



UPRAVLJANJE HVDC PRENOSOM ZASNOVANIM NA PRETVARAČIMA KAO NAPONSKIM IZVORIMA

CONTROL OF VOLTAGE SOURCE CONVERTER BASED HVDC TRANSMISSION

Aleksandar Kokotović, Marko Vekić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U ovom radu su razmatrane najvažnije osobine sistema koji se koriste za jednosmjerni prenos električne energije. Naglašene su prednosti, kao i nedostaci u odnosu na naizmjenične sisteme. Predstavljene su osnovne komponente sistema. Opisano je upravljanje sistemom koristeći strujnu regulaciju. Na kraju su dati rezultati simulacije rada sistema u ustaljenom stanju kako bi se potvrdilo njegovo očekivano ponašanje u tom režimu.

Ključne riječi: HVDC prenos, pretvarači sa naponskim izvorom, strujno upravljanje sistemom

Abstract – The most important characteristics of DC system used for power transmission are discussed in this paper. Advantages, as well as disadvantages comparing to AC systems are emphasized. The main HVDC system components are presented. Current control is detailed as a method to regulate power exchange between two independent AC grids. In order to verify expected behaviour, simulation results of a system in steady state operation are published and explained.

Keywords: HVDC Transmission System, Voltage Source Converters, Current Control Method

1. UVOD

Prva javno upotrebljena mreža za prenos električne energije, izgrađena krajem 19. vijeka. U to doba odvijao se „Rat struja“ između Edisona sa jedne i Tesle i Vestinghausa sa druge strane koji su na kraju dobili Tesla i Vestinghaus otvorivši na taj način put korišćenju naizmjenične struje (AC) za proizvodnju, prenos i potrošnju električne energije. Pošto je tehnologija zasnovana na naizmjeničnoj struji bila naprednija u odnosu na onu zasnovanu na jednosmjernoj struji u pogledu proizvodnje, pouzdanosti, transformisanja kao i naponskih nivoa u prenosu, ubrzo je, postavši standardizovana, postala i stub razvoja tadašnje elektroenergetike [1].

S druge strane, razvoj HVDC sistema je započet sredinom 20. vijeka i zasnivao se na upotrebi snažnih tiristorskih prekidača. Ubrzani napredak i primjena počeli su devedesetih godina 20. vijeka, zahvaljujući razvoju brzih prekidačkih uređaja – snažnih tranzistorskih prekidača.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Marko Vekić, docent.

Najnovijom HVDC tehnologijom moguće je postići sva poboljšanja koja se postižu primjenom FACTS uređaja u naizmjeničnom prenosu, a pored toga, povezivanje naizmjeničnih sistema različitih učestanosti u praksi se ostvaruje jedino jednosmjernom (DC) vezom. Stoga se, potpuno opravdano, može reći da moderna HVDC veza predstavlja najprilagođeniji prenosni sistem [2]. Motiv ovog rada je bio da se predstavi upravljanje jednim savremenim HVDC sklopom zasnovanim na IGBT prekidačima. Upotrebljen je tzv. dvostrani (eng. Back-to-Back) pretvarač koji se sastoji od dva trofazna invertora sa tri nivoa raspregnuta preko zajedničkog DC kola. Cilj je bio prikazati upravljanje tokom snage između dvije nezavisne mreže naizmjeničnog napona povezane preko HVDC sistema.

2. PREGLED HVDC TEHNOLOGIJE

Kao rezultat uvođenja HVDC tehnologije u praktičnu upotrebu nastale su dvije velike, uzajamno povezane dobite vezane za sistem prenosa električne energije. To su povećanje prenosnih kapaciteta i obezbjeđenje dodatne prilagodljivosti sistema, upravljanjem tokom snaga. HVDC prenosni sistemi koriste pretvarače energetske elektronike za povezivanje naizmjeničnih i jednosmjernih mreža. Prednost HVDC prenosa u odnosu na naizmjenični prenos su [3]:

- mogućnost povezivanja naizmjeničnih trofaznih sistema koji nisu sinhronizovani (npr. sistema čije su učestanosti 50 i 60 Hz);
- manji gubici zbog prenosa reaktivne snage, jer je uticaj parazitnih kapacitivnosti i induktivnosti gotovo zanemarljiv;
- najveći dio prenosnog kapaciteta koristi se za prenos aktivne snage;
- povećanje stabilnosti naizmjeničnih sistema međusobnim povezivanjem;
- koristi se manje provodnika za prenos iste količine energije, a moguće je koristiti samo jedan provodnik za prenos (u tom slučaju povratni put je zemlja, pri tome se koriste elektrode ogromne površine ukopane duboko u zemlju);
- provodnici su mnogo tanji (jer je skin-efekat zanemarljiv) i jeftiniji od provodnika koji se koriste u visokonaponskim naizmjeničnim mrežama;
- mogućnost ograničenja struje kratkog spoja u slučaju kvara, što ovu tehnologiju čini manje opasnom po ljude i životnu okolinu;

- smanjenje cijene izgradnje trase prenosnog voda (manje dimenzije zbog smanjenog broja provodnika);

Svi HVDC sistemi koriste pretvarače energetske elektronike, koji se mogu podijeliti u dvije grupe:

- mrežom vođeni pretvarači, koji se zasnivaju na polu-upravljivim poluprovodničkim prekidačima - tiristorima;
- samokomutujući pretvarači, koji se zasnivaju na puno-upravljivim poluprovodničkim prekidačima - tranzistorima (u pitanju su tranzistori sa izolovanim gejtom).

Klasični HVDC sistemi, koji su zasnovani na tiristorskim prekidačima, imaju prednost jedino kada je u pitanju prenos velikih snaga, kao i efikasnost pojedinačnih prekidača.

Sa druge strane, prednosti modernih HVDC sistema, koji su zasnovani na tranzistorskim prekidačima, su odsustvo potrebe za ugrađivanjem kompenzatora reaktivne snage zahvaljujući mogućnosti jednostavnog upravljanja tokom reaktivne snage, smanjene dimenzije neophodnih filtara usljed pojave harmonika višeg reda u talasnom obliku napona na izlazu pretvarača, kao i manji gubici na nivou cjelokupnog pretvaračkog sklopa.

Prema vrsti izvora koji koriste na svojim priključcima na jednosmjernoj (DC) strani, pretvarači mogu biti sa [4]:

- strujnim izvorom (Current Source Converter);
- naponskim izvorom (Voltage Source Converter).

2.1. Topologije pretvarača sa naponskim izvorom u sklopu HVDC sistema

Monofazni polumosni (Half-Bridge) DC/AC pretvarač, predstavlja osnovni gradivni element višefaznog (trofaznog) pretvarača, koji nalazi primjenu u HVDC sistemima u vidu raznih topologija.

Kada radi u invertorskom režimu, ovaj pretvarač na svom izlazu daje pravougaoni talasni oblik napona sa dva nivoa. Takav talasni oblik napona sadrži harmonike neparnog reda koje je potrebno odstraniti kako bi ostala prisutna jedino osnovna komponenta napona. Način da se otklone neželjene sinusne komponente napona je da se na izlaz invertora postavi visokopropusni filtar.

Filtiri za niže harmonike (treći, peti, sedmi, deveti) bi bili izuzetno glomazni i skupi, pa je zato prvo potrebno „pomjeriti“ harmonike nižeg reda na veće učestanosti, a onda ih i ukloniti odgovarajućim filtrom. „Pomjeranje“ harmonika nižeg reda na veće učestanosti se ostvaruje upotrebom tehnike impulsno-širinske modulacije.

Postoji veliki broj različitih topologija pretvarača koji na svom izlazu mogu da daju talasni oblik napona sa više nivoa (u invertorskom režimu rada). One se mogu podijeliti na klasične i moderne [5].

3. KOMPONENTE HVDC PRENOSNOG SISTEMA

Na slici 1 prikazana je pojednostavljena pofazna šema HVDC sistema zasnovanog na pretvaračima sa naponskim izvorom. Osnovni elementi sistema su: pretvarači, energetski transformatori, fazne prigušnice, filtri viših harmonika, kondenzatori, vodovi, prekidači i uzemljivači.

4. UPRAVLJANJE HVDC PRENOSNIM SISTEMOM

Tokovima aktivne i reaktivne snage u ustaljenom stanju u HVDC sistemu se upravlja nezavisno, prema sljedećim jednačinama:

$$P = \frac{V \cdot V_m \cdot \sin \delta}{X}, \quad (1)$$

$$Q = \frac{V \cdot V_m \cdot \cos \delta - (V_m)^2}{X}, \quad (2)$$

gdje je:

V – moduo vektora napona na izlazu pretvarača, sa naizmjenične strane;

V_m – moduo vektora napona na sabirnici na koju se priključuje visokopropusni filtar;

δ – ugao snage (razlika uglova vektora napona V i V_m);

X – reaktansa fazne prigušnice.

Dakle, HVDC sistem zasnovan na pretvaračima sa naponskim izvorom, u izvedbi prikazanoj na slici 1, odlikuje se mogućnošću jednostavnog upravljanja tokovima aktivne i reaktivne snage, koje se razmjenjuju između naizmjeničnih sistema. Postupak upravljanja je zasnovan na zadavanju referentnih vrijednosti za aktivnu i reaktivnu snagu sklopu koji upravlja jednim pretvaračem (neka je to, zbog daljeg razmatranja, lijevi pretvarač). Sklopu koji upravlja drugim pretvaračem (desni pretvarač) se, pored reference za reaktivnu snagu, zadaje i referentna vrijednost napona jednosmjernog međukola. Referentna vrijednost za reaktivne snage se zadaje nezavisno kod oba pretvarača.

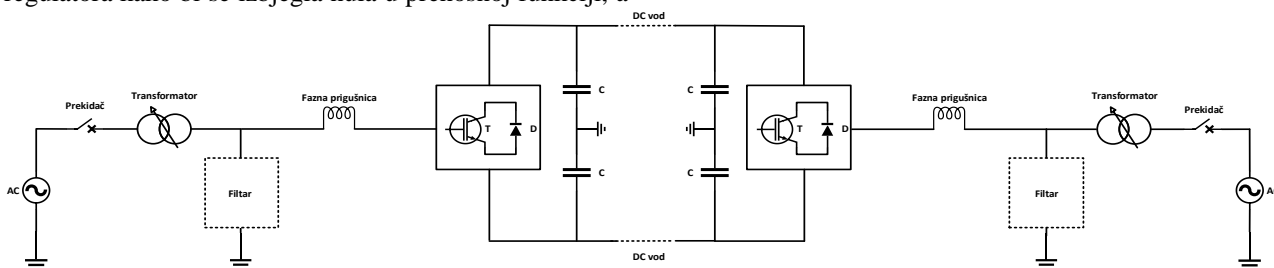
Upravljanje radom pretvarača se vrši regulatorima koji se nalaze u okviru upravljačkih sklopova pretvarača. Regulator aktivne i reaktivne snage nezavisno upravlja razmjennom snage između jednosmjerne strane lijevog pretvarača i naizmjeničnog sistema sa iste strane. Regulator napona jednosmjernog međukola treba da obezbjedi stabilan napon, kako bi regulator snage vršio upravljanje prema izrazima (1) i (2). Proračuni upravljačkih promjenljivih se vrše u dq koordinatnom sistemu. Da bi to bilo moguće potrebno je stalno imati podatak o stvarnom položaju rotirajućeg koordinatnog sistema. Određivanje položaja koordinatnog sistema se vrši u fazno zatvorenoj petlji (Phase Locked Loop - PLL).

4.1. PLL u okviru upravljačkog sklopa HVDC sistema

Da bi upravljanje pretvaračima sa naponskim izvorom koji pripadaju HVDC sistemu bilo izvedeno jednostavno i brzo, potrebno je da se veličine koje zahtjevaju regulatori pretvore iz faznog u dq sistem. Pogodnost dq sistema je što se bilo koja trofazna veličina iz faznog sistema u dq sistemu može predstaviti sa dvije međusobno upravne komponente. One se obrću zajedno sa koordinatnim sistemom, što znači da su u ustaljenom stanju jednosmjerne. Pretvaranje veličina iz abc u dq koordinatni sistem se u oba upravljačka sklopa koji pripadaju pretvaračima vrši na osnovu određenog položaja dq koordinatnog sistema. Oba upravljačka sklopa sadrže po jedan PLL, koji pretvara fazne napone mreže V_{mabc} u napone u dq koordinatnom sistemu V_{mdq} i prilagođava brzinu obrtanja dq koordinatnog sistema sve dok q komponenta napona mreže ne postane jednaka nuli,

$V_{mq} = 0$. Kada se to dogodi, položaj dq sistema je određen. Jedna od mogućnosti za praktično ostvarenje PLL-a jeste upotreba integralno-proporcionalnog (IP) regulatora kako bi se izbjegla nula u prenosnoj funkciji, a

time i preskok u odzivu koji bi nastao kod uobičajenog PI regulatora.



Slika 1. Pofazna šema HVDC sistema koji je zasnovan na pretvaračima sa naponskim izvorom

4.2. Strujno upravljanje u okviru HVDC sistema

Kombinacijom matematičkog modela HVDC sistema u ustaljenom stanju i matematičkog modela pretvarača u okviru HVDC sistema u dq koordinatnom sistemu, dobijaju se uopštene jednačine za zadavanje potrebnih komponenti modulišućeg signala u dq sistemu [6]:

$$m_d = \frac{2}{V_{DC}} \cdot \left[\left(L \frac{di_d}{dt} + Ri_d \right) + V_{md} - \omega_0 Li_q \right], \quad (3)$$

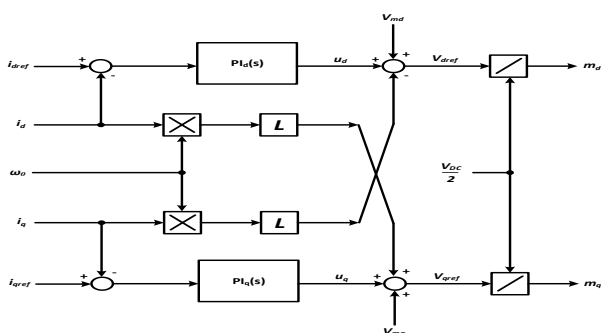
$$m_q = \frac{2}{V_{DC}} \cdot \left[\left(L \frac{di_q}{dt} + Ri_q \right) + V_{mq} + \omega_0 Li_d \right]. \quad (4)$$

Prema izrazima (3) i (4), očigledno je da su za upravljanje d i q komponentama modulišućeg signala neophodna dva proporcionalno-integralna regulatora, po jedan za obje ose. Jednačine koje opisuju rad PI regulatora predstavljaju dva međusobno raspregnuta linearna sistema prvog reda:

$$L \frac{di_d}{dt} = Ri_d + u_d, \quad (5)$$

$$L \frac{di_q}{dt} = Ri_q + u_q, \quad (6)$$

gdje su sa u_d i u_q označene upravljačke promjenljive kojima se neposredno upravlja d (3) i q (4) komponentama indeksa modulacije. Strujna blok šema upravljanja je data na slici 2.



Slika 2. Blok šema upravljanja d i q komponentama struje HVDC sistema

Upravljanje se vrši na osnovu signala greške koji predstavlja razliku između vrijednosti referentnih i stvarnih komponenti struja i_d i i_q , redom.

Zatim se nove vrijednosti komponenti modulišućeg signala koriste za upravljanje d i q komponentama napona na izlazu pretvarača, koje, u stvari, predstavljaju upravljačke promjenljive kojima se zadaju nove vrijednosti d i q komponenti struje.

4.3. Upravljanje tokom snaga u okviru HVDC sistema

Ako je napon u tački priključenja između pretvarača i sistema stabilan, tada je u ustaljenom stanju $V_{mq} = 0$, dok je napon V_{md} jednak vršnoj vrijednosti faznog napona V_m . Ako se pretpostavi da je napon V_m stabilan, onda su izrazi za aktivnu i reaktivnu snagu u dq sistemu:

$$P = \frac{3}{2} V_m i_d, \quad (7)$$

$$Q = -\frac{3}{2} V_m i_q. \quad (8)$$

Dakle, upravljanje tokovima snaga se sprovodi tako što se na osnovu referentnih vrijednosti za razmjenu aktivne i reaktivne snage, P_{ref} i Q_{ref} , zadaju referentne vrijednosti za d i q komponente struje lijevog pretvarača, i_{dref} i i_{qref} :

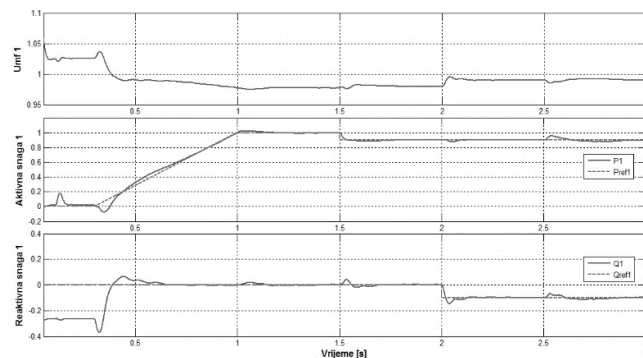
$$i_{dref} = \frac{2}{3V_m} P_{ref}, \quad (9)$$

$$i_{qref} = -\frac{2}{3V_m} Q_{ref}, \quad (10)$$

na osnovu kojih se upravlja d i q komponentama struje.

5. REZULTATI SIMULACIJE RADA SISTEMA

Simulacija rada HVDC sistema izvršena je u *Simulink* programskom paketu, koji je sastavni dio programskog okruženja *MATLAB*. Dužina trajanja simulacije je iznosila 3 s. Na grafiku sa slike 3 prikazani su dobijeni rezultati za „lijevu polovinu“ sistema sa slike 1. Oni su označeni brojem „1“. Na grafiku sa slike 4 prikazani su dobijeni rezultati za „desnu polovinu“ sistema sa slike 1. Oni su označeni brojem „2“. Naizmjenični sistem broj 1 preko HVDC sistema isporučuje aktivnu snagu naizmjeničnom sistemu broj 2.

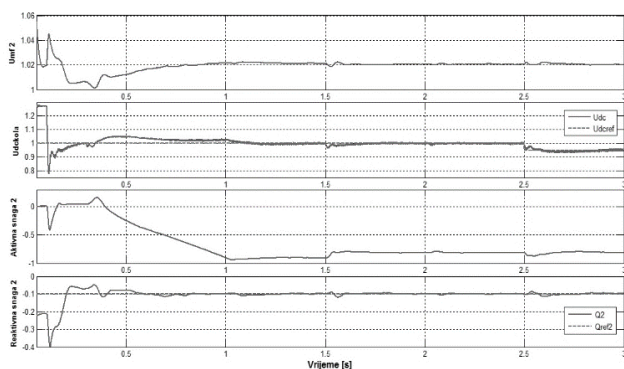


Slika 3. Uporedni pregled dobijenih rezultata simulacije za „lijevu polovinu“ sistema sa slike 1

U trenutku $t = 0,3$ s se, dovođenjem naponskih impulsa na gejtove IGBT-ova u sklopu pretvarača broj 1, uključuje ovaj pretvarač. Kao što je već objašnjeno, on služi za upravljanje tokom aktivne snage. On radi (tokom simulacije) u ispravljačkom režimu. Smjer toka aktivne i reaktivne snage ima pozitivan predznak ako se snage isporučuju od naizmjeničnog sistema (mreže) ka pretvaraču.

Odmah nakon uključivanja pretvarača broj 1 njemu se, kao referenca za vrijednost aktivne snage (isprekidana kriva), zadaje nazivna vrijednost aktivne snage (1 r.j.). Ona se dostiže u trenutku $t = 1$ s. U trenutku $t = 1,5$ s se zadaje smanjenje aktivne snage za 0,1 r.j.

Referentna vrijednost za reaktivnu snagu, koja se zadaje pretvaračem broj 1, ima nultu vrijednost sve do trenutka $t = 2$ s, kada se smanjuje za 0,1 r.j. Ono što se još može uočiti jeste zavisnost povećanja vršne vrijednosti faznih napona (prvi grafik) u tački priključenja filtera od povećanja reaktivne snage koja se isporučuje mreži.



Slika 4. Uporedni pregled dobijenih rezultata simulacije za „desnu polovinu“ sistema sa slike 1

Pretvarač broj 2 se uključuje u trenutku $t = 0,1$ s. On tokom simulacije radi u invertorskom režimu i ima ulogu upravljanja naponom jednosmjernog međukola. Drugi grafik sa slike 4 prikazuje promjenu ovog napona (puna kriva) tokom simulacije. Po uključivanju pretvarača broj 2 njemu se, kao referenca za vrijednost napona jedno-smjernog međukola, zadaje nazivna vrijednost tog napona (1 r.j.). Ova vrijednost se u trenutku $t = 2$ s smanjuje na 0,95 r.j.

Vrijednost aktivne snage koja se preko pretvarača broj 2 isporučuje naizmjeničnom sistemu (mreži) broj 2 ima suprotan znak od vrijednosti aktivne snage koju naizmjenični sistem (mreža) broj 1 isporučuje pretvaraču broj 1, ali je po apsolutnoj vrijednosti manja, što je posljedica gubitaka u pretvaračima i u ostalim komponentama sistema.

Referentna vrijednost za reaktivnu snagu se održava na $-0,1$ r.j. tokom trajanja simulacije. Upravljanje tokom reaktivne snage se odvija nezavisno između naizmjeničnih sistema i pretvarača u sklopu HVDC sistema.

6. ZAKLJUČAK

Ovaj rad daje osvrt na visokonaponske jednosmjerne prenosne sisteme sa strane sa koje se oni nalaze u prednosti u odnosu na klasične, naizmjenične prenosne sisteme. Kao najvažnije prednosti HVDC sistema se mogu navesti jednostavno upravljanje tokovima aktivne i reaktivne snage, pružanje ekonomski isplativih i prostorno prihvatljivih rješenja problema vezanih za reaktivnu snagu, održavanje naponske stabilnosti i

povezivanje nesinhro-nizovanih sistema. Zahvaljujući navedenim prednostima, potpuno je shvatljiv nagli razvoj i porast broja izgrađenih HVDC prenosnih sistema u 21. vijeku. Istorijski gledano, tri decenije stariji, pretvarači zasnovani na tiristorima su jedino po kapacitetu za prenos snaga ostali nenadmašeni u odnosu na pretvarače zasnovane na brzim IGBT-ovima. Važan zaključak je bio da se upravljanje takvim sistemom sprovodi tako što jedan pretvarač upravlja tokom aktivne snage, a drugi upravlja naponom jednosmjernog međukola. Upravljanje tokom reaktivne snage se postiže nezavisno kod oba pretvarača. Postupak upravljanja se vrši u dq sistemu, pošto su u njemu veličine u ustaljenom režimu jednosmjerne. Podatak o trenutnom položaju rotirajućeg dq sistema daje PLL. Za upravljanje tokom aktivne i reaktivne snage korišćena je strujna petlja.

Rezultati simulacije su pokazali očekivane vrijednosti.

7. LITERATURA

- [1] Kim, C. K., Sood, V. K., Jang, G. S., Lim, S. J., Lee, S. J.: „HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems“, John Wiley & Sons (Asia), Clementi Loop, Singapore, 2009.
- [2] Arrillaga, J., Liuand, Y. H., Watson, N. R.: „Flexible Power Transmission: The HVDC Options“, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, England, 2007.
- [3] Ostojić, R.: „Visokonaponski jednosmjerni prenos“, INFOTEH - Jahorina, Vol. 8, Ref. F-14, p. 889-893, Jahorina, BiH, 2009.
- [4] Acha, E., Agelidis, V., Anaya-Lara, O.: „Power Electronic Control in Electrical Systems“, Newnes Books, Oxford, England, 2002.
- [5] Gupta, K. K., Bhatnagar, P.: „Multilevel Inverters: Conventional and Emerging Topologies and Their Control“, Academic Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 2017.
- [6] Yazdani, A., Iravani, R.: „Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications“, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 2010.

Kratka biografija:



Aleksandar Kokotović rođen je u Trebinju 1994. godine. Osnovnu i srednju školu završio je u Bileći. Osnovne akademske studije je započeo 2013. godine na Fakultetu tehničkih nauka, na studijskom programu Energetika, elektronika i telekomunikacije. Diplomski rad je odbranio u septembru 2017. godine. Iste godine je upisao Master akademske studije, smjer Energetska elektronika i električne mašine. Master rad je odbranio u oktobru 2018. godine.



Marko Vekić je docent na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na Katedri za Energetsku elektroniku i pretvarače. Oblast interesovanja su energetska elektronika u prenosnim i distributivnim mrežama i kvalitet električne energije.