodnje generatora i zapamtiti vrednosti napona čvorova. Zatim je potrebno izvršiti onoliko proračuna koliko ima generatora koji imaju fleksibilnu proizvodnju i nakon svakog proračuna zapamtiti vrednosti napona čvorova. Pri tome je u svakom proračunu potrebno promeniti vrednost snage proizvodnje jednog generatora u odnosu na vrednost iz prvog proračuna tokova snaga. Ovakvim diferencijalnim postupkom dolazi se do naponske fleksibilnosti u zavisnosti od fleksibilnosti proizvodnje.

Nedostatak ovakvog pristupa je manja efikasnost kada se primenjuje na velike elektrodistributivne mreže sa velikim brojem generatora. Osim toga, u velikim elektrodistributivnim mrežama uticaj pojedinačnih generatora na naponske prilike je mali pa bi efikasniji postupak bio posmatranje uticaja fleksibilnosti proizvodnje grupe generatora na fleksibilnost napona dela mreže. Ovakav pristup bi podrazumevao prethodno utvrđivanje grupa generatora sa sličnim uticajem na naponske prilike. Utvrđivanje grupa bi se moglo vršiti analitičkim pristupom koji je opisan u delu 2.1 gde bi se na osnovu normalizovanih dijagonalnih vrednosti matrice osetljivosti  $\hat{S}_k$  odredile grupe čvorova koje imaju sličan uticaj na naponske prilike [16].

### 3. MODELOVANJE NEIZVESNOSTI PROIZVODNJE I POTROŠNJE

Neizvesnost proizvodnje i potrošnje evidentan je problem koji unosi kompleksnost u proračune elektroenergetskih sistema [21,22]. Neizvesnosti se mogu modelovati primenom teorije verovatnoće, korišćenjem fazi brojeva, hibridnim pristupom, primenom teorije odlučivanja sa nedostatkom podataka, robusnom optimizacijom i intervalnom aritmetikom [21,22]. U ovom radu su neizvesnosti modelovane primenom intervalne aritmetike jer se taj način pokazao kao efikasan kada se razmatraju modeli velikih sistema kakav je elektrodistributivni sistem [23].

#### 3.1 Intervalna aritmetika

Interval je prvi put definisao Moore 1966. godine i time postavio temelj intervalne aritmetike [24]. Njegova definicija intervala  $x$ :

$$x \in [x_d, x_u], \quad (3.1.1)$$

dala je konzervativne rezultate kada su u pitanju primene aritmetičkih operacija u intervalnoj aritmetici [23]. Da bi se smanjila konzervativnost rezultata operacija sa intervalima koriste se korelacije. Novu definiciju intervala, koja uvažava korelacije u osnovnim aritmetičkim operacijama, predstavili su Piegat i Landowski [25]:

$$x \in [x_m + \alpha_x \Delta L_x], \alpha_x \in [-1, 1], \quad (3.1.2)$$

$$x_m = \frac{x_u + x_d}{2}, \Delta L_x = \frac{x_u - x_d}{2}.$$

Sa ovako definisanim intervalima jednostavno je uvažiti negativan korelacioni koeficijent  $k_{ab}^-$  prilikom sabiranja negativno koreliranih intervala  $a$  i  $b$ :

$$c = a + b = a_m + b_m + (1 + k_{ab}^-)(\alpha_a \Delta L_a + \alpha_b \Delta L_b), \alpha_a, \alpha_b \in [-1, 1], \quad (3.1.3)$$

odnosno uvažiti pozitivan korelacioni koeficijent  $k_{ab}^+$  prilikom oduzimanja pozitivno koreliranih intervala  $a$  i  $b$ :

$$c = a - b = a_m - b_m + (1 - k_{ab}^+)(\alpha_a \Delta L_a - \alpha_b \Delta L_b), \alpha_a, \alpha_b \in [-1, 1]. \quad (3.1.4)$$

Ovakvo sabiranje i oduzimanje koreliranih intervala daje rezultujući interval sa manjom širinom (neizvesnošću) u odnosu na slučaj bez uvažanih korelacija.

#### 3.2. Neizvesnosti proizvodnje i potrošnje

Efikasan način modelovanja neizvesnosti proizvodnje generatora za potrebe proračuna fleksibilnosti je korišćenjem intervalne aritmetike i definisanjem vrednosti neizvesnosti  $s_G$ . Ta vrednost predstavlja procenat vrednosti proizvodnje aktivne  $P_G$  i reaktivne  $Q_G$  snage generatora. Sa tako definisanom neizvesnošću, proizvodnja aktivne i reaktivne snage generatora se može predstaviti na sledeći način:

$$P_{Gx}^{int} \in [P_{Gx} + \alpha_{Gx} \Delta P_{Gx}], \Delta P_{Gx} = \frac{s_G}{100} P_{Gx}, \quad (3.2.1)$$

$$Q_{Gx}^{int} \in [Q_{Gx} + \alpha_{Gx} \Delta Q_{Gx}], \Delta Q_{Gx} = \frac{s_G}{100} Q_{Gx},$$

$$x \in \{a, b, c\}, \alpha_{Gx} \in [-1, 1].$$

Potrošnja potrošača se u elektrodistributivnim sistemima modeluje kao potrošnja zavisna od napona. Aktivna  $P_{Cx}$  i reaktivna  $Q_{Cx}$  snaga potrošnje potrošača se može definisati na sledeći način:

$$P_{Cx} = k_{sp} P_{Cx}^{spec} + k_{ip} P_{Cx}^{spec} u_x + k_{yp} P_{Cx}^{spec} u_x^2, \quad (3.2.2)$$

$$Q_{Cx} = k_{sq} Q_{Cx}^{spec} + k_{iq} Q_{Cx}^{spec} u_x + k_{yq} Q_{Cx}^{spec} u_x^2,$$

$$x \in \{a, b, c\}, u_x = \frac{U_x}{U_{Cn}},$$

$$k_{sp} + k_{ip} + k_{yp} = 1, k_{sq} + k_{iq} + k_{yq} = 1,$$

gde su:

$P_{Cx}^{spec}, Q_{Cx}^{spec}$  – specificirana aktivna i reaktivna snaga potrošnje u fazi  $x$ ,

$k_{sp}, k_{ip}, k_{yp}, k_{sq}, k_{iq}, k_{yq}$  – koeficijenti zavisnosti aktivne i reaktivne snage potrošnje od napona,

$U_x$  – moduo napona u fazi  $x$ ,

$U_{Cn}$  – nominalni napon potrošača.

Neizvesnosti potrošnje se modeluju na isti način kao i neizvesnosti proizvodnje korišćenjem intervalne aritmetike i definisanjem vrednosti neizvesnosti  $s_C$ . Ta vrednost predstavlja procenat vrednosti potrošnje specificirane aktivne  $P_{Cx}^{spec}$  i reaktivne  $Q_{Cx}^{spec}$  snage potrošača. Sa tako definisanim neizvesnošću, specificirana potrošnja aktivne i reaktivne snage potrošača se može predstaviti na sledeći način:

$$P_{Cx}^{spec \text{ int}} \in [P_{Cx}^{spec} + a_{Cx} \Delta P_{Cx}^{spec}], \Delta P_{Cx}^{spec} = \frac{s_C}{100} P_{Cx}^{spec},$$

$$Q_{Cx}^{spec \text{ int}} \in [Q_{Cx}^{spec} + a_{Cx} \Delta Q_{Cx}^{spec}], \Delta Q_{Cx}^{spec} = \frac{s_C}{100} Q_{Cx}^{spec}, \quad (3.2.3)$$

$$x \in \{a, b, c\}, a_{Cx} \in [-1, 1].$$

#### 4. PRORAČUN NAPONSKE FLEKSIBILNOSTI SA UVAŽENIM NEIZVESNOSTIMA PROIZVODNJE I POTROŠNJE

U drugoj glavi su opisana dva načina određivanja naponske fleksibilnosti: analitičkim pristupom i pristupom korišćenjem proračuna tokova snaga. Oba pristupa se mogu proširiti uvažavanjem neizvesnosti proizvodnje i potrošnje što je predmet analize u ovoj glavi.

##### 4.1 Analitički pristup sa neizvesnostima

Neizvesnosti proizvodnje i potrošnje se u analitičkom pristupu mogu uvažiti korišćenjem relacije (2.1.7). Taj matematički model je linearan i nije u skladu sa nelinearnom reprezentacijom fleksibilnosti proizvodnje i potrošnje i njihove neizvesnosti. Uz odgovarajuće aproksimacije, matematički model (2.1.7) se može transformisati u model u kome su naponske fleksibilnosti linearno povezane sa fleksibilnošću proizvodnje i potrošnje. Neka se posmatra promena injektirane struje u čvoru  $k$ ,  $\Delta \hat{I}_k$ , što predstavlja  $k$ -ti element vektora  $\Delta \hat{\mathbf{I}}$ . Promenu te injektirane struje je potrebno predstaviti preko promene injektirane snage  $\Delta \hat{S}_k$ , pri čemu se napon promeni za  $\Delta \hat{U}_k$ :

$$\Delta \hat{I}_k = \hat{I}_{k \text{ promenjeno}} - \hat{I}_k = \frac{\hat{S}_k + \Delta \hat{S}_k}{(\hat{U}_k + \Delta \hat{U}_k)^*} - \frac{\hat{S}_k}{\hat{U}_k^*} = \frac{(\hat{S}_k + \Delta \hat{S}_k) \hat{U}_k^* - \hat{S}_k (\hat{U}_k + \Delta \hat{U}_k)^*}{\hat{U}_k^* (\hat{U}_k + \Delta \hat{U}_k)^*} = \frac{\Delta \hat{S}_k \hat{U}_k^* - \hat{S}_k \Delta \hat{U}_k^*}{\hat{U}_k^* (\hat{U}_k + \Delta \hat{U}_k)^*}. \quad (4.1.1)$$

U elektrodistributivnim sistemima promena napona sa promenom injektirane snage je mnogo manja u odnosu na samu vrednost napona [10]. Zbog toga je opravdano napisati:

$$\frac{\Delta \hat{U}_k^*}{\hat{U}_k^* (\hat{U}_k + \Delta \hat{U}_k)^*} \approx 0, \quad (4.1.2)$$

odakle sledi:

$$\Delta \hat{I}_k = \frac{\Delta \hat{S}_k}{\hat{U}_k^* + \Delta \hat{U}_k^*}. \quad (4.1.3)$$

Kada se injektirana snaga u čvoru poveća povećaće se i napon u čvoru i tada se može napisati nejednakost:

$$\frac{\Delta \hat{S}_k}{\hat{U}_k^* + \Delta \hat{U}_k^*} < \frac{\Delta \hat{S}_k}{\hat{U}_k^*}. \quad (4.1.4)$$

Na osnovu te nejednakosti količnik promene injektirane snage i napona čvora predstavljaće pesimističku aproksimaciju promene injektirane struje, a time uticati da se u relaciji (2.1.7) dobiju pesimističke vrednosti promene napona. Ukoliko se razmatra analiza promene napona u cilju održavanja napona u željenim granicama, ovakva pesimistička aproksimacija promene injektirane stuje pozitivno će uticati na rezultate te analize. Shodno tome, ako se vektorom  $\Delta \hat{\mathbf{S}}$  definiše promena injektirane snage čvorova, relacija (2.1.7) se može aproksimirati na sledeći način:

$$\Delta \hat{\mathbf{U}} \approx \frac{1}{\hat{\lambda}_k} \hat{\mathbf{S}}_k^T \Delta \hat{\mathbf{I}} \approx \frac{1}{\hat{\lambda}_k} \hat{\mathbf{S}}_k^T \frac{\Delta \hat{\mathbf{S}}}{\hat{\mathbf{U}}}. \quad (4.1.5)$$

Ovakva aproksimacija je opravdana jer sa promenom injektirane snage generatora u elektrodistributivnim mrežama važi da je  $\Delta \hat{U} \ll \hat{U}$ . Ovakvim analitičkim modelom se na jednostavan način mogu izračunati naponske fleksibilnosti izabranog čvora u zavisnosti od fleksibilnosti proizvodnje i potrošnje i na jednostavan način se mogu uvažiti neizvesnosti naponske fleksibilnosti preko neizvesnosti proizvodnje i potrošnje.

#### 4.2 Proračun naponske fleksibilnosti korišćenjem proračuna tokova snaga sa neizvesnostima

Proračun tokova snaga sa neizvesnostima je detaljno opisan u [23]. Neizvesnosti su modelovane intervalnom aritmetikom i direktno su uvažene u proračun tokova snaga. Osim toga uvažene su i korelacije između proizvodnje i potrošnje u cilju smanjenja problema pesimističkog širenja rezultujućih intervala i dobijanja konzervativnih rešenja. Koristeći proračun tokova snaga sa neizvesnostima potrebno je izračunati intervale napona svih čvorova sa izabranim vrednostima proizvodnji svih generatora i potrošača. Zatim je potrebno simulirati promenu proizvodnje i/ili potrošnje i sa takvim vrednostima izvršiti još jedan proračun tokova snaga sa neizvesnostima. Razlika intervala napona dobijenih u dva proračuna predstavlja naponsku fleksibilnost sa uvaženim neizvesnostima. Ovakav pristup daje realističnije rezultate u odnosu na analitički, ali je računarski zahtevniji kada se primenjuje na mrežama velikih dimenzija sa velikim brojem elemenata.

### 5. REZULTATI

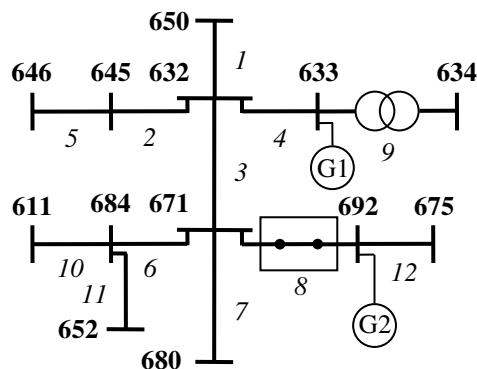
U ovoj glavi su prikazani rezultati proračuna naponske fleksibilnosti sa uvaženim neizvesnostima proizvodnje i potrošnje. Vršeni su proračuni na primeru IEEE mreže sa 13 čvorova. U proračunima su primenjeni analitički pristup i pristup korišćenjem proračuna tokova snaga. Rezultati oba pristupa su međusobno upoređeni, a takođe su upoređeni sa rezultatima dobijenim primenom determinističkog proračuna tokova snaga sa Monte Karlo simulacijama neizvesnosti proizvodnje i potrošnje.

Na slici 5.1 je predstavljena IEEE mreža sa 13 čvorova [26]. Za potrebe proračuna mreža je pojednostavljena da bi se lakše uočio uticaj uvažavanja neizvesnosti na naponsku fleksibilnost. Modifikacije mreže su:

- sve sekcije su trofazne, uravnotežene, sa istim parametrima uzetim iz konfiguracije 601 [26]:  $r = 0,1155 \Omega/\text{km}$ ,  $x = 0,3707 \Omega/\text{km}$ ,  $b = 4,5331 \mu\text{S}$ ,  $r0 = 0,4059 \Omega/\text{km}$ ,  $x0 = 1,1845 \Omega/\text{km}$ ,  $b0 = 2,0505 \mu\text{S}$ ,
- dodata su dva generatora u čvorovima 633 i 692 sa snagama proizvodnje 500 kW,
- potrošnja potrošača je raspodeljena po svim fazama tako da su potrošači uravnoteženi,
- korelacije između potrošača i generatora su prikazane u tabeli 5.1, gde su potrošači označeni slovom P i brojem čvora u kome su priključeni,
- svi potrošači i generatori koji su korelisani imaju neizvesnost 5%.

Tabela 5.1 – Korelacioni koeficijenti između generatora i potrošača

Korelisani elementi	G1	G1	G2	G2	P692
	G2	P634	P692	P675	P675
Korelacioni koeficijent	-0,9	0,7	0,7	0,7	-0,7



Slika 5.1 – IEEE mreža sa 13 čvorova

U proračunima je korišćen bazni napon  $V_b = 4,16$  kV i bazna snaga  $S_b = 3$  MVA. Nakon izračunavanja matrice admitansi mreže, matrica je transformisana prema relaciji (2.1.3). Najmanja sopstvena vrednost je dobijena za poziciju čvora 684 u matrici admitansi i ona iznosi  $\hat{\lambda}_{684} = 4,357 - j7,996$ . Njoj odgovara matrica osetljivosti  $\hat{S}_{684}$ . Kada se izračunaju vrednosti matrice osetljivosti  $\hat{S}_{684}$  primenom relacije (2.1.5), vrednosti njenih dijagonalnih elemenata koji odgovaraju čvorovima 633 i 692 su  $\hat{S}_{684 G1} = 0,012434 - j 0,001329$  i  $\hat{S}_{684 G2} = 0,000352 + j0,000024$ . Na osnovu tih vrednosti zaključuje se da generator G1 više utiče od generatora G2 na naponske prilike u mreži.

Kada se izvrši deterministički proračun tokova snaga dobija se najniži napon u mreži za čvor 634  $U_{634} = 0,948583$  r.j. Kvantifikativni uticaj fleksibilnosti proizvodnje na napon čvora 634 se može odrediti primenom relacije (4.1.5) i na taj način se dobiti fleksibilnost napona  $\Delta U_{634}$ , što je prikazano u tabeli 5.2.

Kada se uvažava neizvesnosti proizvodnje generatora u analitičkom pristupu dobijaju se fleksibilnosti napona koje su prikazane u tabeli 5.2. Iz ovih rezultata se može zaključiti da neizvesnosti značajno utiču na naponsku fleksibilnost. U slučajevima kada su naponi blizu tehnički dozvoljenih granica, ako se ne uvažava neizvesnost u naponskoj fleksibilnosti mogu se doneti odluke o promeni snaga generatora tako da se naponi promene više (0,2006 %) ili manje (0,1815 %) nego što je očekivano (0,1910 %) tako da naponi ne budu sigurno u dozvoljenim granicama. Pored toga iz rezultata se može zaključiti da generator G1 ima mnogo veći uticaj na naponsku fleksibilnost čvora 634 od generatora G2 što je i očekivano s obzirom na blizinu generatora čvoru 634.

Za proračun naponske fleksibilnosti koristeći deterministički proračun tokova snaga potrebno je izvršiti tri proračuna tokova snaga: jedan kada su snage oba generatora 500 kW, drugi kada se samo snaga generatora G1 poveća za 500 kW i treći kada se samo snaga generatora G2 poveća za 500 kW. Kada se napon čvora 634, dobijen u drugom i trećem proračunu tokova snaga, oduzme od napona čvora dobijenog u prvom proračunu, dobijaju se naponske fleksibilnosti koje su prikazane u tabeli 5.3.

Iz rezultata se vidi da na naponske fleksibilnosti veći uticaj ima generator G1, što je u skladu sa tvrdnjom dobijenom na osnovu analitičkog proračuna naponske fleksibilnosti. Ako se uporede vrednosti fleksibilnosti dobijene analitičkim pristupom i pristupom korišćenjem proračuna tokova snaga, vidi se da su rezultati za generator G1 bliski dok za generator G2 nisu. To je u skladu sa tvrdnjom u delu 2.1 da se analitički pristup može koristiti sammo kada se posmatraju generatori i čvorovi koji su na istom izvodu, odnosno kada posmatrani generatori imaju bliske vrednosti odgovarajućih dijagonalnih elemenata matrice osetljivosti, što u ovom primeru nije slučaj.

Tabela 5.2 – Rezultati proračuna naponske fleksibilnosti primenom analitičkog pristupa

	$\Delta U_{634}$ [%]	$\Delta P_{G1}$ [kW]	$\Delta U_{634}$ [%]	$\Delta P_{G2}$ [kW]
Bez neizvesnosti	0,1910	500	0,0327	500
Sa neizvesnostima	[0,1815, 0,2006]	[475, 525]	[0,0310, 0,0343]	[475, 525]

Tabela 5.3 – Rezultati proračuna naponske fleksibilnosti korišćenjem proračuna tokova snaga

	$\Delta U_{634}$ [%]	$\Delta P_{G1}$ [kW]	$\Delta U_{634}$ [%]	$\Delta P_{G2}$ [kW]
Bez neizvesnosti	0,2951	500	0,2870	500
Sa neizvesnostima	[-0,43314, 1,02342]	[475, 525]	[-0,5026, 1,07606]	[475, 525]

Kada se uvažava neizvesnosti proizvodnje i potrošnje dobijaju se naponske fleksibilnosti kao što je dato u tabeli 5.3. Iz ovih rezultata se mogu izvesti isti zaključci kao kod rezultata dobijenih analitičkim pristupom.

Da bi se potvrdila konzistentnost rezultata primenom dva navedena postupka, izvršen je proračun naponske fleksibilnosti primenom determinističkog proračuna tokova snaga sa Monte Karlo simulacijama. Izvršene su tri grupe proračuna: jedna kada su snage generatora 500 kW, druga kada se samo snaga generatora G1 poveća za 500 kW i treća kada se samo snaga generatora G2 poveća za 500 kW. U svim grupama su vršeni proračuni sa simuliranim neizvesnostima proizvodnje 5% i pri tome je za svaku grupu simulirano 100000 proračuna tokova snaga. Kada se odrede granične vrednosti napona svih čvorova u sva tri slučaja i kada se naponi čvorova, dobijeni u drugoj i trećoj grupi proračuna tokova snaga, oduzmu od napona čvorova dobijenih u prvoj grupi proračuna, dobijaju se naponske fleksibilnosti. U tabeli 5.4 prikazane su naponske fleksibilnosti čvora 634 u zavisnosti od promene proizvodnje generatora G1 i G2, kao i neizvesnosti tih generatora.

Tabela 5.4 – Rezultati proračuna naponske fleksibilnosti korišćenjem Monte Karlo simulacija

Grupa proračuna	$P_{G1}$ [kW]	$P_{G2}$ [kW]	$U_{634}$ [%]	$\Delta U_{634}$ [%]
1	[475, 525]	[475, 525]	[94,3302, 94,8110]	/



2	[950, 1050]	[475, 525]	[94,6083, 95,1159]	[-0,2027, 0,7858]
3	[475, 525]	[950, 1050]	[94,5999, 95,1049]	[-0,2111, 0,7748]

Iz ovih rezultata očigledno je da dva predložena postupka za određivanje naponske fleksibilnosti daju pesimističke rezultate. Poredeći rezultate dobijene Monte Karlo i analitičkim pristupom, veće neizvesnosti kod Monte Karlo pristupa posledica su uvažavanja svih neizvesnosti dok je kod analitičkog pristupa uvažena samo neizvesnost jednog generatora. Poredeći rezultate dobijene Monte Karlo pristupom i proračunom tokova snaga sa uvažanim neizvesnostima vidi se da problem širenja intervala (problem zavisnosti u intervalnoj aritmetici) nije mnogo izražen. Dobijanje preciznih rezultata Monte Karlo simulacijama je računarski mnogo zahtevnije u poređenju sa druga dva pristupa. Pristup sa Monte Karlo simulacijama bio bi vrlo neefikasan kada bi se primenio na mrežama velikih dimenzija sa velikim brojem distribuiranih generatora za razliku od druga dva navedena pristupa.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljen uticaj neizvesnosti proizvodnje i potrošnje na proračun naponskih prilika u mreži. Predstavljena je zavisnost naponske fleksibilnosti od fleksibilnosti proizvodnje i potrošnje. U proračunu naponske fleksibilnosti su uvažene neizvesnosti proizvodnje i potrošnje koje su modelovane intervalima. Time je neizvesnost modelovana na jednostavan način koji se efikasno može uvažiti u proračunima. Predstavljena su dva proračuna naponske fleksibilnosti: analitičkim pristupom i korišćenjem proračuna tokova snaga. Istaknute su prednosti i mane oba pristupa i na osnovu njih je utvrđeno da se korišćenjem oba pristupa dobija efikasan način da se izračunaju naponske fleksibilnosti. Ako bi se analitički pristup koristio za utvrđivanje grupa generatora koje najviše utiču na naponske prilike, a proračunom tokova snaga izračunale naponske fleksibilnosti tih grupa generatora, takav pristup bi bio efikasan za primenu na mrežama velikih dimenzija. Pored toga, modelovanje neizvesnosti intervalima u proračunu naponske fleksibilnosti omogućilo bi da se taj proračun efikasno primeni na mreže velikih dimenzija.

Na osnovu dobijenih rezultata utvrđeno je da je neophodno uvažiti neizvesnosti u proračunu naponske fleksibilnosti. Ukoliko se neizvesnosti ne bi uvažile imala bi se pogrešna slika o zavisnosti promene napona od promene proizvodnje i potrošnje. To bi uticalo da se donesu odluke o angažovanju generatora koje bi narušile kvalitet napona i učinile da naponi budu izvan tehnički dozvoljenih granica.

Analizom rezultata proračuna naponske fleksibilnosti sa uvažanim neizvesnostima primenom analitičkog pristupa utvrđeno je da on daje dovoljno tačne rezultate kada se razmatraju generatori i čvorovi na istom izvodu. Korišćenjem analitičkog pristupa zajedno sa proračunom tokova snaga sa uvažanim neizvesnostima proizvodnje i potrošnje, dobijaju se realističniji rezultati od onih dobijenih tradicionalnim pristupom korišćenjem Monte Karlo simulacija. U proračunu tokova snaga su uvažene korelacije između intervala. Time je smanjena konzervativnost rezultata i potvrđena mogućnost primene na mrežama sa velikim brojem generatora i potrošača. Primena tradicionalnog pristupa na takvim mrežama je neefikasna.

Poredeći rezultate analitičkog pristupa i korišćenjem proračuna tokova snaga, utvrđeno je da oba pristupa imaju ograničenja: analitičkim se ne dobijaju dovoljno tačni rezultati za generatore i čvorove koji su udaljeni, a korišćenjem proračuna tokova snaga je potrebno izvršiti veliki broj proračuna. Korišćenjem oba pristupa se efikasno dobijaju tačni rezultati za naponsku fleksibilnost sa uvažanim neizvesnostima proizvodnje i potrošnje.

## LITERATURA

- [1] Lew D, Brinkman G, Kumar N, Lefton S, Jordan G and Venkataraman S, 2013, "Finding flexibility: Cycling the conventional fleet", IEEE Power Energy Mag, 11(6), 20-32
- [2] [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Greenhouse\\_gas\\_emission\\_statistics\\_-\\_air\\_emissions\\_accounts](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Greenhouse_gas_emission_statistics_-_air_emissions_accounts)
- [3] 2020, "Renewables 2020 Global Status Report", REN21, Paris
- [4] [https://ec.europa.eu/clima/eu-action/international-action-climate-change\\_en](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/international-action-climate-change_en)
- [5] Babatunde OM, Munda JL and Hamam Y, 2020, "Power system flexibility: A review", Energy Reports, 6(2), 101-106
- [6] Cochran J, Miller M, Zinaman O, Milligan M, Arent D and others, 2014, "Flexibility in 21st Century Power Systems". United States
- [7] 2011, "Importance of Flexible Electricity Supply: Solar Integration Series. 1 of 3 (Brochure)", Energy Efficiency & Renewable Energy, United States

- [8] Lannoye E, Flynn D and O'Malley M, 2011, "The role of power system flexibility in generation planning", IEEE Power and Energy Society General Meeting
- [9] Haas J, Cebulla F, Cao K, Nowak W, Palma-Behnke R, Rahmann C and Mancarella P, 2017, "Challenges and trends of energy storage expansion planning for flexibility provision in low-carbon power systems – a review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 80, 603-619
- [10] Jhala K, Natarajan B and Pahwa A, 2018, "Probabilistic Voltage Sensitivity Analysis (PVSA)—A Novel Approach to Quantify Impact of Active Consumers", IEEE Trans on Power Systems, 33(3), 2518-2527
- [11] Babatunde OM, Munda JL and Hamam Y, 2019, "A comprehensive state-of-the-art survey on power generation expansion planning with intermittent renewable energy source and energy storage", International Journal of Energy Research, 43
- [12] Husdal J, 2004, "Robustness and flexibility as options to reduce uncertainty and risk", Molde University College, Molde, Norway
- [13] Milovanović VG i Đorđević ŽR, 2004, "Linearna algebra", Elektronski fakultet u Nišu
- [14] Friedman B, 1962, "Principles and techniques of applied mathematics", John Willey & Sons, New York
- [15] Macedo JR and Resende JW, 2002, "The inherent structure theory of networks and admittance matrix sparsity relationship", 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 1, 127-132
- [16] Valtorta G, 2011, "Prototypes and algorithms for network management, providing the signals sent by the DSOs to the aggregators and the markets, enabling and exploiting active demand", ADDRESS Consortium EU-FP7
- [17] Carpinelli G, Russo A, Russo M and Verde P, 1998, "Inherent structure theory of networks and power system harmonics", 145, 123–132
- [18] Strezoski VC i Vidović PM, 2015, "Power flow for general mixed distribution networks", Int Trans Electr Energy Syst, 10, 2455–2471
- [19] Shirmohammadi D, Hong HW, Semlyen A and Luo GX, 1988, "A compensation-based power flow method for weekly meshed distribution and transmission networks", IEEE Trans Power Syst, 2, 753–62
- [20] Teng JH, 2003, "A direct approach for distribution system load flow solutions", IEEE Trans Power Delivery, 3, 882–887
- [21] Ajeigbe OA, Munda JL and Hamam Y, 2020, "Renewable distributed generations' uncertainty modelling: a survey", IEEE PES/IAS PowerAfrica, 1-5
- [22] Zobaa AF and Aleem SA, 2021, "Uncertainties in modern power systems," CA: Academic Press
- [23] Vidović MP i Sarić TA, 2017, "A novel correlated intervals-based algorithm for distribution power flow calculation", Int J Electr Power Energy Syst, 90, 245–255
- [24] Moore RE, 1966, "Interval analysis," Prentice-Hall, Englewood Cliff, NJ.
- [25] Piegat A and Landowski M, 2012, "Is the conventional interval arithmetic correct?", 2, 27-44
- [26] Kersting WH, 2001, "Radial distribution test feeders", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194), Columbus, OH, USA, 2, 908-912

