

Optimalno pozicioniranje sinhrofazorskih jedinica primenom genetičkog algoritma

PMU Optimal Placement Using Genetic Algorithm

Katarina Obradović, Goran Dobrić

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Rezime - Proces energetske tranzicije podrazumeva i veći udeo proizvodnje iz intermitentnih obnovljivih izvora energije povezanih na elektroenergetski sistem (EES), koji u kratkom periodu mogu da promene proizvodnju i tako utiču na naponske prilike i tokove snaga u sistemu. To pred EES postavlja dodatan izazov u postizanju zahtevane pouzdanosti i stabilnosti u radu. Dobar i blagovremen uvid u trenutno stanje električnih parametara mreže igra važnu ulogu u takvim uslovima. Ugradnjom sinhrofazorskih jedinica, odnosno PMU (Phasor Measurement Unit) uređaja, omogućava se da podaci o električnim veličinama čvorova budu vremenski usklađeni sa mikrosekundnom preciznošću obezbeđujući kontrolisanje čak i dinamičkih procesa EES-a u realnom vremenu.

S obzirom da PMU može pored informacije o fazoru napona u posmatranom čvoru da da i informacije o strujama incidentnih grana, moguće je postići opservabilnost sistema čak i ako ne poseduje svaki čvor svoj PMU. Ugradnja PMU uređaja u svaki čvor EES-a ne predstavlja ekonomično rešenje s obzirom na veličinu mreže i broj potrebnih jedinica u tom slučaju. Stoga, neophodno je pažljivo pristupiti određivanju potrebnog i dovoljnog broja PMU-a i njihovom pogodnom lociranju kako bi opservabilnost sistema bila zadržana, a troškovi umanjeni što je više moguće.

U okolnostima kada postoji veliki broj čvorova i grana u modelovanoj mreži, korišćenjem metaheurističkih optimizacionih metoda uz odgovarajuću kriterijumsku funkciju i što preciznije definisana ograničenja može da se smanji računarska kompleksnost algoritma u odnosu na metode linearnog i nelinearnog programiranja, bez značajnog uticaja na kvalitet predloženog rešenja. U ovom radu analizirano je korišćenje genetičkog optimizacionog algoritma sa ciljem određivanja pozicije i broja neophodnih PMU uređaja na primeru nekoliko različitih modela mreža.

Ključne reči - PMU (phasor measurement units), optimizacija lociranja PMU, genetički algoritam

Abstract - Energy transition implies a larger share of the intermittent renewable energy sources connected to the power grid. These utilities can change their production within a short period of time, thus, significantly affecting the voltage conditions and load flows in the grid. This adds to the complexity in achieving required reliability and stability of the system. Proper and timely insight into the grid parameters plays an important

role in regulation of such power system. Implementation of Phasor Measurement Units (PMUs) provides information about electrical parameters of the grid with as much as microsecond precision. Therefore, possible occurring dynamical processes could also be observed and regulated in a proper manner.

Considering PMU can give information regarding voltage phasor as well as currents of adjacent branches, the observability of the system can be achieved even if some nodes are not equipped with their own PMU. Furthermore, installation of PMU in every node is not economical solution considering the size of the power grid and the number of PMUs accordingly. One should assess the sufficient number of PMUs cautiously and locate them carefully in order to maintain observability, but also to reduce expenses as much as possible.

In the grid topology with a vast number of nodes and branches, the usage of metaheuristic optimization algorithms with adequate criteria function and limiting conditions could reduce the computing time compared to the linear and non-linear programming algorithms. In addition, the quality of such solution is also preserved. In this paper, the usage of genetic algorithm is proposed in order to determine the number and position of PMUs for several different grid samples.

Index Terms - Phasor measurement units, Optimal placement of PMU, Genetic algorithm

I UVOD

Kako bi energetska tranzicija mogla što efikasnije i jednostavnije da se sprovede, neophodno je novim zahtevima prilagoditi i elektroenergetski sistem (EES) i njegovu infrastrukturu. Priklučenje obnovljivih izvora energije intermitentne prirode može dovesti do naglih promena naponskih prilika i tokova snaga u EES-u ugrožavajući stabilnost sistema. To je jedan od razloga zašto je potrebno da sinhronizovanost i preciznost merenja budu na visokom nivou čineći *Wide Area Measurement System* (WAMS) koji predstavlja tehnologiju za unapređenje uvida u stanje EES-a [1].

Trenutno rasprostranjeni *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA/EMS) sistem obezbeđuje neophodna merenja sa preciznošću reda nekoliko sekundi što znači da operator nema uvid u dinamičko stanje sistema. Takođe, vrše se merenja amplituda napona bez informacije o faznom stavu i sa slabijom sinhronizovanošću, onemogućavajući pregled dešavanja

u mreži u širem regionu i interkonekciji [2].

S druge strane, novije tehnologije u vidu sinhrofazorskih jedinica (*Phasor Measurement Unit* - PMU) relevantna merenja mogu da obezbede sa frekvencijom većom i nekoliko hiljada puta. Za sinhronizaciju podataka se u ovom slučaju koristi *Global Positioning System* (GPS). Dobijajući vremensku oznaku, ovako dobijeni podaci predstavljaju osnovu WAMS-a [2].

Pomoću PMU-a stiže se uvid kako u amplitudu tako i u fazni stav merene veličine, dok se sinhronizacija dobijenih podataka vrši koristeći *Coordinated Universal Time* obezbeđujući mikrosekundnu preciznost. Tako usklađeni podaci šalju se na *Phasor Data Concentrator* (PDC) gde se kreira slika stanja važnih električnih veličina EES-a. U zavisnosti od broja mernih kanala samog uređaja, mogu se meriti i struje i naponi. U EES-u Srbije postavljeni sinhrofazorski uređaji merenja izvršavaju na svakih 20 ms i trenutno ih ima 12. Ovo značajno poboljšava uvid u realno stanje sistema u realnom vremenu na osnovu kog se određene odluke o manipulacijama u sistemu mogu doneti značajno brže, pozitivno utičući na stabilan i pouzdan rad EES-a [3].

Primenom određenih pravila, traženu opservabilnost je moguće postići pametnim izborom manjeg broja čvorova u kojima će biti instaliran PMU uređaj, umesto postavljanja PMU uređaja u svaki čvor sistema što ne predstavlja prihvatljivo rešenje sa tehnološkog aspekta. Imajući to u vidu, pribegava se različitim algoritmima pomoću kojih se određuju najmanji broj i najpogodnije lokacije za postavljanje sinhrofazorskih uređaja.

U opštem slučaju, optimizacioni algoritmi u osnovi imaju konvencionalne ili heurističke metode. Prvi se mogu zasnivati na celobrojnom kvadratnom programiranju (*Integer Quadratic Programming*) ili celobrojnom linearnom programiranju (*Integer Linear Programming* - ILP). Neki od heurističkih algoritama koji su našli primenu u pozicioniranju PMU su genetički (GA), *Simulated Annealing* (SA), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Tabu Search* (TS), *Immune Genetic Algorithm* (IGA) itd. Kratak pregled najkorišćenijih metoda i algoritama može se videti u [4].

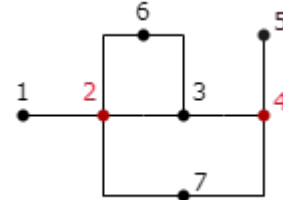
Iako ne garantuju globalno najbolje optimizaciono rešenje [5], zbog svog kraćeg vremena proračuna i generalno dosta manje zahtevne računarske kompleksnosti, heurističke metode se pokazuju kao pogodne pri određivanju broja i lokacija PMU uređaja u mrežama različitih veličina [6] [7] [8] [9] [10].

U ovom radu je u drugom poglavlju predstavljeno kako broj i lokacija utiču na estimaciju stanja i opservabilnost sistema, nakon čega su definisani optimizacioni problem i kriterijumska funkcija. U trećem je detaljno opisan primenjeni algoritam. Zatim su u četvrtom delu prikazani rezultati izvršene analize, a potom dati i zaključci.

II UTICAJ ODABIRA LOKACIJE I BROJA PMU, KRITERIJUMSKA FUNKCIJA I PROMENLJIVE

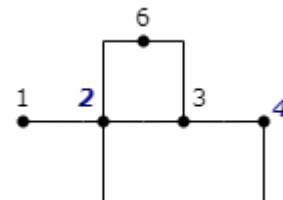
Kako je prethodno napomenuto, da bi se imao uvid u stanje EES-a sa strane napona i tokova snaga, nije neophodno da PMU uređaji budu instalirani u svakom čvoru sistema. Posmatrano na osnovu primera primene teorije grafova, ovaj zaključak proizilazi kao posledica Kirhofovih zakona i pod pretpostavkom da svaki

postavljeni PMU uređaj ima mogućnost merenja napona tog čvora i struja svih grana ekvivalentnog grafa. Dakle, postizanje topološke opservabilnosti sistema, primenom nekoliko pravila, odnosno uvođenjem nekoliko ograničenja često se obezbeđuje sa dosta manjim brojem PMU-a. Jedno takvo pravilo je da su osim čvora u kom je postavljen PMU opservabilni i njemu susedni čvorovi. Primera radi, mreža sa Slike 1 kako bi bila opservabilna dovoljno je da ima PMU uređaje samo u čvorovima 2 i 4. Postavkom PMU-a u 2 opservabilni postaju i čvorovi 1, 3, 7 i 6, dok je opservabilnost čvorova 4 i 5 postiže postavljanjem PMU uređaja u nekom od ta dva. Na ovaj način postignuta je opservabilnost svih 7 čvorova.



Slika 1. Primer jednostavne mreže gde se topološka opservabilnost postiže sa samo dva PMU uređaja

Neophodno je imati u vidu i različite tipove čvorova, poput čvorova nultog injektiranja (*Zero Injection Bus* - ZIB). Ovo su čvorovi u kojima nema priključenih proizvodnih jedinica kao ni potrošačkih područja. U realnoj elektroenergetskoj mreži oni mogu da predstavljaju razvodna postrojenja. Važno je i ZIB čvorove uzeti u obzir, jer adekvatnom primenom nekoliko pravila i oni mogu dodatno umanjiti broj neophodnih sinhrofazorskih jedinica [3]. Na primer, mreža sa Slike 1 koja ima 7 čvorova od kojih su ZIB čvorovi 7 i 4 može da se redukuje na 5 čvorova i 6 grana prikazanu na Slici 2. Tako se potencijalno smanjuje potreba za većim brojem PMU uređaja. Vidi se da je sada dovoljan samo jedan PMU uređaj postavljen u čvoru 2 za postizanje topološke opservabilnosti, što predstavlja umanjeње u odnosu na dva neophodna PMU-a za slučaj kad nije poznato ima li ZIB čvorova (Slika 1).

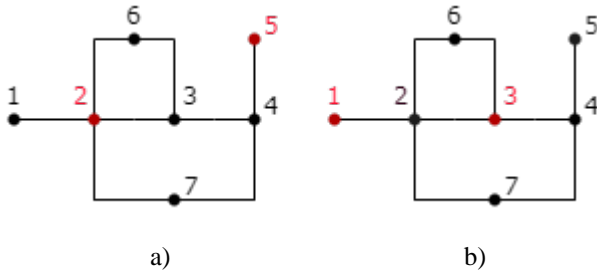


Slika 2. Redukovana mreža postignuta uvažavanjem čvorova nultog injektiranja

Na osnovu prethodnih primera, jasno je da nije samo broj PMU-a taj koji utiče na to da li stanje sistema može da se estimira, odnosno da li se postiže opservabilnost, već je izuzetno bitno i gde se definisani broj PMU uređaja postavlja. Tako, na primer, iako Slike 3. a) i 3. b) imaju jednak broj PMU-a, mreža pod a) jeste opservabilna, dok mreža pod b) nije.

Koliko će precizno i dobro rešenje sa strane odabira broja i pozicija PMU-a da se dobije, zavisi pre svega od načina definisanja kriterijumske funkcije i promenljivih sistema.

Usvojeno je da su promenljive sistema binarne odluke da li je PMU uređaj postavljen u posmatrane čvorove ili ne. Imajući na umu da su osim čvora u kojima su ugrađeni PMU uređaji opservabilni i svi čvorovi susedni tom čvoru, neophodno je odrediti matematičke uslove koji to uvažavaju.



Slika 3. Ugradnjom PMU u čvorove 2 i 5 pod a) prikazana mreža jeste topološki opservabilna, dok mreža pod b) sa PMU u čvorovima 1 i 3 nije

Najpre je potrebno definisati matricu povezanosti čvorova na sledeći način:

$$[A]_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{za } i = j \\ 1, & \text{ako su } i \text{ i } j \text{ povezani čvorovi} \\ 0, & \text{ako } i \text{ i } j \text{ nisu povezani} \end{cases} \quad (1)$$

a zatim i matricu kolonu sa N redova:

$$[Z]_{i,1} = \begin{cases} 1, & \text{ako PMU jeste instaliran u } i - \text{tom čvoru} \\ 0, & \text{ako PMU nije instaliran u } i - \text{tom čvoru} \end{cases} \quad (2)$$

koja je reprezent stanja instaliranih PMU u sistem sa strane broja i lokacije. Potrebno je da bude ispunjen sledeći izraz:

$$[A]_{i \times j} \times [Z]_{N \times 1} \geq [B]_{N \times 1} \quad (3)$$

gde je

$$[B]_{N \times 1} = [111 \dots 1]^T \quad (4)$$

Potrebno je postići minimalnu vrednost sledeće sume:

$$\sum_{i=0}^N Z_i \cdot C_i \quad (5)$$

gde N predstavlja broj čvorova posmatrane mreže, Z_i je i -ti član matrice definisane u (2) [11], a C_i predstavlja težinski faktor cene instalacije PMU uređaja u i -tom čvoru. U ovom slučaju koeficijent C_i je uzet da za svaki čvor iznosi 1. Iako u ovom slučaju ne pravi razliku, u pojedinim optimizacionim problemima može igrati značajniju ulogu što će biti ilustrovano kasnije. Kako bi se postigla minimalna vrednost sume (5) primenjen je genetički algoritam opisan u nastavku.

III OPTIMIZACIJA

A. Genetički algoritam

Genetički algoritam je optimizaciona tehnika koja je zasnovana na evolutivnim i genetskim principima iz prirode. Pokazalo se da je GA pogodan za rešavanje nekontinualnih, nelinearnih i nediferencijabilnih problema gde su analitičke metode neprimenjive ili suviše računarski zahtevne. Iako ne postoji jedinstvena definicija genetičkog algoritma, može se reći da

većina GA metoda sadrži populaciju hromozoma, fitnes funkciju i ukrštanja, mutacije i selekcije kako bi se dobila nova generacija [12].

Hromozomi u GA tipično imaju oblik niza bitova (0 i 1), ali je moguće primeniti i dekadni zapis. Jedna populacija obuhvata sve hromozome. Fitnes funkcija je tu da brojčano opiše koliko je određeni hromozom pogodno rešenje u trenutnoj populaciji. Dakle, fitnes funkcija hromozoma pokazuje koliko dobro određen hromozom rešava problem.

Za određen N_{PMU} broj PMU jedinica i N_H broj čvorova u kojima nije instaliran PMU, u ovom radu fitnes funkcija [13] koja će biti korištena u GA je:

$$f = a \cdot N_{PMU} + b \cdot N_H + c \cdot N_{PMU} \cdot N_H \quad (6)$$

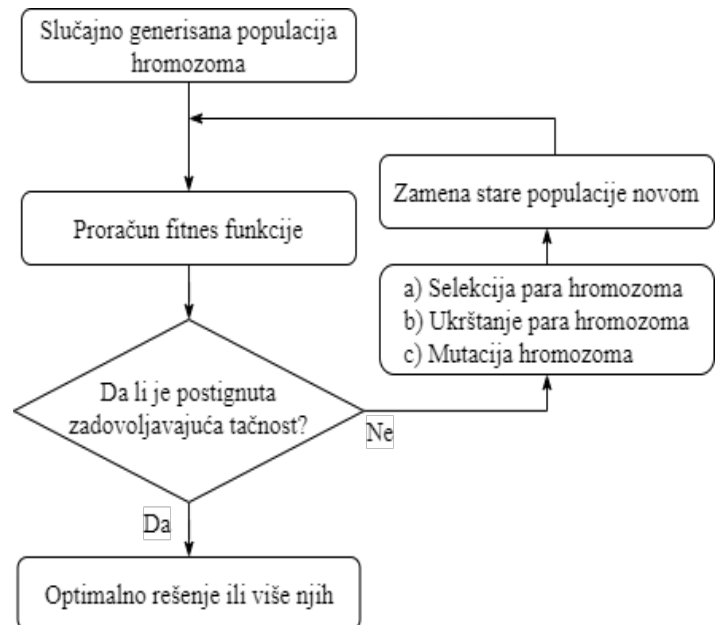
gde, a koeficijenti a , b i c su uzeti da budu 100, -10 i 1 redom.

Dalje, selekcija je operator koji izdvaja one hromozome iz jedne populacije za dalju reprodukciju. Što je hromozom pogodniji, to je verovatnije da će biti selektovan. U predstojećoj analizi biće primenjena i elitistička selekcija čiji je cilj da kvalitet generacija ne počne da opada.

Ukrštanje predstavlja formiranje novih rešenja tako što se na slučajno izabranim mestima u bitskim nizovima dva hromozoma odgovarajući bitovi nakon ili pre određene pozicije zamene. Na primer, ukrštanjem bitova 10011111 i 101010010 za pozicije nakon treće nastaju hromozomi 10011010 i 10101011. Ukrštanje se uglavnom odvija sa velikom verovatnoćom. U daljim analizama verovatnoća ukrštanja je usvojena da bude 90%.

Mutacija je operator koji slučajnim principom izmeni neki bit iz okvira istog hromozoma. Na primer, hromozom 10010 nakon mutacije može da bude 11010. Obično se odvija sa malom verovatnoćom. U ovom radu je usvojeno da iznosi 5%.

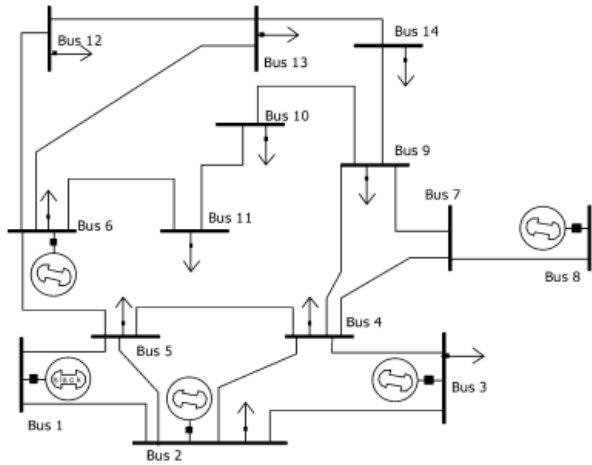
Na Slici 4 prikazan je uprošćen dijagram primenjenog GA.



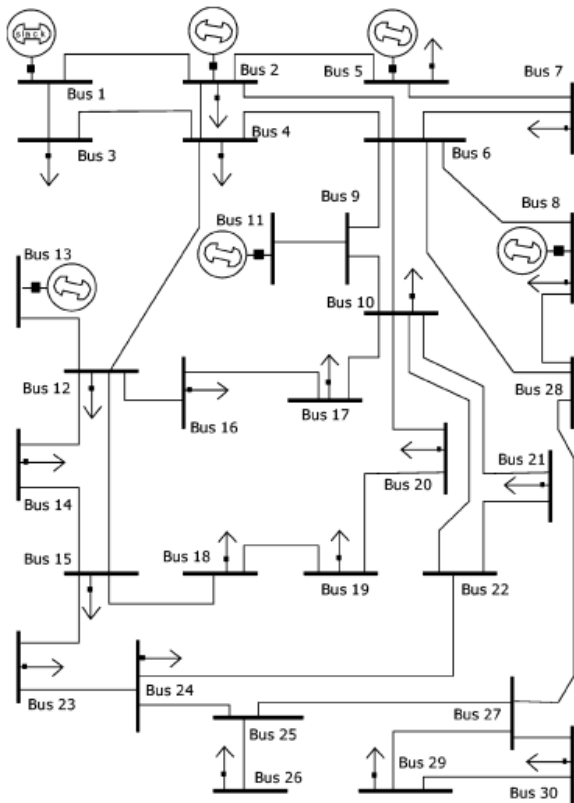
Slika 4. Blok dijagram toka genetičkog algoritma

B. Analizirane mreže

Navedena procedura odabira minimalnog broja i odgovarajućih lokacija PMU uređaja je primenjena na nekoliko različitih mreža. Prvo je analizirana IEEE test mreža sa 14 čvorova prikazana na Slici 5, zatim IEEE test mreža sa 30 čvorova prikazana na Slici 6.



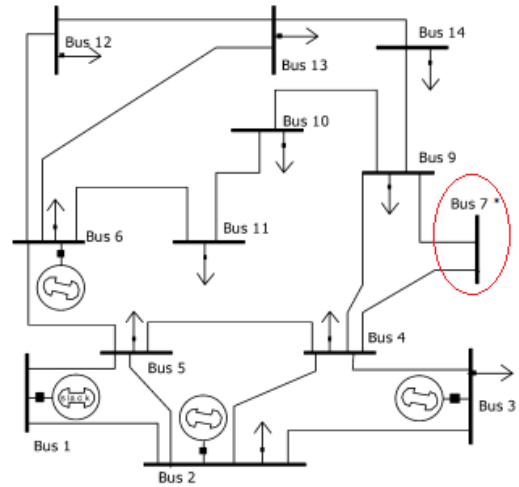
Slika 5. IEEE test mreža sa 14 čvorova [14]



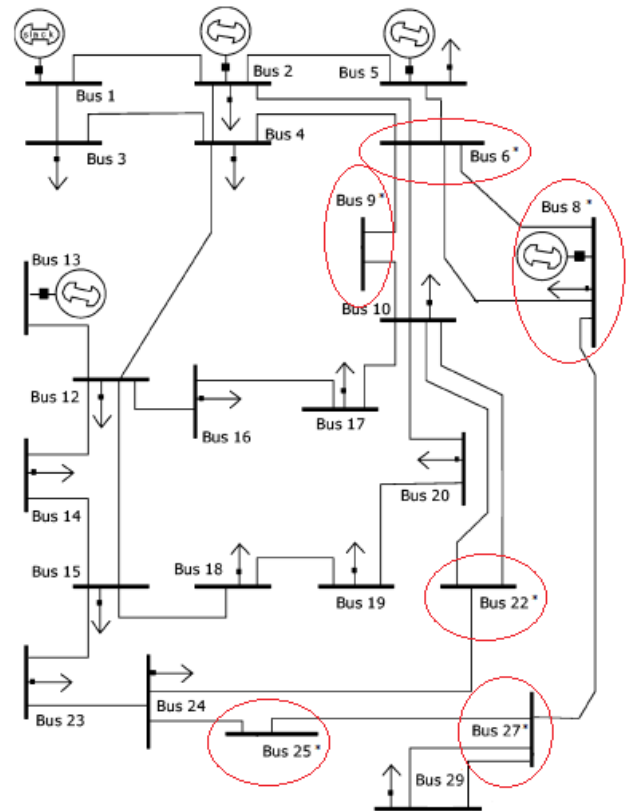
Slika 6. IEEE test mreža sa 30 čvorova [14]

Uzeti su u obzir i ZIB čvorovi - u mreži sa 14 čvorova to je sabirnica 7, a u mreži sa 30 to su sabirnice: 6, 9, 28, 22, 25 i 27. Redukovana šema IEEE test mreža modifikovane pomoću pravila navedenih u [3] ima 13 čvorova u prvom slučaju,

odnosno 24 čvora za drugu mrežu. Ekvivalentne mreže su prikazane na Slikama 7 i 8 gde su crvenom bojom označeni ekvivalentni čvorovi.



Slika 7. Redukovana IEEE test mreža sa 14 čvorova na 13 čvorova spajanjem ZIB čvora sa jednim susednim



Slika 8. Redukovana IEEE test mreža sa 30 čvorova na 24 čvora spajanjem ZIB čvorova

Sada je moguće definisati matrice povezanosti čvorova prema (1) na osnovu Slika 7 i 8. Odgovarajuća matrica za mrežu sa 14 čvorova od kojih je jedan ZIB je prikazana u (7).

$$[A]_{13 \times 13} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

U ovoj matrici osma kolona predstavlja čvor 9, deveta čvor 10 itd. kao posledica činjenice da su čvorovi 7 i 8 spojeni u jedan imajući na umu da je čvor 7 čvor nultog injektiranja. Na sličan način je definisana i matrica za mrežu sa Slike 6 i 24 čvora ekvivalentne šeme.

Na osnovu predstavljenih mreža i matrica povezanosti čvorova mogu se definisati i uslovi koje je neophodno ispuniti kako bi svaka od mreža bila opservabilna. Za mrežu sa Slike 7 primenom (3) sledi da je neophodno da bude ispunjen sledeći skup uslova kako bi se postigla opservabilnost:

$$F_{cond_{IEEE14}} = \begin{cases} x_1 + x_2 + x_5 \geq 1 \\ x_6 + x_{12} + x_{13} + x_{14} \geq 1 \\ x_6 + x_{10} + x_{11} \geq 1 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \geq 1 \\ x_6 + x_{12} + x_{13} \geq 1 \\ x_2 + x_3 + x_4 \geq 1 \\ x_9 + x_{10} + x_{11} \geq 1 \\ x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_{7*} + x_9 \geq 1 \\ x_1 + x_2 + x_6 + x_4 + x_5 \geq 1 \\ x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} \geq 1 \\ x_4 + x_{7*} + x_9 \geq 1 \\ x_4 + x_{7*} + x_9 + x_{10} + x_{14} \geq 1 \\ x_9 + x_{13} + x_{14} \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

gde su x_i binarne odluke da li je PMU postavljen u čvoru i . ZIB čvor 6 je spojen sa čvorom 7 i njihov ekvivalent je modelovan sa 7* kao na Slici 7.

Predlog rešenja postavljanja PMU uređaja u čvorove mreže sa Slike 6 treba da zadovolji sledeće uslove, gde su pritom čvorovi 6 i 7 spojeni u 6*, 8 i 28 u 8*, 9 i 11 u 9*, 21 i 22 u 22*, 25 i 26 u 25*, i konačno 27 i 30 u 27* kao što se može videti na Slike 8:



$$F_{cond_{IEEE30}} = \begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 \geq 1 \\ x_1 + x_3 + x_4 \geq 1 \\ x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_{6*} \geq 1 \\ x_6 + x_{8*} + x_{27} \geq 1 \\ x_2 + x_5 + x_{6*} \geq 1 \\ x_{6*} + x_{9*} + x_{10} \geq 1 \\ x_2 + x_3 + x_4 + x_{6*} + x_{12} \geq 1 \\ x_2 + x_4 + x_5 + x_{6*} + x_{8*} + x_{9*} + x_{10} \geq 1 \\ x_6 + x_{9*} + x_{10} + x_{17} + x_{20} + x_{22*} \geq 1 \\ x_{12} + x_{14} + x_{15} \geq 1 \\ x_4 + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} \geq 1 \\ x_{12} + x_{13} \geq 1 \\ x_{12} + x_{14} + x_{15} + x_{18} + x_{23} \geq 1 \\ x_{12} + x_{16} + x_{17} \geq 1 \\ x_{10} + x_{16} + x_{17} \geq 1 \\ x_{15} + x_{18} + x_{19} \geq 1 \\ x_{18} + x_{19} + x_{20} \geq 1 \\ x_{10} + x_{19} + x_{20} \geq 1 \\ x_{10} + x_{22*} + x_{24} \geq 1 \\ x_{15} + x_{23} + x_{24} \geq 1 \\ x_{22*} + x_{23} + x_{24} + x_{25*} \geq 1 \\ x_{24} + x_{25*} + x_{27*} \geq 1 \\ x_{8*} + x_{25*} + x_{27*} + x_{29} \geq 1 \\ x_{27*} + x_{29} \geq 1 \end{cases} \quad (9)$$

IV REZULTATI ANALIZE

Primenom GA opisanog u prethodnom poglavlju sa fitnes funkcijom (6) dobijeni su minimalni brojevi PMU uređaja uz definisane moguće pozicije, a rezultati su prikazani u Tabeli 1.

Poređenjem sa sličnim analizama izvršenim nad analiziranim test mrežama u [11] [14], vidi se da su se dobijeni ekvivalentni rezultati što opravdava korišćenje ove fitnes funkcije (6) uz izabrane vrednosti koeficijenata a , b i c .

Na osnovu Tabele 1 se vidi da sa porastom mreže raste i broj mogućih opcija pozicioniranja PMU uređaja. Ovo dodatno dolazi do izražaja u realnim elektroenergetskim mrežama koje mogu imati i značajno više čvorova od ovde analiziranih 30. Međutim, u realnim mrežama dodatni ograničavajući faktor predstavlja činjenica da cena instalacije PMU uređaja nije ista za svaku od sabirnica, te težinski faktori C_i u izrazu (5) neće biti 1 za svaki čvor. Na primer, na cenu PMU uređaja utiče i broj mernih kanala. U tom bi slučaju, pod pretpostavkom da se ide na to da budu merene struje svih grana koje se susište u posmatrani čvor, na posmatranom primeru čvor 10 bi bio jedan od najskupljih. Samim tim, suma (5) možda ne bi imala minimalnu vrednost. Ovakva analiza bi svakako uticala i na izgled fitnes funkcije koja bi pored broja PMU uređaja u sebi morala da sadrži i odgovarajuće korekzione faktore koji uvažavaju i cenu instalacije pojedinih čvorova.

Ipak, kako je početna pretpostavka bila da svaki čvor predstavlja podjednako dobro rešenje sa strane cene, čvor 10 se ispostavlja kao gotovo neophodan čvor za lokaciju PMU-a uz čvor 12. Pritom se opservabilnost delova mreže iznad i ispod njih postiže na nekoliko različitih načina. Dalja kombinacija svake od tih mogućnosti dovodi do 30 različitih mogućnosti postavljanja 7 PMU uređaja za IEEE mrežu sa 30 čvorova.

Tabela 1. Rezultati analize neophodnog broja PMU uređaja i njihovih pozicija u IEEE test mrežama sa 14 i 30 čvorova

	Broj ZIB čvorova	Broj PMU	Broj različitih rešenja	Pozicije PMU (brojevi čvorova)
IEEE test mreža, 14 čvorova	1	3	1	2 6 8
IEEE test mreža, 30 čvorova	6	7	30	1 2 10 12 19 23 27*; 1 2 10 12 18 23 27*; 1 2 10 12 18 24 27*; 1 2 10 12 19 24 27*; 1 5 10 12 18 23 27*; 1 5 10 12 18 24 27*; 1 5 10 12 19 23 27*; 1 5 10 12 19 24 27*; 1 6* 10 12 18 23 27*; 1 6* 10 12 18 24 27*; 1 6* 10 12 18 24 29; 1 6* 10 12 19 23 27*; 1 6* 10 12 19 24 27*; 2 3 10 12 18 23 27*; 2 3 10 12 18 24 27*; 2 3 10 12 19 23 27*; 2 3 10 12 19 24 27*; 2 4 10 12 18 23 27*; 2 4 10 12 18 24 27*; 2 4 10 12 19 23 27*; 2 4 10 12 19 24 27*; 3 5 10 12 19 23 27*; 3 6* 10 12 18 23 27*; 3 6* 10 12 18 24 27*; 3 6* 10 12 19 23 27*; 3 6* 10 12 19 24 27*; 3 5 10 12 18 23 27*; 3 5 10 12 19 24 27*; 3 5 10 12 18 24 27*; 1 6* 10 12 19 24 29

V ZAKLJUČAK

Sve izraženija dinamička priroda prikjučenih proizvodnih jedinica zahteva još preciznija i ažurnija merenja kako bi se održao stabilan, pouzdan i kvalitetan rad EES-a. Sinhrofazorske jedinice predstavljaju neizbežan element WAMS tehnologije doprinoseći bržem odzivu na promene u klasičnim sistemima. Pozicioniranje PMU uređaja predstavlja važan strateški korak u tehno-ekonomskim analizama razvoja EES-a. Manje računarski zahtevan od analitičkih metoda, genetički algoritam pokazao se kao dobar alat u rešavanju ovakvog problema. Njegovom primenom je određen broj i dispozicija PMU uređaja u dve standardne IEEE test mreže.

Za mrežu od 14 čvorova zaključeno je da su neophodna 3 PMU uređaja sa jedinstvenom dispozicijom, a mreža od 30 čvorova može biti opservabilna postavljanjem 7 sinhrofazorskih jedinica sa mogućnošću 30 različitih dispozicija. Uvaženi i čvorovi nultog injehtiranja i na taj način smanjeni neophodni brojevi PMU pozicija potrebnih za postizanje topološke opservabilnosti.

Dalja istraživanja će ići u smeru primene drugačijih fitness funkcija genetičkog algoritma, primene proračuna tokova snaga i naponskih prilika kao dela optimizacionog algoritma, kao i potencijalnog uvažavanja poteškoća instalacija PMU-a u određenim čvorovima na primeru realnih EES-a.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Autori zahvaljuju Ministarstvu za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije koje je omogućilo izradu ovog rada u okviru Projekta III 42009 „Inteligentne energetske mreže“.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Aweya, J., Al Sindi, N. Role of Time Synchronization in Power System Automation and Smart Grids, in Proc. 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Cape Town, South Africa, pp. 1392-1397, 25-28 February 2013. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2013.6505875>
- [2] Patil, G. C., Thosar, A. G. Application of synchrophasor measurements using PMU for modern power systems monitoring and control, in Proc. 2017 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPCEIC), Melmaruvathur, India, pp. 754-760, 22-23 March 2017. <https://doi.org/10.1109/ICCPCEIC.2017.8290464>
- [3] Bečejac, V. Optimalna postavka sinhrofazorskih uređaja za obezbeđenje potpune topološke opservabilnosti primenom metode Grebnerove baze, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2020.

- [4] Noureen, S.S., Roy, V., Bayne, S. B. Phasor Measurement Unit Integration: A Review on Optimal PMU Placement Methods in Power System, in Proc. 2017 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC), Polashi Dhaka, Dhaka, Bangladesh, pp. 328-332, 21-23 December 2017. <http://dx.doi.org/10.1109/R10-HTC.2017.8288967>
- [5] Almunif A, Fan L. Optimal PMU placement for modeling power grid observability with mathematical programming methods, International Transactions on Electrical Energy Systems, e12182, 2019. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12182>
- [6] Allagui, B., Ben Aribia, H., Hadj Abdallah, H. Optimal placement of Phasor Measurement Units by genetic algorithm, in Proc. 2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology, Nabeul, Tunisia, pp. 434-439, 26-28 March 2012. <https://doi.org/10.1109/REVET.2012.6195309>
- [7] Babu, R., Bhattacharyya, B. Optimal placement of phasor measurement unit using binary particle swarm optimization in connected power network, in Proc. 2015 IEEE UP Section Conference on Electrical Computer and Electronics (UPCON), Allahabad, India, pp. 1-5, 04-06 December 2015. <https://doi.org/10.1109/UPCON.2015.7456695>
- [8] Mesgarnejad, H., Shahrtash, S. M. Multi-objective measurement placement with new parallel Tabu Search method, in Proc. 2008 IEEE Canada Electric Power Conference, Vancouver, BC, Canada, 06-07 October 2008. <https://doi.org/10.1109/EPC.2008.4763294>
- [9] Aminifar, F., Lucas, C., Khodaei, A., Fotuhi-Firuzabad, M. Optimal Placement of Phasor Measurement Units Using Immunity Genetic Algorithm, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, pp. 1014-1020, 2009. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2014030>
- [10] Gopakumar, P., Reddy, M. J. B., Mohanta, D. K. Novel multi-stage simulated annealing for optimal placement of PMUs in conjunction with conventional measurements, in Proc. 2013 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Wroclaw, Poland, pp. 248-252, 05-08 May 2013. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2013.6549625>
- [11] Abdulkaarem, A., Ogbe, D., Somefun, T., Agbetuyi, F. Optimal PMU Placement Using Genetic Algorithm for 330kV 52-Bus Nigerian Network, Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, Vol. 6, No. 1, pp. 597-604, 2021. <http://dx.doi.org/10.25046/aj060164>
- [12] Mitchell, M. An introduction to genetic algorithms. MIT press, 1998.
- [13] Marín, F.J., García-Lagos, F., Joya, G., Sandoval, F. Genetic algorithms for optimal placement of phasor measurement units in electrical networks, Electronics Letters, Vol. 39, No. 19, pp. 1403-1405, 2003. <https://doi.org/10.1049/EL%3A20030919>
- [14] Chakrabarti, S., Kyriakides, E. Optimal Placement of Phasor Measurement Units for Power System Observability, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 3, pp. 1433-1440, 2008. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.922621>

AUTORI/AUTHORS

Katarina Obradović - dipl. inž. el. i rač., Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, obradovic15@gmail.com, ORCID [0000-0002-2559-8518](https://orcid.org/0000-0002-2559-8518)
dr Goran Dobrić - docent, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, dobrić@etf.rs, ORCID [0000-0002-1747-6211](https://orcid.org/0000-0002-1747-6211)