

OPTIMALNA REKONFIGURACIJA DISTRIBUTIVNIH MREŽA
OPTIMAL NETWORK RECONFIGURATION OF DISTRIBUTION SYSTEMSIvana Jokić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U radu su razmatrana dva osnovna algoritma za optimalnu rekonfiguraciju distributivnih mreža: algoritam izmene grana i algoritam najmanjih struja. Verifikacija njihovih mogućnosti realizovana je na primeru test distributivne mreže koja se sastoji od 25 čvorova.

Abstract – This paper presents two basic algorithms for optimal network reconfiguration of distribution network systems: Branch Exchange algorithm and Minimal branch current algorithm. Verification of their possibilities is realized on the test case of a distribution network consisting of 25 nodes.

Ključne reči: optimalna rekonfiguracija, distributivne mreže, metod izmene grana, metod najmanjih struja

1. UVOD

Većina distributivnih mreža (DM) se projektuje u vidu radijalnih mreža, a sve u cilju postizanja efikasnije koordinacije zaštite pojedinih elemenata mreže [1]. U prisustvu kvara, prekidačkom opremom se može manipulirati u cilju izolovanja dela mreže sa kvarom i prebacivanja izolovane potrošnje na zdrav deo mreže. U normalnim uslovima, ovi prekidači se mogu koristiti za rekonfiguraciju, u cilju smanjenja gubitaka aktivne snage, povećanja pouzdanosti ili balansiranja opterećenja u mreži [2]. Isporuka električne energije od izvora do krajnjih potrošača je uvek praćena gubicima. Ako se u obzir uzme da su distributivna preduzeća suočena sa povećanim pritiskom za ostvarivanje veće efikasnosti, da su uvedeni podsticaji i penali koji elektrodistribucija plaća potrošačima zbog nenajavljenih prekida napajanja ili lošeg kvaliteta isporučene električne energije, i da gubici direktno utiču na finansijska pitanja i efikasnost distributivnih postrojenja, jasno je da redukcija gubitaka predstavlja cilj svakog distributivnog preduzeća [3]. Jedan od efikasnih načina za postizanje ovog cilja jeste optimalna rekonfiguracija distributivnih mreža (ORDM).

2. PRORAČUN TOKOVA SNAGA

Proračun tokova snaga predstavlja proračun promenljivih stanja (režima) mreže, gde su poznati izvor napajanja mreže i potrošnje u svim čvorovima mreže. Na osnovu vrednosti modula i faznih stavova napona proračunavaju se preostale vrednosti koje nisu unapred zadate, a to su aktivne i reaktivne snage injektiranja u čvorovima.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Goran Švenda, red.prof.

Na ovaj način definisano je stanje mreže. Dalje, vrši se proračun tokova snaga po vodovima i određivanje gubitaka po granama. S toga, metode koje se koriste u DM razlikuju se od onih koje se koriste u prenosnim mrežama. Većina poznatih iterativnih postupaka koji se koriste u prenosnim mrežama bazirani su na matricnom postupku, dok se u DM koriste specijalizovani algoritmi koji su orijentisani ka granama [1].

2.1. Modelovanje potrošača

Fazna aktivna i reaktivna snaga potrošnje potrošača priključenog u čvoru, obično se iskazuju preko tri komponente [5]:

- 1) konstantna snaga (nezavisna od modula napona),
- 2) konstantan modul struje i faktor snage (snaga srazmerna s modulom napona),
- 3) konstantna impedansa tj. admitansa (snaga srazmerna kvadratu modula napona).

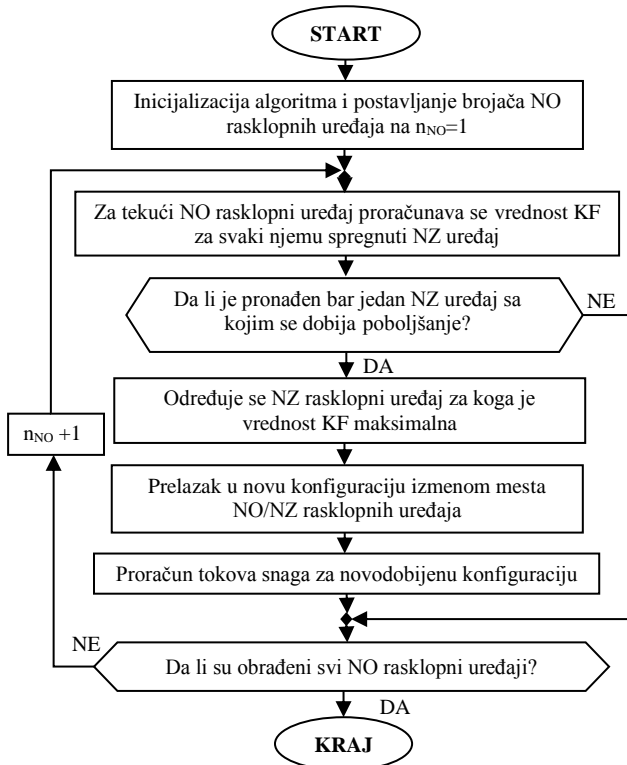
U zavisnosti od modela potrošnje, vrednosti režima EES-a se mogu značajno menjati.

3. OPTIMALNA REKONFIGURACIJA DM

Problem određivanja optimalne konfiguracije mreže je kompleksan, kombinatoran, nelinearan i diskretan optimizacioni problem. Za rešenje ovog problema koriste se: optimizacione metode [1,4], kombinatorno pretraživanje [1] i heurističke metode [1,6]. Izvorni algoritmi vezani su za metode bazirane na heuristici i optimalnim tokovima snaga. Suština ovih algoritama je da se maksimalnim poznavanjem fizike problema na najkraći način dođe do kvalitetnih radijalnih konfiguracija. Postoje dva problema vezana za algoritme bazirane na heuristici: u opštem slučaju, ne obezbeđuju globalni optimum i postizanje optimalne konfiguracije kroz višestruko puštanje tokova snaga može biti vremenski veoma zahtevno. Heuristički algoritmi kojima se rešava problem ORDM su algoritmi izmene grana i najmanjih struja [1].

3.1. Algoritam izmene grana

"Izmena grana" zapravo znači "izmena mesta" normalno otvorenog (NO) rasklopnog uređaja sa njime spregnutim normalno zatvorenim (NZ) rasklopnim uređajem [4]. Globalni blok algoritam prikazan je na slici 1. Glavna prednost ovog algoritma jeste izvršavanje tokova snaga samo u slučaju kada je postignuto poboljšanje vrednosti kriterijumske funkcije. Osnovna mana ovog algoritma jeste zavisnost konačnog od početnog rešenja. Kako je u svakom trenutku proračuna radijalnost uvek održana, mogu se primenjivati metode za proračun tokova snaga orijentisane ka granama. U ovom radu izabran je algoritam sumiranja struja -Shirmohammadi-ev algoritam [1].



Slika 1 – Blok dijagram algoritma izmene grana [1]

Kao kriterijum, odabrana je minimizacija gubitaka aktivne snage. Kriterijumska funkcija (KF) za procenu smanjenja gubitaka aktivne snage nakon izmene mesta NO/NZ prekidača, može da se predstavi kao [3]:

$$IG^{(h)} = \sum_{i=1}^{n_{izv}} \sum_{j \in \alpha_{di}^h} r_{ij} (J_{ij}^h)^2, \quad (1)$$

gde je:

n_{izv} – ukupan broj izvoda,

r_{ij} – rezistansa grane j koja pripada izvodu i ,

α_{di}^h – skup indeksa grana izvoda i u konfiguraciji h ,

J_{ij}^h – moduo struje grane j izvoda i u konfiguraciji h .

Ako je sa supskriptom h označena konfiguracija nakon izmene mesta NO/NZ rasklopnih uređaja, a sa $h-1$ konfiguracija pre te izmene, vrednost kriterijuma je [1]:

$$IG^{(h)} = IG^{(h-1)} - \Delta IG \quad (2)$$

$$\Delta IG^{(h-1)} = 2 \cdot \text{Re} \left[(J_j^{h-1})^* (\Delta V_k^{h-1} - \Delta V_m^{h-1}) \right] - |J_j^{h-1}|^2 \cdot R_{petlje} \quad (3)$$

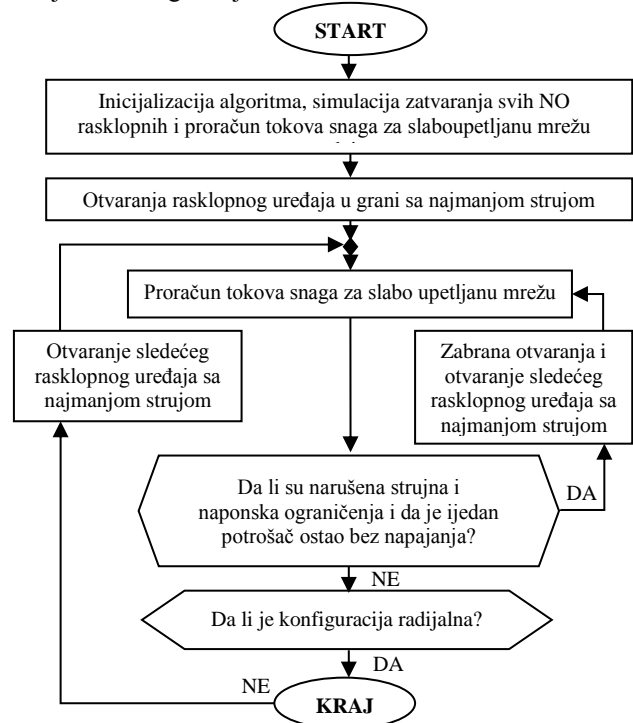
gde su sa $IG^{(h)}$, $IG^{(h-1)}$ i ΔIG naznačene vrednosti gubitaka aktivne snage za konfiguracije h i $h-1$ i promena te vrednosti, respektivno; sa J_j^{h-1} struja grane j u radijalnoj konfiguraciji $h-1$; sa ΔV_k^{h-1} i ΔV_m^{h-1} vrednosti padova napona čvorova levo i desno od razmatranog NO rasklopnog uređaja i sa R_{petlje} rezistansa konture između dva napojna čvora koja sadrže granu sa NO rasklopnim uređajem.

Pri izvođenju algoritma izmene grana dovoljno je proračunati samo vrednost izraza (1). Ako je ta vrednost veća od nule, tada su izmenom mesta razmatranog spregnutog para NO/NZ rasklopnih uređaja gubici aktivne snage smanjeni.

3.2. Algoritam najmanjih struja

Algoritam najmanjih struja je efikasan i robusan heuristički metod koji za razliku od algoritma izmene grana pronalazi optimalno rešenje koje je u potpunosti nezavisno od inicijalnog statusa rasklopnih uređaja [7]. U algoritmu najmanjih struja korišćen je Newton/Raphson-ov iterativni postupak, pogodan za upetljane i slaboupetljane mreže. Mana ovog algoritma jeste relativno veliki broj proračuna tokova snaga (jednak broju NO rasklopnih uređaja u mreži).

Globalni blok dijagram algoritma najmanjih struja dat je na slici 2. Na početku algoritma učitavaju se svi podaci o mreži. Nakon toga vrši se simulacija zatvaranja svih NO rasklopnih uređaja čime se ostvaruje maksimalno upetljan pogon. Za tako upetljanu mrežu proračunavaju se tokovi snaga da bi se dobio celokupan režim. Na osnovu rezultata pronalazi se grana sa najmanjom vrednošću struje i rasklopni uređaj u toj grani se otvara, ali samo ako nisu narušena strujna i naponska ograničenja, i ukoliko neće ostaviti potrošače bez napajanja. U suprotnom, traži se sledeća grana sa najmanjom strujom, za koju su zadovoljena navedena ograničenja. Za takvu topologiju mreže vrši se proračun tokova snaga čiji rezultati predstavljaju ulazne podatke za sledeću iteraciju proračuna. Algoritam se zaustavlja kada je postignuta radijalna konfiguracija mreže.



Slika 2 – Blok dijagram algoritma najmanjih struja [1]

4. VERIFIKACIJA ALGORITAMA

Verifikacija prikazanih algoritama optimalne rekonfiguracije DM izvršena je na primeru test DM sa 25 potrošačkih čvorova. Ti potrošači se nalaze na 5 izvoda koji se napajaju sa zajedničkih SN sabirnica Tr VN/SN. Ukupna potrošnja svih potrošača u mreži, pri nominalnom naponu na sabirnicama njihovog priključenja, je (12.00–9.00) MVA. U nastavku razmatrana su 4 primera, sa različitim početnom topologijom i raspodelom ukupnog opterećenja. Istovremeno, razmatran je i uticaj modela potrošnje na

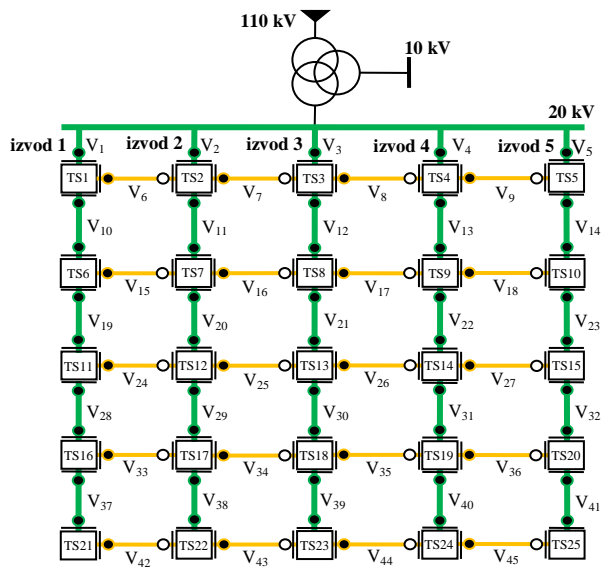
rezultate proračuna tokova snaga (tri modela potrošnje za nominalnu vrednost napona ostvaruju istu vrednost aktivne i reaktivne snage, isti faktor snage, istu struju i istu admitansu).

4.1. Primer 1

Ovo je osnovni primer i njime se vrši osnovna verifikacija proračuna. Sa svakog od pet izvoda napaja se po pet međusobno jednakih potrošača, čija je snaga 0.48 MW i 0.36 Mvar, pri $U=U_{nom}$.

4.1.1. Primena algoritma izmene grana

Nakon primene algoritma izmene grana kriterijumska funkcija u svim iteracijama ima negativnu vrednost, što znači da se promenom uklopnog stanja ne može ostvariti benefit, odnosno da konačno, optimalno rešenje odgovara početnom rešenju, topologija sa slike 3.



Slika 3 – Test DM, inicijalno stanje – Primer 1

4.1.2. Primena algoritma najmanjih struja

Nakon zatvaranja svih NO rasklopnih uređaja, u svakoj iteraciji otvarana je po jedna od grana koje su bile otvorene u početnom stanju, tako da konačno rešenje odgovara početnoj topologiji, slika 3.

4.1.3. Uticaj modela potrošača na tokove snaga

U zavisnosti od modela potrošnje: konstantna snaga, konstantni modul struje i faktor snage, ili kao konstantna admitansa (impedansa), u tako proračuna tokova snaga neke od veličina su konstantne a neke promenljive. U zavisnosti od modela u tabeli 1 su sa "+" naznačene veličine čije su vrednosti konstantne, a sa "-" veličine čije se vrednosti menjaju u toku proračuna tokova snaga.

Tabela 1 – Uticaj modela potrošača

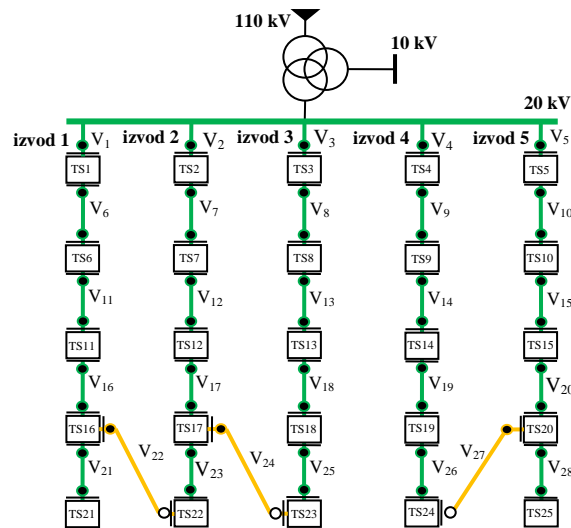
Tip potr.	P_p	Q_p	$\cos\varphi_p$	I_p	\hat{I}_p	\hat{Y}_p
1	+	+	+	-	-	-
2	-	-	+	+	-	-
3	-	-	+	-	-	+

4.2. Primer 2

Obraduje se test DM sa 3 NO rasklopna uređaja, slika 4. Ukupno opterećenje 12.00 MW i 9.00 MVar slučajno je raspoređena po čvorovima, tabela 2.

Tabela 2 – Opterećenje: MW, MVar – Primer 2

čv.	P	Q	čv.	P	Q	čv.	P	Q
1	0.40	0.30	10	0.40	0.30	19	0.56	0.42
2	0.64	0.48	11	0.40	0.30	20	0.32	0.24
3	0.72	0.54	12	0.64	0.48	21	0.40	0.30
4	0.56	0.42	13	0.72	0.54	22	0.24	0.18
5	0.40	0.30	14	0.56	0.42	23	0.16	0.12
6	0.40	0.30	15	0.40	0.30	24	0.16	0.12
7	0.64	0.48	16	0.40	0.30	25	0.32	0.24
8	0.72	0.54	17	0.64	0.48			
9	0.56	0.42	18	0.64	0.48			



Slika 4 – Test DM, inicijalno stanje – Primer 2

4.2.1. Primena algoritma izmene grana

Razmatrana su dva pristupa obrade NO rasklopnih uređaja: 1) IG-1 – od grane sa najmanjim indeksom do grane sa najvećim indeksom i 2) IG-2 – suprotno. Za prvi pristup gubici aktivne snage su smanjeni za 2.4%, a u drugom za 1.9%. Za dva različita pristupa, ostvarena su dva različita optimuma, što ukazuje na zavisnost rešenja od redosleda obrade NO rasklopnih uređaja. Slična rešenja se dobijaju za sva tri tipa potrošača.

4.2.2. Primena algoritma najmanjih struja

Primenom algoritma najmanjih struja (NS) dobijeno je isto rešenje kao rešenje koje je dobijeno primenom prvog pristupa algoritma izmene grana. Ovo rešenje je jedinstveno. Isto rešenje dobija se za sva tri tipa potrošača.

4.3. Primer 3

Početna topologija prikazana je na slici 4. Sva opterećenja odgovaraju vrednostima koje su prikazane u tabeli 2, osim opterećenja u čvorovima TS21 i TS23. Njihove vrednosti su (0.404-j0.304) MVA i (0.234-j0.176) MVA, respektivno.

4.3.1. Primena algoritma izmene grana

Sada se posmatra samo redosled obrade NO rasklopnih uređaja od onog u grani sa najmanjim ka onom u grani sa najvećim indeksom. Nakon izvršenog proračuna za potrošače konstantne snage ostvareno je smanjenje gubitaka aktivne snage za 1.3%. Iste izmene dobijene su i kada su potrošači modelovani kao konstantna vrednost modula struje i faktora snage, ali su zapažene drugačije

vrednosti KF. U slučaju potrošača konstantne admitanse dobijeni su drugačiji rezultati uz ostvaren benefit od 1.9%. Ako se posmatra metoda „izmene grana“, varijacija vrednosti KF u zavisnosti od načina modelovanja potrošača nije velika. Stoga ukoliko KF ima veliku negativnu vrednost za jedan tip potrošnje, mala je verovatnoća da će u slučaju nekog drugog tipa posmatrana izmena biti usvojena. Ali ukoliko je vrednost KF blizu graničnoj vrednosti 0, postoji veća mogućnost da usled drugačijeg modelovanja potrošnje posmatrana izmena bude usvojena. Naravno, to utiče na raspodelu tokova snaga, i u nastavku algoritma može dovesti do usvajanja novih „izmena mesta“ ili odbacivanja nekih izmena koje su bile usvojene u slučaju drugog modela potrošača. Može se reći da model potrošača indirektno utiče na metodologiju „izmene grana“, tako što drugačije vrednosti napona i struja dobijene proračunom tokova snaga utiču na vrednosti KF.

4.3.2. Primena algoritma najmanjih struja

Primenom algoritma najmanjih struja (NS), za model potrošača konstantna snaga i konstantna admitansa podudaraju se sa rezultatima dobijenim metodom izmene grana za slučaj model potrošača konstantna admitansa. Kada se potrošnja modeluje kao konstantni modul struje i faktor snage, rezultati su nešto drugačiji, ali benefit ima približno istu vrednost. Za metodu NS uočeno je da model potrošača u svakoj iteraciji proračuna tokova snaga direktno utiče na izbor otvaranja rasklopnih uređaja, odnosno direktno utiče na krajnje rešenje metode.

4.4. Primer 4

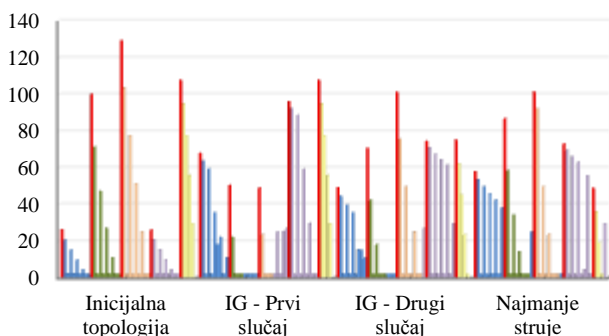
Topologija test DM odgovara onoj iz prvog primera, slika 3. Ukupno opterećenje je i dalje isto, ali je slučajno raspoređeno po čvorovima, u skladu sa tabelom 2.

4.4.1. Primena algoritma izmene grana

Kao i u prethodnim primerima, pravila obrade NO rasklopnih uređaja su ista. Za prvi slučaj IG-1 ostvaren je benefit 5.9%, a u drugom slučaju IG-2 benefit od 19.4%.

4.4.2. Primena algoritma najmanjih struja

Primenom algoritma najmanjih struja (NS) gubici aktivne snage su smanjeni za 17.3%. U poređenju sa vrednostima koji su ostvareni primenom algoritma izmene grana, sa kojim je dobijeno i loše (IG-1) i dobro (IG-2) rešenje, algoritam NS daje jedinstveno, dobro rešenje. Na slici 6 prikazane su vrednosti struja po granama za početnu topologiju i topologije dobijene primenom tri razmatrana pristupa za rešavanje ORDM problema.



Slika 7 – Raspodela opterećenja za sve mreže – primer 4

U tabeli 3 istaknute su vrednosti struja grana od interesa, na osnovu kojih se mogu potvrditi ostvareni benefiti.

Tabela 3 – Raspodela struja u granama od interesa

	Iv ₁ [A]	Iv ₂ [A]	Iv ₃ [A]	Iv ₄ [A]	Iv ₅ [A]
Počet. topol	27.21	100.97	130.31	27.21	108.65
IG-1	69.01	51.46	50.05	96.95	108.65
IG-2	50.13	71.69	102.25	75.58	76.08
NS	58.80	87.81	102.24	74.10	50.00

Kao rezime, u tabeli 4 prikazane su vrednosti benefita koji su ostvareni u razmatranim primerima, kao i broj proračuna tokova snaga.

Tabela 4 – Benefit i broj proračuna tokova snaga

	Primer 2		Primer 4	
	B [%]	br. TS	B [%]	br. TS
IG-1	2.38	4	5.91	7
IG-2	1.49	3	19.42	5
NS	2.38	4	17.32	21

5. ZAKLJUČAK

Algoritam najmanjih struja daje uvek isto rešenje, dok je algoritam izmene grana osetljiv na početno stanje. Broj proračuna tokova snaga kod algoritma najmanjih struja jednak je broju NO rasklopnih uređaja, dok je kod algoritma izmene grana taj broj znatno manji.

6. LITERATURA

- [1] D.Popović, D.Bekut, V.Dabić: *Specijalizovani DMS Algoritmi*; Prosveta, Novi Sad, 2011.
- [2] D.Shirmohammadi, H.W.Hong: Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, April 1989, pp 1492-1498
- [3] Y.Al-Mahrogi, I.A.Metwally, A.Al-Hinai, A.Al-Badi: Reduction of Power Losses in Distribution Systems; *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, Vol:6, No:3, 2012.
- [4] M.F.Sulaima, M.F.Mohamad, M.H.Jali, W.M.Bukhari, M.F.Baharom: A Comparative Study of Optimization Methods for 33kV Distribution Network Feeder Reconfiguration; *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 6, No. 4, 2014, pp. 1169-1182
- [5] V.C.Strezoski: *Osnovi Elektroenergetike*; Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Novi Sad, 2014.
- [6] A.Charlansut, N.Rugthaicharoencheep, S.Auchariyament: Heuristic Optimization Techniques for Network Reconfiguration in Distribution System; *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, Vol. 6, No. 4, 2012, pp. 365-368
- [7] B.Cho, K.Ryu, J.Park, W.Moon, S.Cho, J.Kim: A Selecting Method of Optimal Load on Time Varying Distribution Systems for Network Reconfiguration considering DG; *Journal of International Council on Electrical Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 166-170, 2012.

Kratka biografija:



Ivana Jokić rođena je u Šapcu 27.06.1992. god. Srednju školu, završila je 2011. god. u Šapcu. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi odbranila je 2015. god. Iste godine upisala se na master studije.