

NAPREDNA KONTROLA TROFAZNOG IŠM NAPONSKOG INVERTORA POVEZANOG NA MREŽU PREKO REZONANTNOG LCL FILTRA

ADVANCED CONTROL OF A THREE-PHASE VOLTAGE-SOURCE INVERTER CONNECTED TO THE GRID VIA A RESONANT LCL FILTER

Marijana Tufegdžić, Vladimir Popović, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U ovom master radu modeluje se i razmatra napredna kontrola trofaznog impulsno-širinski modulisanog (IŠM) naponskog invertora povezanog na krutu električnu mrežu preko rezonantnog LCL filtra. Rad obuhvata modelovanje sistema u različitim koordinatnim sistemima, analizu rezonantnih pojava u LCL filtru, kao i tehnike njihovog pasivnog i aktivnog prigušenja. Posebna pažnja posvećena je dizajnu upravljačke strukture zasnovane na kaskadnoj regulaciji sa kontrolom kvadrata napona jednosmernog kola i regulaciji vektora struje uz primenu fazno-zaključne petlje.

Abstract – This master thesis focuses on the modeling and advanced control of a three-phase pulse-width modulated (PWM) voltage source inverter connected to a stiff electrical grid via a resonant LCL filter. The work includes system modeling in various coordinate frames, analysis of resonant phenomena within the LCL filter, and the implementation of both passive and active damping techniques. Special attention is given to the design of a cascaded control structure based on the regulation of the square of the DC-link voltage and the vector control of the grid current using a phase-locked loop (PLL).

Ključne reči: rezonantni LCL filter, pasivno i aktivno prigušenje, tokovi snaga, regulacija napona DC kola

1. UVOD

Razvoj distributivnih energetske sistema i povećanje udela energetske elektronike u savremenim elektro-energetskim mrežama uslovljavaju sve širu primenu trofaznih naponskih pretvarača. Sve strožiji tehnički zahtevi u pogledu kvaliteta energije, elektromagnetne kompatibilnosti i stabilnosti sistema doveli su do zamene uobičajene topologije sa L izlaznim filtrom sa topologijom koja sada ima rezonantni LCL filter. Pored sposobnosti LCL filtra da omogućava efikasnije potiskivanje viših harmonika, njegova upotreba uvodi kompleksnu dinamiku u sistem, uključujući pojavu rezonantnih učestanosti koje mogu ugroziti stabilnost, [1].

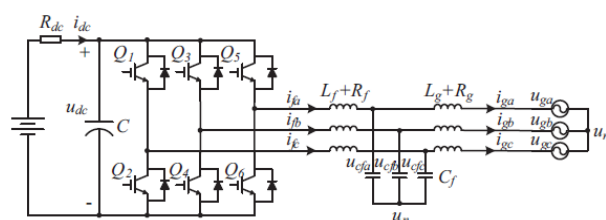
NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Vladimir Popović, docent

U ovom radu razvijen je usrednjeni model trofaznog impulsno-širinski modulisanog (IŠM) naponskog pretvarača povezanog na krutu trofaznu mrežu preko LCL filtra. Posebna pažnja posvećena je upravljačkoj strukturi zasnovanoj na kaskadnoj regulaciji – vektorskoj regulaciji struje sa sinhronizacijom na ugao fazor mrežnog napona pomoću fazno-zaključne petlje i regulaciji kvadrata napona jednosmernog međukola.

2. MODELOVANJE TROFAZNOG IŠM PRETVARAČA PREMA MREŽI SA LCL FILTROM

Jednačine trofaznog sistema strujnog kola naponskog invertora sa LCL filtrom mogu se jednostavno dobiti sagledavanjem *Slike 1*, uz pretpostavke da je mreža kruta i predstavljena idealnim trofaznim naponskim izvorom, [2].



Slika 1. Tipična struktura trofaznog naponskog invertora povezanog na krutu mrežu preko LCL filtra

Dobijeni usrednjeni matematički model pretvarača prema mreži sa LCL filtrom u sinhrono-rotirajućem dq sistemu je najpogodniji za kontrolu, jer su sve izvedene veličine jednosmerne.

$$L_f \cdot \frac{di_f}{dt} + R_f \cdot i_f = -\omega \cdot L_f \cdot J \cdot i_f + \frac{u_{dc}}{2} \cdot S - u_{cf} \quad (1)$$

$$C_f \cdot \frac{du_{cf}}{dt} = -\omega \cdot C_f \cdot J \cdot u_{cf} + i_f - i_g \quad (2)$$

$$L_g \cdot \frac{di_g}{dt} + R_g \cdot i_g = -\omega \cdot L_g \cdot J \cdot i_g + u_{cf} - u_g \quad (3)$$

$$C \cdot \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} - \frac{3}{2} \cdot S \cdot i_f \quad (4)$$

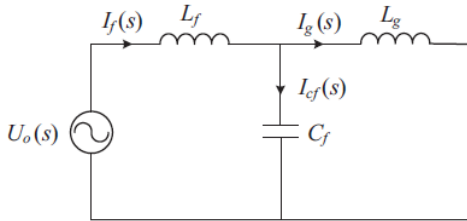
gde su:

- $i_f = [i_{fd} \ i_{fq}]^T$ – vektor struje mreže;
- $i_g = [i_{gd} \ i_{gq}]^T$ – vektor struje pretvarača;
- $i_{cf} = [i_{cfd} \ i_{cfq}]^T$ – vektor struje kroz granu filteraskog kondenzatora;
- $u_{cf} = [u_{cfd} \ u_{cfq}]^T$ – vektor napona na filteraskom kondenzatoru
- $u_g = [u_{gd} \ u_{gq}]^T$ – vektor napona mreže
- L_f – induktivnost rezonantnog LCL filtra sa strane pretvarača
- C_f – kapacitivnost rezonantnog LCL filtra

- L_g – induktivnost rezonantnog LCL filtra sa strane mreže
- C – kapacitivnost u jednosmernom kolu
- S – određuje faktore ispunje digitalnog $I\dot{S}M$ modulatora

3. KONFIGURACIJA LCL FILTRA

Kako su i pretvarač energetske elektronike i električna mreža naponski izvori, kao takvi ne mogu se neposredno spojiti. Za ublažavanje oscilacija između dva ovako sučeljena naponska izvora induktivnost mreže se pojačava sprežnim elementima. Ovaj rad analizira slučaj LCL filtra kao spreznog elementa, što se najčešće primenjuje u praksi, prikazano na Slici 2, [1].



Slika 2. Pojednostavljeno pofazno ekvivalentno kolo LCL filtra

U nastavku će biti opisana neželjena pojava rezonancije LCL filtra kao i tehnike za njeno prigušenje.

3.1. Rezonancija LCL filtra

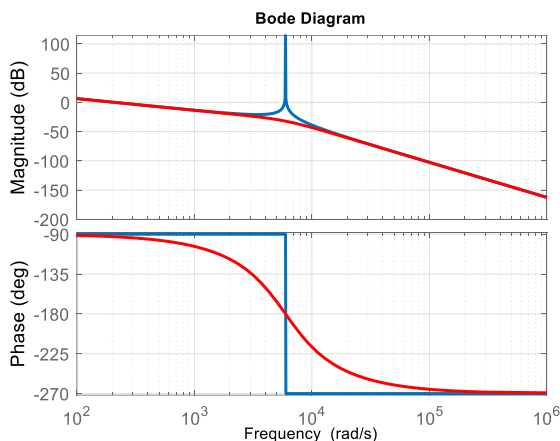
Funkcija prenosa LCL filtra glasi:

$$Y_{LCL}(s) = \frac{I_g(s)}{U_o(s)} = \frac{1/(L_f + L_g)}{s} \cdot \frac{\omega_{res}^2}{s^2 + \omega_{res}^2} \quad (5)$$

gde je rezonantna učestanost ω_{res} :

$$\omega_{res} = 2 \cdot \pi \cdot f_{res} = \sqrt{\frac{L_f + L_g}{L_f \cdot L_g \cdot C_f}} \quad (6)$$

Na Slici 3 plavom bojom prikazane su amplitudska i fazna Bodeova karakteristika LCL filtra sa ne prigušenom rezonantnom pojavom. Izraziti pik amplitude na rezonantnoj učestanosti i brza tranzicija faze u njenoj okolini, ukazuju na probleme sa stabilnošću sistema.

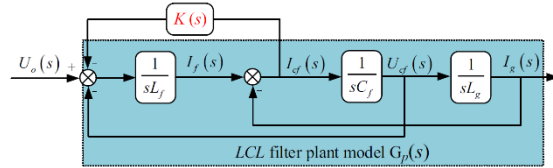


Slika 3. Bodeov dijagram otvorene petlje VSC sa LCL filtrom sa i bez prigušenja rezonancije; parametri Tabela I, sekcija 5

3.2. Tehnike prigušenja rezonantnih pojava

Postoje dva osnovna pristupa za prigušenje rezonantnih pojava, pasivni i aktivni pristup.

Pasivno prigušenje se ostvaruje dodavanjem otpornika na red sa kondenzatora LCL filtra, pri čemu se vodi računa da vrednost tog otpornika bude što manja kako bi se ograničili gubici. Ovakvom izvedbom uspešno se disipira akumulirana energija i pomera rezonantna frekvencija, [1].



Slika 4. Blok dijagram LCL filtra sa implementacijom aktivnog prigušenja sa povratnom spregom po struji kondenzatora

Tehnika aktivnog prigušenja koristi se kada se želi zadržati efikasnost bez dodatnih disipativnih elemenata. Kako je sama rezonansa prouzrokovana filterskim kondenzatorom potrebno je obraditi informacije o struji i naponu grane kondenzatora i izvršiti korekciju po naponu pretvarača kao na Slici 4, [2].

Funkcija prenosa sa aktivnim prigušenjem, gde je K pojačanje po struji otočne grane kondenzatora, glasi:

$$Y_{LCL}(s) = \frac{I_g(s)}{U_o(s)} = \frac{1/(L_f + L_g)}{s} \cdot \frac{\omega_{res}^2}{s^2 + 2\xi\omega_{res} \cdot s + \omega_{res}^2} \quad (7)$$

Sa definisanim relativnim prigušenjem ξ :

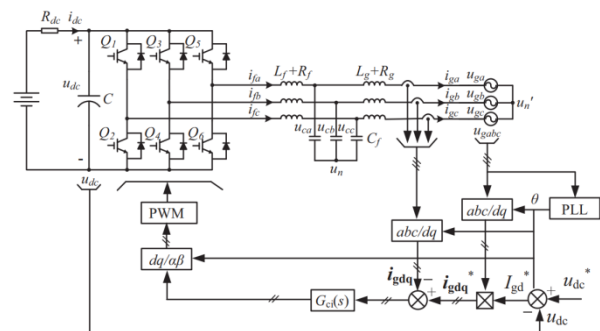
$$\xi = \frac{K\sqrt{C_f L_g}}{2\sqrt{L_f^2 + L_f L_g}} \quad (8)$$

Jasno je da, što je pojačanje K veće, veće je i relativno prigušenje ξ . Preporučuje se takav izbor vrednosti K da ξ bude $1/\sqrt{2}$ ili $1/2$.

Na Slici 3, sa crvenom linijom, prikazan je Bodeov dijagrama za slučaj uvaženog prigušenja ω_{res} . Značajno ublaženi pik i omekšana fazna tranzicija omogućavaju bolju i stabilniju kontrolu.

4. PREDLOG NAPREDNE KONTROLE TOKOVA SNAGE U KONFIGURACIJI VSC SA LCL

Stabilan i efikasan rad trofaznog $I\dot{S}M$ pretvarača namenjenog za kontrolu tokova snage na mreži preko LCL filtra podrazumeva implementaciju kontrolera vektora struje mreže u sinhrono-rotirajućem dq koordinantom sistemu osa orijentisanim na fazor mrežnog napona u konfiguraciji kaskadnog sistema sa nadređenom petljom regulacije napona međukola, Slika 4, [2].

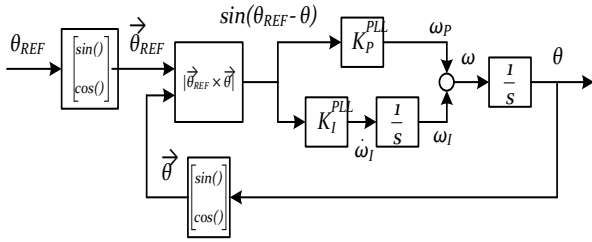


Slika 4. Kontrola VSC u dq – koordinatnom sistemu

4.1. Sinhronizacija sa PLL algoritmom i nadzor snage

Za pravilnu sinhronizaciju pretvarača energetske elektronike sa električnom mrežom na koju se on povezuje, koristi se fazno–zaključna petlja (engl. *Phase Locked Loop – PLL*), Slika 5.

Kada PLL sustigne ugao fazora mreže i kada se taj fazor poklopi sa d osom, q komponenta postaje jednaka nuli. Tako, uz pretpostavku da je mreža kruta i da je PLL dobro podešen, regulacijom struja po d i q osi neposredno se upravlja tokom snage (d komponenta upravlja aktivnom, a q komponenta reaktivnom snagom), [3].



Slika 5. Nelinearni PLL za sinhronizaciju ugla mreže θ_{ref}

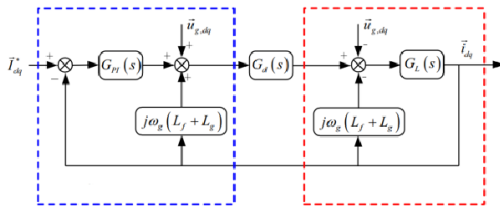
Funkcija prenosa PLL drugog reda sa PI regulatorom za kontrolu praćenja reference ugla i sinteza parametara na osnovu željenog prigušenja ζ i neprigušene prirodne učestanosti ω_n glase [3]:

$$G_{PLL}(p) = \frac{K_p^{PLL} \cdot p + K_i^{PLL}}{p^2 + K_p^{PLL} \cdot p + K_i^{PLL}} \quad (9)$$

$$\zeta = \frac{K_p^{PLL}}{2\sqrt{K_i^{PLL}}}, \omega_n = \sqrt{K_i^{PLL}} \quad (10)$$

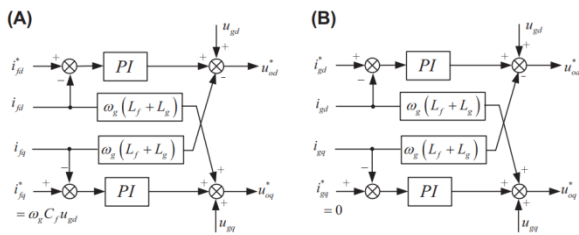
4.2. Regulacija vektora struje mreže

Preduslov za efikasno upravljanje tokovima snaga jeste da se obezbedi injekcija vektora struje pretvarača. Kod konfiguracije VSI pretvarača potrebno je naponsko napajanje pretvoriti u strujno regulisano, CRVSI (engl. *Current Regulated VSI*). Merenjem i povratnom vezom po struji može predašnje obezbediti, Slika 6, [2].



Slika 6. Strujna nadzorna petlja sa prikazanim regulatorom (plava) i objektom upravljanja (crvena)

Zavisno od trenutnih pozicija senzora struje, postoje dve varijante nadzornog sklopa, kontrola po struji pretvarača (šema sa Slike 7A) i kontrola po struji mreže (šema sa Slike 7B).



Slika 7. Regulator vektora struje; pretvarača (levo - A); mreže (desno - B)

Regulacija vektora struje realizovana je paralelnom akcijom dva nezavisna strujna regulatora. Iskorišćeni su PI regulatori u granama pod d po q osi sa rasprežućim članovima usled postojanja induktivnih padova napona. Impedansa kapacitivne grane LCL filtra je zanemarljivo mala na učestanosti mreže, pa je svrsishodno zanemariti njen uticaj prilikom dizajna strujnog nadzora.

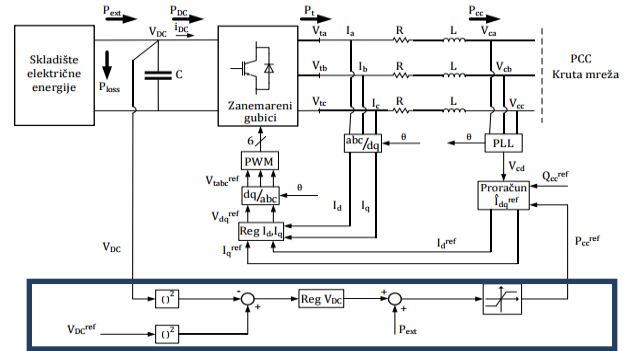
Parametri PI regulatora struje, K_{pi} i K_{il} se biraju na sledeći način:

$$K_{il} = \frac{\omega_{nl}^2}{(L_f + L_g)}, \quad K_{pi} = \frac{2\xi_l \omega_{nl}}{(L_f + L_g)} \quad (11)$$

gde ξ_l i ω_{nl} predstavljaju faktore relativnog prigušenja i i neprigušene prirodne učestanosti petlje struje.

4.3. Nadzor napona jednosmernog kola

Nagli porast ili pad napona jednosmernog kola pretvarača može dovesti do preopterećenja ili kvarova pretvarača, kondenzatora, filtera i drugih komponenti. Ovom regulacijom obezbeđuje se pouzdana i dugotrajna upotreba pretvarača i sistema u kom je on postavljen, prikazano na Slici 8, [1].



Slika 8. Nadređena kontrolna petlja napona DC kola

Nadređena petlja za regulaciju napona DC međukola, V_{DC} obezbeđuje kontrolu toka aktivne snage koja se injektuje u mrežu P_{cc}^{ref} . Ukoliko je stvarna vrednost napona DC međukola veća od vrednosti koja je zadata tj referentna ($V_{DC} > V_{DC}^{ref}$), postoji višak uskladištene energije u DC međukolu. Akcija regulatora je povećanje P_{cc} u cilju korekcija (smanjenja) napona. Pri izlasku iz regulatora dodaje se *feed-forward* član koji daje uvid u dodatnu injekciju snage P_{ext} iz izvora energije (blok Skladište električne energije) kako bi se uklonio uticaj na direktnu granu regulacije. Reaktivna snaga Q_{cc}^{ref} može zadavati po želji, sve dok je to u granicama strujnih mogućnosti pretvarača.

Uskladnik napona jednosmernog kola projektovan je kao PI regulator, pri čemu se parametri biraju tako da se obezbedi stabilan odziv bez oscilacija i sa što manjim vremenskim kašnjenjem. Analiza regulacionog sklopa i sinteza parametara regulatora DC međukola je detaljno opisana u [1].

5. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U nastavku se vrši eksperimentalna verifikacija algoritma za regulaciju injektovane aktivne snage ka mreži i naponskih prilika sa strane pretvarača u slučaju LCL filtra kao spreznog elementa, prikazano na Slici 4.

Prvo se kvantifikuju parametri mreže i kontrolera, a zatim se vrše relevantni testovi tokova snaga i kontrole napona sistema.

5.1. Konfiguracija eksperimentalne postavke

U *Tabeli I* prikazani su parametri električne mreže, spreznog *LCL* filtra i *DC* kola, dok *Tabela II* pruža informacije o pojačanjima kontrolera.

Tabela I. Parametri električnog sistema

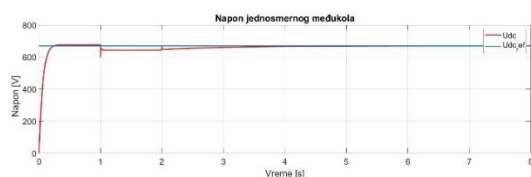
Parametar	Vrednost[veličina]
f_g	50[Hz]
U_l	400[V]
L_f	$3 \cdot 10^{-3}$ [H]
L_g	$1.8 \cdot 10^{-3}$ [H]
C_f	$25 \cdot 10^{-6}$ [μF]
$R_f = R_g$	0.15[Ω]
ω_{res}	$5.96 \cdot 10^3$ [rad/s]
U_{DC}	670[V]
R_{DC}	0.5[Ω]
E	680[V]

Tabela II. Pojačanja kontroler

Parametar	Vrednost[veličina]
$K_{p,i}$	12[V/A]
$K_{i,i}$	750[V/As]
$K_{p,pll}$	$9 \cdot 10^3$ [s ⁻¹]
$K_{i,pll}$	$20.25 \cdot 10^6$ [s ⁻²]
K_d	25.3[V/A]

5.2. Eksperimentalna analiza

Vrši se test injektovanja aktivne snage u mrežu kontrolom napona *DC* kola. Nakon vremena potrebnog za sinhronizaciju *PLL* i uspostavljanja naponskih prilika u mreži, u vremenskoj instanci $t = 2s$ zadaje se referenca napona *DC* kola od $V_{DC}^{ref} = 670V$. Pri simetričnim uslovima u elektroenergetskoj mreži trofaznog linijskog napona 400V, 50Hz sa konfiguracijom parametara iz *Tabele I* garantuje injekciju aktivne snage. Referentna vrednost reaktivne snage ka mreži je jednaka nuli.

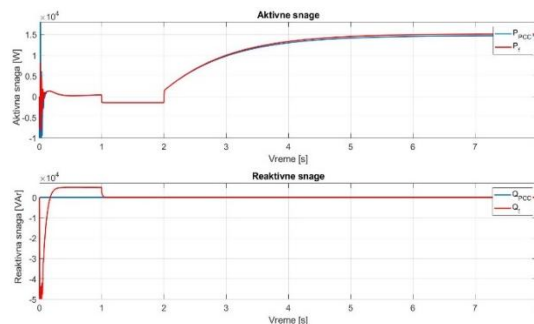


Slika 9. Odziv napona jednosmernog međukola pretvarača (crvena) pri zadatoj referenci (plava)

Sa *Slike 9* se jasno uočava konvergencija napona jednosmernog međukola (crvena) ka referenci (plava) nakon zadavanja iste. Tranzijentni proces traje 4s. Posledica uvećanja naponskih prilika sa strane pretvarača rezultuje injekcijom aktivne snage ka mreži.

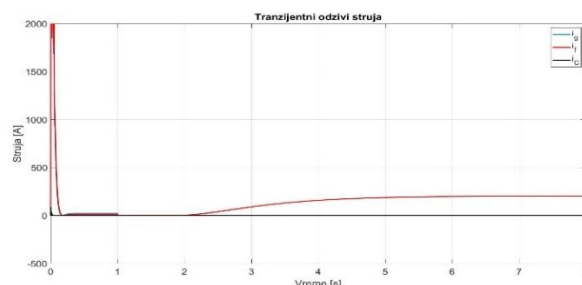
Na *Slici 10* prikazane su komponente aktivnih snaga pretvarača i mreže, gornji grafik. Ove snage su bliske po vrednosti, što potvrđuje da su gubici na *LCL* filtru zanemarivi. Sa iste slike, donji grafik, uočava se nenulta reaktivna snaga pretvarača koja se celokupna troši na *LCL*

filtru. Posledično, reaktivna energija koja se injektuje u mrežu iznosi nula i odgovara referentnoj vrednosti nametnutoj od strane kontrolera.



Slika 10. Prikaz aktivne i reaktivne snage pretvarača (crvena) i mreže (plava) nakon trenutka zadavanja reference; Gornji grafik-aktivne snage, donji grafik-reaktivne snage

Odzivi sa *Slike 11* prikazuju module vektora struja pretvarača, mreže i struje kroz otočni kondenzator.



Slika 11. Tranzijentni odziv amplitude vektora struje pretvarača (crvena), mreže (plava) i otočne struje kroz kondenzator (crna)

6. ZAKLJUČAK

U radu je izvršeno modelovanje i analiza trofaznog naponskog pretvarača povezanog na mrežu preko *LCL* filtra, uz detaljno ispitivanje rezonantnih pojava. Predložena upravljačka struktura sa kaskadnom regulacijom i fazno-zaključanom petljom pokazala je dobru dinamiku i efikasno prigušenje harmonika. Dobijeni rezultati potvrđuju da ovakav pristup obezbeđuje stabilan rad pretvarača i zadovoljava zahteve kvaliteta energije.

7. LITERATURA

- [1] Frede Blaabjerg, Control of power electronic converters and systems, Volume 3, 2021.
- [1] S.G. Parker, B.P. McGrath, D.G. Holmes, Regions of active damping control for LCL filters, IEEE Trans. Ind. Appl. 50 (1) (2013) 424e432.
- [3] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A.V. Timbus, Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems, IEEE Trans. Ind. Electron. 53 (5) (October 2006) 1398e1409

Kratka biografija:

Marijana Tufegdžić je rođena u Sremskoj Mitrovici 2000. god. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranila je 2023. god.