

# Usporedba različitih algoritama za proračun tokova snaga

---

Mamić, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2024

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:027023>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-06-28**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**USPOREDBA RAZLIČITIH ALGORITAMA ZA  
PRORAČUN TOKOVA SNAGA**

**Diplomski rad**

**Karlo Mamić**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

Osijek, 05.05.2024.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Karlo Mamić
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	D-1413, 07.10.2021.
<b>OIB studenta:</b>	97278940161
<b>Mentor:</b>	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
<b>Sumentor:</b>	Marina Dubravac, mag. ing. el.
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	Ružica Kljajić, mag. ing. el.
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Usporedba različitih algoritama za proračun tokova snaga
<b>Znanstvena grana diplomskog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	U teorijskom djelu, objasniti najupotrebljavanije algoritme za proračun tokova snaga. Na primjeru nekoliko različitih konfiguracija elektroenergetskih mreža (sa manje i sa više čvorova) izvršiti proračun tokova snaga sa više algoritama te usporediti i komentirati rezultate. Sumentorica sa FERIT-a: Marina Dubravac
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	05.05.2024.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 27.05.2024.

**Ime i  
prezime  
studenta:**

Karlo Mamić

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br.  
studenta,  
godina  
upisa:**

D-1413, 07.10.2021.

**Turnitin  
podudaranje  
[%]:**

4

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Usporedba različitih algoritama za proračun tokova snaga**

izrađen pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete

i sumentora Marina Dubravac, mag. ing. el.

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak diplomskog rada .....</b>	<b>2</b>
<b>2. PREGLED PODRUČJA TEME.....</b>	<b>3</b>
<b>3. TOKOVI SNAGA .....</b>	<b>6</b>
<b>3.1. Matematička degradacija složenosti zapisa problema tokova snage od AC do DC tokova snage u prijenosnom sustavu .....</b>	<b>6</b>
3.1.1. Matematički zapis AC tokova snaga .....	6
3.1.2. Matematički raspis Newton-Raphson metode .....	8
3.1.3. Primjena Newton-Raphson metode za proračune tokova snaga .....	10
3.1.4. Primjena Newton-Raphson metode na primjeru sa 2 sabirnice .....	11
3.1.5. Gauss – Seidel metoda.....	14
3.1.6. Metoda razdvajanja tokova snaga.....	16
3.1.7. DC tokovi snage .....	17
<b>4. USPOREDBA RAZLIČITH METODA ZA PRORAČUN TOKOVA SNAGA .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1. Opis proračuna.....</b>	<b>18</b>
<b>4.2. Ulazni podatci potrebni za proračun .....</b>	<b>18</b>
<b>4.3. Proračun tokova snaga .....</b>	<b>19</b>
4.3.1. Gauss-Seidel metoda .....	20
4.3.2. Newton-Raphson metoda .....	24
4.3.3. Metoda brzog razdvajanja tokova snaga.....	27
4.3.4. DC metoda.....	29
<b>4.4. Usporedba rezultata dobivenih u proračunu .....</b>	<b>32</b>
<b>5. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>37</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>38</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>40</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>40</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>41</b>
<b>PRILOG 1: Rezultati simulacije u programu PowerWorld za Gauss-Seidel metodu.....</b>	<b>42</b>
<b>PRILOG 2: Rezultati simulacije u programu PowerWorld za Newton-Raphson metodu ..</b>	<b>63</b>

<b>PRILOG 3: Rezultati simulacije u programu PowerWorld za Fast-Decoupled metodu.....</b>	<b>71</b>
<b>PRILOG 4: Rezultati simulacije u programu PowerWorld za DC metodu.....</b>	<b>81</b>

## 1. UVOD

U ovom diplomskom radu obrađuje se tema tokova snaga u elektroenergetskim sustavima. Elektroenergetski sustavi moraju uspješno održavati rad u normalnim okolnostima, što zahtijeva pažljivu kontrolu brojnih komponenti sustava. Tokovi su snaga jedan od najvažnijih proračuna za razumijevanje i regulaciju elektroenergetskog sustava. Pod tipičnim stacionarnim uvjetima trofaznih tokova snage određuju veličine i kutove napona za svaku sabirnicu u elektroenergetskom sustavu. Osim gubitaka, oni također određuju djelatnu i jalovu snagu za svaku komponentu spojenu na sabirnice u mreži. Tokovi snage su potrebni za postizanje brojnih važnih ciljeva u elektroenergetskom sustavu, kao što je održavanje ravnoteže između proizvodnje i potražnje, održavanje napona sabirnice unutar prihvatljivih granica, sprječavanje preopterećenja vodova i transformatora. U radu će se ispitati matematički modeli i postupci za proračun tokova snaga u elektroenergetskim sustavima. Prvo će se razmotriti kako se komplicirane matematičke jednadžbe za tokove snage u sustavima izmjenične struje pojednostavljaju pri prelasku na tokove istosmjerne struje. Također će biti analizirane različite tehnike rješavanja problema tokova snage, kao što su metode Gauss-Seidel (G-S metoda) i Newton-Raphson (N-R metoda). Newton-Raphson metoda koristit će se za rješavanje problema tokova snage na primjeru elektroenergetskog sustava s dvije sabirnice. Pokazat će se kako iterativnim postupkom odrediti veličinu i kut napona na svakoj sabirnici, omogućujući analizu struje u vodovima i jalove snage sustava. Također, u radu će se također raspravljati o metodi brzog razdvajanja tokova snage, koja je korisna za aproksimaciju rješenja za probleme toka snage, posebno tamo gdje se jalova snaga može pojednostaviti. Za upravljanje stabilnim i učinkovitim elektroenergetskim sustavom, proučavanje tokova snage i njihovo poznavanje su ključni, a ovaj će rad ispitati nekoliko aspekata ovog ključnog područja elektroenergetike.

Ovaj rad ispituje različite metode za analizu tokova snaga kako bi se odredile prednosti i nedostaci pojedine metode. Naime, svi proračuni koji se izvode, izvode se na sustavu s 37 sabirnica. Proračuni se izvode iterativno pomoću Gauss-Seidel metode, Newton-Raphson metode, metode brzog razdvajanja tokova snaga te DC metode. Na temelju dobivenih rezultata, međusobno se uspoređuju metode, te pokazuju prednosti i nedostaci metode, odnosno određuje se koja je metoda najučinkovitija za zadani sustav.

Ovaj se diplomski rad sastoji od pet poglavlja. Uvod, koji je prvo poglavlje, daje kratak opis pojmova obrađenih u radu. Drugo poglavlje daje pregled do sad objavljenih radova iz područja tematike. U trećem poglavlju može se vidjeti teoretska osnova potrebna za ispravno ispitivanje

strujno-naponskih prilika u sustavu te rješavanje proračuna tokova snaga pomoću različitih metoda. Četvrto poglavlje objašnjava kako se praktično pristupilo takvim problemima te se bavi tim navedenim proračunima na sustavu s 37 sabirnica. U petom poglavlju donosi se zaključak na temelju podataka iz proračuna.

### **1.1. Zadatak diplomskog rada**

Pri analiziranju elektroenergetskog sustava, kako bi se uspješno riješili proračuni, promatraju se različite električne veličine kao što su snaga i napon na sabirnicama odnosno kako se oni mijenjaju prilikom svake nove iteracije, te je cilj ovog rada pružiti potrebnu teorijsku podlogu kako bi se razumjelo ponašanje sustava. Potrebno je razumjeti zašto se električne veličine ponašaju na način na koji se ponašaju zbog stabilnosti elektroenergetskog sustava.



## 2. PREGLED PODRUČJA TEME

U ovom su radu istražene različite metode za rješavanje tokova snage te je napravljena njihova međusobna usporedba kako bi se ustvrdilo koje su prednosti, a koje su negativne strane pojedine metode te pojasnilo kada se koristi koja metoda. Najčešće korištene analitičke metode za proračun tokova snage su Gauss-Seidel metoda i Newton-Raphson metoda, međutim postoje i druge analitičke metode te također postoje i metode računalne inteligencije. Navedene metode Gauss-Seidel i Newton-Raphson koriste se u prijenosnom sustavu. Također, postoje i metode za distribucijski sustav kao što su metoda tokova snaga s prelaskom unatrag/naprijed (*backward/forward sweep method*) te metoda izravnog toka snage (*direct load flow method*).

Autori se u literaturi [1] bave problemom konvergencije tokova snaga te su predstavili rješenje u obliku približnog toka snage (*approximate power flow*). S obzirom na sve veću kompleksnost sustava javlja se sve češći problem konvergencije Newton-Raphsonove metode te stoga autori predstavljaju metodu brzog razdvajanja (*fast decoupled method*) u kojoj su glavni faktori veza između iznosa djelatne snage te pripadajućeg faznog pomaka, te jalove snage i iznosa napona. Djelatna i jalova snaga automatski se prilagođavaju potrebnim mjerama kako bi poboljšali robusnost metode.

Autori su u literaturi [2] istražili utjecaj tokova snaga na planiranje, raspored i izmjenu snaga u mreži. Autori su objasnili kako se analiza tokova snaga rješava numeričkim analizama, koje su prekompleksne da bi se rješavale ručno, stoga cilj ovog rada je razviti software MATLAB program koji će učiniti analizu lakšom. Software pruža metode poput Newton-Raphson, Gauss-Seidel i metodu brzog razdvajanja (*fast decoupled method*) kako bi se rješio problem tokova snaga. Za rješavanje nelinearnih jednažbi Newton-Raphson metoda je iznimno važna jer konvergira brže za razliku od Gauss-Seidel metode. Također, Newton-Raphson je metoda vrlo praktična metoda za rješavanje tokova snaga na sustavima velikih snaga, međutim nedostatak metode je što zahtjeva veliku računalnu memoriju.

Autori u literaturi [3] prikazuju usporedbu Gauss-Seidel i Newton-Raphson metode za analizu tokova snage. Provode simulaciju u MATLAB programu na sustavu od 4 sabirnice. Zaključili su da Gauss-Seidel metoda prati linearnu konvergenciju, dok Newton-Raphson metoda prati kvadratnu konvergenciju. Na temelju dobivenih rezultata zaključili su da je na jednostavnijim sustavima bolje upotrijebiti Gauss-Seidel metodu iz razloga što Jakobijeva matrica čini Newton-Raphson metodu puno kompleksnijom.

U literaturi [4] predstavljaju usporedbu Gauss-Seidel i Newton-Raphson metode za tokove snaga. Efiksnost ove dvije metode je mjerena na 5 različitih IEEE sustava sabirnica (sustav 3, 5, 14, 30 i 57 sabirnica) koji se temelji na mnogobrojnim iteracijama, računalnom vremenu, toleranciji vrijednosti te konvergenciji. Također, simulacija je provedena u software programu MATLAB. Na temelju provedenih simulacija za 5 različitih slučajeva zaključak je da je Newton-Raphson metoda pouzdanija zato što ima manji broj iteracija te brže konvergira.

Autori su u literaturi [5] prezentirali ideju razvijanja alata za rješavanje problema tokova snaga koristeći MATLAB kako bi olakšali analizu tokova snaga. Kako bi riješili nelinearni problem, autori koriste tradicionalne pristupe poput lambda iteracije i gradijentne metode. Prednost prilikom proučavanja analize tokova snaga je planiranje budućih proširenja sustava kao i određivanje pogona trenutnog sustava. Autori koriste Newton-Raphson i Gauss-Seidel metodu kako bi riješili probleme tokova snage u ovom radu. Na temelju provedenog rada autori su zaključili da Gauss-Seidel metoda ima jednostavne proračune, međutim s povećanjem broja sabirnica znatno raste i broj iteracija. Također, autori su zaključili da Newton-Raphson metoda ima složenije proračune, međutim broj iteracija je nizak čak i kad ima puno sabirnica. Nadalje, u tablici 1.1, autori su usporedili te dvije metode te zaključili sljedeće:

**Tablica 2.1.** Usporedba Gauss-Seidel i Newton-Raphson metode [5]

G-S metoda	N-R method
1. Varijable su izražene u pravokutnim koordinatama.	1. Varijable su izražene u polarnim koordinatama.
2. Vrijeme izračuna po iteraciji je manje.	2. Vrijeme izračuna po iteraciji je veće.
3. Pokazuje karakteristike linearne konvergencije.	3. Pokazuje karakteristike kvadratne konvergencije.
4. S povećanjem sustava raste i broj iteracija potrebnih za konvergenciju.	4. Broj iteracija potrebnih za konvergenciju je neovisan o proširenju sustava.
5. Izbor referentne ( <i>slack</i> ) sabirnice je utječe na konvergenciju.	5. Izbor referentne ( <i>slack</i> ) sabirnice ne utječe na konvergenciju.

U literaturi [6] autori dodaju istosmjerni sustav na IEEE sustav s 33 radijalne sabirnice pomoću pretvarača naponskih izvora te je tako dobiven hibridni izmjenični-istosmjerni sustav. Autori su analizu tokova snage proveli u programu MATLAB, te su koristili Newton-Raphson i Gauss-Seidel metodu kako bi na kraju napravili njihovu međusobnu usporedbu na temelju broja iteracija,

ukupnim gubitcima na vodovima te djelatne i jalove generirane i potrošene snage prema različitim dozvoljenim vrijednostima. Na temelju provedene analize zaključili su da analiza provedena Newton-Raphson metodom ima manji broj iteracija te manje ukupne gubitke. Također, rezultati dobiveni u radu su dokazali da je primjena analize tokova snaga uspješna u hibridnom sustavu.

Za razliku od ostalih radova, autori su u literaturi [7] predstavili drugačije metode za analizu tokova snage koje se temelje na alternativnim smjerovima traženja. Ova metoda odgovara partikularnoj algebarskoj strukturi koja rezultira iz kombinacije globalnog linearnoga skupa jednadžbi i nelinearnih lokalnih relacija uzrokovanih opterećenjima i generatorima. Razlika, u odnosu na Newton-Raphson metodu, je što ovakav smjer analize tokova snage ne razvija Jakobijevu matricu. Ovakve metode mogu postići konvergenciju kod visokonaponskih problema. Također, prednost ove metode je što može dodavati druga nelinearna rješenja koja su specifična za analizu tokova snaga. U ovom radu, autori su predloženu metodu primijenili na 8500 sabirničku IEEE mrežu kako bi testirali učinkovitost ovih metoda te su zaključili da je ova metoda brža od tradicionalnih metoda.

Autori u literaturi [8] opisuju kako se popularnost vjetroelektrana na moru povećala iz razloga što je izvor vjetera na moru ima veću ravnomjernu brzinu te veliku dostupnost morskog područja. Većina vjetroelektrana na moru imaju sustav distribucije izmjeničnom strujom srednjeg napona. Autori su u ovom radu ispitali učinkovitost sustava distribucije istosmjernom strujom srednjeg napona te ju usporedili sa sustavom distribucije izmjenične struje srednjeg napona. Kako bi provjerili učinkovitost potrebno je raditi proračune tokova snaga. Međutim, konvecionalne metode poput Newton-Raphson metode i metode brzog razdvajanja tokova snaga nisu učinkovite za ovakve sustave zbog svoje slabe strukture mreže te velikog broja grana i čvorova. Stoga, autori su koristili metodu izravnog toka snage koristeći Kirchove zakone za napone i struje. Prednosti ove metode su te što se može koristiti bilo koji tip generatora te ne zahtjeva kompleksne inverzije i proračuna matrica, a vrlo je precizan.

### 3. TOKOVI SNAGA

Uspješne operacije elektroenergetskog sustava pod normalno uravnoteženim trofaznim stacionarnim uvjetima zahtijevaju sljedeće:

1. Proizvodnja opskrbljuje potražnju (opterećenja) plus gubitke.
2. Veličine napona sabirnice ostaju približno jednake nazivnim vrijednostima.
3. Generatori rade unutar ograničenja djelatne i jalove snage.
4. Prijenosni vodovi i transformatori ne smiju biti preopterećeni [9].

Tokovi snage su osnovni alat za istraživanje prethodnih zahtjeva. Tokovi snage određuju veličinu napona i kuta za svaku sabirnicu u elektroenergetskom sustavu pod uravnoteženim trofaznim stacionarnim uvjetima. Također, računa djelatnu i jalovu snagu za sve elemente povezane sa sabirnicama u mreži, kao i njihove gubitke. Konvencionalna analiza čvorova ili petlji nije primjerena za proučavanje tokova snaga zato što ulazni podatci za opterećenje su obično zadani kao snaga, a ne kao impedancija. Nadalje, generatori su smatrani kao izvori snage, a ne izvori napona i struje. Stoga je problem tokova snaga formuliran kao skup nelinearnih algebarskih jednadžbi pogodan za računalne operacije [9].

Kao što je u prethodnom ulomku navedeno, tokovi snaga su jako važni u pogonu elektroenergetskog sustava. Stoga, u sljedećem će se potpoglavlju obraditi matematička degradacija složenosti zapisa problema tokova snage od AC do DC tokova snage koji se koriste u prijenosnom sustavu.

#### 3.1. Matematička degradacija složenosti zapisa problema tokova snage od AC do DC tokova snage u prijenosnom sustavu

##### 3.1.1. Matematički zapis AC tokova snaga

Sljedeća jednadžba prikazuje kompleksan matematički zapis za AC tokove snaga koja se zapisuje u obliku prividne snage ( $S$ ).

$$\begin{aligned} S_i &= P_i + jQ_i = V_i \sum_{k=1}^n Y_{ik}^* V_k^* = V_i \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| e^{j\theta_{ik}} (G_{ik} - jB_{ik}) \\ &= \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| (\cos \theta_{ik} + j \sin \theta_{ik}) (G_{ik} - jB_{ik}) \end{aligned} \quad (3-1)$$

gdje je:

$S_i$  – iznos prividne snage na sabirnici  $i$

$P_i$  – iznos djelatne snage na sabirnici  $i$

$Q_i$  – iznos jalove snage na sabirnici  $i$

$V_i$  – iznos napona na sabirnici  $i$

$V_k$  – iznos napona na sabirnici  $k$

$Y_{ik}^*$  – iznos admitancije između sabirnica  $i, k$

$G_{ik}$  – iznos vodljivosti između sabirnica  $i, k$

$B_{ik}$  – iznos susceptancija između sabirnica  $i, k$

$\theta_{ik}$  – iznos kuta između vodljivosti i susceptancije između sabirnica  $i, k$

Nadalje, taj kompleksan matematički zapis za AC tokove snaga može se razdvojiti na njegov realan i imaginaran dio. Njegov realan dio predstavlja djelatnu snagu ( $P$ ), a imaginaran dio predstavlja jalovu snagu ( $Q$ ).

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i||V_k| (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) = P_{Gi} - P_{Di} \quad (3-2)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n |V_i||V_k| (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (3-3)$$

Nadalje, kod tokova snaga prepostavlja se da je poznata vrijednost prividne snage ( $S_i$ ) te je poznata sabirnica ( $Y_{ik}$ ) te se žele izračunati naponi ( $V_i$ ). Međutim, problem kod jednadžbe (3-2) je taj što nema rješenje zatvorenog oblika te je za takve jednadžbe potreban iterativan postupak. Postoje različite metode za postupak iteracije, a autori iz literature [9] su se odlučili raditi pomoću Gauss-Seidel te Newton-Raphson metode. Prednosti Gauss-Seidel metode su te što je svaka iteracija relativno brza, iz razloga što je vrijeme izračuna proporcionalno broju grana i broju sabirnica u sustavu, te je relativno lagana za programirati [9]. S druge strane, Gauss-Seidel metoda ima i neke negativne stvari kao što su relativno spora konvergencija, nepreciznost, ima tendenciju odstupanja u slučajevima s negativnim reaktancijama grana te potreba za programiranjem pomoću

kompleksnih brojeva [9]. Također, autori su koristili Newton-Raphson metodu koja će biti detaljno objašnjena u sljedećim potpoglavljima.

### 3.1.2. Matematički raspis Newton-Raphson metode

Ključna ideja za Newton-Raphson metodu je korištenje sekvencijalne linearizacije. U sljedećem potpoglavljju bit će prikazan matematički raspis Newton-Raphson metode.

Polazi se od općeg oblika problema pronaći  $x$  za koji vrijedi:

$$f(\hat{x}) = 0 \quad (3-4)$$

Skalarni zapis Newton-Raphson metode može se razlučiti u 5 koraka:

1. korak: za svaki  $\hat{x}$ ,  $x^{(v)}$  potrebno je definirati:

$$\Delta x^{(v)} = \hat{x} - x^{(v)} \quad (3-5)$$

2. korak: predstaviti  $f(\hat{x})$  Taylorovim nizom o  $f(x)$ :

$$f(\hat{x}) = f(x^{(v)}) + \frac{df(x^{(v)})}{dx} \Delta x^{(v)} + \frac{1}{2} \frac{d^2 f(x^{(v)})}{dx^2} (\Delta x^{(v)})^2 + \text{termini višeg reda} \quad (3-6)$$

3. korak: aproksimirati  $f(\hat{x})$  zanemarivanjem svih redova osim prva dva:

$$f(\hat{x}) = 0 \approx f(x^{(v)}) + \frac{df(x^{(v)})}{dx} \Delta x^{(v)} \quad (3-7)$$

4. korak: koristiti sljedeću linearnu aproksimaciju za rješavanje  $\Delta x^{(v)}$ :

$$\Delta x^{(v)} = - \left[ \frac{df(x^{(v)})}{dx} \right]^{-1} f(x^{(v)}) \quad (3-8)$$

5. korak: riješiti za novu procjenu  $\hat{x}$ :

$$x^{(v+1)} = x^{(v)} + \Delta x^{(v)} \quad (3-9)$$

Kada je blizu rješenja, pogreška se prilično brzo smanjuje zato što metoda ima kvadratnu konvergenciju. Također,  $f(x(v))$  je poznata kao neusklađenost, a cilj ju je dovesti do nule. Kriteriji zaustavljanja su kada je  $|f(x^{(v)})| < \varepsilon$ . Nadalje, rezultati ovise o početnoj pretpostavci. Područje privlačnosti rješenja skup je početnih pretpostavki koje konvergiraju određenom rješenju. Područje privlačnosti rješenja je često teško odrediti [9].

Nadalje, potrebno je generalizirati na slučaj gdje je  $x$  vektor  $n$ -dimenzije, a  $f(x)$  je funkcija  $n$ -dimenzije:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}; \quad f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

Kao i u prošlom slučaju, potrebno je definirati  $\hat{x}$  tako da je  $f(\hat{x}) = 0$  i da vrijedi  $\Delta x = \hat{x} - x$ .

Proširenje Taylorovog niza potrebno je napisati za svaki  $f_i(x)$ :

$$\begin{aligned} f_1(\hat{x}) &= f_1(x) + \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_n} \Delta x_n + \text{termini višeg reda} \\ f_2(\hat{x}) &= f_2(x) + \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_n} \Delta x_n + \text{termini višeg reda} \\ &\vdots \\ f_n(\hat{x}) &= f_n(x) + \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_n} \Delta x_n + \text{termini višeg reda} \end{aligned} \quad (3-11)$$

Prethodni izraz (3-11) se može napisati u obliku matrice te to izgleda na sljedeći način:

$$f(\hat{x}) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} + \text{termini višeg reda} \quad (3-12)$$

Nadalje, matrica s  $n$ -redaka i  $n$ -stupaca poznata je kao i Jakobijeva matrica ( $J(x)$ ):

$$J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

Derivacija multivarijabilne Newton-Raphson metode je slična kao skalarnom slučaju, te se provodi u sljedećih 5 koraka:

$$f(\hat{x}) = f(x) + J(x)\Delta x + \text{termini višeg reda} \quad (3-14)$$

$$f(x) = 0 \approx f(x) + J(x)\Delta x \quad (3-15)$$

$$\Delta x \approx -J(x)^{-1}f(x) \quad (3-16)$$

$$x^{(v+1)} = x^{(v)} + \Delta x^{(v)} \quad (3-17)$$

$$x^{(v+1)} = x^{(v)} - J(x^{(v)})^{-1}f(x^{(v)}) \quad (3-18)$$

Ovaj postupak treba ponavljati sve dok ne vrijedi:  $\|f(x^{(v)})\| < \varepsilon$

### 3.1.3. Primjena Newton-Raphson metode za proračune tokova snaga

Za primjenu Newton-Raphson metode u proračunima tokova snaga potrebno je raspisati prividnu snagu ( $S_i$ ) na djelatnu snagu ( $P_i$ ) i jalovu snagu ( $Q_i$ ) kako je prikazano na jednadžbama od (3-1) do (3-3). U proračunu tokova snaga koristi se Newton-Raphson metoda za određivanje veličine i kuta napona na svakoj sabirnici u elektroenergetskom sustavu. Za početak, potrebno je riješiti jednadžbe ravnoteža snaga (3-2) i (3-3). Nadalje, potrebno je pretpostaviti da je referentna sabirnica ujedno i prva sabirnica s točnom određenom veličinom i kutom napona. Zatim, potrebno je odrediti veličine i kutova napona na preostalim sabirnicama.



$$x = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \\ |V_2| \\ \vdots \\ |V_n| \end{bmatrix}; \quad f(x) = \begin{bmatrix} P_2(x) - P_{G2} + P_{D2} \\ \vdots \\ P_n(x) - P_{Gn} + P_{Dn} \\ Q_2(x) - Q_{G2} + Q_{D2} \\ \vdots \\ Q_n(x) - Q_{n2} + Q_{n2} \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

Procedura rješavanja tokova snaga je ista kao i za skalarni i multivarijabilni raspis, stoga je potrebno postaviti vrijednost  $v = 0$ ; te odrediti početne  $x, x^{(v)}$ . Sve dok vrijedi  $\|f(x^{(v)})\| < \varepsilon$  potrebno je raditi (3-18) te (3-17). Najteži dio metode je određivanje i invertiranje Jakobijeve matrice s n-brojem redaka i n-brojem stupaca. Jakobijevi elementi izračunavaju se diferenciranjem svake funkcije  $f_i(x)$  s obzirom na svaku varijablu. Na sljedećem primjeru, bit će prikazano jednadžba snage funkcije  $i$  ( $f_i(x)$ ) za sabirnicu  $i$ .

$$f_i(x) = \sum_{k=1}^n |V_i||V_k| (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) - P_{Gi} + P_{Di} \quad (3-20)$$

$$\frac{\partial f_i(x)}{\partial \theta_i} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |V_i||V_k| (-G_{ik} \sin \theta_{ik} + B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (3-21)$$

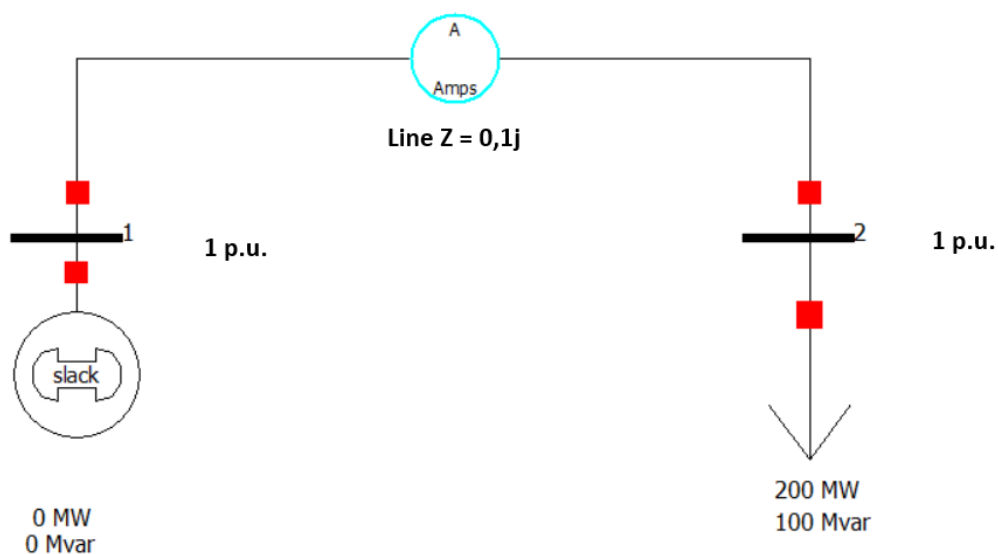
$$\frac{\partial f_i(x)}{\partial \theta_j} = |V_i||V_j| (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}); \quad (j \neq i) \quad (3-22)$$

Budući da je veličina napona na PV sabirnicama fiksna, nema potrebe uključiti ove napone u  $x$  ili napisati jednadžbe bilance jalove snage. Izlazna jalova snaga generatora varira kako bi se održao fiksni napon na terminalu unutar ograničenja. Izborno, ove jednadžbe mogu se uključiti samo pisanjem ograničenja napona za sabirnicu generatora.

$$|V_i| - V_{i \text{ setpoint}} = 0 \quad (3-23)$$

#### 3.1.4. Primjena Newton-Raphson metode na primjeru sa 2 sabirnice

Na sljedećem primjeru, koji je preuzet iz literature [9], za sustav napajanja s dvije sabirnice koji je prikazan na slici ispod, koristi se Newton-Raphsonov metoda za proračun tokova snage kako bi se odredile veličine napona i kuta na sabirnici dva. Pretpostavlja se da je prva sabirnica referentna te da joj je prividna snaga ( $S_{\text{base}}$ ) koja je ujedno i bazna snaga jednaka 100MVA.



Sl. 3.1. Izvedba sustava napajanja s dvije sabirnice. [9]

$$x = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ V_2 \end{bmatrix}; Y_{bus} = \begin{bmatrix} -j10 & j10 \\ j10 & -j10 \end{bmatrix}$$

Za rješavanje ovog primjera potrebne su opće jednadžbe snage za ravnotežu (3-2) i (3-3):

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i||V_k| (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) = P_{Gi} - P_{Di}$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n |V_i||V_k| (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) = Q_{Gi} - Q_{Di}$$

Odnosno, za sabirnicu 2 vrijedi sljedeće:

$$|V_2||V_1|(10 \sin \theta_2) + 2,0 = 0 \quad (3-24)$$

$$|V_2||V_1|(-10 \cos \theta_2) + |V_2|^2(10) + 1,0 = 0 \quad (3-25)$$

Zatim, potrebno je primijeniti tehničke podatke sabirnice 1 kako bi se dobili tehnički podatci za sabirnicu 2:

$$P_2(x) = |V_2|(10 \sin \theta_2) + 2,0 = 0 \quad (3-26)$$

$$Q_2(x) = |V_2|(-10 \cos \theta_2) + |V_2|^2(10) + 1,0 = 0 \quad (3-27)$$

Nadalje, potrebno je odrediti Jakobijevu matricu:

$$J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2(x)}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2(x)}{\partial |V_2|} \\ \frac{\partial Q_2(x)}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_2(x)}{\partial |V_2|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10|V_2| \cos \theta_2 & 10 \sin \theta_2 \\ 10|V_2| \sin \theta_2 & -10 \cos \theta_2 + 20|V_2| \end{bmatrix} \quad (3-28)$$

Nakon toga, potrebno je odrediti prvu iteraciju:

$$v = 0; \quad x^{(0)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-29)$$

$$f(x^{(0)}) = \begin{bmatrix} |V_2|(10 \sin \theta_2) + 2,0 \\ |V_2|(-10 \cos \theta_2) + |V_2|^2(10) + 1,0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,0 \\ 1,0 \end{bmatrix} \quad (3-30)$$

$$J(x^{(0)}) = \begin{bmatrix} 10|V_2| \cos \theta_2 & 10 \sin \theta_2 \\ 10|V_2| \sin \theta_2 & -10 \cos \theta_2 + 20|V_2| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix} \quad (3-31)$$

$$x^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 2,0 \\ 1,0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,2 \\ 0,9 \end{bmatrix} \quad (3-32)$$

Na isti način se određuju i sljedeće iteracije sve dok ne nastupi konvergencija:

$$f(x^{(1)}) = \begin{bmatrix} 0,9(10 \sin(-0,2)) + 2,0 \\ 0,9(-10 \cos(-0,2)) + 0,9^2 * (10) + 1,0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,212 \\ 0,279 \end{bmatrix} \quad (3-33)$$

$$J(x^{(1)}) = \begin{bmatrix} 8,82 & -1,986 \\ -1,788 & 8,199 \end{bmatrix} \quad (3-34)$$

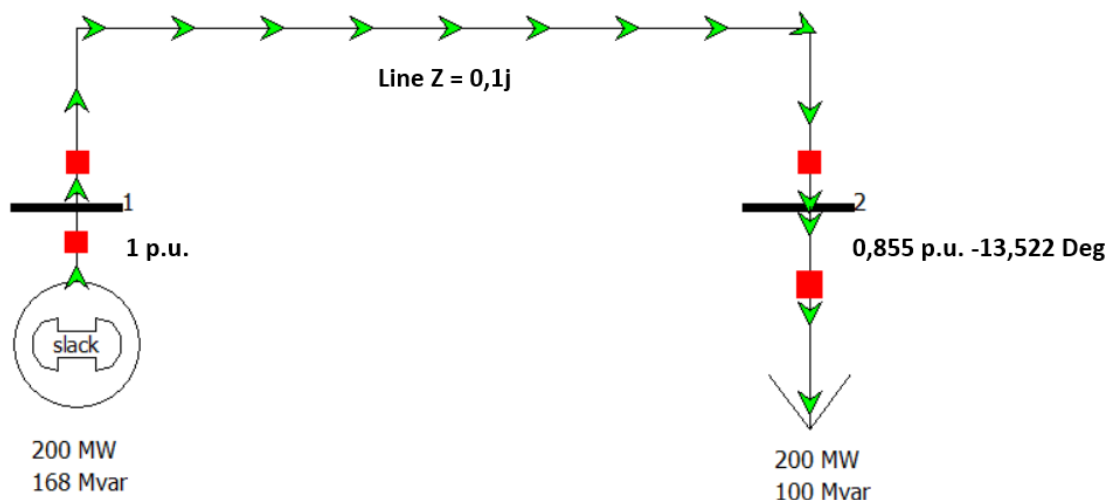
$$x^{(2)} = \begin{bmatrix} -0,2 \\ 0,9 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 8,82 & -1,986 \\ -1,788 & 8,199 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0,212 \\ 0,279 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,233 \\ 0,8586 \end{bmatrix} \quad (3-35)$$

$$f(x^{(1)}) = \begin{bmatrix} 0,9(10 \sin(-0,2)) + 2,0 \\ 0,9(-10 \cos(-0,2)) + 0,9^2 * (10) + 1,0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,212 \\ 0,279 \end{bmatrix} \quad (3-36)$$

$$f(x^{(2)}) = \begin{bmatrix} 0,0145 \\ 0,0190 \end{bmatrix}; \quad x^{(2)} = \begin{bmatrix} -0,236 \\ 0,8554 \end{bmatrix} \quad (3-37)$$

$$f(x^{(3)}) = \begin{bmatrix} 0,0000906 \\ 0,0001175 \end{bmatrix}; \quad V_2 = 0,8554 \angle -13,52^\circ \quad (3-38)$$

Nakon što su poznati kut napona i veličina na sabirnici 2, mogu se izračunati sve ostale vrijednosti sustava, kao što su tokovi kroz vod i izlazna jalova snaga generatora.



Sl. 3.2. Rješenje sustava napajanja s dvije sabirnice. [9]

Autori u literaturi [9] su zaključili da Newton-Raphson metoda ima prednosti poput: brza konvergencija sve dok je početna pretpostavka blizu rješenja te veliko područje konvergencije. Također, postoje i negativne strane poput: svaka iteracija traje mnogo dulje od Gauss-Seidelove iteracije, te je kompliciraniji za kodiranje, osobito pri implementaciji rijetke matrice.

### 3.1.5. Gauss – Seidel metoda

U proračunu tokova snaga pretpostavlja se da su poznate ulazne veličine prividne snage na sabirnici  $i$  ( $S_i$ ) te admitancija na sabirnici  $i$  ( $Y_{bus}$ ). Međutim, problem nastaje na jednadžbi (3-39) jer ta jednadžba nema rješenje zatvorenog oblika, stoga mu je potrebno pristupiti iterativno.

$$S_i = V_i I_i^* = V_i \left( \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \right)^* = V_i \sum_{k=1}^n Y_{ik}^* V_k^* \quad (3-39)$$

Kako bi se proračun rješio pomoću Gauss-Seidel metode potrebno je pisati jednadžbe u implicitnom obliku (3-40). Za daljnu potrebu proračuna, potrebno je pretpostaviti prvo rješenje te zatim iterativno riješiti (3-41) sve dok se ne dođe do fiksnog rješenja za koje vrijedi (3-42).

$$x = h(x) \quad (3-40)$$

$$x^{(v+1)} = h(x^{(v)}) \quad (3-41)$$

$$x^{(v+n)} = h(x^{(v+n)}) \quad (3-42)$$

Ključan problem za rješavanje ove metode je znati prestati iterativno rješavati. Iteracija prestaje kada je ispunjen uvjet:

$$|\Delta x^{(v)}| = \varepsilon ; \Delta x^{(v)} = x^{(v+1)} - x^v \quad (3-43)$$

Ako je rješenje uvjeta skalarno onda jednostavno se završava iterativno računanje, međutim ako je rješenje uvjeta u vektorskom obliku tada je potrebno generalizirati koristeći sljedeću formu:

$$\|\Delta x^{(v)}\|_j < \varepsilon \quad (3-44)$$

Kako bi se rješio proračun pomoću Gauss-Seidel metode potrebno je postaviti sljedeće jednačbe:

$$S_i = V_i I_i^* = V_i \left( \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \right)^* = V_i \sum_{k=1}^n Y_{ik}^* V_k^* \quad (3-45)$$

$$S_i^* = V_i^* I_i = V_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \quad (3-46)$$

$$\frac{S_i^*}{V_i^*} = \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k = Y_{ii} V_i + \sum_{k=1, k \neq n}^n Y_{ik} V_k \quad (3-47)$$

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left( \frac{S_i^*}{V_i^*} - \sum_{k=1, k \neq n}^n Y_{ik} V_k \right) \quad (3-48)$$

S više sustava sabirnica moguće je izračunati nove iznose napona na sabirnici i prema sljedećoj jednačbi:

$$V_i^{(v+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left( \frac{S_i^*}{V_i^{(v)*}} - \sum_{k=1, k \neq n}^n Y_{ik} V_k^{(v)} \right) = h_i(V_1^{(v)}, V_2^{(v)}, \dots, V_n^{(v)}) \quad (3-49)$$

Ovim se putem dobije bolja procjena iznosa napona ( $V_i^{(v+1)}$ ) te se ova vrijednost koristi kao nova vrijednost te se nastavlja dalje istim iterativnim putem dok se ne dobije krajnje rješenje.

### 3.1.6. Metoda razdvajanja tokova snaga

U ovom pristupu, aproksimacije se koriste za razdvajanje jednadžbi djelatne i jalove snage. Generalni oblik ove metode izgleda sljedeće:

$$-\begin{bmatrix} \frac{\partial P^{(v)}}{\partial \Theta} & \frac{\partial P^{(v)}}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q^{(v)}}{\partial \Theta} & \frac{\partial Q^{(v)}}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \Theta^{(v)} \\ \Delta |V|^{(v)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P(x^{(v)}) \\ \Delta Q(x^{(v)}) \end{bmatrix} = f(x^{(v)}) \quad (3-50)$$

Gdje vrijedi da je:

$$\Delta P(x^{(v)}) = \begin{bmatrix} P_2(x^{(v)}) + P_{D2} - P_{G2} \\ \vdots \\ P_n(x^{(v)}) + P_{Dn} - P_{Gn} \end{bmatrix} \quad (3-51)$$

Stoga, počinje se od sljedeće pretpostavke:

- 1) Obično elementi koji nisu dio glavne dijagonale približno jednaki nuli iz razloga što je reaktancija ( $x$ ) puno veća od otpora ( $r$ ). Također, kut  $\Theta_{ij}$  je približan nuli te vrijedi:  $\sin \Theta_{ij} \approx 0$ . Stoga je njih potrebno aproksimirati da teže k nuli, stoga jednadžba (3-50) poprima sljedeći oblik:

$$-\begin{bmatrix} \frac{\partial P^{(v)}}{\partial \Theta} & 0 \\ 0 & \frac{\partial Q^{(v)}}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \Theta^{(v)} \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P(x^{(v)}) \\ \Delta Q(x^{(v)}) \end{bmatrix} = f(x^{(v)}) \quad (3-52)$$

- 2) Tada, metoda se razdvaja na 2 snage: djelatnu snagu i jalovu[MVAR] snagu što je prikazano na sljedećim jednadžbama:

$$\Delta \Theta^{(v)} = - \left[ \frac{\partial P^{(v)}}{\partial \Theta} \right]^{-1} \Delta P(x^{(v)}) \quad (3-53)$$

$$\Delta |V|^{(v)} = - \left[ \frac{\partial Q^{(v)}}{\partial |V|} \right]^{-1} \Delta Q(x^{(v)}) \quad (3-54)$$

- 3) Nastavljajući s Jakobijevim aproksimacijama, može se dobiti razumna aproksimacija koja je neovisna o veličinama/kutovima napona, a to znači da se Jakobijeva matrica treba napraviti samo jednom. Ovaj pristup je poznat kao brzi razdvojeni tok snage (*Fast Decoupled Power Flow*). Brzi razdvojeni tok snage koristi iste jednadžbe neusklađenosti kao standardni tokovi snage te bi stoga trebao imati identično rješenje. Primjena brzog razdvojenog toka snage je široka, osobito kada je potrebno samo približno rješenje [12].

Metoda brzog razdvojenog toka snage koristi sljedeće aproksimacije:

- 1) Elementi koji nisu dio glavne dijagonale su jednaki nuli.

$$|G_{ij}| = 0 \quad (3-55)$$

- 2) Naponi na sabirnici  $i$  su jednaki 1 p.u.

$$|V_i| = 1 \quad (3-56)$$

- 3) Sinus kuta između sabirnica je jednak nuli, dok je kosinus kuta između sabirnica jednak jedan.

$$\sin \theta_{ij} \approx 0; \cos \theta_{ij} \approx 1 \quad (3-57)$$

Stoga vrijedi:

$$\partial \theta^{(v)} = B^{-1} \frac{\Delta P(x^{(v)})}{V^{(v)}} \quad (3-58)$$

$$\Delta |V|^{(v)} = B^{-1} \frac{\Delta Q(x^{(v)})}{V^{(v)}} \quad (3-59)$$

Gdje je susceptancija ( $B$ ) imaginarni dio sabirnice  $Y_{bus} = G + jB$  osim za referentni čvor gdje su stupac odnosno red izostavljeni.

### 3.1.7. DC tokovi snage

DC tokovi snaga daje najkritičnije aproksimacije odnosno pretpostavlja se:

- 1) potpuno zanemarivanje jalove snage,
- 2) da su svi naponi uvijek 1,0 p.u. te fazni kut napona jednak nuli
- 3) zanemarivanje vodljivosti voda.

To čini tokove snage linearnim skupom jednadžbi koje se mogu izravno riješiti:

$$\Theta = B^{-1}P$$

(3-60)

## **4. USPOREDBA RAZLIČITH METODA ZA PRORAČUN TOKOVA SNAGA**

### **4.1. Opis proračuna**

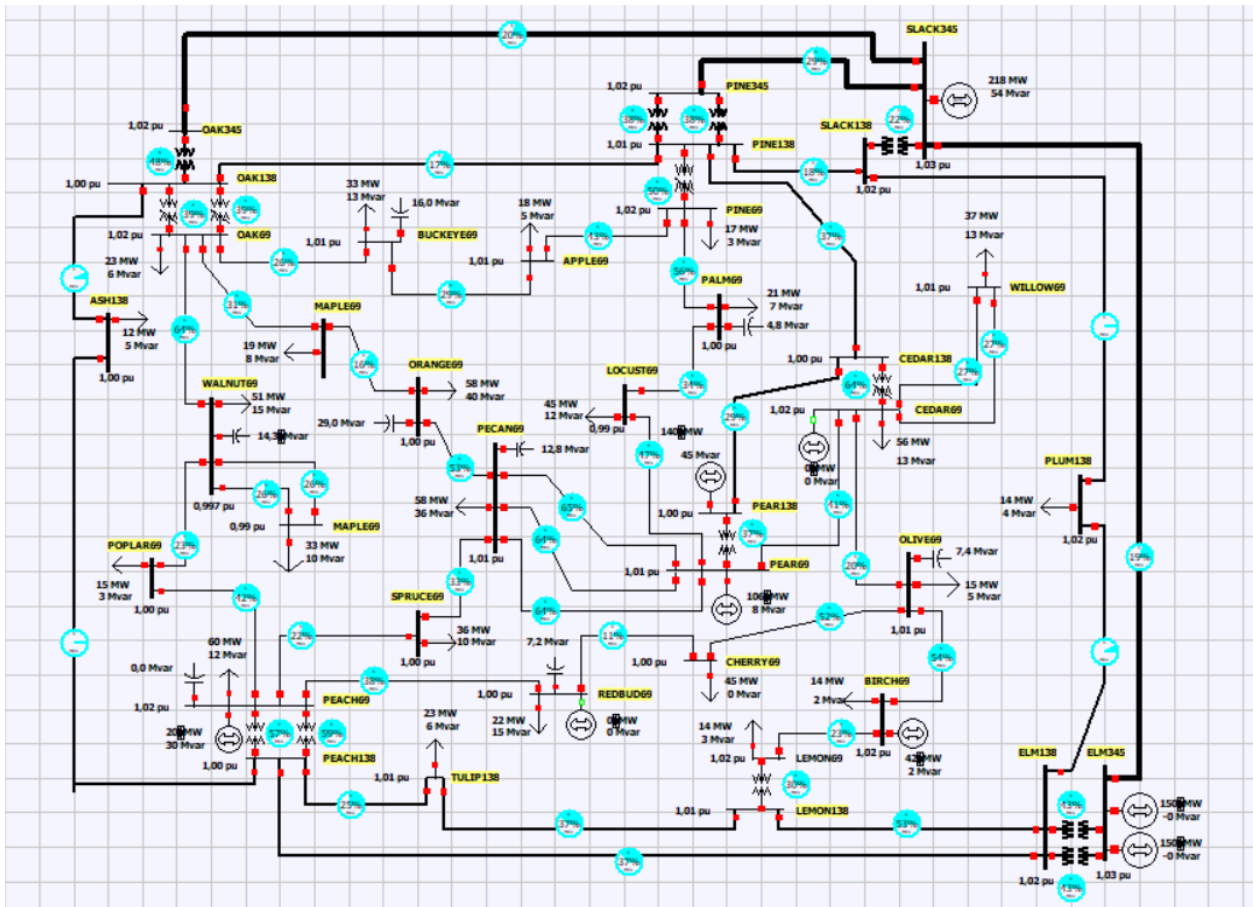
Proračun tokova snaga, glavni je element studija elektroenergetskog sustava jer se pomoću proračuna tokova snaga određuju stacionarni radni uvjeti elektroenergetskog sustava zbog čega je moguće pratiti veličine napona, faznih kutova, tokove djelatne i jalove snage, ali i ukupnu stabilnost mreže. Proračun tokova snaga, na temelju ovih parametara, omogućuje prepoznavanje potencijalnih problema poput nestabilnosti napona, preopterećenja vodova kao i nedostaci jalove snage. Štoviše, podržava procese donošenja odluka za planiranje sustava, proširenje i održavanje, što rezultira pouzdanim i učinkovitim radom elektroenergetskih sustava.

### **4.2. Ulazni podatci potrebni za proračun**

Proračun tokova snaga orijentira se na računalne metode za rješavanje nelinearnih algebarskih jednadžbi. Postoje različite metode za rješavanje problema koje postavljaju mnoge topologije te uvjeti elektroenergetskog sustava. U daljnjem radu, bit će prikazane metode poput Gauss-Seidel metode, Newton-Raphson metode, metode brzog razdvajanja tokova snage te DC metode. Svaka metoda prikazuje jedinstvene karakteristike u smislu brzine konvergencije te računalne učinkovitosti, stoga je cilj ovog rada ispitati svaku metodu te usporediti metode te zaključiti koliko brzo pojedina metoda konvergira. Proračun tokova snaga vršiti će se na mreži preuzetoj iz literature [9]. Ovaj rad koristi energetska sustav od 37 sabirnica. Ova mreža obuhvaća 9 generatora,



57 dalekovoda, 26 opterećenja te više međusobno povezanih sabirnica, što nudi složen, ali upravljiv sustav za analizu, što je vidljivo na slici 4.1.



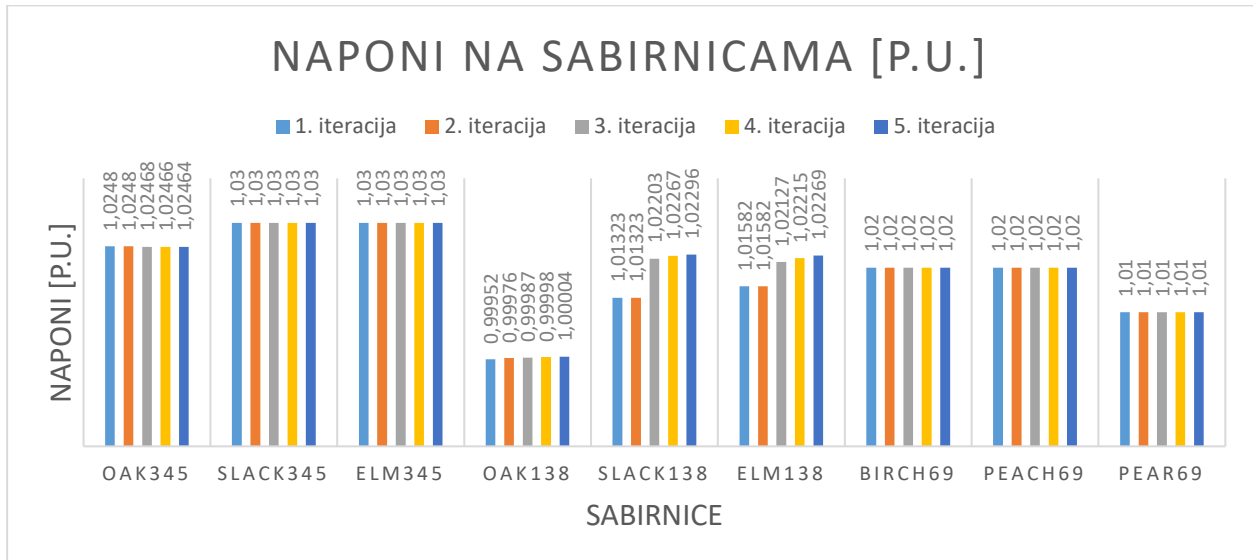
Sl. 4.1. Primjer mreže s 37 sabirnica. [9]

### 4.3. Proračun tokova snaga

Ovaj dio rada sadržava proračun tokova snaga preko Gauss-Seidel metode, Newton-Raphson metode, metode razdvajanja tokova snaga i DC metode koji se provodi u programu PowerWorld. Rezultati koji će biti prikazani nakon odrađene simulacije su veličine iznosa i kuteva napona na sabirnicama, te neusklađenost na sabirnicama. Razlika u snazi između iteracija na sabirnicama se računa kao razlika između prethodne iteracije snage i sljedeće iteracije snage na sabirnici te se mjeri u megavoltamperima. Također, rezultati koji će još biti prikazani su djelatna i jalova snaga na generatoru. Prije početka izvođenja svake iteracije potrebno je postaviti početne uvjete na fiksni početak (*flat start*) te također sabirnica koja će biti referentna u svim proračunima je sabirnica SLACK345. Svrha ovih usporedbi je provjeriti prednosti i nedostatke pojedine metode na primjeru stvarne mreže.

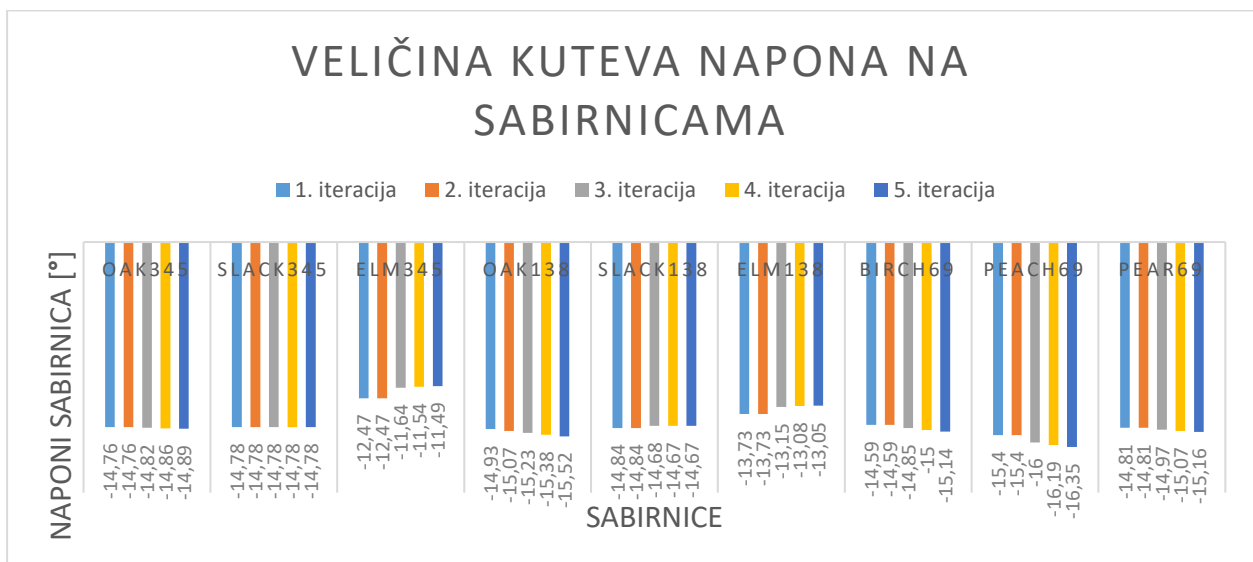
### 4.3.1. Gauss-Seidel metoda

U sljedećem dijelu rada, bit će predstavljena Gauss-Seidel metoda. Naime, vršiti će se proračun za svaku iteraciju, te odrediti nakon koliko iteracija nastupa konvergencija. Na slici 4.2. prikazani su naponi sabirnica u jediničnoj mjeri (*per unit*) nakon prvih pet iteracija.



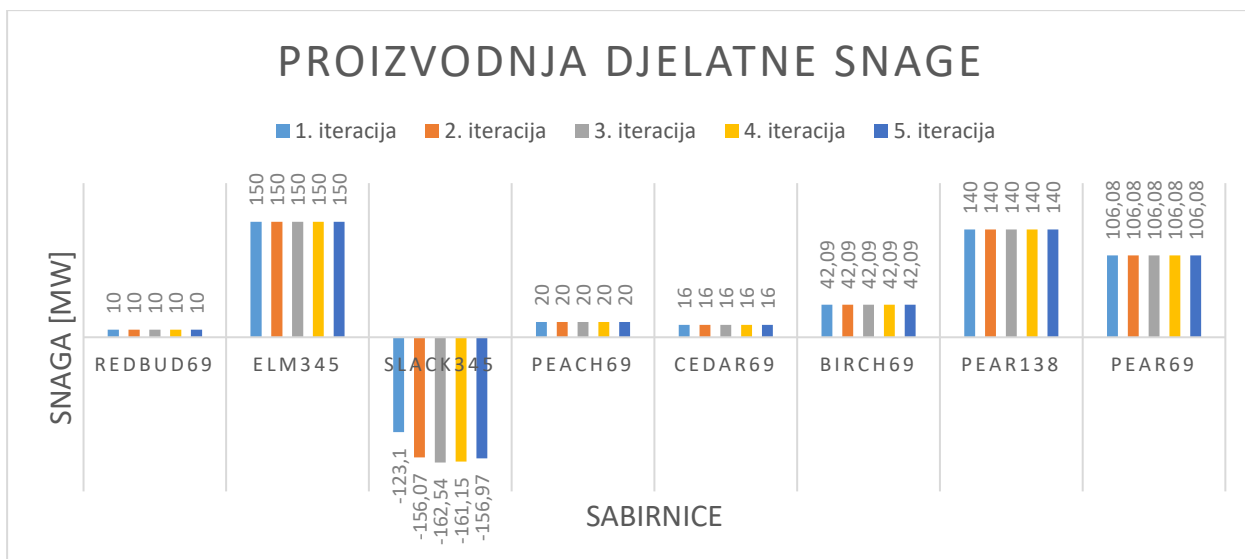
Sl. 4.2. Vrijednosti napona na sabirnicama nakon prvih pet iteracije.

Na slici 4.3. prikazane su veličine kuteva napona sabirnica nakon prvih pet iteracija.



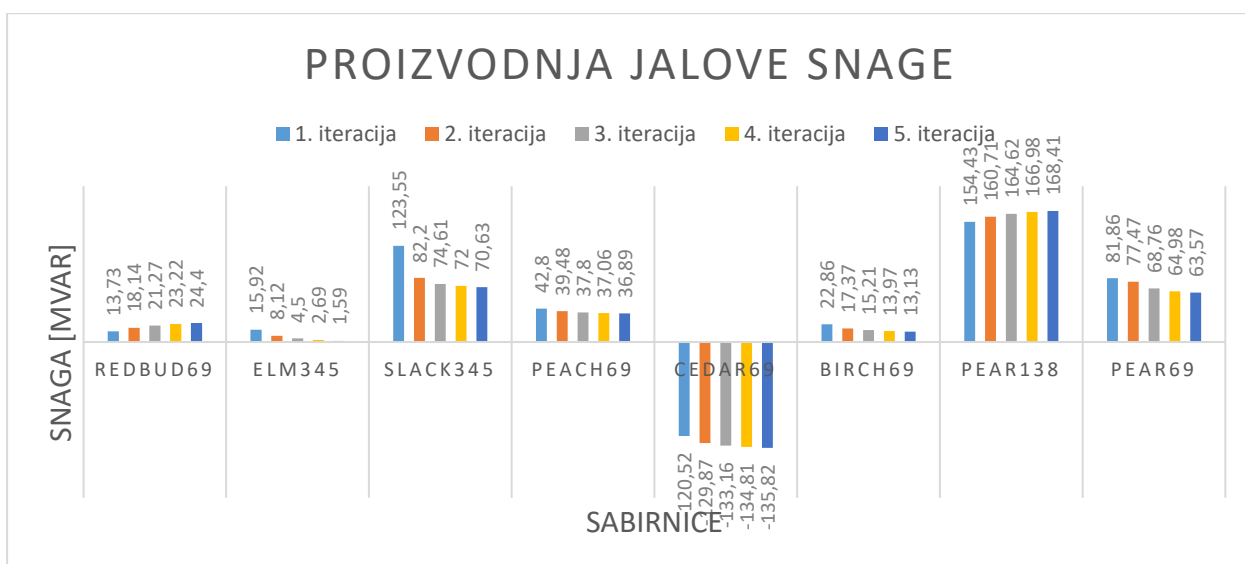
Sl. 4.3. Vrijednosti kuteva napona na sabirnicama nakon prvih pet iteracija.

Na slici 4.4. prikazana je proizvodnja djelante snage na generatorima nakon prvih 5 iteracija.



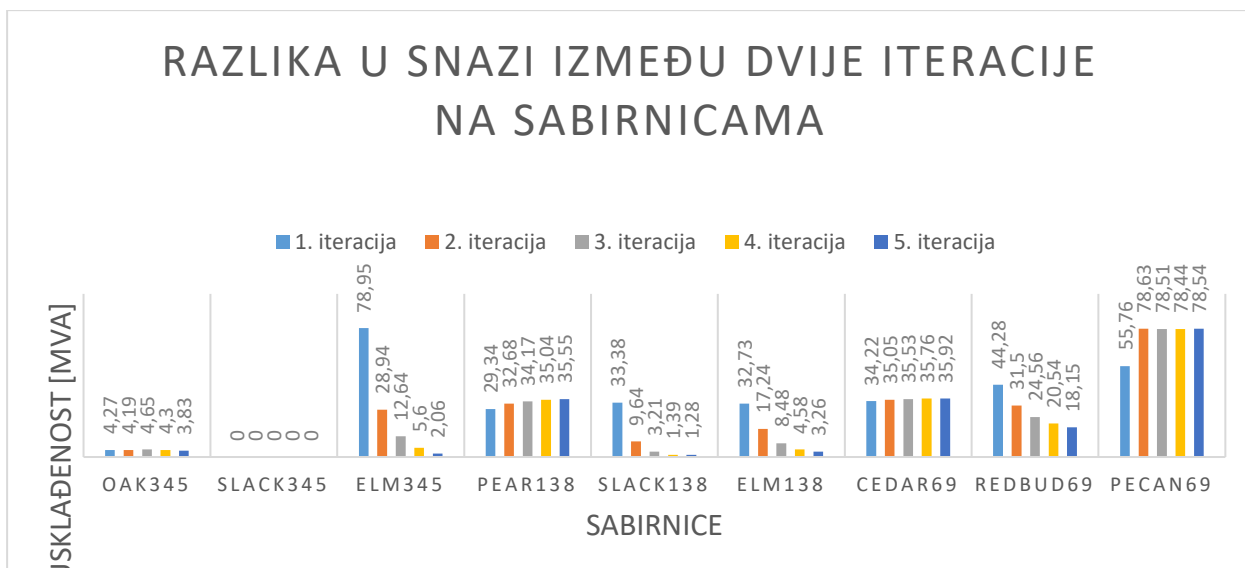
**Sl. 4.4.** Vrijednosti djelatne snage generatora nakon prvih pet iteracija.

Na slici 4.5. prikazana je proizvodnja jalove snage na generatorima nakon prvih pet iteracija



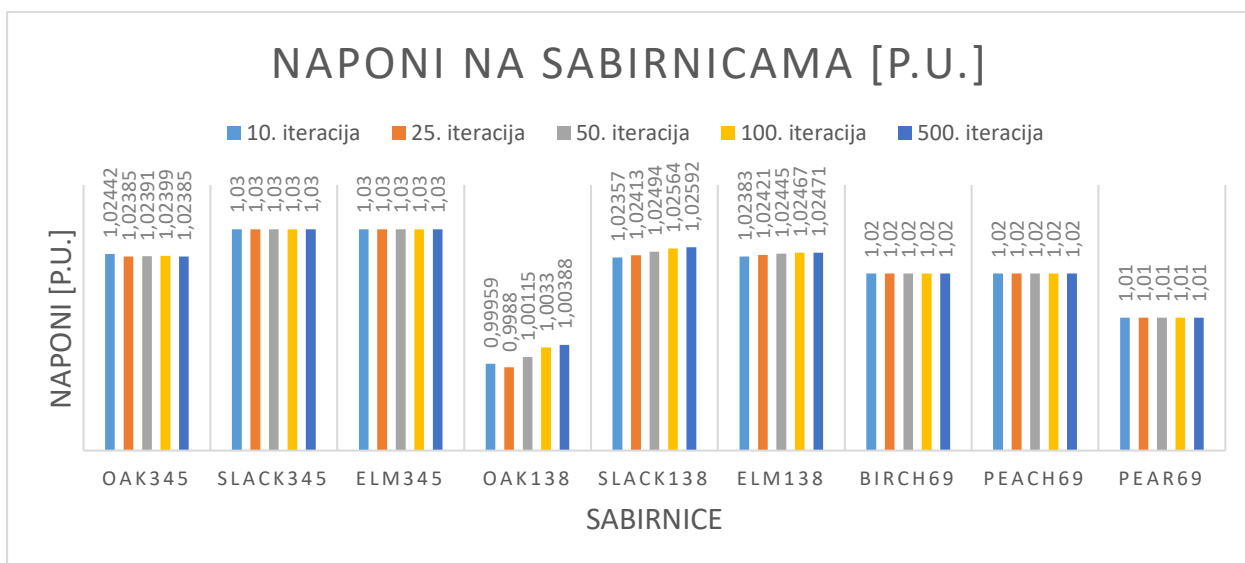
**Sl. 4.5.** Vrijednosti jalove snage generatora nakon prvih pet iteracija.

Na slici 4.6. prikazana je razlika u snazi između dvije uzastopne iteracije na sabirnicama nakon prvih pet iteracija.



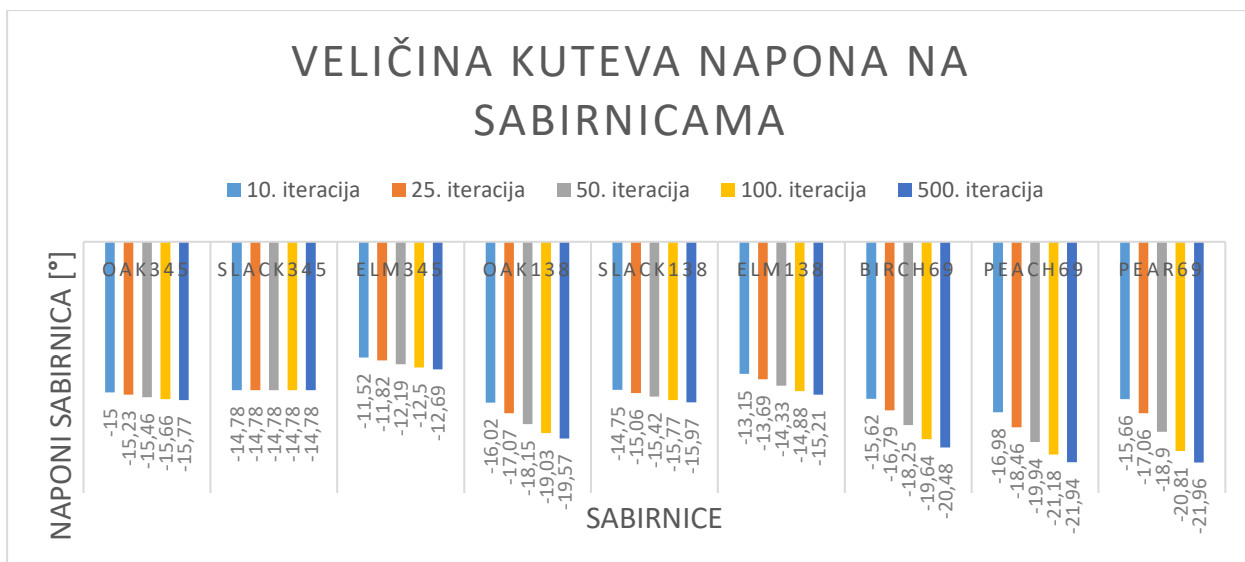
**Sl. 4.6.** Prikaz razlike u snazi između dvije iteracije na sabirnici nakon prvih pet iteracija.

S obzirom da nakon sljedećih par iteracija nema značajnog pomaka u rezultatima, sljedeći rezultati koji će biti prikazani su naponi sabirnica nakon desete, dvadesetpete, pedesete, stote te petstote iteracije kako bi se pokazalo nastupanje konvergencije pomoću Gauss-Seidel metode što je i prikazano na slici 4.7.



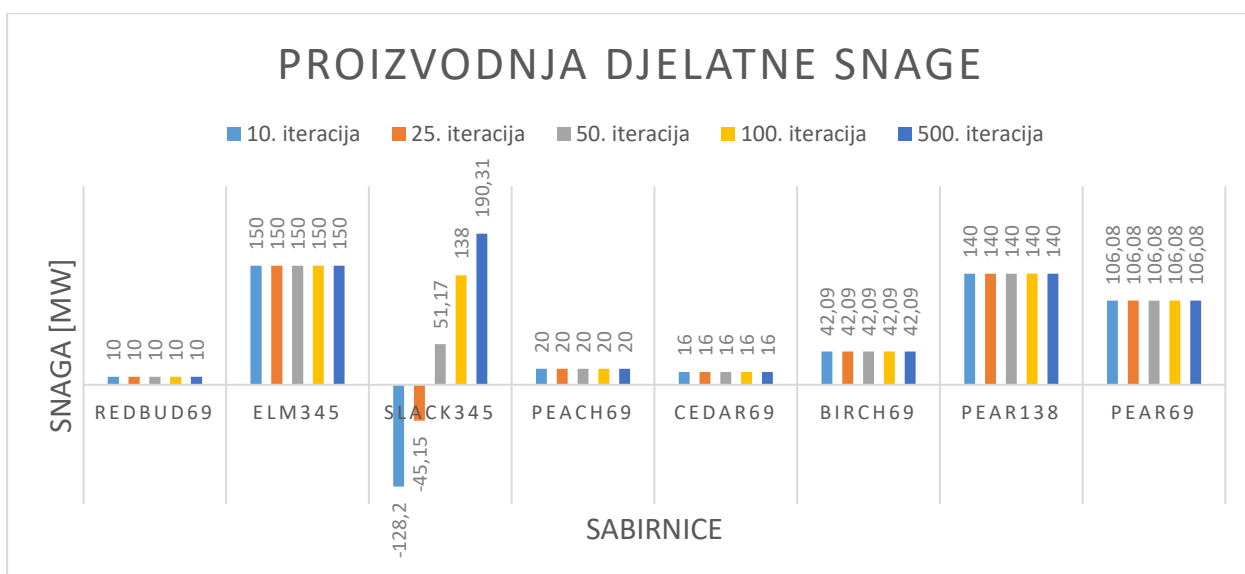
**Sl. 4.7.** Vrijednosti napona na sabirnicama nakon konvergiranja.

Na slici 4.8. prikazana je veličina kuteva napona na danim sabirnicama nakon konvergiranja.



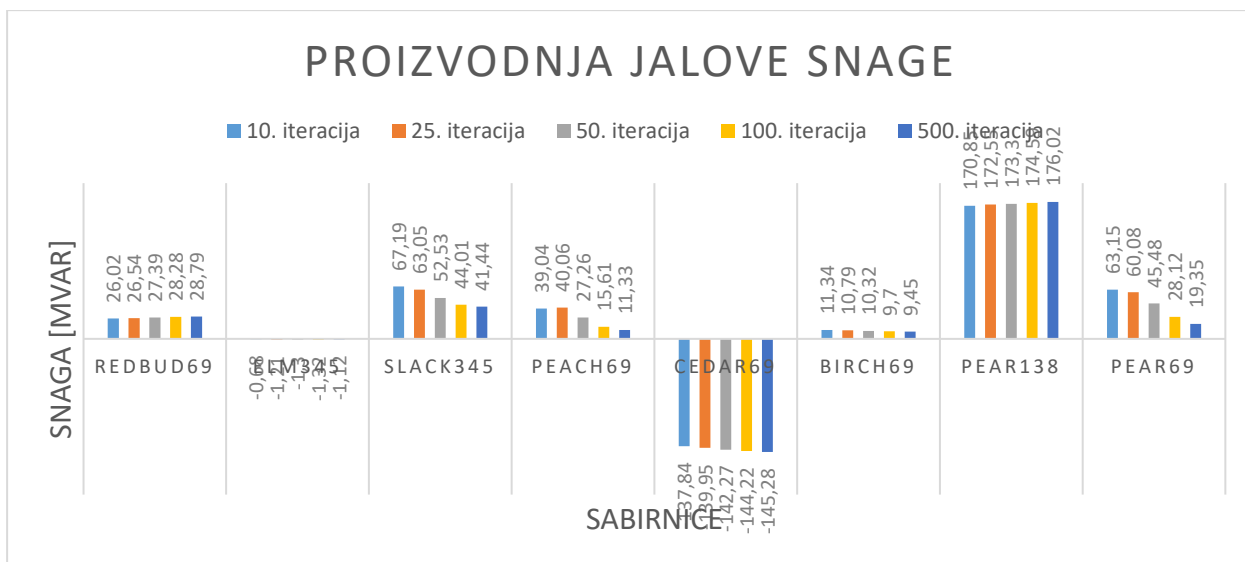
**Sl. 4.8.** Vrijednosti kuteva napona na sabirnicama nakon konvergiranja.

Na slici 4.9. prikazana je proizvodnja djelatne snage na generatorima nakon konvergiranja.



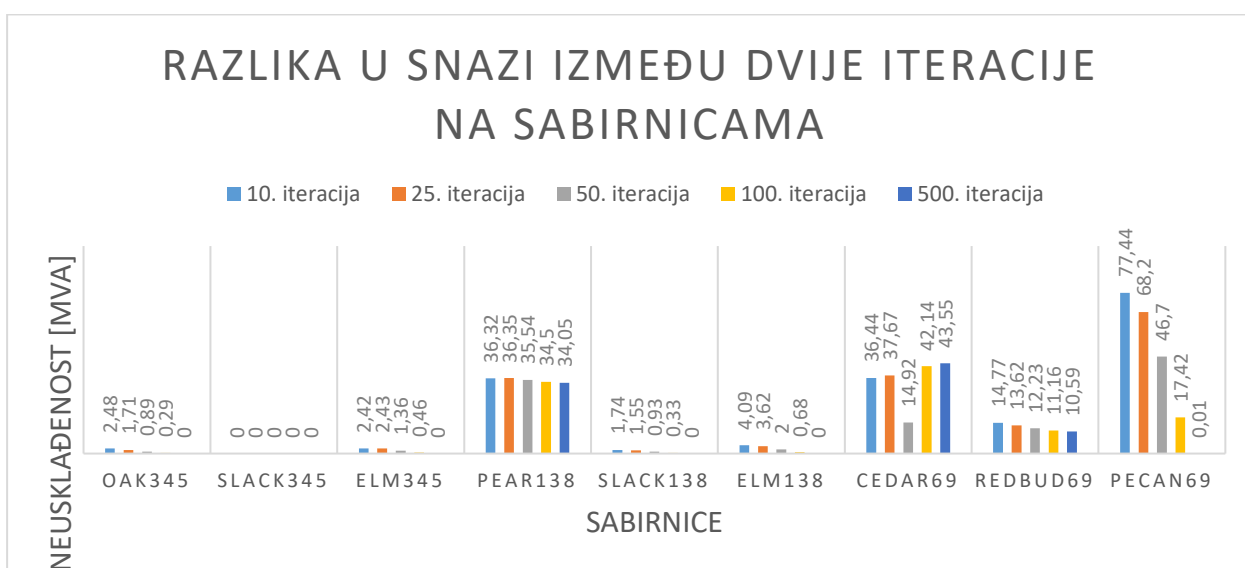
**Sl. 4.9.** Vrijednosti djelatne snage generatora nakon konvergiranja.

Na slici 4.10. prikazana je proizvodnja jalove snage na generatorima nakon konvergiranja.



Sl. 4.10. Vrijednosti jalove snage generatora nakon konvergiranja.

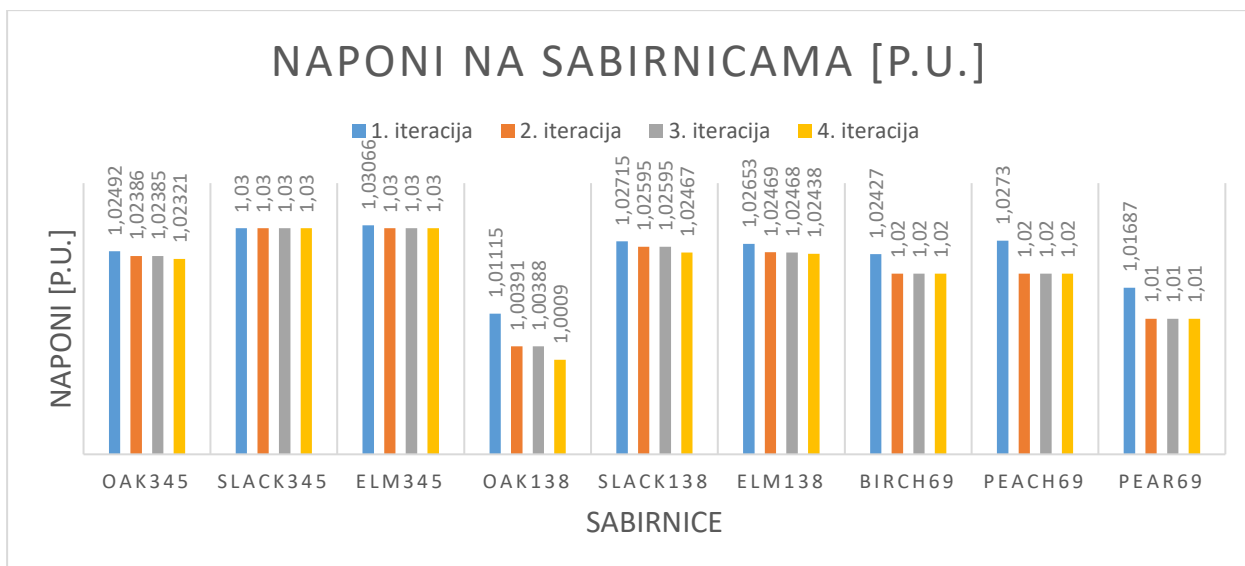
Na slici 4.11. prikazana je razlika u snazi između dvije uzastopne iteracije na sabirnicama nakon konvergiranja.



Sl. 4.11. Prikaz razlike u snazi između dvije iteracije na sabirnici nakon konvergiranja.

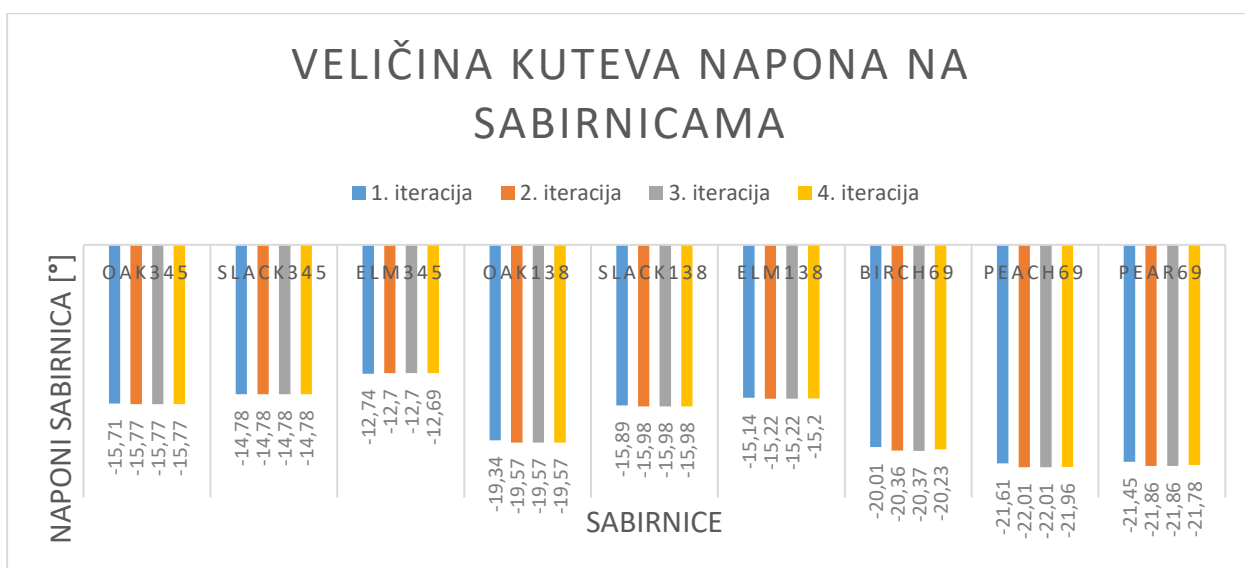
#### 4.3.2. Newton-Raphson metoda

Nadalje, bit će prikazana Newton-Raphson metoda. Naime, kao i za Gauss-Seidel metodu, vršiti će se proračun za svaku iteraciju, te odrediti nakon koliko iteracija nastupa konvergencija. Na slici 4.12. prikazane su veličine napona sabirnica u jediničnoj mjeri (*per unit*) nakon prve četiri iteracije odnosno do iteracije kada dolazi do konvergencije.



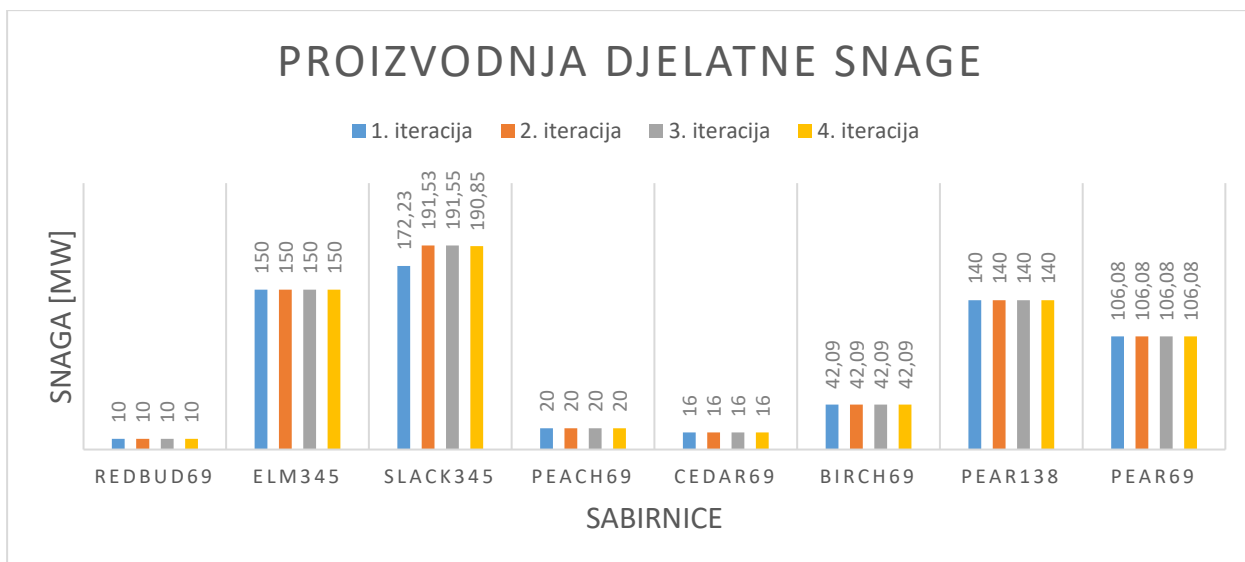
**Sl. 4.12.** Vrijednosti napona na sabirnicama nakon konvergencije.

Na slici 4.13. prikazana je veličina kuteva napona na danim sabirnicama nakon prve četiri iteracije.



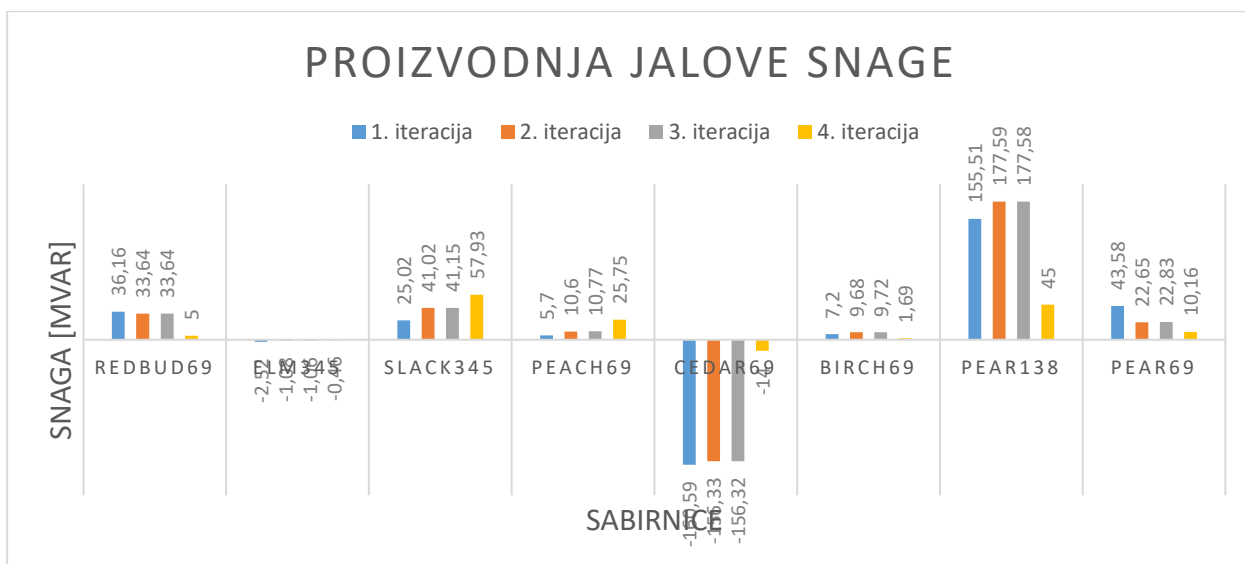
**Sl. 4.13.** Vrijednosti kuteva napona na sabirnicama nakon prve četiri iteracije.

Na slici 4.14. prikazana je proizvodnja djelatne snage na generatorima nakon prve četiri iteracije-



**Sl. 4.14.** Vrijednosti djelatne snage generatora nakon prve četiri iteracije.

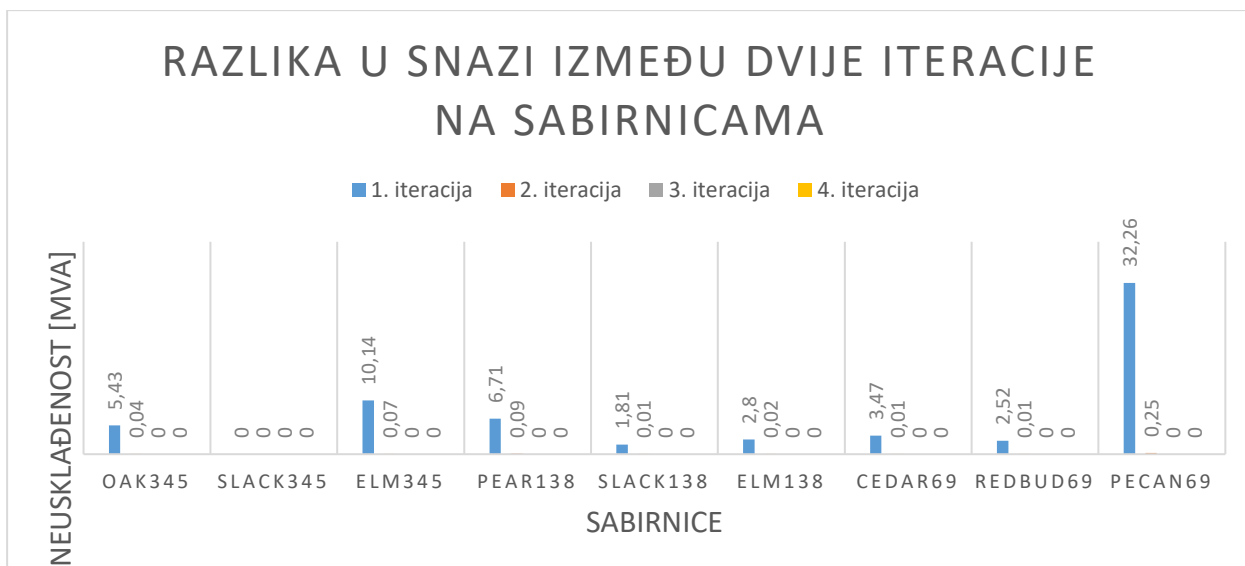
Na slici 4.15. prikazana je proizvodnja jalove snage na generatorima nakon prve četiri iteracije.



**Sl. 4.15.** Vrijednosti jalove snage generatora nakon prve četiri iteracije.

Na slici 4.16. prikazana je razlika u snazi između dvije uzastopne iteracije na sabirnicama nakon prve četiri iteracije.

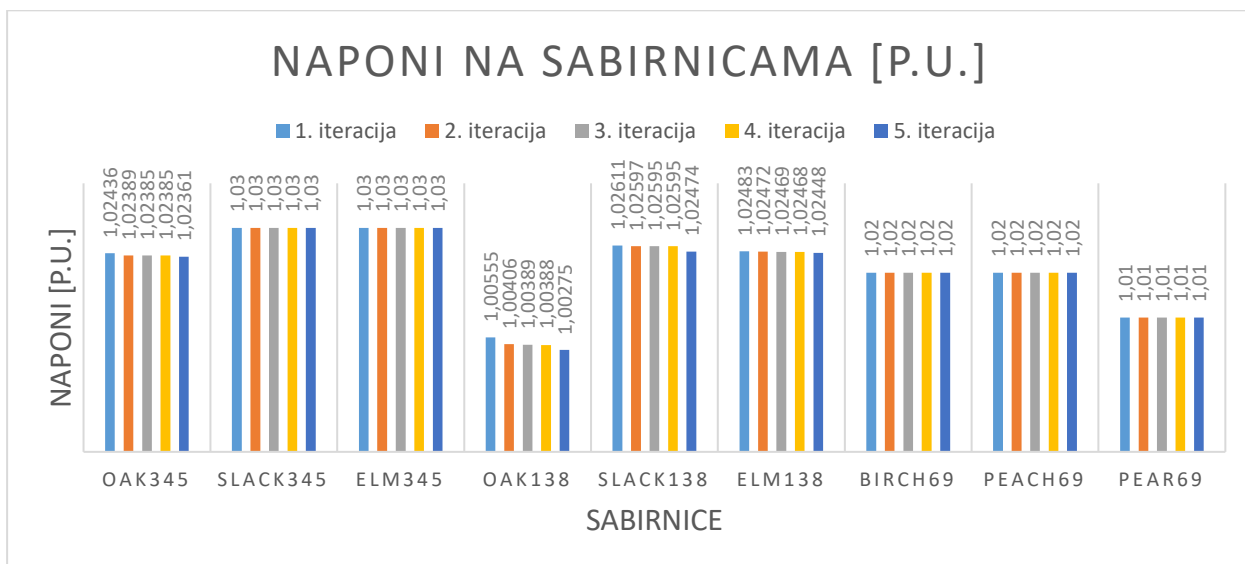




Sl. 4.16. Prikaz razlike u snazi između dvije iteracije na sabirnici nakon prve četiri iteracije

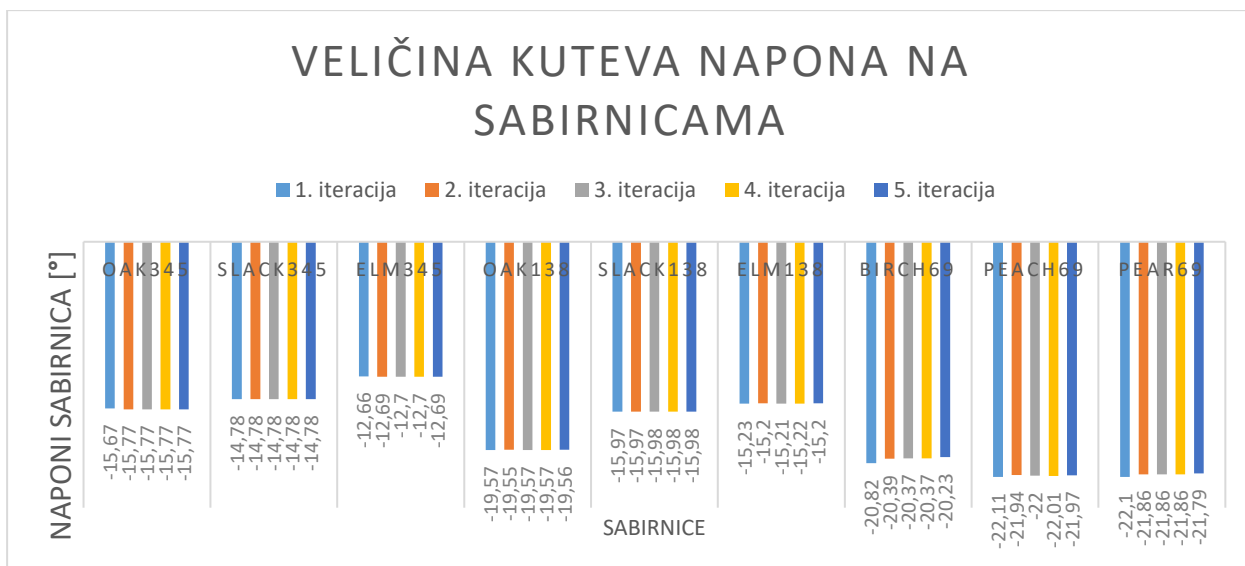
### 4.3.3. Metoda brzog razdvajanja tokova snaga

Zatim, sljedeća metoda koja će se raditi u ovom proračunu metoda brzog razdvajanja tokova snaga. Isto kao i za do sad dvije navedene metode, i za metodu brzog razdvajanja tokova snaga vršiti će se proračun za svaku iteraciju, te odrediti nakon koliko iteracija nastupa konvergencija. Na slici 4.17. prikazane su veličine napona u jediničnoj mjeri (*per unit*) nakon prvih pet iteracija nakon i koje dolazi do konvergencije pomoću ove metode.



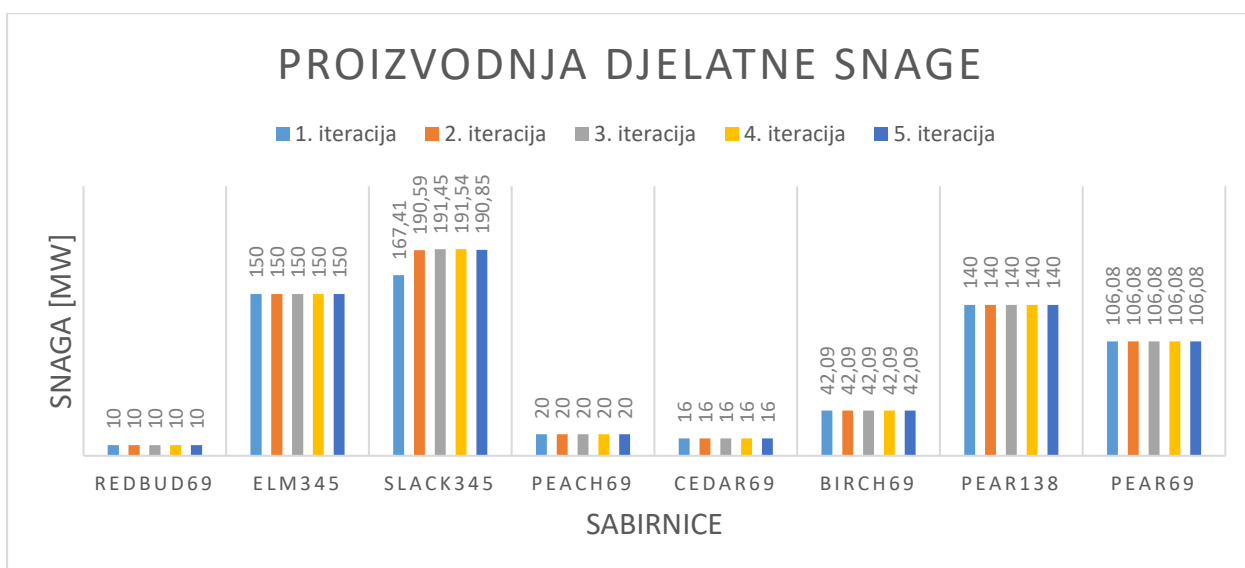
Sl. 4.17. Vrijednosti napona na sabirnicama nakon prvih pet iteracija.

Na slici 4.18. prikazana je veličina kuteva napona na danim sabirnicama nakon prvih pet iteracija.



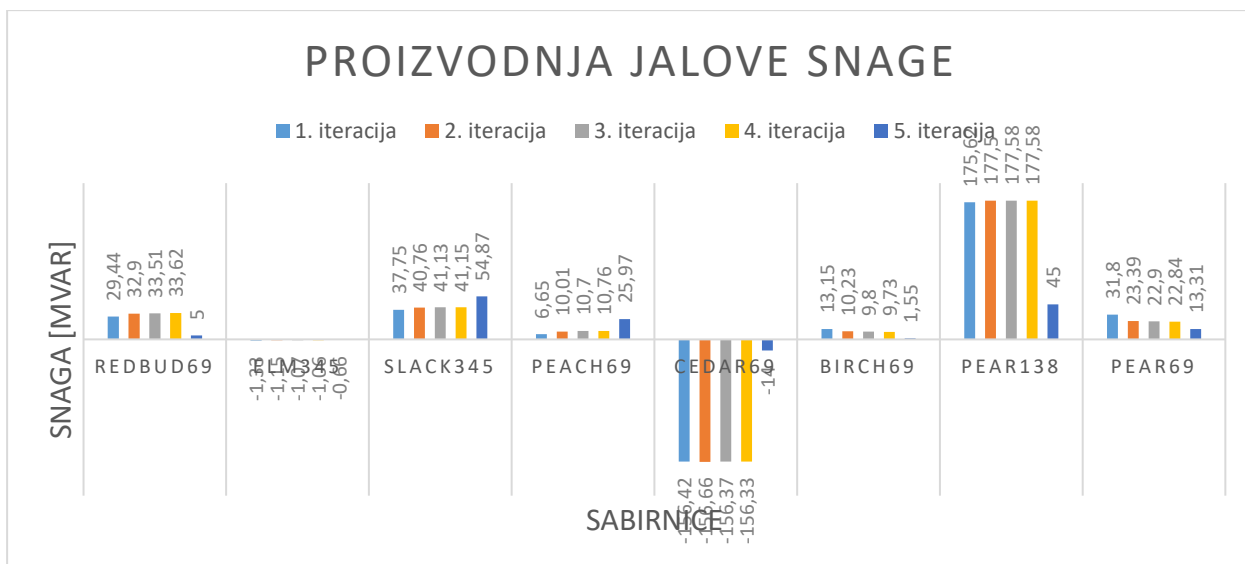
**Sl. 4.18.** Vrijednosti kuteva napona na sabirnicama nakon prvih pet iteracija.

Na slici 4.19. prikazana je proizvodnja djelatne snage na generatorima nakon prvih pet iteracija.



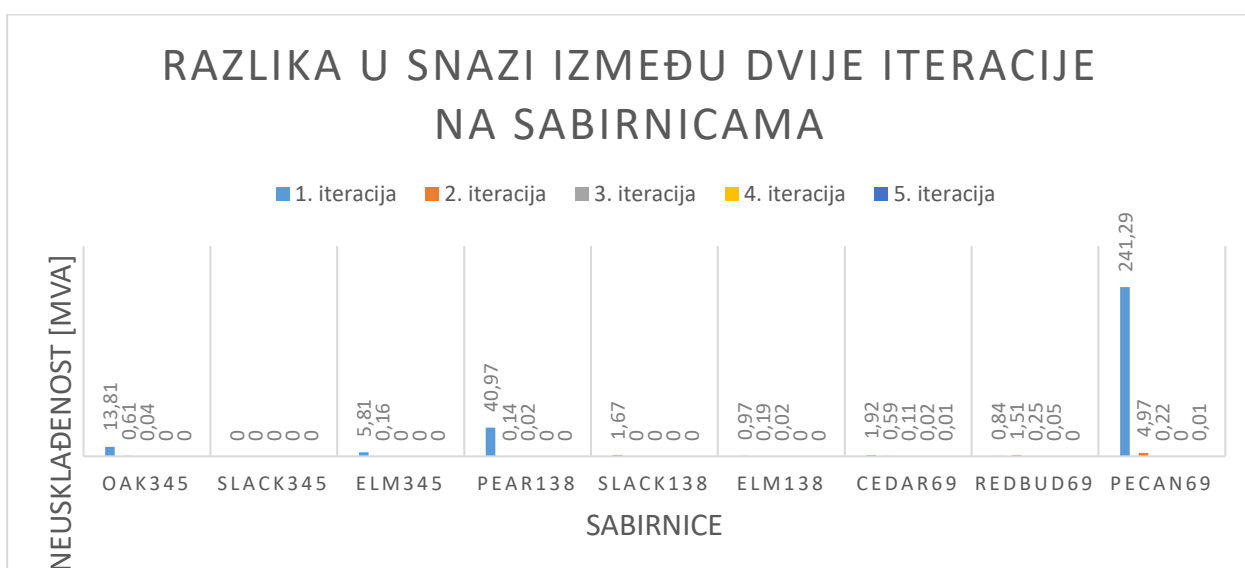
**Sl. 4.19.** Vrijednosti djelatne snage generatora nakon prvih pet iteracija.

Na slici 4.20. prikazana je proizvodnja jalove snage na generatorima nakon prvih pet iteracija.



Sl. 4.20. Vrijednosti jalove snage generatora nakon prvih pet iteracija.

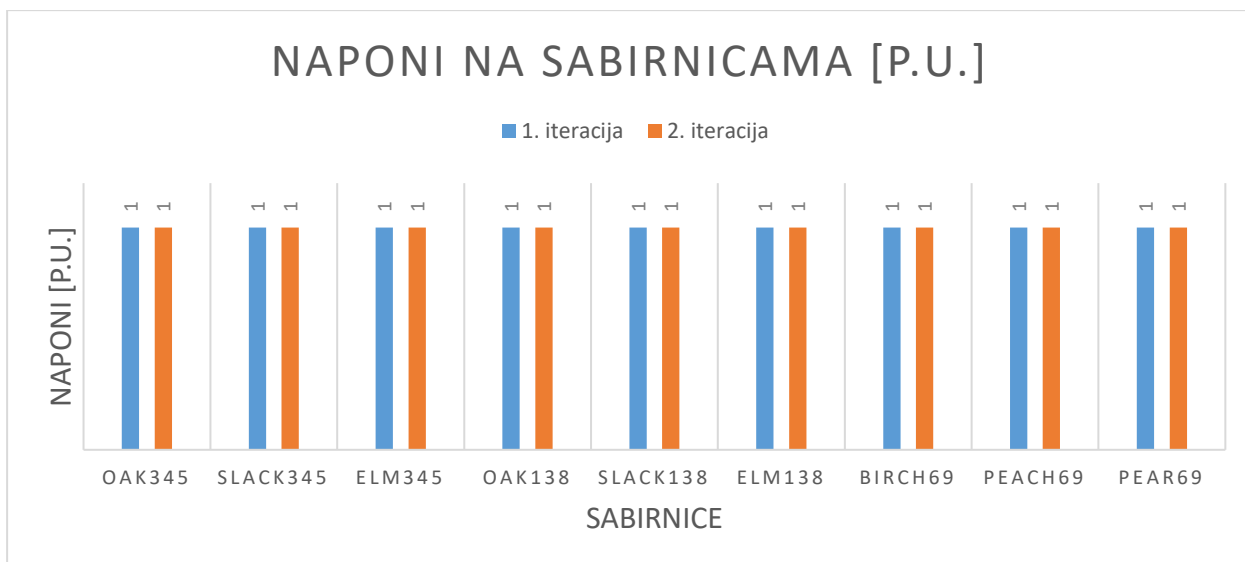
Na slici 4.21. prikazana je razlika u snazi između dvije uzastopne iteracije na sabirnicama nakon prvih pet iteracija.



Sl. 4.21. Prikaz razlike u snazi između dvije iteracije na sabirnici nakon prvih pet iteracija.

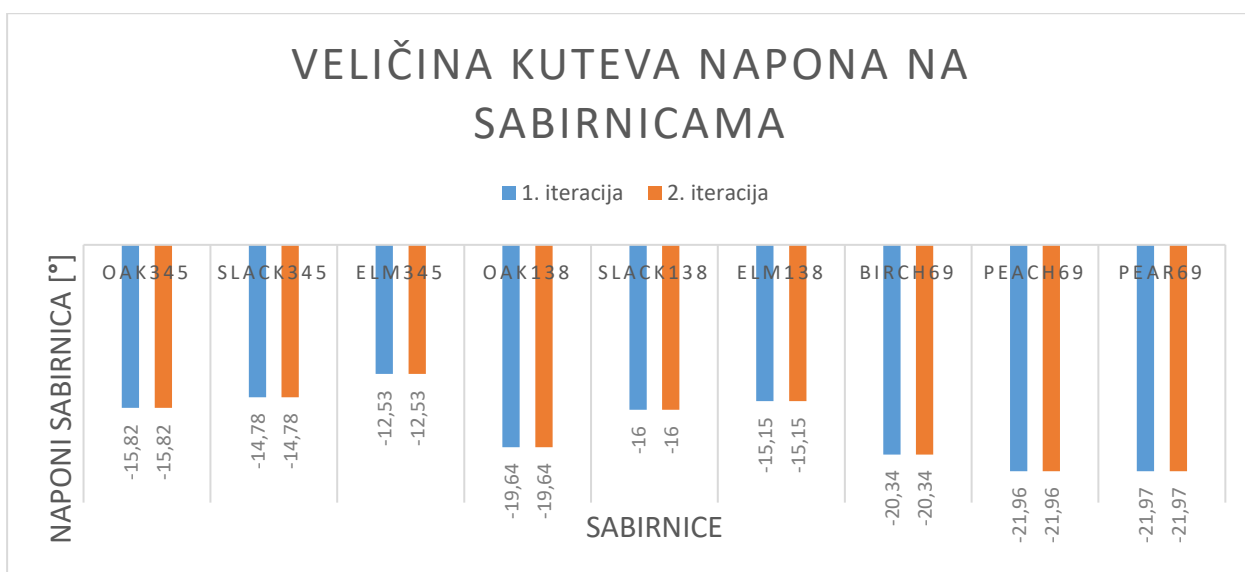
#### 4.3.4. DC metoda

Naposljetku, zadnja metoda koja će se raditi u ovom proračunu je DC metoda. Za razliku od prijašnjih triju metoda, DC metoda konvergira odmah u prvoj iteraciji, iz razloga što ima najveća zanemarenja, stoga su na slici 4.21. prikazane veličine napona u jediničnoj mjeri (*per unit*) nakon prve iteracije odnosno druge iteracije kako bi se dokazalo da DC metoda konvergira u prvoj iteraciji jer nema razlike između prve i druge iteracije.



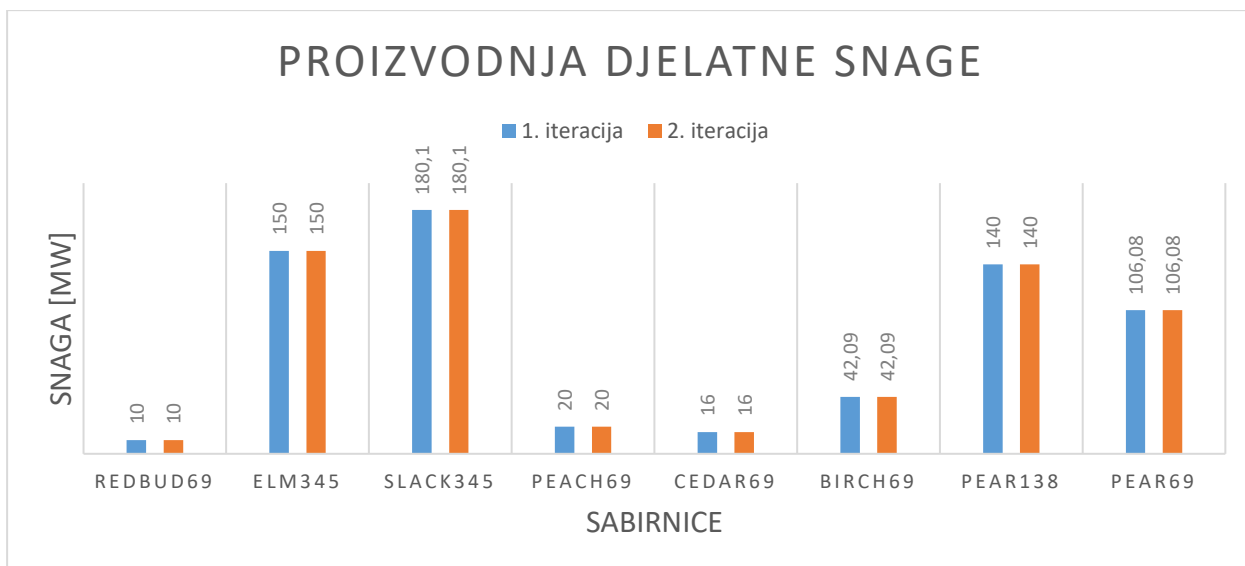
**Sl. 4.22.** Vrijednosti napona na sabirnicama nakon prve dvije iteracije.

Na slici 4.23. prikazana je veličina kuteva napona na danim sabirnicama nakon prve dvije iteracije.



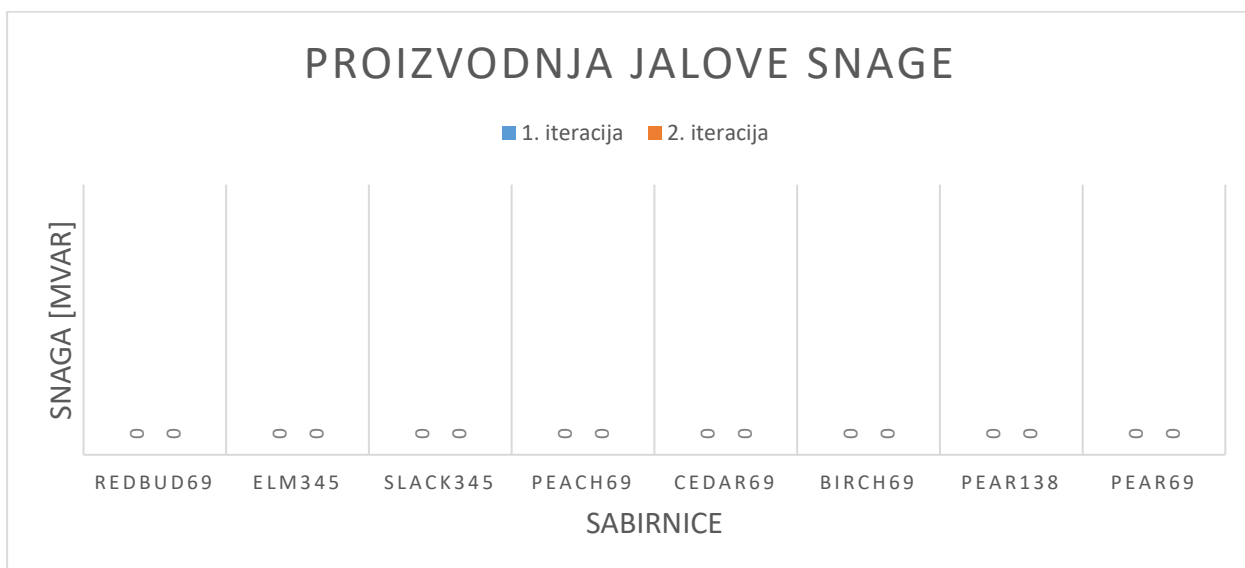
**Sl. 4.23.** Vrijednosti kuteva napona na sabirnicama nakon prve dvije iteracije.

Na slici 4.24. prikazana je proizvodnja djelatne snage na generatorima nakon prve dvije iteracije.



**SI. 4.24.** Vrijednosti djelatne snage generatora nakon prve dvije iteracije.

Na slici 4.25. prikazana je proizvodnja jalove snage na generatorima nakon prve dvije iteracije odnosno ona je na svim generatorima jednaka nuli iz razloga što se u DC metodi zanemaruje jalova snaga.



**SI. 4.25.** Vrijednosti jalove snage generatora nakon prve dvije iteracije.

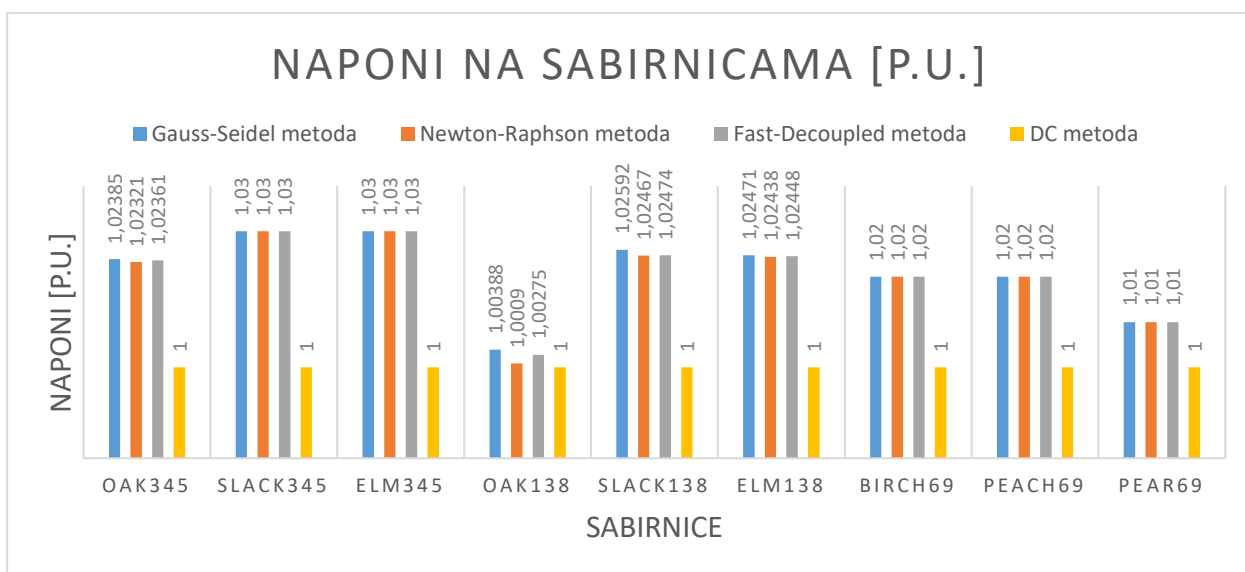
Na slici 4.26. prikazana je razlika u snazi između dvije uzastopne iteracije na sabirnicama, međutim kako DC metoda nije iterativna metoda na svim sabirnicama će pisati 0 odnosno da nema razlike između iteracija.



Sl. 4.26. Prikaz razlike u snazi između dvije iteracije na sabirnici nakon prve dvije iteracije.

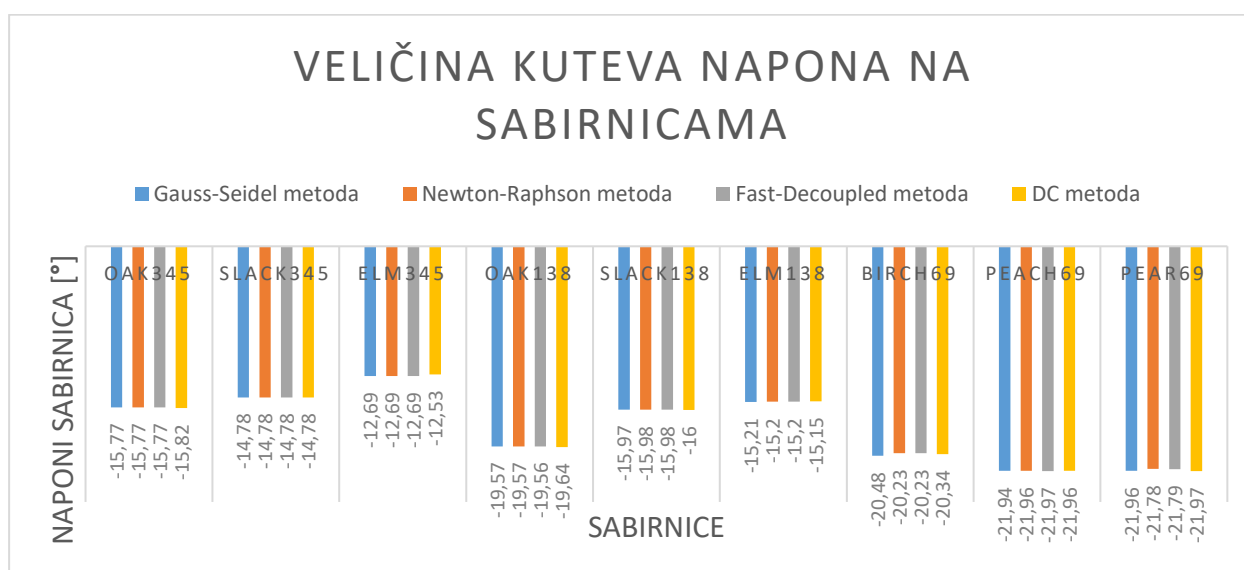
#### 4.4. Usporedba rezultata dobivenih u proračunu

Na slici 4.27. su grafički prikazani rezultati veličine napona sabirnica nakon zadnje iteracije za svaku metodu. Rezultati veličine napona se razlikuju na sabirnicama OAK345, OAK138, SLACK138 i ELM138 unutar apsolutne greške manje od 5% dok na sabirnicama SLACK345, ELM345, BIRCH69, PEACH69 i PEAR69 su identični za Gauss-Seidel, Newton-Raphson i Fast-Decoupled metodu što dokazuje točnost pojedine metode. Za razliku od te tri navedene metode, rezultati DC metode znatno odstupaju od ostalih, međutim, to je i očekivano zbog svih zanemarenja koje DC metoda uzima u obzir.



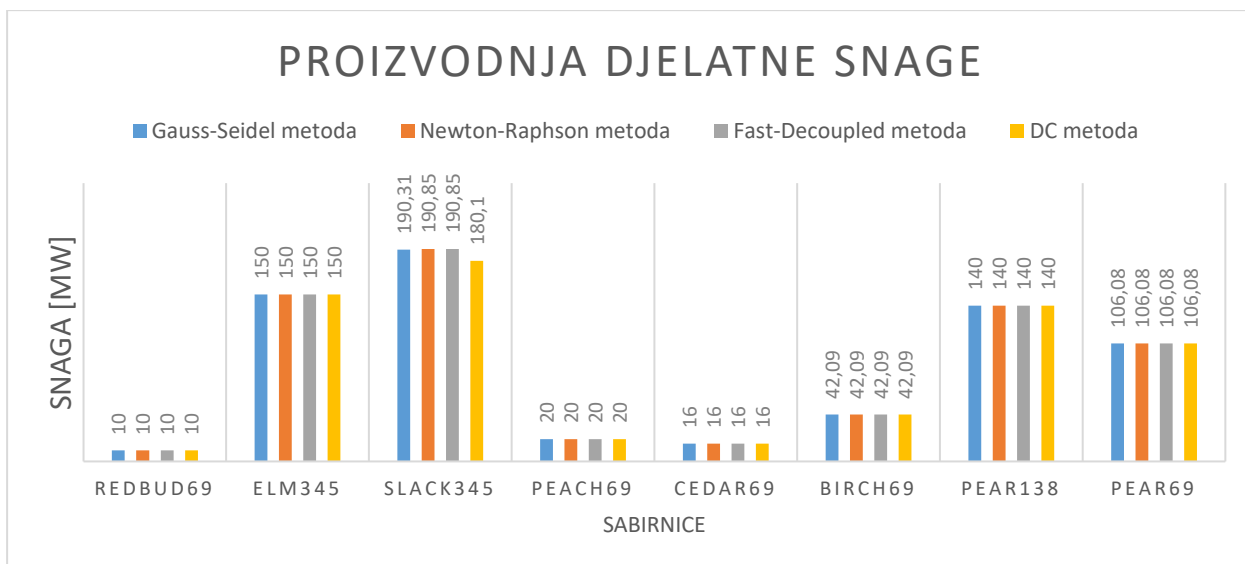
**Sl. 4.27.** Vrijednosti napona na sabirnicama nakon zadnje iteracije za svaku metodu.

Na slici 4.28. su grafički prikazani rezultati veličine kuteva napona sabirnica nakon zadnje iteracije za svaku metodu te su dobiveni rezultati kuteva napona identični za sabirnicu SLACK345 dok su za sve ostale sabirnice rezultati kuteva napona unutar apsolutne greške manje od 5% što je i za očekivati prvenstveno zato što DC metoda uzima u obzir kuteve napona prilikom računanja iteracija.



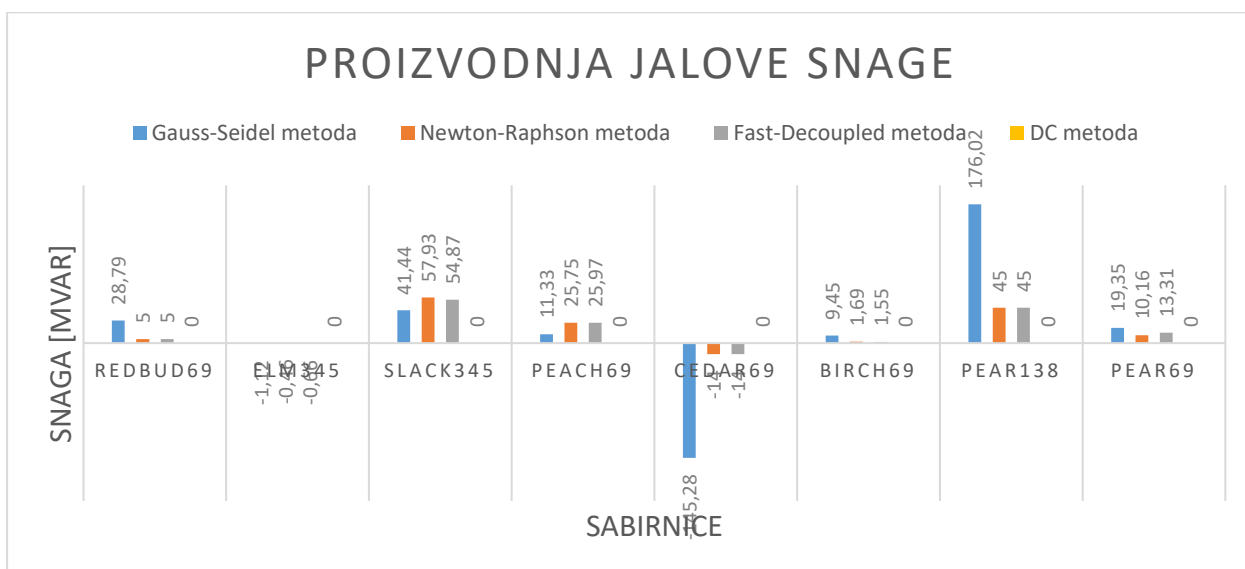
**Sl. 4.28.** Vrijednosti kuteva napona na sabirnicama nakon zadnje iteracije za svaku metodu.

Na slici 4.29. su grafički prikazani rezultati djelatne snage generatora nakon zadnje iteracije za svaku metodu te su rezultati identični za sve metode za generatore REDBUD69, ELM345, PEACH69, CEDAR69, BIRCH69, PEAR138 te PEAR69. Jedina razlika u rezultatu je u referentnom generatoru SLACK345 gdje Newton-Raphson i Fast-Decoupled imaju identične rezultate dok Gauss-Seidel ima minimalnu apsolutnu pogrešku koja iznosi 0,28%. Za razliku od te 3 metode gdje su rezultati unutar apsolutne greške manje od 5% dok DC prelazi tu granicu jer apsolutna greška iznosi 5,63%.



**Sl. 4.29.** Vrijednosti djelatne snage generatora nakon zadnje iteracije za svaku metodu.

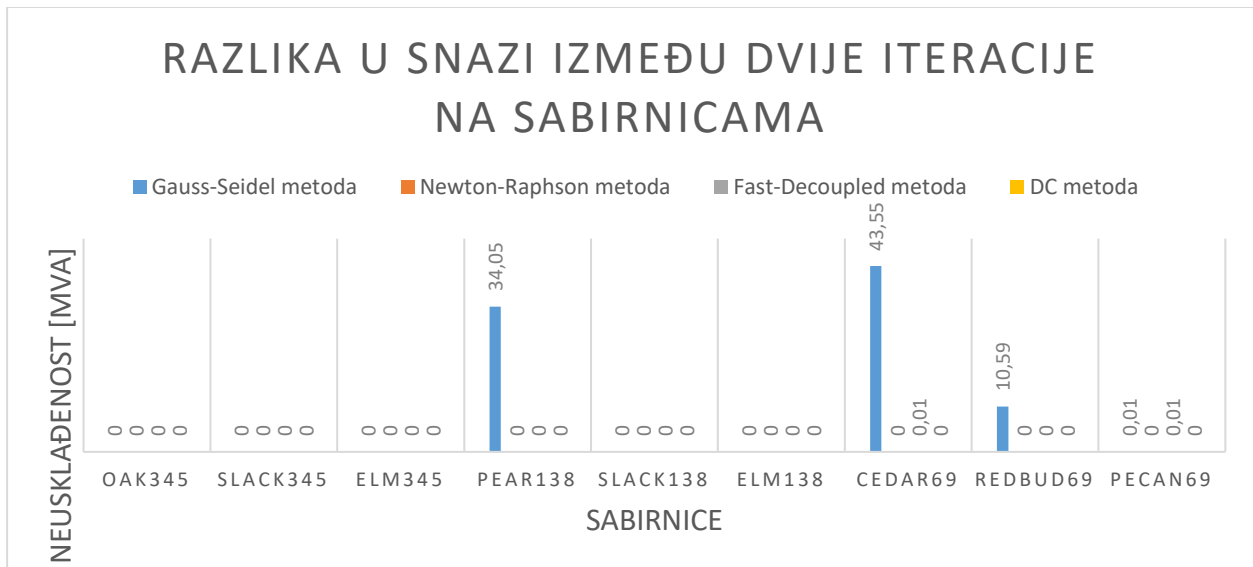
Na slici 4.30. su grafički prikazani rezultati jalove snage generatora nakon zadnje iteracije za svaku metodu gdje se vidi kako su rezultati za Newton-Raphson i Fast-Decoupled identični ili su unutar dozvoljene granice apsolutne pogreške manje od 5%. Na ovom primjeru se vidi nepouzdanost Gauss-Seidelove metode te nemogućnost konvergiranja za dani zadatak u radu. Također, kao što je već navedeno ranije, rezultati DC metode su očekivani i jednaki nuli iz razloga što DC metoda zanemaruje jalovu snagu.



**Sl. 4.30.** Vrijednosti jalove snage generatora nakon zadnje iteracije za svaku metodu.



Na slici 4.31. su grafički prikazani rezultati razlike u snazi između dvije sabirnice nakon zadnje iteracije za svaku metodu te kao što je vidljivo na slici do konvergencije je došlo u Newton-Raphson, Fast-Decoupled i DC metodi jer je vidljivo da nema razlike između iteracija. Međutim, rezultate dobivene DC metodom treba uzeti s rezervom zbog velikih zanemarenja same metode. Također, na slici su prikazani velike neusklađenosti između iteracija prilikom rješavanja Gauss-Seidel metodom što je i očekivano s obzirom da je za ovaj zadatak konvergencija nastupila nakon petstote iteracije.



**Sl. 4.31.** Vrijednosti razlike u snazi između dvije sabirnice nakon zadnje iteracije za svaku metodu.

Na temelju dobivenih rezultata, provedenih u programu PowerWorld na primjeru sustava s 37 sabirnica, može se zaključiti da je Newton-Raphson metoda najpreciznija, te je ujedino i metoda koja najbrže konvergira. Newton-Raphson metodi bilo je potrebno 4 iteracije da konvergira. Sljedeća po redu metoda koja je najbrže konvergirala je metoda brzog razdvajanja tokova snaga te je za tu metodu bilo potrebno 5 iteracija kako bi konvergirala. Gauss-Seidel metoda, u ovom slučaju, nije uspjela konvergirati iz razloga što prije početka svake iteracije potrebno je staviti početne uvjete na fiksni početak, te za ovu simulaciju u programu PowerWorld se ne može doći do rješenja, neovisno o broju iteracija koji se pokuša unijeti u programu. Najbliže konačnom rješenju je prikazano nakon petstote iteracije iz razloga što i nakon svake sljedeće iteracije rezultati ostaju identični kao i na petstotoj iteraciji. U teoriji, metoda koja je najbrže konvergirala je DC metoda jer, tehnički gledano, bila je potrebna samo jedna iteracija kako bi došlo do konvergencije

rezultata, međutim, DC metoda, kao što je navedeno prijašnje u radu, koristi velika zanemarenja, stoga su i rezultati dobiveni tom metodom vrlo neprecizni i nepouzdana. Na temelju svih prikazanih podataka dobivenih iz konkretne simulacije, ovaj rad je pokazao kako je Newton-Raphson metoda koja najbrže konvergira.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu pojašnjen je matematički pristup analizi AC tokova snage u elektroenergetskim sustavima. Na početku su prikazane kompleksne jednadžbe za AC tokove snage, koje je bilo potrebno podijeliti na realni i imaginarni dio, predstavljajući djelatnu i jalovu snagu. Pomoću tog matematičkog zapisa moguće je analizirati te računati napone na sabirnicama u elektroenergetskim sustavima, međutim kako bi se riješile te analize potrebne su iterativne metode poput Gauss-Seidel metode i Newton-Raphson metode.

U teorijskom dijelu se pojašnjava Newton-Raphson metoda, koja se koristi za iterativno rješavanje jednadžbi tokova snage. Cilj je bio pojasniti gradaciju nastajanja Newton-Raphson metode te pojasniti primjenu na analizi tokova snage u elektroenergetskim sustavima. Također, opisane su prednosti i nedostaci ove metode. Nadalje, rad opisuje i metodu brzog razdvajanja tokova snage, koja se koristi za aproksimaciju te brže rješavanje problema tokova snage. Ova se metoda temelji na razdvajanju djelatne i jalove snage te koristi aproksimacije kako bi se proračuni pojednostavili. Konačno, tekst spominje primjenu DC tokova snage i metode optimizacije u distribucijskim sustavima, kao što su DistFlow metode. DistFlow metoda koristi DistFlow jednadžbe grana za analizu i optimizaciju radijalnih distribucijskih sustava. Sve navedene matematičke metode igraju ključnu ulogu u analizi, izračunu i optimizaciji elektroenergetskih sustava, omogućujući učinkovit i pouzdan prijenos i distribuciju električne energije. Praktični dio odnosi se na rješavanje problema opisanih u teorijskom dijelu. Na analizi tokova snaga stvarnog sustava s 37 sabirnica, problem je riješen pomoću Gauss-Seidel metode, Newton-Raphson metode, metode brzog razdvajanja tokova snaga te DC metode. Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti kako je Newton-Raphson metoda najbrže konvergirala te na temelju razlika snaga između dvije iteracije na sabirnicama može se reći da je i najpreciznija. Zatim, sljedeća metoda koja je konvergirala brže od ostalih je metoda brzog razdvajanja tokova snaga. Nadalje, u ovom radu pomoću Gauss-Seidel metode nije se moglo doći do rješenja jer nije nastupila konvergencija, dok DC metoda se ne uzima u obzir kao iterativna metoda zbog svojih velikih zanemarenja.

Ovim radom uspješno je prikazana uporaba Newton-Raphson metode na sustavu s velikim brojem sabirnica te na temelju njene pouzdanosti, preciznosti te brzine konvergencije dokazano je zašto je jedna od najpopularnijih metoda prilikom rješavanja analize tokova snaga u svijetu.

## LITERATURA

- [1] W. Hongfu, M. Shixia, W. Yi and Z. Zhiqiang, "An Approximate Power Flow Method to Deal with the Non-convergence Problem of Power Flow Calculation," 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON), Guangzhou, China, 2018, pp. 292-299, doi: 10.1109/POWERCON.2018.8601714
- [2] L. K. Gumar, M. Mishra, T. Bisht, „A Methodology for Power Flow & Voltage Stability Analysis“2015 International Research Journal of Engineering and Technology
- [3] S. Chatterjee and S. Mandal, "A novel comparison of gauss-seidel and newton- raphson methods for load flow analysis," 2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC), Chennai, India, 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICPEDC.2017.8081050.
- [4] A. Lhoussine, T.El Hachmi, R. Skouri, „Comparison of Newton Raphson and Gauss Seidel Methods for Power Flow Analysis“ 2018 World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Energy and Power Engineering
- [5] Dharamjit, D.K.Tanti (2018); Load Flow Analysis on IEEE 30 bus System; Int J Sci Res Publ 2(11) (ISSN: 2250-3153). <http://www.ijsrp.org/research-paper-1112.php?rp=P11375>
- [6] A. Nur and A. Kaygusuz, "Load Flow Analysis With Newton–Raphson and Gauss–Seidel Methods in a Hybrid AC/DC System," in IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 44, no. 4, pp. 529-536, Fall 2021, doi: 10.1109/ICJECE.2021.3097447.
- [7] D. Borzacchiello, F. Chinesta, M.H. Malik, R. García-Blanco, P. Diez, „Unified formulation of a family of iterative solvers for power systems analysis“, Electric Power Systems Research, Volume 140, 2016, Pages 201-208, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.06.021>.

[8] B. Ravi, S. Raval, V. R. R. Rudraraju and C. Nagamani, "Performance analysis of MVAC and MVDC offshore wind farm distribution system using direct load flow method," 2016 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB), Chennai, India, 2016, pp. 341-346, doi: 10.1109/AEEICB.2016.7538305.

[9] Glover, J. Duncan, Mulukutla S. Sarma, and Thomas Overbye. Power system analysis & design, SI version. Cengage Learning, 2012.

## SAŽETAK

Zadatak diplomskog rada je objasniti važnost analize tokova snaga u elektroenergetskim sustavima, te objasniti metode pomoću kojih je moguće izvoditi proračune tokova snaga. U radu su, na zadanom sustavu s 37 sabirnica, prikazani proračuni pomoću različitih metoda, kao što su Gauss-Seidel metoda, Newton-Raphson metoda, metoda brzog razdvajanja tokova snaga te DC metoda. Na temelju mnogobrojnih primjera napravljenih u proračunu može se zaključiti da je najpouzdanija metoda Newton-Raphson metoda zbog svoje preciznosti, ali i zbog brzine kojom dolazi do konvergencije.

**Ključne riječi:** elektroenergetski sustavi, analiza tokova snaga, Newton-Raphson metoda, Gauss-Seidel metoda

## ABSTRACT

The task of the thesis is to explain the importance of power flow analysis in power systems, and to explain the methods by which power flow calculations can be performed. The paper presents calculations using different methods, such as the Gauss-Seidel method, the Newton-Raphson method, fast decoupled method, and the DC method, on a given system with 37 busbars. Based on numerous examples made in the calculation, it can be concluded that the most reliable method is the Newton-Raphson method due to its precision, but also due to the speed with which convergence occurs.

**Keywords:** power systems, power flow analysis, Newton-Raphson method, Gauss-Seidel method

## **ŽIVOTOPIS**

Karlo Mamić rođen je 31. listopada 1999. u Osijeku. Završio je Osnovna školu Ivan Filipović u Velikoj Kopanici te nakon osnovne škole upisuje I. Gimnaziju u Osijeku. Gimnaziju završava 2018. godine te upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, smjer elektrotehnika. Na drugoj godini studija se opredjeljuje za smjer elektroenergetika. Za diplomski studij 2021. godine odabire modul DEA - Elektroenergetski sustavi. Na drugoj godini diplomskog studija sudjelovao je Erasmus + projektu, studijski boravak četvrtog semestra na fakultetu Polytechnic Institute of Braganca (IPB), Braganca/Portugal.

## PRILOG 1: Rezultati simulacije u programu PowerWorld za Gauss-Seidel metodu

**Tablica 1.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za prvu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
LOCUST69	0,98778	-16,1	0,03
WILLOW69	0,99386	-15,17	39,81
MAPLE69	0,99643	-14,97	0
APPLE69	0,99813	-15,55	0
WALNUT69	0,99834	-14,94	83,39
ASH138	0,99884	-14,93	5,7
TULIP138	0,99904	-14,91	20,68
PALM69	0,99915	-15,41	27,85
OAK138	0,99952	-14,93	0
CEDAR69	1	-15,31	34,22
BUCKEYE69	1,00084	-15,41	29,96
ORANGE69	1,00092	-14,86	33,16
PEACH138	1,00094	-14,74	30,98
MAPLE69	1,00194	-15,01	0
LEMON138	1,00195	-14,69	10,02
SPRUCE69	1,0023	-15,19	10,31
OLIVE69	1,00422	-14,94	40,43
PINE69	1,00543	-15,05	44,6
PECAN69	1,00567	-14,77	55,76
POPLAR69	1,0059	-15,09	15,82
CHERRY69	1,0061	-15,75	0,01
LEMON69	1,00655	-14,96	3
PEAR69	1,01	-14,81	61,77
CEDAR138	1,0103	-14,68	63,74



Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
PINE138	1,01123	-14,84	19,12
SLACK138	1,01323	-14,84	33,38
OAK69	1,01323	-15,01	35,6
PLUM138	1,01357	-14,43	0
ELM138	1,01582	-13,73	32,73
PEACH69	1,02	-15,4	3,7
REDBUD69	1,02	-15,01	44,28
PEAR138	1,02	-14,44	29,34
BIRCH69	1,02	-14,59	1,86
PINE345	1,02137	-14,76	45,07
OAK345	1,0248	-14,76	4,27
SLACK345	1,03	-14,78	0
ELM345	1,03	-12,47	78,95

**Tablica 2.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za prvu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	13,73
ELM345	150	15,92
ELM345	150	15,92
SLACK345	-123,1	123,55
PEACH69	20	42,8
CEDAR69	16	-120,52
BIRCH69	42,09	22,86
PEAR138	140	154,43
PEAR69	106,08	81,86

**Tablica 3.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za drugu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
LOCUST69	0,98471	-16,54	0,01
MAPLE69	0,99301	-15,18	0
WILLOW69	0,99386	-15,7	18,93
WALNUT69	0,99492	-15,15	86,88
PALM69	0,99601	-16,21	8,81
ASH138	0,99889	-15,01	12,41
OAK138	0,99976	-15,07	0
CEDAR69	1	-15,56	35,05
APPLE69	1,00002	-16,09	0
BUCKEYE69	1,00051	-15,99	21,42
TULIP138	1,00075	-14,84	20,56
ORANGE69	1,00134	-15,01	21,39
PEACH138	1,00145	-14,92	17,52
SPRUCE69	1,00207	-15,4	5,83
MAPLE69	1,00231	-15,18	0
LEMON138	1,00451	-14,6	3,44
POPLAR69	1,00504	-15,47	12,26
PECAN69	1,00583	-14,84	78,63
OLIVE69	1,00595	-15,44	28,14
CHERRY69	1,007	-16,4	0,01
LEMON69	1,00795	-14,84	1,51
CEDAR138	1,00997	-14,49	28,85
PEAR69	1,01	-14,89	62,44
PINE69	1,01199	-15,46	31,49
PINE138	1,01296	-14,94	3,05
OAK69	1,01343	-15,25	34,72
PLUM138	1,01862	-14,15	0
ELM138	1,01951	-13,33	17,24
PEACH69	1,02	-15,75	2,13
REDBUD69	1,02	-15,84	31,5

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
PEAR138	1,02	-14,28	32,68
BIRCH69	1,02	-14,69	0,91
SLACK138	1,0202	-14,74	9,64
OAK345	1,02466	-14,79	4,19
PINE345	1,02472	-14,79	9,95
SLACK345	1,03	-14,78	0
ELM345	1,03	-11,86	28,94

**Tablica 4.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za drugu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	18,14
ELM345	150	8,12
ELM345	150	8,12
SLACK345	-156,07	82,2
PEACH69	20	39,48
CEDAR69	16	-129,87
BIRCH69	42,09	17,37
PEAR138	140	160,71
PEAR69	106,08	77,47

**Tablica 5.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za treću iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
LOCUST69	0,9837	-16,79	0,01
MAPLE69	0,98974	-15,41	0

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
WALNUT69	0,99166	-15,38	88,02
WILLOW69	0,99386	-15,95	11,62
PALM69	0,99526	-16,61	4,68
ASH138	0,99925	-15,17	11,82
OAK138	0,99987	-15,23	0
CEDAR69	1	-15,72	35,53
ORANGE69	1,00131	-15,14	18,71
APPLE69	1,00163	-16,49	0
SPRUCE69	1,0019	-15,56	4,1
BUCKEYE69	1,00211	-16,4	15,99
PEACH138	1,00212	-15,06	12,35
MAPLE69	1,00225	-15,32	0
TULIP138	1,00283	-14,81	16,08
POPLAR69	1,00326	-15,76	10,52
PECAN69	1,00582	-14,95	78,51
OLIVE69	1,00608	-15,79	20,3
LEMON138	1,00645	-14,53	2,08
CHERRY69	1,00706	-16,84	0
LEMON69	1,00943	-14,85	2,57
CEDAR138	1,00977	-14,41	8,94
PEAR69	1,01	-14,97	66,87
OAK69	1,01338	-15,48	31,63
PINE69	1,01348	-15,84	18,81
PINE138	1,01355	-15,02	0,87
PEACH69	1,02	-16	1,51
REDBUD69	1,02	-16,36	24,56
PEAR138	1,02	-14,22	34,17
BIRCH69	1,02	-14,85	1,54
PLUM138	1,02041	-14,02	0
ELM138	1,02127	-13,15	8,48

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
SLACK138	1,02203	-14,68	3,21
OAK345	1,02468	-14,82	4,65
PINE345	1,02522	-14,82	5,92
SLACK345	1,03	-14,78	0
ELM345	1,03	-11,64	12,64

**Tablica 6.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za treću iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	21,27
ELM345	150	4,5
ELM345	150	4,5
SLACK345	-162,54	74,61
PEACH69	20	37,8
CEDAR69	16	-133,16
BIRCH69	42,09	15,21
PEAR138	140	164,62
PEAR69	106,08	68,76

**Tablica 7.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za četvrtu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
LOCUST69	0,98343	-16,96	0
MAPLE69	0,98669	-15,65	0
WALNUT69	0,98861	-15,62	87,72
WILLOW69	0,99386	-16,1	8,79

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
PALM69	0,99526	-16,84	3,05
ASH138	0,99957	-15,32	10,43
OAK138	0,99998	-15,38	0
CEDAR69	1	-15,83	35,76
ORANGE69	1,00111	-15,26	17,19
POPLAR69	1,00156	-16	9,55
SPRUCE69	1,00175	-15,7	3,16
MAPLE69	1,00207	-15,46	0
PEACH138	1,00263	-15,17	9,52
APPLE69	1,00291	-16,78	0
BUCKEYE69	1,0034	-16,72	11,64
TULIP138	1,00447	-14,79	12,07
PECAN69	1,00575	-15,05	78,44
OLIVE69	1,00603	-16,05	15,28
CHERRY69	1,00702	-17,14	0
LEMON138	1,00792	-14,51	2,2
CEDAR138	1,00966	-14,39	3,41
PEAR69	1,01	-15,07	69,7
LEMON69	1,01068	-14,9	2,47
OAK69	1,01342	-15,69	28,3
PINE138	1,01383	-15,08	2,57
PINE69	1,01445	-16,06	12,63
PEACH69	1,02	-16,19	1,17
REDBUD69	1,02	-16,72	20,54
PEAR138	1,02	-14,21	35,04
BIRCH69	1,02	-15	1,47
PLUM138	1,0212	-13,97	0
ELM138	1,02215	-13,08	4,58
SLACK138	1,02267	-14,67	1,38
OAK345	1,02466	-14,86	4,3

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
PINE345	1,02538	-14,84	4,6
SLACK345	1,03	-14,78	0
ELM345	1,03	-11,54	5,6

**Tablica 8.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za četvrtu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	23,22
ELM345	150	2,69
ELM345	150	2,69
SLACK345	-161,15	72
PEACH69	20	37,06
CEDAR69	16	-134,81
BIRCH69	42,09	13,97
PEAR138	140	166,98
PEAR69	106,08	64,98

**Tablica 9.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za petu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
LOCUST69	0,98344	-17,08	0
MAPLE69	0,98389	-15,9	0
WALNUT69	0,98582	-15,87	86,49
WILLOW69	0,99386	-16,22	7,62
PALM69	0,9955	-16,99	2,35
ASH138	0,99984	-15,45	9,28

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
POPLAR69	0,99997	-16,21	8,96
CEDAR69	1	-15,93	35,92
OAK138	1,00004	-15,52	0
ORANGE69	1,0009	-15,38	16,07
SPRUCE69	1,00162	-15,82	2,64
MAPLE69	1,00187	-15,58	0
PEACH138	1,00302	-15,27	7,96
APPLE69	1,00387	-17	0
BUCKEYE69	1,00434	-16,96	8,63
PECAN69	1,00566	-15,15	78,54
TULIP138	1,00572	-14,79	10,25
OLIVE69	1,00598	-16,24	12,1
CHERRY69	1,00699	-17,36	0
LEMON138	1,00904	-14,52	2,18
CEDAR138	1,0096	-14,41	10,48
PEAR69	1,01	-15,16	71,52
LEMON69	1,01163	-14,97	2,13
OAK69	1,01339	-15,87	25,03
PINE138	1,01402	-15,14	3,42
PINE69	1,01517	-16,21	9,39
PEACH69	1,02	-16,35	0,98
REDBUD69	1,02	-16,97	18,15
PEAR138	1,02	-14,24	35,55
BIRCH69	1,02	-15,14	1,27
PLUM138	1,02164	-13,95	0
ELM138	1,02269	-13,05	3,26
SLACK138	1,02296	-14,67	1,28
OAK345	1,02464	-14,89	3,83
PINE345	1,02545	-14,86	3,99
SLACK345	1,03	-14,78	0



Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
ELM345	1,03	-11,49	2,06

**Tablica 10** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za petu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	24,4
ELM345	150	1,59
ELM345	150	1,59
SLACK345	-156,97	70,63
PEACH69	20	36,89
CEDAR69	16	-135,82
BIRCH69	42,09	13,13
PEAR138	140	168,41
PEAR69	106,08	63,57

**Tablica 11.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za desetu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
MAPLE69	0,97358	-17,14	0
WALNUT69	0,97553	-17,11	74,68
LOCUST69	0,9841	-17,57	0
WILLOW69	0,99386	-16,69	6,66
POPLAR69	0,99397	-17,18	7,54
PALM69	0,99661	-17,45	1,62
OAK138	0,99959	-16,02	0
CEDAR69	1	-16,39	36,44
ASH138	1,0001	-15,96	6,71

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
ORANGE69	1,00019	-15,9	13,42
MAPLE69	1,00108	-16,13	0
SPRUCE69	1,00129	-16,37	1,95
PEACH138	1,00378	-15,72	5,87
PECAN69	1,00538	-15,65	77,44
APPLE69	1,00554	-17,61	0
BUCKEYE69	1,00561	-17,67	3,72
OLIVE69	1,00589	-16,83	7,48
CHERRY69	1,00693	-18,02	0
TULIP138	1,00853	-15,04	11,51
CEDAR138	1,00955	-14,7	22
PEAR69	1,01	-15,66	73,08
LEMON138	1,01151	-14,76	1,81
OAK69	1,0124	-16,57	17,1
LEMON69	1,01368	-15,34	1,36
PINE138	1,01451	-15,37	4,23
PINE69	1,01694	-16,63	5,14
PEACH69	1,02	-16,98	0,73
REDBUD69	1,02	-17,7	14,77
PEAR138	1,02	-14,55	36,32
BIRCH69	1,02	-15,62	0,81
PLUM138	1,02256	-14,04	0
SLACK138	1,02357	-14,75	1,74
ELM138	1,02383	-13,15	4,09
OAK345	1,02442	-15	2,48
PINE345	1,02559	-14,93	3,13
SLACK345	1,03	-14,78	0
ELM345	1,03	-11,52	2,42

**Tablica 12.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za desetu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	26,02
ELM345	150	-0,68
ELM345	150	-0,68
SLACK345	-128,2	67,19
PEACH69	20	39,04
CEDAR69	16	-137,84
BIRCH69	42,09	11,34
PEAR138	140	170,85
PEAR69	106,08	63,15

**Tablica 13.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za dvadesetpetu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
MAPLE69	0,96809	-20,09	0
WALNUT69	0,97005	-20,06	43,04
LOCUST69	0,98544	-18,76	0
POPLAR69	0,98997	-19,47	4,71
WILLOW69	0,99386	-17,98	6,07
PALM69	0,99765	-18,46	1,37
OAK138	0,9988	-17,07	0
ASH138	0,99938	-17,08	4,85
ORANGE69	0,99979	-17,33	11,21
CEDAR69	1	-17,67	21,59
MAPLE69	1,00061	-17,56	0
SPRUCE69	1,00109	-17,81	1,38
PEACH138	1,00336	-16,89	4,16
BUCKEYE69	1,00518	-18,91	2,51

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
PECAN69	1,00522	-17,07	68,2
OLIVE69	1,00577	-18,13	6,31
APPLE69	1,006	-18,73	0
CHERRY69	1,00686	-19,39	0
TULIP138	1,00889	-16,03	10,02
CEDAR138	1,00961	-15,8	21,59
PEAR69	1,01	-17,06	64,7
OAK69	1,0115	-17,98	11,51
LEMON138	1,01185	-15,67	1,55
LEMON69	1,01436	-16,36	1,16
PINE138	1,01496	-15,97	3,69
PINE69	1,01827	-17,45	3,98
PEACH69	1,02	-18,46	0,52
REDBUD69	1,02	-19,15	13,62
PEAR138	1,02	-15,7	36,35
BIRCH69	1,02	-16,79	0,69
PLUM138	1,02302	-14,49	0
OAK345	1,02385	-15,23	1,71
SLACK138	1,02413	-15,06	1,55
ELM138	1,02421	-13,69	3,62
PINE345	1,02558	-15,12	2,62
SLACK345	1,03	-14,78	0
ELM345	1,03	-11,82	2,43

**Tablica 14.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za dvadesetpetu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	26,54
ELM345	150	-1,21

ELM345	150	-1,21
SLACK345	-45,15	63,05
PEACH69	20	40,06
CEDAR69	16	-139,95
BIRCH69	42,09	10,79
PEAR138	140	172,55
PEAR69	106,08	60,08

**Tablica 15.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za pedesetu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
MAPLE69	0,98155	-22,34	0
WALNUT69	0,98348	-22,3	16,76
LOCUST69	0,98764	-20,3	0
WILLOW69	0,99386	-19,7	4,15
POPLAR69	0,99672	-21,42	1,97
PALM69	0,99961	-19,7	0,92
CEDAR69	1	-19,37	39,73
ORANGE69	1,00066	-19,19	7,39
ASH138	1,00078	-18,25	2,52
OAK138	1,00115	-18,15	0
SPRUCE69	1,00152	-19,6	0,7
MAPLE69	1,0021	-19,35	0
PEACH138	1,00332	-18,12	2,1
PECAN69	1,00546	-18,95	46,7
OLIVE69	1,00565	-19,76	4,04
CHERRY69	1,0068	-21,01	0
TULIP138	1,00878	-17,15	5,51
BUCKEYE69	1,00887	-20,19	1,38
APPLE69	1,00964	-19,91	0

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
CEDAR138	1,00978	-17,31	14,92
PEAR69	1,01	-18,9	44,48
LEMON138	1,01177	-16,74	0,92
LEMON69	1,01504	-17,59	0,73
OAK69	1,01585	-19,37	5,85
PINE138	1,01619	-16,71	2,33
PEACH69	1,02	-19,94	0,25
REDBUD69	1,02	-20,74	12,23
PEAR138	1,02	-17,24	35,54
BIRCH69	1,02	-18,25	0,43
PINE69	1,02092	-18,41	2,43
PLUM138	1,02348	-15,02	0
OAK345	1,02391	-15,46	0,89
ELM138	1,02445	-14,33	2
SLACK138	1,02494	-15,42	0,93
PINE345	1,02573	-15,34	1,64
SLACK345	1,03	-14,78	0
ELM345	1,03	-12,19	1,36

**Tablica 16.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za pedesetu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	27,39
ELM345	150	-1,3
ELM345	150	-1,3
SLACK345	51,17	52,53
PEACH69	20	27,26
CEDAR69	16	-142,27
BIRCH69	42,09	10,32

PEAR138	140	173,3
PEAR69	106,08	45,48

**Tablica 17.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za stotu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
LOCUST69	0,98986	-21,86	0
MAPLE69	0,9923	-23,58	0
WILLOW69	0,99386	-21,48	1,54
WALNUT69	0,99421	-23,55	4,36
CEDAR69	1	-21,11	42,14
PALM69	1,00136	-20,92	0,34
ORANGE69	1,00207	-21,1	2,7
ASH138	1,00218	-19,22	0,85
SPRUCE69	1,00232	-21,37	0,24
POPLAR69	1,00252	-22,69	0,59
OAK138	1,0033	-19,03	0
PEACH138	1,00338	-19,15	0,72
MAPLE69	1,00404	-21,14	0
OLIVE69	1,00551	-21,37	1,47
PECAN69	1,00592	-20,89	17,42
CHERRY69	1,00674	-22,53	0
TULIP138	1,00882	-18,12	1,86
CEDAR138	1,00994	-18,87	5,57
PEAR69	1,01	-20,81	16,67
LEMON138	1,0118	-17,66	0,32
BUCKEYE69	1,01244	-21,25	0,47
APPLE69	1,013	-20,92	0
LEMON69	1,01592	-18,7	0,26

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
PINE138	1,01725	-17,41	0,84
OAK69	1,01975	-20,48	1,94
PEACH69	1,02	-21,18	0,09
REDBUD69	1,02	-22,17	11,16
PEAR138	1,02	-18,85	34,5
BIRCH69	1,02	-19,64	0,15
PINE69	1,02333	-19,32	0,87
PLUM138	1,02389	-15,48	0
OAK345	1,02399	-15,66	0,29
ELM138	1,02467	-14,88	0,68
SLACK138	1,02564	-15,77	0,33
PINE345	1,02582	-15,55	0,59
SLACK345	1,03	-14,78	0
ELM345	1,03	-12,5	0,46

**Tablica 18.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za stotu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	28,28
ELM345	150	-1,32
ELM345	150	-1,32
SLACK345	138	44,01
PEACH69	20	15,61
CEDAR69	16	-144,22
BIRCH69	42,09	9,7
PEAR138	140	174,59
PEAR69	106,08	28,12



**Tablica 19.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za dvjestopedesetu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
LOCUST69	0,99093	-22,74	0
WILLOW69	0,99386	-22,49	0,09
MAPLE69	0,99531	-24,33	0
WALNUT69	0,99721	-24,29	0,27
CEDAR69	1	-22,11	43,48
PALM69	1,00204	-21,63	0,02
ASH138	1,00247	-19,77	0,05
SPRUCE69	1,00274	-22,39	0,01
ORANGE69	1,00276	-22,19	0,15
PEACH138	1,00322	-19,74	0,04
OAK138	1,00385	-19,54	0
POPLAR69	1,00412	-23,44	0,04
MAPLE69	1,00488	-22,15	0
OLIVE69	1,00543	-22,29	0,08
PECAN69	1,00615	-22	0,98
CHERRY69	1,0067	-23,4	0
TULIP138	1,00869	-18,67	0,11
CEDAR138	1,00999	-19,76	0,31
PEAR69	1,01	-21,9	0,94
LEMON138	1,01168	-18,18	0,02
BUCKEYE69	1,01358	-21,86	0,03
APPLE69	1,01416	-21,5	0
LEMON69	1,01632	-19,33	0,01
PINE138	1,01759	-17,81	0,05
PEACH69	1,02	-21,89	0
REDBUD69	1,02	-22,99	10,62
PEAR138	1,02	-19,77	34,07

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
BIRCH69	1,02	-20,44	0,01
OAK69	1,02095	-21,12	0,11
OAK345	1,02386	-15,77	0,02
PLUM138	1,02402	-15,75	0
PINE69	1,0243	-19,84	0,05
ELM138	1,02471	-15,19	0,04
PINE345	1,02577	-15,68	0,03
SLACK138	1,02591	-15,96	0,02
SLACK345	1,03	-14,78	0
ELM345	1,03	-12,68	0,03

**Tablica 20.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za dvjestopedesetu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	28,76
ELM345	150	-1,13
ELM345	150	-1,13
SLACK345	187,35	41,57
PEACH69	20	11,57
CEDAR69	16	-145,22
BIRCH69	42,09	9,47
PEAR138	140	175,93
PEAR69	106,08	19,84

**Tablica 21.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za petstotu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
LOCUST69	0,99099	-22,8	0
WILLOW69	0,99386	-22,55	0
MAPLE69	0,99549	-24,37	0
WALNUT69	0,9974	-24,34	0
CEDAR69	1	-22,16	43,55
PALM69	1,00208	-21,67	0
ASH138	1,00249	-19,8	0
SPRUCE69	1,00276	-22,45	0
ORANGE69	1,0028	-22,25	0
PEACH138	1,00321	-19,78	0
OAK138	1,00388	-19,57	0
POPLAR69	1,00422	-23,48	0
MAPLE69	1,00493	-22,22	0
OLIVE69	1,00542	-22,34	0
PECAN69	1,00616	-22,06	0,01
CHERRY69	1,0067	-23,45	0
TULIP138	1,00868	-18,7	0
CEDAR138	1,00999	-19,81	0
PEAR69	1,01	-21,96	0,01
LEMON138	1,01167	-18,21	0
BUCKEYE69	1,01364	-21,9	0
APPLE69	1,01423	-21,54	0
LEMON69	1,01635	-19,37	0
PINE138	1,01761	-17,84	0
PEACH69	1,02	-21,94	0
REDBUD69	1,02	-23,04	10,59
PEAR138	1,02	-19,82	34,05
BIRCH69	1,02	-20,48	0
OAK69	1,02102	-21,16	0
OAK345	1,02385	-15,77	0

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
PLUM138	1,02402	-15,76	0
PINE69	1,02435	-19,87	0
ELM138	1,02471	-15,21	0
PINE345	1,02577	-15,68	0
SLACK138	1,02592	-15,97	0
SLACK345	1,03	-14,78	0
ELM345	1,03	-12,69	0

**Tablica 22.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću Gauss-Seidel metode za petstotu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	28,79
ELM345	150	-1,12
ELM345	150	-1,12
SLACK345	190,31	41,44
PEACH69	20	11,33
CEDAR69	16	-145,28
BIRCH69	42,09	9,45
PEAR138	140	176,02
PEAR69	106,08	19,35

## PRILOG 2: Rezultati simulacije u programu PowerWorld za Newton-Raphson metodu

**Tablica 23.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću Newton-Raphson metode za prvu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
WILLOW69	1,00155	-21,72	4,98
LOCUST69	1,00197	-22,39	5,31
CEDAR69	1,00654	-21,32	3,47
PEACH138	1,00925	-19,54	0,09
ASH138	1,00955	-19,57	1,15
ORANGE69	1,0103	-21,74	6,84
SPRUCE69	1,01045	-21,94	3,61
OAK138	1,01115	-19,34	10,83
PALM69	1,01202	-21,32	2,45
OLIVE69	1,01287	-21,69	2,81
PECAN69	1,01288	-21,51	32,26
MAPLE69	1,01296	-21,72	2,35
MAPLE69	1,01306	-23,93	5,42
TULIP138	1,01362	-18,49	1,74
WALNUT69	1,01475	-23,88	7,77
CEDAR138	1,01502	-19,65	20,76
LEMON138	1,01604	-18	0,07
PEAR69	1,01687	-21,45	3,41
CHERRY69	1,01701	-22,95	5,82
POPLAR69	1,01712	-23,03	2,59
LEMON69	1,02034	-19,03	1,13
PINE138	1,02121	-17,68	0,53
PEAR138	1,02378	-19,7	6,71
BIRCH69	1,02427	-20,01	3,2

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
APPLE69	1,02457	-21,17	2,13
BUCKEYE69	1,02479	-21,5	3,72
OAK345	1,02492	-15,71	5,43
PLUM138	1,0257	-15,68	0,4
PINE345	1,02643	-15,62	7,6
ELM138	1,02653	-15,14	2,8
SLACK138	1,02715	-15,89	1,81
PEACH69	1,0273	-21,61	3,06
SLACK345	1,03	-14,78	0
REDBUD69	1,03024	-22,87	2,52
OAK69	1,03024	-20,73	12,91
ELM345	1,03066	-12,74	10,14
PINE69	1,03098	-19,56	2,85

**Tablica 24.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću Newton-Raphson metode za prvu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	36,16
ELM345	150	-2,52
ELM345	150	-2,52
SLACK345	172,23	25,02
PEACH69	20	5,7
CEDAR69	16	-160,59
BIRCH69	42,09	7,2
PEAR138	140	155,51
PEAR69	106,08	43,58

**Tablica 25.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću Newton-Raphson metode za drugu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
LOCUST69	0,99088	-22,73	0,04
WILLOW69	0,99386	-22,11	0,04
MAPLE69	0,99564	-24,39	0,02
WALNUT69	0,99754	-24,36	0,11
CEDAR69	1	-21,72	0,01
PALM69	1,0021	-21,64	0,02
ASH138	1,00248	-19,82	0,01
SPRUCE69	1,0026	-22,39	0,03
ORANGE69	1,00264	-22,16	0,06
PEACH138	1,00314	-19,81	0
OAK138	1,00391	-19,57	0,04
POPLAR69	1,00431	-23,53	0,03
MAPLE69	1,00478	-22,14	0,07
OLIVE69	1,00542	-22,16	0,02
PECAN69	1,00609	-21,96	0,25
CHERRY69	1,00668	-23,52	0,07
TULIP138	1,0086	-18,71	0,01
PEAR69	1,01	-21,86	0,15
CEDAR138	1,01035	-19,89	0,1
LEMON138	1,0116	-18,21	0
BUCKEYE69	1,01369	-21,89	0,03
APPLE69	1,01426	-21,53	0,02
LEMON69	1,0161	-19,33	0,01
PINE138	1,0177	-17,85	0
PEAR138	1,01999	-20	0,09
BIRCH69	1,02	-20,36	0,03
PEACH69	1,02	-22,01	0,03
REDBUD69	1,02001	-23,37	0,01
OAK69	1,02105	-21,15	0,1
OAK345	1,02386	-15,77	0,04

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
PLUM138	1,02402	-15,77	0
PINE69	1,02437	-19,87	0,02
ELM138	1,02469	-15,22	0,02
PINE345	1,02579	-15,69	0,05
SLACK138	1,02595	-15,98	0,01
ELM345	1,03	-12,7	0,07
SLACK345	1,03	-14,78	0

**Tablica 26.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću Newton-Raphson metode za drugu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	33,64
ELM345	150	-1,08
ELM345	150	-1,08
SLACK345	191,53	41,02
PEACH69	20	10,6
CEDAR69	16	-156,33
BIRCH69	42,09	9,68
PEAR138	140	177,59
PEAR69	106,08	22,65

**Tablica 27.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću Newton-Raphson metode za treću iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
LOCUST69	0,99086	-22,73	0
WILLOW69	0,99386	-22,11	0



Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
MAPLE69	0,9955	-24,39	0
WALNUT69	0,9974	-24,36	0
CEDAR69	1	-21,73	0
PALM69	1,00207	-21,64	0
ASH138	1,00246	-19,82	0
SPRUCE69	1,0026	-22,39	0
ORANGE69	1,00263	-22,16	0
PEACH138	1,00313	-19,81	0
OAK138	1,00388	-19,57	0
POPLAR69	1,00423	-23,53	0
MAPLE69	1,00477	-22,14	0
OLIVE69	1,00541	-22,16	0
PECAN69	1,00609	-21,97	0
CHERRY69	1,00665	-23,51	0
TULIP138	1,0086	-18,71	0
PEAR69	1,01	-21,86	0
CEDAR138	1,01036	-19,89	0
LEMON138	1,0116	-18,21	0
BUCKEYE69	1,01363	-21,89	0
APPLE69	1,01421	-21,53	0
LEMON69	1,0161	-19,33	0
PINE138	1,01769	-17,85	0
REDBUD69	1,02	-23,37	0
PEACH69	1,02	-22,01	0
PEAR138	1,02	-20	0
BIRCH69	1,02	-20,37	0
OAK69	1,02099	-21,15	0
OAK345	1,02385	-15,77	0
PLUM138	1,02402	-15,77	0
PINE69	1,02434	-19,87	0

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
ELM138	1,02468	-15,22	0
PINE345	1,02579	-15,69	0
SLACK138	1,02595	-15,98	0
SLACK345	1,03	-14,78	0
ELM345	1,03	-12,7	0

**Tablica 28.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću Newton-Raphson metode za treću iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	33,64
ELM345	150	-1,06
ELM345	150	-1,06
SLACK345	191,55	41,15
PEACH69	20	10,77
CEDAR69	16	-156,32
BIRCH69	42,09	9,72
PEAR138	140	177,58
PEAR69	106,08	22,83

**Tablica 29.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću Newton-Raphson metode za četvrtu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
LOCUST69	0,98979	-22,67	0
MAPLE69	0,99686	-24,37	0
CEDAR138	0,99782	-19,94	0
WALNUT69	0,99876	-24,34	0

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
PALM69	1,00025	-21,61	0
ASH138	1,0004	-19,8	0
OAK138	1,0009	-19,57	0
PEAR138	1,00116	-19,93	0
PEACH138	1,00251	-19,78	0
SPRUCE69	1,00259	-22,33	0
ORANGE69	1,00272	-22,1	0
CHERRY69	1,00445	-23,32	0
POPLAR69	1,00493	-23,49	0
MAPLE69	1,00514	-22,09	0
PECAN69	1,00609	-21,89	0
TULIP138	1,00814	-18,67	0
REDBUD69	1,00839	-22,98	0
PEAR69	1,01	-21,78	0
LEMON138	1,01119	-18,17	0
OLIVE69	1,01174	-22,16	0
WILLOW69	1,0121	-22,33	0
APPLE69	1,0138	-21,53	0
PINE138	1,01406	-17,86	0
BUCKEYE69	1,01413	-21,9	0
LEMON69	1,01569	-19,24	0
CEDAR69	1,01812	-21,95	0
PEACH69	1,02	-21,96	0,01
BIRCH69	1,02	-20,23	0
PINE69	1,02176	-19,86	0
OAK69	1,02301	-21,15	0
OAK345	1,02321	-15,77	0
PLUM138	1,02331	-15,76	0
ELM138	1,02438	-15,2	0
SLACK138	1,02467	-15,98	0

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
PINE345	1,0247	-15,69	0
SLACK345	1,03	-14,78	0
ELM345	1,03	-12,69	0

**Tablica 30.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću Newton-Raphson metode za četvrtu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	5
ELM345	150	-0,46
ELM345	150	-0,46
SLACK345	190,85	57,93
PEACH69	20	25,75
CEDAR69	16	-14
BIRCH69	42,09	1,69
PEAR138	140	45
PEAR69	106,08	10,16

### PRILOG 3: Rezultati simulacije u programu PowerWorld za Fast-Decoupled metodu

**Tablica 31.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću metode brzog razdvajanja tokova snaga za prvu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
LOCUST69	0,99097	-22,94	0,13
WILLOW69	0,99339	-22,39	5,16
MAPLE69	0,99713	-24,37	12,74
WALNUT69	0,99969	-24,32	9,82
CEDAR69	1	-21,94	1,92
PALM69	1,002	-21,83	3,17
PEACH138	1,0035	-19,92	3,23
ASH138	1,00362	-19,86	0,56
OAK138	1,00555	-19,57	7,05
POPLAR69	1,00656	-23,41	6,76
OLIVE69	1,00768	-22,13	12,15
SPRUCE69	1,00798	-22,38	2,56
TULIP138	1,00898	-18,84	1,76
ORANGE69	1,00905	-22,15	1,06
CHERRY69	1,00924	-23,26	10,56
CEDAR138	1,00973	-20,19	51,79
PEAR69	1,01	-22,1	244,6
MAPLE69	1,01064	-22,11	12,74
LEMON138	1,01201	-18,33	0,37
PECAN69	1,01272	-21,98	241,29
APPLE69	1,01503	-21,59	5,32
BUCKEYE69	1,01583	-21,85	3,24
LEMON69	1,01713	-19,51	2,52
PINE138	1,01809	-17,87	3,44

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
PEACH69	1,02	-22,11	12,55
REDBUD69	1,02	-23,25	0,84
PEAR138	1,02	-20,15	40,97
BIRCH69	1,02	-20,82	14,24
OAK69	1,02362	-21,05	11,34
PLUM138	1,02411	-15,79	1,04
OAK345	1,02436	-15,67	13,81
ELM138	1,02483	-15,23	0,97
PINE69	1,02499	-19,9	3,59
PINE345	1,02597	-15,62	16,67
SLACK138	1,02611	-15,97	1,67
SLACK345	1,03	-14,78	0
ELM345	1,03	-12,66	5,81

**Tablica 32.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću metode brzog razdvajanja tokova snaga za prvu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	29,44
ELM345	150	-1,33
ELM345	150	-1,33
SLACK345	167,41	37,75
PEACH69	20	6,65
CEDAR69	16	-156,42
BIRCH69	42,09	13,15
PEAR138	140	175,62
PEAR69	106,08	31,8

**Tablica 33.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću metode brzog razdvajanja tokova snaga za drugu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
LOCUST69	0,99089	-22,72	0,04
WILLOW69	0,99385	-22,09	0,06
MAPLE69	0,99569	-24,34	0,01
WALNUT69	0,99759	-24,31	0,13
CEDAR69	1	-21,71	0,59
PALM69	1,0021	-21,63	0,13
ASH138	1,00261	-19,78	0,01
SPRUCE69	1,003	-22,35	1,03
PEACH138	1,00323	-19,77	0,11
ORANGE69	1,00328	-22,13	4,34
OAK138	1,00406	-19,55	0,46
POPLAR69	1,00432	-23,47	0,1
MAPLE69	1,00538	-22,1	0,46
OLIVE69	1,00549	-22,14	0,22
PECAN69	1,00639	-21,95	4,97
CHERRY69	1,00669	-23,45	0,03
TULIP138	1,00869	-18,68	0,03
PEAR69	1,01	-21,86	12,18
CEDAR138	1,01037	-19,87	0,24
LEMON138	1,01169	-18,19	0,18
BUCKEYE69	1,01386	-21,86	0,03
APPLE69	1,01441	-21,5	0,12
LEMON69	1,01627	-19,31	0,36
PINE138	1,01774	-17,84	0,07
PEACH69	1,02	-21,94	0,99
REDBUD69	1,02	-23,27	1,51
PEAR138	1,02	-19,98	0,144

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
BIRCH69	1,02	-20,39	1,51
OAK69	1,02125	-21,11	0,7
OAK345	1,02389	-15,77	0,61
PLUM138	1,02405	-15,75	0,03
PINE69	1,02442	-19,85	0,33
ELM138	1,02472	-15,2	0,19
PINE345	1,0258	-15,69	0,5
SLACK138	1,02597	-15,97	0
SLACK345	1,03	-14,78	0
ELM345	1,03	-12,69	0,16

**Tablica 34.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću metode brzog razdvajanja tokova snaga za drugu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	32,9
ELM345	150	-1,15
ELM345	150	-1,15
SLACK345	190,59	40,76
PEACH69	20	10,01
CEDAR69	16	-156,66
BIRCH69	42,09	10,23
PEAR138	140	177,5
PEAR69	106,08	23,39

**Tablica 35.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću metode brzog razdvajanja tokova snaga za treću iteraciju.



Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
LOCUST69	0,99087	-22,73	0,01
WILLOW69	0,99386	-22,11	0
MAPLE69	0,99551	-24,39	0,01
WALNUT69	0,99741	-24,35	0
CEDAR69	1	-21,72	0,11
PALM69	1,00207	-21,64	0,01
ASH138	1,00247	-19,81	0
SPRUCE69	1,00263	-22,39	0,14
ORANGE69	1,00267	-22,16	0,28
PEACH138	1,00314	-19,81	0,02
OAK138	1,00389	-19,57	0,07
POPLAR69	1,00423	-23,52	0,01
MAPLE69	1,0048	-22,14	0,04
OLIVE69	1,00542	-22,16	0,02
PECAN69	1,0061	-21,97	0,22
CHERRY69	1,00666	-23,5	0,03
TULIP138	1,00861	-18,71	0
PEAR69	1,01	-21,86	0,49
CEDAR138	1,01036	-19,89	0,02
LEMON138	1,01161	-18,21	0,02
BUCKEYE69	1,01364	-21,89	0
APPLE69	1,01422	-21,53	0
LEMON69	1,01612	-19,33	0,04
PINE138	1,01769	-17,85	0,02
PEACH69	1,02	-22	0,18
REDBUD69	1,02	-23,35	0,25
PEAR138	1,02	-20	0,02
BIRCH69	1,02	-20,37	0,22
OAK69	1,021	-21,14	0,04
OAK345	1,02385	-15,77	0,04

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
PLUM138	1,02402	-15,77	0
PINE69	1,02435	-19,87	0,02
ELM138	1,02469	-15,21	0,02
PINE345	1,02579	-15,69	0,01
SLACK138	1,02595	-15,98	0
SLACK345	1,03	-14,78	0
ELM345	1,03	-12,7	0

**Tablica 36.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću metode brzog razdvajanja tokova snaga za treću iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	33,51
ELM345	150	-1,07
ELM345	150	-1,07
SLACK345	191,45	41,13
PEACH69	20	10,7
CEDAR69	16	-156,37
BIRCH69	42,09	9,8
PEAR138	140	177,58
PEAR69	106,08	22,9

**Tablica 37.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću metode brzog razdvajanja tokova snaga za četvrtu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
LOCUST69	0,99086	-22,73	0
WILLOW69	0,99386	-22,11	0

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
MAPLE69	0,9955	-24,39	0
WALNUT69	0,9974	-24,36	0
CEDAR69	1	-21,73	0,02
PALM69	1,00207	-21,64	0
ASH138	1,00246	-19,81	0
SPRUCE69	1,0026	-22,39	0,01
ORANGE69	1,00263	-22,16	0
PEACH138	1,00313	-19,81	0
OAK138	1,00388	-19,57	0
POPLAR69	1,00423	-23,53	0
MAPLE69	1,00477	-22,14	0
OLIVE69	1,00541	-22,16	0,01
PECAN69	1,00609	-21,97	0
CHERRY69	1,00665	-23,51	0
TULIP138	1,0086	-18,71	0
PEAR69	1,01	-21,86	0,05
CEDAR138	1,01036	-19,89	0
LEMON138	1,0116	-18,21	0
BUCKEYE69	1,01363	-21,89	0
APPLE69	1,01421	-21,53	0
LEMON69	1,01611	-19,33	0,01
PINE138	1,01769	-17,85	0
PEACH69	1,02	-22,01	0,01
REDBUD69	1,02	-23,37	0,05
PEAR138	1,02	-20	0
BIRCH69	1,02	-20,37	0,03
OAK69	1,02099	-21,15	0
OAK345	1,02385	-15,77	0
PLUM138	1,02402	-15,77	0
PINE69	1,02434	-19,87	0

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
ELM138	1,02468	-15,22	0
PINE345	1,02579	-15,69	0
SLACK138	1,02595	-15,98	0
SLACK345	1,03	-14,78	0
ELM345	1,03	-12,7	0

**Tablica 38.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću metode brzog razdvajanja tokova snaga za četvrtu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	33,62
ELM345	150	-1,06
ELM345	150	-1,06
SLACK345	191,54	41,15
PEACH69	20	10,76
CEDAR69	16	-156,33
BIRCH69	42,09	9,73
PEAR138	140	177,58
PEAR69	106,08	22,84

**Tablica 39.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću metode brzog razdvajanja tokova snaga za petu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
LOCUST69	0,98968	-22,68	0
MAPLE69	0,99476	-24,36	0
WALNUT69	0,99667	-24,33	0
CEDAR138	0,99788	-19,95	0,01

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
PALM69	1,00003	-21,62	0
PEAR138	1,0012	-19,94	0
ASH138	1,00167	-19,79	0
ORANGE69	1,00245	-22,09	0,01
SPRUCE69	1,00255	-22,33	0
OAK138	1,00275	-19,56	0
PEACH138	1,00288	-19,78	0
POPLAR69	1,00384	-23,49	0
MAPLE69	1,00445	-22,08	0
CHERRY69	1,00445	-23,33	0
PECAN69	1,00604	-21,9	0,01
TULIP138	1,00837	-18,67	0
REDBUD69	1,00839	-22,98	0
PEAR69	1,01	-21,79	0,01
LEMON138	1,01139	-18,17	0
OLIVE69	1,01175	-22,16	0
BUCKEYE69	1,01193	-21,88	0
WILLOW69	1,01213	-22,34	0
APPLE69	1,01214	-21,52	0
PINE138	1,01423	-17,86	0
LEMON69	1,01581	-19,25	0
CEDAR69	1,01815	-21,96	0,01
OAK69	1,01991	-21,12	0
PEACH69	1,02	-21,97	0
BIRCH69	1,02	-20,23	0,01
PINE69	1,02145	-19,86	0
PLUM138	1,0234	-15,76	0
OAK345	1,02361	-15,77	0
ELM138	1,02448	-15,2	0
SLACK138	1,02474	-15,98	0

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
PINE345	1,02475	-15,69	0
SLACK345	1,03	-14,78	0
ELM345	1,03	-12,69	0

**Tablica 40.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću metode brzog razdvajanja tokova snaga za petu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	5
ELM345	150	-0,66
ELM345	150	-0,66
SLACK345	190,85	54,87
PEACH69	20	25,97
CEDAR69	16	-14
BIRCH69	42,09	1,55
PEAR138	140	45
PEAR69	106,08	13,31

## PRILOG 4: Rezultati simulacije u programu PowerWorld za DC metodu

**Tablica 41.** Rezultati na sabirnicama dobiveni nakon simulacije pomoću DC metode za prvu iteraciju.

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
OAK345	1	-15,82	0
ASH138	1	-19,88	0
POPLAR69	1	-23,62	0
PINE69	1	-20,01	0
OAK69	1	-21,17	0
PALM69	1	-21,95	0
REDBUD69	1	-23,02	0
PECAN69	1	-22,09	0
ORANGE69	1	-22,27	0
BUCKEYE69	1	-21,97	0
WALNUT69	1	-24,48	0
APPLE69	1	-21,7	0
OLIVE69	1	-22,19	0
WILLOW69	1	-22,43	0
SPRUCE69	1	-22,52	0
MAPLE69	1	-22,23	0
ELM345	1	-12,53	0
ELM138	1	-15,15	0
TULIP138	1	-18,76	0
SLACK345	1	-14,78	0
LEMON138	1	-18,25	0
LEMON69	1	-19,46	0
CHERRY69	1	-23,37	0
SLACK138	1	-16	0
MAPLE69	1	-24,54	0
PINE345	1	-15,73	0

Sabirnice	Napon [p.u.]	Napon [°]	Razlika u snazi između iteracija [MVA]
PINE138	1	-17,95	0
OAK138	1	-19,64	0
PEACH138	1	-19,84	0
PEACH69	1	-21,96	0
CEDAR138	1	-20,09	0
CEDAR69	1	-21,98	0
BIRCH69	1	-20,34	0
PEAR138	1	-20,04	0
PEAR69	1	-21,97	0
LOCUST69	1	-23,08	0
PLUM138	1	-15,75	0

**Tablica 42.** Rezultati na generatorima dobiveni nakon simulacije pomoću DC metode za prvu iteraciju.

Generatori	Djelatna snaga [MW]	Jalova snaga [MVAR]
REDBUD69	10	0
ELM345	150	0
ELM345	150	0
SLACK345	180,1	0
PEACH69	20	0
CEDAR69	16	0
BIRCH69	42,09	0
PEAR138	140	0
PEAR69	106,08	0