

**UTICAJ REGULACIJE POBUDE SINHRONOG GENERATORA NA DINAMIKU
KRATKIH SPOJEVA****IMPACT OF SYNCHRONOUS GENERATOR EXCITATION REGULATION ON SHORT-
CIRCUIT DYNAMICS**Nikola Papić, Dejan Jerkan, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – Predmet rada je analiza uticaja regulacije napona upravljanjem naponom pobude sinhronog generatora prilikom trolnih kratkih spojeva u upetljanoj prenosnoj mreži. Dat je postupak i proračun tranzijentna trolnog kratkog spoja, kao i analitički izraz za struju kratkog spoja pod uticajem regulacije napona upravljanjem pobude generatora. Nakon toga, prelazi se na simulacionu verifikaciju gde je detaljno objašnjen postupak izvedbe sinhronizacije i regulacije. Konačno, snimljeni su talasni oblici veličina od interesa prilikom kratkog spoja gde su potvrđena teorijska izlaganja, kojima je predviđena pojava većih vrednosti struja kratkog spoja primenom regulacije.

Ključne reči: Sinhroni generator, kratki spojevi, regulacija napona

Abstract The subject of this paper is the analysis of the influence of the network voltage regulation on the control of the excitation voltage of the synchronous generator in case of three-pole short circuits in the looped transmission network. The procedure and calculation of transients for a three-phase short circuit are presented, as well as the analytical expression for the short-circuit current under the influence of voltage regulation through generator excitation control. After that, it is moved on to simulation verification, where the process of implementation of synchronization and regulation is explained in details. Finally, the waveforms of interest during the short-circuit fault event were recorded, providing experimental validation of the theoretical background that short-circuit currents attain higher values when excitation-based voltage regulation is applied.

Keywords: Synchronous generator, short circuits, voltage regulation

1. UVOD

U savremenim elektroenergetskim sistemima sinhrona mašine imaju ključnu ulogu, posebno u konvencionalnim elektranama koje su direktno povezane na visokonaponsku prenosnu mrežu. Najčešće se koriste u generatorskom režimu, kao osnovni proizvođači električne energije.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada, čiji mentor je bio dr Dejan Jerkan, vanr. prof.

U odnosu na druge vrste mašina koje mogu raditi kao generatori, prednost sinhronih generatora leži u mogućnosti podešavanja napona i upravljanja tokom reaktivnih snaga u sistemu, što je omogućeno nezavisnim sistemom pobuđivanja. Preduslov za njihovu eksploataciju jeste adekvatan postupak priključenja na mrežu. Priključenje sinhronog generatora na naizmeničnu elektroenergetsku mrežu bez prethodnog ispunjenja svih uslova za sinhronizaciju dovodi do izraženih električnih i mehaničkih naprezanja u samom generatoru, što može rezultovati ozbiljnim oštećenjima mašine. U okviru eksploatacije elektroenergetskog sistema (EES) neminovno se javljaju različiti poremećaji koji utiču na njegov stabilan rad.

Od svih poremećaja koji se mogu javiti u radu elektroenergetskih sistema, najveći izazov svakako predstavljaju metalni kratki spojevi, posebno onda kada nastanu neposredno na priključcima same mašine. Među različitim vrstama kratkih spojeva, trolni kratak spoj izdvaja se kao najnepovoljniji, jer izaziva najveća i najsveobuhvatnija naprezanja u sistemu. Unutar ovog rada, između ostalog, obrađena je i teorija o regulaciji napona i teorija o sinhronizaciji generatora na mrežu. Pored toga, date su Parkove jednačine i operatorske induktivnosti kao način modelovanja sinhrona mašine pogodan za upravljanje. Izvedeni su izrazi za parametre sinhrona mašine i vremenske konstante za subtranzijentnu, tranzijentnu i ustaljenu sekvencu kratkog spoja.

**2. MATEMATIČKI MODEL SINHRONE MAŠINE,
PARAMETRI MAŠINE I VREMENSKE
KONSTANTE**

Početna forma sistema sastoji se od deset izraza, pri čemu se pet njih tiče jednačina naponske ravnoteže namotaja, a drugih pet jednačina njihovih fluksnih obuhvata, prikazanih na sledeći način:

$$u_d = R_s i_d + p\psi_d - \omega\psi_q \quad (1) \quad \psi_d = L_d i_d + M_d i_f + M_d i_D \quad (6)$$

$$u_q = R_s i_q + p\psi_q + \omega\psi_d \quad (2) \quad \psi_q = L_q i_q + M_q i_Q \quad (7)$$

$$u_f = R_f i_f + p\psi_f \quad (3) \quad \psi_f = M_d i_d + L_f i_f + M_d i_D \quad (8)$$

$$0 = R_k i_D + p\psi_D \quad (4) \quad \psi_D = M_d i_d + M_d i_f + L_D i_D \quad (9)$$

$$0 = R_k i_Q + p\psi_Q \quad (5) \quad \psi_Q = M_q i_q + L_Q i_Q \quad (10)$$

Imajući u vidu činjenicu da su za regulaciju od interesa isključivo upravljačke veličine, uvodi se motiv da se vrši svođenje matematičkog modela na jednostavniji model gde će figurisati promenljive od interesa koje su merljive u mašini. Rezultat ovog postupka uprošćavanja prerasta u sistem jednačina koje opisuju samo statorske namotaje po d i q osi, ali u kojima je kroz izraze operatorskih

induktivnosti dobijenih tokom postupka uprošćavanja sistema, ipak sadržan uticaj svih prisutnih namotaja. Ovakav sistem se naziva sistemom Parkovih jednačina i glasi:

$$u_d = R_s i_d + p\psi_d - \omega\psi_q \quad (11) \quad \psi_d = L_d(p)i_d + G(p)u_f \quad (13)$$

$$u_q = R_s i_q + p\psi_q + \omega\psi_d \quad (12) \quad \psi_q = L_q(p)i_q \quad (14)$$

Uvedene su tri nove veličine u matematički model:

$L_d(p)$ – podužna operatorska induktivnost, $L_q(p)$ – poprečna operatorska induktivnost i $G(p)$ – prenosna funkcija napona pobude. Podužna i poprečna induktivnost, date u zavisnosti od Laplasovog operatora p , produkt su postupka uprošćavanja sistema jednačina (1)-(10). Induktivnosti se tada izražavaju relacijama u kojima figurišu omski otpor (R_k , R_f) i rasipni (Λ_D , Λ_Q , Λ_f) parametri prigušnog i pobudnog namotaja, podužna i poprečna rasipna induktivnost statorskog namotaja, Λ_d i Λ_q , međuinduktivnosti M_d i M_q :

$$pL_d(p) = p\Lambda_d + pM_d\|(R_k + p\Lambda_D)\|(R_f + p\Lambda_f) \quad (15)$$

$$pL_q(p) = p\Lambda_q + pM_q\|(R_k + p\Lambda_Q) \quad (16)$$

Prilikom pojave naglih poremećaja u mašini, poput kratkih spojeva, dinamika odziva mašine je upravo dominantno određena ovim operatorskim induktivnostima.

Vremenski tok struja kratkog spoja karakterišu tri uočljiva stadijuma, koji se na osnovu oblika anvelope struje kvara mogu jasno raščlaniti. To su subtranzijentni, tranzijentni i ustaljeni period. Ovakva podela na intervale uzrokovana je konstrukcionim karakteristikama mašine sa isturenim polovima rotora i prigušnim namotajem. Naime, na samom početku kvara, ukupnoj impedansi mašine aktivno doprinose svi namotaji u mašini. Međutim, zbog izraženije vrednosti aktivne otpornosti prigušnog namotaja u poređenju sa otpornostima ostalih namotaja mašine, doprinos ovog namotaja u impedansi kratkog spoja najpre iščezava. Značajan uticaj prigušnog namotaja najbrže jenjava i time označava kraj subtranzijentnog, a početak tranzijentnog perioda. Aktivna otpornost pobudnog namotaja je i do 50 puta manja od prigušne, što uz ujedno i veliku sopstvenu induktivnost određuje da tranzijentni period vremenog toka struje kvara traje značajno duže od subtranzijentnog. Sopstvena magnetna tromost pomenutih namotaja može se iskazati putem sledećih vremenskih konstanti:

$$T_f = \frac{L_f}{R_f} = \frac{\Lambda_f + M_d}{R_f} - \text{podužna vremenska konstanta pobudnog namotaja rotora} \quad (17)$$

$$T_D = \frac{L_D}{R_k} = \frac{\Lambda_D + M_d}{R_k} - \text{podužna vremenska konstanta prigušnog namotaja rotora} \quad (18)$$

Kao što je rečeno, strujama kvara statorskih namotaja doprinose svi namotaji mašine usled magnetskog sprežanja. Efekat ovog sprežanja je uvažen putem operatorskih induktivnosti $L_d(p)$ i $L_q(p)$. Stoga je vremenski tok struja kvara određen dinamikom svih međusobno spregnutih namotaja, tako da oni združeno određuju induktivnosti i vremenske konstante pomoću kojih se ta promena karakteriše.

Operatorske induktivnosti se mogu primenom teoreme o graničnim vrednostima tumačiti kao konstantne veličine

tokom trajanja nekog od tri pobrojana segmenta (sub,tr,ust). Prema tome, subtranzijentnom tj. početnom periodu prelaznog procesa odgovara primena prve navedene granične teoreme čime se dobija tzv. subtranzijentna induktivnost L_d'' :

$$L_d^n = L_d(t \rightarrow 0) = L_d(p \rightarrow \infty) = \Lambda_d + \left(M_d \left\| \left(\frac{R_k}{p} + \Lambda_f \right) \right\| + \Lambda_D \right) \left\| \left(\frac{R_f}{p} + \Lambda_f \right) \right\| = \Lambda_d + (M_d \|\Lambda_D\|_f). \quad (19)$$

Naredni je tranzijentni period koji za polaznu osnovu uzima izraz sličan prethodnom, ali bez učešća parametara vezanih za prigušni namotaj (Λ_f , R_f). Ovakav pristup je teorijski opravdan odnosnom vrednosti vremenske konstante prigušnog i pobudnog namotaja za koje važi $T_f \gg T_D$. Izraz za određivanje tranzijentne induktivnosti L_d' , uz pobrojana ograničenja glasi:

$$L_d' = L_d(t \rightarrow 0) = L_d(p \rightarrow \infty) = \Lambda_d + (M_d \|\Lambda_f\|). \quad (20)$$

Po vremenskom toku poslednja, ustaljena induktivnost L_d , dobija se korišćenjem drugog graničnog uslova na sledeći način:

$$L_d = L_d(t \rightarrow \infty) = L_d(p \rightarrow 0) = \Lambda_d + \frac{1}{p}(pM_d\|R_k\|R_f) = \Lambda_d + M_d. \quad (21)$$

Analognim postupkom definišu se i poprečne induktivnosti subtranzijentnog i ustaljenog perioda, L_q'' i L_q :

$$L_q'' = L_q(t \rightarrow 0) = L_q(p \rightarrow \infty) = \Lambda_q + \left(M_q \left\| \left(\frac{R_k}{p} + \Lambda_Q \right) \right\| + \Lambda_D \right) \left\| \left(\frac{R_f}{p} + \Lambda_Q \right) \right\| = \Lambda_q + (M_q \|\Lambda_Q\|) \quad (22)$$

$$L_q = L_q(t \rightarrow \infty) = L_q(p \rightarrow 0) = \Lambda_q + M_q. \quad (23)$$

Poprečna operatorska induktivnost nije pod uticajem promene u tranzijentnom periodu zbog odsustva pobudnog namotaja po podužnoj osi, te stoga trivijalno sledi $L_q'' = L_q'$. Vremenske konstante statorskih namotaja se mogu izvesti putem razlaganja na proste činioce izraza za operatorske induktivnosti:

$$L_d(p) = L_d \frac{(1+pT_d')(1+pT_d'')}{(1+pT_{d0}')(1+pT_{d0}'')}; \quad (24)$$

$$L_q(p) = L_q \frac{1+pT_q''}{1+pT_{q0}''}; \quad (25)$$

gde su:

$$T_{d0}' = T_f + T_D \approx T_f = \frac{\Lambda_f + M_d}{R_f} \quad (26)$$

$$T_{d0}'' = \frac{\sigma_{fD}T_D}{1 + T_D} \approx \sigma_{fD}T_D = \frac{\Lambda_D + (\Lambda_f \| M_d)}{R_k} \quad (27)$$

$$T_d' = \sigma_{df}T_f + \sigma_{dD}T_D \approx \sigma_{df}T_f = \frac{\Lambda_f + (\Lambda_d \| M_d)}{R_f} \quad (28)$$

$$T_d'' = \frac{\Lambda_D + (\Lambda_d \| \Lambda_f \| M_d)}{R_k} \quad (29)$$

Apostrof ' se odnosi na konstante vezane za tranzijentni period prelaznog procesa, dok je dvosotruki apostrof '' oznaka za subtranzijentni period. Dodatni indeks ''0'' naglašava da je reč o konstantama koje ne uključuju statorske rasipne induktivnosti, što asocinara na režim praznog hoda, dok su veličine bez indeksa vezane za režim kratkog spoja.

3. ANALITIČKI IZRAZ ZA STRUJU TROPOLNOG KRATKOG SPOJA

Analički izraz za struju kratkog spoja glasi:

$$i_a(t) = -\sqrt{2} \cdot E \cdot \left(\left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} \right] \cos(\omega t + \vartheta_0) - \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(\vartheta_0) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \cos(2\omega t + \vartheta_0) \right] \right) \quad (30)$$

Uvažavajući da je $X_d'' \approx X_q''$ kod sinhronih mašina sa dobro dimenzionisanim prigušnim namotajem i $\vartheta_0 = 0$, jednačina za struju u vremenskom domenu glasi:

$$i_a(t) = -\left[\sqrt{2} \frac{E}{X_d} + \sqrt{2} E \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \sqrt{2} E \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} \right] \cdot \cos(\omega t) + \sqrt{2} \frac{E}{X_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (31)$$

Gde je T_a aperodična vremenska konstanta i iznosi:

$$T_a = \frac{2X_d''X_q''}{\omega R_s(X_d'' + X_q'')} \quad (32)$$

Proračuni struja trofaznog kratkog spoja u radijalnoj šemi mogu se izvesti primenom izraza izvedenih za kvarove neposredno na krajevima generatora, izmenjenim tako da obuhvataju uticaj impedanse elemenata mreže do mesta kvara. Deo prenosnog sistema, npr pri tački C sa slike 1, može se kod trofaznog kratkog spoja zameniti električnom šemom sa generatorom i ukupnom rednom impedansom mreže do mesta kvara:

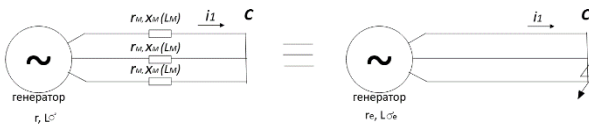
$$\bar{Z}_M = r_M + jX_M \quad (33)$$

Impedansa $\bar{Z}_M$ predstavlja zbir rednih impedansi elemenata mreže do mesta kvara u tački C. Stvarni generator sa impedansom mreže se pri proračunima struje kratkog spoja može zameniti ekvivalentnim generatorom kao na slici 1 sa aktivnom otpornošću faza:

$$r_e = r + r_M \quad (34)$$

i induktivnošću rasipanja:

$$L_{\sigma e} = L_{\sigma} + L_M \quad (35)$$



Slika 1. Ekvivalentni generator

Struja kratkog spoja u radijalnoj šemi računa se preko izraza (30) napisanog za ekvivalentni generator:

$$i_a(t) = -\left[\sqrt{2} \frac{E}{X_{de}} + \sqrt{2} E \left(\frac{1}{X_{de}'} - \frac{1}{X_{de}} \right) e^{-\frac{t}{T_{de}'}} + \sqrt{2} E \left(\frac{1}{X_{de}''} - \frac{1}{X_{de}'} \right) e^{-\frac{t}{T_{de}''}} \right] \cdot \cos(\omega t) + \sqrt{2} \frac{E}{X_{de}''} e^{-\frac{t}{T_{ae}}}, \quad (36)$$

gde su:

$$\begin{aligned} X_{de} &= X_d + X_M; \\ X_{de}' &= X_d' + X_M; \\ X_{de}'' &= X_d'' + X_M, \end{aligned} \quad (37)$$

dok su vremenske konstante:

$$\begin{aligned} T_{de}' &= T_{d0}' \frac{X_{de}'}{X_{de}}; \\ T_{de}'' &= T_{d0}'' \frac{X_{de}''}{X_{de}} \end{aligned} \quad (38)$$

Vremenske konstante T_{d0}' i T_{d0}'' ekvivalentnog generatora poklapaju se sa konstantama stvarnog generatora jer na njih ne utiču parametri statora. Uz pretpostavku da je $X_{de}'' = X_{qe}''$, T_{ae} je, u skladu sa izrazom (32), jednaka:

$$T_{ae} = \frac{1}{\omega} \frac{X_{de}''}{R_s} \quad (39)$$

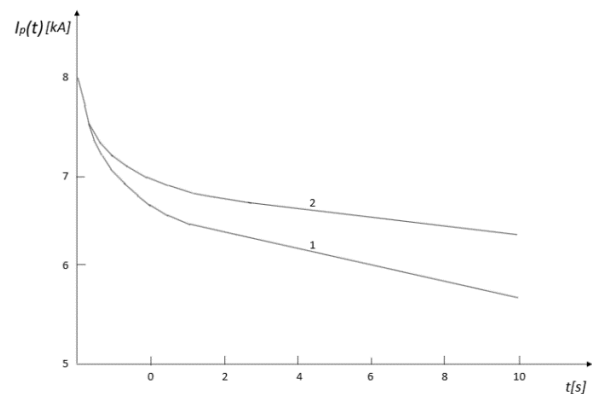
Promena napona pobude generatora usled dejstva regulacije pobude može se približno opisati izrazom:

$$\Delta U_f(p) = \frac{\Delta U}{p} \frac{1}{1 + pT_B} \quad (40)$$

Sa $\Delta U_f(p)$ označena je Laplasova transformacija porasta napona pobude, sa ΔU podešeni maksimalni porast napona pobude, a T_B je vremenska konstanta sistema pobude. Efektivna vrednost naizmenične komponente struje kratkog spoja pri delovanju regulacije dobija se kada se odgovarajućem članu u izrazu (36) doda član prouzrokovan regulacijom:

$$i_a(t) = -\left[\sqrt{2} \frac{E}{X_{de}} [1 + (k-1)F(t)] + \sqrt{2} E \left(\frac{1}{X_{de}'} - \frac{1}{X_{de}} \right) e^{-\frac{t}{T_{de}'}} + \sqrt{2} E \left(\frac{1}{X_{de}''} - \frac{1}{X_{de}'} \right) e^{-\frac{t}{T_{de}''}} \right] \cdot \cos(\omega t) \quad (41)$$

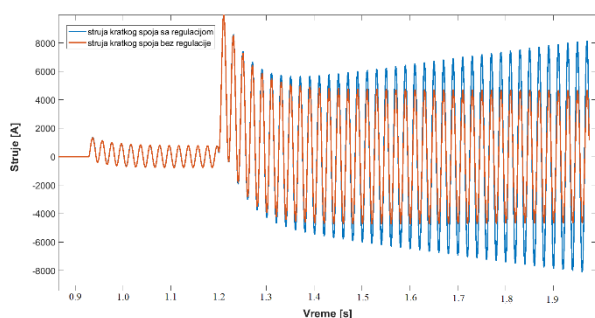
Faktor k obično ima vrednost do reda 2. Na slici 2 prikazan je vremenski tok efektivne vrednosti naizmenične komponente struje kratkog spoja u slučajevima sa i bez udarne regulacije pobude.



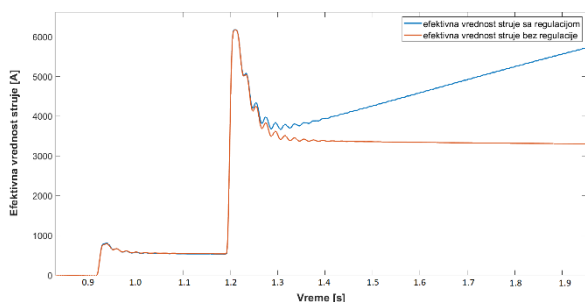
Slika 2. Efektivna vrednost naizmenične struje, (1) bez regulacije, (2) sa regulacijom

4. SIMULACIONA VERIFIKACIJA

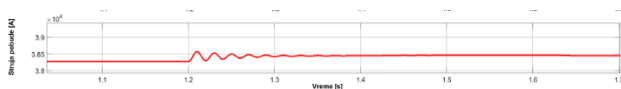
Unutar ovog rada korišćena je IEEE 5-BUS šema koja predstavlja standardizovani električni model pogodan za analizu u okviru Matlab&Simulink softverskog okruženja. Na jedan od čvorova prenosne upetljane mreže vezan je generator kome se reguliše napon pobude, a na mrežu se povezuje putem prekidača. U svrhu analize kratkih spojeva, prvenstveno je neophodna sinhronizacija generatora na mrežu, a zatim i implementacija regulacije napona, što je urađeno putem kaskadne regulacije, izbegavajući time potrebu za pronalaskom parametara PI-kontrolera. Nakon što se uspešno izvrši sinhronizacija i otpočne proces regulacije napona iz razloga što je napon mreže na mestu priključenja manji od zadanog nominalnog, stvara se kratak spoj u dubini prenosne mreže. Kao posledica kratkog spoja javljaju se velike vrednosti struja trolnog kratkog spoja u mreži. Najbitniji rezultati simulacione verifikacije su talasni oblici struje trolnog kratkog spoja sa i bez regulacije napona mreže putem generatora prikazani na slici 3, izdvojene promene efektivnih vrednosti struja u vremenu na slici 4, kao i struje pobude bez regulacije na slici 5 i sa regulacijom na slici 6. Imajući u vidu da kvar nastaje u trenutku $t = 1,2$ s, potvrđena je teorija da su vrednosti struja kvara pri regulaciji veće od onih bez regulacije.



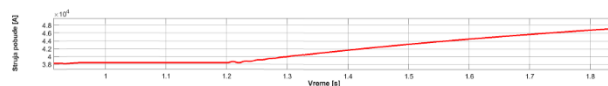
Slika 3. Talasni oblici struja kratkog spoja sa (plava boja) i bez regulacije (narandžasta boja)



Slika 4: Efektivne vrednosti struja kvara sa i bez regulacije u prenosnoj mreži



Slika 5. Struja pobude bez regulacije prilikom kratkog spoja



Slika 6. Struja pobude sa regulacijom prilikom kratkog spoja

5. ZAKLJUČAK

Simulacionom verifikacijom potvrđeni su teorijski analitički izrazi za struje kratkih spojeva sa i bez regulacije napona mreže. Potvrđeno je da su veće vrednosti struje kvara kada postoji regulacija napona u mreži. Sa jedne strane, ovo može predstavljati manu jer zbog većih efektivnih vrednosti dolazi do većih mehaničkih i termičkih naprezanja kako u mašini, tako i u prenosnim vodovima. Sa druge strane, povećanje efektivne vrednosti struje kratkog spoja ima prednost u smislu bržeg delovanja relejne zaštite u prenosnoj mreži, a samim tim i bržeg prepoznavanja i otklonjanja kvara.

6. LITERATURA

- [1] Modelovanje električnih mašina, Vladan Vučković
- [2] Adkins, B. i Harley, RG., 1975., *The general theory of alternating current machines: Application to Practical Problems*, Chapman and Hall.
- [3] Concordia, C., 1951. *Synchronous machines, Theory and Performance*. New York: John Wiley & Sons, INC.
- [4] Osnovi elektroenergetike, Vladimir C. Strezoski, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu
- [5] Odabrana poglavlja iz visokonaponskih postrojenja, Jovan Nahman, Vladica Mijailović, Elektrotehnički fakultet, Akademska misao Beograd

Kratka biografija:

Nikola Papić rođen je u Novom Sadu 2000. god. Osnovne akademske studije završio je 2023. na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine uz završni rad na temu „Modulacione tehnike za upravljanje trofaznim inverterom“. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranio je 2025.god. na temu „Uticaj regulacije pobude sinhronog generatora na dinamiku kratkih spojeva“.

Dejan Jerkan je vanr. prof. na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na Katedri za Energetsku elektroniku i pretvarače. Oblast interesovanja su mu modelovanje i dijagnostika električnih mašina, kao i metoda konačnih elemenata.