

# REKONFIGURACIJA DISTRIBUTIVNE MREŽE I OTOČNA KOMPENZACIJA UZ PRISUSTVO VETRO GENERATORA

## DISTRIBUTION NETWORK RECONFIGURATION AND CAPACITOR SWITCHING IN THE PRESENCE OF WIND GENERATORS

Branko STOJANOVIĆ, Tehnički opitni centar, Srbija  
Tomislav RAJIĆ, Elektrotehnički fakultet, Srbija

### KRATAK SADRŽAJ

U radu je predstavljena rekonfiguracija distributivne mreže sa istovremenom otočnom kompenzacijom kada su joj, u startu, pridodati vetro generatori, metodom simuliranog kaljenja. Analizirana je mreža Baran-a i Wu-a sa 33 čvora, uključujući i balansni, i 37 grana od kojih svaka može da komutuje, poseduje komutacioni uređaj. Uvedene su i sledeće pretpostavke: potrošnja u čvorovima mreže menja se po Gauss-ovoj normalnoj raspodeli a snaga vetro generatora po Weibull-ovoj, postoje dva vetro generatora maksimalne snage 200 kW svaki, koji mogu biti u startu pridodati bilo kojem čvoru mreže sem balansnom. Kondenzatorske baterije se generišu tako što se takođe dodeljuju bilo kom čvoru mreže sem balansnom. Problem ovakvog uključivanja generatora i baterija treba rešiti automatizacijom. Kondenzatorske baterije se postavljaju tako da ulazni faktor snage mreže bude veći od 0.95 jer je veliki broj konfiguracija po potrošnji takav da je ulazni faktor snage već veći, na samom startu, od 0.85. Drugo ograničenje je da mreža ne bude prekompenzovana. Program je automatizovan tako što generiše proizvoljan broj puštanja i beleži cenu konfiguracije, generisane baterije i ulazne podatke, aktivnu i reaktivnu potrošnju u čvorovima i snage kao i čvorove gde su postavljeni vetro generatori i konačno uštede po satima. Vetro generatori dodeljuju se čvorovima po uniformnoj raspodeli i pretpostavka je da im je snaga samo aktivna i da zavisi jedino od snage vetra (menja se po Weibull-ovoj raspodeli). Rezultati su prikazani tabelarno za prvih 10 sati rada vetro generatora (pretpostavka je da vetro genertatori rade 100 sati, u svakom satu različito) i izvršena je njihova analiza na osnovu 100 puštanja programa.

**Ključne reči:** rekonfiguracija, kondenzatorske baterije, vetro generatori, Gauss-ova raspodela, Weibull-ova raspodela, simulirano kaljenje

### SUMMARY

In this paper, distribution network reconfiguration with simultaneous capacitor switching, in the presence of wind generators, by SA is presented. Baran and Wu network is analyzed which has 33 nodes including slack one and 37 branches, all of which can commute. Following assumptions are made: load in nodes is changed according to Gauss distribution and wind generator power with Weibull one, there are two wind generators of 200 kW maximum power each and can be allocated to any node but the slack one. The same is valid for the capacitor banks regarding allocation. This switching logic is to be performed by automation procedure. Input power factor is to be greater than 0.95 in order to allocate capacitor banks as it is in start greater for majority of configurations than 0.85. Another constraint is that network should not be overcompensated. The programme is automated and notes the price of configuration, generated banks and input data, active and reactive load and power and location of wind generators and savings which change on hour basis. The wind generators are uniformly distributed in accordance to nodes and generate only active power complying with Weibull distribution. Tabled results are presented for ten hour operation (operation in one hundred hours, every hour different) and analysis is done for one hundred hour work.

**Key words:** reconfiguration, capacitor banks, wind generators, Gauss distribution, Weibull distribution, SA

## 1. UVOD

Optimalna rekonfiguracija i otočna kompenzacija uz prisustvo distribuiranih generatora omogućavaju ekonomičan i pouzdan rad distributivne mreže smanjujući gubitke aktivne snage, povećavajući ulazni faktor snage i popravljajući naponsku sliku. Problemi simultane rekonfiguracije i otočne kompenzacije u svrhu smanjenja gubitaka aktivne snage dosta su proučavani u literaturi a jedan od skorijih je i rad autora, Stojanović i Rajić (1) vezan za njihov ekonomski aspekt koji je pokazao da simultana primena ove dve metode ne mora biti i najekonomičnija. Samo otočna kompenzacija se bavi određivanjem lokacije, tipa i veličine kondenzatorske baterije koju treba pridružiti sabirnici a rekonfiguracija tretira status (uključeno/isključeno) komutacione opreme. Simultano posmatranje ove dve metode uz prisustvo vetro generatora znači da se obe primenjuju istovremeno i onda posmatraju njihovi efekti na distributivnu mrežu. Ovo su NP-problemi kombinatorijske optimizacije (vreme algoritma nije ograničeno polinomom dimenzije problema) sa nediferencijabilnim funkcijama cilja. Metode prevođenja nediferencijabilne funkcije cilja u diferencijabilnu, Oliveira et al. (2), još se kod nas nisu odomaćile tako da rešavanje ova dva problema gledanih kao jedan primenom metode simuliranog kaljenja dobija pun smisao.

Simultani problem rekonfiguracije mreže i otočne kompenzacije u svrhu smanjenja gubitaka aktivne snage nije mnogo obrađivan (2-8) pri čemu su njima pridodati još i distribuirani generatori (distributed generation) (7, 8). Analiza rada distributivne mreže pri simultanoj rekonfiguraciji i otočnoj kompenzaciji uz prisustvo vetro generatora kada konzum podleže Gauss-ovoj raspodeli a snaga vetro generatora se menja po Weibull-ovoj raspodeli nije dosada obrađivana u literaturi uz početne uslove koncipirane u ovom članku a to je da postoje dva vetro generatora od po 200 kW aktivne snage koji se uniformno raspodeljuju po čvorovima mreže, na samom startu, pre optimizacije, i da se kondenzatorske baterije priključuju u kandidat čvorovima mreže (osim balansnog) sve u cilju smanjenja funkcije cilja. Funkcija cilja se sastoji od gubitaka aktivne snage pomnoženog penalizacionim faktorom (120 \$/kW), cene kondenzatorskih baterija pomnožene godišnjom stopom cene (0.15) i vrednosti ugrađenih vetro generatora za koje se pretpostavlja da već postoje u mreži (u odgovarajućim čvorovima) i da rade 100 sati. Test primer je mreža Baran-a i Wu-a (9). Potrošnja i snaga vetro generatora se menja iz sata u sat po odgovarajućim gore pomenutim raspodelama.

## 2. NORMALNA I WEIBULL-OVA RASPODELA

Za stohastičnost potrošnje, usvaja se normalna raspodela (Gauss-Laplas raspodela). Na početku je poznata očekivana vrednost potrošnje u nekoj tački sistema. Ona se usvaja prema podacima zadatim za taj čvor (P i Q) (9). Odstupanja svake slučajne varijable od njene očekivane vrednosti posmatrana su kao „greške” i, na osnovu „zakona grešaka”, opisana su normalnom raspodelom. Zakon verovatnoća dat je u obliku, formula (2.1):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.1)$$

Gde su:

m - očekivana vrednost potrošnje u jednom čvoru i

$\sigma$  - standardna devijacija, odstupanje od očekivane vrednosti.

Za  $\sigma$  je usvojeno 10%.

Slučajnost proizvodnje definisana je Weibull-ovom raspodelom jer se radi o vetro generatorima, formula (2.2). Njihova proizvodnja zavisi od brzine vetra na mestu ugradnje vetro turbine. Proizvedena električna snaga, u zavisnosti od brzine vetra prikazana je na **Slici 1a**), dok je gustina raspodele brzine vetra za jednu godinu predstavljena na **Slici 1b**). Za maksimalnu snagu turbine usvojena je vrednost 0.2 MW. Verovatnoća duvanja vetra definisana je Weibull-ovom raspodelom. Prvo se dobija informacija o brzini vetra koja se javljala tokom godine. Nakon toga se formira kriva Weibull-ove raspodele sa dva parametra. Funkcija gustine raspodela se najbolje može predstaviti sledećom jednačinom (2.2):

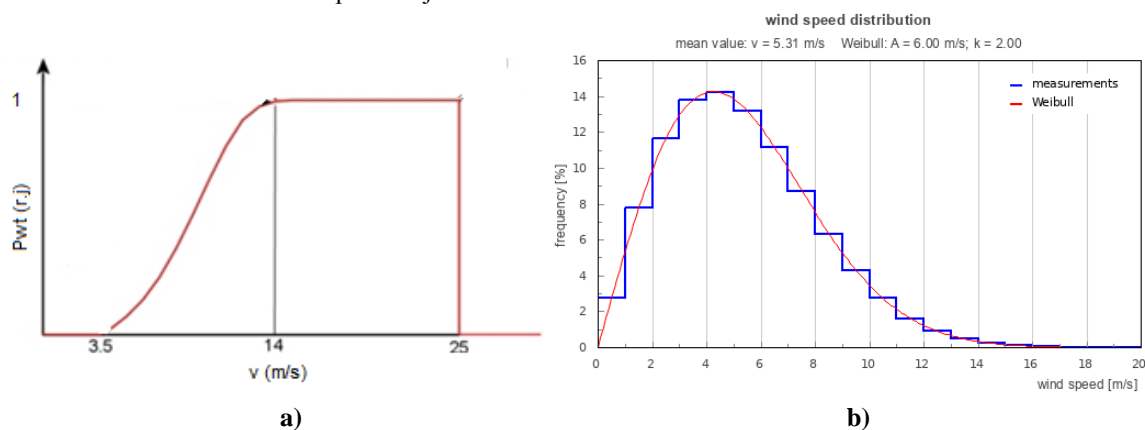
$$f(v) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (2.2)$$

U formuli (2.2) su:

v - brzina vetra [m/s],

A- parametar Weibullove skale u m/s, mera za karakterističnu brzinu vetra. A je proporcionalno srednjoj brzini vetra i

k – parametar Weibullove formule. Određuje oblik Weibullove raspodele i obično ima vrednost između 1 i 3. Mala vrednost za k označava vrlo promenljive vetrove.



**SLIKA 1 – KARAKTERISTIKE VETROGENERATORA I VETRA**  
**A) PROIZVEDENA ELEKTRIČNA SNAGA U ZAVISNOSTI OD BRZINE VETRA**  
**B) GUSTINA RASPODELE BRZINE VETRA ZA JEDNU GODINU**

Usvajene su sledeće vrednosti:  $v_{sr}=5.31$  m/s,  $A=6$  m/s i  $k=2$ .

### 3. CENA RADA UGRAĐENIH VETRO GENERATORA I CENA DODELJIVANIH KONDENZATORSKIH BATERIJA

Uvaženi su slučajevi kada postoje vetrogeneratori integrisani u sistem i kondenzatorske baterije za kompenzaciju reaktivne snage. Cena rada ugrađenih vetro generatora dobijena je na osnovu formule (3.1):

$$T=CC \cdot FCR+ O\&M \cdot CF \cdot 8760 \text{ [$/kW god]} \quad (3.1)$$

u kojoj je:

T - cena rada vetro generatora za period od 8760 sati (godinu),

CC - su kapitalni troškovi (800\$/kW),

FCR - fiksna kamatna stopa (0.14 1/god),

O&M - su troškovi održavanja i pokretanja (0.006 \$/kWh),

CF - procentualno iskorišćenje punog kapaciteta (0.37).

Za 100 sati rada cena je:

$$T=800 \cdot 0.14+0.006 \cdot 0.37 \cdot 100=112.2220 \text{ ($/kW)} \quad (3.2)$$

Za zadati sistem pretpostavlja se da su instalirana dva vetro generatora od po 200 kW, pa je cena na početku.

$$T_{str}=112.2220 \text{ ($/kW)} \cdot 400 \text{ (kW)}. \quad (3.3)$$

Cena dodeljivanih kondenzatorskih baterija data je u **Tabeli 1**. Ona se množi sa godišnjom stopom cene koja iznosi 0.15.

**TABELA 1 –UKUPNI TROŠKOVI KONDENZATORSKIH BATERIJA U ZAVISNOSTI OD NJIHOVE SNAGE**

Snaga	> 0, ≤ 300 kVar	> 300, ≤ 600 kVar	> 600, ≤ 900 kVar	> 900, ≤ 1200 kVar	> 1200 kVar
Troškovi	1900 \$	3200 \$	4500 \$	5400 \$	6000 \$

#### 4. KONEKTIVNOST DISTRIBUTIVNE MREŽE I EFIKASNI ALGORITAM TOKOVA SNAGA

Topologija distributivnog sistema se može predstaviti grafom koji ima  $m$  grana i  $n$  čvorova (sabirnica). Može se tvrditi da je topologija distributivne mreže radijalna ako zadovoljava sledeća dva uslova:

- 1) konfiguracija mora da poseduje  $n-1$  granu;
- 2) konfiguracija mora biti povezana.

Najpre se formira matrica incidencije za mrežu čije su sve grane zatvorene (upetljana mreža). Broj vrsta odgovara broju čvorova (sa balansnim) a broj kolona broju grana (ukupan broj grana, sve zatvorene). Onda se briše prva vrsta (odgovara balansnom čvoru) i onoliko kolona koliko ima otvorenih grana. Dobijena matrica je kvadratna i može joj se sračunati determinanta koja u slučaju povezane mreže (koja je i radijalna s obzirom na broj uključenih grana) mora biti 1 ili -1 (različita od 0). Vrednosti 1 ili -1 se dobijaju u zavisnosti od konvencije definisanja matrice incidencije (grana incidentna čvoru i orjentisana od njega sa elementom 1 i grana incidentna čvoru i orjentisana ka njemu -1 ili obrnuto).

Tek na ovako izgenerisanu mrežu može se primeniti efikasni algoritam tokova snaga za sračunavanje gubitaka aktivne snage za konkretnu konfiguraciju. Primenjen je Newton-ov tačni efikasni algoritam tokova snaga u MATPOWER okruženju pogodan kako za statične (kompenzacija) tako i za dinamične probleme (rekonfiguracija) koji konvergira za maksimalno 10 iteracija, ukupnog trajanja stotih delova sekunde u zavisnosti od mreže koja se analizira, Zimmerman i Sanchez (10).

#### 5. SIMULIRANO KALJENJE

U ovom radu, za optimizacioni proračun, usvojena je metoda simuliranog kaljenja. Simulirano kaljenje je probabilistička metoda kombinatorijske optimizacije koja iznalazi globalni optimum uz određene uslove a to je da proces spuštanja temperature, koja teži 0, traje beskonačno dugo i da se na svakoj temperaturi ostvari stacionarna distribucija (homogeni algoritam), Stojanović (11). Postoji i nehomogeni algoritam koji snižava temperaturu pre svake primene Metropolis kriterijuma (posebni postupak prihvatanja skupljih konfiguracija) koji je znatno brži od homogenog jer ne zahteva ostvarenje termičkog ekvilibrijuma ali zato, zbog brzog hlađenja, dovodi do rešenja koje je suboptimalno. Upravo zbog vremena trajanja algoritma, autori su se opredelili za nehomogeni algoritam, na štetu kvaliteta rešenja, u svojim istraživanjima. Usvojeni su sledeći parametri algoritma: početna temperatura ( $T_{početno}$ ) 5000 °C, dužina Markov-ljevog lanca 3000, pravilo snižavanja temperature  $T=0.95*T$  i stopa prihvatanja 0.001.

#### 6. MAKSIMALNA I MINIMALNA SNAGA UGRAĐENIH KONDENZATORSKIH BATERIJA

Moraju biti usvojena ograničenja prema snazi ugrađenih kondenzatorskih baterija. Postavljaju se dva uslova. Jedan je da mreža ne bude prekompenzovana a drugi je da faktor snage kod napojnog čvora bude veći od 0,95. Ovi uslovi su prikazani izrazima (6.1) i (6.2):

$$Q_{b\max} = Q_{loss} + Q_{dem} \quad (6.1)$$

$$Q_{b\min} = Q_{loss} + Q_{dem} - P_{00} * \frac{\sqrt{1-0.95^2}}{0.95} \quad (6.2)$$

Usvojene su sledeće oznake:

$Q_{b\max}$  - maksimalna ukupna snaga instalisanih kondenzatorskih baterija za određeni nivo potrošnje (kVAr),

$Q_{loss}$  - gubici reaktivne snage za "suvu" mrežu, mrežu bez ugrađenih kondenzatorskih baterija za određeni nivo potrošnje (kVAr),

$Q_{dem}$  - reaktivna potrošnja određenog nivoa (kVAr),

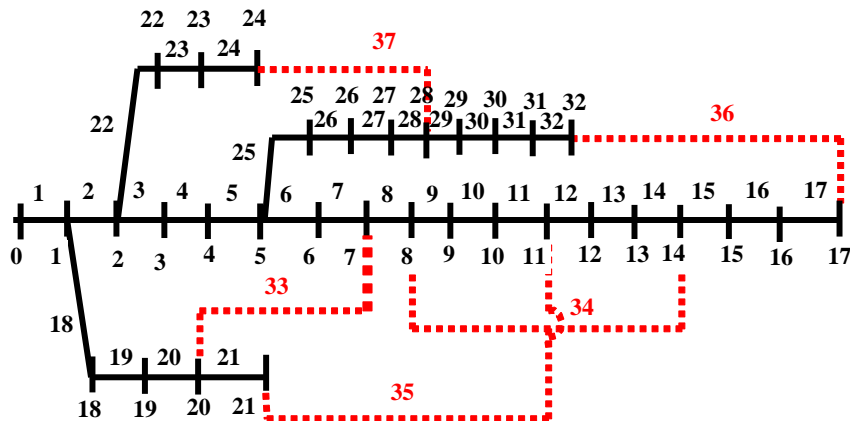
$Q_{b\min}$  - minimalna ukupna snaga instalisanih kondenzatorskih baterija za određeni nivo potrošnje (kVAr) i

$P_{00}$  - aktivna snaga napojnog čvora za određeni nivo potrošnje (kW).

Gornje dve jednakosti daju samo grube granice i ograničavaju prostor konfiguracija (populaciju) a realnu situaciju je potrebno konkretno proveriti (u pogledu prekompenzovanosti i ulaznog faktora snage).

## 7. TEST PRIMER

Test mreža je hipotetična mreža nazivnog napona 12.66 kV i prikazana je na **Slici 2**. Mreža se sastoji od 32 normalno zatvorene grane (crne boje) i 5 spojnih grana (crvene boje) koje formiraju petlje kada se zatvore.



SLIKA 2 - MREŽA BARAN I WU (9)

Podaci o sistemu dati su u referenci (1). Totalno aktivno i reaktivno opterećenje je 3715 kW i 2300 kVAr respektivno. Ukupan gubitak aktivne snage iznosi 202.675 kW što je 5.5% ukupne aktivne potrošnje. Mreža nije dobro kompenzovana, ulazni faktor snage je 0.8493 (<0.95). Sve se odnosi na nominalni nivo opterećenja. Maksimalna dozvoljena tolerancija napona čvorova je  $\pm 10\%$  (od 12.66 kV). Može komutirati svaka grana i može se dodeliti kondenzatorska baterija svakom čvoru sem napojnom.

## 8. FUNKCIJA CILJA

Funkcijom cilja obuhvaćeni su troškovi baterija, gubici aktivne snage i cena vetrogeneratora. Funkcija cilja optimizacione metode prikazana je izrazom (8.1).

$$E = E1 \cdot 0.15 + 120 \cdot P_{loss} + T_{str} \quad (\$) \quad (8.1)$$

Gde su:

$E1$  - ukupna cena svih ugrađenih kondenzatorskih baterija (\$),

$P_{loss}$  - gubici (kW),

0.15 - godišnja stopa cene ugrađenih baterija uvažavajući sve troškove,

120 - faktor penalizacije gubitaka (\$/kW) i

$T_{str}$  - cena ugrađenih vetrogeneratora.

## 9. NUMERIČKI REZULTATI

Za prvih 10 sati rada dobijene su rezultati koji su prikazani u **Tabelama 2.1-2.9**. Može se uočiti da su postignute znatne uštede koje se menjaju iz sata u sat. Zadovoljen je uslov za faktor snage i mreža nije prekompenzovana. Vidljivo je smanjenje gubitaka aktivne snage.

TABELA 2.1: AKTIVNA SNAGA POTROŠNJE PO ČVOROVIMA ZA PRVIH 10 SATI

PD (MW) aktivna potrošnja										
čvor	1 sat	2 sat	3 sat	4 sat	5 sat	6 sat	7 sat	8 sat	9 sat	10 sat
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.109	0.093	0.101	0.106	0.095	0.096	0.094	0.092	0.101	0.094
3	0.091	0.084	0.091	0.099	0.085	0.086	0.087	0.082	0.094	0.099
4	0.128	0.112	0.122	0.122	0.114	0.114	0.110	0.110	0.123	0.125
5	0.064	0.056	0.061	0.065	0.057	0.057	0.058	0.055	0.060	0.057
6	0.061	0.056	0.061	0.062	0.057	0.059	0.061	0.055	0.064	0.065
7	0.207	0.186	0.203	0.207	0.190	0.193	0.191	0.183	0.210	0.187
8	0.211	0.186	0.203	0.213	0.190	0.196	0.193	0.183	0.210	0.198
9	0.068	0.056	0.061	0.064	0.057	0.057	0.055	0.055	0.067	0.061
10	0.067	0.056	0.061	0.066	0.057	0.059	0.060	0.055	0.057	0.061
11	0.046	0.042	0.046	0.046	0.043	0.043	0.042	0.041	0.042	0.044
12	0.068	0.056	0.061	0.063	0.057	0.059	0.058	0.055	0.059	0.060
13	0.065	0.056	0.061	0.063	0.057	0.057	0.059	0.055	0.067	0.062
14	0.128	0.112	0.122	0.131	0.114	0.109	0.113	0.110	0.123	0.119
15	0.065	0.056	0.061	0.067	0.057	0.057	0.060	0.055	0.059	0.064
16	0.064	0.056	0.061	0.062	0.057	0.057	0.057	0.055	0.059	0.069
17	0.064	0.056	0.061	0.065	0.057	0.056	0.058	0.055	0.061	0.062
18	0.099	0.084	0.091	0.096	0.085	0.087	0.091	0.082	0.090	0.089
19	0.099	0.084	0.091	0.097	0.085	0.088	0.086	0.082	0.086	0.101
20	0.099	0.084	0.091	0.095	0.085	0.089	0.087	0.082	0.088	0.096
21	0.098	0.084	0.091	0.095	0.085	0.091	0.084	0.082	0.095	0.091
22	0.094	0.084	0.091	0.097	0.085	0.087	0.085	0.082	0.094	0.095
23	0.098	0.084	0.091	0.097	0.085	0.086	0.087	0.082	0.091	0.090
24	0.467	0.391	0.426	0.440	0.398	0.405	0.397	0.384	0.426	0.417
25	0.456	0.391	0.426	0.452	0.398	0.401	0.389	0.384	0.467	0.444
26	0.066	0.056	0.061	0.062	0.057	0.058	0.057	0.055	0.060	0.058
27	0.066	0.056	0.061	0.065	0.057	0.057	0.057	0.055	0.060	0.064
28	0.064	0.056	0.061	0.063	0.057	0.058	0.056	0.055	0.066	0.069
29	0.130	0.112	0.122	0.126	0.114	0.116	0.113	0.110	0.116	0.121
30	0.212	0.186	0.203	0.209	0.190	0.203	0.183	0.183	0.207	0.199
31	0.165	0.139	0.152	0.164	0.142	0.150	0.146	0.137	0.153	0.143
32	0.221	0.195	0.213	0.224	0.199	0.199	0.205	0.192	0.205	0.222
33	0.063	0.056	0.061	0.065	0.057	0.057	0.057	0.055	0.061	0.054

TABELA 2.2: REAKTIVNA SNAGA POTROŠNJE PO ČVOROVIMA ZA PRVIH 10 SATI

QD (MVar) reaktivna potrošnja										
čvor	1 sat	2 sat	3 sat	4 sat	5 sat	6 sat	7 sat	8 sat	9 sat	10 sat
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.036	0.031	0.033	0.035	0.031	0.032	0.031	0.030	0.033	0.031
3	0.030	0.028	0.030	0.032	0.028	0.028	0.029	0.027	0.031	0.032
4	0.042	0.037	0.040	0.040	0.037	0.038	0.036	0.036	0.040	0.041
5	0.021	0.018	0.020	0.021	0.019	0.019	0.019	0.018	0.020	0.019
6	0.020	0.018	0.020	0.020	0.019	0.019	0.020	0.018	0.021	0.022
7	0.068	0.061	0.067	0.068	0.062	0.063	0.063	0.060	0.069	0.061
8	0.069	0.061	0.067	0.070	0.062	0.064	0.063	0.060	0.069	0.065
9	0.022	0.018	0.020	0.021	0.019	0.019	0.018	0.018	0.022	0.020
10	0.022	0.018	0.020	0.022	0.019	0.019	0.020	0.018	0.019	0.020
11	0.015	0.014	0.015	0.015	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
12	0.022	0.018	0.020	0.021	0.019	0.019	0.019	0.018	0.019	0.020
13	0.021	0.018	0.020	0.021	0.019	0.019	0.019	0.018	0.022	0.020
14	0.042	0.037	0.040	0.043	0.037	0.036	0.037	0.036	0.040	0.039
15	0.021	0.018	0.020	0.022	0.019	0.019	0.020	0.018	0.020	0.021
16	0.021	0.018	0.020	0.020	0.019	0.019	0.019	0.018	0.019	0.023
17	0.021	0.018	0.020	0.021	0.019	0.018	0.019	0.018	0.020	0.020

18	0.033	0.028	0.030	0.031	0.028	0.028	0.030	0.027	0.030	0.029
19	0.033	0.028	0.030	0.032	0.028	0.029	0.028	0.027	0.028	0.033
20	0.033	0.028	0.030	0.031	0.028	0.029	0.029	0.027	0.029	0.031
21	0.032	0.028	0.030	0.031	0.028	0.030	0.028	0.027	0.031	0.030
22	0.031	0.028	0.030	0.032	0.028	0.029	0.028	0.027	0.031	0.031
23	0.032	0.028	0.030	0.032	0.028	0.028	0.028	0.027	0.030	0.030
24	0.153	0.128	0.140	0.145	0.131	0.133	0.130	0.126	0.140	0.137
25	0.150	0.128	0.140	0.148	0.131	0.132	0.128	0.126	0.153	0.146
26	0.022	0.018	0.020	0.020	0.019	0.019	0.019	0.018	0.020	0.019
27	0.022	0.018	0.020	0.021	0.019	0.019	0.019	0.018	0.020	0.021
28	0.021	0.018	0.020	0.021	0.019	0.019	0.018	0.018	0.022	0.023
29	0.043	0.037	0.040	0.041	0.037	0.038	0.037	0.036	0.038	0.040
30	0.070	0.061	0.067	0.069	0.062	0.067	0.060	0.060	0.068	0.065
31	0.054	0.046	0.050	0.054	0.047	0.049	0.048	0.045	0.050	0.047
32	0.073	0.064	0.070	0.074	0.065	0.065	0.067	0.063	0.067	0.073
33	0.021	0.018	0.020	0.021	0.019	0.019	0.019	0.018	0.020	0.018

TABELA 2.3: SNAGA VETROGENERATORA PO ČVOROVIMA ZA PRVIH 10 SATI

PWT (MW) snaga vetro generatora										
čvor	1 sat	2 sat	3 sat	4 sat	5 sat	6 sat	7 sat	8 sat	9 sat	10 sat
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0.049	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.007	0	0	0.047	0	0	0	0	0.027	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0.087	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0.049	0	0	0.022
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0.087	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0.027	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0.046	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0.047	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0.046	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0.011	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0.025	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0.025	0	0	0	0	0	0	0

TABELA 2.4: OTVORENE GRANE ZA KONFIGURACIJU IZGENERISANU GENERATOROM SLUČAJNIH BROJEVA ZA PRVIH 10 SATI

Konfiguracija										
otvorena grana	1 sat	2 sat	3 sat	4 sat	5 sat	6 sat	7 sat	8 sat	9 sat	10 sat
1	37	32	37	37	37	37	37	36	37	32
2	36	28	16	36	32	36	36	28	17	27
3	34	14	12	14	14	14	34	14	14	14
4	8	10	9	11	9	10	9	10	8	10
5	6	7	7	7	7	7	7	7	6	7

TABELA 2.5: UŠTEDA U NOVČANIM JEDINICAMA ZA PRVIH 10 SATI

Krajnja cena (\$)										
1 sat	2 sat	3 sat	4 sat	5 sat	6 sat	7 sat	8 sat	9 sat	10 sat	
59429	55583	57387	58806	55778	55900	55705	54235	57975	57592	
Polazna cena (\$)										
1 sat	2 sat	3 sat	4 sat	5 sat	6 sat	7 sat	8 sat	9 sat	10 sat	
65329	59955	62313	64585	60514	60259	60114	57622	62828	62650	
UŠTEDA (\$)										
1 sat	2 sat	3 sat	4 sat	5 sat	6 sat	7 sat	8 sat	9 sat	10 sat	
5900.7	4371.8	4926.4	5778.5	4736.9	4359.0	4408.8	3387.2	4853.2	5058.1	

TABELA 2.6: FAKTOR SNAGE ZA PRVIH 10 SATI

cosφ(polazni/krajnji)										
1 sat	2 sat	3 sat	4 sat	5 sat	6 sat	7 sat	8 sat	9 sat	10 sat	
0.9459	0.9466	0.9451	0.9438	0.9463	0.9442	0.9439	0.9419	0.9450	0.9458	
0.9925	0.9859	0.9667	0.9928	0.9686	0.9843	0.9671	0.9667	0.9660	0.9667	

TABELA 2.7: REAKTIVNA SNAGA U NAPOJNOM ČVORU ZA PRVIH 10 SATI

Q napojnog čvora (MVar)										
1 sat	2 sat	3 sat	4 sat	5 sat	6 sat	7 sat	8 sat	9 sat	10 sat	
0.5054	0.5997	1.0109	0.4800	0.9236	0.6426	0.9272	0.8742	1.0387	1.0210	

TABELA 2.8: MINIMALNI NAPON ČVORA U MREŽI ZA PRVIH 10 SATI

U <sub>min</sub> (polazno/krajnje) u p.u.										
1 sat	2 sat	3 sat	4 sat	5 sat	6 sat	7 sat	8 sat	9 sat	10 sat	
0.9185	0.9303	0.9244	0.9198	0.9289	0.9316	0.9295	0.9375	0.9248	0.9241	
0.9519	0.9590	0.9535	0.9515	0.9547	0.9526	0.9535	0.9610	0.9495	0.9502	

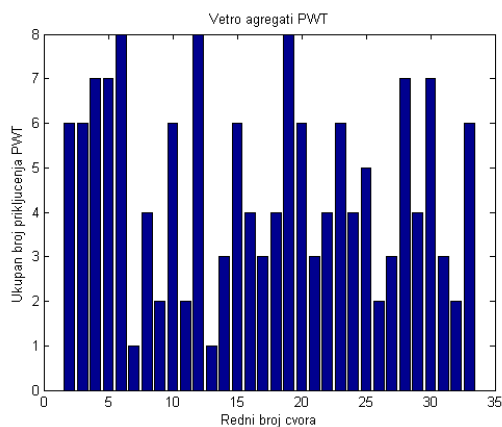
TABELA 2.9: UKUPNI GUBICI AKTIVNE SNAGE U MREŽI ZA PRVIH 10 SATI

P <sub>loss</sub> (polazno/krajnje) u kW										
1 sat	2 sat	3 sat	4 sat	5 sat	6 sat	7 sat	8 sat	9 sat	10 sat	
170.3	125.5	145.2	164.1	130.2	128.0	126.8	106.1	149.4	148.0	
114.7	84.3	101.7	110.3	88.3	87.7	87.7	75.5	106.6	103.4	

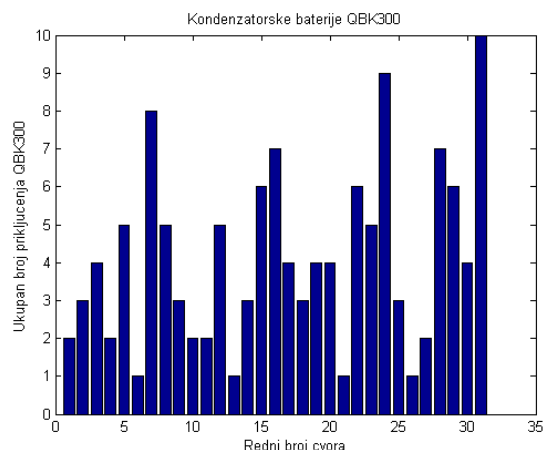
Grafički su predstavljeni sumarni rezultati za narednih 100 sati rada. Od interesa su najčešće izgenerisane lokacije za priključenje vetrogeneratora u mreži za 100 sati rada (**Slika 3**). Može se videti da se optimalni rezultati dobijaju najčešće kada su vetrogeneratori priključeni u čvorovima 5, 12 i 19. Na **Slikama 4-6** može se uočiti u kojim čvorovima se najčešće pojavljuju baterije instalisanih snaga 300 KVAR, 600 KVAR odnosno 900 KVAR. Pokazuje se da veće snage baterija nisu potrebne. Na **Slici 7** prikazano je koje se grane najčešće u simulacijama pojavljuju kao isključene. Grane 7, 14 i 37 su najčešće isključivane grane.

Primećuje se da je zbir isključenja grana za 100 sati rada mreže 500 (100 sati rada a za svaki sat se ima 5 otvorenih grana). Ušteda na isporučenu električnu energiju za 100 sati rada iznosi oko 5000 \$ sa uzetom u obzir cenom kondenzatorskih baterija i vršne snage pomnoženih respektivno sa penalizacionim faktorima (0.15 i 120\$/kW). Za cenu gubitaka električne energije usvojeno je 0.03 \$/kWh.

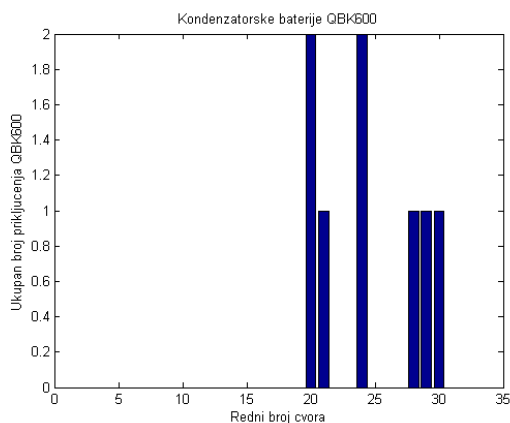




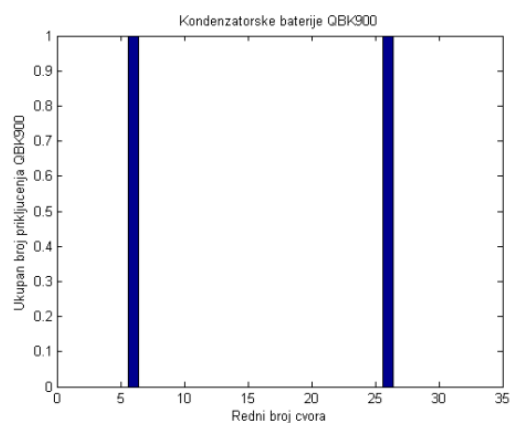
SLIKA 3 - UKUPAN BROJ UKLJUČENJA VETRO GENERATORA PO ČVOROVIMA MREŽE ZA 100 SATI RADA



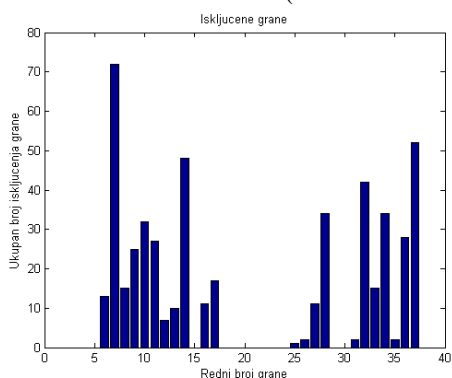
SLIKA 4 – UKUPAN BROJ UKLJUČENJA 300 KVAR BATERIJE PO ČVOROVIMA MREŽE (BEZ NULTOG ČVORA) ZA 100 SATI RADA



SLIKA 5 - UKUPAN BROJ UKLJUČENJA 600 KVAR BATERIJE PO ČVOROVIMA MREŽE (BEZ NULTOG ČVORA) ZA 100 SATI RADA



SLIKA 6 – UKUPAN BROJ UKLJUČENJA 900 KVAR BATERIJE PO ČVOROVIMA MREŽE (BEZ NULTOG ČVORA) ZA 100 SATI RADA



SLIKA 7 – UKUPAN BROJ ISKLJUČENJA GRANA MREŽE ZA 100 SATI RADA

## 10. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljena rekonfiguracija distributivne mreže koja obuhvata kompenzaciju reaktivne energije pomoću baterija i instalisane vetrogeneratore. Analizirana je mreža Baran-a i Wu-a sa 33 čvora, uključujući i balansni, i 37 grana od kojih svaka može da komutuje. Pretpostavljeno je da se potrošnja u čvorovima mreže menja po Gauss-ovoj normalnoj raspodeli a snaga vetrogeneratorsa zavisi od brzine vetra za čiju je gustinu raspodele usvojena Weibull-ova. Mesto priključenja vetrogeneratorsa i kondenzatorskih baterija generiše se nasumično u velikom broju iteracija. Postavljaju se dva uslova. Jedan je da mreža ne bude prekompenzovana a

drugi je da faktor snage kod napojnog čvora bude veći od 0,95. Pokazuje se da optimizaciona metoda daje zadovoljavajuće rezultate. Dodatni zaključak rada jeste da se na osnovu analize rezultata za svaku simulaciju može ustanoviti u kojim se čvorovima najčešće pojavljuju vetrogeneratori a u kojim baterije i kolikih snaga. Tako se može dati preporuka gde treba instalirati vetrogeneratore odnosno baterije da bi novčane uštede bile maksimalne i gubici aktivne snage minimalni.

## LITERATURA

1. Stojanović B., Rajić T., 24-28 septembar 2018, "Ekonomska procena rekonfiguracije distributivnih mreža i otočne kompenzacije", 11. Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem, Kopaonik
2. De Oliveira L.W., Carneiro Jr.S., De Oliveira E.J., Pereira J.L.R., Silva Jr.I.C, Costa J.S., 2010, "Optimal reconfiguration and capacitor allocation in radial distribution systems for energy loss minimization", "Electrical Power and Energy Systems" 32, pp. 840-848
3. Lin Y., Zhizhong G., 2008, "Comprehensive optimization for energy loss reduction in distribution networks", "IEEE" , 8 pgs
4. Rezaei P., Vakilian M., 2010, "Distribution system efficiency improvement by reconfiguration and capacitor placement using a modified particle swarm optimization algorithm", "Proceeding of electric power and energy conference (EPEC) ", 6 pgs
5. Guimaraes M.A.N., Castro C.A., Romero R., 2010, "Distribution systems optimization through reconfiguration and capacitor allocation by dedicated genetic algorithm", "IET Generation, Transmission & Distribution", "Vol. 4, Iss. 11", pp. 1213-1222
6. Farahani V., Vahidi B., Abyaneh H.A., May 2012, "Reconfiguration and capacitor placement simultaneously for energy loss reduction based on an improved reconfiguration method", "IEEE Transactions on Power Systems", "Vol.27, No.2", pp. 587-595
7. Ameli A., Ahmadifar A., Shariatkhah M.H., Vakilian M., Haghifam M.R., 2017, "A dynamic method for feeder reconfiguration and capacitor switching in smart distribution systems", "Electrical Power and Energy Systems" 85, pp 200-211
8. Salehi J., Oskuee M.R.J., Amini A., 13 January 2017, "Stochastics multi-objective modeling of simultaneous reconfiguration of power distribution network and allocation of DG's and capacitors", "International journal of Ambient Energy", 15 pgs
9. Baran M.E., Wu F.F, April 1989, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol.4, No.2", pp. 1401-1407
10. Zimmerman R.D., Murillo-Sanchez C.E., 16 December 2016, "MATPOWER 6.0 User's Manual", 205 pgs
11. Stojanović B., 1997, "Simulacija kaljenja i njena primena na kompenzaciju u radijalnim distributivnim mrežama", Magistarski rad, Beograd, 94 str. (osnovni deo rada)