

**ANALIZA PRORAČUNA OPTIMALNE TOPOLOGIJE PRENOSNIH MREŽA ZA POTREBE ELIMINACIJE PREOPTEREĆENJA****ANALYSIS OF OPTIMAL TOPOLOGY CALCULATION FOR RESOLVING OVERLOADS IN TRANSMISSION NETWORKS**Ana Spasojević, Savo Đukić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – U radu su opisani osnovni pojmovi vezani za optimalnu promjenu topologije prenosnih mreža (OPTPM). Takođe, teorijski su opisana dva algoritma OPTPM-a. Oba algoritma su verifikovana nad testnom mrežom i izneti su zaključci o dobijenim rezultatima.

**Ključne riječi:** Optimalna promjena topologije, Preopterećenje elemenata, Prenosna mreža.

**Abstract** – The paper describes basic concepts about the optimal topology calculation for transmission networks. Also, two algorithms for optimal topology calculation for transmission networks are described theoretically. Both algorithms are verified using test network and obtained conclusions are provided.

**Keywords:** Optimal topology change, Element overload, Transmission network.

**1. UVOD**

Nakon narušavanja ograničenja opterećenja elemenata, da bi se elektroenergetski sistem (EES) preveo u stabilan režim rada, operatori posežu za upravljačkim akcijama. Dostupne upravljačke akcije su promjena proizvodnje, rasterećenje potrošnje i akcije nad prenosnom mrežom [1].

Posmatranjem rada operatora primjećeno je da oni koriste rekonfiguraciju mreže za potrebe poboljšanja stanja u mreži. Na osnovu iskustva određuju da li promjena topologije može dovesti do poboljšanja stanja u mreži. Dakle, ukoliko se već promjena topologije aktivno koristi u svrhe razrješenja preopterećenja, postoji osnova za uvođenjem proračuna koji bi omogućili da se donesu bolje odluke prilikom upravljanja [2].

U drugom poglavlju ovog rada su predstavljena dva algoritma OPTPM-a. U trećem poglavlju su upoređeni rezultati oba algoritma nad testnom mrežom. Na kraju rada je dat zaključak, kao i korišćena literatura.

**2. OPTPM**

Proračun OPTPM-a predstavlja način da se promjenom uklopnog stanja elemenata mreže popravi stanje sistema.

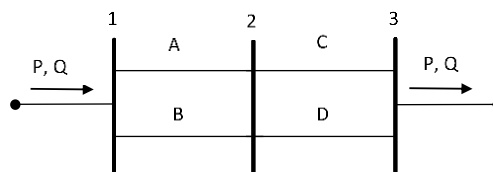
**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Savo Đukić, docent.

Prilikom proračuna se mora voditi računa da, tokom izvršavanja proračunate sekvence manipulacija rasklopnom opremom, svako novo stanje mora biti stabilno i ne smije dovoditi do novih narušavanja sigurnosti sistema [3].

**2.1. Uticaj izmjene topologije na tokove snaga**

Analizira se isječak mreže prikazan na Slici 2.1.1. Isječak ove mreže se sastoji od četiri grane od kojih su grane označene sa D i C paralelne, kao i grane označene sa A i B. Navedene grane su povezane sabirnicama označenim brojevima 1, 2 i 3. Pretpostaviće se da je u grani C došlo do preopterećenja.



Slika. 2.1.1. – Dio EES-a

Isključenjem grane D bi dovelo do povećanja toka kroz granu C i dovelo bi do još većeg preopterećenja te grane jer bi ona morala prenositi sav tok od sabirnice 2 ka sabirnici 3. Međutim, ukoliko bi isključili granu B, povećala bi se impedansa između čvorova 1 i 2 i smanjila bi se vrijednost struje od čvora 1 do čvora 2.

Ovaj primjer je veoma jednostavan i nije teško zaključiti koje grane bi mogle biti isključene da bi došlo do rasterećenja opterećene grane. Međutim, EES su veoma komplikovani i u njima je teško na ovakav način zaključiti kojim granama je potrebno promijeniti ukloпно stanje [4].

**2.2. Proračuni OPTPM**

Postoji više pristupa optimizaciji promjene topologije prenosne mreže. Oni se mogu klasifikovati po tome [3] [4]:

- koji elementi se uzimaju kao resursi (transformatori, sekcije, prekidači spojnog polja, otočni elementi poput kondenzatora i potrošača),
- da li su zasnovani na provjeri svih mogućih stanja, izmjeni matrice admitansi (impedansi) ili na simuliranju isključenja pomoću injektiranja struja (snaga), i

- da li kao resurse posmatraju elemente iz cijele mreže ili su resursi samo izabrani elementi.

U narednom poglavlju će biti predstavljena dva proračuna koja traže moguća razrješenja prekoračenja strujnih ograničenja, a kao resursi se koriste grane.

### 2.3. Proračun OPTPM zasnovan na tokovima snaga

Ovaj algoritam se zasniva na simulaciji promjene uklopnog stanja svakog resursa pojedinačno, a zatim se vrši upoređivanje broja prekoračenja nakon izmjene uklopnog stanja svakog od resursa.

Upoređivanjem broja prekoračenja za svaki od resursa, bira se onaj resurs koji će dovesti do najvećeg poboljšanja stanja. Kada se izabere, mreža sa promjenjenim stanjem izabranog resursa postaje nova početna mreža.

Za novu početnu mrežu se vrši simulacija promjene uklopnih stanja ostalih resursa i ponovo se bira resurs koji dovodi do najvećeg poboljšanja.

Ovaj proces se vrši iterativno sve dok se ne dođe do mreže bez prekoračenja ograničenja ili do stanja iz kojeg se promjenom uklopnog stanja elemenata ne može preći u stanje sa manjim brojem prekoračenja ograničenja.

Funkcija cilja je definisana sledećim izrazom:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^N \left( \frac{I_i^{calc}}{I_i^{nom}} \right)^2 + \sum_{j=1}^M \left( \frac{S_j^{calc}}{S_j^{nom}} \right)^2 \right\} \quad (2.3.1)$$

uz ograničenje:

$$Viol_p < Viol_k \quad (2.3.2)$$

gdje su:

$$Viol_b = \sum_{l=1}^L Viol_{b,l}^{Sect} + \sum_{r=1}^R Viol_{b,r}^{Node} + \sum_{t=1}^T Viol_{b,t}^{GenQ}, b \in p, k. \quad (2.3.3)$$

$N$ - broj vodova,

$I_i^{calc}$  - vrijednost modula struje voda  $i$ ,

$I_i^{nom}$  - vrijednost nominalne struje voda  $i$ ,

$M$ - broj transformatora,

$S_j^{calc}$  - vrijednost modula prividne snage transformatora  $j$ ,

$S_j^{nom}$  - vrijednost nominalne prividne snage transformatora  $j$ ,

$Viol_p$  - broj prekoračenja ograničenja u početnom stanju,

$Viol_k$  - broj prekoračenja ograničenja u novom stanju,

$L$ - broj svih grana,

$p, k$ - indeksi početnog i novog stanja, respektivno,

$Viol_b$  - broj prekoračenja ograničenja,

$Viol_{b,l}^{Sect}$  - funkcija koja ima vrijednost 1 ukoliko je prekoračeno ograničenje grane  $l$ , a vrijednost 0 ukoliko nije,

$R$ - broj svih čvorova,

$Viol_{b,r}^{Sect}$  - funkcija koja ima vrijednost 1 ukoliko su prekoračena ograničenja čvora  $r$ , a vrijednost 0 ukoliko nisu,

$T$ - broj svih generatora, i

$Viol_{b,t}^{Sect}$  - funkcija koja ima vrijednost 1 ukoliko su prekoračena ograničenja reaktivne snage generatora  $t$ , a vrijednost 0 ukoliko nisu.

Prednost ovog proračuna predstavlja to što se može koristiti za proračun boljeg stanja i u mreži u kojoj ima veći broj prekoračenja. Mane su što optimum do kog ovaj algoritam dolazi ne mora biti globalni. Takođe, vrijeme izvršavanja je veliko jer se za svaki od resursa simulira promjena topologije i vrši proračun tokova snaga, i tako u svakoj iteraciji u kojoj se pronade novo, bolje stanje mreže.

### 2.4. Proračun OPTPM zasnovan na strujnim distribucionim faktorima

Cilj ovog algoritma je razrješenje prekoračenja opterećenja jedne grane EES. Proračun koristi strujne distribucione faktore kako bi došao do informacije kakav će uticaj na stanje sistema imati izmjena topologije. Strujni distribicioni faktori prikazuju približne promjene vrijednosti struja po granama pri promjeni konfiguracije prenosne mreže [1].

Cilj proračuna je da se iz topologije A pređe u topologiju B koja se od A razlikuje samo za uklopno stanje jednog elementa. Prelaženjem iz jedne u drugu topologiju koja je najbolja od svih mogućih potencijalnih topologija se ide ka optimalnom rešenju.

U ovom proračunu se koristi „bazna“ mreža. To je imaginarna mreža u kojoj su sve grane EES u uključenom stanju. Prije samog proračuna neophodno je proračunati matricu admitansi bazne mreže kao i matricu strujnih distribucionih faktora.

Početni korak algoritma predstavlja proračun tokova snaga kako bi se dobile injektirane struje i naponi svih čvorova. Nakon toga je neophodno proračunati injektirane struje nove mreže. S obzirom da će se vršiti samo jedna prekidačka akcija, uvodi se pretpostavka da će injektirane struje u obe mreže biti iste.

Iz matrice distribucionih faktora bazne mreže (koja je već proračunata) se proračunavaju matrice distribucionih faktora za sve topologije u koje se iz trenutne topologije mreže može preći jednom prekidačkom akcijom. S obzirom da je uvedena pretpostavka za vrijednost injektiranih struja nove topologije, mogu se izračunati struje elemenata nove topologije, kao i naponi čvorova i ispitati da li su ograničenja napona čvorova i struja elemenata ispoštovana za ponudene topologije mreže. Topologija koja nudi najveća poboljšanja se proglašava novom početnom i proračun se nastavlja sve dok se ne dođe do topologije iz koje se ne može preći u bolje stanje.

S obzirom na uvedene pretpostavke, ne može se sa sigurnošću reći da su dobijeni rezultati tačni. Zato se moraju izvršiti i tokovi snaga za izabranu topologiju kako bi se potvrdilo da su rezultati dobri.

Ako rezultati nisu dobri, bira se druga topologija za koju se opet računaju tokovi snaga. Ako su rezultati dobri, ta topologija predstavlja početnu topologiju i algoritam se ponavlja. Nakon izvršenog algoritma postoji sekvenca prekidačkih akcija koja se može izvršiti da bi se prešlo u bolje stanje [3].

Funkcija cilja je definisana izrazom:

$$\min\{I_{opt}^{calc}\} \quad (2.4.1)$$

uz ograničenje:

$$Viol_p < Viol_k \quad (2.4.2)$$

gdje je  $I_{opt}^{calc}$  izračunata vrijednost struje preopterećene grane.

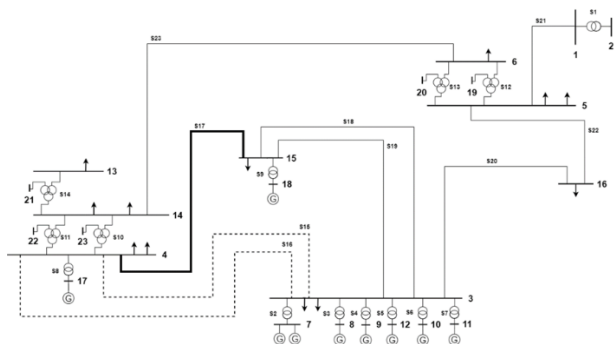
Opisani algoritam uzima u obzir ograničenja nejednakosti koja modeluju ograničenja vrijednosti napona čvorova i struja grana i vrši proračun na brz i sistematičan način. Međutim, potrebno je naglasiti da algoritam OPTPM zasnovan na distribucionim faktorima ne garantuje optimalnost rješenja. Takođe, veliki nedostatak je i to što se proračun vrši za razrješenje preopterećenja samo jedne grane, a ne za razrješenje preopterećenja svih grana u mreži.

### 3. VERIFIKACIJA OPISANIH ALGORITAMA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati dobijeni izvršavanjem opisanih algoritama nad testnom mrežom (slika 3.1.1). Algoritam koji koristi strujne distribucione faktore je implementiran programskim jezikom C++ i poređen sa već implementiranim algoritmom zasnovanim na tokovima snaga. Proračun OPTPM zasnovan na tokovima snaga će u nastavku biti nazivan „kontrolni“ proračun, a proračun OPTPM zasnovan na strujnim distribucionim faktorima će biti nazivan „implementirani“ proračun. Razmatrana su dva primjera za istu testnu mrežu, ali se impedansa preopterećene grane razlikuje u prvom i drugom primjeru.

#### 3.1. Primjer 1

Proračun je testiran nad mrežom koja se sastoji od 23 čvora, 23 grane, 9 generatora i 12 interkonekcija. Grane S15 i S16 su deenergizovane i prikazane su isprekidanim linijama na slici 3.1.1. Stanje u mreži je takvo da je grana S17 preopterećena (prikazana podebljanim linijom na slici 3.1.1).



Slika 3.1.1. Razmatrana test mreža

Kada je izvršen implementirani proračun, nije predložena nijedna grana za promjenu uklopnog stanja. Proračunato

novi stanje nakon promjene uklopnog stanja bilo kog od resursa bi, prema implementiranom proračunu, dovelo do prekoračenja naponskih ili strujnih ograničenja.

Kontrolni proračun je kao rezultat predložio promjenu uklopnog stanja grane S15. Dakle, rezultat implementiranog proračuna se ne slaže sa kontrolnim proračunom.

Nakon poređenja stvarnih vrijednosti napona čvorova i struja (prividnih snaga) grana, koje se dobijaju ako grana S15 promjeni uklopno stanje, i vrijednosti dobijenih od strane implementiranog proračuna, detektovane su značajne razlike između stvarnih i proračunatih napona.

Početna pretpostavka je bila da će injektirane struje ostati približno jednake nakon manje promjene topologije, kao što je izmjena uklopnog stanja jednog elementa. Da bi se utvrdio uticaj razlike injektiranih struja, izvršen je implementirani proračun sa ispravnim (proračunatim od strane tokova snaga) injektiranim strujama za slučaj kada je grana S15 energizovana i dobijeni su rezultati koji se zanemarljivo razlikuju od tačnih vrijednosti. Dakle, zbog razlike u injektiranim strujama, implementirani proračun daje loše rezultate.

#### 3.2. Primjer 2

Prilikom analize rezultata prethodnog primjera, primjećeno je da su gubici nad opterećenom granom značajni i da iznose 30% ukupnih gubitaka mreže. Nakon što se razriješi preopterećenje te grane, gubici po njoj se značajno smanje. Zbog toga, ukupna snaga sistema se smanji i injektirane struje u čvorovima se značajno promjene. Da bi se analizirao uticaj promjene snage gubitaka na rezultate proračuna, smanjena je impedansa opterećene grane, a samim tim i gubici po njoj. Sa smanjenom impedansom, gubici na preopterećenoj grani će u obe situacije biti zanemarljivi.

Proračun je testiran nad istom test mrežom kao u prethodnom primjeru. Kada je izvršen implementirani proračun, nije predložena nijedna grana za promjenu uklopnog stanja. Proračunato novo stanje nakon promjene uklopnog stanja bilo kog od resursa bi, prema implementiranom proračunu, dovelo do prekoračenja naponskih ili strujnih ograničenja.

Kontrolni proračun je kao rezultat predložio promjenu uklopnog stanja grane S15. Dakle, rezultat implementiranog proračuna se ponovo ne slaže sa kontrolnim proračunom.

Nakon poređenja stvarnih vrijednosti napona čvorova i struja (prividnih snaga) grana, koje se dobijaju ako grana S15 promjeni uklopno stanje, i vrijednosti dobijene od strane implementiranog proračuna, ponovo su detektovane značajne razlike između stvarnih i proračunatih napona.

Da bi se utvrdio uticaj razlike injektiranih struja, izvršen je implementirani proračun sa ispravnim (proračunatim od strane tokova snaga) injektiranim strujama za slučaj kada je grana S15 energizovana i dobijeni su rezultati koji se zanemarljivo razlikuju od tačnih vrijednosti. Dakle, zbog razlike u injektiranim strujama, implementirani proračun je opet dao loše rezultate.

### 3.3. Upoređivanje rezultata primjera

U tabeli 3.3.1 su prikazani rezultati proračuna za Primjer 1 i Primjer 2. Sivom bojom su označeni rezultati primjera za koji su razlike između stvarnih i proračunatih vrijednosti manje.

Tabela 3.3.1. Pregled rezultata razmatranih primjera

	Primjer 1	Primjer 2
Najveća razlika injektiranih struja [r.j]	0.0174	0.0007
Prosječna razlika injektiranih struja [r.j]	0.0014	0.0001
Najveća razlika napona čvorova [r.j]	0.1389	0.1606
Prosječna razlika napona čvorova [r.j]	0.1323	0.1539
Najveća razlika struja (prividnih snaga) grana [r.j]	0.0682	0.0849
Prosječna razlika struja (prividnih snaga) grana [r.j]	0.0242	0.0216

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 3.3.1 može se zaključiti da je razlika vrijednosti injektiranih struja najmanja kada su gubici na preopterećenoj grani mali. Na ovaj način drastična promjena opterećenja ove grane ne utiče na proizvodnju. Iako je očekivano da će rezultati za sve veličine biti precizniji ukoliko su razlike između injektiranih struja prije i nakon optimizacije manje, razmatrani primeri su pokazali da nije tako. Štaviše, rezultati za napone su lošiji. Može se zaključiti da čak i mala razlika u injektiranim strujama dovodi do velike razlike u rezultatima.

### 4. ZAKLJUČAK

Na kraju rada se može zaključiti da rezultati koji se dobijaju algoritmom koji koristi distribucione faktore nisu dovoljno dobri da bi se algoritam mogao koristiti za proračun promene topologije prenosne mreže sa aspekta eliminacije preopterećenja. U proračunu je napravljena pretpostavka da će injektirana struja u čvorovima ostati približno ista ukoliko se napravi mala izmjena u topologiji poput promjene uklopnog stanja jedne grane.

Nakon analize primjera se došlo do zaključka da je promjena injektirane struje nakon izmjene uklopnog stanja jedne grane dovoljno velika da izazove značajne razlike u rezultatima koje daje proračun OPTPM zasnovan na strujnim distribucionim faktorima i proračun tokova snaga za režim koji se dobija kada ta grana izmjeni uklopno stanje.

Takođe, na osnovu Primjera 2 se može zaključiti da čak i mala razlika vrijednosti injektirane struje dovodi do velike greške u proračunu vrijednosti napona čvorova. Iako su dobijeni rezultati za struje vodova i prividne snage transformatora dobri, vrijednosti napona čvorova se previše razlikuju, pa se na osnovu dobijenih rezultata ne može zaključiti da li će novo stanje biti bez prekoračenja ograničenja napona ili će dovesti do novih.

Zbog toga, zaključak je da upotreba ovog algoritma nije moguća u savremenim softverima za upravljanje prenosnom mrežom.

### 5. LITERATURA

- [1] A. Sarić, M. Čalović i P. Stefanov: Eksploatacija elektroenergetskih sistema u uslovima slobodnog tržišta, Tehnički fakultet, Čačak, 2005.
- [2] A. A. Mazi, B. F. Wollenberg and M. H. Hesse: Corrective control of power system flows by line and bus-bar switching, *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 1, Issue 3, Aug. 1986.
- [3] R. Bacher and H. Glavitsch: Network Topology Optimization with Security Constraints, *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 1, Issue 4, Nov. 1986.
- [4] E. B. Makram, K. P. Thorton and H.E. Brown: Selection of lines to be swithed to eliminate overloaded lines using a Z-matrix method, *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 4, Issue 2, May 1989.

### Kratka biografija:

**Ana Spasojević** rođena je u Bijeljini 1993. godine. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi odbranila je 2017. godine.

**Savo Đukić** rođen je u Novom Sadu 1983. godine. Doktorsku disertaciju odbranio je 2014. godine na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektroenergetski sistemi.