

IEEE TEST MREŽE I SAVREMENE METODE REAL-TIME SIMULACIJE**IEEE TEST GRID AND METHODS OF REAL-TIME SIMULATION**Dejan Vračarić, Aleksandar Stanisavljević, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U radu su razmatrani multi-time analize elektroenergetskih sistema, osvrćući se na dugoročno planiranje, kratkoročno (operativno) planiranje, operativno stanje i kontrolu, kao i na klasifikaciju elektroenergetskih sistema. Zatim savremene test mreže, njihove mane i prednosti. Naredni segment savremene metode real-time simulacije. Poslednji deo čini detaljan opis IEEE 34-bus test mreže, kao i izrada simulacionog modela u programskom okruženju Matlab (Simulink) navedene test mreže. Ovaj deo čini i na testiranje simulacionog modela i potvrda da verno reprezentuje stvarnu mrežu.

Ključne reči: Real time simulacije, IEEE test mreže, IEEE 34-bus, Modelovanje i proračun

Abstract – The paper discusses multi-time analyzes of power systems, focusing on long-term planning, short-term (operational) planning, operational status and control, as well as the classification of power systems. Then modern test networks, their disadvantages and advantages. The next segment of the modern method of real-time simulation. The last part is a detailed description of the IEEE 34 test network, as well as the creation of a simulation model in the Matlab (Simulink) programming environment of the said test network. This part also involves testing the simulation model and confirming that it faithfully represents the real network.

Keywords: Real time simulations, IEEE test grids, IEEE 34-bus, Modeling and calculation

1. UVOD

Pouzdan dizajn, planiranje i rad elektroenergetskih sistema su od od ključne važnosti za obezbeđivanje pouzdane usluge prema kupcima. Ovaj rad razmatra različite aspekte pouzdanosti elektroenergetskog sistema, raspon od planiranja do rada. Prikazani pregled pruža prednosti i nedostatke postojećih sistema za testiranje, uključujući obnovljive resurse i savremene tehnologije. Štaviše, daju se i zahtevi za unapređenje i izmenu merila za analizu savremenih elektroenergetskih sistema.

Savremene tehnologije, posebno, obnovljivi (promenljivi) izvori energije i distribuirani izvori, kao što su fotonaponski (PV) i vetroelektrane, e-mobilnost, a u najskorije vreme i distribuirana skladišta zasnovana na jednosmernoj (DC) struji i naponu, zajedno sa konceptom pametne mreže, menjaju elektroenergetske sisteme (EES) širom

sveta. Oni postaju distribuirani u velikoj meri, kako u fizičkom, tako i u sajber sloju. U fizičkom sloju, energetska elektronika igra značajnu ulogu u konverziji energije za proces proizvodnje, prenos, distribuciju i nivoe potrošnje. Promena paradigme u načinu organizacije EES-a, od vertikalnog (odozgo prema dole) na distribuirani način, naglašava važnost komunikacionih sistema u planiranju i radu savremenih EES-a. Nasuprot tome, električne mreže su jedna od najkritičnijih infrastrukture i jedan od najsloženijih sistema, gde bilo kakva nezgoda ili ispad može da dovede do nena-doknadivih socijalno-ekonomskih posledica. Napori modernizacije i liberalizacije nastoje da poboljšaju efikasnost i performanse, što je dovodi do daljeg usložnjavanja ovog sistema, ali i ranjivosti na pitanjama pouzdanosti, bezbednosti i sajber bezbednosti.

U radu će biti pregledani sistemi za testiranje za ocenu pouzdanosti, koji su predstavljeni u više od 240 radova koji su objavljeni u naučnim časopisima. Taj pregled je fokusiran pre svega na glavne koncepte pouzdanosti, odnosno adekvatnosti i bezbednosti. Međutim, na pouzdanost elektroenergetskog sistema može uticati širok opseg pojava, koje mogu ugroziti njegovu pouzdanost i prebaciti ga u nesigurno područje.

2. MULTI-TIME ANALIZA ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA

Planiranje i rad elektroenergetskog sistema su procesi idealnog, ekonomičnog dizajna, proširenja, praćenja, upravljanja, zaštite i kontrole električne mreže koje snabdevaju krajnje korisnike sa željenim nivoom pouzdanosti. Zahtevaju različite studije u različitim vremenskim skalama u rasponu od mikrosekundi do nekoliko godina. Analaza elektroenergetskih sistema se generalno može proučavati u tri glavna vremenska okvira, uključujući dugoročno planiranje objekata (tzv. planiranje proširenja), kratkoročno operativno planiranje i rad u realnom vremenu.

2.1. Dugoročno planiranje

Planiranje objekata uzima u obzir opterećenje i tehnološki rast za proširenje i izgradnju novih objekata u narednih 5 do 30 godina. Glavni cilj dugoročnog planiranja je da se obezbedi ekonomično proširenje elektroenergetskih sistema za obezbeđivanje adekvatne i bezbedne isporuke energije [1].

2.2. Kratkoročno planiranje (Operativno planiranje)

Operativno planiranje podrazumeva marketing i održavanje u vremenskom okviru od nekoliko minuta do jedne godine. Upravljanje održavanjem objekata kako bi se osigurala pouzdana isporuka električne energije je od najveće važnosti za planiranje elektroenergetskog sistema. Teoretski, održavanje može biti preventivno ili korek-

NAPOMENA:

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

tivno. Preventivno održavanje se vrši periodično kako bi se smanjila verovatnoća kvara, a korektivno održavanje se sprovodi nakon što dođe do kvara. Kao rezultat toga, upravljanje održavanjem može značajno uticati na dostupnost sistema i operativne troškove [1].

2.3. Operativno stanje i kontrola

Tokom faze operativnog planiranja, ISO je zadužen za održavanje, marketing, kontrolu i optimalno planiranje proizvodnih jedinica. Sledeća faza je rad u realnom vremenu, kada je predviđeno da generatori proizvedu svoju unapred definisanu izlaznu snagu i primarni rezervni provajderi obračunavaju im bilanse. Sekundarne i tercijalne rezerve dobavljači onda kompenzuju ove neravnoteže izazvane neizvesnošću prognoza opterećenja, prognoze obnovljive proizvodnje i nenamerni prekidi (ovi termini su povezani sa adekvatnošću sistema). U među-vremenu, tokom rada u realnom vremenu, operateri sistema su zabrinuti za sigurnost sistema; naročito, moraju znati koliko je sistem siguran u svom sadašnjem stanju i koliko je bezbedan u narednih nekoliko minuta. Dakle, bezbednost sistema postaje najvažnija u okviru pogona sistema.

3. SAVREMENE METODE SIMULACIJE U REALNOM VREMENU

Digitalna simulacija u realnom vremenu (eng. DRTS) električnih elektroenergetskih sistema je reprodukcija izlaza talasnih oblika (napona/struje) sa željenom tačnošću, koji su reprezentativni sa stvarnim ponašanjem u sistemu koji se modeluje. Da bi se postigao takav cilj, digitalni simulator u realnom vremenu treba da reši jednačine modela za jedan vremenski korak unutar istog vremena, kao i u realnom sistemu. Stoga daje izlaze u diskretnim vremenskim intervalima, gde se stanja sistema računaju u određenim diskretnim vremenima koristeći fiksni vremenski korak.

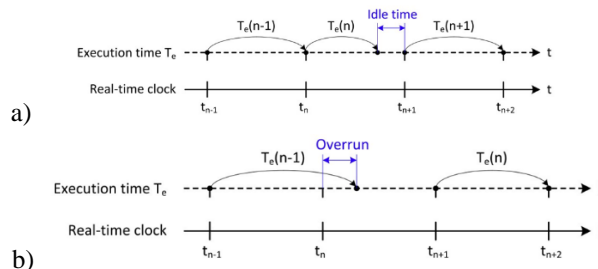
DRTS je tehnika za prolaznu simulaciju elektroenergetskih sistema koji koriste digitalno-računarski vremenski domen rešenja. Sistemi su predstavljeni korišćenjem komponenti koje su dostupne u biblioteci softverskih alata, koji koristi grafički interfejs i simulira na hardverskoj platformi koja koristi paralelno računanje.

U zavisnosti od potrebnog vremena mogu se pojaviti dve situacije pomoću platforme za simulaciju da se izvrši izračunavanje stanja izlaza za svaki vremenski korak (slika 1.a), ako izvršenje vremena T_e za simulaciju sistema je kraće ili jednako sa vremenom izabranog vremenskog koraka, smatra se da je simulacija u realnom vremenu (slika 1.b). Ako je vreme T_e veće od svoje veličine vremenskog koraka za jedan ili više vremenskih koraka, dolazi do prekoračenja i simulacija se smatra da nije u realnom. U poslednjem slučaju, može se povećati vremenski korak ili se model sistema može pojednostaviti za pokretanje u realnom vremenu [2].

3.1. Kategorije digitalne simulacije u realnom vremenu

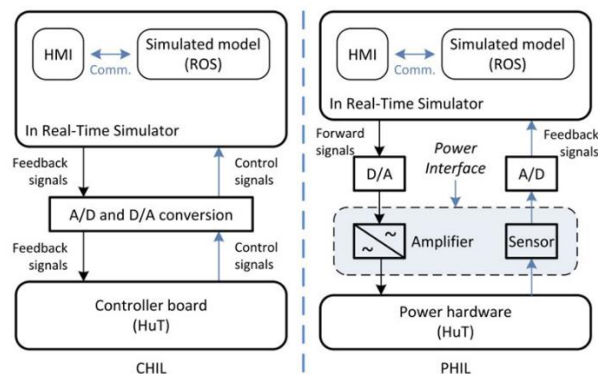
DRTS primenjen u domenu elektroenergetskih sistema može se klasifikovati u dve kategorije: 1) potpuno digitalna simulacija u realnom vremenu (npr. model-u-petlji, softver-u-petlji ili procesor u-petlji) i 2) hardver-u-petlji (HIL) simulacija u realnom vremenu. Za prvi tip potrebna je potpuno digitalna simulacija u realnom

vremenu celog sistema (uključujući kontrolu, zaštitu i ostale delove) da se modeluju unutar simulatora i da se ne uključuje spoljno povezivanje ili ulazi/izlazi (I/O). S druge strane, HIL simulacija se odnosi na stanje gde delovi potpuno digitalnih simulacija u realnom vremenu bivaju zamenjeni stvarnim fizičkim komponentama.



Sl.1. (a) Simulacija u realnom vremenu, (b) Simulacija koja nije u realnom vremenu [2]

Ako HIL sistem uključuje pravi hardver kontrolera koji deluje sa ostatkom simuliranog sistema, tzv. hardver u petlji kontrolera (CHIL). Takođe se koristi za brzu izradu prototipa kontrolera. U ovoj metodi nema stvarnog prenosa snage i elektroenergetski sistem je modelovan kao virtuelni sistem unutar simulatora i spoljni kontroler hardver razmenjuje I/O kontrolera sa sistemom unutar simulatora. Generalno, novo dizajniran/razvijen kontroler se testira pomoću ove metode, gde kontroler uzima povratne signale sa simulatora i obrađuje ih da bi proizveo potrebne izlazne signale, koji se zatim šalju nazad u sistem (unutar simulatora). Takva postavka kontrolera prototipa ili CHIL je prikazan na slici 2., gde je energetski elektronski pretvarač modelovan unutar simulatora, a realni kontroler je povezan sa njim preko I/O [2].



Sl.2. Osnovni HIL koncept simulacije za CHIL i PHIL [2]

Bilo koja HIL simulacija koja uključuje prenos snage na ili sa HuT-a je poznata kao hardver za napajanje u petlji (PHIL) (slika 2.). U ovom slučaju, deo elektroenergetskog sistema je interno simuliran, a drugi deo je realno hardverski spojen spolja. Izvor napajanja ili potrošač (povezan preko PHIL interfejsa) je potreban za ovo podešavanje, koje će ili proizvoditi ili apsorbovati snagu. Referentni signali se generišu na osnovu rešenja virtuelnog sistema unutar simulatora u realnom vremenu i šalju se na pojačavač snage koji proizvodi potrebne napone ili struje za primenu na HuT-u. Povratni signali dobijeni merenjem napona/struje sa HuT-a su na odgovarajući način skalirani i vraćeni u simulator da bi se završila simulaciona petlja.

Primer takve simulacije u realnom vremenu može biti ispitivanje mašina, pretvarača, ograničavača struje kvara, odnosno bilo koja druga električna oprema. Ispitivanje zaštitnih uređaja, kao što su releji, mogu zahtevati pojačavače napona ili struje za HIL testiranje, međutim u tome se ne razmenjuje nikakva snaga [2].

4. STANDARDNI TEST SISTEMI

Dva glavna test sistema obuhvaćena u ovom radu su standardi IEEE i CIGRE [1,3]. Najbitnije karakteristike standardnih sistema za ispitivanje su predstavljene u tabeli 1, a odgovarajuće jednopolne šeme su prikazane u radu. Sve IEEE test mreže su pogodne za konvencionalne sisteme napajanja naizmeničnom strujom. U međuvremenu, CIGRE test mreže koje su deo mreža evropskih zemalja, uključujući sisteme napajanja naizmeničnom i/ili jedno-smernom strujom [1, 3].

Tabela 1. Standardne test mreže [1,3]

Test sistem	Napon [kV]	Broj sabirnica	Namena
IEEE 9	13,8; 16,5; 18 i 230	9	Stabilnost
IEEE 14	13,8; 18 i 69	14	Procena stanja
IEEE 30	33; 132	30	Planiranje
IEEE 57	345	39	Stabilnost
IEEE 118	138; 345	57	Procena stanja
IEEE 300	138; 230 i 345	118	Planiranje
CIGRE B4 DC	±400; ± 200; 380 i 450	300	Nove tehnologije

4.1. Izazovi savremenih test mreža i zahtevi koji se postavljaju

IEEE test mreže se široko koriste za različite studije pojava u elektroenergetskom sistemu [5-8]. Mogu se modifikovati da uključe u razmatranje i promenljive energetske resurse i nove tehnologije, odnosno prenosne i distributivne energetske sisteme, mada te promene nisu usvojene iz realnih sistema napajanja.

Međutim, podaci koji se koriste za moderne postojeće konvencionalne mreže, mogu neki put izazvati pogrešne procene. Pored toga, uprkos naporima koji su posvećeni ažuriranju postojeće test mreže (na pr. IEEE PTC-96) i koji omogućavaju da se ova mreža koristi za savremene sistemske studije, potrebno je više nadogradnje u budućim verzijama. Razlog za to je činjenica da ne obuhvataju detaljne informacije o vetroturbinama, vetroparkovima, solarnim elektranama i skladištima energije.

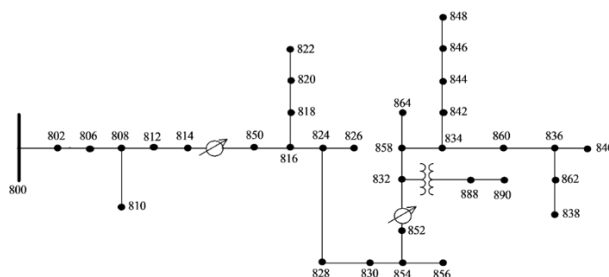
Ovakav koncept, više je primenljiv na studije planiranja, npr. upravljanje energijom i procene adekvatnosti. U međuvremenu, u predstavljenom ažuriranju PTC GLMC, podaci o pouzdanosti za promenljive izvore napajanja nisu obezbeđeni energetske resursima, posebno za tehnologiju baziranu na energetskej elektronici. Ove tehnologije su jedne od čestih neuspeha izvora u vetroelektranama. Nasuprot tome, struktura vetroparka može uticati na njegovu pouzdanost, dakle detaljnije tehničke informacije u vezi sa vetrom i solarne elektrane trebaju biti obezbeđene u budućim ažuriranjima.

Štaviše, IEEE sistemi za testiranje koji su namenjeni za analize stabilnosti nisu prikladni za pitanja stabilnosti u vezi sa kontrolom, kao što je harmonijska stabilnost. Čak i test mreža IEEE 39, koja je namenjena posebno za analizu stabilnosti, zahteva odgovarajuće modifikacije da bi se olakšalo uključivanje novih tehnologija.

Test mreže CIGRE su više pogodne za savremene studije elektroenergetskog sistema, koji obuhvataju nove tehnologije. CIGRE B4DC se može koristiti za analizu stabilnosti, zaštite, protoka energije, planiranje, kontrolu kvaliteta električne energije, koje odgovoraju u DC mrežama sa više terminala. Međutim, nije primenljivo za analize orijentisane na pouzdanost, tj. procene adekvatnosti zbog nedostatka podataka o pouzdanosti. Štaviše, farme vetroparkova nisu bile obuhvaćene ovom test mrežom. CIGRE LV/MV mreže su pogodne za proučavanje mikromreža naizmenične struje, npr. kontrolu i planiranje, međutim zahtevaju neke modifikacije za analizu pouzdanosti i sajber bezbednosti [1].

4.2. IEEE 34-bus

IEEE 34-bus test mreža je mreža koja se nalazi u Arizoni, sa nominalnim naponom od 24,9 kV. Odlikuje se dugim i lagano opterećenim nadzemnim dalekovodima, dva linijska regulaciona transformatora, jedan linijski transformator za kratku deonicu naponskog nivoa 4,16 kV, 24 nebalansirana opterećenja i dva šant kondenzatora. Na slici 3 data je topologija same mreže, sa svim svojim deonicama, opterećenjima i sabirnicima, kao i transformatorima.

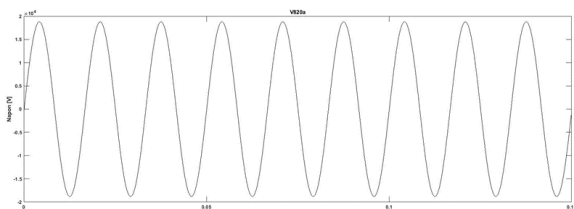


Sl. 3. Šematski prikaz IEEE 34 test mreže [3,4]

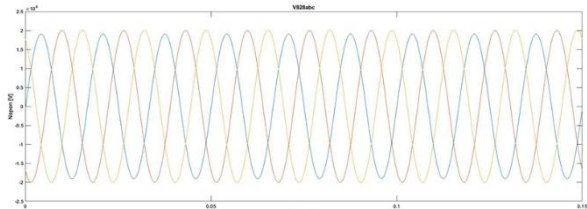
Iz dokumentacije koja je dostupna, bilo je potrebno iščitati podatke za datu mrežu i za sve njene segmente. Kao što su podaci nadzemnih vodova, dužina trase, konfiguracija, zatim sve podatke vezane za potrošače koji su priključeni u određene čvorove bilo da su distribuirani ili tačkasto orijentisani. Potrebno je i prilagoditi navedene podatke programskom okruženju Matlab – Simulink, kao što su merne jedinice i odgovarajuće fizičke veličine. Iz razloga što je model većih dimenzija neće biti prikazan ovom članku, dok se model može pogledati u master radu.

4.3. Rezultati simulacije

U cilju testiranja modela izvršeno je niz simulacija. Mereni su fazni naponi (između faze i zemlje), međufazni naponi, kao i viši harmonici (2, 5, 7) u pojedinim čvorovima. Za potrebe simulacije izvršena je modifikacija modela, dodati su blokovi za merenje. Neki rezultati prikazani su na slikama 4 i 5. Vidi se da model dobro funkcioniše i da su dobijeni očekivani rezultati.

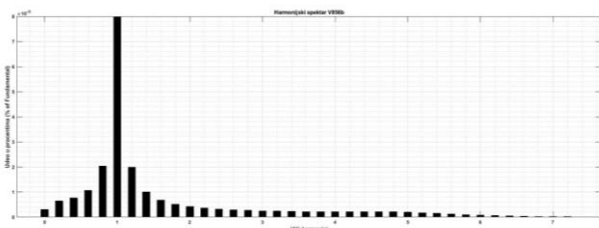


Sl. 4. Fazni napon u fazi A čvora 820



Sl. 5. Međufazni napon u čvoru 828

U nastavku, razmatran je uticaj viših harmonika na mrežu. Ukoliko je napon izobličen u odnosu na idealni sinusni talasni oblik, kaže se da je „zagađen“ višim harmonicima. Takav talasni oblik može se predstaviti kao zbir osnovnog harmonika (u ovom slučaju to je na 60 Hz) i viših harmonika koji su umnožak osnovnog (2, 5, 7...). Na osnovu simulacionih rezultata, datih na slici 6 može se zaključiti da je dominantan osnovni harmonik na 60 Hz i da mreža nije zaprljana višim harmonicima.



Sl. 6. Harmonijski spektar u fazi B čvora 856

5. ZAKLJUČAK

Ovaj rad je u prvom delu pregledao standardne test sisteme, uključujući IEEE i CIGRE test mreže, kao i njihovu primenljivost na proučavanje elektroenergetskog sistema. Krajnji cilj studija elektroenergetskog sistema je da efikasno snabdeva krajnje korisnike sa prihvatljivim nivoom pouzdanosti. Postizanje takvog cilja za velike, složene sisteme zahteva dugoročna istraživanja, projektovanja i planiranja, kratkoročne studije za operativno planiranje, kao i rad u realnom vremenu.

Iako je izvestan broj simulatora u realnom vremenu, samo nekoliko njih je u stanju da simulira velike sisteme. Preostali su ili pogodni za male sisteme ili da služe kao kontrolor u realnom vremenu. Stoga karakteristike tri glavna simulatora u realnom vremenu su detaljno razmotreni, dok su neki od ostalih simulatora samo spomenuti. Većina simulatora u realnom vremenu je sposobna sa interfejsom eksternog hardvera za izvođenje HIL testova i eksperimenata.

Iako su dizajnirani za aplikacije elektroenergetskih sistema, mnogi ovih simulatora u realnom vremenu su pogodni za izvođenje simulacija korišćenjem multirate/multiphysics simulacije. Stalna korisnička podrška, omogućava ovim simulatorima da se mogu koristiti da udovolje svim posebnim potrebama potrošača.

Poslednji segment rada je detaljan opis test mreže IEEE 34, kao i izrada simulacionog modela i prikaz rezultata simulacije, čime potvrđujemo verodostojnost razvijenog modela.

6. LITERATURA

- [1] S. Peyghami, P. Davari, M. Fotuhi-Firuzabad, and F. Blaabjerg, „Standard Test Systems for Modern Power System Analysis”, IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol.13, No.4, Dec. 2019, pp.86-105.
- [2] T. Strasser, „Real-Time Simulation Technologies for Power Systems Design, Testing, and Analysis”, IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, Vol.2, No.2, June 2015, pp.63-73.
- [3] A.M. Stanisavljević, V.A. Katić, B.P. Dumnić, 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.
- [4] IEEE PES, „IEEE 34 Node Test Feeder”, 2004
- [5] D. Stojišić, V.A. Katić, A.M. Stanisavljević, „Modelovanje i analiza kvaliteta napona u realnoj i test mreži”, Zbornik radova FTN, Vol. 37, No.11, 2022, pp.1934-1937.
- [6] N. Lučić, V.A. Katić, A.M. Stanisavljević, „Simulacija propada napona u distributivnoj test mreži sa obnovljivim izvorom energije”, Zbornik radova FTN, Vol. 37, No.2, 2022, pp.262-265.
- [7] V. Vidačić, V.A. Katić, „Uticaj obnovljivih izvora energije na propade napona u distributivnim mrežama”, Zbornik radova FTN, Vol. 36, No.7, 2021, pp.1287-1290.
- [8] J. Toholj, V.A. Katić, A.M. Stanisavljević, „Modelovanje i analiza uticaja propada napona primjenom test mreža sa distribuiranim generatorima”, Zbornik radova FTN, Vol.36, No.1, 2021, pp.123-126.

Kratka biografija:



Dejan Vračarić rođen je u Vrbasu 1997. god. Srednju školu ETS Mihajlo Pupin, završio je u Novom Sadu, 2016 god. Fakultet tehničkih nauka, studijski program Energetika, elektronika i telekomunikacije upisao je školske 2016/2017. Na studijama se opredelio za smer Elektroenergetika - energetska elek-tronika i mašine i diplomirao 22.09. 2021. god. Master studije upisuje školske 2021/2022. na smeru Elektroener-getika - energetska elektronika i mašine i odbranio master rad 2023.



Aleksandar Stanisavljević rođen je 1988. godine u Beogradu. Doktorirao je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 2019. god. Kao asistent na Katedri za energetska elektroniku i pretvarače radi od 2016. god., a kao docent od 2019. god. Učestvovao je na brojnim međunarodnim konferencijama. Autor ili koautor je više od 20 naučnih radova, od kojih su tri publikacije u vrhunskim međunarodnim časopisima.