

MODELOVANJE MODERNIH DISTRIBUTIVNIH ENERGETSKIH RESURSA ZASNOVANIH NA UREĐAJIMA ENERGETSKE ELEKTRONIKE ZA POTREBE PRORAČUNA KRATKIH SPOJEVA**MODELING OF MODERN DISTRIBUTION ENERGY RESOURCES BASED ON ENERGY ELECTRONIC DEVICES FOR THE NEEDS OF SHORT-CIRCUIT CALCULATION**

Miloš Spasić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast- ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U radu je opisan model distributivne mreže (DM) sa velikim brojem modernih energetske resursa (DER). Predstavljene su vrste postojećih DER kao i njihovi modeli u proračunima režima s kratkim spojem. Akcenat rada je na modelima DER koji su na DM povezani uređajima energetske elektronike. Predstavljen je i unapređen algoritam sumiranja struja i korekcije napona (USSKN) kako bi se ovi modeli uključili u proračune režima s kvarom.

Ključne reči: *Modeli modernih distribuiranih izvora, proračun kratkih spojeva, generalizovano delta kolo.*

Abstract – *This paper describes the model of a power distribution system with a large number of modern energy resources. Types of existing energy resources, as well as their models in short-circuit calculations are presented. The emphasis of this paper is on energy resource models connected to the network by energy electronic devices. Improved backward/forward sweep algorithm is introduced in order to incorporate these models into calculations of the fault mode of distribution networks.*

Keywords: *Models of distributed energy resources, short circuits calculation, generalized delta circuit.*

1. UVOD

U poslednjih nekoliko godina dolazi do velikog razvoja i sve većeg korišćenja distribuiranih energetske resursa (DER) zasnovanih na uređajima energetske elektronike. Modeli ovih DER razlikuju se od modela sinhronih i asinhronih generatora. Kako je moderni DER odvojen od DM pomoću invertora, njegov model zavisi isključivo od upravljanja inverterom [2].

Pokazano je i da se modeli modernih DER ne mogu koristiti u tradicionalnim procedurama za izračunavanje režima s kratkim spojem zato što sadrže veliki broj mogućih kontrolnih strategija. Stoga je opisan koncept generalizovanog delta kola, koji omogućava integraciju DER zasnovanih na savremenim tehnologijama, u postojeće proračune kratkih spojeva u DM [1]. Stanje sistema s kvarom se dobija superpozicijom režima pre kvara, koje je poznato, i režima generalizovanog delta kola.

NAPOMENA:

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

Takode, većina razvijenih zemalja ima svoj pravilnik o pogonu distributivnih mreža, gde su propisani i FRT (Fault Ride Through) zahtevi. FRT zahtevima se određuje kako bi moderni DER trebalo da se ponašaju u slučaju pada napona na mestima njihovih priključenja na mrežu. U zavisnosti od specifičnih zahteva država, inventori DER se mogu podešavati na različite načine.

Cilj ovog rada je prikaz modela savremenih DER za potrebe proračuna kratkih spojeva u DM na koje je moguće primeniti različite FRT zahteve. Opisani model je integrisan u unapređenu proceduru sumiranja struja i korekcije napona za proračun režima aktivnih DM s kratkim spojem.

2. MODELI ELEMENATA DISTRIBUTIVNE MREŽE

U ovom delu, predstavljeni su pofazni modeli, odnosno pogonski reprezentivi trofaznih uravnoteženih elemenata DM koji se koriste u proračunima kratkih spojeva.

2.1. Potrošači

Potrošači se u proračunima režima DM s kratkim spojem najčešće modeluju idealnim strujnim generatorima. Te struje se izračunavaju na osnovu poznatih snaga i napona iz režima pre kratkog spoja.

2.2. Sekcije vodova

Sekcije vodova se za potrebe proračuna kratkih spojeva zamenjuju svojim pogonskim Π kolima određenog redosleda, između kojih, usled uravnoteženosti, u domenu simetričnih veličina ne postoje sprege između pogonskih kola direktnog, inverznog i nultog redosleda [4].

2.3. Transformatori

Transformatori su uređaji koji povezuju DM različitih naponskih nivoa. Prelaskom u domen relativnih vrednosti i relativnih uglova idealni transformator je eliminisan (sveden na jedinicu) [4], a njegov model se sastoji od redne impedanse \hat{z}_l i otočne admitanse magnećenja \hat{y}_m .

2.4. Koren distributivne mreže

Koren DM predstavlja čvor u kojem se DM priključuje na prenosni sistem. Ona predstavlja glavni izvor električne energije u DM i modeluje se indentično kao DER tipa I, koji će biti objašnjen u nastavku.

3. MODELI DER U PRORAČUNIMA REŽIMA DISTRIBUTIVNIH MREŽA S KRATKIM SPOJEVIMA

U zavisnosti od vrste i načina povezivanja na sistem, DER se u proračunima kratkih spojeva mogu modelovati na sledeća četiri načina [1]:

- 1) DER tipa I - Sinhroni distributivni generatori koji su direktno priključeni na DM;
- 2) DER tipa II - Asinhroni distributivni generatori koji su direktno priključeni na DM;
- 3) DER tipa III - Dvostruko napajana asinhrona mašina (Doubly Fed Induction Machine - DFIM);
- 4) DER tipa IV - IBDER (Inverter Based Distributed Energy Resource) – DER koji je priključen na mrežu preko invertora.

3.1. DER tipa I – Sinhroni generator direktno priključen na mrežu

U ovom radu modeli DER tipa I, u proračunima režima s kratkim spojem se prikazuju njihovim Tevenenovim ekvivalentima linearnog kola [4]. U kolima direktnog redosleda, u sve tri vremenske sekvence, postoji direktna komponenta elektromotornih sila \hat{E}^d , dok se impedansa menja od suptranzitne $\hat{Z}_s^{d''}$, preko tranzitne $\hat{Z}_s^{d'}$, do impedanse u ustaljenom periodu - \hat{Z}_s^d . Impedanse u inverznom \hat{Z}_s^i i nultom \hat{Z}_s^0 se ne menjaju tokom kratkog spoja.

3.2. DER tipa II – Asinhroni generator direktno priključen na mrežu

Asinhroni generatori se, slično sinhronim, tretiraju Tevenenovim ekvivalentima. Jedine razlike su što kod modela asinhronne mašine ne postoji tranzitni period i elektromotorne sile \hat{E}^d su anulirane.

3.3. DER tipa III – DFIM

Kod ovih generatora, stator je povezan direktno na trofaznu DM, dok je rotor povezan preko uređaja energetske elektronike. Ovaj pretvarač je jako osetljiv na struje iznad nominalnih, tako da mora na neki način, biti zaštićen od kratkih spojeva u blizini generatora.

Kroubar i čoper su dve osnovne i najrasprostranjenije zaštite [3]. Kroubar predstavlja trofazan otpornik velike vrednosti koji se redno povezuje sa namotajem rotora mašine.

U slučaju ozbiljnog kvara, odnosno kratkog spoja blizu DFIM, kroubar reaguje i kratko spaja rotor mašine [1]. Time se pretvarač potpuno odvaja od ostatka mreže, a model DFIM u proračunima kratkih spojeva postaje jako sličan modelu asinhronne mašine (DER tipa II), tj. DFIM gubi kontrolu nad izlaznim strujama. Ako se DFIM štiti čoperom ili kvar nije toliko ozbiljan inverter će nastaviti da kontroliše injektirane struje i oni će imati iste modele kao DER IV, koji će biti opisan u sledećoj glavi.

3.4. DER tipa III – IBDER

Ovaj tip DER je uređajem energetske elektronike kompletno odvojen od DM. Ta činjenica, omogućava potpunu kontrolu izlaznih struja, kako u normalnim režimima, tako i u slučaju kratkih spojeva u DM.

4. DER TIPA III-IV

Ovom tipu DER će, u ovom radu, biti posvećeno najviše pažnje. Predstavnicima ovog tipa DER su IBDER i DFIM koji uspeju da zadrže kontrolu struje tokom kratkog spoja. Za ove vrste DER, koristiće se zajednički naziv – „DER tipa III-IV” [1]. Njihovi modeli, kao i injektirane struje tokom kvara, uopšte ne zavise od karakteristika samih generatora, već isključivo od primenjenih kontrolnih strategija koje su ugrađene u invertore [1]. Tokom kvara, da bi se uređaj energetske elektronike ovog tipa DER zaštitio, kontrolisana injektirana struja ne sme preći predefinisane granice. Najčešće se struja tokom kratkog spoja ograničava na 1 – 1.5 njene nominalne vrednosti.

DER tipa III-IV injektira struje isključivo direktnog redosleda, čak i tokom neuravnoteženih kratkih spojeva [3]. Odavde sledi da njihov model u proračunima kratkih spojeva sadrži idealan strujni generator jedino u kolu direktnog redosleda.

4.1. FRT standardi

Većina razvijenih zemalja ima svoja pravila o pogonu DM, među kojima se nalaze i FRT zahtevi. Njima se propisuje kako bi moderni DER trebalo da se ponašaju u slučaju pada napona usled kratkog spoja na mestima njihovih priključenja na DM.

FRT zahtevi za obnovljive izvore električne energije generalno opisuju sledeća četiri podzahteva:

- 1) Vrednost napona na kojem DER tipa III-IV mora ostati priključen na DM tokom kratkog spoja;
- 2) Nivo naponske podrške (injektirane reaktivne snage) koja se zahteva od DER tipa III-IV tokom kvara;
- 3) Injektiranje aktivne snage tokom kvara;
- 4) Injektiranje aktivne snage nakon čišćenja kvara.

Kada se DM nalazi u stanju sa kvarom, DER tipa III-IV treba da ostanu operativni i priključeni, čak i u slučaju smanjenih napona. Najčešće se, u okviru pravila o pogonu DM definišu LVRT (Low Voltage Ride Through) zahtevi kojima se propisuju vrednosti napona pri kojima DER tipa III-IV ostaje na mreži.

Naponi čvorova su jako pogođeni kratkim spojem u DM, tako da DER tipa III-IV treba da pruže podršku injektiranjem reaktivne snage. FRT standardima se propisuje vrednost reaktivne struje koja će biti injektirana u DM od strane DER tipa III-IV, sa ciljem što bržeg povratka napona u normalne granice [5]. Većina tih standarda zahteva da se sa jednim procentom pada napona od njegove nominalne vrednosti DER tipa III-IV poveća injektiranje reaktivne struje za 2%. Tokom kvarova prioritet injektiranja iz DER tipa III-IV je reaktivna snaga, dok se aktivna snaga injektira onoliko koliko je to moguće, a da se ne premaši strujno ograničenje.

4.2. Modeli DER tipa III–IV za potrebe proračuna režima s kratkim spojem

Kao što je ranije rečeno, DER tipa III-IV su podešeni tako da injektiraju simetrične struje direktnog redosleda čak i u slučaju neuravnoteženih kvarova u sistemu [1]. Režimi inverznog i nultog pogonskog kola su anulirani. Odavde sledi, da modeli ovih DER u simulacijama kratkih spojeva sadrže jedino idealne strujne generatore u kolima

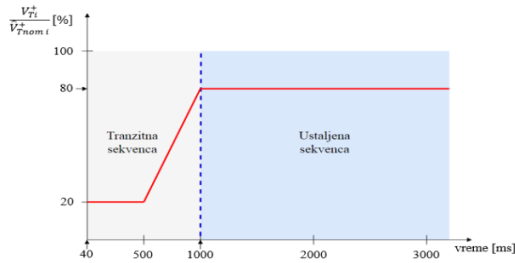
direktnog redosleda. Takođe, ovi DER reaguju isključivo na pad direktne komponente napona na njihovim priključcima na mrežu, tako da se njihovi modeli u proračunima režima s kratkim spojem sastoje samo od komponente direktnog redosleda [1], što je prikazano na slici 1. Naponi direktnog redosleda u kojima su priključeni DER tipa III-IV (V_{Ti}^+ , $i = 1, \dots, N_{DERIII-IV}$) se računaju u jednoj iteraciji USSKN i pomoću njih će biti proraračunate struje injektiranja ovih DER u svim vremenskim sekvencama kratkog spoja.



Slika 1. Model DER tipa III-IV u kolima direktnog redosleda za proračun kratkih spojeva u DM

Nakon ovog proračuna, modeli DER tipa III-IV se dele na suptranzitne, tranzitne i ustaljene. Na slici 1 je prikazan model ovog tipa DER u svim vremenskim sekvencama. Jedino što se menja kroz sekvence je vrednost injektirane struje kratkog spoja ($\hat{I}_{DERIII-IV}^{ks}$).

Najčešće, suptranzitna sekvenca predstavlja vreme dok invertor DER tipa III-IV ne detektuje kratak spoj. To je najčešće do dve periode (40ms). Druge dve sekvence, tranzitna i ustaljena, definiše posmatrani FRT standard. U ovom radu biće obrađen španski FRT zahtev. Taj zahtev, kao i podela na tranzitnu i ustaljenu sekvencu je prikazana na slici 2. Ovako definisane vremenske sekvence modela DER tipa III-IV se prilično dobro slažu s sekvencama DER tipa I i II [4].



Slika 2. Tranzitna i ustaljena vremenska sekvenca za DER tipa III-IV tokom kratkog spoja

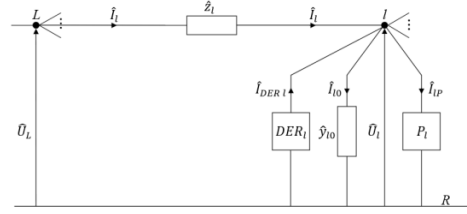
4.3. Γ segment distributivne mreže

Proračun režima DM s kratkim spojem je najlakše vršiti u domenu simetričnih veličina. Time se model DM predstavlja sa tri pogonska kola direktnog, inverznog i nultog redosleda. Kako se ovde posmatraju samo uravnotežene trofazne mreže ova kola su spregnuta samo na mestu neuravnoteženog kratkog spoja (čvor k). Ta kola su prikazana na slici 3.

5. GENERALIZOVANO DELTA KOLO

Koncept tradicionalnog delta kola, generalno nije pogodan za DM koji sadrže DER tipa III-IV sa velikim rasponom mogućih kontrolnih strategija [1].

Koristeći drugu kontrolnu strategiju, pretpostavka da je delta kolo pasivno svuda osim na mestu s kratkim spojem više ne važi [1].



Slika 3. Γ segment DM u sva tri redosleda

U ovom slučaju, delovi struja koji premašuju injektirane struje DER tipa III-IV pre kvara se injektiraju u delta kolo. Stoga, delta kolo postaje aktivno i u svim čvorovima u kojima su ovi DER priključeni na DM [1]. Kako DER tipa III-IV injektira samo direktnu komponentu struje, samo tradicionalno delta kolo direktnog redosleda se menja. Ovo kolo se naziva generalizovano delta kolo, a struje koje prekoračuju struje pre kvara se nazivaju ekcesnim i računaju se na sledeći način [1]:

$$\hat{I}_{DERIII-IV}^{\Delta+} = \hat{I}_{DERIII-IV}^{ks} - \hat{I}_{DERIII-IV}^{preks}, \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, N_{DERIII-IV}$$

gde $N_{DERIII-IV}$ predstavlja čvorove u kojima su priključeni DER tipa III-IV sa ekcesnim strujama ($\hat{I}_{DERIII-IV}^{\Delta+}$). Generalizovana delta kola inverznog i nultog redosleda su i dalje pasivna svuda osim na mestu kvara, jer su ekcesne struje u tim kolima jednake nuli.

5.1. Ključne veličine za proračun režima generalizovanog delta kola

U ovom radu se obrađuju četiri vrste metalnih kratkih spojeva. Struje kvara u domenu simetričnih veličina na mestu kratkog spoja (čvor k) se tradicionalno računaju jednačinama prikazanim u sledećoj tabeli [4]:

Tabela 1. Formule za proračun struja kvara na mestu kratkog spoja

	1FKS(faza a)	2FKSZ(faze b i c)	2FKS(faze b i c)	3FKS
\hat{J}_k^+	$\frac{\hat{U}_{ka}}{\hat{Z}_k^+ + \hat{Z}_k^- + \hat{Z}_k^0}$	$\frac{(\hat{Z}_k^- + \hat{Z}_k^0) \hat{U}_{ka}}{\hat{Z}_k^+ \hat{Z}_k^- + \hat{Z}_k^+ \hat{Z}_k^0 + \hat{Z}_k^- \hat{Z}_k^0}$	$\frac{\hat{U}_{ka}}{\hat{Z}_k^+ + \hat{Z}_k^-}$	$\frac{\hat{U}_{ka}}{\hat{Z}_k^+}$
\hat{J}_k^-	$\frac{\hat{U}_{ka}}{\hat{Z}_k^+ + \hat{Z}_k^- + \hat{Z}_k^0}$	$\frac{-\hat{Z}_k^0 \hat{U}_{ka}}{\hat{Z}_k^+ \hat{Z}_k^- + \hat{Z}_k^+ \hat{Z}_k^0 + \hat{Z}_k^- \hat{Z}_k^0}$	$\frac{-\hat{U}_{ka}}{\hat{Z}_k^+ + \hat{Z}_k^-}$	0
\hat{J}_k^0	$\frac{\hat{U}_{ka}}{\hat{Z}_k^+ + \hat{Z}_k^- + \hat{Z}_k^0}$	$\frac{-\hat{Z}_k^- \hat{U}_{ka}}{\hat{Z}_k^+ \hat{Z}_k^- + \hat{Z}_k^+ \hat{Z}_k^0 + \hat{Z}_k^- \hat{Z}_k^0}$	0	0

U formulama iznad, \hat{Z}_k^+ , \hat{Z}_k^- , \hat{Z}_k^0 predstavljaju Tevenenove impedanse u domenu simetričnih veličina viđenih sa mesta kratkog spoja. \hat{U}_{ka} je poznati napon čvora k pre kvara. Kao što je pokazano u [2], uticaj ekcesnih struja DER tipa III-IV na struje kratkog spoja na mestu kvara je zanemarljiv.

5.2. Proračun režima generalizovanog delta kola u domenu simetričnih veličina

Režim generalizovanog delta kola u direktnom redosledu se računa sledećim algoritmom (USSKN) [1]:

Sumiranje struja:

$$(\hat{I}_l^{\Delta+})^{h+1} = \hat{I}_l^{\Delta+} + \hat{I}_{l0}^+ (\hat{U}_l^{\Delta+})^h + \sum_{j \in \alpha_l} (\hat{I}_j^{\Delta+})^{h+1} \quad (2)$$

$$+ \hat{I}_{DERIII-IV}^{\Delta+}, l = n, \dots, 3, 2$$

Korekcija napona:

$$(\hat{U}_l^{\Delta+})^{h+1} = (\hat{U}_l^{\Delta+})^{h+1} - \hat{Z}_l^+ (\hat{I}_l^{\Delta+})^{h+1}, \quad (3)$$

$$l = 2, 3, \dots, n$$

Injektirane struje na mestu kvara su poznate iz tabele 1:

$$\hat{I}_l^{\Delta+} = \begin{cases} 0, & l \neq k \\ \hat{I}_k^{\Delta+} \neq 0, & l = k \end{cases} \quad (4)$$

Ekcesne struje DER tipa III-IV su poznate iz sledeće formule:

$$\hat{I}_{DER3-4}^{\Delta+} = \begin{cases} 0, & l \notin \alpha_{DERIII-IV} \\ -\hat{I}_{DERIII-IV}^{\Delta+}, & l \in \alpha_{DERIII-IV} \end{cases} \quad (5)$$

Iterativna procedura se zaustavlja kada se ispuni kriterijum konvergencije:

$$|(\hat{U}_l^{\Delta+})^{h+1} - (\hat{U}_l^{\Delta+})^h| < \varepsilon_U, l = 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

Režimi delta kola u inverznom i nultom redosledu se izračunavaju indentično kao tradicionalna delta kola, kao što je prikazano u [4].

6. KOMPLETAN TOK PRORAČUNA REŽIMA S KRATKIM SPOJEM DISTRIBUTIVNE MREŽE U KOJOJ SE NALAZE DER TIPa III-IV

Na osnovu svih izlaganja u prethodnim glavama, sada je na jednom mestu, na slici 4, prikazan kompletan tok proračuna uravnotežene DM bez petlje u režimu s kratkim spojem.

7. ZAKLJUČAK

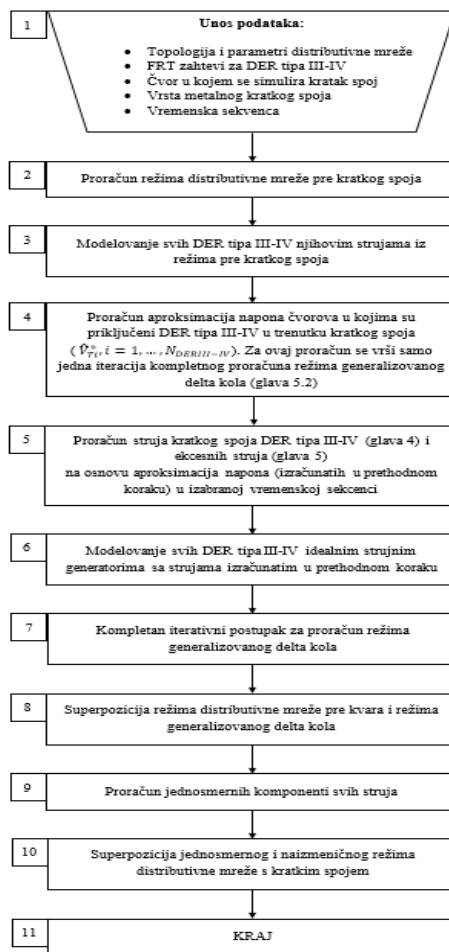
U skladu sa [1], u ovom radu je urađeno sledeće:

1. Predstavljen je pojam FRT standarda;
2. Detaljno su opisani modeli DER tipa III-IV za potrebe proračuna DM s kratkim spojem. Da bi se predloženi model lakše uklopio u postojeće proračune on je predstavljen u suptranzitnoj, tranzitnoj i ustaljenoj vremenskoj sekvenci;
3. Objasnjen je koncept generalizovanog delta kola koji omogućuje integraciju modela DER tipa III-IV u proračune režima DM s kratkim spojem;
4. Da bi se režim generalizovanog delta kola odredio, predstavljen je unapređeni algoritam sumiranja struja i korekcije napona.

Realizacijom ovih ciljeva, ispunjena su dva osnovna uslova proračuna kratkih spojeva u DM, a to su visoka preciznost i efikasnost.

Preciznost je rezultat što je moguće tačnijeg modelovanja elemenata DM, dok su u isto vreme ti modeli i dovoljno jednostavni za proračune kratkih spojeva u DM velikih dimenzija, koje sadrže relativno veliki broj DER tipa III-IV.

Korišćenjem predstavljenog unapređenog algoritma sumiranja struja i korekcije napona moguće je, sa podjednako lakoćom, proračunavati režime DM kako sa malim brojem čvorova, tako i DM ogromnih dimenzija.



Slika 4. Algoritam proračuna stanja mreže s kratkim spojem

8. LITERATURA

- [1] Luka Strezoski, „Proračun kompleksnih kratkih spojeva neuravnoteženih distributivnih mreža sa distribuiranim energetske resursima”, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2017.
- [2] Luka Strezoski and Marija Prica, „Real-Time Short-Circuit Analysis of Active Distribution Systems”, IEEE Power and Energy Conference in Illinois (PECI), Champagne, IL, USA, 2016.
- [3] Joint Working Group, „Fault Current Contribution from Wind Plants”, Report to the T&D Committee of the IEEE Power and Energy Society, Pro Relay, 2015.
- [4] Vladimir Strezoski, „Analiza elektroenergetskih sistema”, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2014.
- [5] Luka Strezoski, Marija Prica, Vladimir Katić, Boris Dumnić, „Short-Circuit Modeling of Inverter Based Distributed Generators Considering the FRT Requirements”, North American Power Symposium (NAPS), IEEE, Denver, Septembar 2016.

Kratka biografija:



Miloš Spasić rođen je 1994. godine u Krajujevcu. Fakultet tehničkih nauka, studijski program Energetika, elektronika i telekomunikacije upisao je 2013. Na studijama se opredelio za smer Elektroenergetika - elektroenergetski sistemi i diplomirao u oktobru 2017. godine. Trenutno je na master studijama na smeru Elektroenergetski sistemi na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu.