

Rekonfiguracija distributivne mreže i otočna kompenzacija uz prisustvo vetro generatora

Distribution Network Reconfiguration and Capacitor Switching in the Presence of Wind Generators

Branko Stojanović*, Tomislav Rajić**

* Tehnički opitni centar, Beograd

** Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Rezime – U radu je prikazana rekonfiguracija distributivne mreže i otočna kompenzacija kada su prisutni vetro generatori metodom simuliranog kaljenja (SA). Mreža od interesa ima 69 čvorova i 73 grane koje su sve komutujuće. Potrošnja se menja po Gauss-ovoj raspodeli a snaga vetro generatora po Weibull-ovoj svaki sat. Postoje dva vetro generatora maksimalne snage od 200 kW (10% aktivne potrošnje) i na početku se mogu dodeliti svakom čvoru po uniformnoj raspodeli. Isto važi i za kondenzatorske baterije što je nerealistično. Monte Carlo grafičkom metodom biraju se najčešće posećeni čvorovi za permanentan rad vetro generatora i uključenje kondenzatorskih baterija. Ulazni faktor snage mreže je manji od 0.85 tako da su kondenzatorske baterije neophodne. Mreža ne sme biti ni prekompenzovana. Analiziraju se četiri scenarija, prvi kada postoje samo vetro generatori a zatim i sve moguće kombinacije regulacije. Izlaz iz programa su: cena konfiguracije i baterija kondenzatora kao i promena ušteda na časovnoj osnovi. Rezultati su prikazani krivama za period rada od 1000 sati. Oni pokazuju da se istovremenom rekonfiguracijom i otočnom kompenzacijom uz prisustvo vetro generatora mogu ostvariti znatne uštede.

Ključne reči – rekonfiguracija, otočna kompenzacija, vetro generatori, simulirano kaljenje (SA)

Abstract- In this paper, the distribution network reconfiguration with simultaneous capacitor switching, in the presence of wind generators, by Simulated Annealing (SA) is presented. Analysed test network has 69 nodes including the slack one and 73 branches, all of which can commutate. Following assumptions are made: load in nodes is changed according to Gauss distribution and wind generator power with Weibull one, every hour, then there are two wind generators of 200 kW maximum power each (10% of total, nominal active power load) and they can be allocated to any node but the slack one. The same is valid for the capacitor banks regarding allocation. This switching logic is unrealistic. On its basis more realistic one was issued with fixed nodes for allocation of wind generators and capacitor banks (the most frequently visited nodes), by Monte Carlo graphical method. Input power factor is to be greater than 0.85 which is not fulfilled with commencing configuration (from the start) so that allocation of capacitor banks is mandatory. Another constraint is

that the network should not be overcompensated. Four realistic scenarios are investigated. In the first one only network with wind generators is analysed and the rest are dedicated to all possible combinations of the regulation. The programme is automated indicating the price of configuration, generated banks, input data (active and reactive load, power and location of wind generators) and savings which change on an hourly basis. The wind generators are uniformly distributed in accordance to nodes (for the less realistic scenario) and generate only active power complying with Weibull distribution. The graphical results are presented for a 1000-hour operation (operation in one thousand hours, every hour different) and the analysis is done for a thousand-hour work. The presented method shows that considerable savings can be achieved by simultaneous application of reconfiguration method and capacitor switching with already allocated wind generators.

Index Terms - reconfiguration, capacitor placement, wind generators, Simulated Annealing (SA)

I UVOD

Pojedinačni problemi vezani za rekonfiguraciju i otočnu kompenzaciju su dosta proučavani u ranijoj literaturi [1-4]. Kompenzacija se odnosi na određivanje tipa, veličine i čvora gde će se kondenzatorska baterija ugraditi. Rekonfiguracija u svrhu smanjenja gubitaka aktivne snage je takođe dosta proučavana matematičkim, heurističkim i meta-heurističkim alatima.

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 [5], 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

[5-11] pri čemu su njima pridodati još i distribuirani generatori (distributed generation) [10-13]. 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. U ovom radu prvo je na bazi 1000 puštanja programa (1000 sati) izvršena analiza osetljivosti na osnovu koje su za mrežu [14] određeni čvorovi za lokaciju vetro generatora i kondenzatorskih baterija. Za analizu osetljivosti korišćena je grafička Monte Carlo metoda sprovedena algoritmom simuliranog kaljenja. Kada su utvrđeni kandidat čvorovi ponovljena je analiza istim algoritmom za različite scenarije radi utvrđivanja finansijske osnove problema (takođe za 1000 sati rada mreže).

II NORMALNA I WEIBULL-OVA RASPODELA

Za stohastičnost potrošnje, usvaja se normalna raspodela (Gauss-Laplace raspodela). Na početku je poznata očekivana vrednost potrošnje u nekoj tački sistema. Ona se usvaja prema podacima zadatim za taj čvor (P i Q) [14]. 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
 σ - standardna devijacija, odstupanje od očekivane vrednosti. Za σ 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):

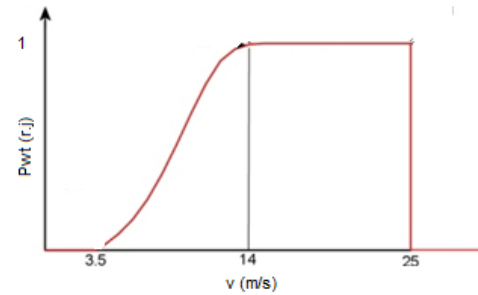
$$f(v) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k}. \quad (2.2)$$

gde su:

v - brzina vetra [m/s],

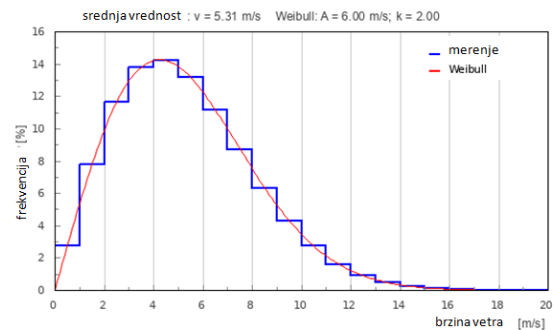
A - parametar Weibull-ove skale u m/s, mera za karakterističnu brzinu vetra (A je proporcionalno srednjoj brzini vetra) i

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



a)

Raspodela brzine vetra



b)

Slika 1. Karakteristike vetrogeneratora i vetra,

a) Proizvedena električna snaga u zavisnosti od brzine vetra,

b) Gustina raspodele brzine vetra za jednu godinu

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

III CENA UGRAĐENIH KONDENZATORSKIH BATERIJA

Cena kondenzatorskih baterija data je tabelarno (stepenastom funkcijom, Tabela 1) po koracima reaktivnih snaga baterije:

Tabela 1. Cena kondenzatorske baterije (\$)

| snaga baterije | > 0, ≤ 300 kVAr | > 300, ≤ 600 kVAr | > 600, ≤ 900 kVAr | > 900, ≤ 1200 kVAr | > 1200 kVAr |
|--|-----------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------|
| cena | 1900 \$ | 3200 \$ | 4500 \$ | 5400 \$ | 6000 \$ |
| Cena održavanja i montaže uključena je u fiksni deo cene kondenzatorske baterije | | | | | |

IV 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 radialna 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 [15].

V SIMULIRANO KALJENJE

Simulirano kaljenje je probablistička 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). 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.

VI MAKSIMALNA I MINIMALNA SNAGA UGRAĐENIH KONDENZATORSKIH BATERIJA

U polaznom scenariju kada se još ne zna gde će biti postavljene kondenzatorske baterije u svakom satu j vrši se provera maksimalne i minimalne snage ugrađenih kondenzatorskih baterija.

Određivanje maksimalne i minimalne snage kondenzatorskih baterija opisano je u [16]. Moraju da budu ispunjena sledeća dva uslova:

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

da mreža ne bi bila prekompenzovana, tj.

$$Q_{b\min} = Q_{loss} + Q_{dem} - P_{00} * \frac{\sqrt{1 - 0.85^2}}{0.85} \quad (6.2)$$

da bi imali faktor snage kod napojnog čvora veći od 0.85.

U jednačinama (6.1) i (6.2) korišćene 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

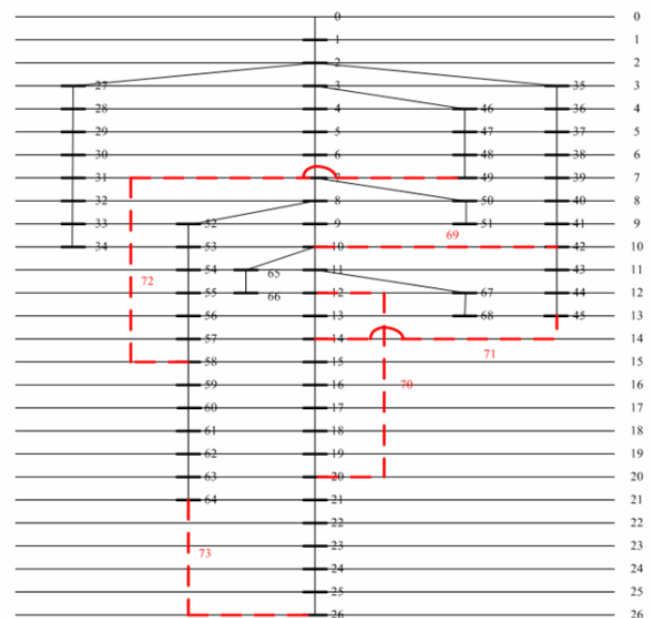
P_{00} - aktivna snaga napojnog čvora za određeni nivo potrošnje [kW].

Pretpostavljeno je da ne postoje dozemne admitanse što je ispunjeno kod test mreže.

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).

VII TEST PRIMER

Test mreža je srednje veličine, hipotetična, nazivnog napona 12.66 kV [14], prikazana na **Slici 2**. Sastoji se od 68 sekcionih grana i 5 spojnih od kojih svaka može da komutuje, spojne grane prikazane su tačkasto. Ukupno aktivno i reaktivno opterećenje mreže iznosi 3802 kW i 2694 kVAr. Ukupni gubici su 225 kW što je 5.9% aktivne potrošnje. Mreža ima ulazni faktor snage $\cos\phi$ 0.8212 (<0.85) tako da nije dobro kompenzovana. Sve važi za nominalni nivo opterećenja. Pretpostavimo da minimalni napon iznosi 95 % od 12.66 kV. Kako je on u startu 90.9% on ne zadovoljava. Proračun je izvršen u MATLAB R2010a (Pentium IV PC; Intel core i7-4770; 3.4 GHz; 32 GB RAM). Primenjen je algoritam tokova snaga u MATPOWER-u ('casejng').



Slika 2. Mreža test primer [14]

VIII FUNKCIJE CILJA, OPERACIONI INDEKSI I OGRANIČENJE
KOMUTACIJA

Funkcija cilja za svaki sat rada:

$$EOLDD_{i,j}[\$] = E1_{i,j} * 0,15 + 120 * P_{loss,i,j} + C_{int,i,j} = FINALCOST_{i,j} \quad (8.1)$$

gde su:

$E1_{i,j}$ - cena kondenzatorskih baterija [\$],

0,15 - godišnja stopa cene kondenzatorskih baterija,

120 - cena gubitaka aktivne snage [\$/kW],

$P_{loss,i,j}$ - gubici aktivne snage [kW],

$C_{int,i,j}$ - trošak za neisporučenu električnu energiju [\$] [17],

j - oznaka koja se odnosi na tekući sat i

i - oznaka koja se odnosi na redni broj scenarija.

Uštede svakog sata se sračunavaju:

$$SAVINGS_{i,j} = INITIAL_{i,j} - FINALCOST_{i,j} \quad (8.2)$$

gde su:

$INITIAL_{i,j}$ - inicijalna funkcija cilja za polaznu konfiguraciju

(bez komutacija i bez kondenzatorskih baterija).

Funkcija cilja uštede za ceo posmatani period od 1000 sati:

$$\begin{aligned} ENERGY_i [\$] = & 120 * \max(P_{loss,initial,i,j}) + 0,03 * \sum_{j=1}^{N^{hours}} P_{loss,initial,i,j} \\ & + \sum_{j=1}^{N^{hours}} C_{int,initial,i,j} + [0,15 * E1_{i,j} + 120 * \max(P_{loss,i,j}) + \\ & + 0,03 * \sum_{j=1}^{N^{hours}} P_{loss,i,j} + \sum_{j=1}^{N^{hours}} C_{int,i,j} + C_{com,i}] \end{aligned} \quad (8.3)$$

0,03 - cena gubitaka na isporučenu električnu energiju [\$/kWh] i

$C_{com,i}$ - cena komutacija (cena jedne komutacije je 1 \$ ili 50 \$).

Ukupni indeks naponske slike:

$$TVPI_i = \frac{\sum_{j=1}^{N^{hours}} VPI_{i,j}}{\sum_{j=1}^{N^{hours}} VPI_{i,j}^n} \quad (8.4)$$

Pojedinačni indeks naponske slike:

$$VPI_{i,j} = \sum_{k=1}^N |1 - V_{k,i,j}| \quad (8.5)$$

gde su:

N - broj čvorova mreže,

$V_{k,i,j}$ - napon čvora k u relativnim jedinicama (p.u.) i

$VPI_{i,j}^n$ - pojedinačni indeks naponske slike za polaznu konfiguraciju.

Ukupni indeks gubitaka aktivne snage:

$$TPLI_i = \frac{\sum_{j=1}^{N^{hours}} PLI_{i,j}}{\sum_{j=1}^{N^{hours}} PLI_{i,j}^n} \quad (8.6)$$

$$PLI_{i,j} = \sum_{b=1}^{N_b} r_b * I_{b,i,j}^2 \quad (8.7)$$

gde su:

N_b - ukupan broj grana,

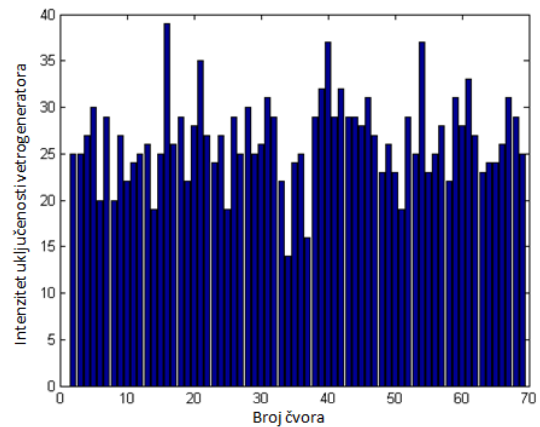
r_b - aktivna otpornost grane b i

$I_{b,i,j}$ - vrednost struje grane b .

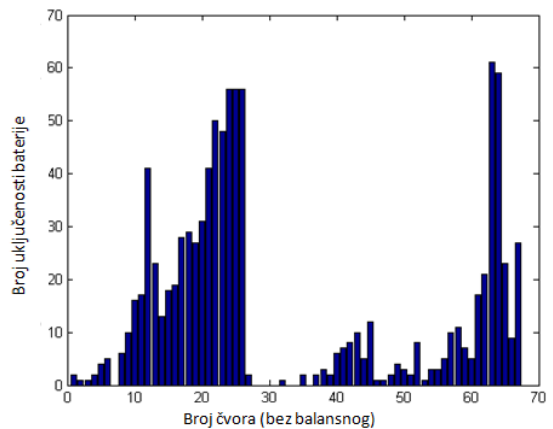
Za rad mreže od 24 sata i prekidač koji treba da radi 15 godina predviđa se maksimalni broj komutacija od 6, 4 za rekonfiguraciju i 2 za eventualnu restauraciju. Pretpostavljeno je da je ova vrednost ista za sve prekidače.

IX GRAFIČKI I NUMERIČKI REZULTATI

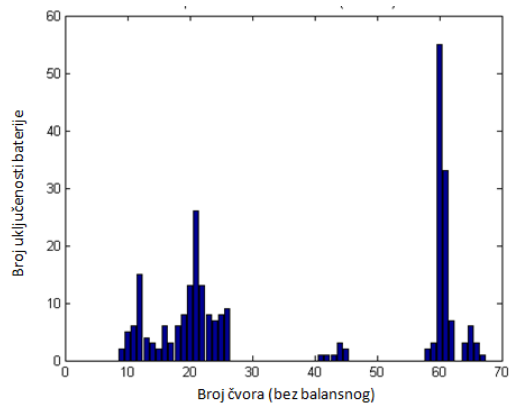
Na početku program se pušta 1000 sati za slučaj kada čvorovi za lokaciju kondenzatorskih baterija i vetro generatora nisu fiksirani. Rezultati su prikazani na slikama 3.a)-3.g).



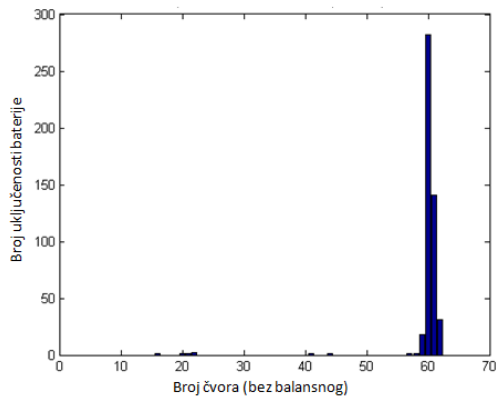
Slika 3.a) Intenzitet uključenosti vetro generatora



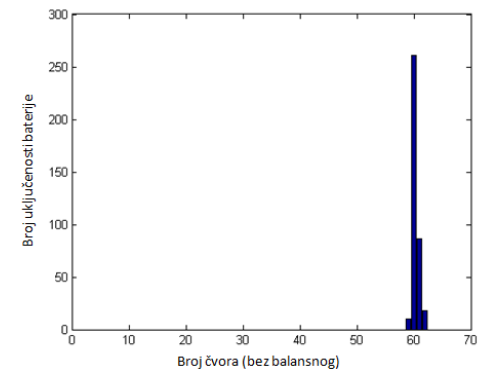
Slika 3.b) Kondenzatorska baterija 300 kVAR



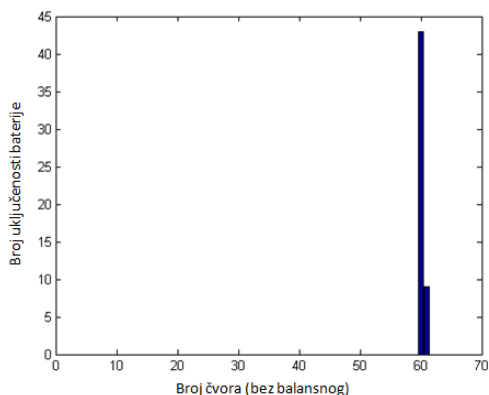
Slika 3.c) Kondenzatorska baterija 600 kVAr



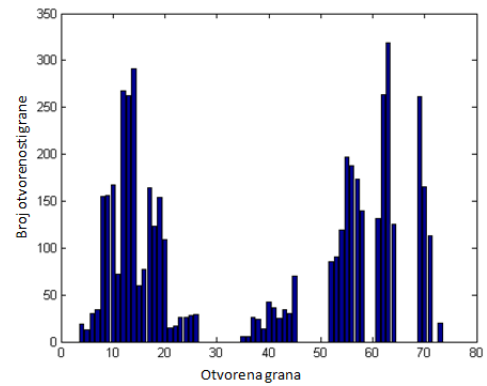
Slika 3.d) Kondenzatorska baterija 900 kVAr



Slika 3.e) Kondenzatorska baterija 1200 kVAr

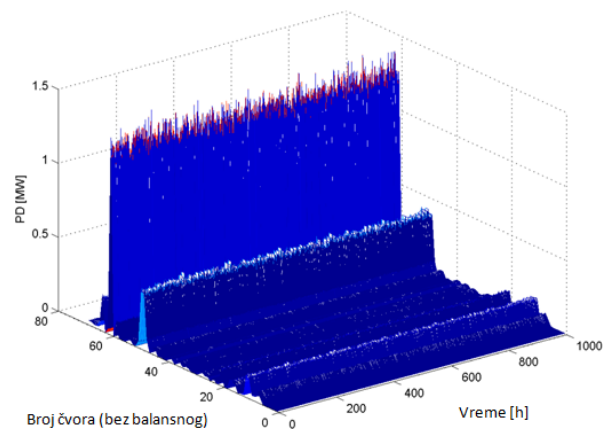


Slika 3f.) Kondenzatorska baterija 1500 kVAr

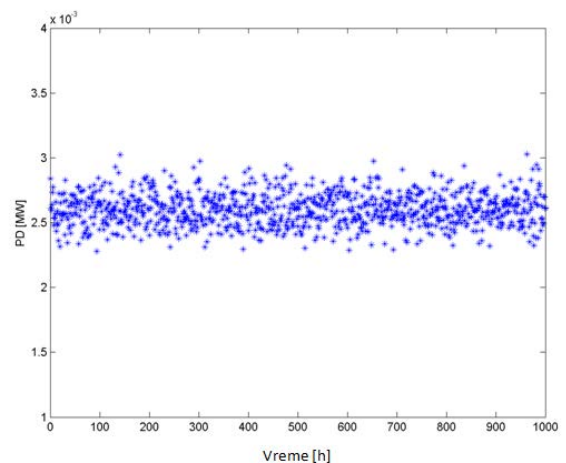


Slika 3g) – Intenzitet komutacija (otvaranja) grana mreže

Nakon toga na bazi analize osjetljivosti kao najčešće posećeni čvorovi za vetro generatore izabrani su čvorovi 16 i 40 (Slika 3a). Izabrane su kondenzatorske baterije na isti način od 600 i 900 kVAr-a respektivno u čvorovima 21 i 60 (Slike 3b-f). Ukupna reaktivna snaga baterija je 1500 kVAr-a da mreža ne bi bila prekompenzovana. Ovakav pristup nazvan je Monte Carlo grafička metoda.

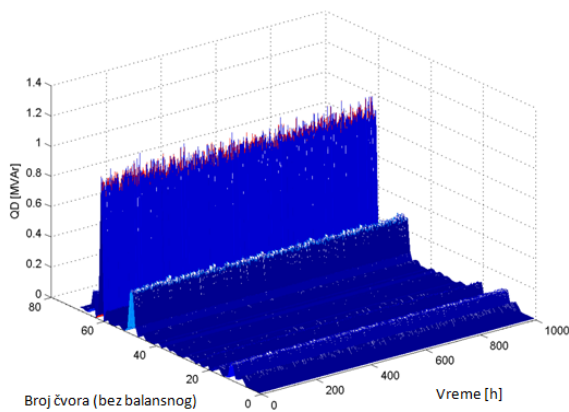


Slika 4. Kriva aktivnog opterećenja za celu mrežu za 1000 sati

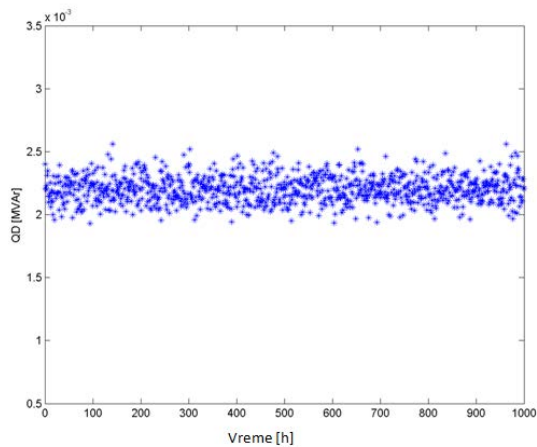


Slika 5. Kriva aktivnog opterećenja čvora 6 za 1000 sati

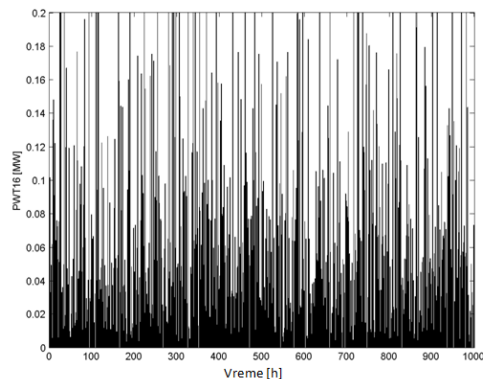
Program je zatim startovan sa novim ulaznim podacima (za 1000 sati rada). Za naknadno navedene scenarije dobijene su naredne slike. Slike 4-7 pokazuju krive trajanja aktivnog i reaktivnog opterećenja za celu mrežu i čvor 6 (Gauss-ova raspodela).



Slika 6. Kriva reaktivnog opterećenja za celu mrežu za 1000 sati



Slika 7. Kriva reaktivnog opterećenja čvora 6 za 1000 sati



Slika 8. Aktivna proizvodnja vetro generatora u čvoru 16 tokom 1000 sati

Aktivna i reaktivna potrošnja menjaju se po Gauss-ovoj raspodeli oscilujući oko svoje srednje vrednosti. To se potvrđuje analizom podataka sa Slike 5 za čvor 6 kome je nominalno opterećenje 2.6 kW [14] i sa Slike 7 na kojoj reaktivno opterećenje čvora 6

osciluje oko nazivne vrednosti od 2.2 kVA-a. Vremenska promena snage vetro generatora za čvorove 16 i 40 je identična i podložna Weibull-ovoj raspodeli. Za čvor 16 ona je predstavljena na Slici 8.

Analizirani su sledeći scenariji:

- Scenario 1 je opterećena mreža sa potrošnjom koja se menja po Gauss-ovoj raspodeli i prisutnim vetro generatorima koji daju snagu u skladu sa Weibull-ovom raspodelom.
- Scenario 2 je mreža kao pod 1 ali sa još prisutnom rekonfiguracijom.
- Scenario 3 je slučaj kao pod 1 ali sa još pridodatim kondenzatorskim baterijama u čvorovima 21 i 60.
- Scenario 4 je mreža kao pod 1 ali kada je prisutna rekonfiguracija i kada su pridodate kondenzatorske baterije u čvorovima 21 i 60.

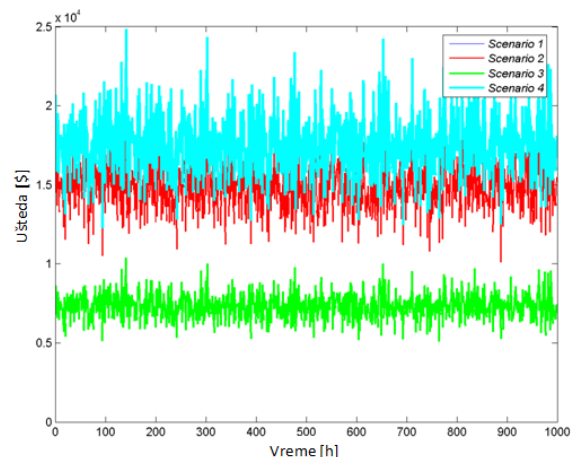
Funkcija cilja $ENERGY_i$, operacioni indeksi $TVPI_i$ i $TPLI_i$ i cena komutacija za pojedine scenarije i rad od 1000 sati prikazani su tabelarno (Tabela 2).

Tabela 2. $ENERGY_i$, $TVPI_i$, $TPLI_i$ i trošak komutacija za 1000 sati rada mreže

| Scenario | $ENERGY_i$ [\$] | $TVPI_i$ [r.j.] | $TPLI_i$ [r.j.] | trošak komutacija [\$] |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|
| 1 | 0 | 1 | 1 | - |
| 2 | 446100 (323306) | 0.5852 | 0.4598 | 2506 (125300) |
| 3 | 59042 | 0.7637 | 0.6843 | - |
| 4 | 484580 (340814) | 0.3804 | 0.3171 | 2934 (146700) |

NAPOMENA: (trošak po komutaciji 50\$).

Iz gornje tabele vidi se da je optimalan scenario 4.

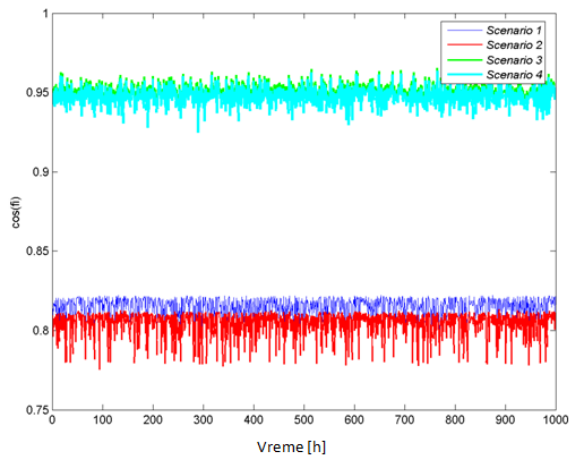


Slika 9. Uštede po satima za 1000 sati za različite scenarije

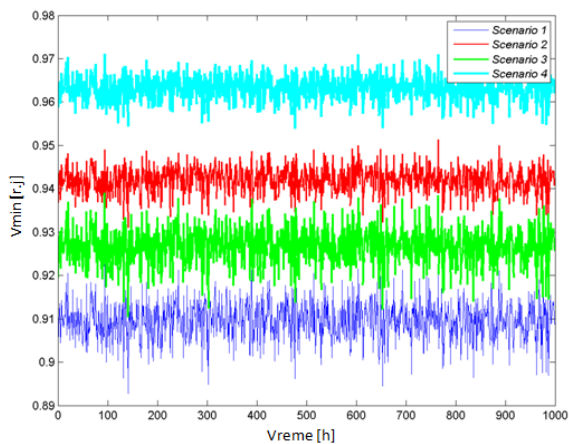
Uštede po satima rada mreže date su na Slici 9. Očigledno je da su one najveće za scenario 4. Za scenario 1 ne postoje uštede.

Promene ulaznog faktora snage $\cos\phi$ predstavljene su Slikom 10. Najbolji faktor snage postiže se kada su pridodate samo

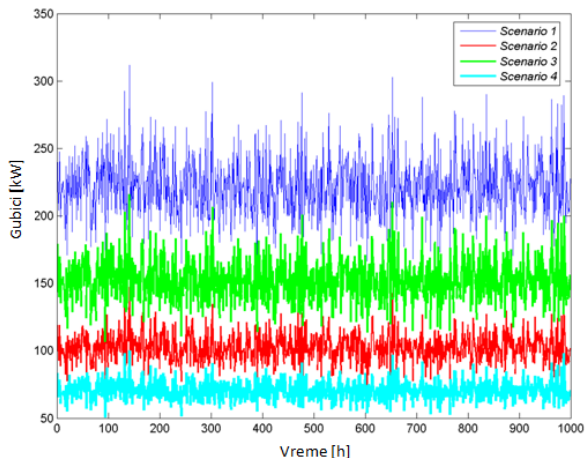
kondenzatorske baterije. Za scenario 4 on je nešto gori. Najbolji najniži napon mreže je u scenariju 4 i nešto gori za scenario 2. Samo za scenario 4 zadovoljen je uslov da je on viši od 95 % tako da ugradnja regulacionog transformatora za podizanje napona mreže u napojnom čvoru nije potrebna (Slika 11).



Slika 10. Ulazni faktor snage ($\cos\phi$) po satima za 1000 sati za različite scenarije



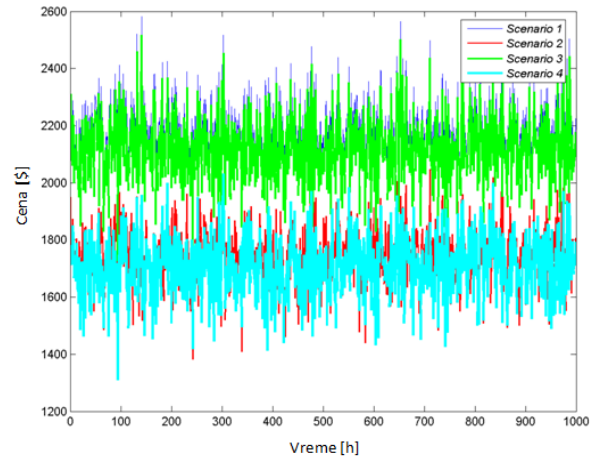
Slika 11. Najniži napon mreže po satima za 1000 sati za različite scenarije



Slika 12. Gubici aktivne snage mreže po satima za 1000 sati za različite scenarije

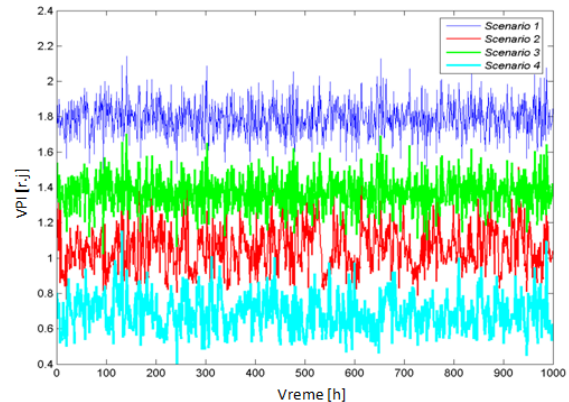
Na Slici 12 prikazana je promena gubitaka aktivne snage mreže. Gubici aktivne snage su najmanji za scenario 4 pa onda za scenario 2.

Trošak na neisporučenu električnu energiju (prekid u napajanju) predstavljen je Slikom 13. Najmanji je za scenario 4, gotovo isti za scenario 2 i lošiji za preostala dva scenarija.



Slika 13. Cena za neisporučenu energiju mreže po satima za 1000 sati za različite scenarije

Kvalitet mreže iskazuje se indeksom naponske slike (najbolji je za scenario 4, Slika 14).

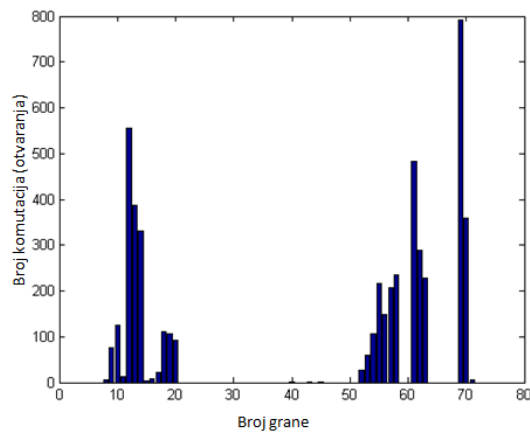


Slika 14. Indeks naponske slike mreže po satima za 1000 sati za različite scenarije

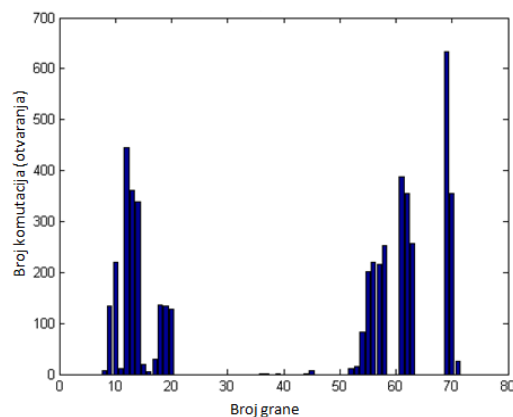
Na Slikama 15 i 16 prikazan je intenzitet otvaranja grana kada su čvorovi kojima se dodeljuju vetro generatori i kondenzatorske baterije fiksni (za period od 1000 sati) i to za scenarije 2 i 4. Na osnovu njih zaključujemo da se neke grane nikad ne otvaraju tako da prisustvo prekidača na njima nije neophodno.

Grane 1-7, 21-39, 41, 42, 44, 46-52, 58-60, 64-68 i 72-73 (Slika 15, scenario 2), 1-7, 21-35, 38, 40-43, 46-52, 58-60, 64-68 i 72-73 (Slika 16, scenario 4) se nikada ne otvaraju tako da prekidači na njima nisu potrebni čime se mogu postići dodatne uštede.

Trajanje programa za simulaciju 1000 sati rada mreže za najzahtevniji scenario 4 iznosi 23 h što je 2.3 % od planiranog perioda tako da je metoda primenljiva u fazi planiranja.



Slika 15. Broj komutacija (otvaranja) različitih grana mreže za 1000 sati rada za scenario 2



Slika 16. Broj komutacija (otvaranja) različitih grana mreže za 1000 sati rada za scenario 4

X ZAKLJUČCI

U ovom radu predstavljena je simultana rekonfiguracija i otočna kompenzacija distributivne mreže uz prisustvo vetro generatora metodom simuliranog kaljenja. Analizirana je IEEE mreža koja ima 69 čvorova i 73 grane od kojih svaka može da komutuje. Izvršena kompjuterska analiza pokazuje da je primenjenom metodom moguće postići znatne uštede. One se menjaju iz sata u sat i ne mogu se sumirati. Ulazni faktor snage ($\cos\phi$) za neke scenarije je veći od 0,85 a za polazni je manji. Sa dve kondenzatorske baterije u čvorovima 21(600kVAr) i 60(900kVAr) mreža nije prekompenzovana. Postignuti naponski profil je bolji od polaznog. Za scenario 4 minimalni napon je veći od 0,95 r.j. tako da je izbegnuta ugradnja teretnog regulatora u napojnom čvoru mreže. Postignuti gubici aktivne snage su mnogo bolji od polaznih. Postignuta je znatna ušteda na isporučenoj električnoj energiji. Sa vremenom računanja koje iznosi 2,3 % od trajanja planiranog perioda eksploatacije metoda je primenjiva u fazi planiranja. Neke grane se nikada ne otvaraju tako da prekidači na njima nisu potrebni što donosi dodatne uštede. Može se zaključiti da je primenjena grafička Monte Carlo metoda sprovedena algoritmom simuliranog kaljenja potvrdila svoj validitet.

LITERATURA

- [1] Chiang, H.D., Wang, J.C., Cockings, O., Shin, H.D. Optimal capacitor placements in distribution systems: part 1: A new formulation and the overall problem, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.5, No.2, pp. 634-642, 1990. <https://doi.org/10.1109/61.53065>
- [2] Chiang, H.D., Wang, J.C., Cockings, O., Shin, H.D. Optimal capacitor placements in distribution systems: part 2: Solution algorithms and numerical results, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.5, No.2, pp. 643-649, 1990. <https://doi.org/10.1109/61.53066>
- [3] Chiang, H.D., Jumeau, R.J. Optimal network reconfigurations in distribution systems: part 2: Solution algorithms and numerical results, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.5, No.3, pp.1568-1574, 1990. <https://doi.org/10.1109/61.58002>
- [4] Chiang, H.D., Jumeau, R.J. Optimal network reconfigurations in distribution systems: part 1: A new formulation and a solution methodology, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.5, No.4, pp. 1902-1909, 1990. <https://doi.org/10.1109/61.103687>
- [5] De Oliveira, L.W., Carneiro, Jr.S., De Oliveira, E.J., J. Pereira, L.R., Silva, Jr.I.C., Costa, J.S. Optimal reconfiguration and capacitor allocation in radial distribution systems for energy loss minimization, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 32, pp. 840-848, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.01.030>
- [6] Lin, Y., Zhizhong, G. Comprehensive optimization for energy loss reduction in distribution networks, in Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 20-24 July 2008. <https://doi.org/10.1109/pes.2008.4595980>
- [7] Rezaei, P., Vakilian, M. Distribution system efficiency improvement by reconfiguration and capacitor placement using a modified particle swarm optimization algorithm, in Proc. *Modern Electric Power Systems EPEC 2010*, Wroclaw, Poland, 20-22 Sept. 2010. <https://doi.org/10.1109/epec.2010.5697205>
- [8] Guimaraes, M.A.N., Castro, C.A., Romero, R. Distribution systems optimization through reconfiguration and capacitor allocation by dedicated genetic algorithm, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 4, Issue. 11, pp. 1213-1222, 2010. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2010.0020>
- [9] Farahani, V., Vahidi, B., Abyaneh, H.A. 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, 2012. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2011.2167688>
- [10] Ameli, A., Ahmadi, A., Shariatkah, M.H., Vakilian, M., Haghifam, M.R. A dynamic method for feeder reconfiguration and capacitor switching in smart distribution systems, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 85, pp. 200-211, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.09.008>
- [11] Salehi, J., Oskuee, M.R.J., Amini, A. Stochastics multi-objective modeling of simultaneous reconfiguration of power distribution network and allocation of DG's and capacitors, *International journal of Ambient Energy*, Vol. 39, Issue 2, pp. 176-187, 2017. <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1280084>
- [12] Šošić, D., Stefanov, P., Mršić, P. Određivanje parametara pouzdanosti u distributivnim mrežama u prisustvu distribuirane potrošnje, *Energija ekonomija, ekologija*, Vol. XX, No 1-2, pp. 313-318, 2018.
- [13] Stefanov, P., Jeličić, N., Šošić, D. Optimizacija prekidačkih operacija u rekonfiguraciji distributivnih mreža primenom PSO postupka, *Energija ekonomija ekologija*, Vol. XIX, broj 1-2, pp. 408-416, 2017.
- [14] Jiang, D. *Electric distribution system reconfiguration and capacitor switching*, Worcester Polytechnic Institute, May 1994, 77 pages.
- [15] Zimmerman, R.D., Murillo-Sanchez, C.E. *MATPOWER 6.0 User's Manual*, 2016. <https://matpower.org/docs/MATPOWER-manual-6.0.pdf>
- [16] Stojanović, B., Rajić, T. Rekonfiguracija i otočna kompenzacija distributivne mreže u svrhu smanjenja gubitaka na električnu energiju, in Proc. 35. *Savetovanje ENERGETIKA 2020*, Zlatibor, pp. 207-214, 21-24 jun 2020.
- [17] Nahman, J., Perić, D. Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, pp. 790-795, 2008. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2008.920047>

AUTORI

mr Branko Stojanović, Tehnički opitni centar, Beograd, stojanovic.branko@rocketmail.com

dr Tomislav Rajić - docent, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, rajic@etf.rs