

**PRIMENA SISTEMA ZA SKLADIŠTENJE ELEKTRIČNE ENERGIJE U RAZGRANATOJ  
DISTRIBUTIVNOJ MREŽI PRI NJENOJ REKONFIGURACIJI I OTOČNOJ KOMPENZACIJI**

**APPLICATION OF BATTERY ELECTRICITY STORAGE SYSTEMS IN LARGE SCALE  
DISTRIBUTION NETWORK UNDER RECONFIGURATION AND CAPACITOR SWITCHING**

Branko STOJANOVIĆ, Tehnički opitni centar, Srbija

Tomislav RAJIĆ, Elektrotehnički fakultet, Srbija

Darko ŠOŠIĆ, Elektrotehnički fakultet, Srbija

**KRATAK SADRŽAJ**

Sistemi za skladištenje električne energije (BESS) se sve više primenjuju u distributivnoj mreži zbog prisutne penetracije distribuiranih generatora (vetroelektrane, solarni paneli, DG) čiji je rad praćen prekidima. Kada je proizvodnja DG veća od potrošnje BESS su u režimu punjenja a kada je manja BESS se prazne. U noćnim satima i kada nema vetra BESS mogu da proizvode električnu energiju namesto solarnih i vetroelektrana koje tada ne rade. Takođe se BESS koriste za „peglanje“ pikova potrošnje. Njihovo neadekvatno postavljanje može dovesti do povećanih struja grana, prenapona i podnapona kao i do kontra tokova snaga. U analiziranoj razgranatoj distributivnoj mreži od 118 čvorova i 132 grane (15 spojnih) koje sve mogu da komutuju, BESS i DG su prisutni na samom početku analize pre rekonfiguracije i kompenzacije koje su razdvojene (prvo se vrši rekonfiguracija metodom minimalno razgranatog stabla, Kruskalov algoritam pa otočna kompenzacija simuliranim kaljenjem). Minimizira se funkcija cilja za svaki sat rada mreže kojih ima 1008 a ona se sastoji od gubitaka na aktivnu snagu, cene kondenzatorskih baterija i cene na neisporučenu električnu energiju. U prvoj fazi proračuna kondenzatorske baterije „šetaju“ po čvorovima mreže, svakoga sata, u cilju optimizacije što je nerealna situacija pa se naknadno fiksiraju u najčešće posećenim čvorovima sa snagama koje se ne menjaju. Da bi se zadovoljila tehnička ograničenja dozvoljenih tolerancija napona i ulaznog faktora snage mreže u napojni čvor se postavlja teretna naponska sklopka (OLTC) i vrši se otočna kompenzacija. Na kraju proračuna se izračunavaju rezultantne uštede koje uključuju cenu na isporučenu i neisporučenu električnu energiju, gubitke vršne snage, cenu kondenzatorskih baterija, cenu komutacija i cenu punjenja i pražnjenja BESS. Analizira se veliki broj različitih scenarija rada mreže od kojih su u radu predstavljeni samo karakteristični. Najpodobniji scenariji pokazuju da ugradnja BESS poboljšava tehničke performanse mreže ali da je za usvojene cene njihovog punjenja i pražnjenja ekonomski skuplja od slučaja kada nisu prisutne.

**Ključne reči:** BESS, DG, rekonfiguracija, algoritam Kruskala, otočna kompenzacija, simulirano kaljenje

**ABSTRACT**

Battery electricity storage systems (BESS) find their application more frequently in present distribution networks because of intermittent penetration of solar cells and wind farms (distributed generation, DG). When consumption is lower than production BESS charge and discharge otherwise. In night hours and when there is no wind BESS can produce electricity instead of renewables. They can be also used for peak “shaving“. Their wrong placement can produce overvoltage, undervoltage, increased branch currents and reverse power flow. In underdone analyses BESS and DG are present from the very start, in initial configuration of 118 node, 132 branch analyzed network (of 15 tie switches). Then reconfiguration is performed by minimum spanning tree (MST), Kruskal algorithm, followed by capacitor switching by simulated annealing (SA). Objective function for each hour is minimized consisting of capacitors cost, price of active power losses and undelivered electric energy while period of analysis is of 1008 hour duration. After first phase when capacitors “slide“ to the nodes, each hour, they are assigned to fixed mostly visited nodes, and fixed capacity that is more realistic. To comply technically regarding voltage gap and input power factor value On Load Tap Changer (OLTC) is slack node placed and compensation is undertaken. The end of calculation is lump objective function comprising of cost of capacitors, price of delivered and undelivered electric energy, peak power loss, cost of BESS charge and discharge and commutations. Only characteristic scenarios of them all, are paper presented. The most feasible

scenarios show that BESS although bringing technical advantages are financially more costly than when they are not used.

**Key words:** BESS, DG, reconfiguration, Kruskal algorithm, capacitor switching, simulated annealing (SA)

## 1. UVOD

S obzirom da obnovljivi izvori električne energije kao što su vetroelektrane i solarni paneli (DG) sve više ulaze u upotrebu, u savremenim distributivnim mrežama, problemi vezani za njihov rad sa prekidima postaju sve izraženiji. Baterijski sistemi za skladištenje električne energije (BESS) mogu ublažiti ove probleme svojim radom (punjenje/praznjenje) koji utiče i na „peglanje“ pikova potrošnje. Smanjenje električne potrošnje, u momentima kada su kapaciteti mreže preopterećeni „peglanjem“ pikova, pomaže odlaganju ulaganja u proširenje mreže ili njeno pojačanje. Smanjenjem trajanja pikova smanjuje se trošak na električnu energiju, jer se baterije pune noću, kada je tarifa niža, a isporučuju električnu energiju tokom dnevnih vršnih sati. Nadzor rada distributivne mreže se može olakšati ugradnjom električnih baterija za skladištenje električne energije. Na lokacijama, gde je kapacitet mreže ograničen tokom vršnih sati, kada rade obnovljivi izvori, baterije mogu skladištiti preveliku proizvedenu električnu energiju i davati je kada je proizvodnja obnovljivih izvora smanjena. Skladištenjem električne energije obezbeđuje se, fleksibilnost energetskog sistema i ono je korisno, jer omogućuje da se veće količine obnovljive energije sigurno i bezbedno integrišu u mrežu. Moguće je napajanje više potrošača, pri postojećem kapacitetu mreže, jer se višak električne energije može skladištiti.

U optimizaciji instalisane snage BESS potrebno je uključiti i operaciona ograničenja koja mreža mora da zadovolji (naponske granice, efektivne vrednosti struja grana i regularne tokove snaga) kao i stohastičnost distribuirane proizvodnje (DG). Weibull-ova raspodela za modelovanje snage vetroturbine i dijagram insolacije sa uključenom oblačnošću za solarne panele su primenjene u ovom radu. Probabilistička potrošnja je predstavljena Gauss-ovom raspodelom i dnevnim dijagramom potrošnje za radni i neradni dan. Analizirana je razgranata distributivna mreža koja ima 118 čvorova, 117 sekcioničnih grana i 15 spojnih, koje sve mogu da komutuju (1). Pored toga što popravljaju tehničke performanse mreže (smanjuju trošak na isporučenu i neisporučenu električnu energiju i trošak vršne snage) u poređenju sa mrežom u kojoj nisu prisutne, BESS moraju biti i finansijski isplative (samo je cena njihovog punjenja i praznjenja uzeta u obzir).

Gubici u distributivnoj mreži su znatno veći, nego u prenosnoj, tako da je kod distributivne mreže njihovo smanjenje od vitalnog interesa. Udeo distributivne mreže iznosi 5-13% od ukupnih gubitaka u energetskom sistemu (2). Operator ima na raspolaganju različite taktike da bi smanjio gubitke, kao što su rekonfiguracija mreže, kompenzacija reaktivne snage, lokacija distribuiranih generatora (DG), automatizacija distributivne mreže, redukcija vršnih opterećenja, simetriranje opterećenja, korišćenje teretnih regulatora (OLTC), naponskih regulatora, optimalni izbor kablova i upotrebu transformatora i indukcionih motora. U dosadašnjoj literaturi, nije mnogo pažnje posvećeno simultanom dejstvu DG, kompenzacije, rekonfiguracije i uticaja OLTC uz prisustvo BESS. Zajednička koordinacija ovih strategija može dati optimalne rezultate u cilju minimiziranja gubitaka, popravke naponskog profila i korekciju ulaznog faktora snage distributivne mreže uz zadovoljenje tehničkih ograničenja, kao što su maksimalne struje grana i dozvoljene tolerancije napona čvorova. S druge strane loše postavljanje DG i BESS, može smanjiti potencijalne koristi i ugroziti postojeći sistem. Takođe je verovatno, da postavljanje samo DG i BESS bez rekonfiguracije i kondenzatorskih baterija neće dati optimalno rešenje.

Kada se posmatra rekonfiguracija sa aspekta smanjenja gubitaka aktivne snage, potrebno je naći optimalnu šemu uključivanja, to jest isključenja grana, pri čemu funkcija cilja treba da je minimalna a postignuta konfiguracija radijalna. Strukturirani, kao slabo upetljane mreže, poželjno je da distributivni sistemi budu radijalni da bi olakšali koordinaciju relejne zaštite i smanjili struje kratkih spojeva. Ovo se postiže manipulacijom sekcijom (normalno zatvorenom) i spojnom (normalno otvorenom) komutacionom opremom. Rekonfiguracija distributivne mreže pripada klasi mešovito-celobrojnih nelinearnih optimizacionih problema (MINLP). Konfiguracija mreže je određena statusom (otvoreno/zatvoreno) rasklopnih elemenata koji se modeluje binarnim (0/1) promenljivima. Pored toga, režim rada mreže (tokovi snaga, gubici aktivne snage, itd.) je modelovan nelinearnim algebarskim jednačinama sa kontinualnim varijablama (moduli i fazni stavovi fazora napona). Isto važi i za problem kompenzacije kod koga su veličine ugrađenih kondenzatorskih baterija diskretne veličine. Rešenje ovih problema je detaljno proučavano u literaturi matematičkim, heurističnim i metaheurističnim algoritmima.

## 2. PROMENLJIVOST POTROŠNJE, BRZINE VETRA I SOLARNA IRADIJACIJA

Dnevni dijagrami potrošnje za radni i neradni dan zasnovani na jednogodišnjem merenju u jednoj beogradskoj trafo stanici su prikazani u (3). Stohastičnost potrošnje je predstavljena Gauss-ovom raspodelom. Usvojene veličine potrošnje odstupaju od srednje vrednosti u skladu sa funkcijom gustine raspodele verovatnoća predstavljene jednakošću (1).

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

$f(x)$ - funkcija gustine raspodele verovatnoća,  
 $m$  - očekivana vrednost potrošnje u jednom čvoru i  
 $\sigma$  - standardna devijacija, za koju je usvojeno 10%.

Na ovaj način je nesigurnost potrošnje uzeta u obzir.

Weibull-ova funkcija gustine raspodele verovatnoća sa dva parametra služi za simulaciju brzine vetra pa indirektno i za određivanje snage vetroturbin (jednačina (2)).

$$f(v) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (2)$$

$v$  - brzina vetra [m/s],

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

$k$  – parametar koji određuje oblik Weibull-ove raspodele i obično ima vrednost između 1 i 3. Vrlo promenljive vetrove karakteriše mala vrednost za  $k$ .

Kada nema oblačnosti dijagram insolacije je simetričan, kada je ona uključena odstupanje svakog sata je između 1 i 10%. Najjača izračenost je u 13 sati dok je noću nula.

Usvojena su dva vetro generatora i dva solarna panela u samom startu. Pretpostavljeno je da su svi oni u istom geografskom području tako da su brzine vetra i solarna iradijacija iste za obe jedinice. Za postavljanje vetro-generatora izabrani su čvorovi 102 i 34. Snaga im je maksimalno 1.6 MW pojedinačno. Ovakav izbor usledio je nakon niza neuspelih pokušaja opisanih u poglavlju **6. PRIBLIŽAVANJE PODOBNOM REŠENJU**, kada su varirane snage vetrogeneratora i BESS. BESS su nakon nepodobnih rešenja, pridruženi čvorovima u kojima se nalaze vetrogeneratori a snage su im 1 MW (0.5 MW punjenje i 0.5 MW pražnjenje). Solarni paneli raspoređeni su u dva najopterećenija čvora aktivnom snagom (čvor 50, 918.37 kW i čvor 111, 918.03 kW), snage 1 MW.

## 3. PRIMENJENI OPTIMIZACIONI ALGORITMI

Primenom Kruskalovog algoritma (MST) postižu se gubici aktivne snage mreže približni globalnom optimumu i to u startu proračuna. Nakon rekonfiguracije simuliranim kaljenjem, SA (4) se vrši kompenzacija koje je za nju pogodno jer nema ograničenja tipa radjalnosti mreže i ovakav algoritam terminira za prihvatljivo vreme. Simulirano kaljenje primenjeno na rekonfiguraciju za mrežu primer traje 17 dana i ne daje prihvatljive rezultate pa je simultana metoda odbačena kao vremenski nerealan zahtevna. Primenjeni efikasni algoritam tokova snaga modelovan je u MATPOWER-u, Newton-ov algoritam (5). Sam algoritam se primenjuje samo jedanput svakog sata a dobijena mreža je radjalna. Parametri SA su: početna temperatura ( $T_{\text{početno}}$ ) 5000 °C, dužina Markov-ljevog lanca 3000, pravilo snižavanja temperature  $T=0.95 \cdot T$  i stopa prihvatanja 0.001. Posmatrani period rada mreže mora biti deljiv sa 24 sata pa je usvojeno 1008 sati.

Algoritam MST opisan je u nastavku:

- na početku se određuju težinski koeficijenti grana grafa koji su efektivne vrednosti struja kod potpuno upetljane mreže,
- počinje se sa praznim grafom i od balansnog čvora koji se označava sa 1,
- nadograđuje se grana najveće struje do posmatranog trenutka a da se ne formira petlja,
- dobijeni čvor se pridodaje skupu čvorova,
- proverava se da li su obuhvaćeni svi čvorovi i u tom slučaju algoritam terminira,
- ako ima još neobuhvaćenih čvorova algoritam se nastavlja na isti način dok se svi ne obuhvate.

Za analiziranu mrežu (1) vreme proračuna je reda ( $O(\log N)$ ), gde je  $N$  broj čvorova i gotovo je trenutno.

#### 4. PODACI O TEST MREŽI

Mreža primer je izbalansirana, nazivnog napona 11 kV sa 117 sekcionih (označene punom linijom) i 15 spojnih grana (označene isprekidanom linijom) koje sve mogu da komutuju (**Slika 5**). Ukupan broj čvorova je 118. Podaci o mreži nalaze se u referenci (1). Za nazivni režim gubici aktivne snage su 1298.1 kW a  $\cos\phi$  je 0.7998 ( $< 0.85$ ). Najniži napon se ima u čvoru 77 i iznosi 0.869 r.j. Dodavanje kondenzatorskih baterija vrši se sukcesivno počevši od baterija najmanje snage (300 kVAr) u čvorovima mreže sem balansnog da se minimizira funkcija cilja. Usvojene su sledeće nazivne maksimalne struje grana: 1 (1.9 kA), 2 (0.9 kA), 3 (1.85 kA), 4-7 (0.95 kA), 8-26 (0.9 kA), 27 i 28 (1.45 kA), 29-34 (1.25 kA), 35-45 (0.9 kA), 46-53 (1.25 kA), 54-61 (0.9 kA), 62 i 63 (1.45 kA), 64-76 (1.25 kA), 77-98 (0.9 kA), 99-109 (1.25 kA), 110 (0.9 kA), 111 i 112 (1.25 kA) i 113-132 (0.9 kA), cifre van zagrada označavaju redni broj grane.

#### 5. FUNKCIJE CILJA, OGRANIČENJA, OPERACIONI INDEKSI, DOZVOLJENI BROJ KOMUTACIJA PO GRANI I DIJAGRAM TOKA

Za svaki sat rada ima se sledeća funkcija cilja:

$$EOLDD_{i,j}[\$] = E_{1,i,j} * 0.15 + 120 * P_{loss,i,j} + C_{int,i,j} = FINALCOST_{i,j} \quad (3)$$

$E_{1,i,j}[\$]$  - cena kondenzatorskih baterija,

0.15 - godišnja stopa cene kondenzatorskih baterija,

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

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

$C_{int,i,j}[\$]$  - trošak na neisporučenu električnu energiju (6),

$j$  - oznaka koja se odnosi na tekući sat i

$i$  - oznaka koja se odnosi na redni broj scenarija.

Funkcija cilja za ceo posmatani period od 1008 sati data je izrazom:

$ENERGYSAVINGS_i[\$] =$

$$120 \cdot \max(P_{loss,initial,i,j}) + 0.03 \cdot \sum_{j=1}^{N^{hours}} P_{loss,initial,i,j} + \sum_{j=1}^{N^{hours}} C_{int,initial,i,j} -$$

$$+ [0.15 \cdot E_{1,i,j} + 120 \cdot \max(P_{loss,i,j}) + 0.03 \cdot \sum_{j=1}^{N^{hours}} P_{loss,i,j} + \sum_{j=1}^{N^{hours}} C_{int,i,j} + C_{com,i} + \text{cena punjenja/praznjenja BESS}] \quad (4)$$

U izrazu (4) je:

0.03 [\$/kWh] – cena gubitaka na isporučenu električnu energiju i

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

Ograničenja punjenja i pražnjenja baterija data su izrazima (5) i (6):

$$P_{ch\_min} \leq P_{ch}(k) \leq P_{ch\_max} \quad (5)$$

$$P_{dis\_min} \leq P_{dis}(k) \leq P_{dis\_max} \quad (6)$$

$P_{ch}(k)$  – aktivna snaga punjenja (W),  $P_{dis}(k)$  – aktivna snaga pražnjenja (W)

$P_{ch\_max}$ ,  $P_{ch\_min}$  – maksimum i minimum aktivne snage punjenja i

$P_{dis\_max}$ ,  $P_{dis\_min}$  – maksimum i minimum aktivne snage pražnjenja.

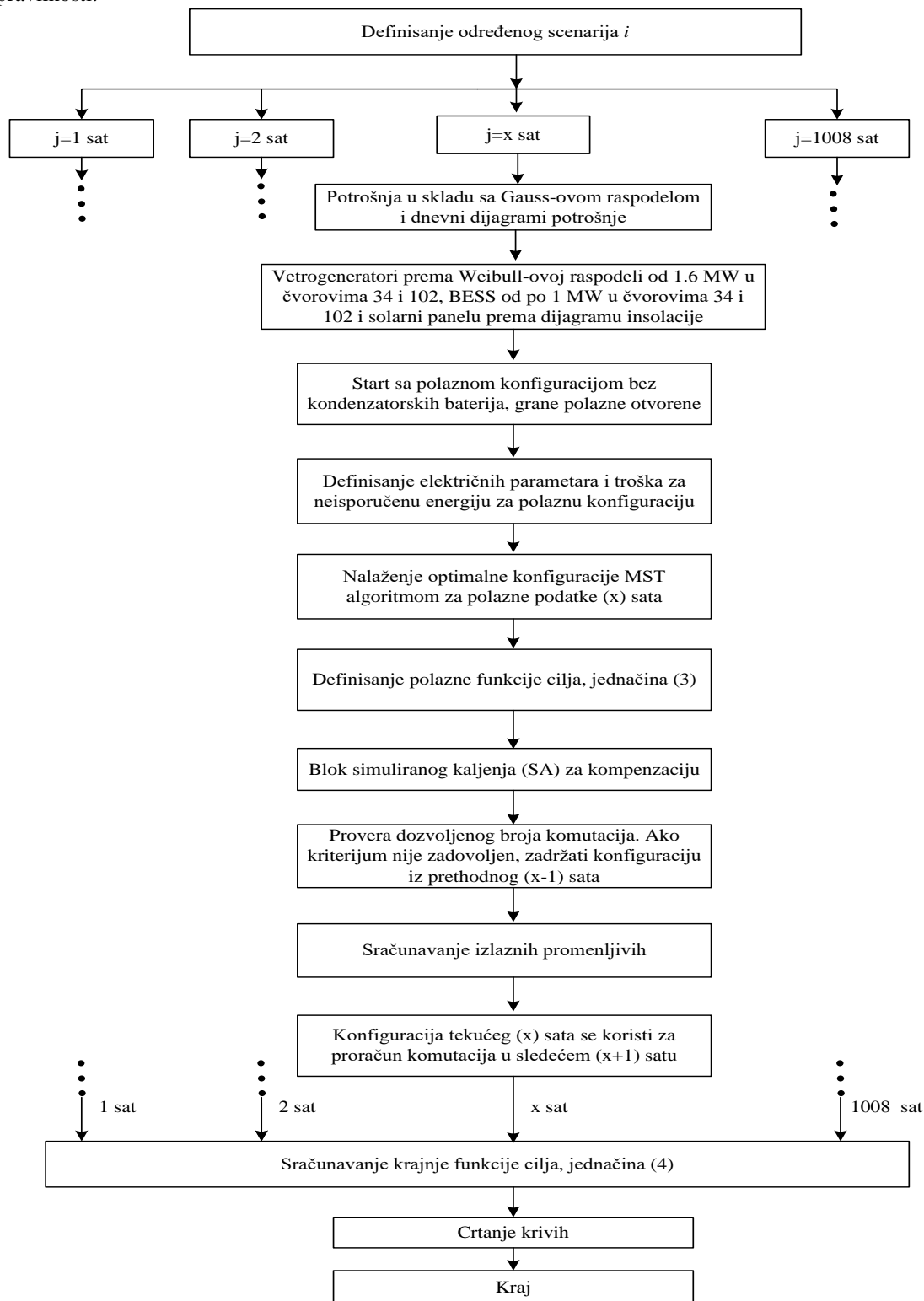
Za ostala ograničenja, operacione indekse i cene kondenzatorskih baterija pogledati rad (3). Maksimalni dozvoljeni broj komutacija po prekidačkom elementu grane za 24 sata, koji je usvojen iznosi 6.

Na **Slici 1** prikazan je dijagram toka, korak po korak od početka do kraja. Završni korak je izlazak iz programa. Nehomogeni algoritam simuliranog kaljenja se izvršava u svakom scenariju u svakom satu (ima 1008 sati). Svi gubici aktivne snage u algoritmima su računati efikasnim algoritmom tokova snaga u MATPOWER okruženju.

#### 6. Približavanje podobnom rešenju

Pre rekonfiguracije i kompenzacije, na početku vršenih proračuna, za 1008 sati rada mreže, čvorovima 14 i 34 su pridruženi vetrogeneratori od po 12 MW maksimalne snage pojedinačno i solarni paneli maksimalne snage od po 1 MW svaki i to u najopterećenijim čvorovima mreže, čvor 50 (0.91837 MW, 1.2015 MVar) i čvor 111 (0.91803 MW i 0.89855 MVar), što je bio početni kriterijum za izbor obnovljivih izvora. Čvoru 72, pridružena je jedna baterija za skladištenje električne energije sledećih nazivnih karakteristika (BESS-snaga 20 MW,

10 MW punjenje i 10 MW pražnjenje). Pretpostavljeno je da je položaj otepa teretnog regulatora (OLTC) 1.05 r.j. Samo su varirane kondenzatorske baterije posle rekonfiguracije mreže, koja je prvo vršena nezavisno od kompenzacije. Uočene su sledeće tehničke nepravilnosti: struje grana polazne i krajnje konfiguracije nisu zadovoljile, bile su prevelike, a takođe je uočena pojava prenapona i podnapona kod krajnje konfiguracije kao i reverzibilni tok snage. Zatim je snaga vetrogeneratora umanjena na 11 MW. BESS od 18 MW (9 MW punjenje, 9 MW pražnjenje) je postavljen u čvoru 28. Zadržana je teretna sklopka otepa 1.05 r.j. Struja mreže na početku proračuna je zadovoljila, a krajnja nije, bila je veća od dozvoljene. Opet su se pojavile već navedene tehničke nepravilnosti.



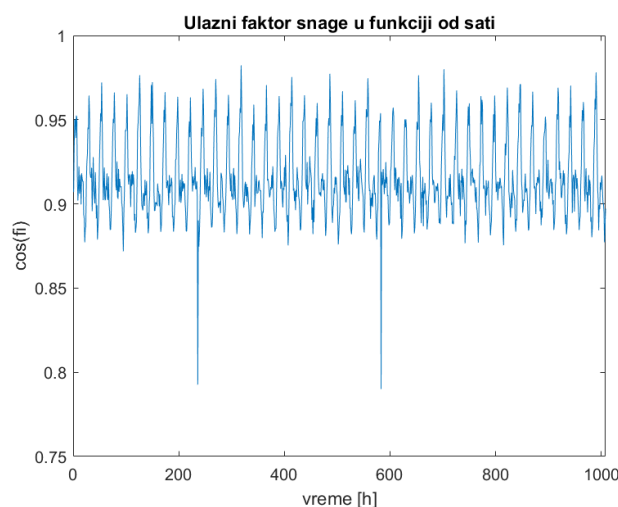
**Slika 1** – Dijagram toka algoritma kada su fiksirani čvorovi za postavljanje vetrogeneratora, BESS i solarnih panela određenih snaga

Iz napred izloženog, može se zaključiti da nepravilno postavljanje distribuiranih izvora i BESS, može dovesti do prevelikih struja, prenapona, podnapona i kontra toka snage. Logika za BESS da se puni, kada je ukupna potrošnja umanjena za ukupnu proizvodnju vetroagregata i solarnih panela manja od nule, u protivnom prazni se, pokazala se kao pogrešna (pitalica za uključenje BESS-ova u programu). Gornja logika je zamenjena sledećom. BESS su u istim čvorovima gde i vetrogeneratori, pune se kada je njihova proizvodnja veća od potrošnje u čvorovima a prazne kada im je snaga premala u odnosu na ovu potrošnju (nova pitalica za uključenje BESS-ova u programu). Novi izbor vetroagregata, vršen je tako, što je stavljen vetrogenerator u čvor 102, a zadržan proizvoljno postavljen vetrogenerator u čvoru 34. Snaga im je od maksimalno 1.6 MW pojedinačno. BESS su snage 1 MW (0.5 MW punjenje, 0.5 MW pražnjenje) pojedinačno, nalaze se u čvorovima 34 i 102. Usvojena je tolerancija za napone čvorova mreže (0.95 – 1.1 r.j.). Zato je postavljena teretna sklopka u napojnom čvoru otepa 1.05 r.j. Solarni paneli su zadržani po veličinama i mestima, kao u prethodnoj analizi. Tokom proračuna, koji je usledeo, samo su varirane kondenzatorske baterije posle rekonfiguracije mreže koja je prvo vršena nezavisno od kompenzacije. Sve je tehnički zadovoljilo, sem što ulazni faktor snage nije bio uvek veći od 0.85 kako je usvojeno.

Problem rešavan u (3) na početku proračuna dozvoljava uniformnu raspodelu vetrogeneratora po čvorovima mreže, unapred određene snage (1MW) kojih ima dva što čini 10% aktivne potrošnje mreže u nazivnom režimu (22.7097 MW). U ovde prezentovanom radu čvorovi i snage vetrogeneratora i BESS su unapred određeni a kondenzatorske baterije se dodeljuju čvorovima mreže u skladu sa funkcijom cilja koja je identična kao u (3) i prvo se vrši rekonfiguracija predmetne mreže Kruskalovim algoritmo takođe kao u radu (3). Ograničenja sem onih koja se odnose na punjenje i pražnjenje baterija, procedura, postupak generisanja varijanti i izbor najboljeg rešenja je isto kao u citiranom radu.

## 7. REZULTATI I DISKUSIJA

Za gore navedene ulazne podatke izvršen je proračun prvo za rekonfiguraciju a zatim kompenzaciju kada kondenzatorske baterije „šetaju“ po čvorovima mreže u skladu sa pojedinačnom funkcijom cilja (3). Trajanje programa na računaru PRIME LIDER BAYONET PC (AMD Ryzen5 2600 3.4 do 3.9 GHz; 2x32 GB RAM) je 10 sati i 30 minuta. Kada se fiksiraju čvorovi, najčešće posećeni i snage kondenzatorskih baterija proračun za svaki izgenerisani scenario traje 2 min zbog skalabilnosti Kruskalovog algoritma. Realni scenariji, dobijeni su sukcesivnim dodavanjem kondenzatorskih baterija u čvorove mreže. Prvo su postavljane baterije od 1200 kVAr-a, posle njih od 600 kVAr-a i na kraju od 300 kVAr-a. Sve dok je rasla ušteda, vršeno je dodavanje baterija da bi se sa tim prekinulo kada je ona počela da opada. Svaki od scenarija karakteriše fiksno postavljanje baterija kondenzatora odgovarajuće snage za ceo period rada mreže od 1008 sati, što je pregledno prikazano u **Tabeli 1 (PRILOG)**. Zvezdica u koloni koja se odnosi na ulazni faktor snage označava da je on u nekoliko iteracija pao ispod vrednosti 0.85. Može se zaključiti da rekonfiguracija i prisustvo BESS kod određenih scenarija kvare ulazni faktor snage. Najbolji je **Scenario 000095**. Kod njega nema BESS. Takođe sa BESS uslov da je ulazni faktor snage uvek veći od 0.85, pri prisutnoj kompenzaciji, nije stalno ispoštovan (za 1008 sati rada mreže, **Scenario 000084**, **Slika 2**). Gubici aktivne snage i minimalni naponi za isti scenario dati su na **Slikama 3 i 4**.

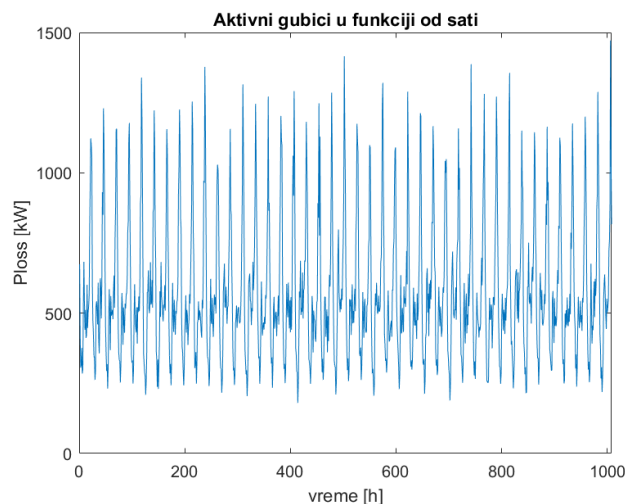


**Slika 2** - Faktor snage **Scenario 000084** za 1008 sati rada mreže (najbolji scenario sa BESS)

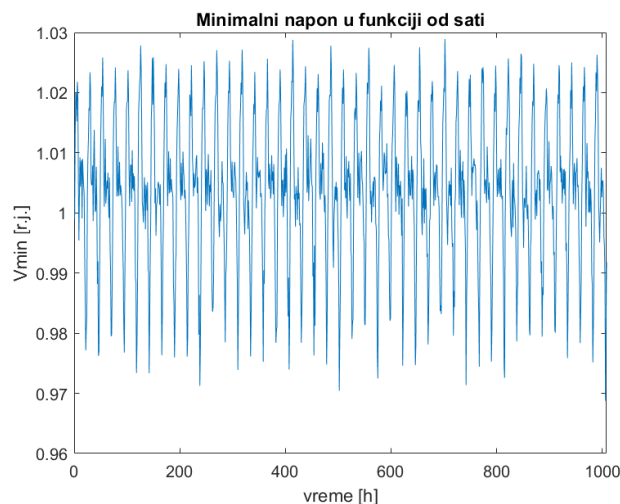
## 8. ZAKLJUČAK

Potrebno je izvršiti poređenje tri scenarija **000084** (najbolji sa BESS, **Slika 5**), **000095** (najbolji) i baznog **000098** u pogledu tehničkih parametara (**Tabela 1**). Očigledan je visok tehnički kvalitet izgenerisanih rešenja (scenarija sa BESS i bez BESS) kao i degradacija baznog polaznog scenarija. Treba uočiti da je najjeftiniji **Scenario 000095** koji nema BESS i on je jeftiniji od identičnog scenarija sa BESS za 18600\$. Takođe je značajno primetiti da je scenario sa BESS skuplji od analognog koji ga nema ali i bolji u pogledu veličine troškova (na gubitak električne energije, na neisporučenu električnu energiju i na gubitak vršne snage). Komponente funkcije cilja Energy (sabirak u srednjoj zagradi jednakosti (4)) za optimalan **Scenario 000095** su:

- 1) trošak na gubitak električne energije 17328\$,
- 2) trošak na neisporučenu električnu energiju 6486400\$,
- 3) trošak na gubitke vršne snage 176960\$,
- 4) trošak na komutacije 1459\$ (cena komutacije 1\$) i



**Slika 3** - Aktivni gubici **Scenario 000084** za 1008 sati rada mreže (najbolji scenario sa BESS)



**Slika 4** - Minimalni napon **Scenario 000084** za 1008 sati rada mreže (najbolji scenario sa BESS)

5) cena instalisanih kondenzatorskih baterija 5385\$.

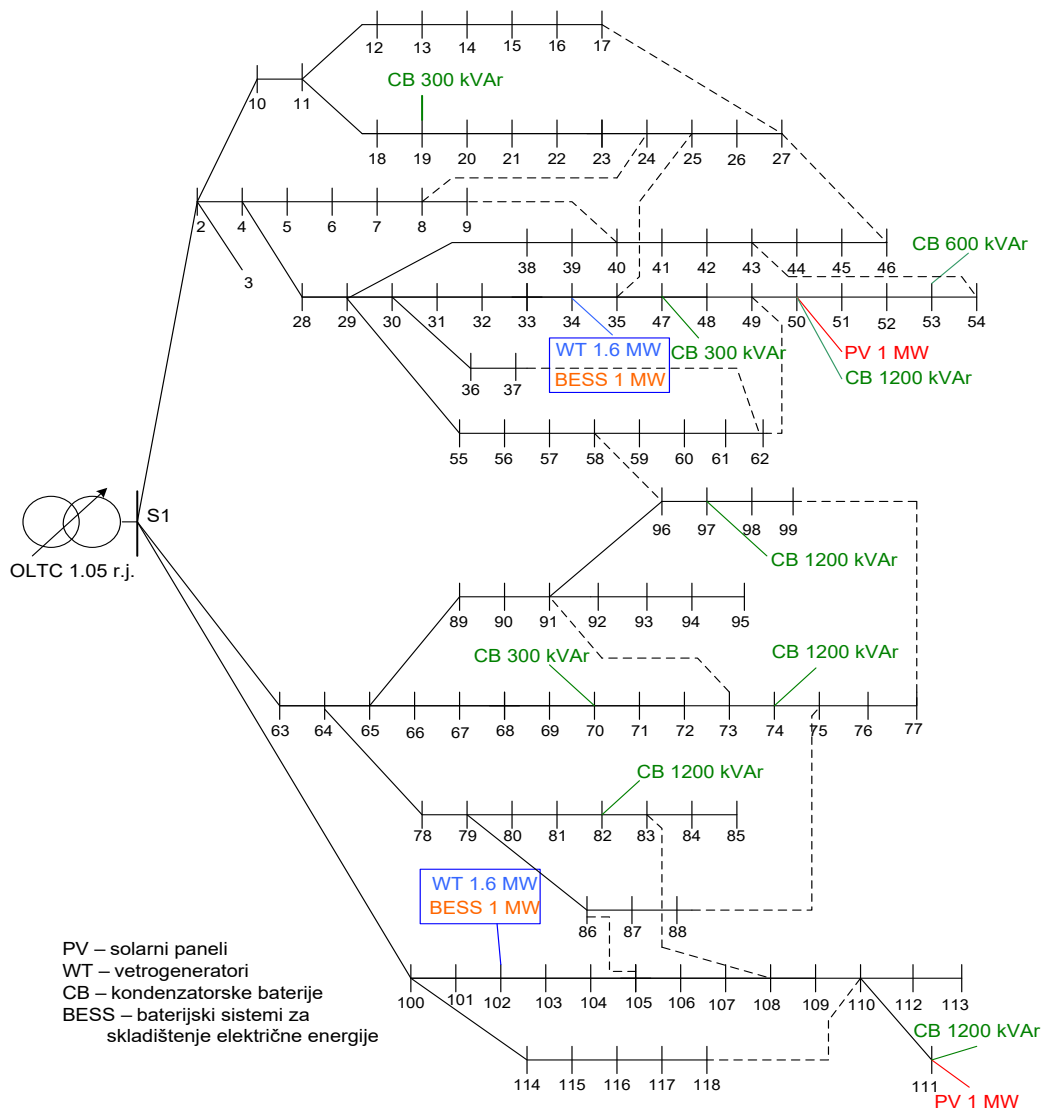
Komponente funkcije cilja Energy za sub-optimalan **Scenario 000084** (sa BESS) su:

- 1) trošak na gubitak električne enrgije 17316\$ (bolje nego bez BESS za 12\$),
- 2) trošak na neisporučenu električnu energiju 6476000\$ (bolje nego bez BESS za 10400\$),
- 3) trošak na gubitke vršne snage 176570\$ (bolje nego bez BESS za 390\$),
- 4) trošak na komutacije 1189\$ (cena komutacije 1\$) (bolje nego bez BESS za 270\$) i
- 5) cena instalisanih kondenzatorskih baterija 5385\$.

U analizu nije uključena vrednost teretne naponske sklopke jer se do ovog podatka nije moglo doći.

**Zaključak je da se za mrežu primer instalisanjem BESS za usvojene parametre (7):  
cena punjenja i pražnjenja za 1008 sati 35020\$,**

$C_{ch} - 20 \text{ \$/MWh}$  (cena punjenja),  
 $C_{dis} - 30 \text{ \$/MWh}$  (cena pražnjenja),  
 cena montaže i održavanja zanemarena,  
 dobija skuplji Scenario 000084 nego kada nema BESS Scenario 000095 koji je finansijski i sa aspekta ulaznog faktora snage optimalan, tako da za nju instaliranje baterija za skladištenje električne energije nije ekonomski opravdano. Komponente funkcije cilja za sub-optimalan Scenario 000084 (sa BESS) su bolje (manje po vrednosti) nego za optimalan Scenario 000095 tako da dodavanje baterija za skladištenje električne energije ima puni tehnički smisao što je naročito izraženo kod troška na neisporučenu električnu energiju.



Slika 5 - Scenario 000084

## LITERATURA

- [1] Zhang D, Fu Z and Zhang L, 2007, "An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems", "Electric Power Systems Research", "77", 685-694
- [2] Salehi J, Oskuee M R J and Amini A, 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", "13"; 15 pgs
- [3] Stojanović B, Rajić T, Šošić D, „Rekonfiguracija i otočna kompenzacija u prisustvu distribuiranih izvora u razgranatoj distributivnoj mreži“, „Energija, ekonomija, ekologija“, 2023, god. XXV, br.1
- [4] Stojanović B, Rajić T, 22-25 jun 2021, „Rekonfiguracija distributivne mreže i otočna kompenzacija uz prisustvo vetro generatora“, ENERGETIKA 2021 (U susret zelenom oporavku), Zlatibor, Srbija
- [5] Zimmerman R D, Murillo-Sanchez C E, 16 December 2016, "MATPOWER 6.0 User's Manual", 205 pgs



- [6] Nahman J, Perić D, May 2008, “Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique”, “IEEE Transactions on Power Systems”, “Vol. 23”, “No. 2”, pp. 790-795
- [7] Li Z, Wang S, Zhou Y, Liu W, Zheng X, 2020, “Optimal distribution systems operation in the presence of wind power by coordinating network reconfiguration and demand response”, “Electrical Power and Energy Systems” 119 105911, 10 pgs

## PRILOG

Tabela 1 – Rezultati za 1008 puta puštan program za različite scenarije

Scenario/ baterija kVAr/ (čvor bez nultog)/ BESS (da/ne)	Ulazno	Energy OLTC cena nije uključena	Energy Savings OLTC cena nije uključena	TVPI (operacioni indeks za napon)	TPLI (operacioni indeks za gubitke aktivne snage)	Komutacije	ΔIpolazno	ΔIkrajnje	Umax polazno	Umax krajnje	Umin krajnje	cosφ	pre
Redni broj	r.j.	\$	\$	r.j.	r.j.	\$	A	A	r.j.	r.j.	r.j.		
000084 1200 (110) 1200 (49) 1200 (96) 1200 (81) 1200 (73) 600 (52) 300 (69) 300 (46) 300 (18) da	1.05	6 706 100 6 764 361	1 168 185 1 109 924	█	█	1189 59 450	81.0613	88.3938	1.05	1.05	0.9688	<0.85 <sup>†</sup>	
000095 1200 (110) 1200 (49) 1200 (96) 1200 (81) 1200 (73) 600 (52) 300 (69) 300 (46) 300 (18) ne	1.05	6 687 500 6 758 991	1 186 785 1 115 294	█	█	1459 72 950	74.8565	82.1007	1.0519	1.05	0.9688	>0.85 <sup>†</sup>	
000098 ne	1.000	7 874 285	0	1	1	-	-17.6153	-17.6153	1	1	0.7813	<0.85	

Napomene: - boldovane vrednosti se odnose na cenu 50\$ po komutaciji,

- Energy je izraz u srednjoj zagradi jednakosti (4),

- žuto je zasenčen najbolji scenario (sa BESS) koji je usvojen za dalji tok proračuna,

- ljubičasto je zasenčen najbolji scenario za kompletan proračun,

- ljubičasto zasenčena 0 označava polazni, bazni scenario u odnosu na koji je vršeno poređenje svih ostalih scenarija,

- BESS (eng. *Battery electricity storage system*, električne baterije za skladištenje električne energije), cena punjenja i pražnjenja za 1008 sati 35020\$,  $C_{ch} - 20$  \$/MWh (cena punjenja),  $C_{dis} - 30$  \$/MWh (cena pražnjenja), cena montaže i održavanja zanemarena,

- cena OLTC nije uzeta u obzir.