

**ZAŠTITNA OPREMA I NJENO MODELOVANJE U DISTRIBUTIVNOJ TEST MREŽI
MODELLING RELAY PROTECTION IN DISTRIBUTED TEST NETWORKS**Dušan Đuketić, Aleksandar Stanisavljević, Vladimir A. Katić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U radu je posmatrana modifikovana IEEE 13-bus test mreža u okviru koje je modelovana relejna zaštita. Mreža je modifikovana tako što je u okviru nje priključena solarna elektrana i zaštitna oprema. Simulirani su jednopolni i trolejni kratak spoj sa i bez relejne zaštite i prikazan je rad relejne zaštite tokom kratkih spojeva.

Ključne reči: IEEE 13-bus test mreža, solarna elektrana, relejna zaštita, napon, struja

Abstract – In the paper, a modified IEEE 13-bus test grid was observed in which the relay protection was modelled. The network was modified by connecting a solar power plant and protective equipment within it. Single-pole and three-pole short circuits with and without relay protections are simulated and the operation of the relay protection during short circuits is shown.

Keywords: IEEE 13-bus test grid, solar power plant, relay protection, voltage, current

1. UVOD

Pojava obnovljivih (distribuiranih) izvora električne energije u elektroenergetskom sistemu, poput solarnih, vetroelektrana, malih hidroelektrana, te elektrana na biomasu i bio gas unele su velike promene u njegov rad i postavile nove zahteve u pogledu održavanja stabilnosti i zaštite [1, 2]. Po obimu priključivanja, raspršenosti po distributivnoj mreži i prostornoj raspodeli, te intermitentnosti solarne energije, foto-naponske (FN) solarne elektrane imaju najširi uticaj i zahtevaju posebna prilagođenja u planiranju i eksploataciji, kao i promenu dnevne rutine [3]. Iz tih razloga je važno izučiti rad zaštitne opreme (relejne zaštite) i njeno modelovanje u slučaju kvarova u mreži. Poznati su brojni pristupi ovoj problematici [4, 5], a u ovom radu će za ovo izučavanje biti iskorišćen simulacioni model jedne od međunarodno priznatih IEEE referentnih distributivnih test mreža [6]. Za istraživanje efekata kvarova, odnosno pojave propada napona u mreži sa priključenim obnovljivim izvorima, na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu korišćene su razne IEEE test mreže. Tako je u [7] ovo istraživanje vršeno modelovanjem IEEE test mreža sa 3 i 9 sabirnica u DigSilent softveru. U [8] je korišćena IEEE test mreža sa

33 sabirnice emulirana u Typhoon HIL paketu, a razmatrani su propadi napona i pojava harmonijskog otiska [9].

Najčešće je za istraživanje korišćena IEEE 13-bus test mreža. U [10] i [11] razmatrani su propadi napona simuliranjem raznih vrsta kratkih spojeva u ovoj mreži sa priključenom FN i vetroelektranom i modelovanjem u Matlab/Simulink softveru. U [12] je iskorišćen DigSilent softver, a test mreža je modifikovana jednim vetrogeneratorom. Posmatrani su vremenski dijagrami napona i struja tokom kvara, kao i uticaj rada vetrogeneratora na ove veličine tokom kvara. Napredne metode ispitivanja propada u IEEE 13-bus test mreži sa primenom neuralnih mreža prikazane su u [13], gde je ukazano na veliku brzinu i tačnost detekcije kvarova.

Međutim, ni u jednom pomenutom istraživanju nije uključeno modelovanje i simulacija zaštitne opreme i njenog rada tokom raznih vrsta kvarova uz paralelno dejstvo obnovljivih izvora. U ovom radu će biti razmatrani različiti scenariji ovakvih situacija korišćenjem IEEE 13-bus test mreže sa priključenom FN elektranom i posmatran način reagovanja relejne zaštite.

2. DISTRIBUTIVNE TEST MREŽE I ZAŠTITA

U odnosu na tradicionalni, vertikalno organizovan elektroenergetski sistem (EES), gde je proizvodnja električne energije zasnovana na velikim elektranama sa sinhronim generatorima, a zatim se energija preko prenosnog i distributivnog sistema dostavlja potrošačima, kod novih, savremenih mreža proizvodnja na bazi obnovljivih izvora priključuje se i na distributivnu mrežu. Tako se dobija aktivna (distributivna) mreža, koja uključuje proizvodnju i skladištenje električne energije, odnosno Distribuirane elektroenergetske resurse ili skraćeno DER [2]. Time se smanjuju troškovi, gubici i negativni efekti na okolinu, a povećava efikasnost rada elektroenergetskog sistema.

2.1. Distributivne test mreže

Distributivne test mreže predstavljaju modele mreža koji su sačinjeni na bazi konfiguracije i parametara realnih distributivnih mreža, pa omogućuju simulacije njihovog rada u raznim (hipotetičkim) situacijama i pogodne su za razna testiranja. Cilj je da se reprodukuju karakteristike realnih sistema, pri čemu se uvažavaju karakteristike regiona gde se mreža nalazi. Distributivne test mreže su veoma koristan alat i veoma često se koriste u istraživanjima u oblasti elektroenergetike.

Najčešće korišćene distributivne test mreže su one koje je formirao IEEE, te CIGRE i dr. Ima ih više i najlakše se

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Aleksandar Stanisavljević, docent.

mogu podeliti po broju sabirnica (engl. *bus*), pa se kreću od 4 pa sve do 8500 čvorova [6].

IEEE 13-bus test mreža napravljena je po uzoru na severnoameričke mreže, koje su znatno drugačije od evropskih, pre svega zbog postojanja velikog broja potrošača koji su priključeni na jednu ili dve faze. Koren mreže predstavljen je „swing“ generatorom (može da generiše bilo koju količinu energije koja je potrebna mreži kako bi se održale naponske prilike) nominalnog napona 4.16 kV. Čvorovi su povezani nadzemnim i kablovskim vodovima, koji mogu biti trofazni, dvofazni ili monofazni. Na mrežu su priključena tri tipa potrošača. U čvoru 675 priključena je kondenzatorska baterija koja u mrežu utiskuje reaktivnu snagu od 200 kVAr po fazi. Frekvencija sistema je 60 Hz [6].

2.2. Relejna zaštita distributivnih mreža

U modernim distributivnim mrežama, za zaštitu od kratkih spojeva najčešće se primenjuju zaštitni uređaji kao što su prekostrujni releji, reklozeri, osigurači i naponski releji, koji obezbeđuju razne vrste zaštite [4].

U ovom radu razmatraće se tri vrste zaštite: prenaponska, podnaponska i prekostrujna zaštita. Treba napomenuti da će se koristiti trenutna prekostrujna zaštita, tačnije relej čija se logika zasniva na merenju trenutne struje. Kod podnaponske i prenaponske relejne zaštite princip rada i način delovanja je potpuno isti kao kod prekostrujnih releja. Ulazna veličina je napon i logika releja se zasniva na merenju istog. Napon koji se meri vezan je za struju podešenja sledećim izrazom:

$$U_{\text{podešenja}} = I_{\text{podešenja}} * Z \quad (1)$$

gde Z označava impendansu releja [4].

3. MODELOVANJE SISTEMA U SIMULINKU

U ovom radu korišćen je programski jezik „Matlab 2020“, odnosno njegov deo „Simulink“ iz kog je preuzet model IEEE 13-bus test mreže [14] i modifikovan dodavanjem modela FN elektrane [10,11,13]. Test mreža je dodatno modifikovana dodavanjem modela relejne zaštite.

3.1. Model IEEE13-bus test mreže sa FN elektranom

Model razmatrane IEEE 13-bus test mreže sa priključenom FN elektranom prikazan je na slici 1.

3.2. Model solarne elektrane

Model FN elektrane korišćene u radu dat je na slici 2. Elektrana je snage 250 kW i povezana je na sabirnicu 671 na napon 4,16 kV.

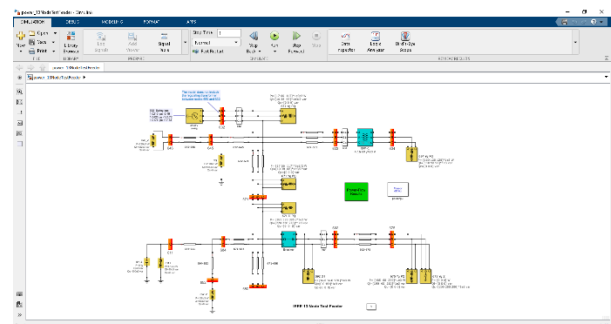
3.3. Modelovanje relejne zaštite

U distributivnoj mreži sa priključenom FN elektranom relejna zaštita je modelovana tako što se elektrana odvaja od mreže sa kvarom pomoću prekidača. U sve tri pomenute vrste zaštite, različita je samo logika po kojoj se prekidač aktivira. Na slici 3 prikazana je šema povezivanja i delovanja releja u IEEE 13-bus test mreži. Prikazana su sva tri releja, iako ne mogu odjednom da deluju. Kroz različita modelovanja biće prikaza primena svakog ponaosob.

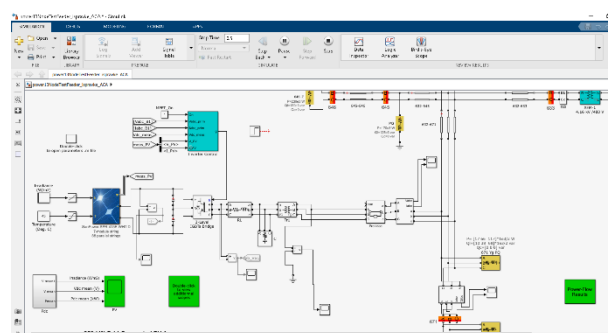
Podnaponski relej radi kada je napon manji od unapred određene vrednosti. Parametri se podešavaju tako što se prvo unese granica ispod koje relej reaguje i šalje signal

prekidaču. Podešavanje vremenskog kašnjenja podnapona zasniva na kašnjenju releja u davanju signala, odnosno ukoliko napon padne ispod dozvoljene granice, ali se vrati na dozvoljenu vrednost za manje od 0.1 sekunde, relej neće reagovati. Kašnjenje releja je uvedeno zbog omogućavanja rada distribuiranih izvora u modu podrške mreži prilikom kvara (engl. *Low Voltage Ride Through - LVRT*). Nominalni napon faza-zemlja je napon mreže. U ovom istraživanju napon mreže je 4.16 kV, pa je fazni napon 2.4 kV. Zbog toga se relej podešava na donju granicu od 2.1 kV. Frekvencija sistema je 50 Hz ili 60 Hz. Logika rada prenaponskog releja se zasniva na istom principu kao kod podnaponskog releja samo on reaguje na porast napona preko 10% nominalnog. Podešavanje podnaponskog releja „U>>“ se postiže duplim klikom na box releja u modelu (slika 3). Podešavanje vremenskog kašnjenja je identično kao kod podnaponskog releja. Za podatke za ovu test mrežu, relej se podešava za gornju granicu napona od 2.7 kV. Frekvencija sistema je ista, kao ranije pomenuta.

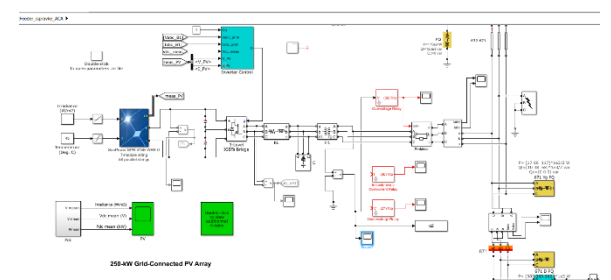
Relej za trenutnu prekomernu struju reaguje kada struja premaši unapred određenu vrednost. Relej reaguje i šalje nalog prekidaču za otvaranje ukoliko je struja u mreži veća od 25% dozvoljene vrednosti. U modelu se meri struja (Ampermetar se veže redno na vod u kom se meri struja, na ulaz ide „+“, a na izlaz „-“), a signal iz releja se dalje šalje na prekidač.



Sl. 1. MATLAB/Simulink model IEEE13-bus test mreže



Sl. 2. Model FN elektrane priključene na sabirnicu 671



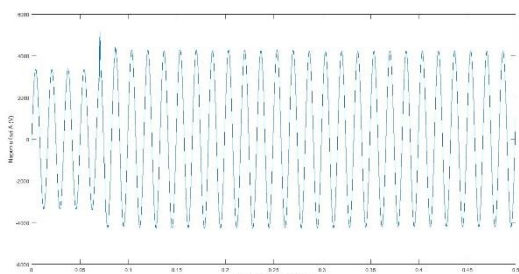
Sl. 3. Relejna zaštita u modelu IEEE 13-bus test mreže

4. REZULTATI SIMULACIJA

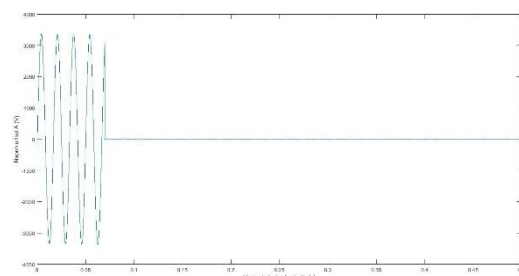
Početno stanje je mreža bez kvara, odnosno napon je sinusoidalnog oblika i bez izobličenja u skladu sa standardima kvaliteta električne energije [15]. U sklopu istraživanja, razmatrana su četiri slučaja, kada sistem radi bez relejne zaštite, rad podnaponskog releja, rad prenaponskog i rad prekostrujnog releja.

4.1. Simulacija 1: Rad bez relejne zaštite

Prvo je razmatran slučaj kada nije uključena (modelovana) relejna zaštita, što prikazuje kako će se kvarovi odraziti na napon u mreži. Simuliran je jednopolni kratak spoj u fazi „B“, a zatim trolpolni u sve tri faze lociran u blizini mesta priključenja FN elektrane. Na slikama 4 i 5 prikazan je odziv napona u fazi „A“ pre i tokom kvara. Kod jednopolnog kratkog spoja, došlo je do porasta napona u „zdravoj“ fazi „A“. Trolpolnim kratkim spojem pogođene su sve tri faze u mreži. Odziv napona u preostale dve faze je isti kao u posmatranoj fazi „A“.



Sl. 4. Napon faze „A“ nakon jednopolnog k.s. bez delovanja relejne zaštite



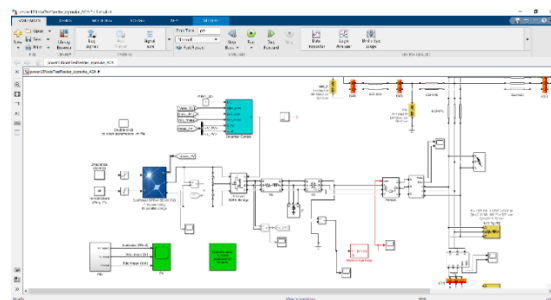
Sl. 5. Napon faze „A“ nakon trolpolnog k.s. bez delovanja relejne zaštite

4.2. Simulacija 2: Rad podnaponskog releja

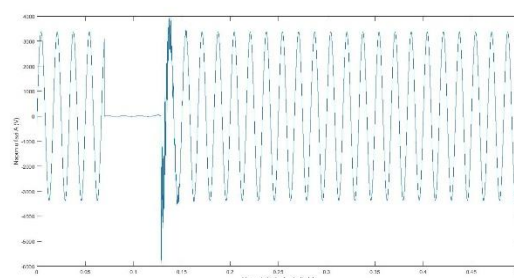
U drugom slučaju, simuliran je trolpolni kratak spoj i otvaranje prekidača korišćenjem podnaponskog releja. Kratak spoj je simuliran u blizini mesta priključenja FN elektrane. Releji je podešen da reaguje ukoliko napon padne više od 10% nominalne vrednosti. Na slici 6 prikazan je model releja i njegovo podešavanje, kao i lokacija kratkog spoja.

Odziv napona na mestu priključenja FN elektrane pre i tokom kvara, te nakon reagovanja podnaponskog releja prikazan je na slici 7. Nakon pojave trolpolnog kratkog spoja, dolazi do propada napona i reagovanja releja posle oko 130 ms. Po njegovom delovanju vidi se da je napon u mreži ponovo sinusnog oblika nominalne vrednosti. Dakle, prekidač se otvorio i mreža, koja je u kvaru, više ne utiče na kvalitet napona na izlazu FN elektrane.

Takođe, može se primetiti da se tokom kvara javlja i značajno izobličenje napona, koje se manifestuje pojavom kratkotrajne visoke harmonijske distorzije napona [9].



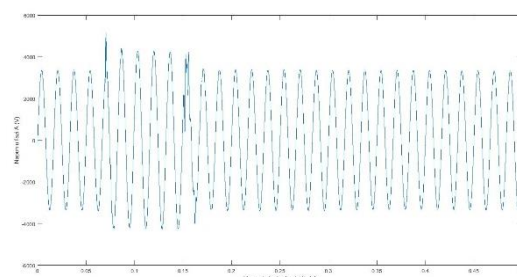
Sl. 6. Model trolpolnog kratkog spoja sa zemljom na priključku FN elektrane i podnaponskog releja u mreži



Sl. 7. Odziv napona na mestu priključenja FN elektrane pre i tokom kvara, te nakon reagovanja podnaponskog releja

4.3. Simulacija 3: Rad prenaponskog releja

U trećoj simulaciji, simuliran je jednopolni kratak spoj na mestu priključenja FN elektrane u mrežu i kako prenaponski relej daje nalog prekidaču. Slično kao u podpoglavlju 4.1, simuliran je jednopolni kratak spoj faze „B“ sa zemljom, a posmatran odziv u fazi „A“. Kao što je očekivano, opterećenje u preostale dve faze je poraslo, pa time i napon u fazi „A“, što je i pokazano na slici 8. Nakon prorade prenaponskog releja, napon se vraća na nominalnu vrednost.

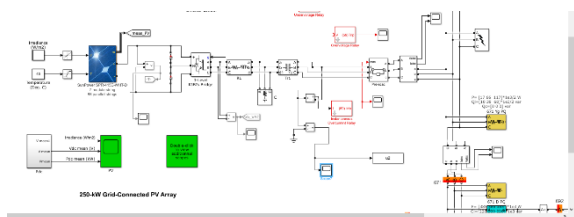


Sl. 8. Odziv napona na mestu priključenja FN elektrane pre i tokom kvara, te nakon reagovanja prenaponskog releja

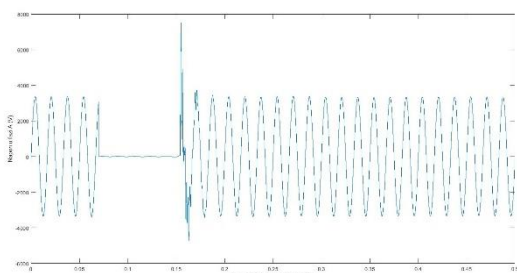
4.4. Simulacija 4: Rad prekostrujnog releja

U poslednjoj simulaciji, posmatran je prekostrujni relej i njegova uloga u zaštiti mreže. Modelovanjem relejne zaštite, koja kao mernu veličinu koristi struju, moguće je pokazati rad releja simuliranjem bilo kog kratkog spoja. Na slici 9 prikazan je model mreže sa prekostrujnim releom i mestom kvara. Ovde je odabran trolpolni kratak spoj sa zemljom, a odziv napona u fazi „A“ dat je na slici 10. Vidi se da je nakon delovanja prekostrujne zaštite sistem stabilan i spreman da se ponovo priključi na mrežu po otklanjanju kvara. Može se uočiti i dobro postavljanje relejne zaštite, odnosno dobra selektivnost (sposobnost relejne zaštite da izoluje samo element koji je pogođen

kvarom), kojom je prilikom kvara automatski isključen samo onaj deo sistema koji je u kvaru, dok je preostali deo, tj. solarna FN elektrana, ostala u pogonu.



Sl. 9. Model trofaznog kratkog spoja sa zemljom na priključku FN elektrane i prekostrujnog releja u mreži



Sl. 10. Odziv napona na mestu priključenja FN elektrane pre i tokom kvara, te nakon reagovanja prekostrujnog releja

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisan je rad relejne zaštite u distributivnoj mreži sa obnovljivim izvorima, korišćenjem IEEE 13-bus test mreže. Mreža je modifikovana priključenjem FN elektrane i odgovarajuće relejne zaštite, a modelovana je u programskom okruženju Matlab/Simulink. Simulirani su različiti kvarovi i potvrđen rad modelovane relejne zaštite u slučaju pojave podnapona, prenapona i prevelikih struja.

6. LITERATURA

- [1] L. Freris and D. Infield, "Renewable Energy in Power Systems", Wiley, Chichester (U.K.), 2008.
- [2] V. Mijailović, „Distribuirani izvori energije – principi rada i eksploatacioni aspekti“, Akademska misao, Beograd, 2011.
- [3] H.L.R. van der Walt, R.C. Bansal, and R. Naidoo, „PV based distributed generation powersystem protection: A review“, *Renewable Energy Focus*, Vol. 24, Mar. 2018, pp.33-40.
- [4] D. Bekut, „Relejna zaštita“, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1996.
- [5] M. Andreev, A. Suvorov, A. Askarov, A. Kievets, and V. Rudnik, „Impact of renewables on relay protection operation“, *Przeglad Elektrotechniczny*, Vol. 95, No. 12, 2019, pp.42-47.
- [6] A.M. Stanisavljević, V.A. Katić, B.P. Dumnić, and B.P. Popadić, „A Brief Overview of the Distribution Test Grids with a Distributed Generation Inclusion Case Study“, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 15, No. 1, Feb. 2018, pp.115-129.
- [7] J. Toholj, V.A. Katić i A.M. Stanisavljević, „Modelovanje i analiza uticaja propada napona primjenom test mreža sa distribuiranim

generatorima“, *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, God.36, Br. 1, 2021, pp.123-126.

- [8] N. Lučić, V.A. Katić i A.M. Stanisavljević, „Simulacija propada napona u distributivnoj mreži sa obnovljivim izvorima energije“, *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, God. 37, Br.2, 2022, pp.262-265.
- [9] V.A. Katic and A.M. Stanisavljevic, “Smart Detection of Voltage Dips Using Voltage Harmonics Footprint”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.54, No.5, Sep./Oct. 2018, pp.5331-5342.
- [10] V. Vidačić i V.A. Katić, ”Uticaj obnovljivih izvora energije na propade napona u distributivnim mrežama“, *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, God. 36, Br.7, 2021, pp.1287-1290.
- [11] D. Stojišić, V.A. Katić i A.M. Stanisavljević, „Modelovanje i analiza kvaliteta napona u realnoj i test mreži“, *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, God. 37, Br.11, 2022, pp.1934-1937.
- [12] P. Perge, V.A. Katić, i A.M. Stanisavljević, „Ispitivanje uticaja obnovljivih izvora primenom test mreže“, *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, God. 36, Br.3, 2021, pp.480-483.
- [13] I. Vasić, V.A. Katić, i A.M. Stanisavljević, „Primena neuralnih mreža za detekciju propada napona na primeru rada test mreža“, *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, God. 36, Br.3, 2021, pp.436-439.
- [14] <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/ieee-13-node-test-feeder.html>
- [15] V. Katić, „Kvalitet električne energije - viši harmonici“, Monografija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2002.

Kratka biografija:



Dušan Đuketić rođen je 1997. godine u Novom Sadu. Srednju školu – Gimnaziju Svetozar Marković završio je u Subotici 2016. godine. Fakultet tehničkih nauka upisao je školske 2016/2017. godine. Na studijama se opredelio za smer Elektroenergetika – Elektroenergetski sistemi gde je i diplomirao 2021. godine Master studije upisao je 2021/2022 školske godine.



Aleksandar M. Stanisavljević rođen je u Beogradu 1988. god. Diplomirao je i odbranio master rad na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, 2011. i 2012. god., respektivno. Od 2012. god. je na Fakultetu tehničkih nauka kao istraživač pripravnik. Na istom fakultetu, odbranio je doktorsku disertaciju 2019. god. gde je zatim izabran je u nastavno zvanje docenta.



Vladimir A. Katić rođen je 1954. god. u Novom Sadu. Doktorirao je na Univerzitetu u Beogradu 1991. god. Od 2002. god. je redovni profesor Univerziteta u Novom Sadu. Oblasti interesovanja su mu energetska elektronika, kvalitet električne energije, obnovljivi izvori električne energije i električna vozila.