

POREĐENJE PERFORMANSI MATRIČNOG I ALGORITMA SUMIRANJA STRUJA ZA PRORAČUN REŽIMA DISTRIBUTIVNE MREŽE SA KRATKIM SPOJEM

MATRIX AND THE CURRENT SUMMATION ALGORITHM PERFORMANCE COMPARISON FOR SHORT-CIRCUIT CALCULATION IN DISTRIBUTION NETWORK

Milica Delić, Luka Strezoski, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U radu su upoređeni vremenski zahtevi za proračun režima distributivnih mreža s kratkim spojem primenom dva različita algoritma. Prvi je algoritam sumiranja struja i korekcija napona (SSKN) koji se uobičajeno koristi za proračune u distributivnim mrežama, dok je drugi matični algoritam koji se uobičajeno koristi za proračune u prenosnim mrežama. Upoređena su vremena potrebna za proračun tri velike, realne, distributivne mreže, koje sadrže 1000, 5000 i 10000 čvorova, respektivno. Cilj ovog poređenja je bio da se ispita mogućnost korišćenja znatno robusnijeg i izuzetno tačnog matičnog algoritma, za proračun distributivnih mreža velikih dimenzija, pogođenih kratkim spojem.

Ključne reči: Distributivne mreže, Matični algoritam, Vreme izvršenja

Abstract – In this paper, the time requirements for the short-circuit calculation of distribution network using two different algorithms are compared. The first is the current summation and voltage correction algorithm (CSVC) that is commonly used for distribution networks, while another is a matrix algorithm commonly used for calculations in transmission networks. The time required for the calculation of three large, real, distribution networks, containing 1000, 5000 and 10000 nodes, respectively, were compared. The aim of this comparison was to examine the possibility of using a much more robust and extremely accurate matrix algorithm for the calculation of large-scale distribution networks affected by short-circuits.

Keywords: Distribution networks, Matrix algorithm, Execution time

1. UVOD

Proračun režima s kratkim spojem može da se koristi za sebe, ali mnogo češće se koriste u okviru velikog broja ostalih proračuna u sistemima za vođenje prenosnih i distributivnih mreža („Energy Management System – EMS“ i „Distribution Management System – DMS“ softverima) [1]. Izbor prekidačke opreme, podešenje i koordinacija relejne zaštite kao i određivanje lokacija kvara samo su neke od funkcija u okviru kojih je neophodno proračunavati struje kvara ili celog režima mreže sa kvarom i po više puta u toku jednog poziva. Kako je zbog praktične primene pojedinih funkcija bitna brzina izvršenja, vreme potrebno za proračun struja kvara trebalo bi svesti na minimum. Poslednje dve decenije, pri proračunu režima distributivnih mreža sa kratkim spojem,

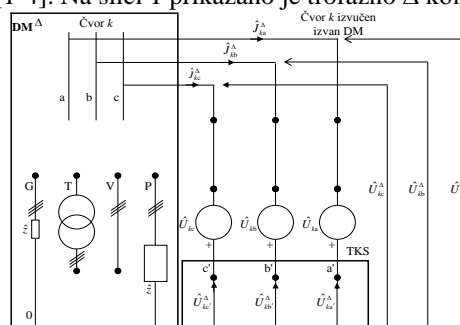
široko je rasprostranjena metoda orijentisana prema granama, poznata kao algoritam sumiranja struja i korekcija napona (SSKN) [2-4]. Zbog specifične topologije distributivne mreže ovaj postupak se pokazao kao vrlo efikasan i brz.

Matični pristup proračunu režima sa kvarom koji je orijentisan prema čvorovima zbog velikog broja čvorova u distributivnoj mreži u praksi nije našao primenu. [5-6].

U ovom radu se istražuju mogućnosti primene matičnog algoritma, karakterističnog za prenosne mreže, sa svim svojim prednostima u odnosu na algoritme orijentisane prema granama, za proračun režima distributivne mreže sa kvarom, u pogledu vremenskih zahteva. Matični algoritam može bez problema da uvaži prekid nulte komponente, za razliku od algoritama koji su orijentisani prema granama (npr. algoritam SSKN), pa se zbog toga pri korišćenju algoritama orijentisanih prema granama uvode određene aproksimacije koje konačno dovode do rezultata koji nisu savršeno tačni. Ovaj problem bi se potpuno izbegao ukoliko bi se za proračune distributivnih mreža s kratkim spojem koristio matični algoritam. Međutim, poznato je da su vremenski zahtevi za izvršenje matičnog algoritma veći, zbog potrebe za inverzijom matrice velikih dimenzija i da sa porastom broja čvorova mreže ti zahtevi rastu. U ovom radu se kvantifikuje koliko je vremena potrebno žrtvovati da bi se primenio jedan izuzetno dobar algoritam (matični) koji nema problema sa uvažavanjem prekida nulte komponente u distributivnim mrežama velikih dimenzija.

2. MATEMATIČKI MODEL Δ KOLA

Nezavisno od tipa algoritma koji se primenjuje za proračun kratkih spojeva u distributivnim mrežama, vrši se uobičajena dekompozicija režima sa kratkim spojem na režim distributivne mreže pre kratkog spoja i režim tzv. fiktivnog Δ kola, koji je u opštem slučaju trofazan nesimetričan sa nesimetrijom istog karaktera kao što je i nesimetrija režima distributivne mreže sa kratkim spojem [1-4]. Δ kolo je pasivno svuda osim na mestu kratkog spoja [1-4]. Na slici 1 prikazano je trofazno Δ kolo [1].

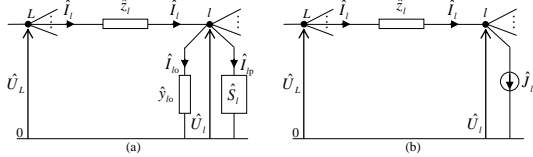
Slika 1. Trofazno Δ kolo

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio doc. dr Luka Strezoski.

2.1. Matematički model izveden direktnom primenom Kirchhoff-ovih zakona

Pogonska kola redosleda s ($s =$ direktni, inverzni, nulti – d, i, o) trofazne Δ mreže razmatrane radialne distributivne mreže lestvičasta su kola. Lestvičasta kola se prikazuju koristeći se Γ segmentima (slika 2) i memorišu koristeći se principom slojeva [7]. Njihovi modeli mogu se izvesti direktnom primenom Kirchhoff-ovih zakona.



Slika 2. Pogonska kola Γ_l segmenta trofazne distributivne mreže (a) i njihova ekvivalentna kola (b)

Dakle, opisani (potpuni) matematički model trofaznog Δ kola sastoji se od sledećih $6n+6$ jednačina [1].

Opšti model Δ kola:

$$\hat{I}_l^{\Delta s} = \hat{J}_l^{\Delta s} + \hat{y}_{io}^s \hat{U}_l^{\Delta s} + \sum_{j \in \alpha_l} \hat{I}_j^{\Delta s}, \quad l = n \dots 3, 2 \quad (1)$$

$$\hat{U}_l^{\Delta s} = \hat{U}_L^{\Delta s} - \hat{z}_l^s \hat{I}_l^{\Delta s}, \quad l = 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

pri čemu je sa α_l označen skup indeksa svih Γ segmenata kojima je segment Γ_l prethodnik, sa $\hat{I}_l^{\Delta s}$ struja po grani l , sa $\hat{J}_l^{\Delta s}$ injektirana struja u čvor l , sa \hat{y}_{io}^s ukupna otočna admitansa u čvoru l , sa $\hat{U}_l^{\Delta s}$ napon čvoru l , sa $\hat{I}_j^{\Delta s}$ struja po grani j , sa $\hat{U}_L^{\Delta s}$ napon čvoru L , sa \hat{z}_l^s redna impedansa grane l , dok je sa n označen broj čvorova. Oznaka s se odnosi na redosled (direktni, inverzni, nulti – d, i, o).

Zatim relacije kojima se modeluje ostatak Δ kola:

$$F_1(\hat{U}_{ka}^{\Delta}, \hat{U}_{kb}^{\Delta}, \hat{U}_{kc}^{\Delta}, \hat{J}_{ka}^{\Delta}, \hat{J}_{kb}^{\Delta}, \hat{J}_{kc}^{\Delta}) = 0 \quad (3)$$

$$F_2(\hat{U}_{ka}^{\Delta}, \hat{U}_{kb}^{\Delta}, \hat{U}_{kc}^{\Delta}, \hat{J}_{ka}^{\Delta}, \hat{J}_{kb}^{\Delta}, \hat{J}_{kc}^{\Delta}) = 0 \quad (4)$$

$$F_3(\hat{U}_{ka}^{\Delta}, \hat{U}_{kb}^{\Delta}, \hat{U}_{kc}^{\Delta}, \hat{J}_{ka}^{\Delta}, \hat{J}_{kb}^{\Delta}, \hat{J}_{kc}^{\Delta}) = 0 \quad (5)$$

$$\hat{U}_{ka}^{\Delta} - \hat{U}_{kb}^{\Delta} = \hat{U}_{ka}^{\Delta} \quad (6)$$

$$\hat{U}_{kb}^{\Delta} - \hat{U}_{kc}^{\Delta} = \hat{U}_{kb}^{\Delta} \quad (7)$$

$$\hat{U}_{ka}^{\Delta} - \hat{U}_{kc}^{\Delta} = \hat{U}_{ka}^{\Delta} \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} \hat{U}_k^{\Delta d} \\ \hat{U}_k^{\Delta i} \\ \hat{U}_k^{\Delta o} \end{pmatrix} = \hat{\mathbf{A}} \begin{pmatrix} \hat{U}_{ka}^{\Delta} \\ \hat{U}_{kb}^{\Delta} \\ \hat{U}_{kc}^{\Delta} \end{pmatrix}, \quad (9) \quad \begin{pmatrix} \hat{J}_k^{\Delta d} \\ \hat{J}_k^{\Delta i} \\ \hat{J}_k^{\Delta o} \end{pmatrix} = \hat{\mathbf{A}} \begin{pmatrix} \hat{J}_{ka}^{\Delta} \\ \hat{J}_{kb}^{\Delta} \\ \hat{J}_{kc}^{\Delta} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

pri čemu je sa $\hat{\mathbf{A}}$ označena matrica transformacije iz faznog u domen simetričnih komponenti, sa $\hat{U}_{ka}^{\Delta}, \hat{U}_{kb}^{\Delta}, \hat{U}_{kc}^{\Delta}$ naponi čvoru k u tačkama a', b' i c', sa $\hat{J}_{ka}^{\Delta}, \hat{J}_{kb}^{\Delta}, \hat{J}_{kc}^{\Delta}$ injektirane struje u čvoru k , sa $\hat{U}_{ka}^{\Delta}, \hat{U}_{kb}^{\Delta}$ i \hat{U}_{kc}^{Δ} naponi idealnih naponskih izvora insertovanih u ansambl kratkog spoja, sa $\hat{U}_{ka}^{\Delta}, \hat{U}_{kb}^{\Delta}, \hat{U}_{kc}^{\Delta}$ naponi čvoru k u tačkama a, b i c, dok su $\hat{U}_k^{\Delta d}, \hat{U}_k^{\Delta i}, \hat{U}_k^{\Delta o}$ i $\hat{J}_k^{\Delta d}, \hat{J}_k^{\Delta i}, \hat{J}_k^{\Delta o}$ simetrične komponente napona i struja $\hat{J}_{ka}^{\Delta}, \hat{J}_{kb}^{\Delta}, \hat{J}_{kc}^{\Delta}$, (slika 1).

2.2. Matematički model napisan u saglasnosti sa metodom nezavisnih napona

Pogonska kola redosleda s ($s=d, i, o$) trofazne Δ mreže razmatrane radialne distributivne mreže lestvičasta su kola.

Lestvičasta kola se prikazuju koristeći se Γ segmentima (slika 2) i memorišu koristeći se principom slojeva. Njihovi modeli mogu se izvesti primenom metode nezavisnih napona.

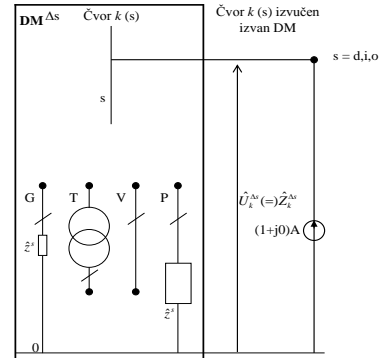
Opšti model Δ kola:

$$\hat{J}_{n-1,1}^{\Delta s} = \hat{Y}_{n-1,n-1}^s \hat{U}_{n-1,1}^{\Delta s}, \quad s = d, i, o \quad (11)$$

pri čemu je sa $\hat{J}_{n-1,1}^{\Delta s}$ označen vektor injektiranih struja u čvorove, sa $\hat{Y}_{n-1,n-1}^s$ matrica admitansi sistema, sa $\hat{U}_{n-1,1}^{\Delta s}$ označeni naponi čvorova, sa n broj čvorova. Oznaka s se odnosi na redosled (direktni, inverzni, nulti – d,i,o). Pored ovih relacija, potpun matematički model čine i relacije kojima se modeluje ostatak Δ kola, a koje su označene sa (3,4,5,6,7,8,9,10).

3 REŠENJE MATEMATIČKOG MODELA Δ KOLA

Nezavisno od tipa algoritma koji se primenjuje za proračun kratkih spojeva u distributivnim mrežama, prvo je neophodno izračunati ekvivalente impedanse gledano odočeno sa mesta kvara za direktni, inverzni i nulti režim. Pogonsko kolo trofaznog Δ kola, koje je prikazano na slici 3, pasivno je svuda osim na mestu kratkog spoja (čvor k). Tako, elektromotorne sile njihovih Thévenin-ovih ekvivalenata jednake su nuli, za svaku vremensku sekvencu. Thévenin-ova impedansa pogonskog kola redosleda $s, s=d, i, o$, za bilo koju vremensku sekvencu, brojno je određena naponom čvoru k pogonskog kola redosleda s , izabrane vremenske sekvence, kada se između čvoru nultog potencijala i čvoru k u tom pogonskom kolu, priključi idealan strujni generator jedinične struje – slika 3 [1].



Slika 3. Pogonsko kolo redosleda s trofazne Δ mreže, koje je pripremljeno za izvođenje Thévenin-ovih impedansi

Vrednost ekvivalente impedanse dobijene na opisan način jednaka je sa vrednošću impedanse sa k -tog dijagonalnog mesta iz matrice impedansi koja se kod matricnog algoritma dobija inverzijom matrice admitansi [10].

3.1 Rešenje matematičkog modela izvedenog direktnom primenom Kirchhoff-ovih zakona

S obzirom da je režim distributivne mreže pre kratkog spoja poznat, poznat je i napon \hat{U}_{ka}^{Δ} faze a čvoru s kratkim spojem k , pre kratkog spoja. S obzirom na to da je struja na mestu kvara funkcija napona pre kratkog spoja i ekvivalentnih impedansi (20), kada se izračunaju Thévenin-ove impedanse pogonskih kola trofaznog Δ kola ($\hat{Z}_k^d, \hat{Z}_k^i, \hat{Z}_k^o$; za impedansu direktnog redosleda \hat{Z}_k^d računaju se tri vrednosti, po jedna za svaku od tri vremenske sekvence), onda se mogu izračunati ključne nepoznate veličine – simetrične komponente struja ansambla kratkog spoja u Δ kolu: $\hat{J}_k^{\Delta d}, \hat{J}_k^{\Delta i}, \hat{J}_k^{\Delta o}$, za bilo koju vremensku sekvencu.

$$\hat{J}_k^{\Delta s} = f(\hat{U}_{ka}^{\Delta}, \hat{Z}_k^d, \hat{Z}_k^i, \hat{Z}_k^o), \quad s=d,i,o \quad (12)$$

Kada se te tri struje poznaju, tada u $6n-6$ jednačine (1) i (2) ima isto toliko nepoznatih veličina:

- 1) \hat{I}_l^{As} , $l = 2, 3, \dots, n$, $s = d, i, o$; ima ih $3n-3$;
- 2) \hat{U}_l^{As} , $l = 2, 3, \dots, n$, $s = d, i, o$; ima ih $3n-3$.

Te algebarske, linearne, simultane i kompleksne jednačine treba rešiti, pre svega, po $3n$ veličina stanja – simetrične komponente napona Δ kola: \hat{U}_l^{As} , $l = 2, 3, \dots, n$, $s = d, i, o$.

One se mogu rešiti različitim metodima. Za njihovo rešenje se koristi Gauss/Seidel-ov iterativni metod, odnosno postupak SSKN. Jednačine (1) i (2) su pripremljene za direktnu primenu tog metoda:

$$(\hat{I}_l^{As})^{h+1} = \hat{J}_l^{As} + \hat{Y}_l^{As} (\hat{U}_l^{As})^h + \sum_{j \neq l} (\hat{I}_j^{As})^{h+1}, l = n \dots 3, 2 \quad s = d, i, o, \quad (13)$$

$$(\hat{U}_l^{As})^{h+1} = (\hat{U}_l^{As})^{h+1} - \hat{Z}_l^{As} (\hat{I}_l^{As})^{h+1}, l = 2, 3, \dots, n, s = d, i, o, \quad (14)$$

pri čemu su struje \hat{I}_l^{As} poznate:

$$\hat{J}_l^{As} = \begin{cases} 0, & \text{za } l \neq k \\ \hat{J}_k^{As} \neq 0, & \text{za } l = k \end{cases}, \quad s = d, i, o \quad (15)$$

Sa h je označen redni broj iteracije Gauss/Seidel-ovog iterativnog metoda ($h=1, 2, 3 \dots$). Simetrične komponente napona \hat{U}_l^{As} , $s = d, i, o$, za $L=1$ (prvi čvor segmenta korena – Thévenin-ovog ekvivalenta nadredene mreže koji je priključen u korenu – između čvorova 1 i 2), jednake su nuli: $\hat{U}_l^{As} = 0$, $s = d, i, o$. Tako, one se ne menjaju od iteracije do iteracije: $(\hat{U}_l^{As})^{h+1} = 0, \forall h$.

Za početne vrednosti simetričnih komponenti napona trofaznih čvorova Δ kola mogu se usvojiti nulte vrednosti:

$$(\hat{U}_l^{As})^1 = 0, \quad l = 2, 3, \dots, n, \quad s = d, i, o \quad (16)$$

Iterativna procedura se zaustavlja kada se zadovolje sledeći kriterijumi konvergencije:

$$\left| (\hat{I}_l^{As})^{h+1} - (\hat{I}_l^{As})^h \right| \leq \varepsilon_i \wedge \left| (\hat{U}_l^{As})^{h+1} - (\hat{U}_l^{As})^h \right| \leq \varepsilon_u \wedge \left| (\hat{U}_l^{As})^{h+1} - (\hat{U}_l^{As})^h \right| \leq \varepsilon_v, \quad l = 2, 3, \dots, n \quad (17)$$

pri čemu su ε_i , ε_u i ε_v kriterijumi konvergencije (po želji izabrani pozitivni brojevi). Najčešće je dovoljno proveravati samo poslednja dva od tri kriterijuma (17) [1].

3.2 Rešenje matematičkog modela napisanog u saglasnosti sa metodom nezavisnih napona

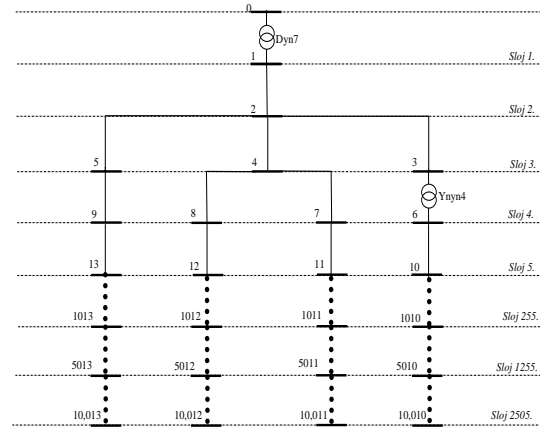
S obzirom da je režim distributivne mreže pre kratkog spoja poznat, poznat je i napon \hat{U}_{ka} faze a čvora s kratkim spojem k , pre kratkog spoja. Kada se izračunaju Thévenin-ove impedanse pogonskih kola trofaznog Δ kola ($\hat{Z}_k^d, \hat{Z}_k^i, \hat{Z}_k^o$; za impedansu direktnog redosleda \hat{Z}_k^d računaju se tri vrednosti, po jedna za svaku od tri vremenske sekvence), onda se mogu izračunati ključne nepoznate veličine – simetrične komponente struja ansambla kratkog spoja u Δ kolu: $\hat{J}_k^{Ad}, \hat{J}_k^{Ai}, \hat{J}_k^{Ao}$, za bilo koju vremensku sekvencu. Kada se te tri struje poznaju, tada se poznaju vektori s levih strana tri skupa od po n jednačina – opšteg modela pogonskih kola trofaznog Δ kola u admitantnoj formi. Svaki od ta tri skupa od po n jednačina može se rešiti po n nepoznatih odgovarajućih simetričnih komponenti napona n trofaznih čvorova Δ kola, nezavisno od druga dva skupa po n jednačina. Tim rešenjima su obuhvaćene i simetrične komponente napona samog čvora k sa kratkim spojem. Dakle, kada se raspolaze sa vrednostima te tri struje problem rešavanja sistema od $3n+12$ spregnutih jednačina i

isto toliko nepoznatih veličina se svodi na rešavanje tri raspregnuta sistema, svaki od po n linearnih jednačina sa n nepoznatih veličina. Oni su napisani u formi nad kojom se za njihovo rešenje može direktno primeniti Gausova redukcija. Rešavanje tri raspregnuta sistema jednačina je znatno jednostavnije od rešavanja $3n+12$ spregnutih jednačina.

Korišćenjem opisanog postupka, mogu se izračunati simetrične komponente napona u svim čvorovima Δ kola. Tih $3n$ napona – rešenje Δ kola – predstavljaju stanje naizmenične komponente režima trofaznog Δ kola u domenu simetričnih komponenti za izabranu vremensku sekvencu. Iz njih se prema definiciji stanja može izračunati celokupni režim Δ kola. Zatim se taj režim može transformisati u fazni domen.

4 NUMERIČKA VERIFIKACIJA PRORAČUNA

Trofazna distributivna mreža nad kojom je vršena numerička verifikacija proračuna prikazana je na slici 4. Mreža se napaja preko prenosne mreže koja je modelovana mrežom beskonačne snage. Sastoji se od vodova i transformatora. Svi parametri su dati u domenu simetričnih komponenti. Izvršena je normalizacija kao i Θ -transformacija [8-9].



Slika 4. Distributivna test mreža

Mreža se sastoji od 14 čvorova i 13 rednih grana. Svi vodovi su jednakih dužina i parametara. Dužina svakog voda je 0.0914 [km], a redni i otočni parametri su dati u tabelama 1 i 2.

Tabela 1 – Podužni redni parametri vodova

Z (R +jX) [Ω/km]			
faza	b	c	a
a	0.828+j0.848	0.129+j0.287	0.128+j0.285
b	0.129+j0.287	0.828+j0.848	0.129+j0.287
c	0.128+j0.285	0.129+j0.287	0.828+j0.848

Tabela 2 – Podužni otočni parametri vodova

Y (G +jB) [μS/km]			
faza	a	b	c
a	0.000+j2.916	0.000-j0.563	0.000-j0.559
b	0.000-j0.563	0.000+j2.916	0.000-j0.563
c	0.000-j0.559	0.000-j0.563	0.000+j2.916

Podaci o transformatorima su dati u tabeli 3.

Tabela 3 – Podaci o transformatorima

Tr	Sprega	m_k [kV/kV]	S_n [kVA]	R [%]	X [%]
1	Dyn	115/4.16	5000	1.0	8.0
2	Yyn	4.16/0.48	500	1.1	2.0

Simulacije kratkih spojeva vršene su u programu koji je napisan i pokretan na računaru koji ima 4GB RAM memorije i procesor brzine 2.1 GHz. Za simuliranje jednofaznog kratkog spoja izabrana je faza a. Kratki spojevi su simulirani u svim čvorovima mreže primenom oba algoritma. Vrednosti struja kvara dobijene jednim i drugim algoritmom su jednake i date su u tabeli 4.

Tabela 4 – Struje Δ kola na mestu kvara pri 1FKS

Čvor	Faza					
	a		b		c	
	I[A]	ugao[°]	I[A]	ugao[°]	I[A]	ugao[°]
1	8600.16	-82.87	0.0	0.0	0.0	0.0
2	6479.14	-72.71	0.0	0.0	0.0	0.0
3	5121.46	-66.70	0.0	0.0	0.0	0.0
4	5120.94	-66.69	0.0	0.0	0.0	0.0
5	5121.29	-66.70	0.0	0.0	0.0	0.0
6	16547.33	-63.23	0.0	0.0	0.0	0.0
7	4208.83	-62.79	0.0	0.0	0.0	0.0
8	4208.83	-62.79	0.0	0.0	0.0	0.0
9	4209.07	-62.79	0.0	0.0	0.0	0.0
10	15296.47	-61.86	0.0	0.0	0.0	0.0
11	3562.84	-60.08	0.0	0.0	0.0	0.0
12	3562.84	-60.08	0.0	0.0	0.0	0.0
13	3563.02	-60.08	0.0	0.0	0.0	0.0

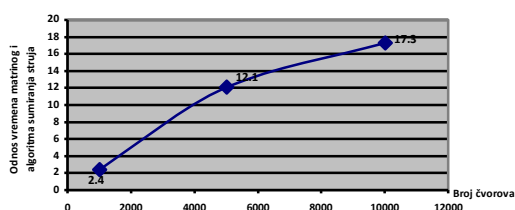
Na svaku od 4 završne grane iz poslednjeg sloja iz gore opisane mreže od 14 čvorova dodato je još 250 grana jednakih parametara i na taj način formirana mreža od 1014 čvorova. Na isti način mreža je proširena na 5014, a zatim i na 10014 čvorova.

Na svakoj od ovih mreža je vršena simulacija kratkih spojeva i merena su vremena potrebna za izračunavanje algoritmom SSKN, a zatim matricnih algoritmom. Vremena su data u tabeli 5.

Tabela 5 – Vremena trajanja proračuna

Broj čvorova	Vreme [s]	
	Algoritam SSKN	Matrični algoritam
1014	0.9375	2.2500
5014	20.8281	252.3281
10014	107.3750	1854.8440

Na osnovu rezultata izloženih u ovom radu, vidi se da je vreme potrebno za proračun kratkih spojeva matricnim algoritmom veće od vremena potrebnog za proračun algoritmom SSKN. Ta razlika nije mnogo izražena na mreži od 1014 čvorova. Za matricni algoritam je potrebno $2.25[s]/0.9375[s]= 2.4$ puta više vremena. Kako se povećava broj čvorova tako raste i razlika u potrebnom vremenu. Za proračun matricnim algoritmom na mreži od 5014 čvorova potrebno je $252.3281[s]/20.8281[s]= 12.1$ puta više vremena, dok je na mreži od 10014 čvorova potrebno $1854.844[s]/107.375[s]= 17.3$ puta više vremena. Odnos vremena potrebnih za proračun matricnim i algoritmom SSKN u zavisnosti od broja čvorova grfički je prikazan na slici 5.



Slika 5. Odnos vremena potrebnog za proračun u zavisnosti od broja čvorova

Ako se uzme u obzir skromna konfiguracija računara sa kojim je ovaj proračun vršen (4GB RAM memorije i 2.1 GHz procesor) i dobijeni rezultati, može se zaključiti da bi se ovaj odnos prilično smanjio kada bi se proračun vršio na današnjim industrijskim računarima sa znatno moćnijom konfiguracijom, na kojima se i vrše praktični DMS proračuni. Na osnovu ovih rezultata, može se pretpostaviti da bi se vremena dodatno približila, ali svakako i značajno smanjila, te vremenski zahtevi vrlo verovatno ne bi bili ograničavajući faktor za primenu

matričnog algoritma za proračun kratkih spojeva u velikim distributivnim mrežama. Da bi se ove pretpostavke i potvrdile sa sigurnošću, potrebno je odraditi dodatno istraživanje na ovu temu. Potvrda navedenih pretpostavki jeste jedan od pravaca za dalja istraživanja autora.

5 ZAKLJUČAK

Cilj ovog poređenja matricnog i algoritma SSKN bio je da se ispita mogućnost korišćenja znatno robusnijeg i izuzetno tačnog matricnog algoritma, za proračun distributivnih mreža velikih dimenzija, pogođenih kratkim spojem. Korišćenjem matricnog algoritma izbegle bi se neophodne aproksimacije koje se uvode korišćenjem SSKN algoritma, pa bi se samim tim i povećala tačnost rezultata. Poređenjem vremenskih zahteva za proračun kratkih spojeva na distributivnim mrežama koje sadrže 1014, 5014 i 10014 čvorova, respektivno, prvo algoritmom SSKN, zatim matricnim algoritmom, na računaru skromne konfiguracije (4GB RAM memorije i 2.1 GHz procesor), ipak se pokazuje da je SSKN algoritam brži i da razlika u brzini raste sa porastom broja čvorova, međutim i pored toga, rezultati otvaraju mogućnost primene matricnog metoda u industrijskim softverima. Kada se uzmu u obzir znatna poboljšanja računarskih performansi u poslednjoj deceniji, može se zaključiti da bi se pri proračunima matricnim metodom vršenim u industrijskim softverima, na računarima sa znatno moćnijom konfiguracijom, vremenski zahtevi znatno smanjili i približili vremenskim zahtevima za proračun algoritmom SSKN. Ovim se otvara mogućnost primene matricnog algoritma za proračun režima realnih distributivnih mreža pogođenih kvarom u industrijskim softverima, sa aspekta vremenskih zahteva.

6 LITERATURA

- [1] L. V. Strezoski and M. D. Prica, "Real-time short-circuit analysis of active distribution systems," *2016 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, Urbana, IL, 2016, pp. 1-8.
- [2] X.Zhang, F.Soudi, D.Shirmohammadi, C.Cheng: A Distribution Short Circuit Analysis Approach Using Hybrid Compensation Method, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10. No. 4, 1995., pp. 2053-2059.
- [3] A.Tan, W.H.Liu, D.Shirmohammadi: Transformer and Load Modeling in Short Circuit Analysis for Distribution Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 3, 1997., pp. 1315-1322.
- [4] D.Rajicic, R.Taleski: Two Novel Methods for Radial and Weakly Meshed Network Analysis, *Electric Power System Research*, 48, 1998., pp. 79-87.
- [5] V.Strezoski, D.Bekut: A Canonical Model for the Study of Faults in Power Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 6, No. 4, 1991., pp. 1493-1499.
- [6] V.C.Strezoski, G.S.Švenda, D.D.Bekut: Extension of the Canonical Model to Grounding Parts of Power Systems Under Fault Conditions, *Electrical Power & Energy Systems*, No 25, 2003, pp 567-575.
- [7] P. Vidovic, Proračuni tokova snaga neuravnoveženih distributivnih mreža, doktorska disertacija, Fakultet Tehničkih Nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2015.
- [8] V.Strezoski: A New Scaling Concept in Power System Analysis, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 143, No. 5, 1996., pp. 399-406.
- [9] V. C. Strezoski: Advanced symmetrical components method, *IET Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 5, Issue 8, ISSN 1751-8687, August 2011, pp. 833-841.
- [10] V.C.Strezoski: Osnovni proračuni elektroenergetskih sistema, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 2017.